



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

**(Η περίπτωση των ανθρακονημάτινων σκελετών
αγωνιστικών ποδηλάτων δρόμου)**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ Γ. ΚΙΤΣΕΛΗ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧ/ΓΩΝ ΜΗΧ/ΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

**(Η περίπτωση των ανθρακονημάτινων σκελετών
αγωνιστικών ποδηλάτων δρόμου)**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ Γ. ΚΙΤΣΕΛΗ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Επταμελής εξεταστική επιτροπή

- | | | |
|----|-------------------|------------------------------|
| 1. | Μανωλάκος Δ. | Καθηγητής Ε.Μ.Π. |
| 2. | Προβατίδης Χ. | Καθηγητής Ε.Μ.Π. |
| 3. | Μαρκόπουλος Α. | Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. |
| 4. | Ζουμπουλάκης Λ. | Καθηγητής Ε.Μ.Π. |
| 5. | Τσούβαλης Ν. | Καθηγητής Ε.Μ.Π. |
| 6. | Κοντού-Δρούγκα Ε. | Ομότιμη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. |
| 7. | Θεοτόκογλου Ε. | Καθηγητής Ε.Μ.Π. |

ΑΘΗΝΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2023

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εργασία μου θέλω να ευχαριστήσω όλους αυτούς που με στήριξαν αυτά τα χρόνια για να εκπληρώσω ένα όνειρο ζωής!

ΤΟ Ε.Μ.Π. που όχι μόνο με δέχτηκε στους κόλπους του, αλλά έγινε και η αιτία να έχω ως επιβλέποντα καθηγητή, ένα καταξιωμένο επιστήμονα, τον Καθηγητή μου κ. Δημήτριο Μανωλάκο, ο οποίος με την άριστη επιστημονική καθοδήγηση και την υπομονή που έδειξε, με βοήθησε να φτάσω στο τέλος του δρόμου!

Κύριε Καθηγητά, Κύριε Μανωλάκο ένα Μεγάλο Ευχαριστώ, είναι πολύ λίγο για να σας εκφράσω, όσα πέτυχα χάρη σε Σας!

Μεγάλο Ευχαριστώ και στο προσωπικό του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών που με βοήθησε στις πειραματικές δοκιμές!

Το φίλο και συνεργάτη μου Θοδωρή στην Gram Carbon για την υποστήριξη της ιδέας της διατριβής και τη δημιουργία του εργαστηρίου που την υλοποίησε!

Όλους τους φοιτητές που πέρασαν από το εργαστήριο αυτό και βοήθησαν ο καθένας με τον τρόπο του στην έρευνα και τα πειράματα που έγιναν!

Ευχαριστώ τη σύζυγό μου Ελένη που αναλαμβάνοντας πρακτικά διπλό ρόλο (και αυτόν του πατέρα), με συμπαράσταση και υπομονή με ώθησε για την ολοκλήρωση αυτής της διατριβής κατά προτεραιότητα!

Και τέλος, για την αμέριστη υποστήριξη και βοήθειά της, στα δύσκολα, σε όλα μου τα προβλήματα αυτή την επίπονη περίοδο, για αυτήν που μου χάρισε τη ζωή! Μητέρα, Ευχαριστώ!

Περίληψη

Τα Χρόνια Περνάνε, οι Εποχές Αλλάζουν! Και μαζί αλλάζουν οι προτεραιότητες και οι ανάγκες της ανθρωπότητας.

Καινούριες τεχνολογίες, νέες εφευρέσεις και έρευνες, για δημιουργίες νέων προϊόντων και υλικών, τρέχουν για να προλάβουν τις σημερινές αλλά και μελλοντικές μας ανάγκες. Ένα από αυτά τα υλικά είναι και τα ανθρακονήματα, των οποίων η χρήση και εφαρμογή θα απασχολήσει αυτή την διατριβή. Τα τελευταία χρόνια γίνεται ευρεία χρήση των ανθρακονημάτων για κατασκευή και χρήση εξαρτημάτων τα οποία δεν περιορίζονται μόνο στους παραδοσιακούς για αυτά τομείς: Αμυντικοί Εξοπλισμοί, Αεροδιαστημική Βιομηχανία, Μηχανοκίνητος Αθλητισμός. Έχει γίνει ευρεία εξάπλωση σε προϊόντα καθημερινής χρήσης, σε όλους τους τύπους οχημάτων, καθώς και των ποδηλάτων, ειδικά, των Αγωνιστικών Ποδηλάτων Δρόμου. Από την έρευνά μας έχει προκύψει ότι παρόλη την εξάπλωση των ανθρακονημάτων σκελετών, τα ποδήλατα αυτά σπάνε πολύ εύκολα αν δεχτούν φορτίο λίγο διαφορετικό από το προβλεπόμενο των προτύπων ασφαλείας.

Γιατί αφενός παρά τον προσεκτικό σχεδιασμό και την υψηλή ποιότητα κατασκευής, υπάρχουν αστοχίες, που προκύπτουν, τόσο από πτώσεις, όσο και από το γεγονός ότι οι σκελετοί που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με τη λογική του «μηχανικού αεροσκαφών» ο οποίος ακολουθεί τις οδηγίες του τμήματος marketing, είναι πολύ άκαμπτοι και εν γένει ψαθυροί. Αφετέρου η οδική συμπεριφορά σε απρόβλεπτες καταστάσεις, πχ λακκούβες, κίνηση, καιρικές συνθήκες, χειροτερεύει το πρόβλημα των αστοχιών.

Σε ότι αφορά την τιμή τους, έχουν πολύ υψηλό κόστος γιατί χρησιμοποιούν μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής από την Αεροπορική κυρίως βιομηχανία, όπου απαιτούνται εξειδικευμένοι μηχανικοί και πανάκριβα λογισμικά. Επίσης στο κατασκευαστικό κομμάτι, χρησιμοποιείται ακριβός εξοπλισμός (autoclave ή πρέσες με θερμαινόμενες πλάκες καθώς και ειδικά καλούπια που απαιτούνται για την παραγωγή).

Οι αστοχίες αυτές αυξάνουν το τίμημα για τους χρήστες τους, αφού η αντικατάστασή τους είναι και κοστοβόρα και χρονοβόρα, δεδομένου ότι η συνεχής εξέλιξη και το marketing καθιστούν δύσκολη την εξεύρεση ανταλλακτικών.

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής προτείνεται και αναπτύσσεται μια νέα μέθοδος σχεδιασμού και κατασκευής για τους σκελετούς ποδηλάτων δρόμου με σκοπό τη μείωση του κόστους και του αριθμού των σπασμένων σκελετών.

Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος σχεδιασμού και ανάλυσης η οποία αναπτύχθηκε είναι η ακόλουθη: Αφού σκεφτούμε την κατασκευή που θέλουμε να κάνουμε, σχεδιάζουμε και μελετάμε ανεξάρτητα τμήματά της σε στρεπτική και καμπτική δυσκαμψία καθώς και σε αεροδυναμική συμπεριφορά αν απαιτείται και μετά τα συνθέτουμε και κάνουμε ελάχιστες έως και καθόλου δοκιμές στο σύνολο. Ακολουθεί η μελέτη της διαστρωμάτωσης σε ένα τελικό

σχέδιο όπου ρυθμίζουμε την αντοχή και τη συμπεριφορά της κατασκευής μας μέσω αυτής. Με αυτόν τον τρόπο γλυτώνουμε την κοστοβόρα διαδικασία σχεδιασμού ολόκληρων μοντέλων και τις χρονοβόρες αλλαγές των ενώσεων τους που θα απαιτούνταν στην περίπτωση που σχεδιάζαμε και μελετούσαμε σε κάθε σενάριο ολόκληρο μοντέλο. Επιπλέον αυτή η μέθοδος μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε και βάση δεδομένων για μελλοντική χρήση και εύκολη εξέλιξη νέων υποπαραλλαγών της κατασκευής.

Στο σκελετό του ποδηλάτου στην περίπτωση μας μελετήσαμε διάφορα πιθανά σχήματα σε κάθε σωλήνα τόσο σε αεροδυναμική όσο και σε δυσκαμψία και επιλέξαμε για κάθε σωλήνα ένα σχήμα. Μετά τα ενώσαμε και δημιουργήσαμε το τελικό μοντέλο το οποίο και μελετήσαμε ως συνολικό μοντέλο για διαστρωμάτωση. Η διαδικασία αυτή όχι μόνο μας κέρδισε πολύ χρόνο στο κομμάτι του σχεδιασμού αλλά μας έδωσε και τη δυνατότητα, να κάνουμε πολύ εύκολα υποπαραλλαγές πχ διαφορετικά μεγέθη. Στα πλεονεκτήματα περιλαμβάνεται η εύκολη δημιουργία νέων μοντέλων με διαφορετικά χαρακτηριστικά αφού έχουμε μια βάση δεδομένων έτοιμη με ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες αεροδυναμικής και δυσκαμψίας.

Στο κατασκευαστικό κομμάτι, η μέθοδος κατασκευής η οποία αναπτύχθηκε είναι η ακόλουθη: Κάνουμε τη διαστρωμάτωση που έχουμε πάρει από τη μελέτη μας για το όποιο εξάρτημα θέλουμε να κατασκευάσουμε, επιλέγοντας εξ αρχής τον τύπο overlap που θα ακολουθήσουμε. Μετά για το ψήσιμο, αντί για autoclave με υψηλή πίεση και θερμοκρασία χρησιμοποιούμε απλό κλίβανο ή θερμαινόμενες κουβέρτες, και δημιουργούμε υποπίεση με μια αντλία κενού από την ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια του ψησίματος και όσο η μήτρα η οποία έχει χρησιμοποιηθεί βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση εφαρμόζουμε δονήσεις πχ με έναν πνευματικό δονητή στο καλούπι κοντά στο σημείο συντονισμού του. Κάνουμε αργό κύκλο ψησίματος επιλέγοντας τη χαμηλότερη θερμοκρασία που μας επιτρέπει η μήτρα ώστε να αυξηθεί ο χρόνος κατά τον οποίο το ιξώδες της είναι χαμηλό. Αυτό διώχνει τις φυσαλίδες μέσα από τις στρώσεις του σύνθετου υλικού. Αν απαιτείται κάνουμε και post cure για να ανεβάσουμε το Tg ή για να αυξήσουμε την αντοχή σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι ένα εξάρτημα με πορώδες, αντίστοιχο αυτού που θα είχαμε, αν είχαμε κάνει τη διαδικασία σε autoclave. Το τελικό κομμάτι όμως είναι λιγότερο ψαθυρό και έχει σημαντικά καλύτερη αντοχή σε χτυπήματα ενώ παρουσιάζει και αντίστοιχη ή καλύτερη διάρκεια ζωής.

Στο σκελετό του ποδηλάτου στην περίπτωση μας, το αποτέλεσμα, σε σχέση με το σκελετό που κατασκευάστηκε σε autoclave ήταν, η σημαντικά αυξημένη απορροφητικότητα κραδασμών και η μη αστοχία σε αρκετές περιπτώσεις όπου ο σκελετός από το autoclave αστόχησε πχ από πέτρες που πέταξαν τα λάστιχα και από πτώσεις. Επιπλέον το γεγονός ότι δε χρειάζεται autoclave μειώνει σημαντικά το κόστος επένδυσης και χρήσης ειδικού εξοπλισμού άρα και του τελικού προϊόντος.

Αυτή η προσέγγιση μπορεί να αξιοποιηθεί από πολλούς τομείς, εκτός από την περίπτωση των σκελετών ποδηλάτων, με σκοπό τη μείωση του κόστους σχεδιασμού και παραγωγής των εξαρτημάτων από Σύνθετα Υλικά. Ενδεικτικά μερικοί από αυτούς είναι: Η Βιομηχανία Αθλητικού Εξοπλισμού πάσης φύσεως, η Αυτοκινητοβιομηχανία, η Ιατρική, η Ναυτιλία, η Αεροπορική

Βιομηχανία, η Οικοδομή, οι Εφαρμογές Biocomposites και οι Επισκευές Εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά. Αν αυτή η μέθοδος εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να κάνει τα σύνθετα υλικά πιο προσβάσιμα με αποτέλεσμα να εισαχθούν σε πολλούς τομείς της ζωής μας βελτιώνοντάς την. Θέλω να πιστεύω ότι η επιστημονική κοινότητα και η βιομηχανία θα την εξελίξουν ακόμα περισσότερο προς όφελος όλης της οικουμένης!

Abstract

Time flows like a river and the world changes! So do humanity's needs and priorities.

New technologies, new inventions and research is conducted for the creation of new products and materials, in order to satisfy our current and future needs. One of these materials is carbon fibers, whose use and applications will be part of this thesis. In recent years, carbon fibers have been widely used for the construction of components which are not limited to the standard sectors for them: Defense Equipment, Aerospace Industry and Motor Sports. They have become common in everyday use products, in all types of vehicles, as well as bicycles, especially Road Racing Bikes. From our research it has emerged that although the carbon fiber frames are widely used, they fail easily if they receive a load that is slightly different from what is prescribed by the safety standards.

Despite the careful design and high quality of their construction, there are failures, resulting both from falls and from the fact that the frames designed and built with the rules of the "Aircraft Engineer" who follows the directions of the Marketing Department, they are very rigid and generally fragile. On the other hand, driving in unpredictable situations, for example potholes, traffic and bad weather conditions, worsens the problem of failures.

Regarding their price, they have a very high cost because they use design and manufacturing methods from the Aviation industry, where specialized engineers and expensive software are required. Also in the Manufacturing part, very expensive equipment is used (autoclaves or presses with heated plates as well as special molds are required for production).

These failures increase the cost of ownership for their users, since their replacement is both costly and time-consuming because constant development and marketing make it difficult to find spare parts.

In this thesis, a new design and manufacturing method for road bicycle frames is proposed and developed in order to reduce the cost and the number of broken frames.

Specifically, the design and analysis method that was developed is the following: After thinking about the structure we want to make, we design and study its parts independently in torsional and bending stiffness as well as in aerodynamic behavior if required and then we combine them and conduct the least possible tests to them. The study of the laminate is taking place in the final design stage where we regulate the strength and behavior of our construction through it. In this way we save the costly process of redesigning entire models and the time-consuming changes of their sub cases that would be required if we designed and studied in each scenario an entire model. In addition, this method allows us to create a database for future use and easy development of new sub-variants of the construction.

In the bike frame in our case, we studied various possible shapes in each tube in both aerodynamic behavior and stiffness and chose a shape for each tube. Then we combined them and created the final model which we studied as an overall model for the final verification. This process not only saved us a lot of time in the design part, but also gave us the possibility to make very easy sub-variations, such as different sizes. The advantages include the easy creation of new models with different characteristics since we have a database ready with qualitative and quantitative aerodynamic and stiffness information.

Regarding the manufacturing method that was developed, the process is the following: We create the lay-up that we have obtained from our study for any component that we want to manufacture, choosing from the beginning the type of overlap that we will follow. Then for curing, instead of an autoclave with high pressure and temperature, we use a simple oven or heated blankets, and we create negative pressure with a vacuum pump from the atmosphere. During the cure and while the matrix that has been used is in a liquid state, we apply vibrations, for example with a pneumatic vibrator, to the mold near its resonance point. We use a long curing cycle by choosing the lowest temperature that the matrix allows us to increase the time during which its viscosity is low. This drives the bubbles through the layers of the composite. If required, we also do a post cure to raise the Tg or to increase the resistance to environmental conditions. The result is a part with porosity, similar to what we would have if we had done the process in an autoclave. The final piece, however, is less brittle and has significantly better resistance to impacts, while also having an equivalent or better lifespan.

In the bicycle frame in our case, the result, in relation to the frame made in an autoclave, was the significantly increased shock absorption and the non-failure in several cases where the frame from the autoclave failed e.g. from debris thrown by the tires and from crashes. In addition, the fact that there is no need for an autoclave significantly reduces the cost of investment and use of specialized equipment and thus of the final product.

This approach can be exploited by many sectors, apart from the case of bicycle frames, in order to reduce the design and production costs of components made from Composite materials. Indicatively some of them are: The Sports Equipment Industry of all kinds, the Automotive Industry, Medicine, Shipping, the Aviation Industry, Construction, Biocomposites Applications and Repairs of Composite Materials. If this method is applied on a large scale, it can make composite materials more accessible, resulting in them being introduced into many areas of our life, improving it. I want to believe that the scientific community and the industry will further develop it for the benefit of everyone!

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	Στόχος της Διατριβής και Πρωτότυπη Συμβολή στη Πρόοδο της Επιστήμης
Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών
Κεφάλαιο 2	Η αστοχία στα σύνθετα υλικά
Κεφάλαιο 3	Εισαγωγικά στοιχεία ποδηλάτων
Κεφάλαιο 4	Σχεδιασμός βέλτιστου μοντέλου αγωνιστικού σκελετού δρόμου
Κεφάλαιο 5	Έλεγχος Προδιαγραφών ISO, CAE και διαστρωματώσεις πρωτοτύπου με πεπερασμένα στοιχεία
Κεφάλαιο 6	Κατασκευή πρωτότυπου πλαισίου
Κεφάλαιο 7	Η επίδραση του κύκλου πολυμερισμού στις ιδιότητες απορρόφησης κραδασμών κατασκευών ενισχυμένων με σύνθετα υλικά.
Κεφάλαιο 8	Η επίδραση του συντονισμού στην κατασκευή σωλήνων ενισχυμένων με ίνες άνθρακα
Κεφάλαιο 9	Η επίδραση του τύπου επικάλυψης στρώσεων στις μηχανικές ιδιότητες κατασκευών ενισχυμένων με σύνθετα υλικά
Κεφάλαιο 10	Δημιουργία τελικού πρωτοτύπου και αξιολόγηση
Κεφάλαιο 11	Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων
Βιβλιογραφία	
Δημοσιεύσεις	
Παράρτημα	

Κατάλογος Εικόνων

- Θ-1.1.1: Κατάταξη υλικών.
- Θ-1.2.1: Επιλογές ενισχυτικού υλικού.
- Θ-1.3.1: Ξύλο με στρώσεις.
- Θ-1.3.2: Ιστορική εξέλιξη [1.1].
- Θ-1.4.1: Οι εφαρμογές των σύνθετων είναι ποικίλες και επεκτείνονται.
- Θ-1.4.2: Ζερhyg ανθρακονημάτινο αεροσκάφος που κινείται με ηλιακή ενέργεια.
- Θ-1.4.3: Καταμαράν με ανθρακονημάτινο πανί που του επιτρέπει ταχύτητες των 59 km/h.
- Θ-1.4.4: Specialized-Mclaren Venge, το ποδήλατο αυτό δημιουργήθηκε από την συνεργασία της Specialized με την McLaren.
- Θ-1.5.1: Σύγκριση ειδικών ιδιοτήτων.
- Θ-1.5.2: Σχετική δομική αποδοτικότητα υλικών αεροσκαφών.
- Θ-1.5.3: Ιδιότητες κόπωσης υλικών αεροδιαστημικής.
- Θ-1.5.4: Κόστη για σύνθετα υλικά.
- Θ-1.5.5: Επίδραση θερμοκρασίας και υγρασίας στην αντοχή του carbon/epoxy.
- Θ-1.5.6: Απορρόφηση υγρασίας για πολυμερή σύνθετα.
- Θ-1.5.7: Αποκολλήσεις στρώσεων (delaminations) και ρωγμές στην μήτρα (matrix cracking) εξαιτίας φθοράς από πρόσκρουση.
- Θ-3.6.1: Είδη σύνθετων υλικών ανάλογα με τη μορφή.
- Θ-1.7.2.1: Επίπεδα συμμετρίας σύνθετων υλικών.
- Θ-1.7.2.2: Συμπεριφορά σε ορθή τάση και σε διάτμηση ισοτροπικών και ορθοτροπικών υλικών.
- Θ-1.7.2.3: Τυπική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων μονοαξονικού σύνθετου υλικού.
- Θ-1.8.2.1: Ένα κομμάτι από ύφασμα ανθρακονημάτων.
- Θ-1.8.2.2: Ουρά από RC ελικόπτερο, κατασκευασμένη από CFRP.

- Θ-1.8.2.3: Μία ίνα άνθρακα διαμέτρου 6μm.
(ξεκινά από κάτω αριστερά) σε σύγκριση με μια ανθρώπινη τρίχα.
- Θ-1.8.3.1: Σχέση πυκνότητας ινών.
- Θ-1.8.3.2: Σχέση κόστους ινών.
- Θ-1.8.3.3: Σχέση μέτρου ελαστικότητας ινών.
- Θ-1.8.3.4: Σχέση ορίου αντοχής σε εφελκυσμό των ινών.
- Θ-1.10.1: Μορφές προϊόντος που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα.
- Θ-1.10.2: Διαφορετικές μορφές αρχιτεκτονικών ενίσχυσης.
- Θ-3.10.3: Μορφές υλικών με ίνες.
- Θ-1.10.4: Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών.
- Θ-1.10.5: Τύποι σύνθετων υλικών.
- Θ-1.10.6: Τυπικό πλεκτό ύφασμα από ίνες γυαλιού.
- Θ-1.10.7: Η βασική διαδικασία ύφανσης σχηματικά.
- Θ-1.10.8: Παραδείγματα υβριδικών υφάνσεων.
- Θ-1.10.9: Πλεκτό ύφασμα προεμποτισμένου υλικού (prepreg) από άνθρακα, με χαρτί στο πίσω μέρος.
- Θ-1.10.10: Κοινές δυσδιάστατες πλέξεις.
- Θ-1.10.11: Θερμικός κύκλος σκλήρυνσης ρητίνης.
- Θ-1.11.1: Παράδειγμα διαστρωμάτωσης σύνθετου υλικού.
- Θ-1.11.2: Οιωνεί-ισοτροπική διάταξη στρώσεων.
- Θ-1.11.3: Ιδιότητες σε εφελκυσμό ινών, μήτρας και σύνθετου.
- Θ-1.11.4: Κατασκευή διαστρωμάτωσης.
- Θ-1.11.5: Προτιμητέοι προσανατολισμοί στρώσεων.
- Θ-1.12.1: Διαδικασία στρωματοποίησης με το χέρι (hand layup).
- Θ-1.12.2: Διαδικασία υγρής εναπόθεσης (wet lay-up process).
- Θ-1.12.3: Τεχνική Vacuum Bagging.
- Θ-1.12.4: Διάταξη αυτόκλειστου φούρνου.

- Θ-1.12.5: Διαδικασία lay-up για προεμποτισμένο υλικό.
- Θ-1.12.6: Αρχή του curing σε autoclave.
- Θ-1.12.7: Παραδοσιακό lay-up και cure σε autoclave.
- Θ-1.12.8: Μέθοδος VARI.
- Θ-1.12.9: Αεροθάλαμος μέσω σακούλας και θετικής πίεσης (Pressure Bag Moulding).
- Θ-1.12.10: Καλούπωμα με θερμική διαστολή.
- Θ-1.12.11: Περιέλιξη υλικού (filament winding).
- Θ-1.12.12: Διαδικασία spray-up.
- Θ-1.12.13: Καλούπωμα με έγχυση (injection molding).
- Θ-1.12.14: Καλούπωμα με μεταφορά ρητίνης (Resin transfer molding).
- Θ-1.12.15: Διαδικασία καλουπώματος σε πρέσα.
- Θ-1.12.16: Καλούπωμα με συμπίεση (Compression molding).
- Θ-1.12.17: Διέλαση (pultrusion).
- Θ-2.1: Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών αστοχίας σε μια ινώδη στρώση.
- Θ-2.2: Σχηματική αναπαράσταση της διαστρωματικής αποκόλλησης (delamination).
- Θ-2.3: Ρηγμάτωση ρητίνης πριν τη θραύση των ινών.
- Θ-2.4: Θραύση ινών πριν τη θραύση της ρητίνης.
- Θ-2.5: Τρόποι αστοχίας σε θλίψη μιας μονοαξονικής στρώσης.
- Θ-2.6: Εσωτερική αστοχία.
- Θ-2.7: Διαστρωματική αποκόλληση.
- Θ-2.8: Μορφή “μανιτάρι”.
- Θ-2.9: Τυπική μορφή διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης.
- Θ-2.10: Κεντρική ρωγμή.
- Θ-2.11: Debris wedge, internal-external frond, main crack.
- Θ-2.12: Σχηματισμός εσωτερικού μηχανισμού θραύσης.
- Θ-2.13: Θραύση σε ακανόνιστα σχήματα.
- Θ-2.14: Υποβάθμιση δύναμης και δυσκαμψίας σε συνεχή κυκλική φόρτιση.

- Θ-2.15: Σχηματική απεικόνιση της τυπικής καμπύλης υποβάθμισης δυσκαμψίας για σύνθετα υλικά.
- Θ-3.1: 1819 "Johnson's Pedestrian Hobby Horse Riding School in London".
- Θ-3.2: Χειροκίνητο velocipede σχεδιασμένο το 1821 από τον Gompertz στην Αγγλία.
- Θ-3.3: M. W. Wright, διάσημος Άγγλος ποδηλάτης του 1870, με το Ordinary.
- Θ-3.4: Αλουμινένιος σκελετός ποδηλάτου. γνωστής αμερικανικής εταιρίας. Μοντέλο του 2011.
- Θ-3.5: Πετάλια τιτανίου (Speedplay X1 Titanium Pedals).
- Θ-3.6: Τα μηχανικά μέρη ενός σκελετού-διαμάντι.
- Θ-3.7: Παράδειγμα σκελετού με dual-stay seat stays.
- Θ-3.8: Συνήθεις μετρούμενες διαστάσεις.
- Θ-3.9: Ένα τυπικό αγωνιστικό ποδήλατο δρόμου.
- Θ-3.10: Ένα τυπικό αγωνιστικό ποδήλατο τριάθλου.
- Θ-3.11: Ένα τυπικό αγωνιστικό ποδήλατο βουνού.
- Θ-3.12: Αστοχία από την αλυσίδα μετά από αποτυχημένη προσπάθεια αλλαγής ταχύτητας.
- Θ-3.13: Αστοχία γαλβανική οξειδωση στο σημείο της ένωσης του σκελετού με τον εμπρόσθιο εκτροχιαστή.
- Θ-3.14: Αστοχία στο σημείο ένωσης με το παλουκόσελο που ξεκίνησε από ενδοστρωματική αποκόλληση μετά από πτώση σε λακούβα με τον αναβάτη καθιστό, διαδόθηκε και οδήγησε σε ολική θραύση των ινών.
- Θ-3.15: Αστοχία στο σημείο ένωσης με τον οπίδιο εκτροχιαστή μετά από αποτυχημένη αλλαγή ταχύτητας όπου μπλόκαρε ο πίσω εκτροχιαστής και έσπασε το νύχι του σκελετού.
- Θ-3.16: Αστοχία από έντονο φρενάρισμα στο σημείο αμέσως μετά τη βάση στήριξης του φρένου.
- Θ-3.17: Αστοχία από πτώση σε λακούβα.
- Θ-3.18: Αστοχία από γύρισμα τιμονιού.
- Θ-3.19: Αστοχία από σχάρα μεταφοράς ποδηλάτου.

- Θ-3.20: Κατασκευαστική αστοχία όπου μαγκώθηκε το carbon στην διαχωριστική επιφάνεια του καλουπιού και ουσιαστικά ελάττωσε σε τέτοιο βαθμό την αλληλοεπικάλυψη των στρώσεων ώστε να προκληθεί αστοχία.
- Θ-6.1: Μετρητική καλίμπρα Bike Fitting.
- Θ-6.2: Σχαράκια (πάνω) και εξομοιωτής θέσης (κάτω).
- Θ-4.3: Κάμερα δυναμικής ανάλυσης.
- Θ-4.4: Σύστημα ανάλυσης πεταλαρίσματος.
- Θ-4.5: Ανάλυση δυνάμεων και ροπών κατά την άσκηση.
- Θ-4.6: Ανάλυση φορτίων ανά πόδι κατά τη διάρκεια του κύκλου πεταλαρίσματος.
- Θ-4.7: Ανάλυση κατανομής φορτίου στο πετάλι.
- Θ-4.8: Τα σωματομετρικά στοιχεία του αθλητή.
- Θ-4.9: Η γεωμετρία του ποδηλάτου όπως προκύπτει από το πρόγραμμα του Bike Fitting.
- Θ-4.10: Περιορισμοί διατομών και μορφές αεροτομών των τμημάτων του πλαισίου.
- Θ-4.11: Περιορισμοί ενώσεων των τμημάτων του πλαισίου.
- Θ-4.12: Μορφή αεροτομής.
- Θ-4.13: Δυνάμεις σε σκελετό κατά τη διάρκεια τυπικού πεταλαρίσματος.
- Θ-4.14: Απορρόφηση ενέργειας σε κάθε σωλήνα του πλαισίου Trek 770 σε διαφορετικά σενάρια φόρτισης.
- Θ-4.15: Απορρόφηση ενέργειας στους σωλήνες των πλαισίων Trek 770, Trek 2000 και Bador στο σενάριο στατικής εκκίνησης.
- Θ-4.16: Κατανομή φορτίου και είδος φόρτισης σε κάθε σωλήνα στο πλαίσιο Trek 2000.
- Θ-4.17: Κατανομή φορτίου και είδος φόρτισης σε κάθε σωλήνα στο πλαίσιο Trek 770.
- Θ-4.18: Κατανομή φορτίου και είδος φόρτισης σε κάθε σωλήνα στο πλαίσιο Bador.
- Θ-4.19: Διαφορετικοί σωλήνες ποδηλάτων.
- Θ-4.20: Διατομές οριζόντιου σωλήνα 1 έως 4.
- Θ-4.21: Διατομές διαγώνιου σωλήνα 1 έως 7.
- Θ-4.22: Διατομές κάθετου σωλήνα 1 έως 6.

- Θ-4.23: Διατομές πάνω ψαλιδιών 1 έως 4.
- Θ-4.24: Διατομές κάτω ψαλιδιών 1 έως 5.
- Θ-4.25: Διατομές κάτω ψαλιδιού 6 σε διάφορες θέσεις.
- Θ-4.26: Πλέγμα στο downtube.
- Θ-4.27: Αποτελέσματα δοκιμής στο downtube.
- Θ-4.28: Σύγκριση οπισθέλκουσας αεροδυναμικού και μη αεροδυναμικού ποδηλάτη σε σχέση με την ταχύτητα κίνησης.
- Θ-4.29: Χάρτης ανέμων Ευρώπης.
- Θ-4.30: Συνισταμένη ταχύτητα κατά την κίνηση του ποδηλάτου.
- Θ-4.31: Γωνία σχετικού αέρα.
- Θ-4.32: Διάγραμμα πιθανοτήτων της γωνίας σχετικού αέρα.
- Θ-4.33: Δομημένο πλέγμα για το downtube.
- Θ-4.34: Αποτελέσματα και γραμμές ροής για το downtube.
- Θ-4.35: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές του top tube.
- Θ-4.36: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του top tube.
- Θ-4.37: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές του top tube στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.
- Θ-4.38: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές του down tube.
- Θ-4.39: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του down tube.
- Θ-4.40: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές του down tube στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.
- Θ-4.41: Γραμμές ροής Διατομών 1-7 downtube.
- Θ-4.42: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές του seat tube.
- Θ-4.43: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του seat tube.

- Θ-4.44: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές του seat tube στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.
- Θ-4.45: Δημιουργία τύρβης στο κενό μεταξύ σωλήνα σέλλας και πίσω τροχού.
- Θ-4.46: Γραμμές ροής σε κάθε μοντέλο του σωλήνα seat tube.
- Θ-4.47: Γραμμές ροής γύρω από την πρώτη διατομή του σωλήνα seat tube.
- Θ-4.48: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές των seat stays.
- Θ-4.49: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές των seat stays.
- Θ-4.50: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές των seat stays στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.
- Θ-4.51: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές των chain stays.
- Θ-4.52: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές των chain stays.
- Θ-4.53: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές των chain stays στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.
- Θ-4.54: Square-Oval μορφή σωλήνων Κάτω Ψαλιδιών.
- Θ-4.55: Επεξήγηση υποκοπής.
- Θ-4.56: Τελικό μοντέλο πλαισίου.
- Θ-4.57: Ένωση σωλήνων κούτελου, top tube και down tube, ολόκληρη (αριστερά) και σε τομή (δεξιά).
- Θ-4.58: Μεσαία τριβή.
- Θ-4.59: Ανάλυση συνέχειας στις επιφάνειες του πλαισίου.
- Θ-4.60: Parting Lines πάνω στις επιφάνειες του πλαισίου.
- Θ-5.1: Διάταξη πλαισίου και εμπρόσθιου πιρουνιού στη δοκιμή πρόσκρουσης με προσπίπτουσα μάζα.
- Θ-5.2: Πειραματική διάταξη πλαισίου-εμπρόσθιου πιρουνιού για δοκιμή πρόσκρουσης πλαισίου.
- Θ-5.3: Πειραματική διάταξη δοκιμών κοπώσεως πλαισίου σε pedaling.

- Θ-5.4: Πειραματική διάταξη δοκιμών κοπώσεως του πλαισίου σε οριζόντιες δυνάμεις.
- Θ-5.5: Πειραματική διάταξη δοκιμών κοπώσεως του πλαισίου σε κάθετες δυνάμεις.
- Θ-5.6: Ολόκληρος ο σκελετός με το πλέγμα.
- Θ-5.7: Το πλέγμα στην περιοχή της μεσαίας τριβής.
- Θ-5.8: Το πλέγμα στην περιοχή της μεσαίας τριβής μαζί με τις κατευθύνσεις των ινών.
- Θ-5.9: Το πλέγμα στην περιοχή του κούτελου μαζί με τις κατευθύνσεις των ινών όπως προκύπτουν από το draping.
- Θ-5.10: Απεικόνιση δοκιμής πίπτουσας μάζας.
- Θ-5.11: Απεικόνιση της δοκιμής πρόσκρουσης του σκελετού.
- Θ-5.12: Απεικόνιση δοκιμής κόπωσης με δυνάμεις πεταλαρίσματος.
- Θ-5.13: Απεικόνιση δοκιμής κόπωσης με οριζόντιες δυνάμεις.
- Θ-5.14: Απεικόνιση δοκιμής κόπωσης με κατακόρυφη δύναμη.
- Θ-5.15: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.
- Θ-5.16: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.
- Θ-5.17: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.
- Θ-5.18: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.
- Θ-5.19: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.
- Θ-6.1 Το καλούπι των ανθρακονημάτων έτοιμο για χρήση.
- Θ-6.2 Ο πρωτότυπος σκελετός πριν το ξεκαλούπωμα.
- Θ-6.3: Κενό στις στρώσεις επειδή δεν άνοιξαν πλήρως οι σακούλες.
- Θ-6.4: Bridge λόγω στρωσίματος υφασμάτων και χαμηλής πίεσης.
- Θ-6.5: Μάγκωμα υφασμάτων ανάμεσα στις επιφάνειες κλεισίματος του καλουπιού.
- Θ-6.6 Συνδυασμός προβλημάτων από χαμηλή πίεση στις σακούλες και τον τρόπο τοποθέτησής τους εσωτερικά στο σκελετό.
- Θ-6.7 Ο Παγκόσμιος πρωταθλητής Χρήστος Γαρέφης δοκιμάζει το ποδήλατο κάνοντας και ρεκόρ διαδρομής σε αγώνα λόγω του ότι δεν πονούσε η μέση του χάρη στην αυξημένη άνεση και των ειδικών χαρακτηριστικών του σκελετού, ακαμψίας-αεροδυναμικής – οδηγικής συμπεριφοράς.

- Θ-6.8 Εμφανείς φυσαλίδες στην επιφάνεια του σκελετού που παράχθηκε στον κλίβανο.
- Θ-7.1: Τοποθέτηση στρώσεων μέσα στο καλούπι.
- Θ-7.2: Επικάλυψη στρώσεων μέσα στο καλούπι.
- Θ-7.3: Διάγραμμα θερμοκρασίας (μπλε γραμμή) και καλουπιού (μαύρη γραμμή) κατά τον κύκλο πολυμερισμού.
- Θ-7.4: Πειραματική διάταξη και δοκίμια.
- Θ-7.5: Στιγμιότυπα του βίντεο σε αργή κίνηση.
- Θ-7.6: Διαγράμματα μεταβολής γραμμικής κλίσης ανά δοκίμιο.
- Θ-7.7: Γράφημα απεικόνισης του ύψους κάθε αναπήδησης για κάθε δοκίμιο.
- Θ-8.1: Η διαστρωμάτωση στη επιφάνεια του καλουπιού.
- Θ-8.2: Το ένα μέρος του καλουπιού, όμοιο σε κάθε περίπτωση.
- Θ-8.3: Τύποι επικάλυψης στρώσεων δοκιμίων: αριστερά διαδοχικός , δεξιά σειριακός
- Θ-8.4: Ο πνευματικός δονητής.
- Θ-8.5: Διαδικασία πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας.
- Θ-8.6: Διαδικασία πολυμερισμού σύντομης χρονικής διάρκειας.
- Θ-8.7: Αξονική τομή των δοκιμίων.
- Θ-8.8: Το πείραμα της θλίψης.
- Θ-8.9: Τα δοκίμια μετά την θλίψη.
- Θ-8.10: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια από T700 με διαδοχικό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.11: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια από T700 με σειριακό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.12: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια από T300 πλεκτό με διαδοχικό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.13: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια από T300 πλεκτό με σειριακό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.14: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια μικτού τύπου υλικών με διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.15: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια μικτού τύπου υλικών με σειριακό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.16: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.17: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.18: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.19: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.20: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.21: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.22: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.23: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.24: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.25: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.26: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.27: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.28: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.29: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Θ-8.30: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

- Θ-8.31: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.32: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και σειριακό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.33: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.34: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και σειριακό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.35: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.36: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και σειριακό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.37: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.
- Θ-8.38: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και σειριακό τύπο επικάλυψης.
- Θ-9.1: Ο διαδοχικός τύπος επικάλυψης στρώσεων.
- Θ-9.2: Ο σειριακός τύπος επικάλυψης στρώσεων.
- Θ-9.3: Ο κύκλος πολυμερισμού.
- Θ-9.4: Το πείραμα κάμψης τριών σημείων.
- Θ-9.5: Δοκίμια συνδέσμου τύπου step lap.
- Θ-9.6: Δοκίμια συνδέσμου τύπου blocked .
- Θ-9.7: Διαγράμματα τάσης σ (MPa) – παραμόρφωσης ϵ .
- Θ-9.8: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 5 της κατηγορίας E1.
- Θ-9.9: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 2 της κατηγορίας A.
- Θ-9.10: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 4 της κατηγορίας A.
- Θ-9.11: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 4 της κατηγορίας B1.
- Θ-9.12: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 3 της κατηγορίας D2.
- Θ-9.13: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 1 της κατηγορίας E2.

- Θ-10.1 Τα πατρόν όπως έχουν προκύψει από τη μελέτη έτοιμα για διαστρωμάτωση.
- Θ-10.2 Μέρος της διαστρωμάτωσης στο τμήμα του κούτελου από την «over» μεριά του καλουπιού.
- Θ-10.3 Μέρος της διαστρωμάτωσης στο τμήμα του οριζόντιου σωλήνα από την «over» μεριά του καλουπιού.
- Θ-10.4 Μέρος της διαστρωμάτωσης στο τμήμα του διαγώνιου σωλήνα από την «exact» μεριά του καλουπιού.
- Θ-10.5 Όλα τα τμήματα του καλουπιού στρωμένα έτοιμα για σακούλιασμα.
- Θ-10.6 Καλούπωμα και σακούλιασμα Όλα τα τμήματα του καλουπιού στρωμένα έτοιμα για σακούλιασμα.
- Θ-10.7 Το καλούπι έτοιμο για δημιουργία κενού.
- Θ-10.8 Το καλούπι στο φούρνο έτοιμο για ψήσιμο με τις τεχνολογίες που μελετήθηκαν.
- Θ-10.9 Ο σκελετός έτοιμος μετά το φούρνισμα. Διακρίνεται με γυμνό οφθαλμό η εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας.
- Θ-10.10 Ο σκελετός έτοιμος για το καλιμπράρισμα.
- Θ-10.11 Ο σκελετός καλιμπράρεται.
- Θ-10.12 Ο σκελετός έτοιμος για βαφή (προαιρετικά) και συναρμολόγηση.
- Θ - 10.13 Ο Παγκόσμιος πρωταθλητής Χρήστος Γαρέφης , ο κορυφαίος αθλητής στην κατηγορία του παγκοσμίως και όχι μόνο δοκιμάζει το σκελετό σε ακραίες αγωνιστικές συνθήκες.
- Θ - 10.14 Ο κορυφαίος Έλληνας προπονητής Βασίλης Κρομμύδας με παγκόσμιο ρεκόρ στη Χαβάη όπου διεξάγεται ο πιο δύσκολος αγώνας στον κόσμο επιβεβαιώνει και αυτός τα αποτελέσματα μας δοκιμάζοντας το σκελετό και αυτός και οι κορυφαίοι αθλητές του.

Καταστροφικές καταπονήσεις οχημάτων

(Η περίπτωση των ανθρακονημάτων σκελετών αγωνιστικών ποδηλάτων δρόμου)

Ο στόχος της διατριβής και η Πρωτότυπη Συμβολή της στην Πρόοδο της Επιστήμης

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο ευρεία η χρήση εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά ενισχυμένων με ίνες άνθρακα - κατά κύριο λόγο - αλλά και άλλων ειδών όπως γυαλιού, kevlar κτλ. ανά περίπτωση. Η εφαρμογή τους δεν περιορίζεται πλέον μόνο στους παραδοσιακούς τομείς όπως είναι οι Αμυντικοί Εξοπλισμοί (αεροσκάφη, πλοία, αυτοκίνητα), η Αεροδιαστημική Βιομηχανία (αεροπλάνα, διαστημόπλοια) και ο Μηχανοκίνητος Αθλητισμός (κάθε είδους αγωνιστικό όχημα). Έχει γίνει ευρεία εξάπλωση σε όλους τους τύπους οχημάτων συμπεριλαμβανομένων των ποδηλάτων και ειδικά των ποδηλάτων δρόμου.

Αν και η χρήση των σύνθετων υλικών είναι πλέον μονόδρομος στα ποδήλατα δρόμου υψηλής ποιότητας και επιδόσεων, η απόκτηση και η χρήση τους δεν είναι τόσο εύκολη και απροβλημάτιστη όσο θα περίμενε κανείς. Στο θέμα της τιμής πώλησής τους το υψηλό κόστος απόκτησης τους προκύπτει από την εφαρμογή μεθόδων σχεδιασμού και κατασκευής από την αεροπορική κυρίως βιομηχανία. Στο κομμάτι σχεδιασμού απαιτούνται εξειδικευμένοι μηχανικοί και πανάκριβα λογισμικά ενώ στο κατασκευαστικό κομμάτι χρησιμοποιούνται ακριβός εξοπλισμός τόσο ως προς την απόκτηση όσο και ως προς τη χρήση του όπως είναι το autoclave ή οι πρέσες με θερμαινόμενες πλάκες. Σε αυτά προστίθενται και τα ειδικά καλούπια που απαιτούνται για την παραγωγή.

Παρόλο τον προσεκτικό σχεδιασμό και την υψηλή ποιότητα κατασκευής, υπάρχουν πολλές αστοχίες σε σκελετούς, ενώ πληρούν τα πρότυπα ασφαλείας και χρήσης κατά ISO και άλλους φορείς πιστοποίησης. Οι αστοχίες αυτές προκύπτουν τόσο από πτώσεις όσο και από το γεγονός ότι οι σκελετοί σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με τη λογική του «μηχανικού αεροσκαφών» ο οποίος ακολουθεί τις προσταγές του τμήματος Marketing, δηλαδή με έμφαση στην ικανοποίηση των προτύπων ασφαλείας αλλά έχοντας πχ σχήματα ή διατομές που είναι εν γένει εύθραυστες είτε λόγω μορφής είτε λόγω πάχους. Αυτοί οι σκελετοί είναι πολύ δύσκαμπτοι και εν γένει εύθραυστοι. Η δε χρήση στο δρόμο σε απρόβλεπτες καταστάσεις πχ λακκούβες, κίνηση, καιρικές συνθήκες χειροτερεύει το πρόβλημα των αστοχιών. Οι αστοχίες αυτές αυξάνουν το κόστος για τους χρήστες τους αφού η αντικατάστασή τους είναι πολύ κοστοβόρα και χρονοβόρα, λόγω του ότι η συνεχής εξέλιξη και το marketing καθιστά την εύρεση ανταλλακτικών δύσκολη στην

καλύτερη των περιπτώσεων. Σε αυτά τα προβλήματα έρχεται να προστεθεί και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ζημιών αυτών.

Το πρόβλημα αυτό θα το λύσουμε στα πλαίσια αυτής της διατριβής προτείνοντας εν τέλει μια διαφορετική προσέγγιση στο κομμάτι του σχεδιασμού αλλά και της κατασκευής τους. Με την εφαρμογή των μεθόδων αυτών όχι μόνο θα μειωθεί σε μεγάλο βαθμό το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής αλλά θα είναι και σημαντικά πιο ανθεκτικός ο σκελετός.

Αυτός ο συνδυασμός σχεδιασμού και μεθόδου κατασκευής αποτελεί και την πρωτότυπη συμβολή της διατριβής στην επιστήμη αφού δεν λύνει μόνο το πρόβλημα των σκελετών αγωνιστικών ποδηλάτων δρόμου. Έχει πολλούς εν δυνάμει τομείς εφαρμογής όπου αν εφαρμοστεί θα βοηθήσει στη σημαντική μείωση του κόστους των κατασκευών από σύνθετα υλικά και θα τα καταστήσει και πιο ανθεκτικά σε σχέση με τις υπάρχουσες λύσεις. Η μείωση του κόστους προέρχεται τόσο από το σχεδιαστικό κομμάτι όπου θα απαιτούνται λιγότερες ώρες μέχρι τον τελικό σχεδιασμό όσο και από την κατασκευαστική μέθοδο όπου θα χρησιμοποιείται πολύ φθηνότερος και προσβάσιμος εξοπλισμός. Η Βιομηχανία Αθλητικού Εξοπλισμού πάσης φύσεως, η Αυτοκινητοβιομηχανία, η Ιατρική, η Ναυτιλία, η Αεροπορική Βιομηχανία, η Οικοδομή και οι Εφαρμογές με Βιοcomposites είναι μερικοί μόνο από τους τομείς που μπορούν να επωφεληθούν από τη μείωση του κόστους και την αύξηση της αντοχής των προϊόντων.

Επιπλέον η συμβατότητα της μεθόδου με διαδικασίες επισκευής θα μειώσουν το πρόβλημα της δυσκολίας της ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών και τα σπασμένα εξαρτήματα θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται αντί να πετιούνται.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών

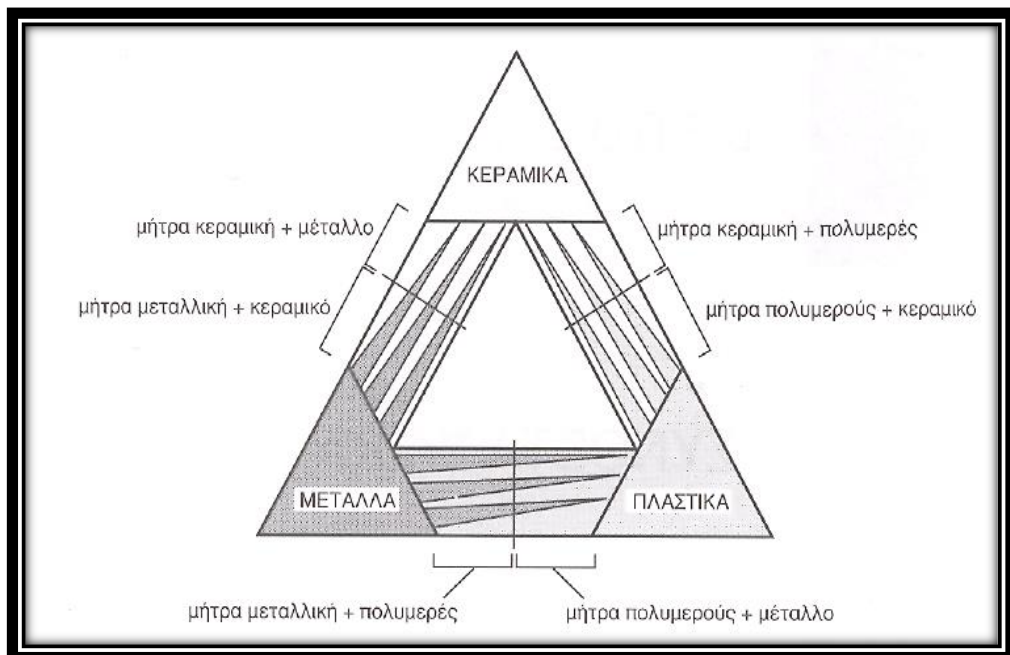
1.1 Εισαγωγή

Η επιτυχία και η πρόοδος όλων των κλάδων της βιομηχανίας βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην εξέλιξη της επιστήμης των υλικών και της τεχνολογίας των κατεργασιών τους. Η σωστή γνώση των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων υλικών, καθώς και η κατανόηση των σχέσεων μεταξύ μικροδομής και μακροσκοπικών ιδιοτήτων, είναι απαραίτητη για την πρόοδο των διάφορων βιομηχανικών τεχνικών.

Τα υλικά κατατάσσονται συνήθως σε τρεις κατηγορίες:

- Μέταλλα και κράματα,
- Οργανικά υλικά, όπως πλαστικά,
- Μη μεταλλικά ανόργανα υλικά, όπως κεραμικά υλικά και τεχνητά γυαλιά.

Η χημική σύσταση, η δομή και οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους είναι οι βασικές διακρίσεις μεταξύ των διαφόρων υλικών. Υλικά που αποτελούνται από συνδυασμούς των τριών παραπάνω κατηγοριών, ωστόσο, έχουν ιδιότητες που δεν μπορούν να τα κατατάξουν εξολοκλήρου σε κάποια από τις βασικές κατηγορίες. [1.1]



Θ-1.1.1: Κατάταξη υλικών.

1.2 Ορισμός σύνθετων υλικών

Ως σύνθετο μπορεί να οριστεί ένα υλικό που αποτελεί συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών. Το αποτέλεσμα είναι υλικό με καλύτερες ιδιότητες από αυτές που θα είχαμε αν χρησιμοποιούσαμε ξεχωριστά καθένα από τα συστατικά υλικά. Σε αντίθεση με τα μεταλλικά κράματα, κάθε υλικό διατηρεί τις ξεχωριστές χημικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του.

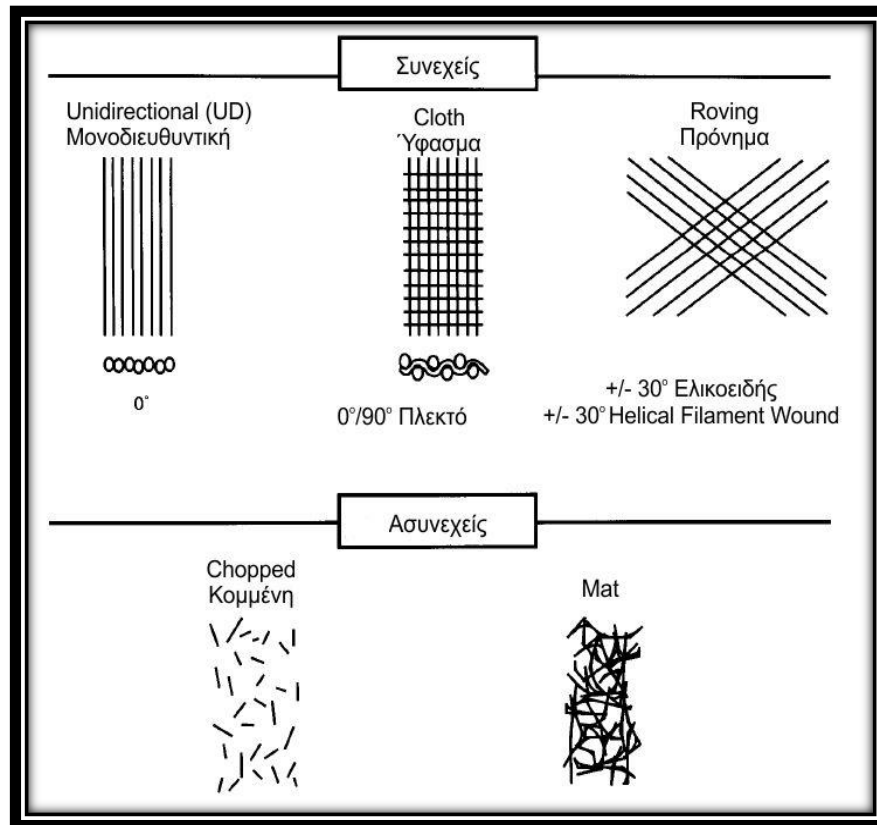
Ειδικότερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται σήμερα εκείνα τα υλικά, των οποίων τα συνιστώμενα μέρη έχουν διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Παραδείγματα υλικών που δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως σύνθετα είναι τα συνήθη μέταλλα, αν και περιέχουν άλλα συστατικά, όπως ανεπιθύμητες ακαθαρσίες ή κραματοποιημένα στοιχεία, καθώς επίσης και τα πλαστικά, τα οποία συνήθως περιέχουν μικρές ποσότητες ειδικών προσθετικών (fillers). Στην περίπτωση των διφασικών μετάλλων, οι συνιστώσες φάσεις έχουν συχνά σχεδόν ίδιες ιδιότητες (π.χ. μέτρο ελαστικότητας) και η μία από αυτές υπάρχει συνήθως σε πολύ μικρές ποσότητες. Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας ενός χάλυβα είναι ανεξάρτητο από την περιεκτικότητά του σε άνθρακα και τα μεταλλικά κράματα δεν θεωρούνται γενικά ως σύνθετα υλικά.

Επομένως, για να καταταχθούν συγκεκριμένα υλικά στην κατηγορία των σύνθετων, θα πρέπει να αποτελούν συνδυασμό συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (≥ 5 φορές), και η περιεκτικότητα κατ' όγκο του ενός να μην είναι πολύ μικρή ($> 10\%$). Επομένως, ως σύνθετα μπορούν να θεωρούνται τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Τα σύνθετα υλικά είναι κατασκευασμένα από μεμονωμένα υλικά, τα οποία αναφέρονται ως συστατικά υλικά. Υπάρχουν δύο κατηγορίες συστατικών υλικών: η μήτρα και η ενίσχυση. Κατ' ελάχιστο, ένα μέρος από κάθε τύπο είναι απαραίτητο. Το υλικό της μήτρας συνήθως είναι χαμηλής πυκνότητας, περιβάλλει και υποστηρίζει τα υλικά ενίσχυσης με το να διατηρεί τις σχετικές τους θέσεις. Οι ενισχύσεις αποδίδουν τις ιδιαίτερες μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες για να βελτιωθούν οι ιδιότητες της μήτρας.

Οι τυπικές ίνες είναι συνήθως κατασκευασμένες από γυαλί, αραμίδιο και άνθρακα και μπορεί να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς. Οι μήτρες μπορεί να είναι πολυμερή, μεταλλικά ή κεραμικά υλικά. Από αυτήν την συνεργασία παράγονται ιδιότητες υλικού ανύπαρκτες στα μεμονωμένα συστατικά υλικά, καθώς η ευρεία ποικιλία από μήτρες και υλικά ενίσχυσης επιτρέπει στον σχεδιαστή του προϊόντος ή της κατασκευής να επιλέξει τον βέλτιστο συνδυασμό.

Στην Εικόνα Θ-1.2.1 βλέπουμε παραδείγματα συνεχούς ενίσχυσης, τα οποία περιλαμβάνουν τις μονοδιευθυντικές ίνες (unidirectional), το πλεκτό ύφασμα (woven cloth) και την ελικοειδή περιτύλιξη (helical winding), καθώς και παραδείγματα ασυνεχούς ενίσχυσης, που περιλαμβάνουν τις κομμένες ίνες (chopped fibers) και την τυχαία διάταξη (random mat). [1.2]



Θ-1.2.1: Επιλογές ενισχυτικού υλικού.

1.3 Ιστορική Αναδρομή

Εδώ και χιλιάδες χρόνια ο άνθρωπος χρησιμοποιεί σύνθετα υλικά. Φυσικά υλικά, όπως το κόκκαλο, η πέτρα, το ξύλο και ο πηλός, ήταν τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα. Οι πρώτες χρήσεις σύνθετων υλικών χρονολογούνται περίπου στο 1500 π.Χ. όταν οι Αιγύπτιοι και Μεσοποτάμιοι άποικοι χρησιμοποίησαν μίγμα λάσπης και άχυρου για να δημιουργήσουν δυνατά και ανθεκτικά κτίσματα. Το άχυρο συνέχισε να παρέχει ενίσχυση στα αρχαία «σύνθετα» προϊόντα συμπεριλαμβανομένων κεραμικών και βαρκών.

Οι Αιγύπτιοι, αρκετά νωρίς, αντιλήφθηκαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου ήταν πολύ ανθεκτικότερες στη στρέβλωση από απορρόφηση υγρασίας από το φυσικό ξύλο καθαυτό. Γύρω στο 1000π.Χ. στη Μεσοποταμία εφαρμόστηκε το

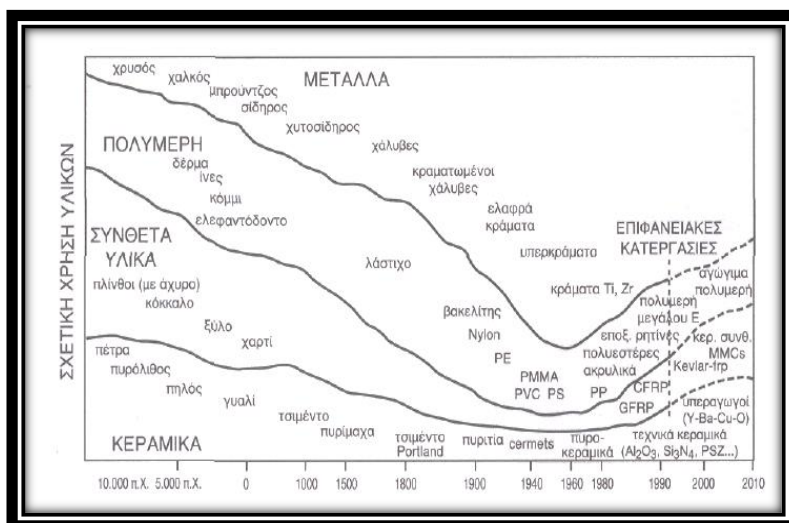
βερνίκωμα των τούβλων και πλακιδίων για περιορισμό της επιφανειακής φθοράς. Επίσης, η ανάμειξη γύψου με ζωικό τρίχωμα ήταν μία πολύ πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής σε αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Αργότερα, γύρω στο 1200 μ.Χ. οι Μογγόλοι εφηύραν το πρώτο «σύνθετο» τόξο. Χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό ξύλου, κόκκαλων και «κόλλας» από ζωικά συστατικά, τα τόξα συμπιέζονταν και τυλίγονταν με φλοιό σημύδας. Αυτά τα τόξα ήταν εξαιρετικά ισχυρά και ακριβή. Το συγκεκριμένο τόξο από «σύνθετο» υλικό εξασφάλισε στον Genghis Khan στρατιωτική κυριαρχία και χάρη στην συγκεκριμένη πρώιμη τεχνολογία αυτό το όπλο θεωρείτο το πιο ισχυρό έως την εφεύρεση της πυρίτιδας.

Η μετεξέλιξη της τεχνικής των Αιγυπτίων στη σύγχρονη εποχή είναι η χρήση της σιδηρόβεργας για οπλισμένο σκυρόδεμα. Κοντά στο 1920 εμφανίστηκε το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού. Ο βακελίτης, όπως έγινε γνωστό το εν λόγω υλικό από τον Βέλγο επιστήμονα Leo Baekeland, αποτελεί ένα μείγμα ινιδίων ξύλου σε φαινολική φορμαλδεΐδη.



Θ-1.3.1: Ξύλο με στρώσεις.



Θ-1.3.2: Ιστορική εξέλιξη [1.1].

➤ **Γέννηση της «Εποχής των Πλαστικών»**

Η σύγχρονη εποχή των σύνθετων ξεκίνησε αφότου οι επιστήμονες ανέπτυξαν τα πλαστικά. Έως τότε, οι φυσικές ρητίνες, που προέρχονταν από φυτά και ζώα, ήταν η μόνη πηγή για κόλλες και συνδετικά. Στις αρχές του 1900, αναπτύχθηκαν πλαστικά όπως το πολυστυρόλιο, βινυλικές, φαινολικές και πολυεστερικές ρητίνες. Αυτά τα νέα συνδετικά υλικά εκτόπισαν με τις ιδιότητές τους τις φυσικές ρητίνες.

Παρόλαυτα, τα πλαστικά μόνα τους δεν παρέχουν αρκετή αντοχή για δομικές εφαρμογές. Χρειάζοταν κάποιο είδος ενίσχυσης που θα προσέδιδε αντοχή και δυσκαμψία. Το 1935, ο Owens Corning εισήγαγε την πρώτη ίνα υάλου (fiberglass). Το fiberglass, σε συνδυασμό με πλαστικό πολυμερές δημιουργεί μια εξαιρετικά ανθεκτική δομή, η οποία είναι επίσης και ελαφριά. Αυτή ήταν η αρχή της βιομηχανίας των Fiber Reinforced Polymers (Πολυμερών με ινώδη ενίσχυση).

➤ **Δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος. Ορόσημο στην αλλαγή των πρώιμων σύνθετων**

Πολλές από τις μεγαλύτερες προόδους στα σύνθετα σημειώθηκαν εξαιτίας του πολέμου. Ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος «έβγαλε» στην βιομηχανία το FRP από το εργαστήριο στην παραγωγή. Εναλλακτικά υλικά χρειαζόνταν για ελαφριές εφαρμογές σε στρατιωτικά αεροσκάφη. Οι μηχανικοί συνειδητοποίησαν γρήγορα τα επιπλέον οφέλη των σύνθετων πέραν του μικρού βάρους και της υψηλής αντοχής τους. Ανακαλύφθηκε ότι τα σύνθετα από fiberglass ήταν «διάφανα» σε ραδιοσυχνότητες και το συγκεκριμένο υλικό υιοθετήθηκε για χρήση στην προστασία εξοπλισμού ηλεκτρονικών ραντάρ (Radomes).

➤ **Προσαρμόσιμα σύνθετα: Από διαστημικά υλικά σε υλικά της καθημερινότητας**

Μέχρι το τέλος του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου μια μικρή βιομηχανία σύνθετων υλικών ήταν σε έντονη λειτουργία. Με μειωμένη την ζήτηση, πλέον, για στρατιωτικά προϊόντα, οι νεωτεριστές των σύνθετων ξεκίνησαν μια φιλότιμη προσπάθεια να εισάγουν τα σύνθετα και σε άλλες αγορές. Τα πλοία ήταν μια προφανής επιλογή και το πρώτο εμπορικό κύριο σώμα πλοίου εμφανίστηκε το 1946.

Αυτή την περίοδο ο Brandt Goldsworthy, που αναφέρεται συχνά ως ο «πατέρας των σύνθετων», ανέπτυξε νέες διαδικασίες κατασκευής και νέα προϊόντα. Του αναγνωρίζονται αρκετοί νεωτερισμοί, συμπεριλαμβανομένης της πρώτης σανίδας του surf από fiberglass, που έφερε επανάσταση στο άθλημα. Ο Goldsworthy εφηύρε επίσης μια διαδικασία κατασκευής γνωστή ως pultrusion (διέλαση).

➤ Συνεχιζόμενη πρόοδος στα σύνθετα

Η παραγωγή πολυμερών σε παγκόσμιο επίπεδο ξεκίνησε στα μέσα του 20ού αιώνα – περί το 1950 σε περιορισμένες αρχικά εφαρμογές - ενώ στην Βρετανική βιομηχανία ξεκίνησε στις αρχές του 1960. Τότε τα κόστη των υλικών και της παραγωγής ήταν χαμηλά και νέες παραγωγικές τεχνολογίες και καινούριες κατηγορίες υλικών συνδυάζονταν για να κάνουν οικονομική την παραγωγή των πολυμερών. Περίπου το 1970 η βιομηχανία των σύνθετων άρχισε να «ωριμάζει». Τότε η παγκόσμια παραγωγή πολυμερών παραμέρισε το ασάλι καθιστώντας τα πολυμερή ως το δημοφιλέστερο υλικό που είναι σήμερα. Τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες ήταν ένα αξιοσημείωτο μέρος αυτής της βιομηχανίας από την αρχή. Καλύτερες πλαστικές ρητίνες και ενισχυτικές ίνες αναπτύχθηκαν. Η Dupont ανέπτυξε μια ίνα από αραμίδιο, που είναι γνωστή ως Kevlar. Αυτή η ίνα έχει γίνει η πιο συνηθισμένη σε οπλισμούς εξαιτίας της υψηλής αντοχής της σε εφελκυσμό. Οι ίνες άνθρακα (carbon fiber) αναπτύχθηκαν περίπου την ίδια περίοδο και από τότε αντικαθιστούν τα μέταλλα σαν ένα νέο υλικό επιλογής.

Η βιομηχανία σύνθετων εξελίσσεται συνέχεια, με μεγάλο μέρος της ανάπτυξης να επικεντρώνεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών θέτουν συνέχεια καινούργια όρια σε μέγεθος και απαιτούν προηγμένα υλικά, κατάλληλο σχεδιασμό και κατασκευή.

Μελλοντικά τα σύνθετα θα χρησιμοποιούν όλο και καλύτερες ίνες και ρητίνες, πολλές από τις οποίες θα ενσωματώνουν νάνο υλικά. Επιπρόσθετα, τα σύνθετα τείνουν να γίνουν πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Οι ρητίνες θα ενσωματώνουν ανακυκλωμένα πλαστικά και πολυμερή με βιολογική βάση. [1.3]

1.4 Σύγχρονες εφαρμογές

Τα σύνθετα υλικά έχουν γίνει δημοφιλή, παρόλο το μεγάλο κόστος τους, σε προϊόντα υψηλών επιδόσεων, τα οποία χρειάζεται να είναι ελαφριά και αρκετά δυνατά ώστε να δέχονται σκληρές συνθήκες φορτίσεως και λειτουργίας. Τέτοια είναι τα εξαρτήματα των αεροσκαφών (ουρές, φτερά, άτρακτοι, προπέλες), τα πλαίσια αγωνιστικών ποδηλάτων και των αμαξωμάτων για αγωνιστικά αυτοκίνητα.

Η χρήση σύνθετων υλικών είναι εκτενής και επεκτείνεται. Σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ακόμη και στο πεδίο της ορθοπεδικής χειρουργικής. Ορισμένες εφαρμογές τους, που περιλαμβάνουν προϊόντα για αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, ναυπηγική, αθλήματα και πιο πρόσφατα για υποδομές οικοδομών, παρουσιάζονται στην Εικόνα Θ-1.4.1.



Θ-1.4.1: Οι εφαρμογές των σύνθετων είναι ποικίλες και επεκτείνονται.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής σύνθετων υλικών στην αεροναυπηγική είναι τα κατακόρυφα και τα οριζόντια φτερά στην ουρά του Boeing 777. Στην περίπτωση αυτή, το υλικό κατασκευής είναι ανθρακονήματα εμποτισμένα σε εποξική ρητίνη (carbon/epoxy). Πλέον, κατασκευάζονται μέχρι και πλαίσια αεροσκαφών εξ' ολοκλήρου από σύνθετα, όπως σε ορισμένες περιπτώσεις επαγγελματικών τζετ. Στην αναζήτηση για μείωση του βάρους και συνεπώς της μέγιστης εκμετάλλευσης των καυσίμων, μικρά και μεγάλα εμπορικά σκάφη χρησιμοποιούν κατασκευές από σύνθετα υλικά. Τα πλαίσια των στρατιωτικών αεροσκαφών απαρτίζονται κατά ένα ποσοστό της τάξης του 20-30% από σύνθετα υλικά, με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και του ωφέλιμου φορτίου τους. Στα ελικόπτερα χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες ίνες γυαλιού σαν ενίσχυση στα πτερύγια του ρότορα για αυξημένη αντοχή σε κόπωση.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται επίσης εκτενώς σε επαναχρησιμοποιούμενα και αναλώσιμα οχήματα εκτόξευσης φορτίων και για δομές δορυφόρων. Ακόμη, χρησιμοποιείται ευρέως στα υποστρώματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, στις ανακλαστικές κεραίες και στους ζυγούς - σφιγκτήρες των διαστημόπλοιων. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε προσαρμογείς συνολικού φορτίου αεροσκάφους, σε εσωτερικού χώρου κατασκευές και ασπίδες θερμότητας στα οχήματα εκτόξευσης.

Στροφή προς τα σύνθετα υλικά παρατηρείται και στις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες, καθώς κρίνεται αναγκαία η μείωση του βάρους (λόγω διεθνούς αυστηρότερης νομοθεσίας στις εκπομπές καυσαερίων και της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου) και η αύξηση της απόδοσης των οχημάτων τους. Επιπλέον, το αισθητικό αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται στα καλούπια με καλό φινιρίσμα επιφανείας (smooth molded) κάνει ακόμα πιο ελκυστική τη χρήση σύνθετων υλικών. Καθώς το κόστος είναι σημαντική παράμετρος για τα εμπορικά μέσα μεταφοράς, τα σύνθετα προτιμώνται σε αρκετές εφαρμογές επειδή μειώνουν το βάρος και το

κόστος συντήρησης. Συνήθως, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι γυαλί - πολυουρεθάνη κατασκευασμένα με καλούπωμα υγρό ή υπό πίεση (liquid or compression molding) και γυαλί - πολυεστέρας κατασκευασμένα με καλούπωμα υπό πίεση. Εδώ και καιρό χρησιμοποιούνται ίνες από γυαλί σε οχήματα, που η χρήση τους είναι κυρίως ψυχαγωγική, τόσο για την αυξημένη αντοχή όσο και για την εξοικονόμηση σε βάρος, ειδικά σε σχέση με τα μέταλλα. Το προϊόν είναι συνήθως σε μορφή γυαλιού SMC το οποίο παράγεται είτε με καλούπωμα με συμπίεση είτε με έγχυση (compression or injection molding).

Ένα από τα βασικότερα θέματα στη ναυπηγική βιομηχανία είναι το κόστος συντήρησης των διαφόρων εξαρτημάτων και δομών. Τα σύνθετα, αφού δεν διαβρώνονται, όπως τα μέταλλα, και δεν σαπίζουν, όπως το ξύλο, βοηθούν στην ελαχιστοποίηση αυτών των προβλημάτων. Ίνες γυαλιού από πολυεστερικές ή βινυλεστερικές ρητίνες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σκελετών πλοίων, από μικρά αλιευτικά έως και μεγάλα αγωνιστικά γιοτ. Ακόμα και τα κατάρτια τους παράγονται συνήθως από ίνες carbon. Ένα ακόμα παράδειγμα εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι οι μπουκάλες καταδύσεων, καθώς έτσι μπορούν να συγκρατούν περισσότερο αέρα και παράλληλα απαιτούν λιγότερη συντήρηση από τις αντίστοιχες μεταλλικές. Σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται μέχρι και σε τζετ σκι και ρυμουλκά πλοίων για ελαχιστοποίηση του βάρους και μείωση της διάβρωσης.

Οι εφαρμογές δεν περιορίζονται όμως μόνο στις βιομηχανίες των μέσων μεταφοράς. Χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης των σύνθετων υλικών στον αθλητισμό είναι η κατασκευή ρακετών τένις από ίνες γυαλιού και οι άξονες μπαστουινιών του γκολφ από ίνες carbon. Οι διεργασίες μπορεί να περιλαμβάνουν καλούπωμα υπό συμπίεση για τις ρακέτες του τένις και περιέλιξη για τους άξονες του γκολφ. Άλλα παραδείγματα χρήσης συνθέτων σε αθλητικές – ψυχαγωγικές εφαρμογές είναι τα πέδιλα του σκι, τα snowboard και οι ιστιοσανίδες. Η χρήση σύνθετων υλικών σε αυτές τις περιπτώσεις αποσκοπούν σε προϊόντα ελαφρύτερα και δυνατότερα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής τους. Συγκεκριμένα, τα snowboard κατασκευάζονται με μια μέθοδο τύπου σάντουιτς (σύνθετη πάνω και κάτω στρώση με κυψελοειδή πυρήνα) για μέγιστη ειδική δυσκαμψία.

Το 2007 ένα ολικά σύνθετο στρατιωτικό τροχοφόρο όχημα υψηλής κινητικότητας για πολλές χρήσεις, παρουσιάστηκε από τις TPI Composites Inc and Armor Holdings Inc, και αποτέλεσε το πρώτο ολικά σύνθετο στρατιωτικό όχημα. Συνεπώς, με την χρήση των σύνθετων υλικών το όχημα είναι σημαντικά ελαφρύτερο. Το 2008, ίνες άνθρακα και DuPont Kevlar (5 φορές δυνατότερο από το ατσάλι) συνδυάστηκαν με θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες για να φτιάξουν στρατιωτικές θήκες μεταφοράς, οι οποίες είναι ελαφρύτερες κατά 30% και με μεγαλύτερη αντοχή.

Μια σχετικά νέα, αλλά ιδιαίτερα συναρπαστική εφαρμογή, είναι η χρήση των σύνθετων για τη βελτίωση των υποδομών των δρόμων και των γεφυρών. Η αυξημένη διάβρωση και η διαρκής συντήρηση και αντικατάσταση που απαιτείται

μπορεί να αντιμετωπιστεί με την υιοθέτηση σύνθετων υλικών στις κατασκευές αυτές.

Τα σύνθετα, χάρη στην αντίστασή τους σε διάβρωση, παρέχουν πολύ μεγαλύτερη ζωή με λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης. Τυπικά υλικά και επεξεργασίες περιλαμβάνουν επισκευές με υγρή εναπόθεση και ανθεκτικά στη διάβρωση προϊόντα διέλασης. Το μπετόν μπορεί να ενισχυθεί με διελασμένους οπλισμούς από υαλονήματα, ενώ ίνες γυαλιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάποια υλικά για ξυλοκέραμα. Η χρήση σύνθετων υλικών έχει επεκταθεί ακόμα και στην κατασκευή πυλώνων ηλεκτρισμού και κολώνων φωτισμού, δεδομένου ότι ο αριθμός των ώριμων ψηλών δέντρων μικραίνει συνεχώς. Οι τεχνικές κατασκευής που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι συνήθως η διέλαση ή η περιέλιξη γυαλιού. Τα πτερύγια για μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι κατασκευασμένα συνήθως από σύνθετα για να βελτιωθεί η απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Θ-1.4.2: Zephyr ανθρακονημάτινο αεροσκάφος που κινείται με ηλιακή ενέργεια.



Θ-1.4.3: Καταμαράν με ανθρακονημάτινο πανί που του επιτρέπει ταχύτητες των 59 km/h.



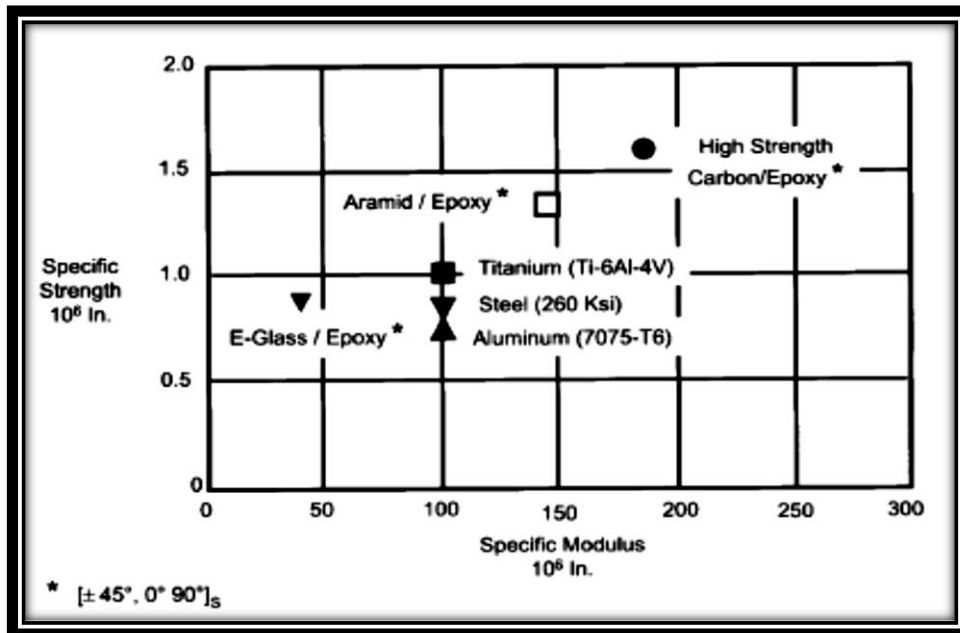
Θ-1.4.4: Specialized-McLaren Venge, το ποδήλατο αυτό δημιουργήθηκε από την συνεργασία της Specialized με την McLaren.

Εκτός από την εξέλιξη στην τεχνολογία των υλικών, η εξέλιξη των υπολογιστών και των προγραμμάτων σχεδίασης άλλαξε ριζικά την μορφή όλων των κατασκευών και τις διαδικασίες παραγωγής τους. [1.2]

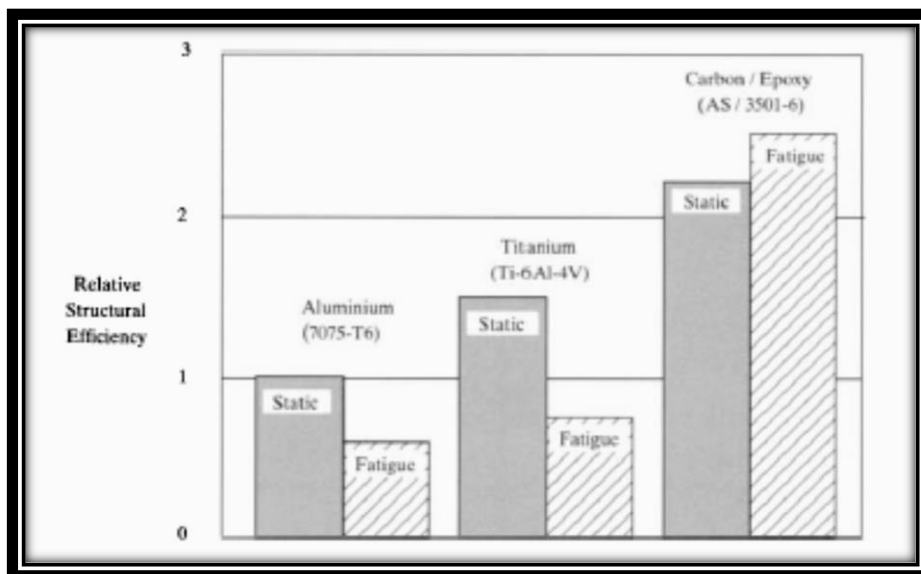
1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών

Τα πλεονεκτήματα των σύνθετων είναι πολλά, περιλαμβάνοντας το μικρότερο βάρος, την δυνατότητα προσαρμογής της διαστρωμάτωσης για βέλτιστη αντοχή και δυσκαμψία, βελτιωμένη διάρκεια κόπωσης (fatigue life), αντίσταση στην διάβρωση και με καλή πρακτική σχεδιασμού, μειωμένο κόστος συναρμολόγησης χάρη στα λιγότερα λεπτομερή εξαρτήματα και συνδέσμους.

Η ειδική αντοχή (specific strength) $(\frac{\text{Δύναμη}}{\text{Πυκνότητα}})$ και το ειδική δυσκαμψία (modulus) $(\frac{\text{Μέτρο ελαστικότητας}}{\text{Πυκνότητα}})$ ινών υψηλής δύναμης, ειδικά άνθρακα, είναι υψηλότερα εκείνων άλλων συμβατών μεταλλικών κραμάτων αεροναυπηγικής (Εικόνα Θ-1.5.1). [Manufacturing Processes for Advanced Composites F.C. Campbell]. Αυτό μεταφράζεται σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση βάρους, που έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση, υψηλότερο ωφέλιμο φορτίο, ευρύτερο φάσμα και εξοικονόμηση καυσίμου. Η δομική αποδοτικότητα carbon/epoxy, Ti-6Al-4V και 7075-T6 αλουμινίου συγκρίνονται συνολικά στην Εικόνα Θ-1.5.2. Στο Πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφοροι παράγοντες που πρέπει να έχει ο μηχανικός υπόψιν του για την σωστή επιλογή, ανά πεδίο εφαρμογής και περίπτωση, των χαρακτηριστικών του σύνθετου υλικού.



Θ-1.5.1: Σύγκριση ειδικών ιδιοτήτων.



Θ-1.5.2: Σχετική δομική αποδοτικότητα υλικών αεροσκαφών.

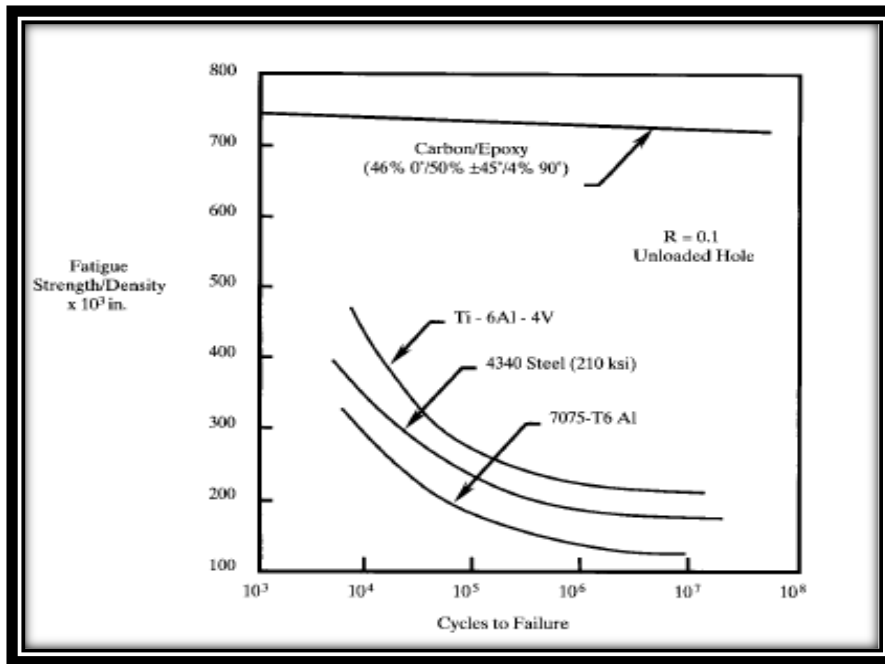
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Συνήθεις αντισταθμιστικοί παράγοντες (trade-offs) επιλογής σύνθετων υλικών

Απόφαση σχεδιασμού	Συνήθη trade-offs	Τυπικά χαμηλότερο κόστος	Τυπικά υψηλότερο κόστος
Τύπος ίνας	Κόστος, δύναμη, ακαμψία (stiffness), πυκνότητα (βάρος),	E-glass	Carbon

	αντοχή σε πρόσκρουση (impact strength), ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity), περιβαλλοντική σταθερότητα (environmental stability), διάβρωση (corrosion), θερμική διαστολή (thermal expansion)		
Μέγεθος δέσμης (σε περίπτωση που έχει επιλεγεί carbon)	Κόστος, Όγκος ίνας (fiber volume), βελτιωμένος εμποτισμός ίνας (fiber wet-out), δομική απόδοση (structural efficiency) (μείωση πάχους διαστρωμάτωσης), επιφανειακό φινίρισμα (surface finish)	12K tow	3K tow
Modulus (μέτρο ελαστικότητας) ίνας (σε περίπτωση που έχει επιλεγεί carbon)	Κόστος, ακαμψία (stiffness), βάρος, ψαθυρότητα (brittleness)	Carbon με χαμηλότερο modulus	Carbon με υψηλότερο modulus
Μορφή ίνας (συνεχής- ασυνεχής, continuous, discontinuous)	Κόστος, δύναμη, βάρος, όγκος ίνας (fiber volume), πολυπλοκότητα σχεδιασμού (design complexity)	Τυχαία, ασυνεχής	Προσανατολισμένη και συνεχής
Μήτρα (matrix)	Κόστος, θερμοκρασία λειτουργίας (service temperature), Δύναμη συμπίεσης (compressive strength), διατμητικές δυνάμεις μεταξύ στρώσεων (interlaminar shear), περιβαλλοντική απόδοση (environmental performance) (αντίσταση ρευστού, Σταθερότητα σε UV, απορρόφηση υγρασίας), αντοχή σε καταπόνηση (damage tolerance), χρόνος ζωής (shelf life), επεξεργασιμότητα (processability), θερμική	Βινυλεστερική και πολυεστερική	Για υψηλή θερμοκρασία-πολυαμιδική Για χαμηλή-μέση θερμοκρασία-εποξική Για σκληρότητα (toughness)-σκληρυμένη εποξική ρητίνη (εξαρτάται πως ορίζεται ως «υψηλότερη» απόδοση, υψηλή θερμοκρασία, σκληρότητα και

	διαστολή (thermal expansion)		ανώτερες μηχανικές ιδιότητες)
Μορφή σύνθετου υλικού	Κόστος (υλικού και εργασίας), συμβατότητα επεξεργασίας (process compatibility), έλεγχος όγκου ίνας (fiber volume control), χειρισμός υλικού (material handling), εμποτισμός ινών (fiber wet-out), υπολείμματα υλικού (material scrap)	Μορφή βάσης-Καθαρή Ρητίνη / Προνήματα	Προ-εμποτισμένο (Prepreg) (Η μορφή του υλικού δεν καθοδηγείται από την απόδοση, αλλά συνήθως καθορίζεται από την διαδικασία κατασκευής)

Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η αεροπορική βιομηχανία είναι η διάβρωση των κραμάτων αλουμινίου και το σημαντικό κόστος που προκύπτει από την ανάγκη συντήρησής τους, τόσο για εμπορικά όσο και για στρατιωτικά αεροσκάφη. Σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων σε κόστος συντήρησης, ωστόσο, μπορεί να προκύψει εάν χρησιμοποιηθούν σύνθετα υλικά, λόγω της αντίστασής τους σε διάβρωση. Τα σύνθετα υλικά από carbon fiber προκαλούν γαλβανική διάβρωση του αλουμινίου, αν οι ίνες εναποτεθούν σε άμεση επαφή με την μεταλλική επιφάνεια. Το πρόβλημα αυτό, όμως, εξαλείφεται αν συνδεθεί ηλεκτρική μόνωση υφάσματος από γυαλί σε όλες τις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το αλουμίνιο. Η σύγκριση της αντοχής σε κόπωση των σύνθετων σε σχέση με αυτή των μετάλλων υψηλής αντοχής φαίνεται στην επόμενη εικόνα Θ-1.5.3. Όσο χρησιμοποιούνται λογικά επίπεδα τάσεων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, η κόπωση των σύνθετων από carbon fiber δεν θα αποτελέσει πρόβλημα.



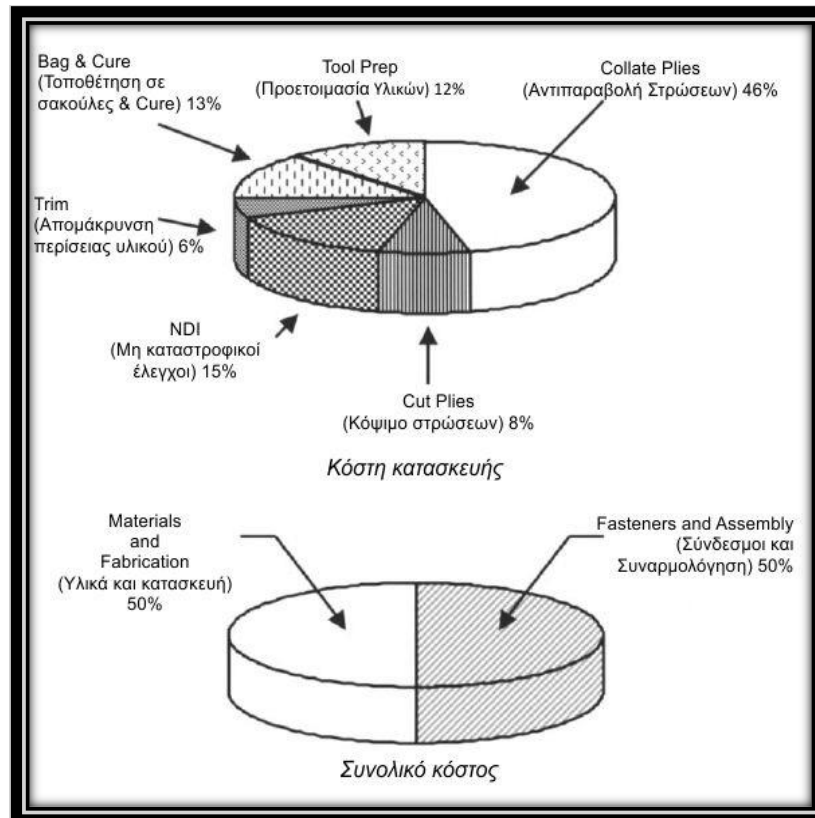
Θ-1.5.3: Ιδιότητες κόπωσης υλικών αεροδιαστημικής.

Το 50% περίπου του κόστους ενός πλαισίου αεροσκάφους προέρχεται από τη συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων. Με τη χρήση σύνθετων υλικών σε αυτές τις κατασκευές, επειδή ακριβώς μπορούν να συνδυαστούν πολύπλοκα εξαρτήματα σε μία μόνο κατασκευή, μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των συνδέσμων και οι εργασίες συναρμολόγησης. Ο συνδυασμός των διάφορων εξαρτημάτων μπορεί να γίνει είτε κατά το αρχικό cure είτε κατά τη δευτερογενή σύνδεση με κόλλημα (adhesive bonding).

Τα σύνθετα υλικά, παρά τα τεράστια οφέλη που έχουν στις κατασκευές, εμφανίζουν και κάποια πολύ σημαντικά μειονεκτήματα. Το πιο βασικό είναι το υψηλό κόστος πρώτης ύλης. Επιπλέον, επισύρουν υψηλά κόστη κατά τη συναρμολόγηση αλλά και την παραγωγή τους. Σε πιο μηχανικό επίπεδο, η υγρασία και η αυξημένη θερμοκρασία επηρεάζουν δυσμενώς τα υλικά αυτά. Επίσης πολύ σημαντική είναι η αδυναμία τους σε φορτίσεις κατά διευθύνσεις «εκτός επιπέδου» (out of plane), αφού τότε το πρωτεύον φορτίο παραλαμβάνεται από τη μήτρα. Ακόμα, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε σημεία όπου υπάρχουν σύνθετες καταπονήσεις (π.χ. σε μούφες (lugs) και σε ενώσεις (fittings) - εξαρτημάτων). Τα σύνθετα υλικά είναι επιρρεπή σε καταπόνηση και αστοχία από κρούση και αποκόλληση στρώσεων (delamination) ή διαχωρισμό αυτών (ply separations). Τελικά, είναι πιο δύσκολο να επισκευαστούν απ' ό,τι οι αντίστοιχες μεταλλικές δομές, χωρίς όμως αυτό να είναι και αδύνατο.

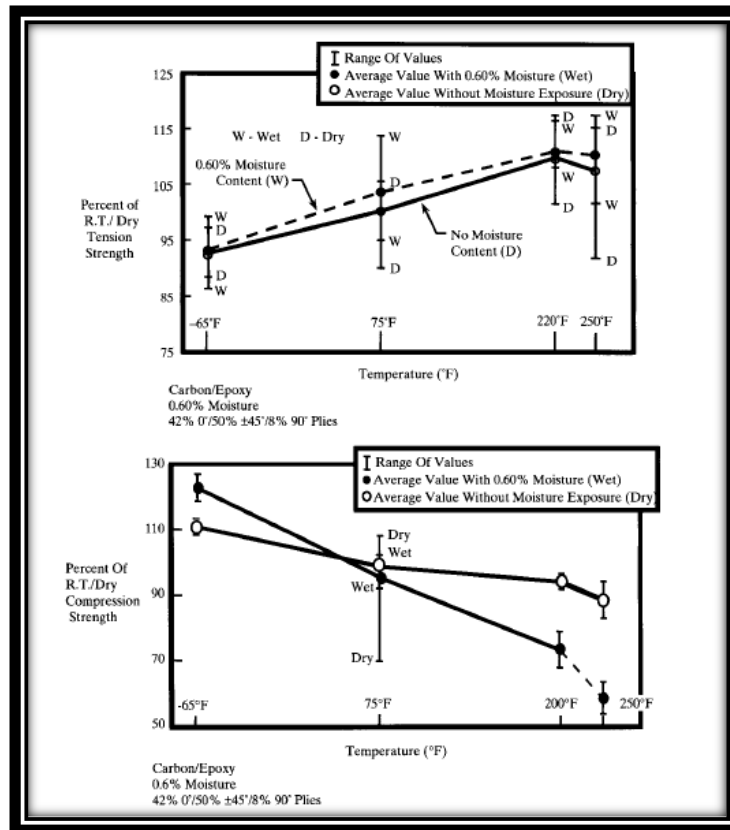
Κατά την παραγωγή ενός συμβατικού τεμαχίου από σύνθετα υλικά με χειρωνακτικό τρόπο (hand lay-up), το μεγαλύτερο κόστος εντοπίζεται στη διαστρωμάτωση – αντιπαραβολή των στρώσεων (collating). Ανάλογα με την

πολυπλοκότητα του τεμαχίου, το κόστος αυτό κυμαίνεται μεταξύ 40-60% του κόστους παραγωγής. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η θερμική επεξεργασία ή συγκόλληση ενός αριθμού εξαρτημάτων μαζί είναι ένα από τα ενδεχόμενα πλεονεκτήματα των σύνθετων, καθώς έτσι μειώνεται το κόστος συναρμολόγησης και ο αριθμός των απαιτούμενων συνδέσμων. [1.2]



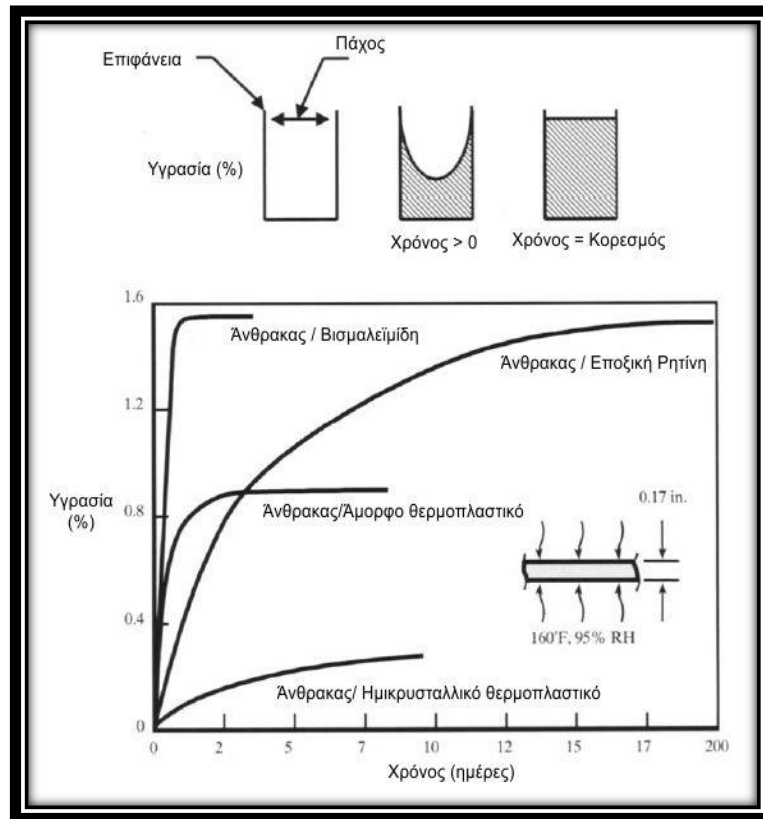
Θ-1.5.4: Κόστη για σύνθετα υλικά.

Η θερμοκρασία είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός σύνθετου. Τυπικά, οι ιδιότητες που επηρεάζονται από τη μήτρα μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ οι ιδιότητες που επηρεάζονται από τις ίνες μειώνονται κάπως με την πτώση της θερμοκρασίας. Οι επιπτώσεις των χαμηλών θερμοκρασιών δεν είναι όμως τόσο σοβαρές όσο η επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στις ιδιότητες που επηρεάζονται από τη μήτρα. Γενικά, οι παράμετροι σχεδιασμού για σύνθετο υλικό carbon/epoxy είναι ψυχρός/ξηρός εφελκυσμός και θερμή/υγρή συμπίεση (hot/wet compression).



Θ-1.5.5: Επίδραση θερμοκρασίας και υγρασίας στην αντοχή του carbon/epoxy.

Το υλικό της μήτρας και η σχετική υγρασία είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το ποσό απορροφημένης υγρασίας, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Ο ρυθμός απορρόφησης υγρασίας επιταχύνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η απορροφημένη αυτή υγρασία μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας, ενώ παράλληλα την διογκώνει. Η διόγκωση αυτή ανακουφίζει τις θερμικές τάσεις από την αυξημένη θερμοκρασία κατά το curing. Τα μεγάλα πλαίσια τα οποία είναι πακτωμένα στις άκρες τους μπορούν να υποστούν λυγισμό (buckling) εξαιτίας αυτών των μεγάλων τάσεων διόγκωσης. Επιπλέον, μπορούν να προκληθούν ρωγμές στη μήτρα κατά τη διάρκεια κύκλων ψύξης/απόψυξης, αφού η απορροφημένη υγρασία διαστέλλεται κατά την απόψυξη. Σε περιπτώσεις που η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα (υπερακοντίσεις, thermal spikes), η υγρασία αυτή μετατρέπεται σε ατμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πιθανή διαστρωματική αποκόλληση, όταν η πίεση του εσωτερικού ατμού υπερβεί την αντοχή σε εφελκυσμό κατά το επίπεδο του σύνθετου. [1.2]

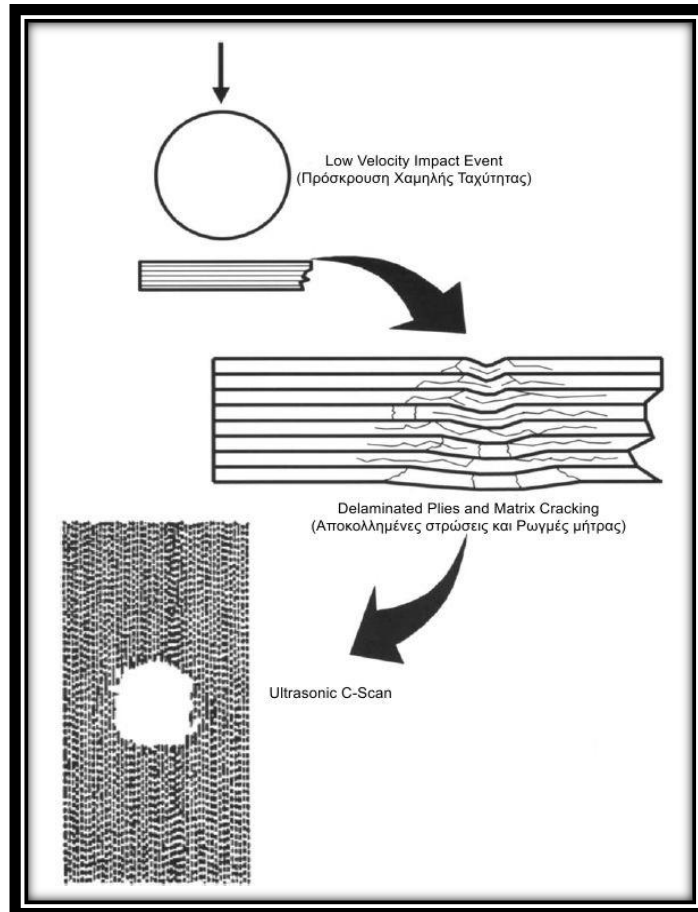


Θ-1.5.6: Απορρόφηση υγρασίας για πολυμερή σύνθετα.

Διαστρωματική αποκόλληση μπορεί να συμβεί στα σύνθετα κατά την παραγωγή, τη συναρμολόγηση ή ακόμα και κατά τη λειτουργία τους. Κατά την παραγωγή, ένα από τα πιο πιθανά λάθη είναι η παραμονή μέρους του πλαστικού καλύμματος που έχουν τα προ-εμποτισμένα φύλλα ανθρακονημάτινου υφάσματος (prepreg) μέσα στη διαστρωμάτωση. Αποκολλήσεις μπορούν να προκληθούν επίσης κατά τη συναρμολόγηση εξαιτίας ακατάλληλων χειρισμών του τεμαχίου ή λάθος εγκατεστημένων συνδέσμων. Εν λειτουργία, καταπονήσεις από χαμηλής ταχύτητας πρόσκρουση (LVID) (low-velocity-impact damage) από εργαλεία που έχουν πέσει ή από φουρκέτες περονοφόρων, που λειτουργούν εντός του αεροσκάφους, μπορεί να προκαλέσουν φθορά. Ακόμα και αν εμφανιστεί ως ένα μικρό σημάδι στην επιφάνεια, η φθορά μπορεί να διαδίδεται δια μέσου των στρώσεων και να σχηματίζει ένα πολύπλοκο σύστημα αποκολλήσεων και ρωγμών στη μήτρα, όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα. Η διαστρωματική αποκόλληση, ανάλογα με το μέγεθός της, ενδέχεται να μειώσει τη στατική αντοχή, την αντοχή σε κόπωση και την αντοχή σε buckling. Επιπλέον, αν το μέγεθός της είναι αρκετά μεγάλο, μπορεί να επεκταθεί κάτω από τη φόρτιση κόπωσης.

Τυπικά, η ρητίνη είναι αυτή που καθορίζει την αντοχή σε καταπόνηση. Σημαντική βελτίωση στην αντίσταση σε καταπόνηση από πρόσκρουση παρατηρείται όταν επιλέγεται σκληρυμένη ρητίνη. Οι ίνες από αραμίδιο, επιπρόσθετα, εμφανίζουν

εξαιρετική αντοχή στις καταπονήσεις. Κατά τη διάρκεια της φάσης του σχεδιασμού, είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται το ενδεχόμενο της διαστρωματικής αποκόλλησης και να γίνεται συντηρητική χρήση τάσεων σχεδιασμού, ούτως ώστε δομές που έχουν υποστεί ζημιές να μπορούν να επισκευαστούν. [1.2]



Θ-1.5.7: Αποκολλήσεις στρώσεων (delaminations) και ρωγμές στην μήτρα (matrix cracking) εξαιτίας φθοράς από πρόσκρουση.

1.6 Είδη σύνθετων υλικών

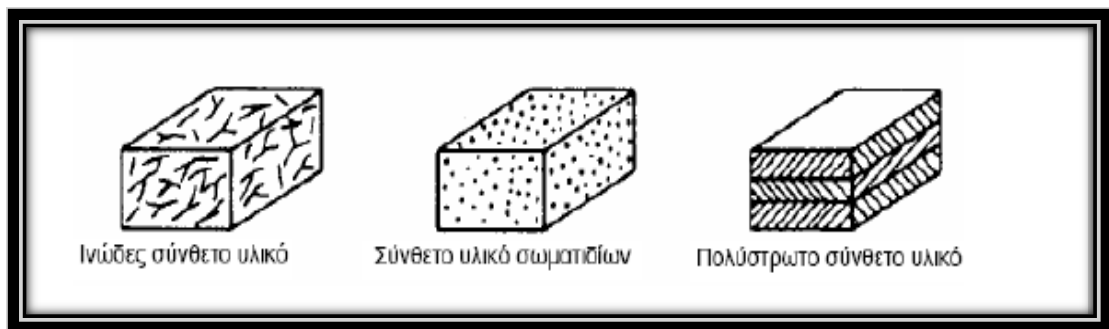
Τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, βάσει της μορφής του συστατικού ενίσχυσης:

- Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη (fiber reinforced composites).
- Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια – σφαιρικά, κυβικά, νιφάδες κλπ. (particulate composites).

- Στρωματικά ή πολύστρωτα σύνθετα υλικά, τα οποία αποτελούνται από στρώσεις ενισχυτικών υλικών συγκεκριμένης διεύθυνσης ενωμένες με κάποιο συνδετικό υλικό (laminar composites).

Στην παρούσα εργασία, τα πολύστρωτα υλικά αποτελούν το κύριο ενδιαφέρον καθώς χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των τελικών δοκιμίων.

Οι στρώσεις ενός πολύστρωτου σύνθετου αποτελούνται συνήθως από νήματα τα οποία δημιουργούν ένα φύλλο υλικού. Τα φύλλα αυτά, στα οποία τα νήματα ράβονται, κολλώνται ή πλέκονται μεταξύ τους, τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και συνδέονται με ρητίνη. Η ρητίνη μπαίνει ανάμεσα σε κάθε φύλλο για να τα συγκρατεί και να αυξήσει τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού.



Θ-1.6.1: Είδη σύνθετων υλικών ανάλογα με τη μορφή.

1.7 Ιδιότητες σύνθετων υλικών

1.7.1 Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε, οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής ως προς το βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας ως προς το βάρος. Επίσης, τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ενισχυμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ενισχυμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης – παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο που τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, οι ίνες γενικά συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύριο φορέα μεταφοράς του

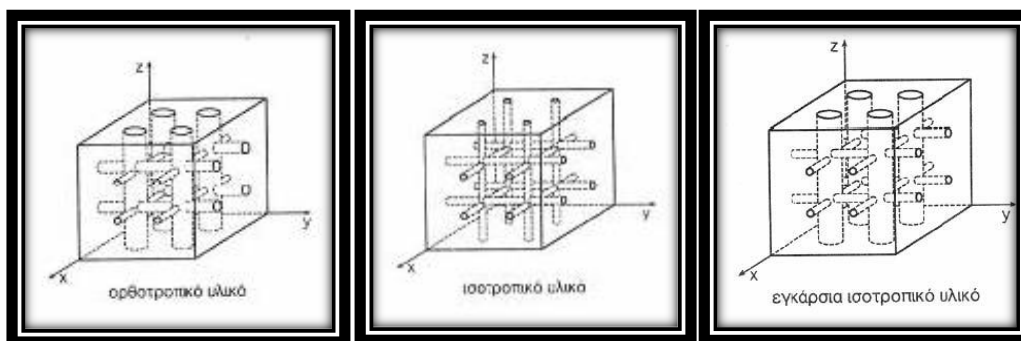
φορτίου, πολύ σπάνια τα ενισχυμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Αντίθετα, η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

1.7.2 Μακροσκοπική ανάλυση

Ισοτροπικότητα – Ανισοτροπικότητα

Η πλειονότητα των συμβατικών κατασκευαστικών υλικών είναι ομογενή και ισότροπα. Ομοιογενές χαρακτηρίζεται ένα σώμα στο οποίο οι ιδιότητες του υλικού του διατηρούν τις ίδιες τιμές ανεξαρτήτως θέσεως εντός του σώματος. Αντίστοιχα, ισότροπο χαρακτηρίζεται ένα σώμα στο οποίο οι ιδιότητες του υλικού του παραμένουν ίδιες ανεξαρτήτως διεύθυνσης ή προσανατολισμού.

Τα σύνθετα υλικά κατά κανόνα είναι ανομοιογενή και ανισότροπα, τις περισσότερες φορές ορθοτροπικά. Ως ανομοιογενές χαρακτηρίζεται ένα σώμα στο οποίο οι ιδιότητες του υλικού του είναι συνάρτηση της θέσεως εντός του σώματος και ως ανισότροπο χαρακτηρίζεται ένα σώμα όταν οι ιδιότητες του υλικού του εξαρτώνται από τη διεύθυνση ή τον προσανατολισμό. Ορθοτροπικό θεωρείται ένα σώμα όταν οι ιδιότητες του υλικού του είναι διαφορετικές στις τρεις διευθύνσεις του καρτεσιανού συστήματος, έχουν όμως τρία επίπεδα συμμετρίας, που ορίζονται από το καρτεσιανό σύστημα.



Θ-1.7.2.1: Επίπεδα συμμετρίας σύνθετων υλικών.

Μηχανικές ιδιότητες

Από τον συνδυασμό των ιδιοτήτων της μήτρας και των ινών προκύπτουν οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει κάποιες βασικές ιδιότητες των δύο συνηθέστερων τύπων ενισχυμένων πολυμερών υγρής εφαρμογής για

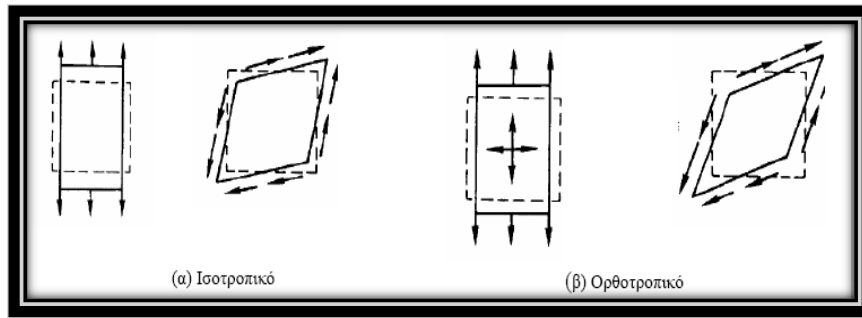
ενίσχυση δομικών στοιχείων, υαλονήματα με εποξική ρητίνη και ανθρακονήματα με εποξική ρητίνη.

Πίνακας 2 - Ενδεικτικές ιδιότητες σύνθετων υλικών ενισχυμένων πολυμερών

Τύπος σύνθετου υλικού	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Πάχος στρώσης (mm)
Υαλονήματα και εποξική ρητίνη	1800-4300	65-80	0.30-1.30
Ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη	2200-4300	200-145	0.12-0.60

Οι μηχανικές ιδιότητες ποσοτικοποιούν τη συμπεριφορά ενός υλικού σε συγκεκριμένες φορτίσεις και χαρακτηρίζουν κάθε κατασκευαστικό υλικό. Το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young {E}, το οποίο σχετίζει τις παραμορφώσεις που παραλαμβάνει ένα υλικό σε σχέση με την κατακόρυφη τάση που δέχεται, ο λόγος Poisson {ν}, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των παραμορφώσεων που λαμβάνει ένα υλικό σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις και το μέτρο διάτμησης {G}, το οποίο δείχνει τις παραμορφώσεις σε σχέση με τη διατμητική τάση που δέχεται ένα υλικό, είναι οι μηχανικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν ένα υλικό.

Συχνά, τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά έχουν τουλάχιστον δύο επίπεδα συμμετρίας στα οποία οι ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση, είναι δηλαδή ορθοτροπικά. Κατά την εφαρμογή τάσης προκαλείται διαφορετική παραμόρφωση στη διεύθυνση της φόρτισης και στην κάθετη σε αυτή διεύθυνση. Επιπλέον, το μέτρο διάτμησης είναι ανεξάρτητο του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson. Τα ορθοτροπικά υλικά χαρακτηρίζονται από εννέα μεγέθη: E_{xx} , E_{yy} , E_{zz} , ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{xz} , G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} , τρία δηλαδή σε κάθε διεύθυνση. E_{xy} , E_{yz} , E_{xz} . Στα ορθοτροπικά υλικά δεν παρουσιάζεται συσχέτιση μεταξύ διατμητικών τάσεων – ορθών παραμορφώσεων ($\tau - \epsilon$), διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων σε διαφορετικά επίπεδα καθώς και ορθών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων ($\sigma - \gamma$). Η εικόνα Θ-1.7.2.2 παρουσιάζει τη συμπεριφορά ενός ισοτροπικού (α) και ενός ορθοτροπικού (β) υλικού σε ορθή τάση και διάτμηση.



Θ-1.7.2.2: Συμπεριφορά σε ορθή τάση και σε διάτμηση ισοτροπικών και ορθοτροπικών υλικών.

Στα σύνθετα υλικά οι σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων ακολουθούν το νόμο του Hooke και είναι γραμμικές. Σε ομοιογενή και ισότροπα υλικά, η σχέση μεταξύ τάσης που επιβάλλεται και της παραμόρφωσης που προκαλείται είναι:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (1-1)$$

Θεωρώντας ότι η πρόσφυση μεταξύ ινών και μήτρας είναι τέλεια, οι ίνες και η μήτρα έχουν κοινή παραμόρφωση όταν το φορτίο ασκείται στη διεύθυνση των ινών ενός μονοδιευθυντικού σύνθετου υλικού. Δηλαδή ισχύει:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (1-2)$$

Η διεύθυνση των ινών υποδεικνύεται με το δείκτη 1, οι ίνες με f και η μήτρα με m. Με βάση τις σχέσεις (3-1) και (3-2) υπολογίζεται:

$$\sigma_f = E_f * \varepsilon_1 \quad (1-3)$$

$$\sigma_m = E_m * \varepsilon_1 \quad (1-4)$$

Οι ίνες φέρουν το μεγαλύτερο μέρος του εξωτερικού φορτίου δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας των ινών είναι πολύ μεγαλύτερο αυτού της μήτρας. Η μέση ορθή τάση υπολογίζεται ως:

$$\sigma = P / A \quad (1-5)$$

όπου P η εφαρμοζόμενη δύναμη και A η διατομή του σύνθετου υλικού.

Το φορτίο P μοιράζεται στις ίνες και τη μήτρα, δηλαδή ισχύει ότι $P = P_f + P_m$ ενώ για κάθε φάση ισχύει ότι:

$$P_f = \sigma_f * A_f \quad \text{και} \quad P_m = \sigma_m * A_m$$

$$\text{Άρα } P = \sigma_f * A_f + \sigma_m * A_m$$

P_f και P_m είναι η δύναμη επί των ινών και της μήτρας αντίστοιχα και A_f και A_m η καθαρή διατομή ινών και της μήτρας αντίστοιχα στην διατομή του δοκιμίου.

Στη διεύθυνση 1 που είναι κάθετη στη διατομή A η τάση είναι:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (1-6)$$

με ε_1 να είναι η μηχανική παραμόρφωση του συνθέτου υλικού στη διεύθυνση 1 και E_1 να είναι το μέτρο ελαστικότητας στην ίδια διεύθυνση. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1-5), (1-6) και (1-3) το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού στη διεύθυνση 1 προσδιορίζεται ως:

$$E_1 = E_f * (A_f/A) + E_m * (A_m/A) + E_f * V_f + E_m * V_m = E_f * V_f + E_m * (1-V_f)$$

που είναι ουσιαστικά ο νόμος των μίξεων. Ωστόσο εξαιτίας των διαφορετικών λόγων Poisson μήτρας και ινών, παρατηρείται μια απόκλιση κοντά στο 2% από πειραματικές μετρήσεις.

Παρόμοια, προσδιορίζεται και το εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας E_2 :

$$E_2 = (E_f * E_m) / (E_f * V_m + E_m * V_f)$$

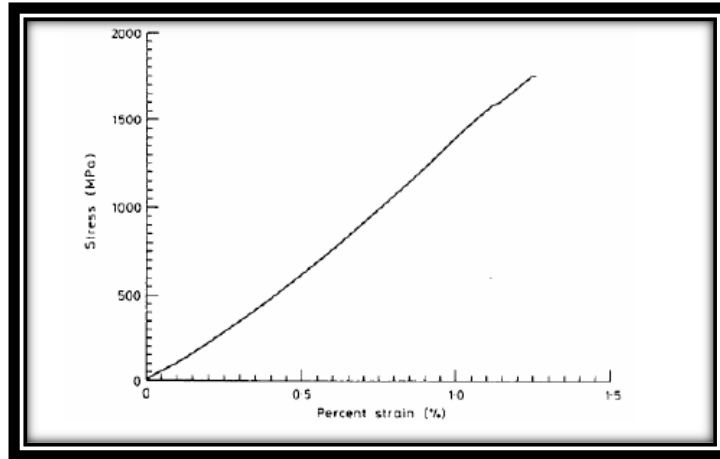
Αντίστοιχα, βασισμένο στις ίδιες υποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή του E_1 , ο λόγος Poisson ν_{12} υπολογίζεται ως:

$$\nu_{12} = \nu_f * V_f + \nu_m * V_m \quad (1-7)$$

Τέλος, το μέτρο διάτμησης G_{12} μπορεί να προσδιοριστεί θεωρώντας ότι για διάτμηση στο επίπεδο 12 έχουμε ίδιες διατμητικές τάσεις σε ίνα και μήτρα, ενώ παράλληλα πρέπει να αγνοηθεί η μη γραμμική συμπεριφορά των ινωδών υλικών σε διάτμηση και να υποτεθεί ως γραμμική. Έτσι προκύπτει ότι:

$$G_{12} = (G_f * G_m) / (G_f * V_m + G_m * V_f) \quad (1-8)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν μόνο ελαστική συμπεριφορά. Συνεπώς, κατά τη φόρτιση, η αύξηση των παραμορφώσεων είναι αναλογική της αύξησης των τάσεων έως τη θραύση, πράγμα που είναι εμφανές και στο σχήμα Θ-1.7.2.3 όπου απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων σε σύνθετο υλικό. Έτσι, τα σύνθετα υλικά κατατάσσονται ως ψαθυρά.



Θ-1.7.2.3: Τυπική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων μονοαξονικού σύνθετου υλικού.

1.7.3 Μικροσκοπική ανάλυση

Οι γεωμετρικές παράμετροι όπως διάμετρος, μήκος, περιεκτικότητα κατ' όγκο των ινών V_f , ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού της μήτρας καθορίζουν και τις τελικές ιδιότητες ενός ινώδους σύνθετου υλικού.

α. Συνεχείς ίνες σε μονοδιάστατη στρώση

Σε μονοδιάστατη στρώση, οι ίνες διατάσσονται παράλληλα η μία δίπλα στην άλλη. Από τη συνάρτηση της διαμέτρου των ινών και της μεταξύ τους απόστασης προκύπτει αναλυτικά η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών V_f , η οποία μεγιστοποιείται όταν οι παράλληλες ίνες εφάπτονται. Ακόμα και όταν η περιεκτικότητα είναι χαμηλή, π.χ. για $V_f = 0.3$, παρατηρείται ότι η απόσταση διπλανών ινών είναι μικρότερη της διαμέτρου τους. Στην πράξη, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα που μπορεί να επιτευχθεί είναι της τάξης του $V_f = 0.7$. Η χαμηλότερη περιεκτικότητα ινών σε ένα ινώδες σύνθετο σημαίνει χειρότερη ευθυγράμμιση των ινών μέσα στη στρώση. Από τη συνάρτηση της κατ' όγκο περιεκτικότητας και της πυκνότητας των συστατικών προκύπτει η κατά βάρος περιεκτικότητα W_f :

$$W_f = \rho_f \cdot V_f / (\rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m) \quad (1-9)$$

όπου $V_m = 1 - V_f$, με τους δείκτες f, m να υποδεικνύουν την ίνα (fibre) και την μήτρα (matrix) αντίστοιχα.

β. Πεπλεγμένες συνεχείς ίνες

Πέρα από τη διάμετρο, το μήκος και τη διάταξη των ινών, ένα ύφασμα πεπλεγμένων ινών έχει επιπλέον γεωμετρικές μικρομηχανικές παραμέτρους, όπως το μήκος του κυματισμού του πλέγματος, το πλήθος των ινών ανά δεσμίδα και η γωνία μεταξύ των πεπλεγμένων ινών (συνήθως 90°). Δεδομένων των θηλάκων ρητίνης στα σύνορα της πλέξης, είναι εμφανές ότι η μέγιστη δυνατή κατ' όγκο περιεκτικότητα των πεπλεγμένων σύνθετων υλικών είναι μικρότερη των μονοδιάστατων.

γ. Τυχαία διάταξη ινών

Τυχαία διατεταγμένες ίνες μεγάλου μήκους είτε μεμονωμένες είτε σε δέσμες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή επίπεδων στρώσεων σύνθετου υλικού με τιμές V_f μεταξύ 0.1 και 0.3. Στην περίπτωση μικρού μήκους ινών, το σύνθετο χρειάζεται για τον πλήρη χαρακτηρισμό του μια επιπλέον παράμετρο, την κατανομή του μήκους των ινών. Για την παραγωγή αυτού του τύπου σύνθετου υλικού, αναμειγνύονται με ρητίνη ή θερμοπλαστικό δέσμες μεγάλου μήκους, οι οποίες κατά την ανάμειξη σπάνε λόγω των υψηλών εφελκυστικών και καμπτικών τάσεων που δημιουργούνται από τη ροή της υγρής φάσης μέσω των νηματιδίων.

δ. Διάκενα

Τα διάκενα επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διατμητική και διαστρωματική αντοχή ενός σύνθετου, καθώς έχει διαπιστωθεί ελάττωση της διατμητικής αντοχής έως και 30% όταν τα διάκενα είναι της τάξης του 4%. Τα διάκενα είναι ελλειψοειδούς ή σφαιρικής μορφής και εμφανίζονται είτε παράλληλα στις ίνες μέσα στη στρώση είτε μεταξύ στρώσεων ενός πολύστρωτου. Η παρουσία τους οφείλεται είτε σε παγίδευση αέρα ανάμεσα σε ρητίνη και ίνες ή σε πτητικές ουσίες παραγόμενες κατά τη θερμική κατεργασία θερμοσκληρυνόμενων ρητινών ή κατά την τήξη θερμοπλαστικών. Η κατ' όγκον περιεκτικότητα των διάκενων μπορεί να υπολογιστεί με μη καταστροφικές μεθόδους, όπως η υπερηχητική σάρωση (C-scan), αλλά και με ποσοτική ανάλυση βασισμένη σε μικροφωτογράφιση πλήθους τομών.

ε. Η διεπιφάνεια

Ως διεπιφάνεια ίνας και μήτρας (fibre – matrix interface) θεωρείται η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου, αλλά και η περιοχή στα σύνορα αυτής. Η διεπιφάνεια παρουσιάζει διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες από τη μήτρα και τις ίνες. Παρότι η διεπιφάνεια

θεωρείται μηδενικού πάχους για λόγους θεωρητικής ανάλυσης, στην πραγματικότητα εκτείνεται από μερικά νανόμετρα έως μερικές εκατοντάδες νανόμετρα δημιουργώντας μια ενδιάμεση φάση (interphase) αντί για διεπιφάνεια (interface). Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια των διεργασιών πρόσφυσης ίνας – μήτρας, διάφοροι παράγοντες επενεργούν στη διαφοροποίηση, τοπικά, των ιδιοτήτων και στις δύο πλευρές της διεπιφάνειας λόγω διάχυσης, χημικών αντιδράσεων και διαφόρων θερμικών φαινομένων.

στ. Η μεταφορά του φορτίου από τη μήτρα στην ίνα

Στα σημεία ασυνέχειας του σύνθετου υλικού, όπως τα άκρα των ινών, οι ρωγμές, οι εγκοπές και τα σημεία θραύσης, ενεργοποιείται ο μηχανισμός μεταβίβασης των τάσεων από τη μήτρα στην ίνα μέσω της διεπιφάνειας. Εξωτερικά φορτία και θερμικές τάσεις δημιουργούν στη διεπιφάνεια ινών και μήτρας ένα τασικό πεδίο, του οποίου η ένταση εξαρτάται από τη διάταξη των ινών. Κατά την εφαρμογή τάσης στη διεύθυνση ευθυγραμμισμένων ινών, η ικανότητα της διεπιφάνειας να αντέξει τις αναπτυσσόμενες στην περιοχή μετατοπίσεις καθορίζει την ακεραιότητα του σύνθετου. Η παραδοχή ότι οι ίνες φέρουν το αξονικό φορτίο ενώ η μήτρα το διατμητικό βασίζεται στην προϋπόθεση ότι η δυσκαμψία της μήτρας είναι συγκριτικά πολύ μικρότερη αυτής των ινών.

1.8 Ίνες (fibers)

1.8.1 Ο ρόλος της ίνας

Οι ίνες χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά για να προσδώσουν δύναμη και ακαμψία. Συνολικά, οι ίνες υψηλής αντοχής έχουν μεγάλες διακυμάνσεις στην αντοχή, είναι ψαθυρές και έχουν ελαστική συμπεριφορά με καθόλου ή ελάχιστη διαρροή. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των κυριότερων ινών υψηλής αντοχής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. [1.2]

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών υψηλής αντοχής

Ίνα	Πυκνότητα ($\frac{lb}{in^3} = 27679,9 \frac{kg}{m^3}$)	Αντοχή σε εφελκυσμό ($ksi=6,895 MPa$)	Μέτρο ελαστικότητας ($msi=6894,757 M$)	Παραμόρφωση έως αστοχία (Strain to failure) (%)	Διάμετρος ($mil=0,0254mm$)	Συντελεστής θερμικής διαστολής ($\frac{10^{-6} \cdot in}{in \cdot ^\circ F} = \frac{1,8 \cdot 10^{-6}}{K}$)
E-glass	0,09	500	11,0	4,8	0,36	2,8
S-glass	0,092	650	12,6	5,6	0,36	1,3
Quartz	0,079	490	10,0	5,0	0,35	1,0
Aramid (Kevlar 49)	0,052	550	19,0	2,8	0,47	-1,1
Spectra 1000	0,035	450	25,0	0,7	1,00	-1,0
Carbon (AS4)	0,065	530	33,0	1,5	0,32	-0,2
Carbon (IM-7)	0,064	730	41,0	1,8	0,20	-1,2
Graphite (P- 100)	0,078	350	107	0,3	0,43	-1,3
Boron	0,093	520	58,0	0,9	4,00	2,5

1.8.2 Τύποι ινών

Ίνες Υάλου

Οι ίνες ύαλου (glass fibers), έχοντας πολύ καλό λόγο κόστους και μηχανικών ιδιοτήτων, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αγορά. Πρωτοεμφανίστηκαν το 1939 στο εμπόριο και είναι διαθέσιμες σε έξι διαφορετικούς τύπους, δύο από τους οποίους, ο ύαλος-E και ο ύαλος-S, χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών. Παράγονται μηχανικά από γυαλί που τήκεται και το κυριότερο

χαρακτηριστικό όλων των τύπων είναι ότι δεν έχει ούτε ιδιότητες ρευστού αλλά ούτε παρουσιάζει και πλήρως κρυσταλλική δομή. [1.4]

Πίνακας 4 - Ιδιότητες υάλου – E και υάλου – S

Είδος υαλονήματος	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm ³)
Ύαλος – E	2000-3000	70-75	3.0-4.5	2.54
Ύαλος - S	3500-4800	85-90	4.5-5.5	2.48

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4 είναι εμφανές ότι ο ύαλος-S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E. Ωστόσο, είναι περιορισμένη η εφαρμογή του λόγω του υψηλού κόστους του.

Ίνες Πολυαραμιδίου

Οι πρώτες ίνες πολυαραμιδίου κυκλοφόρησαν το 1970 με την εμπορική ονομασία Kevlar, ενώ άλλες γνωστές ονομασίες τους είναι η Nomex και Technora. Πρόκειται για οργανικές ίνες με εξαιρετική αντοχή σε καταπόνηση, χαμηλή πυκνότητα, υψηλή τάση εφελκυσμού αλλά καθόλου καλή απόδοση στη θλίψη. Επιπλέον παρουσιάζουν ευαισθησία στην υπεριώδη ακτινοβολία και πρέπει να περιορίζεται η μακροχρόνια χρήση τους σε θερμοκρασίες κάτω από τους 350° F=449,82 K.

Spectra

Η ίνα Spectra είναι μια οργανική ίνα από εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο, με χαμηλή πυκνότητα, χαμηλή διηλεκτρική σταθερά και εξαιρετική δυνατότητα απόκρυψης από τα radar. Επιπλέον εμφανίζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας και ειδική αντοχή σε θερμοκρασία δωματίου. Παρά την υψηλή της αντοχή σε κρούση, όπως και οι ίνες αραμιδίου, εμφανίζει κακή προσκόλληση στη μήτρα, η οποία όμως μπορεί να βελτιωθεί με κατεργασίες πλάσματος.

Ίνες βορίου και κεραμικές ίνες

Αρκετές άλλες ίνες χρησιμοποιούνται περιστασιακά για σύνθετα πολυμερή. Ίνες από βόριο ήταν οι αυθεντικές ίνες υψηλής απόδοσης πριν αναπτυχθούν οι ίνες από

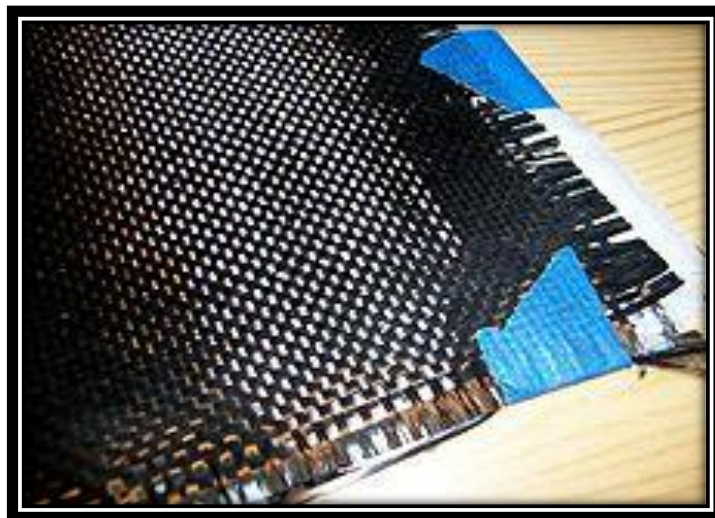
άνθρακα. Είναι ίνες μεγάλης διαμέτρου (0.05-0.2 mm) σε σχέση με τις άλλες ίνες και κατασκευάζονται τραβώντας ένα λεπτό σύρμα βολφραμίου μέσα από ένα μακρύ, λεπτό αντιδραστήριο όπου εναποθέτουμε βόριο με χημικό τρόπο υπό τη μορφή ατμού. Από τη στιγμή που κατασκευάζεται μία ίνα την φορά αντί για χιλιάδες, είναι πολύ ακριβή μέθοδος. Εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, επιδεικνύει εξαιρετικές ιδιότητες στην συμπίεση. Μειονεκτήματά αυτών των ινών είναι ότι δεν προσαρμόζονται καλά σε πολύπλοκα σχήματα και είναι πολύ δύσκολο να κατεργαστούν. [1.4]

Ίνες από άνθρακα και γραφίτη (Carbon and graphite fibers)

Εισαγωγή

Οι ιδιότητες των ινών άνθρακα θα αναπτυχθούν λεπτομερέστερα διότι αυτές θα χρησιμοποιηθούν κατά κύριο λόγο στην παρούσα διατριβή για την κατασκευή δοκιμίων στα διάφορα στάδια της.

Οι ίνες από άνθρακα και γραφίτη είναι οι πιο κυρίαρχες μορφές ίνας σε σύνθετες δομές υψηλής απόδοσης. Οι ίνες από άνθρακα και γραφίτη μπορούν να παραχθούν με ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων, επιδεικνύουν ανώτερη αντοχή σε εφελκυσμό και σε συμπίεση, διαθέτουν υψηλά μέτρα ελαστικότητας, έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά κόπωσης και δεν διαβρώνονται.



Θ-1.8.2.1: Ένα κομμάτι από ύφασμα ανθρακονημάτων.

Ιστορική αναδρομή

Το 1958, ο Dr. Roger Bacon δημιούργησε τα ανθρακονήματα στο Union Carbide Parma Technical Center, που βρίσκεται λίγο έξω από το Cleveland (United States of America), Ohio. Εκείνες οι ίνες είχαν κατασκευαστεί από θερμά νήματα από rayon μέχρι να ανθρακοποιηθούν. Αυτή η επεξεργασία έχει αποδειχθεί αναποτελεσματική, καθώς οι παραγόμενες ίνες περιέχουν μόνο γύρω στο 20% άνθρακα και έχει χαμηλή αντοχή και ελαστικότητα. Στα αρχές του 1960, μια επεξεργασία αναπτύχθηκε, χρησιμοποιώντας πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) ως ακατέργαστο υλικό. Με αυτόν τον τρόπο, παράχθηκε ανθρακόνημα που περιείχε περίπου 55% άνθρακα και πολύ καλύτερες ιδιότητες. Η επεξεργασία μετατροπής του PAN γρήγορα έγινε η πρωταρχική μέθοδος για την παραγωγή ανθρακονημάτων.

Η υψηλή αντοχή του ανθρακονήματος εξακριβώθηκε το 1963 σε μια επεξεργασία που αναπτύχθηκε στο Royal Aircraft Establishment στο Farnborough, Hampshire. Η επεξεργασία αυτή ανακηρύχθηκε ως πατέντα από το Ministry of Defence και στη συνέχεια αδειοδοτήθηκε από το NRDC σε 3 Βρετανικές εταιρίες: Την Rolls-Royce, την Morganite και την Courtaulds. Αυτές ήταν ικανές να εγκαθιδρύσουν ιδιότητες βιομηχανικού ανθρακονήματος για λίγα χρόνια, και η Rolls-Royce πλεονέκτησε στις ιδιότητες του νέου υλικού, με το να ταράξει την Αμερικανική αγορά με την RB-211 μηχανή για αεροπλάνα.

Δυστυχώς, η Rolls-Royce χρησιμοποίησε ανθρακονήματα στα πτερύγια του συμπιεστή της μηχανής, γεγονός το οποίο ήταν ικανό για να καταστραφεί η μηχανή από τις κρούσεις με πουλιά. Αυτό που φαινόταν να είναι ένας πραγματικός Βρετανικός τεχνολογικός θρίαμβος, γρήγορα κατέληξε σε τραγωδία, αφού το φιλόδοξο εγχείρημα της Rolls-Royce για το RB-211 ναυάγησε. Πράγματι, τα προβλήματα της έγιναν τόσο μεγάλα, ώσπου η εταιρία εθνικοποιήθηκε από την κυβέρνηση Edward Heath's το 1971, και το εργοστασιακό συγκρότημα της παραγωγής ανθρακονημάτων πουλήθηκε στην Bristol Composites.

Δεδομένης της περιορισμένης αγοράς για ένα πολύ ακριβό προϊόν ποικίλης ποιότητας, η Morganite αποφάσισε ότι η παραγωγή ανθρακονημάτων ήταν περιφερειακή για τον πυρήνα της επιχείρησής της, αφήνοντας την Courtaulds ως τον μοναδικό μεγάλο κατασκευαστή στην Βρετανία. Η εταιρία αυτή συνέχισε να παράγει ανθρακονήματα, αναπτύσσοντας δύο βασικές αγορές: την αεροδιαστημική και τον εξοπλισμό για τα αθλήματα. Η ταχύτητα της παραγωγής και η ποιότητα των προϊόντων βελτιώθηκαν. Κατά τη διάρκεια των 1980, η Courtaulds συνέχιζε να είναι ο βασικός προμηθευτής των ανθρακονημάτων στην αγορά για τα αγαθά των αθλημάτων, με την Mitsubishi τον σημαντικότερο πελάτη της.

Κατά την διάρκεια του 1970, πειραματικές εργασίες για την εύρεση εναλλακτικών ακατέργαστων πρώτων υλών οδήγησαν στην εισαγωγή των ανθρακονημάτων

κατασκευασμένων από ρητίνη πετρελαίου. Αυτές οι ίνες περιείχαν περίπου 85% άνθρακα και είχαν εξαιρετική αντοχή σε κάμψη.

Εφαρμογές ινών άνθρακα

Οι ιδιότητες του ανθρακονήματος, όπως υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, χαμηλό βάρος και χαμηλή θερμική εκτόνωση το καθιστούν πολύ δημοφιλές υλικό στην αεροδιαστημική, στο πεδίο του πολιτικού μηχανικού, στον στρατιωτικό τομέα, στα αγωνιστικά και μη αθλήματα. Το ανθρακόνημα είναι πολύ ανθεκτικό όταν εφελκύεται ή κάμπτεται, αλλά πολύ αδύναμο σε περίπτωση που δεχθεί φορτίο θλίψης ή εκτεθεί σε μεγάλη κρούση.

Ευρύτατη είναι η χρήση των ανθρακονημάτων στην κατασκευή αγωνιστικών αυτοκινήτων, καθώς, παρά το υψηλό τους κόστος, παρουσιάζουν πολύ χαμηλό βάρος και παράλληλα πολύ μεγάλη αντοχή. Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι κατασκευής που προσδίδουν στα ανθρακονημάτινα τεμάχια πολύ μεγάλη αντοχή στη διεύθυνση που δέχονται φορτία, χωρίς όμως να προσθέτουν ίνες και συνεπώς βάρος, σε διευθύνσεις που δεν αναπτύσσονται τάσεις κατά τη λειτουργία των αυτοκινήτων στα εξαρτήματα αυτά. Επιπλέον αναπτύχθηκαν συγκεκριμένες πλέξεις υφασμάτων ανθρακονημάτων με πολλές διευθύνσεις ινών, δίνοντας έτσι στο τελικό τεμάχιο αντοχή σε όλες τις διευθύνσεις.

Τα ανθρακονήματα αρχίζουν σταδιακά να εμφανίζονται και σε αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής, καθώς ο απαραίτητος εξοπλισμός για την κατασκευή τους είναι πιο εύκολα διαθέσιμος σε σχέση με προηγούμενα χρόνια. Επιπλέον, αυξάνεται ο αριθμός των ανθρώπων που γνωρίζουν πώς να τα χειρίζονται, ενώ το κόστος τους που παλαιότερα θεωρούταν απαγορευτικό πλέον φαίνεται πιο προσιτό.

Τα ανθρακονήματα έχουν αρχίσει να εμφανίζονται και στις κατασκευές, ειδικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, όπου αποτελούν μια εναλλακτική ενίσχυση δομικών υλικών, αλλά και ενίσχυση ήδη υφιστάμενων κατασκευών για αύξηση της αντοχής τους. Στην πρώτη περίπτωση, τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται για ενίσχυση αντί για σίδηρο στο μπετόν, όπου μπορεί μέχρι και να διπλασιάσει την αντοχή και να αυξήσει κατά 10% την ελαστικότητα.

Η ενίσχυση ήδη υπάρχοντων κατασκευών είναι η πιο διαδεδομένη χρήση των ανθρακονημάτων. Συχνά χρησιμοποιούνται για επιδιόρθωση κατεστραμμένων κατασκευών, σεισμική ενίσχυση αλλά και για ενίσχυση παλαιών κατασκευών, όπου αυξάνουν την ικανότητά τους να παραλαμβάνουν και να αντισταθμίζουν φορτία, δεδομένου ότι ήταν αρχικά σχεδιασμένες να αντέχουν χαμηλότερες φορτίσεις, όπως για παράδειγμα παλιές γέφυρες. Με την ενίσχυση παλαιών κατασκευών αποφεύγεται και το υψηλό κόστος αντικατάστασης των προβληματικών αυτών δομών. Τα CFRP υλικά χρησιμοποιούνται επίσης για την αύξηση αντοχής σε διάτμηση

του ενισχυμένου μπετόν. Τυλίγοντας υφάσματα ή τοποθετώντας ίνες στις επιθυμητές περιοχές, όπως κολώνες κτηρίων ή γέφυρες, αυξάνεται η ολκιμότητα τοπικά και η γενική ανθεκτικότητά τους σε κατάρρευση από σεισμούς. Αν η περιοχή ενίσχυσης είναι κυλινδρική, αυξάνεται και η αξονική ικανότητα της κατασκευής.

Το γεγονός, ωστόσο, ότι δεν υπάρχει τυποποίηση αλλά και συγκεκριμένοι εγκεκριμένοι συνδυασμοί ινών και ρητίνης στην αγορά, δημιουργεί αμφισβήτηση μεταξύ των μηχανικών σχετικά με τη χρήση αυτών των υλικών στις κατασκευές. Παρόλα αυτά, παρέχεται η δυνατότητα κατά παραγγελία παραγωγής υλικών με κατάλληλες ιδιότητες ανάλογα με τις επιθυμίες και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Ένας ακόμα τομέας όπου τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται ευρύτατα είναι ο αθλητικός εξοπλισμός. Ρακέτες για τένις, αντιπέρησης και σκουός, σκάφη κωπηλασίας και καλάμια ψαρέματος είναι κάποιες από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές. Ειδική αναφορά αξίζει να γίνει στον ποδηλατικό εξοπλισμό. Τόσο οι σκελετοί όσο και περιφερειακά εξαρτήματα, όπως το τιμόνι, οι ρόδες, οι λαίμοι τιμονιού και σέλλας, η ίδια η σέλλα αλλά και το πιρούνι μπορούν να κατασκευαστούν από ανθρακονήματα. Με προσεκτική επιλογή της πλέξης και της διεύθυνσης των ινών μπορεί να μεγιστοποιηθεί η ελαστικότητα και η αντοχή των εξαρτημάτων αυτών, μειώνοντας παράλληλα το βάρος τους.

Σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται επίσης στην ιατρική, π.χ. ως επιθέματα, στηρίγματα ή ως βοηθήματα σε εγκαύματα ή σε ασθένειες όπως η Charcot-Marie-Tooth disease και άλλες διαταραχές του νευρολογικού συστήματος, σε μουσικά όργανα και τα εξαρτήματά τους, π.χ. δοξάρι για βιολί, πένα για κιθάρα, γκάντα, μαντολίνο και τσέλο, σε υποδήματα, π.χ. πάτοι αθλητικών παπουτσιών, αλλά και στη βιομηχανία όπλων, όπου αντικαθιστούν τμήματα πυροβόλων όπλων για μείωση του συνολικού τους βάρους.

Τέλος, μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των ανθρακονημάτων είναι η χρήση τους στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Ένα παράδειγμα που αποδεικνύει τα σημαντικά οφέλη των ανθρακονημάτων έναντι παραδοσιακών υλικών, όπως τα φύλλα αλουμινίου, είναι το ανθρακονημάτινο rudder στο του A310 Airbus, που είναι η κινητή επιφάνεια ελέγχου προσαρμοσμένη όρθια την πρύμνητου αεροσκάφους. Σε σχέση με το παραδοσιακό rudder, παρουσιάζονται τα εξής πλεονεκτήματα:

- 25% μείωση βάρους
- 95% μείωση του αριθμού των εξαρτημάτων από τον συνδυασμό μερών και δομών σε απλούστερα διαμορφωμένα τμήματα.
- Συνολική μείωση σε παραγωγικά κόστη, λόγω της μείωσης των εξαρτημάτων και συνεπώς του κόστους παραγωγής τους, αλλά και σε λειτουργικά κόστη, λόγω της μείωσης του βάρους και συνεπώς της εξοικονόμησης καυσίμων.



Θ-1.8.2.2: Ουρά από RC ελικόπτερο, κατασκευασμένη από CFRP.

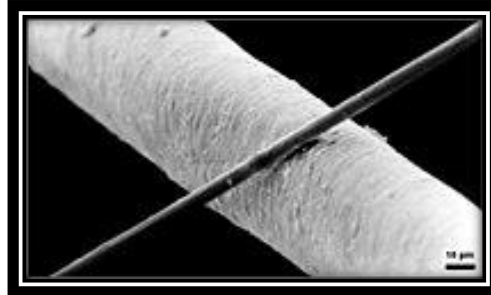
Δομή και ιδιότητες

Το ανθρακόνημα είναι ένα υλικό αποτελούμενο από υπερβολικά λεπτές ίνες, περίπου 0.005–0.010 mm σε διάμετρο, και συντίθεται περισσότερο από άτομα άνθρακα. Τα άτομα άνθρακα συνδέονται μαζί σε μικροσκοπικούς κρυστάλλους, οι οποίοι είναι περισσότερο ή λιγότερο ευθυγραμμισμένοι παράλληλα με την μεγάλη πλευρά των ινών. Η κρυσταλλική ευθυγράμμιση επιφέρει στην ίνα μεγάλη αντοχή για το μέγεθός της. Αρκετές χιλιάδες ίνες άνθρακα περιστρέφονται μαζί για να σχηματίσουν ένα ανθρακόνημα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του είτε πλεγμένο σε μορφή υφάσματος.

Το ανθρακόνημα μπορεί να πλεχθεί σε πολλά διαφορετικά σχέδια πλέξης, και μπορεί να συνδυαστεί με μια πλαστική ρητίνη και να διαμορφωθεί για να σχηματίσει σύνθετο υλικό (όπως είναι το πλαστικό ενισχυμένο με ανθρακονήματα – cfrp), έτσι ώστε να προκύψει μεγάλος λόγος αντοχής – βάρους. Η πυκνότητα του ανθρακονήματος είναι αισθητά χαμηλότερη από την πυκνότητα του ατσαλιού, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό βάρος.

Το πολυμερές ενισχυμένο με ανθρακονήματα (carbon fiber reinforced plastic) ή πλαστικό ενισχυμένο με ανθρακονήματα, είναι πολύ δυνατό ελαφρύ και ακριβό

σύνθετο υλικό. Παρόμοιο με τα υαλονήματα (πολυμερές ενισχυμένο με ίνες γυαλιού), αυτό το σύνθετο υλικό συχνά αναφέρεται και ως απλά ανθρακονήματα, από το όνομα των ενισχύσεών του. Το πολυμερές είναι τις περισσότερες φορές εποξική ρητίνη, μα και άλλα πολυμερή, όπως είναι ο πολυεστέρας, ο βινυλεστέρας ή το νυλον, χρησιμοποιούνται κάποιες φορές. Ορισμένα σύνθετα υλικά περιέχουν και ανθρακονήματα, και άλλες ίνες, όπως είναι οι ενισχύσεις αλουμινίου, υαλονημάτων και Kevlar.



Θ-1.8.2.3: Μια ίνα άνθρακα διαμέτρου 6μm (ξεκινά από κάτω αριστερά) σε σύγκριση με μια ανθρώπινη τρίχα.

Χιλιάδες ίνες άνθρακα απαρτίζουν τη δέσμη ενός ανθρακονήματος. Μία ίνα άνθρακα έχει διάμετρο 5-8 μm (7-8 μm οι αρχικές γενιές και 5 μm οι νεότερες) και η ατομική της δομή περιλαμβάνει στρώματα άνθρακα τοποθετημένα σε κανονικό εξάγωνο και, ενώ μοιάζει με αυτήν του γραφίτη, διαφοροποιείται στον τρόπο σύνδεσης των ατόμων. Στον γραφίτη, τα στρώματα του άνθρακα είναι παράλληλα μεταξύ τους σε κανονικό σχήμα και ενώνονται με ελκτικές δυνάμεις Van der Waals. Στις ίνες άνθρακα, τα στρώματα μπορεί είτε να είναι τυχαία διπλωμένα μαζί (turbostatic), είτε να ακολουθούν τη δομή του γραφίτη (γραφιτική), είτε να είναι υβριδική, δηλαδή να εμφανίζουν και τις δύο δομές. Η δομή των ινών του άνθρακα εξαρτάται από τη μέθοδο κατασκευής της ίνας. Έτσι, οι ίνες που παράγονται από πολυακρυλονιτρίλιο ή PAN εμφανίζουν turbostatic δομή, ενώ αυτές που παράγονται από μεσοφασική ρητίνη μετά την επίδραση θερμότητας σε θερμοκρασίες άνω των 2200 °C εμφανίζουν γραφιτική δομή. Οι turbostatic ίνες συνήθως εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ οι γραφιτικές ίνες έχουν συνήθως υψηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Τα βασικότερα υλικά από τα οποία παράγονται τα ανθρακονήματα είναι το PAN ή πολυακρυλονιτρίλιο, το rayon και η πίσσα πετρελαίου ή pitch.

Οι ίνες άνθρακα (carbon fiber) είναι πιο ακριβές από το γυαλί και από το αραμίδιο αλλά έχουν και τον καλύτερο συνδυασμό ιδιοτήτων. Είναι αγωγίμες, έχουν χαμηλή πυκνότητα και συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE, coefficient of thermal expansion). Τα υλικά από ανθρακόνημα επιδεικνύουν χαμηλή αντίσταση σε κρούση και είναι ψαθυρά [κόπωση έως αστοχία (strain-to-failure) λιγότερο από 2%]. Ανθρακονήματα είναι διαθέσιμα σε ευρύ πεδίο στιβαρότητας [μέτρο ελαστικότητας

(30-145 msi)] και αντοχής (300-1000 ksi). Έτσι, τα ανθρακονήματα ταξινομούνται συχνά στις εξής κατηγορίες, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5: [1.2]

- Υψηλής αντοχής (high strength)
- Ενδιάμεσου μέτρου ελαστικότητας
- Υψηλού μέτρου ελαστικότητας

Πίνακας 5. Ιδιότητες ανθρακονημάτων με βάση το PAN

Ιδιότητα	Υψηλή δύναμη, εμπορίου	Υψηλή δύναμη	Ενδιάμεσο μέτρο ελαστικότητας	Υψηλό μέτρο ελαστικότητας
Μέτρο εφελκυσμού (Tensile modulus, msi)	33	32-35	40-43	50-65
Δύναμη εφελκυσμού (Tensile strength, ksi)	550	500-700	600-900	600-800
Επιμήκυνση στην αστοχία (Elongation at failure, %)	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Ηλεκτρική ανθεκτικότητα (Electrical resistivity, $\mu\Omega \cdot cm$)	1650	1650	1450	900
Θερμική αγωγιμότητα (Thermal conductivity, $\frac{Btu}{ft \cdot h \cdot ^\circ F} = 1,73 \frac{W}{m \cdot K}$)	11,6	11,6	11,6	29-46
Συντελεστής θερμικής διαστολής στην αξονική διεύθυνση (Coefficient of thermal expansion, axial direction, $10^{-6}K$)	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Πυκνότητα ($\frac{lb}{in^3}$)	0,065	0,065	0,065	0,069
Περιεχόμενο σε άνθρακα (%)	95	95	95	+99

Διάμετρος νήματος (Filament diameter, μm)	6-8	6-8	5-6	5-8
---	-----	-----	-----	-----

Παρόλο που οι όροι χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά, οι ίνες γραφίτη έχουν αρκετές διαφορές από τις ίνες άνθρακα. Συγκεκριμένα, οι ίνες γραφίτη:

- υπόκεινται σε θερμικές κατεργασίες πάνω από τους $3000^{\circ}\text{F} \approx 1922\text{ K}$
- κατέχουν τρισδιάστατη σχέση διάταξης των ατόμων τους
- έχουν περιεχόμενο άνθρακα πάνω από 99%
- έχουν μέτρο ελαστικότητας (E) μεγαλύτερο από 50 msi
- ανθρακοποιούνται πρώτα και μετά γραφιτιάζονται σε θερμοκρασίες μεταξύ των 3600 και 5500°F ($2255,37$ και $3310,93\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα).

Σε αντίθεση, οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα) έχουν χαμηλότερο περιεχόμενο άνθρακα (93 με 95%) και υφίστανται ανθρακοποίηση στους 1800 με 2700°F ($1255,37$ έως $1755,37^{\circ}\text{C}$). Γενικά, η διαδικασία γραφιτιάσης καταλήγει σε ίνα με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας.

Οι ίνες άνθρακα εμφανίζουν μεγάλο εύρος ιδιοτήτων. Για παράδειγμα, η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 2100 MPa έως 6800 MPa , με τα 3500 MPa να είναι η πιο συνηθισμένη για τις περισσότερες εφαρμογές. Αντίστοιχα, το μέτρο ελαστικότητας είναι μεταξύ 215 GPa έως 700 GPa και, ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής και το είδος του νήματος, η επιμήκυνση θραύσης βρίσκεται μεταξύ 0.2 έως 2.5% . Τα ανθρακονήματα εμφανίζουν μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες. Η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης για ίνες άνθρακα και γραφίτη σε οξειδωτική ατμόσφαιρα είναι $930^{\circ}\text{F} = 772\text{ K}$. Τα υφάσματα ανθρακονημάτων με εποξική ρητίνη παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε διάβρωση, ερπυσμό και κόπωση. Ωστόσο, δεδομένου ότι τα ανθρακονήματα έχουν υψηλή αγωγιμότητα, πρέπει να αποφευχθεί η άμεση επαφή των ινών άνθρακα με μέταλλα, όπως ο χάλυβας ή το αλουμίνιο, έτσι ώστε να μη προκληθεί γαλβανική διάβρωση. [1.4]

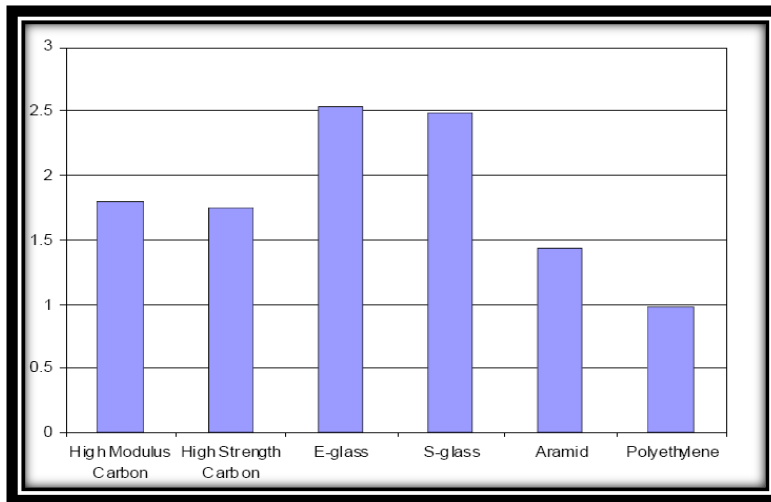
1.8.3 Παράγοντες επιλογής ινών

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ίνες στην αγορά είναι οι ίνες υάλου, αραμιδίου και άνθρακα. Οι κύριοι παράγοντες επιλογής μεταξύ αυτών των ινών είναι οι εξής:

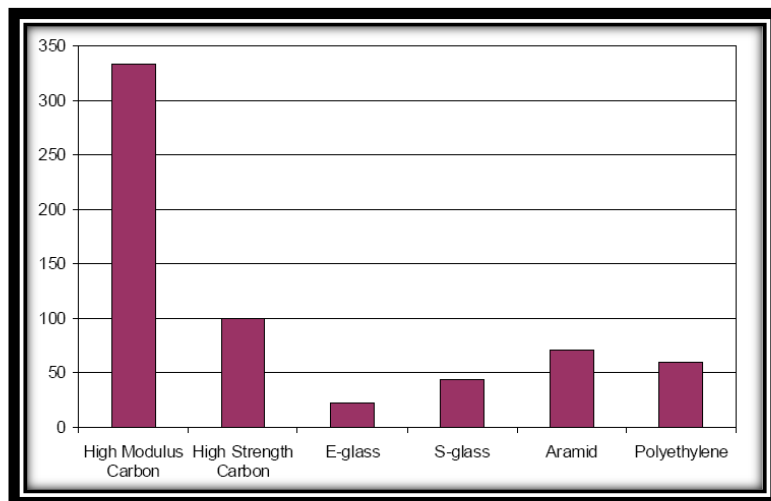
1. Μέτρο ελαστικότητας (Tensile Modulus), όπου ο άνθρακας έχει διακριτικό προβάδισμα έναντι του γυαλιού και του αραμιδίου.

2. Μέτρο συμπίεσης (Compression Modulus), όπου και πάλι ο άνθρακας έχει τα πιο επιθυμητά χαρακτηριστικά.
3. Αντοχή σε εφελκυσμό (Tensile Strength), όπου το e-glass είναι προτιμητέο σε κατασκευή με κύρια παράμετρο σχεδιασμού την τάση εφελκυσμού λόγω χαμηλού κόστους.
4. Αντοχή σε θλίψη (Compression Strength), όπου υπερτερεί έναντι των άλλων το ανθρακόνημα.
5. Αντοχή σε κρούση (Impact Strength), όπου προτιμώνται οι ίνες αραμιδίου, ενώ οι ίνες άνθρακα αποφεύγονται λόγω της ψαθυρότητάς τους. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι και η μήτρα επιδρά σημαντικά στην αντοχή σε κρούση.
6. Πυκνότητα, όπου κατά αυξάνουσα σειρά οι ίνες κατατάσσονται ως εξής: ίνες αραμιδίου, ανθρακονήματα, s2-glass και e-glass.
7. CTE, όπου αραμίδιο και άνθρακας έχουν ελαφρά αρνητικό CTE, ενώ τα υαλονήματα θετικό.
8. Αντίσταση σε περιβαλλοντικές συνθήκες (Environmental resistance), όπου παρατηρείται ότι:
 - Οι ιδιότητες των ινών αραμιδίου επηρεάζονται από την υπεριώδη ακτινοβολία και πρέπει να λειτουργούν το πολύ έως 350 °F.
 - Άνω των 700 °F τα ανθρακονήματα οξειδώνονται
 - Τα υαλονήματα απορροφούν υγρασία, καθώς είναι υδρόφιλα
9. Κόστος, όπου πιο φθηνή ίνα είναι αυτή από γυαλί και πιο ακριβή το ανθρακόνημα. Όσο μικρότερος ο αριθμός ατύλιχτων νημάτων σε μια δεσμίδα (tow), τόσο ακριβότερο είναι το ανθρακόνημα. Ωστόσο, σε πλεκτό ύφασμα με μεγάλο μέγεθος tow, που είναι πιο φθηνό, έγκειται κίνδυνος μικρορωγμών της μήτρας λόγω μεγαλύτερων θυλάκων ρητίνης και κενών.

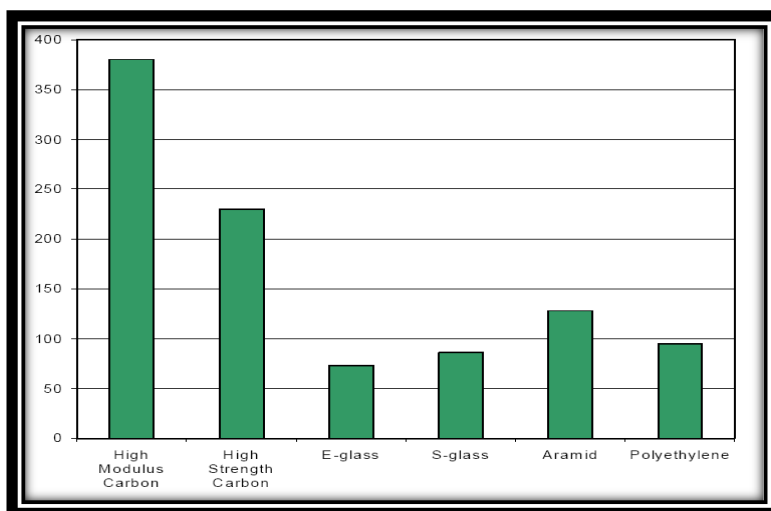
Στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνονται οι διάφορες ίνες ανά παράγοντα για την διευκόλυνση της επιλογής ίνας. [1.5]



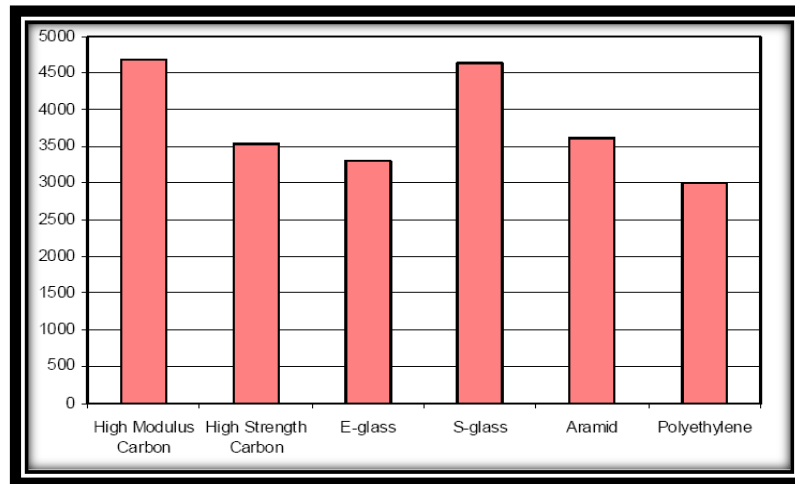
Θ-1.8.3.1: Σχέση πυκνότητας ινών.



Θ-1.8.3.2: Σχέση κόστους ινών.



Θ-1.8.3.3: Σχέση μέτρου ελαστικότητας ινών.



Θ-1.8.3.4: Σχέση ορίου αντοχής σε εφελκυσμό των ινών.

1.9 Μήτρες (Matrices)

1.9.1 Ο ρόλος της μήτρας στο σύνθετο

Μέσα σε ένα σύνθετο υλικό, η μήτρα προστατεύει από την τριβή τις ίνες, ενώ παράλληλα τις συγκρατεί στη θέση τους, μεταφέρει σε αυτές τα φορτία και είναι υπεύθυνη για τη διατμητική ενδοστρωματική αντοχή (interlaminar shear strength). Κατά την επιλογή μιας μήτρας τα χαρακτηριστικά που θεωρούνται επιθυμητά είναι:

- Να παρέχει αντίσταση στη θερμοκρασία, τα χημικά και την υγρασία
- Να έχει μεγάλο λόγο παραμόρφωσης προς τάση αστοχίας (strain to failure)
- Να μπορεί να υποστεί θερμική κατεργασία σε όσο το δυνατό χαμηλή θερμοκρασία
- Να έχει μεγάλες διάρκειες ζωής εκτός κατάψυξης
- Και να μην είναι τοξική.

Η μήτρα θα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες προϋποθέσεις έτσι ώστε να είναι κατάλληλη για την χρήση και επεξεργασία των FRP και να διασφαλίζει μια επιτυχή ενίσχυση από μόνη της.

Πιο συγκεκριμένα, η μήτρα θα πρέπει να είναι ικανή να διαρρέει με τον κατάλληλο τρόπο και να συνδέεται με τις ίνες μέσα σε έναν ανεκτό χρόνο αποπεράτωσης. Επίσης, είναι προτιμότερο η μήτρα να συνδέεται χημικά με την ενίσχυση των ινών, έτσι ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη συγκόλληση. Επιπλέον, θα πρέπει να περιβάλλει πλήρως τις ίνες, για να τις προστατεύσει από εγκοπές και

θραύσεις, που θα μπορούσαν να μειώσουν την αντοχή τους, αλλά και να μεταφέρει δυνάμεις στις ίνες.

Οι ίνες θα πρέπει να διατηρούνται ξεχωριστά μεταξύ τους, έτσι ώστε εάν συμβεί αστοχία να περιορισθεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Σε περίπτωση που η αστοχία τελικά συμβεί, πρέπει ακόμη η μήτρα να αποκολληθεί από τις ίνες για παρόμοιους λόγους. Τελικά, η μήτρα πρέπει να είναι από ένα πλαστικό που να παραμένει χημικά και φυσικά σταθερό κατά τη διάρκεια και μετά τις διαδικασίες της ενίσχυσης και της διαμόρφωσης.

Το υλικό της ίνας, για να είναι κατάλληλο για ενίσχυση, θα πρέπει να πληροί ορισμένες προδιαγραφές. Αρχικά, να αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό και τον συντελεστή ελαστικότητας της μήτρας. Ακόμη, οι ίνες να υπερβαίνουν τις κρίσιμες τιμές των συστατικών τους. Στην συνέχεια, η αντοχή και η ελαστικότητα των ινών μόνο, θα πρέπει να υπερβαίνουν τα αντίστοιχα μεγέθη της μήτρας. Εν τέλει, θα πρέπει να υφίσταται βέλτιστος συνδυασμός - συγκόλληση ανάμεσα στην μήτρα και τις ίνες.

1.9.2 Τύποι μητρών

Η μήτρα μπορεί να είναι οργανική, κεραμική ή μεταλλική. Στις περισσότερες περιπτώσεις προτιμώνται οι οργανικές μήτρες, καθώς έχουν πολύ καλές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, ενώ είναι εύκολο να παραχθούν με χαμηλότερο κόστος.

Οι οργανικές μήτρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις θερμοπλαστικές και τις θερμοσκληρυνόμενες. Για τη δημιουργία θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες, όπως το πολυαιθυλένιο (PE) και το πολυστυρένιο (PS). Έχουν πολύ χαμηλή τιμή και σε συνδυασμό με χαμηλό κόστους ενισχυτικά υλικά δημιουργούν φθηνά τελικά προϊόντα που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης.

Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και έτσι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες αποτελούνται από δύο υλικά: μια ρητίνη, για παράδειγμα εποξική, και ένα παράγοντα σκλήρυνσης συμβατό με τη ρητίνη. Το μείγμα των δύο υλικών έχει αρχικά χαμηλό ιξώδες. Όταν αυτό επεξεργαστεί θερμικά, σχηματίζονται πλεγματικές διασταυρώσεις ανάμεσα στις μοριακές αλυσίδες (cross links) και δημιουργείται έτσι ένα αδιάσπαστο στερεό που δεν έχει δυνατότητα αναθέρμανσης ή επανεπεξεργασίας.

Για την παραγωγή ινωδών σύνθετων υλικών, ως μήτρα χρησιμοποιείται συνήθως ρητίνη, η οποία συνδέει τις ίνες και προσδίδει ηλεκτρική μόνωση και ανθεκτικότητα στο σύνθετο υλικό. Για ισχυρή χημική και μηχανική σύνδεση μεταξύ ινών και ρητίνης

πρέπει να υπάρχει η μεταξύ τους συνάφεια, ενώ για τον περιορισμό ανεπιθύμητων αντιδράσεων μεταξύ τους πρέπει να είναι χημικά συμβατές.

Σε σχέση με τις ίνες που εμποτίζουν, οι ρητίνες έχουν μειωμένες ιδιότητες. Συγκεκριμένα, είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες, εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε χημικούς διαλύτες (οξέα και βάσεις) και το νερό και είναι πιο ευπαθείς στη θερμότητα. Επιπλέον, συγκρινόμενες με τα παραδοσιακά δομικά υλικά, παρουσιάζουν μεγαλύτερες ερπυστικές παραμορφώσεις. Ωστόσο, η ρητίνη είναι απαραίτητη για τη δημιουργία CFRP, καθώς δρα ως μεταφορέας και κατανομέας των τάσεων στις ίνες κάθε στρώσης του υλικού. Έτσι, το ενισχυμένο πολυμερές μπορεί να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομοιογενές υλικό.

Οι μήτρες πολυμερών έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, κατά τη διάρκεια της οποίας μέσω φορτίσεων αλλάζουν προοδευτικά οι φυσικές τους ιδιότητες. Όταν ένα πολυμερές αποτελεί τη μήτρα σε ένα σύνθετο υλικό, η διάρκεια ζωής του εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό και από την ενίσχυση του σύνθετου υλικού. Μια τυπική μορφή αστοχίας ενισχυμένων πολυμερών είναι η κατάρρευση λόγω ερπυσμού και οφείλεται καθαρά στην πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται η μήτρα.

Οι επικρατέστερες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες που χρησιμοποιούνται για σύνθετες μήτρες είναι πολυεστέρες, βινυλεστέρες (vinyl esters), εποξικές, βισμαλεϊμίδες (bismaleimides), πολυιμίδια (polyimides) και φαινολικές (phenolics) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. [1.2]

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. Συγκριτικά χαρακτηριστικά σύνθετων μητρών από ρητίνη

Πολυεστέρες (polyesters)	Χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εμπορικές εφαρμογές. Σχετικά ανέξοδοι με ευελιξία στην επεξεργασία. Χρήση για συνεχή και ασυνεχή σύνθετα.
Βινυλεστέρες (Vinyl esters)	Παρεμφερείς με πολυεστέρες αλλά είναι πιο σκληροί και έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην υγρασία.
Εποξικές ρητίνες (epoxies)	Συστήματα μήτρας με υψηλή απόδοση, πρωταρχικά για σύνθετα από συνεχείς ίνες. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για θερμοκρασίες έως $250 - 275^{\circ}\text{F} = 394,26 - 408,15 \text{ K}$ Καλύτερη απόδοση στις υψηλές θερμοκρασίες από τους πολυεστέρες και τους βινυλεστέρες.
Βισμαλεϊμίδες (bismaleimides)	Μήτρες ρητίνης υψηλών θερμοκρασιών για χρήση στο θερμοκρασιακό εύρος $275 - 350^{\circ}\text{F} = 408,15 - 449,82 \text{ K}$ με επεξεργασία παρόμοια με αυτή των εποξικών. Απαιτούν post cure αυξημένης θερμοκρασίας.
Πολυιμίδια (polyimides)	Συστήματα ρητίνης πολύ υψηλής θερμοκρασίας για χρήση στους $550 - 600^{\circ}\text{F} = 560,93 - 588,70 \text{ K}$. Πολύ δύσκολα στην επεξεργασία τους.

Φαινολικές ρητίνες (phenolics)	Συστήματα ρητίνης υψηλής θερμοκρασίας με καλή αντίσταση στον καπνό και στη φωτιά. Χρησιμοποιούνται εκτενώς για εσωτερικά αεροσκαφών. Μπορεί να είναι δύσκολα στην επεξεργασία τους.
--------------------------------	---

Πίνακας 7- Ιδιότητες εποξικής, πολυεστερικής και βινυλεστερικής ρητίνης

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm ³)
Εποξική	55-130	2.0-4.5	4.0-14.0	1.20-1.30
Πολυεστερική	35-104	2.1-4.1	<5.0	1.10-1.46
Βινυλεστερική	73-81	3.0-3.6	3.5-5.5	1.12-1.32

1.9.3 Παράγοντες επιλογής μήτρας

Η επιλογή του υλικού της μήτρας μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις συνθήκες κατεργασίας. Οι ακόλουθοι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επιλογή μιας μήτρας από ρητίνη:

- Χρόνος ζωής στο δοχείο ή διάρκεια ζωής εκτός ψυγείου (Pot or working life). Με τον όρο αυτό εννοείται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η μήτρα διατηρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για την προτιθέμενη χρήση. Τυπικά, για μη ενισχυμένες ρητίνες (neat resin) χρησιμοποιείται ο όρος χρόνος ζωής στο δοχείο, ενώ ο όρος χρόνος ζωής εκτός ψυγείου αναφέρεται σε προεμποτισμένες ίνες (prepregs). Σε διεργασίες όπου χρησιμοποιείται μη ενισχυμένη ρητίνη είναι επιθυμητός μεγάλης διάρκειας χρόνος ζωής, όπως για παράδειγμα σε διαδικασίες περιέλιξης (filament winding), στον εμπότισμό με μεταφορά ρητίνης στο καλούπι (resin transfer molding) και στη διέλαση (pultrusion). Όταν ο χρόνος pot-life είναι βραχύς, απαιτούνται συχνές αλλαγές της ρητίνης στο δοχείο (resin bath changes) και αυξάνεται η απώλεια υλικού (scrap). Επιπλέον, ένας σύντομος χρόνος pot-life μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην ποιότητα ενός τεμαχίου που παράγεται σε μια υγρή διαδικασία, καθώς μειώνεται ο εμπότισμός (wet-out) των ινών.

- Διάρκεια ζωής στην αποθήκη (Shelf life). Πρόκειται για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το υλικό της μήτρας δύναται να αποθηκευτεί κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, ενώ παράλληλα τηρούνται όλες οι απαιτήσεις για το χειρισμό και την διατήρησή του. Όσον αφορά στα προεμποτισμένα θερμορρυθμιζόμενα υλικά, ο χρόνος ζωής τους ανέρχεται σε 6 – 12 μήνες όταν αποθηκεύονται σε καταψύκτες και στη συνέχεια πρέπει να

επαναπιστοποιηθούν. Σε περίπτωση που η μήτρα (μέρος A) και ο σκληρυντής (μέρος B) ενός θερμορρυθμιζόμενου υλικού παρέχονται σε διαφορετικά δοχεία και αποθηκεύονται ξεχωριστά, ο χρόνος ζωής σε θερμοκρασία δωματίου ανεβαίνει στα 2 χρόνια. Παρόλο που δεν αντιδρούν τόσο εύκολα όσο τα προεμποτισμένα, αλλαγές στο ιξώδες και χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα κατά την πάροδο του χρόνου αποθήκευσης. Η συντήρηση σε καταψύκτη επιβραδύνει την διαδικασία και παρατείνει τη διάρκεια ζωής.

- **Ιξώδες.** Σε μη θερμικά επεξεργασμένη ρητίνη, το ιξώδες ορίζεται ως η αντίστασή της στη ροή. Όσο χαμηλότερο είναι το ιξώδες, τόσο καλύτερα εμποτίζει η ρητίνη τις ίνες. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία κατά το θερμικό κύκλο σκλήρυνσης, παρατηρείται αρχικά μείωση του ιξώδους και στη συνέχεια μεγάλη αύξησή του μέχρι η ρητίνη τελικά να πήξει ή να έχει μορφή γέλης. Το ιξώδες μετριέται, χρησιμοποιώντας ως βάση το νερό, σε όρους ροής (centipoises). Για εμποτισμό θερμορρυθμιζόμενων ρητινών, προτιμώνται ρητίνες με ιξώδες κάτω από 1000cP, ενώ το νερό έχει 1cP. Μια τέτοια ρητίνη αποκτά μορφή γέλης όταν έχει ιξώδες 100000cP.

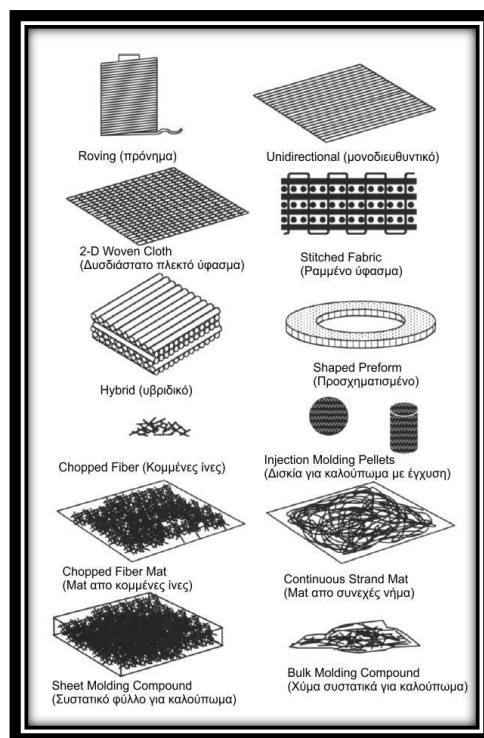
- **Χρόνος θερμικής επεξεργασίας (Cure time).** Ο χρόνος cure, όσον αφορά στις θερμορρυθμιζόμενες ρητίνες, είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να λάβουν χώρο οι διασταυρώσεις του πλέγματος, δηλαδή το cross-linking. Με τον όρο αυτό εννοείται ο σχηματισμός πλευρικών δεσμών μεταξύ διαφορετικών αλυσίδων στο μόριο του πολυμερούς. Οι διασταυρώσεις αυτές στο πλέγμα αυξάνουν την ακαμψία του μορίου. Τυπικά, απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος cure για ρητίνες με μεγαλύτερη T_g . Σε αυξημένες θερμοκρασίες, οι εποξικές έχουν γενικά χρόνο cure περίπου 2-6 h. Για κάποιες εποξικές ρητίνες, πολυεστέρες και βινυλεστέρες μπορεί να μην είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί διαδικασία post cure, συνεπώς μειώνεται έτσι το κόστος επεξεργασίας. Σε ρητίνες με υψηλότερη T_g , όπως οι βισμαλεϊμίδες και τα πολυαμίδια, απαιτούνται μεγαλύτεροι κύκλοι cure και post cure. Κατά το post curing αναπτύσσονται περαιτέρω μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ παράλληλα βελτιώνεται η T_g της μήτρας για κάποιες ρητίνες, βισμαλεϊμίδες και πολυαμίδια. Για κατασκευές με πρέσα αλλά και ορισμένες κατεργασίες παραγωγής ανθρακονημάτων, όπως είναι η διέλαση, προτιμώνται μικροί χρόνοι cure.

1.10 Μορφές υλικού

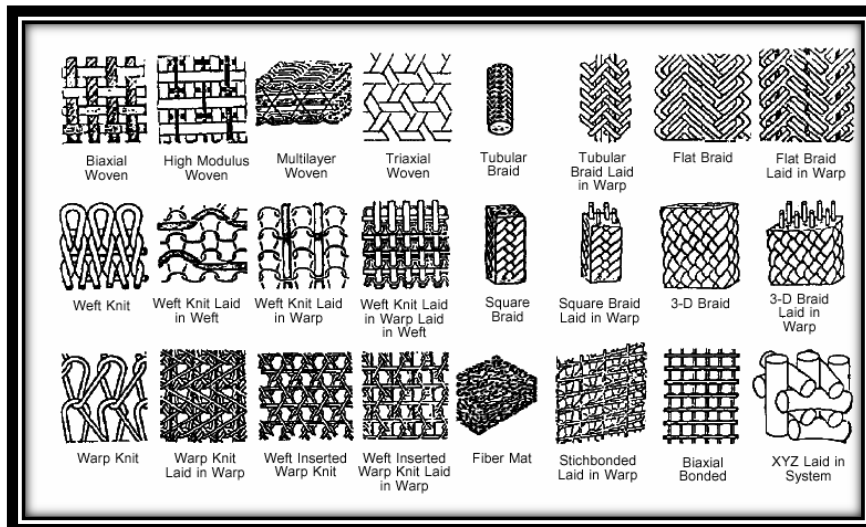
Τα σύνθετα υλικά συναντώνται σε πολλές διαφορετικές μορφές και δομές, κάποιες από τις οποίες απεικονίζονται στις επόμενες εικόνες. Οι ίνες μπορεί να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς, ενώ ο προσανατολισμός τους μπορεί να είναι τυχαίος ή προκαθορισμένος. Οι ίνες μπορεί να είναι διαθέσιμες είτε ως ξηρές (dry) ή ως προ-

εμποτισμένες με ρητίνη (pre-impregnated). Καθώς η αγορά καθοδηγεί τη διαθεσιμότητα, δεν είναι διαθέσιμοι σε κάθε μορφή όλοι οι συνδυασμοί ίνας και μήτρας. Γενικά, όσο περισσότερες διεργασίες απαιτούνται από τον προμηθευτή, τόσο αυξάνει και το αντίστοιχο κόστος, πράγμα που γίνεται αντιληπτό από το υψηλότερο κόστος του προ-εμποτισμένου υφάσματος σε σχέση με το αντίστοιχο στεγνό πλεκτό (dry-woven) ύφασμα. Ενώ οι περίπλοκες στεγνές έτοιμες φόρμες (complex dry performs) είναι ακριβές, μπορεί να μεταφραστούν σε χαμηλότερο κόστος παραγωγής μειώνοντας ή απαλείφοντας την χειρωνακτική εργασία της διαστρωμάτωσης (lay up).

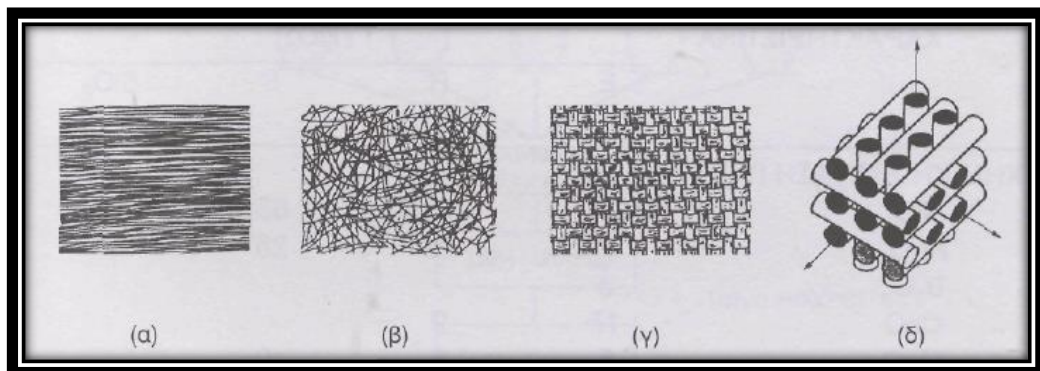
Στην περίπτωση που η δομική αποδοτικότητα και το βάρος είναι σημαντικές παράμετροι σχεδίασης, χρησιμοποιούνται μορφές συνεχών ενισχυμένων προϊόντων καθώς οι ασυνεχείς ίνες δίνουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Το μέγεθος που έχουν οι ίνες είναι καθοριστικό για τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Γενικά, οι μικρότερες σε διάμετρο ίνες έχουν καλύτερη μηχανική αντοχή. Επομένως, όσο λεπτότερο είναι το ύφασμα, τόσο πιο ανθεκτική γίνεται η κατασκευή. Από την άλλη πλευρά, όσο μεγαλώνει το μέγεθος των ινών, τόσο αυξάνει το μέτρο ελαστικότητάς τους, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη δυσκαμψία του τελικού σύνθετου υλικού.



Θ-1.10.1: Μορφές προϊόντος που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα.



Θ-1.10.2: Διαφορετικές μορφές αρχιτεκτονικών ενίσχυσης.

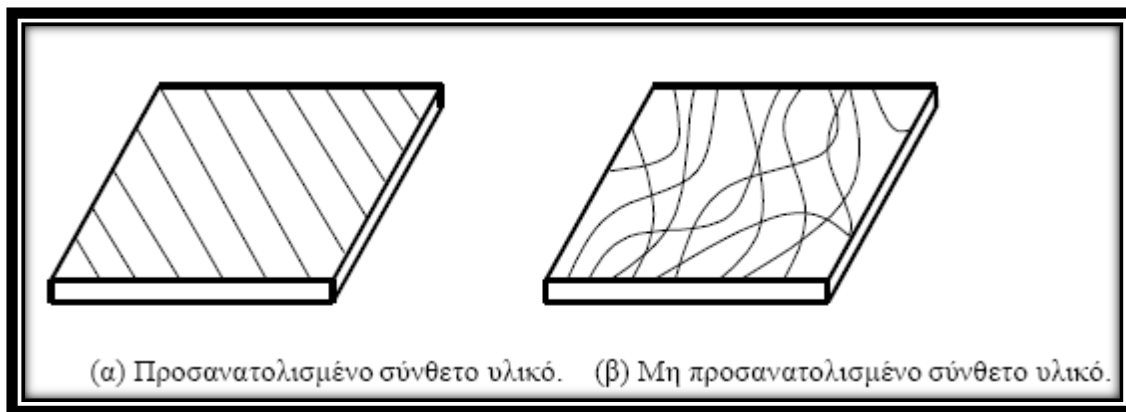


Θ-1.10.3: Μορφές υλικών με ίνες.

Είδη σύνθετων υλικών ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών

Τα ινώδη σύνθετα υλικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, βάσει του προσανατολισμού των ινών τους:

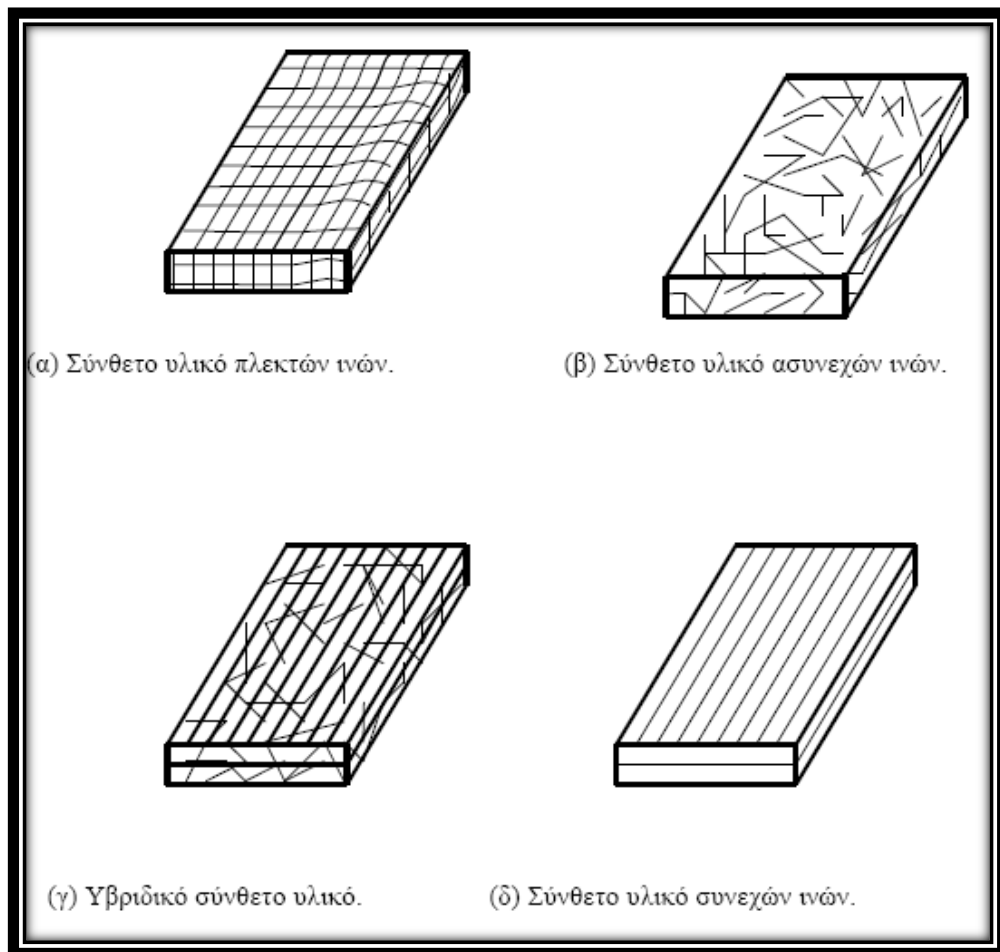
- Προσανατολισμένα (unidirectional), στα οποία οι ίνες έχουν την ίδια διεύθυνση και είναι συνεχείς (Σχήμα Θ-1.10.4α).
- Μη προσανατολισμένα, στα οποία οι ίνες τοποθετούνται τυχαία μέσα στο συνδετικό υλικό (Σχήμα Θ-1.10.4β).



Θ-1.10.4: Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών.

Ανάλογα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής, οι ίνες των σύνθετων υλικών μπορεί να είναι διαφορετικού τύπου (π.χ. υαλόνημα και ίνες γραφίτη) και τοποθετούνται με διαφορετικούς τρόπους. Έτσι, τα ινώδη σύνθετα υλικά μπορούν να καταταχθούν στις εξής κατηγορίες:

- Σύνθετα υλικά πλεκτών ινών (woven fiber), που είναι ένα συνεχές σώμα και δεν έχουν επιμέρους στρώματα (Σχήμα Θ-1.10.5α). Λόγω του υψηλού ποσοστού ρητίνης και της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων έχουν μειωμένη αντοχή.
- Σύνθετα υλικά ασυνεχών ινών (chopped fiber), που αποτελούνται από μικρού μήκους ίνες διάσπαρτες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα Θ-1.10.5β). Σε σχέση με τα υλικά συνεχών ινών έχουν κατώτερες μηχανικές ιδιότητες.
- Υβριδικά σύνθετα υλικά (hybrid), στα οποία μπορεί να υπάρχουν συνεχείς και ασυνεχείς ίνες ή οι ίνες να είναι διαφορετικού τύπου (Σχήμα Θ-1.10.5γ).
- Σύνθετα υλικά συνεχών ινών (continuous fiber), στα οποία το σώμα αποτελείται από συνδεδεμένα στρώματα συνεχών ινών σε ρητίνη σε συγκεκριμένη διεύθυνση (Σχήμα Θ-1.10.5δ). παρά τη μεγάλη τους αντοχή, εμφανίζουν μεγάλη πιθανότητα αποκόλλησης μεταξύ των στρώσεων.



Θ-1.10.5: Τύποι σύνθετων υλικών.

Τα προνήματα (rovings)

Ως πρόνημα ονομάζεται μια χαλαρή δέσμη ινών. Η δέσμη μη στριμμένων ινών ονομάζεται δεσμίδα (tow), ενώ η δέσμη στριμμένων ινών ονομάζεται κλωστή (yarn). Αυτές είναι οι βασικές μορφές των συλλογών συνεχών ινών και από αυτές προκύπτουν μέσω ύφανσης, ραφής, προεμποτισμού και κοπής άλλες μορφές προϊόντος. Είναι οι πιο φθηνές μορφές ινών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως πρώτη ύλη για διεργασίες, όπως η υγρή εναπόθεση υφασμάτων (wet filament winding), αλλά και για κατεργασίες παραγωγής ανθρακονημάτων, όπως είναι η διέλαση.

Το πλεκτό ύφασμα

Το πλεκτό ύφασμα είναι η πλέον κοινή μορφή συνεχούς ξηρού υλικού. Με το πλέξιμο οι ίνες του πλέγματος συγκρατώνται μεταξύ τους με τρόπο μηχανικό και αυτό συνεχίζει να συμβαίνει μετά τον πολυμερισμό, μέσα στην πολυμερική μήτρα. Οι τάσεις μεταφέρονται κυρίως μέσω των ινών και έτσι η αντοχή είναι μεγάλη. [1.2]

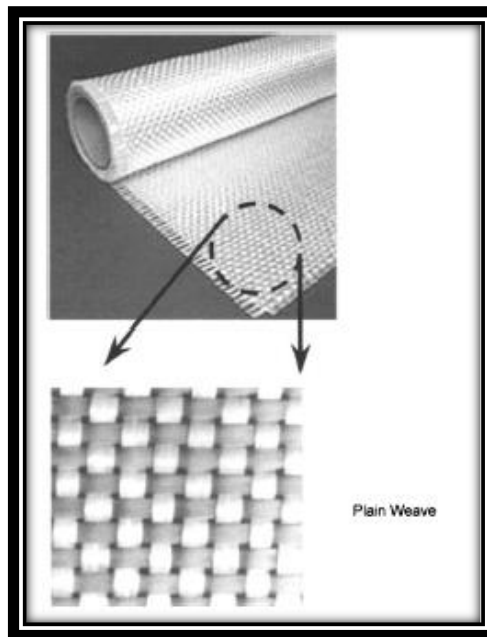
Ένα πλεκτό ύφασμα αποτελείται από πλεγμένες ίνες και πιο συγκεκριμένα το στημόνι (warp) και το υφάδι (weft). Καθώς το ύφασμα ξετυλίγεται, η διεύθυνση των 0° ονομάζεται στημόνι, ενώ η διεύθυνση των 90° ονομάζεται υφάδι. Σε σχέση με τα μονοδιευθυντικά ή τα ραμμένα υλικά (stitched), τα πλεκτά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευελιξία (drapeability). Τα χαρακτηριστικά αυτής της ευελιξίας (drapeability characteristics) επηρεάζονται από τη μορφή της πλέξης, η οποία επιδρά παράλληλα και στον τρόπο χειρισμού του υφάσματος και στις δομικές του ιδιότητες. Στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμα πολλά πλεκτά μοτίβα – μορφές. Κάθε πλέξη εμφανίζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με τη διάταξη και τη μορφή του εξαρτήματος, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της ίνας. Ωστόσο, κάποιες ίνες με υψηλό μέτρο ελαστικότητας είναι ιδιαίτερα δύσκολο να πλεχθούν εξαιτίας της έμφυτης ψαθυρότητάς τους. Τα βασικά πλεονεκτήματα των πλεκτών υφασμάτων είναι η ευελιξία τους, η δυνατότητα σχηματισμού μεγαλύτερου όγκου ινών, η δομική τους αποτελεσματικότητα και η ευρεία διαθεσιμότητά τους στην αγορά. Ένα μειονέκτημα του πλεκτού υφάσματος είναι η καμπυλότητα που εισάγεται στην ίνα κατά την ύφανση. Συνήθως τοποθετούνται τελειώματα και βοηθητικά στοιχεία στις ίνες έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολη η διαδικασία της ύφανσης και να ελαχιστοποιηθούν οι ζημιές στις ίνες. Τέλος, όταν προδιαγράφεται ένα ύφασμα είναι σημαντική η διασφάλιση ότι το τελείωμα είναι συμβατό με την επιλεγμένη μήτρα.

Τα δισδιάστατα πλεκτά υφάσματα συνήθως συναντώνται ως κατασκευές 0° και 90°, από τις οποίες όμως μπορούν να φτιαχτούν και πλάγιες υφάνσεις (+45°, -45°) με περιστροφή του αρχικού υφάσματος. Οι υφάνσεις φτιάχνονται σε αργαλειό συνυφαίνοντας δύο ορθογώνια (αμοιβαία κάθετα) σετ κλωστών στις διευθύνσεις υφαδιού και στημονιού. Η διεύθυνση του υφαδιού είναι παράλληλη κατά μήκος του κυλίνδρου, ενώ του στημονιού είναι κάθετη στην διεύθυνση του κυλίνδρου. Οι αργαλειοί κατά την παραγωγή του υφάσματος ξεχωρίζουν τις κλωστές του στημονιού και περνούν τις κλωστές του υφαδιού ανάμεσα. Τα «harnesses» χειρίζονται τα ξεχωριστά υφάδια και στημόνια και κινούν τα αντίστοιχα «headdles». Το σύστημα σαΐτας του αργαλειού μεταφέρει τα υφάδια μπρος-πίσω και δημιουργεί ένα συμπλεκόμενο ύφασμα.

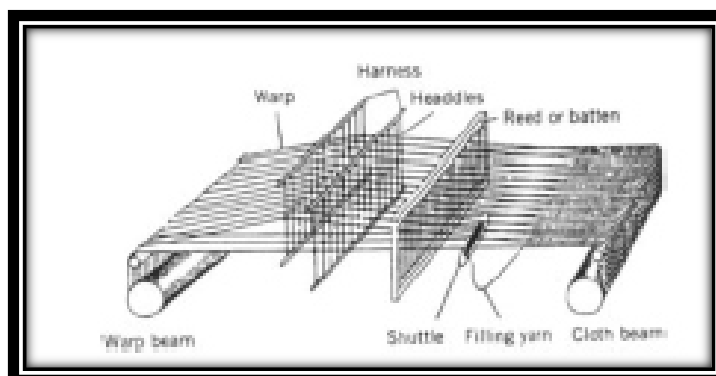
Η πληθώρα των υφάνσεων περιέχουν παρόμοιο αριθμό ινών και χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό και στις δύο διευθύνσεις. Ωστόσο, συχνά χρησιμοποιούνται υβριδικές υφάνσεις, όπως ανθρακονήματα με υαλονήματα, αλλά και υφάνσεις όπου οι ίνες στο στημόνι υπερισχύουν των ινών στο υφάδι. Αυτές οι υβριδικές υφάνσεις μπορεί

να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθούν ορισμένες ιδιότητες, όπως στην περίπτωση ανάμειξης άνθρακα με αραμίδιο για την εκμετάλλευση της σκληρότητας του αραμιδίου, ή για μείωση του κόστους, όπως όταν έχουμε ανάμειξη ινών γυαλιού με άνθρακα.

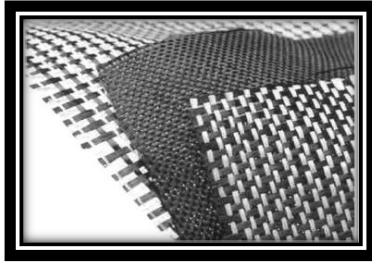
Τα πλεκτά υφάσματα είναι διαθέσιμα είτε ως προεμπροτισμένα είτε ως ξηρές προφόρμες. Στην πλειονότητα των εφαρμογών χρησιμοποιούνται πολλαπλές στρώσεις διδιάστατων υφάνσεων που διαστρωματώνονται μαζί. Η εκάστοτε στρώση προσανατολίζεται κατάλληλα με σκοπό την επίτευξη της απαιτούμενης αντοχής και σιβαρότητας.



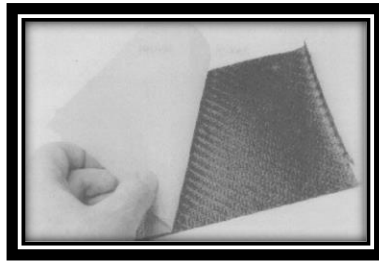
Θ-1.10.6: Τυπικό πλεκτό ύφασμα από ίνες γυαλιού.



Θ-1.10.7: Η βασική διαδικασία ύφανσης σχηματικά.

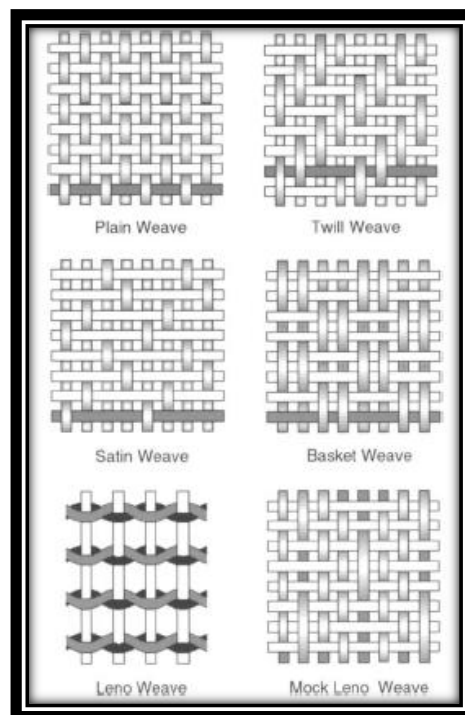


Θ-1.10.8: Παραδείγματα υβριδικών υφάνσεων.



Θ-1.10.9: Πλεκτό ύφασμα προεμποτισμένου υλικού (prepreg) από άνθρακα, με χαρτί στο πίσω μέρος.

Οι υφάνσεις πρέπει να ταξινομηθούν βάση του μοτίβου συνύφανσης (interlacing pattern) όπως φαίνεται στην Εικόνα Θ-1.10.10.



Θ-1.10.10: Κοινές δυσδιάστατες πλέξεις.

Γενικά, διαφορετικές πλέξεις δίνουν ελαφρώς διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Ο τρόπος με τον οποίο είναι πλεγμένες επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα στο σύνθετο υλικό, καθώς αλλάζει το μηχανισμό διάδοσης τάσεων μέσα σε αυτό. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζεται μια ποιοτική σύγκριση των ιδιοτήτων των πιο κοινών δισδιάστατων πλέξεων. [1.2]

Πίνακας 8 – Σύγκριση ιδιοτήτων διαθέσιμων πλέξεων

Ιδιότητα	Plain	Twill	Satin	Basket	Leno	Mock leno
Καλή σταθερότητα	****	***	**	**	*****	***
Χαμηλό πορώδες	***	****	*****	**	*	***
Ομαλότητα	**	***	*****	**	*	**
Ισορροπία	****	****	**	****	**	****
Συμμετρία	*****	***	*	***	*	****
Χαμηλός κυματισμός	**	***	*****	**	**/*****	**
***** = άριστο , **** = καλό, ***= αποδεκτό , ** =κακό, * = πολύ κακό						

Προεμπτισμένα υφάσματα (prepreg)

Τα prepreg αποτελούνται από ένα υλικό ενίσχυσης (reinforcement)-ανθρακονήματα, ίνες γυαλιού κλπ- σε μονοδιευθυντική (unidirectional) ή πλεκτή (woven) μορφή προεμπτισμένα σε προκαθορισμένο και ελεγχόμενο επίπεδο μέσα σε μήτρα ρητίνης. Με τα prepreg απλά κόβουμε την επιφάνεια που χρειαζόμαστε από το ρολό υφάσματος και προχωρούμε απευθείας στην διαστρωμάτωση, χωρίς να παρεμβάλλεται ανάμειξη ή χειρισμός άλλων δυνητικά επικίνδυνων χημικών.

Όλα τα Prepregs έχουν σαφώς προκαθορισμένο χρόνο ζωής (out life) σε θερμοκρασία δωματίου. Αποθηκεύονται σε καταψύκτη για να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής τους. Η αντιδραστικότητα ενός συγκεκριμένου συστήματος prepreg είναι προκαθορισμένη και αυτό ως αποτέλεσμα υποδεικνύει την ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία μια συγκεκριμένη ρητίνη θα υποστεί θερμικό κύκλο cure.

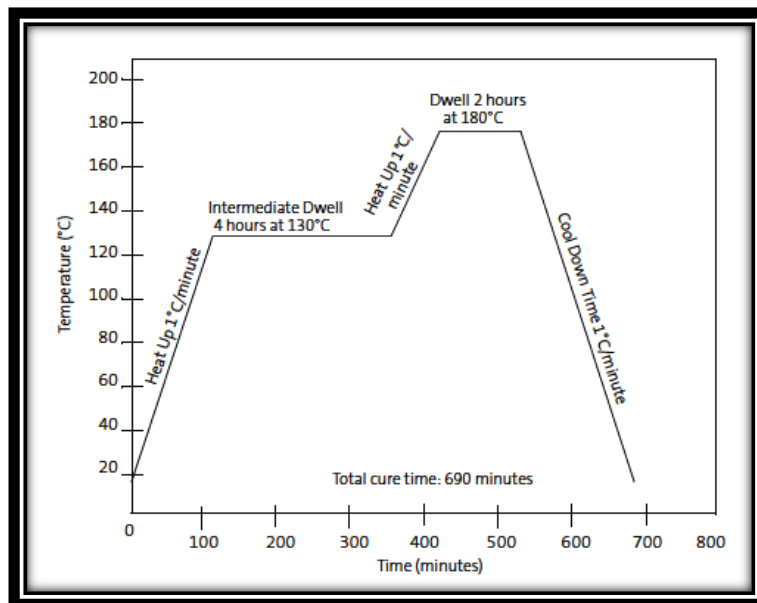
Οι παράμετροι out-life και η ελάχιστη θερμοκρασία cure είναι σημεία κλειδιά για την βελτιστοποίηση της επιλογής υλικών , ισορροπώντας τον χρόνο που απαιτείται για το lay up (ειδικά σε μεγάλες κατασκευές) και στην επιλογή του υλικού του καλουπιού. Όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία του curing, τόσο χαμηλότερο το κόστος εξοπλισμού.

Τα prepregs προμηθεύονται με ελεγχόμενο level of tack (κολλώδης ιδιότητα). Οι στρώσεις μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα και με ακρίβεια στο καλούπι για να δώσουν υψηλό επίπεδο στον έλεγχο του προσανατολισμού των ινών χωρίς τον κίνδυνο μετακίνησης, wash out των ινών, ή την ανάπτυξη περιοχών πλούσιων σε ρητίνη κατά την μετέπειτα επεξεργασία. Όλα αυτά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια της απόδοσης.

Πλεονεκτήματα prepregs

- Απλουστευμένη αποθήκευση και μειωμένα θέματα υγείας και ασφάλειας
- Επιλογές εργαλείων χαμηλού κόστους
- Μειωμένη εργασία
- Γρήγορο και απόλυτα ελεγχόμενο lay-up , βελτιστοποίηση και μεγιστοποίηση ιδιοτήτων τελικού προϊόντος
- Εξοικονόμηση βάρους
- Μειωμένος κίνδυνος επεξεργασίας σε σύγκριση με της διαδικασίες έγχυσης

Η διαδικασία σκλήρυνσης της ρητίνης προεμποτισμένων υφασμάτων ακολουθεί κάποια συγκεκριμένα στάδια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα Θ-1.10.11.



Θ-1.10.11: Θερμικός κύκλος σκλήρυνσης ρητίνης.

Αρχικά, στη φάση του Heat up, η θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι να φτάσει τη θερμοκρασία στερεοποίησης της ρητίνης με σταθερό ρυθμό, ο οποίος εξαρτάται

από τα χαρακτηριστικά της ρητίνης (ιξώδες και αντιδραστικότητα), το πάχος και τη μάζα της διαστρωμάτωσης και τη θερμική αγωγιμότητα του καλουπιού. Προαιρετικά, υπάρχει περίπτωση κατά τη διάρκεια του heat up να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία για ορισμένο χρόνο πιο χαμηλά από την τελική στη φάση intermediate dwell. Αυτό συμβαίνει για να διασφαλιστεί ότι καλούπι και ύφασμα έχουν την ίδια θερμοκρασία, αλλά και για την απομάκρυνση φυσαλίδων αέρα ανάμεσα από τις στρώσεις. Η φάση του heat up τελειώνει όταν επιτευχθεί η απαραίτητη θερμοκρασία για τη σκλήρυνση της ρητίνης. Το είδος της ρητίνης καθορίζει ένα εύρος θερμοκρασιών και χρόνου, συγκεκριμένος συνδυασμός των οποίων χρησιμοποιείται για το cure της ρητίνης. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση ψύξης του προϊόντος ή του καλουπιού, η οποία γίνεται με σταθερό ρυθμό για αποφυγή ανάπτυξης τάσεων ή ζημιών στο καλούπι.

Σε περίπτωση που δεν μπορούν να επιτευχθούν οι επιθυμητές πιέσεις ή θερμοκρασίες για το cure της ρητίνης, υπάρχει δυνατότητα να πραγματοποιηθεί επιπλέον θερμική κατεργασία, γνωστή και ως post cure. Στη διαδικασία αυτή βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος και αυξάνεται η αντοχή του σε θερμοκρασία.

Ραμμένο ύφασμα (stitched fabric)

Το ραμμένο ύφασμα είναι ουσιαστικά ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από μονοδιευθυντικές στρώσεις διαφορετικών διευθύνσεων που συρράπτονται. Τυπικά, ένα ραμμένο ύφασμα έχει στρώσεις διευθύνσεων 0°, +45°, 90° και -45°. Τα βασικά πλεονεκτήματα χρήσης ραμμένου υφάσματος είναι τα εξής:

- Μείωση έως και 25% του υπολείμματος (scrap) κατά την κοπή του πατρόν σε σχέση με τυπικά πλεκτά υλικά, καθώς λόγω των διευθύνσεων των ινών στο ύφασμα δεν είναι απαραίτητη η off-axis κοπή.
- Χρήση λιγότερων στρώσεων για κατασκευή ενός τεμαχίου, άρα μείωση εργατοωρών.
- Λόγω των ραφών, η διεύθυνση των στρώσεων παραμένει σταθερή κατά το χειρισμό του υλικού.

Ωστόσο, παρατηρούνται και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα στη χρήση ραμμένων υφασμάτων.

- Το τυπικό ραμμένο ύφασμα έχει συγκεκριμένη σειρά στρώσεων 0°, +45°, 90° και -45° και καλύπτει ένα εύρος απαιτήσεων του πιθανού πελάτη. Η παραγωγή διαφορετικού υφάσματος εμφανίζει δυσκολίες, καθώς γίνεται ειδική παραγγελία που διευκρινίζει τον όγκο και τον τύπο των ινών, καθώς και τον τύπο ραψίματος.

- Λόγω των ραφών, το ύφασμα αυτό παρουσιάζει μικρή ευελιξία σε τεμάχια μικρών καμπυλοτήτων και σύνθετων γεωμετριών.
- Το υλικό της κλωστής ραφής μπορεί να μην είναι συμβατό με τις θερμοκρασίες κατεργασίας ή τη μήτρα, οπότε είναι απαραίτητη η προσεκτική επιλογή του.

Οι κομμένες ίνες (chopped fibers)

Οι κομμένες ίνες διατίθενται στη αγορά σε διάφορα μήκη, κυρίως μεταξύ 0,125 και 2 ιντσών. Αναμειγμένες με άλλα πρόσθετα και ρητίνες, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τεμαχίων. Οι κοντύτερες ίνες αναμειγνύονται με θερμοπλαστικές ρητίνες και είναι ιδανικές για καλούπωμα με έγχυση. Αντίστοιχα, οι μακρύτερες συνδυάζονται με θερμορρυθμιζόμενες και χρησιμοποιούνται για καλούπωμα με συμπίεση και μεταφορά (compression and transfer molding). Οι φρεζαρισμένες ίνες (milled fibers), με μήκος από 1/32 έως 1/8 ίντσες, εμφανίζουν ευκολία στη διεργασία της ενθυλάκωσης (encapsulation) και στο καλούπωμα με συμπίεση.



Θ-1.10.11: Κομμένες ίνες γυαλιού.

Το προμορφοποιημένο (preform)

Το προμορφοποιημένο (preform) πρόκειται για μια ενίσχυση από ίνες η οποία έχει προσχηματιστεί και μορφοποιηθεί με τη χρήση ενός αρνητικού πυρήνα-άξονα πριν τοποθετηθεί στο καλούπι. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι το σχήμα του προμορφοποιημένου να προσεγγίζει ικανοποιητικά το σχήμα του τελικού τεμαχίου.

Το προμορφοποιημένο αποτελεί την πιο ακριβή μορφή ξηρής, συνεχούς προσανατολισμένης ίνας. Ωστόσο, η χρήση του μπορεί να μειώσει κατά πολύ τα εργατικά κόστη κατασκευής. Το προμορφοποιημένο ύφασμα φτιάχνεται

χρησιμοποιώντας προνήματα, κομμένες, πλεκτές, ραμμένες ή μονοδιευθυντικές μορφές υλικού. Οι ίνες αυτές συγκρατώνται σε συγκεκριμένες θέσεις και προσανατολισμούς με τη χρήση συρραφών, συνδετήρων ή συγκολλητών, τυλίγματος ή τρισδιάστατης πλέξης.

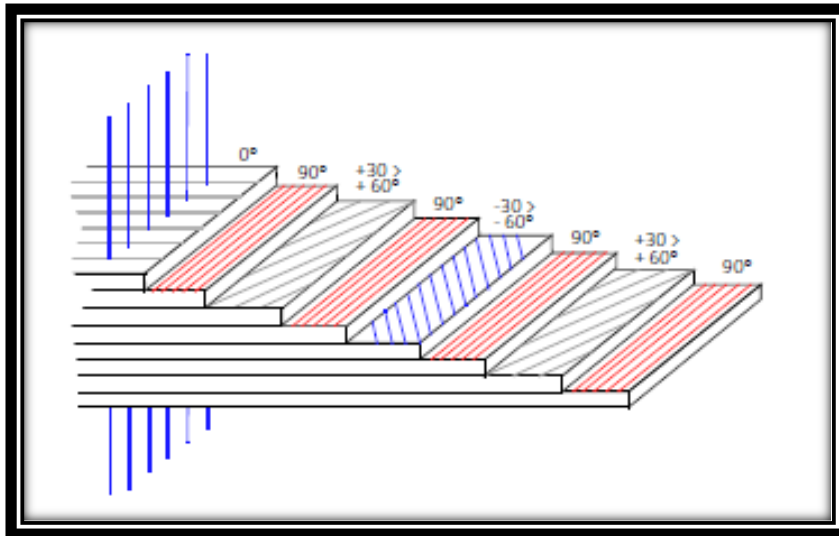
Στα βασικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου υφάσματος περιλαμβάνονται τα χαμηλά εργατικά κόστη, η ελάχιστη απώλεια υλικού (scrap), το μειωμένο ξέφτισμα σε πλεκτά ή ραμμένα υλικά, η βελτιωμένη αντοχή σε καταπόνηση (σε τρισδιάστατα ραμμένα ή προμορφοποιημένα πλεκτά) και το «κλείδωμα» των επιθυμητών προσανατολισμών των ινών. Αντίστοιχα, τα κύρια μειονεκτήματα των προμορφοποιημένων αποτελούν το υψηλό κόστος τους, η πιθανότητα μη επαρκούς εμποτισμού των ινών σε πολύπλοκα σχήματα και γεωμετρίες, η πιθανή ασυμβατότητα των συνδετήρων ή των συγκολλητών με τη μήτρα και η περιορισμένη δυνατότητα αλλαγών, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο στην πορεία της κατασκευής. Το πιο κοινό ελάττωμα που παρουσιάζουν τα προμορφοποιημένα είναι οι εκτός ανοχών διαστάσεις τους, με αποτέλεσμα να τοποθετούνται δύσκολα στο εργαλείο και να απαιτείται αφαίρεση υλικού.

Υβρίδια

Ως υβρίδια θεωρούνται οι μορφές υλικού που αποτελούνται από τουλάχιστον δύο διαφορετικά είδη ίνας και χρησιμοποιούνται για το συνδυασμό των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων κάθε τύπου ίνας. Στα υβρίδια, μπορεί οι διαφορετικοί τύποι ίνας να βρίσκονται σε εναλλασσόμενες στρώσεις (interply), μέσα στην ίδια στρώση (intraply) ή τοπικά σε επιλεγμένες περιοχές. Στην αγορά, οι πιο συχνοί συνδυασμοί είναι οι ίνες γυαλιού και άνθρακα, οι ίνες γυαλιού και αραμιδίου και οι ίνες αραμιδίου και άνθρακα. Μια κοινή χρήση υβριδικού υλικού γυαλιού/άνθρακα είναι για την αποφυγή γαλβανικής διάβρωσης μεταξύ ινών άνθρακα και αλουμινίου. Ένα υβρίδιο αραμιδίου/άνθρακα εμφανίζει χαμηλές θερμικές τάσεις, αυξημένη αντοχή σε συμπίεση σε σχέση με υλικό που έχει μόνο ίνες άνθρακα και αυξημένο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με υλικό που έχει μόνο ίνες αραμιδίου. Τέλος, το υβρίδιο άνθρακα/e-glass συνδυάζει χαμηλότερο κόστος από ύφασμα ανθρακονημάτων με καλύτερες ιδιότητες από ένα τυπικό ύφασμα μόνο με e-glass. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι είναι απαραίτητη η προσεκτική αξιολόγηση του συντελεστή θερμικών διαστολών των διαφορετικών ινών για να αποφευχθεί η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κατά τη θερμική σκλήρυνση της ρητίνης, ειδικά όταν πραγματοποιείται σε μεγάλες θερμοκρασίες.

1.11 Διαστρωματώσεις (laminates)

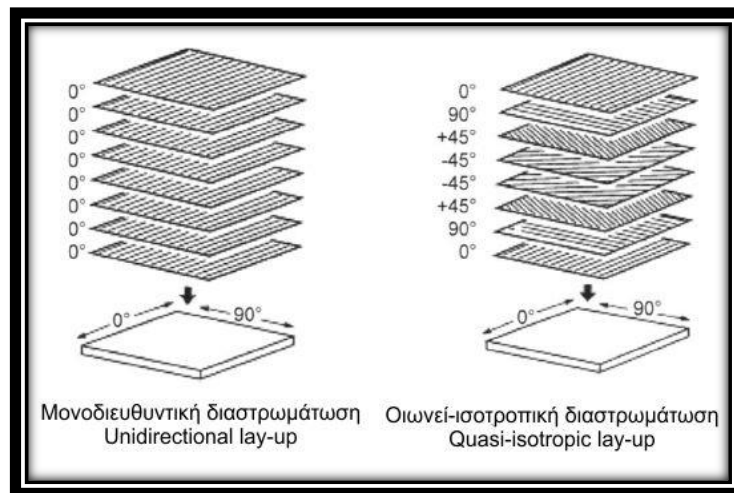
Τα ενισχυμένα με συνεχείς ίνες σύνθετα υλικά αποτελούνται από ξεχωριστές στρώσεις συγκεκριμένων διευθύνσεων ως προς τον άξονα του προϊόντος και δημιουργούν έτσι διαστρωματώσεις (Σχήμα Θ-1.11.1). Μια μονοδιευθυντική στρώση (unidirectional) 0° εμφανίζει μεγάλη ακαμψία όταν το φορτίο εφαρμόζεται στη διεύθυνση των 0° . Ωστόσο, όταν το φορτίο εφαρμόζεται στην κάθετη διεύθυνση 90° είναι πολύ αδύναμη καθώς μόνο η μήτρα μπορεί να παραλάβει το φορτίο. Μια τυπική ίνα υψηλής αντοχής έχει τάση εφελκυσμού κοντά στα 3500 MPa, ενώ αντίστοιχα μια τυπική πολυμερική μήτρα έχει μόνο 35 με 70 MPa. Οι ίνες φέρουν τα φορτία συμπίεσης και τη διαμήκη τάση, ενώ η μήτρα την εγκάρσια τάση και τη διάτμηση μεταξύ στρώσεων. Παράλληλα, η μήτρα κατανέμει και μεταφέρει τα εφελκυστικά φορτία στις ίνες και προλαμβάνει την κάμψη τους υπό θλιπτικά φορτία. Οι σχετικοί ρόλοι ίνας και μήτρας στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων συνοπτικά φαίνονται στον (Πίνακα 9) . [1.2]



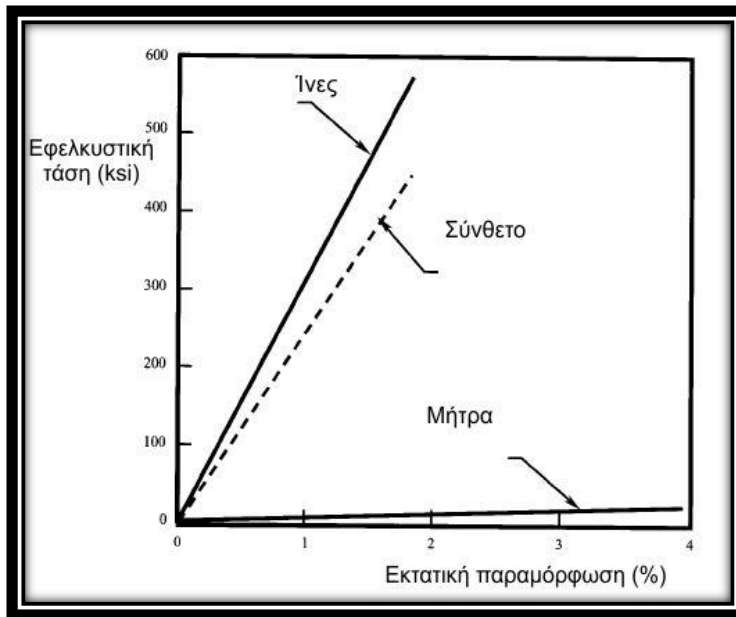
Θ-1.11.1: Παράδειγμα διαστρωμάτωσης σύνθετου υλικού.

Πίνακας 9. Επίδραση ίνας και μήτρας στις μηχανικές ιδιότητες

Μηχανική Ιδιότητα	Κυρίαρχο συστατικό σύνθετου	
	Ίνα	Μήτρα
Μονοδιευθυντική		
Εφελκυσμός 0°	√	
Θλίψη 0°	√	√
Διάτμηση		√
Εφελκυσμός 90°		√
Laminate (Διαστρωμάτωμα)		
Εφελκυσμός	√	
Θλίψη	√	√
Θλίψη εντός επιπέδου	√	
Ενδοστρωματική διάτμηση		√

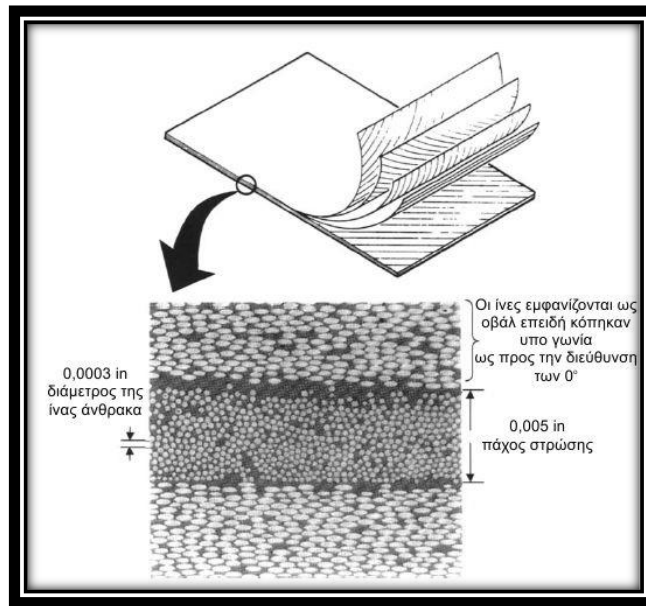


Θ-1.11.2: Οικονεί-ισοτροπική διάταξη στρώσεων.

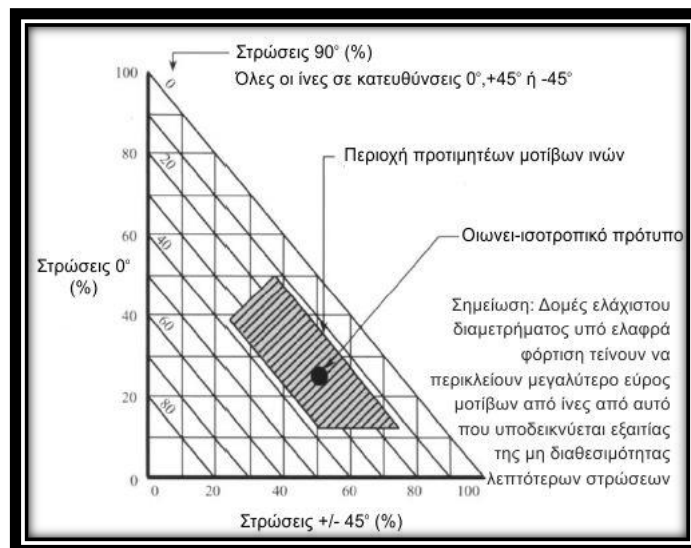


Θ-1.11.3: Ιδιότητες σε εφελκυσμό ινών, μήτρας και σύνθετου.

Δεδομένου ότι ο προσανατολισμός των ινών επιδρά άμεσα στις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου, η λογικότερη κίνηση θα ήταν να προσανατολιστεί η πλειοψηφία των στρώσεων στην κύρια διεύθυνση παραλαβής του φορτίου. Παρότι αυτό μπορεί να είναι δόκιμο σε κάποιες περιπτώσεις, συνήθως είναι απαραίτητη η εξισορρόπηση της ικανότητας παραλαβής του φορτίου σε διαφορετικές διευθύνσεις, όπως για παράδειγμα στις 0° , $+45^\circ$, -45° και 90° . Μια φωτομικρογραφία συνεχούς διασταυρωμένου ανθρακονήματος σε εποξική ρητίνη παρατηρείται στην Εικόνα Θ-1.11.4. Οιωνοί – ιστροπική (quasi-isotropic) καλείται μια ισορροπημένη διαστρωμάτωση με ίσο αριθμό στρώσεων στις κατευθύνσεις 0° , $+45^\circ$, -45° και 90° , καθώς μπορεί να παραλάβει ίσα φορτία και στις τέσσερις βασικές διευθύνσεις. Γραφική αναπαράσταση των προτιμώμενων προσανατολισμών στρώσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα Θ-1.11.5. Αυτές οι διαστρωματώσεις είναι προτιμητέες επειδή είναι αρκετά ισορροπημένες και μπορούν να παραλάβουν φορτία σε πολλαπλές κατευθύνσεις.



Θ-1.11.4: Κατασκευή διαστρωμάτωσης.



Θ-1.11.5: Προτιμητέοι προσανατολισμοί στρώσεων.

1.12 Σύνοψη των διαδικασιών παραγωγής

Τα μηχανολογικά σύνθετα υλικά πρέπει να διαμορφωθούν με κάποιας μορφής καλούπι. Το υλικό της μήτρας μπορεί να εισαχθεί στις ενισχύσεις είτε πριν, είτε μετά από την τοποθέτηση του υλικού ενίσχυσης μέσα στο καλούπι διαμόρφωσης, ή πάνω σε επιφάνεια διαμόρφωσης. Στο υλικό της μήτρας συμβαίνει μια διαμόρφωση,

ύστερα από την οποία το σχήμα του δοκιμίου έχει ουσιαστικά δοθεί. Εξαρτώμενοι από την φύση του υλικού της μήτρας, η διαμόρφωση μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους, όπως με χημικό πολυμερισμό ή με στερεοποίηση από τηκόμενη κατάσταση.

Γενικά, τα υλικά ενίσχυσης και μήτρας συνδυάζονται, συμπιέζονται και οδηγούνται να υφίστανται τήξη. Ύστερα από την τήξη, το σχήμα του δοκιμίου έχει ουσιαστικά δοθεί, αν και μπορεί να παραμορφωθεί κάτω από ορισμένες συνθήκες κατεργασίας. Για ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές υλικό μήτρας, η τήξη είναι μια αντίδραση κατά την οποία τα πολυμερή συνδέονται χημικά για το σχηματισμό δικτύων πολυμερών. Η αντίδραση αυτή εισάγεται με την εφαρμογή επιπλέον θερμότητας ή χημικής επενεργοποίησης, όπως ένα οργανικό υπεροξειδίο. Για ένα θερμοπλαστικό πολυμερές υλικό μήτρας, το αποτέλεσμα της τήξης είναι μια στερεοποίηση από την τηκόμενη κατάσταση. Για ένα μεταλλικό υλικό μήτρας, όπως είναι τα φύλλα τιτανίου, η τήξη επιτυγχάνεται σε υψηλή πίεση και σε θερμοκρασία κοντά στο σημείο τήξης.

Μια ποικιλία από μεθόδους διαμόρφωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν με βάση τις απαιτήσεις του σχεδιασμού του τελικού προϊόντος. Οι πρωταρχικοί παράγοντες που επιδρούν στο αποτέλεσμα είναι η φύση του επιλεχθέντος υλικού μήτρας, αλλά και του υλικού ενίσχυσης. Ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας είναι η συνολική ποσότητα του παραχθέντος υλικού. Μεγάλες ποσότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αιτιολογηθούν υψηλά χρηματικά ποσά που ξοδεύονται για γρήγορη και αυτοματοποιημένη κατασκευαστική τεχνολογία. Μικρές ποσότητες παραγωγής διευκολύνονται με χαμηλότερα χρηματικά ποσά επένδυσης, αλλά με υψηλότερο κόστος εργαστηρίου και εργαλείων σε έναν αντίστοιχα αργότερο ρυθμό.

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι διαμόρφωσης είναι οι ακόλουθες:

Hand Lay-up - Wet lay-up

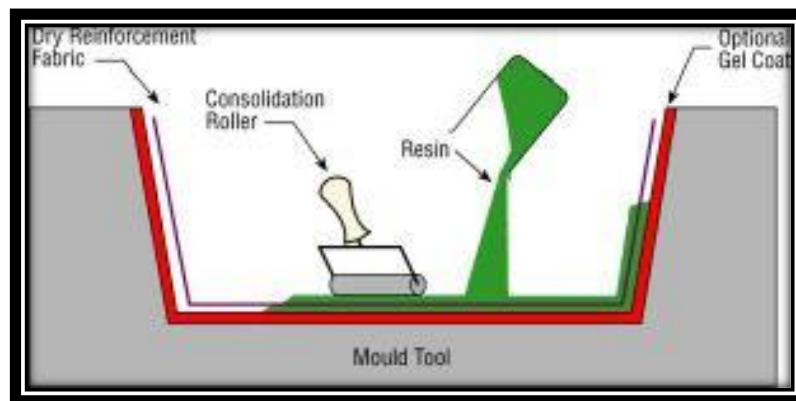
Η μέθοδος αυτή αποτελείται από τα εξής στάδια: τη χειρονακτική επίστρωση και στρωματοποίηση (Hand Lay-up) και την έκχυση ρητίνης με το χέρι (Wet Lay-up). Έχει τις μικρότερες απαιτήσεις από πλευράς μηχανημάτων και εγκαταστάσεων και πρόκειται για την απλούστερη μέθοδο κατασκευής σύνθετων υλικών.

Το καλούπι δέχεται αρχικά ένα προστατευτικό στρώμα κεριού ή ρητίνης και στη συνέχεια ο τεχνίτης τοποθετεί σε αυτό ένα στρώμα ινών και το εμποτίζει με ρητίνη έτσι ώστε να καλυφθεί εντελώς. Η επιπλέον ρητίνη και ο αέρας αφαιρούνται με χειροκίνητους κυλίνδρους και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το σύνθετο να φτάσει τον επιδιωκόμενο αριθμό στρώσεων ή πάχους.

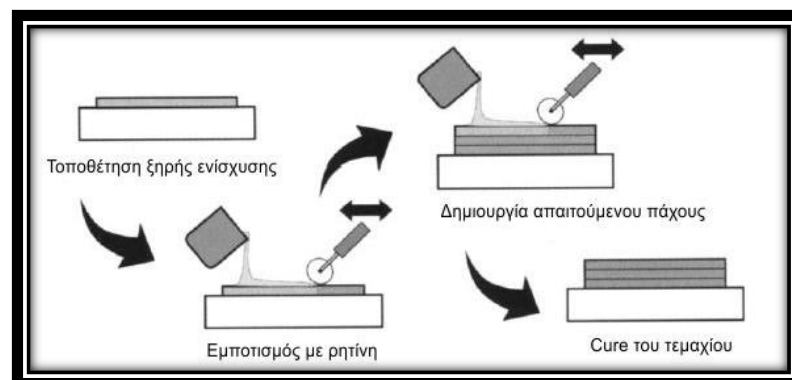
Στην συνέχεια, το καλούπι αφήνεται, για να σκληρύνει η ρητίνη, συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου, αν και η θέρμανση κάποιες φορές συνιστάται για γρήγορη σκλήρυνση. Συχνά το cure διεξάγεται χωρίς σακούλα υποπίεσης, εντούτοις η πίεση

κενού βοηθά στην βελτίωση της ποιότητας διαστρωμάτωσης. Από την στιγμή που το cure συνήθως διεξάγεται σε θερμοκρασία δωματίου ή σε χαμηλές θερμοκρασίες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολύ οικονομικός εξοπλισμός (π.χ. ξύλο) για ελαχιστοποίηση του κόστους.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μέθοδος αυτή δεν είναι ιδιαίτερως απαιτητική και λόγω της ευελιξίας της αυτής εφαρμόζεται ευρύτατα σε ναυπηγεία και στη βιομηχανία σκαφών αναψυχής. Τα υαλονήματα είναι τα πιο γνωστά που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την επεξεργασία, και τα αποτελέσματα συναντώνται σε αγαθά ευρείας κατανάλωσης, όπως είναι τα πέδιλα του σκι, τα κανό, τα καγιάκ και οι σανίδες του σερφ. Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική διαδικασία όταν η απαιτούμενη ποσότητα είναι μικρή.



Θ-1.12.1: Διαδικασία στρωματοποίησης με το χέρι (hand layup).

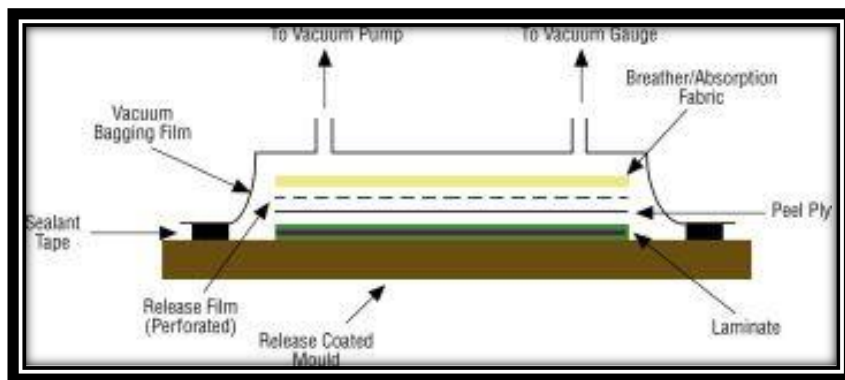


Θ-1.12.2: Διαδικασία υγρής εναπόθεσης (wet lay-up process).

Διαμόρφωση με σάκο κενού (vacuum bagging)

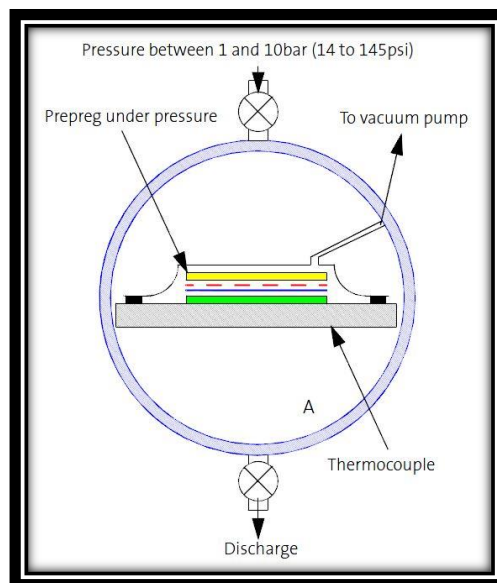
Σε αυτήν την μέθοδο οι ίνες τοποθετούνται μέσα ή πάνω σε καλούπι, εμποτίζονται και στρωματοποιούνται κατά τα γνωστά. Για να εφαρμοστεί πίεση στο

σύνθετο, το υλικό καλύπτεται αρχικά με ειδικό ύφασμα που δεν κολλάει στη ρητίνη (peel ply), μετά με ύφασμα που απορροφά την περισσευούμενη ρητίνη (breather) και τέλος με νάιλον σακούλα η οποία κλείνει πάνω στο καλούπι και πάνω της εφαρμόζεται σωλήνας συνδεδεμένος σε αντλία κενού. Έτσι, ανοίγοντας την αντλία, αφαιρείται ο αέρας που υπάρχει μέσα στις στρώσεις του υλικού, τα διάφορα υφάσματα και τη σακούλα. Σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο, παρατηρείται ότι το τελικό προϊόν έχει μεγαλύτερη κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα και λιγότερες ατέλειες. Ακόμα, με αυτή τη μέθοδο εξασφαλίζουμε ότι αφού οι ίνες εμποτιστούν σε ρητίνη, μπορούν να αποκτήσουν σχήματα περίπλοκης γεωμετρίας. Το curing της ρητίνης μπορεί να γίνει σε ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασία είτε περιβάλλοντος είτε μεγαλύτερη.



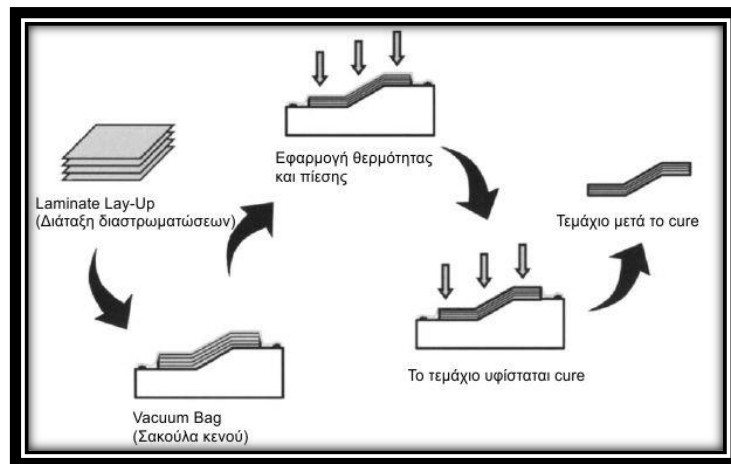
Θ-1.12.3: Τεχνική Vacuum Bagging.

Διαμόρφωση με χρήση αυτόκλειστου (autoclave processing)



Θ-1.12.4: Διάταξη αυτόκλειστου φούρνου.

Autoclave ονομάζεται ένα μεγάλο, θερμαινόμενο δοχείο υπό πίεση. Το καλούπωμα σε autoclave είναι παρόμοιο με το καλούπωμα υποπίεσης με την διαφορά ότι η διαστρωμάτωση υποβάλλεται σε μεγαλύτερη πίεση, συνήθως έως 8 bar, ενώ εφαρμόζεται θερμότητα για το cure της ρητίνης. Στα αρχικά στάδια του cure συνήθως εφαρμόζεται υποπίεση για να απομακρυνθούν τα πτητικά στοιχεία και ο παγιδευμένος αέρας χωρίς να έχουμε υπερβολική ροή ρητίνης. Η πίεση που ασκείται στην διαστρωμάτωση κυμαίνεται συνήθως στο εύρος μεταξύ 3,5 έως 7 bar. Η διαδικασία καλουπώματος σε autoclave παράγει διαστρωματώσεις υψηλής ποιότητας, με ελάχιστους πόρους και ο έλεγχος στο τελικό πάχος της διαστρωμάτωσης είναι πολύ καλύτερος από αυτόν που μπορούμε να έχουμε από το καλούπωμα υπό κενό. Το κεφάλαιο που απαιτείται για τον εξοπλισμό είναι μεγάλο, και η παραγωγή σχετικά μικρή, παράγοντες που περιορίζουν την χρήση αυτής της διαδικασίας σε αγορές υψηλότερου κόστους, όπου η υψηλή ποιότητα είναι ουσιώδης. Πολλά κύρια δομικά εξαρτήματα για αεροσκάφη, όπως πτερύγια και άτρακτοι κατασκευάζονται με αυτή την μέθοδο, καθώς διασφαλίζει επαναληψιμότητα. [1.2, 1.5]



Θ-1.12.5: Διαδικασία lay-up για προεμποτισμένο υλικό.

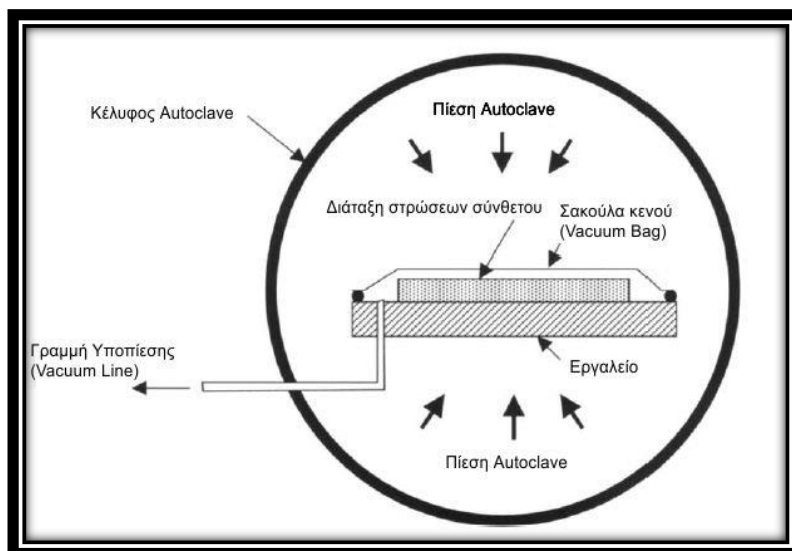
Οι στρώσεις τοποθετούνται στις απαιτούμενες διευθύνσεις και στα σωστά πάχη. Εν συνεχεία μια λεπτή νάιλον σακούλα κενού τοποθετείται γύρω από το υλικό και γίνεται αναρρόφηση ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας που υπάρχει μεταξύ των στρώσεων. Το τεμάχιο μαζί με τη σακούλα τοποθετείται μέσα σε κλίβανο ή σε autoclave (αυτόκλειστος θάλαμος όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις) και υφίσταται θερμική κατεργασία (cure) για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, θερμοκρασία και πίεση. Σε περίπτωση που απαιτείται curing σε κλίβανο,

η μέγιστη πίεση που μπορεί να επιτευχθεί είναι η ατμοσφαιρική (14,7 psi ή λιγότερο).

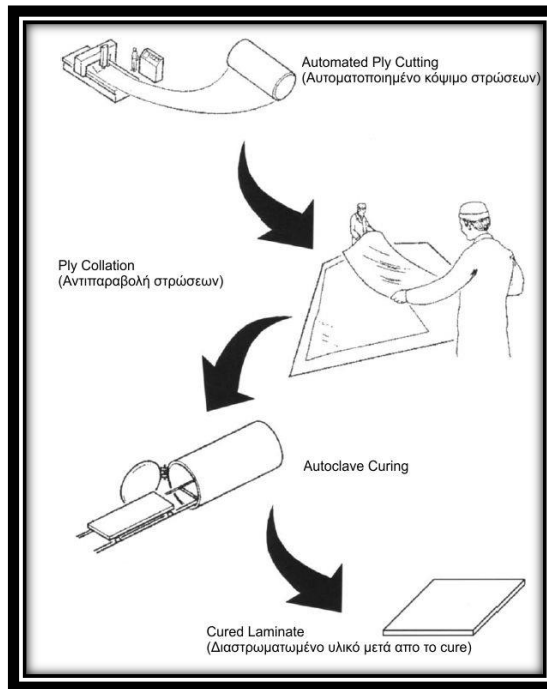
Ένα autoclave (Εικόνα Θ-1.12.6) λειτουργεί βάσει της αρχής της διαφορικής πίεσης αερίου. Ο αέρας απομακρύνεται με την εκκένωση της σακούλας κενού (vacuum bag) και στη συνέχεια το autoclave παρέχει πίεση αέρα στο τεμάχιο. Ο θάλαμος χρησιμοποιεί ένα σύστημα θέρμανσης με ανεμιστήρα για την κυκλοφορία του θερμού αέρα. Ένα autoclave παρέχει το εξής πλεονέκτημα: Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ μεγαλύτερες πιέσεις (π.χ. 100 psi) με συνέπεια να παράγεται μεγαλύτερη συμπίεση, μεγαλύτερα ποσοστά όγκου ινών, λιγότερα κενά και πορώδεις. Επιπρόσθετα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πρέσες γι' αυτή την διαδικασία αλλά έχουν κάποια μειονεκτήματα:

- (1) Το μέγεθος του τεμαχίου περιορίζεται από το μέγεθος του εμβόλου της πρέσας.
- (2) Τα έμβολα μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλα ή και μικρά σημάδια πίεσης αν οι πλάκες δεν είναι παράλληλες,
- (3) Είναι δύσκολο να παραχθούν πολύπλοκα σχέδια.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διαδικασίες για την παραγωγή σύνθετων υψηλής απόδοσης στην αεροναυπηγική είναι: αυτοματοποιημένη κοπή των υφασμάτων για τις διαστρωματώσεις, χειρωνακτική ταξινόμηση, διαστρωμάτωση και επεξεργασία σε autoclave (Εικόνα Θ-1.12.7). Παρόλο που η χειρωνακτική διαστρωμάτωση είναι κοστοβόρα, είναι ικανή για την κατασκευή τεμαχίων υψηλής ποιότητας και πολύπλοκης γεωμετρίας. Από τη στιγμή που το κόστος είναι σημαντική παράμετρος, υπάρχει εκτενής έρευνα που διεξάγεται για την ανεύρεση περισσότερο οικονομικών μορφών υλικών προϊόντων και διεργασιών. [1.2]



Θ-1.12.6: Αρχή του curing σε autoclave.



Θ-1.12.7: Παραδοσιακό lay-up και cure σε autoclave.

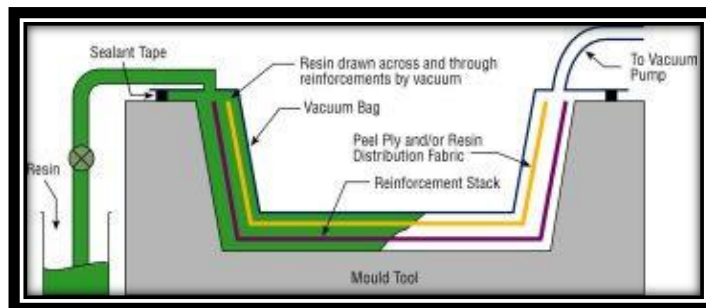
Διαμόρφωση με σάκο πίεσης

Στη μέθοδο αυτή για τη διαμόρφωση του σύνθετου χρησιμοποιείται ένα στερεό θηλυκό καλούπι και ένα εύκαμπτο αρσενικό. Όπως και στη μέθοδο του σάκου κενού, η ενίσχυση τοποθετείται μέσα στο θηλυκό καλούπι με περίσσεια ρητίνης και πάνω της εφαρμόζεται το εύκαμπτο αρσενικό καλούπι. Το σύστημα των δύο καλουπιών συσφίγγεται και το αρσενικό καλούπι διογκώνεται με ατμό ή θερμό συμπιεσμένο αέρα. Υπάρχει δυνατότητα να θερμανθεί επίσης και το θηλυκό καλούπι. Ο παγιδευμένος αέρας και η περισσευούμενη ρητίνη διαφεύγει προς τα έξω υπό την επίδραση της πίεσης.

Η διαμόρφωση με σάκο πίεσης είναι μια απλή και χαμηλού κόστους διαδικασία και χρησιμοποιείται εκτεταμένα για παραγωγή τεμαχίων από σύνθετα υλικά. Για την παραγωγή ενός τεμαχίου χρειάζονται από 20 έως 45 λεπτά μέσα στο σύστημα των καλουπιών και ειδικά αν θερμανθούν τα καλούπια δε χρειάζεται επιπλέον χρόνος αποπεράτωσης των τελειωμένων προϊόντων.

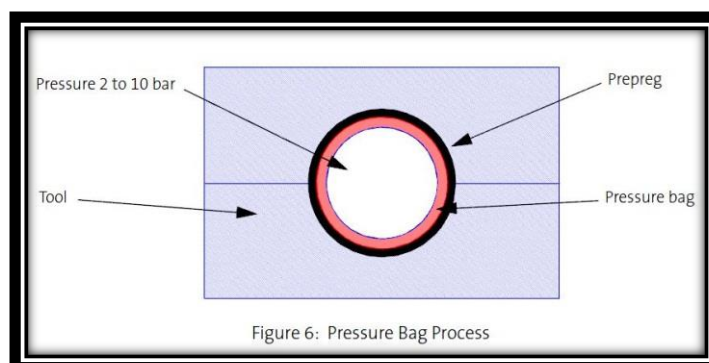
Vacuum assisted resin infusion

Η μέθοδος VARI είναι μια εξελιγμένη μορφή της διαμόρφωσης με σάκο κενού και η βασική διαφορά της εντοπίζεται στον τρόπο εμποτισμού του σύνθετου με ρητίνη. Συγκεκριμένα, όπως και στη μέθοδο του vacuum bagging, τα υφάσματα ξηρής ενίσχυσης τοποθετούνται μέσα ή πάνω στο καλούπι, χωρίς όμως να εμποτιστεί κάθε στρώση με ρητίνη. Αφού καλυφθούν τα στρώματα με τα απαραίτητα υφάσματα, τοποθετείται πάνω από όλα μια νάιλον σακούλα η οποία έχει προσαρμοσμένους επάνω της δύο σωλήνες. Ο ένας σωλήνας είναι ενωμένος με την αντλία κενού και ο άλλος με ένα δοχείο που περιέχει τη ρητίνη. Ενεργοποιώντας την αντλία, αφαιρείται ο αέρας που είναι παγιδευμένος ανάμεσα σε στρώματα ινών, υφάσματα και σακούλα ενώ παράλληλα κυκλοφορεί η ρητίνη μέσα στις στρώσεις μέχρι να φτάσει στο σωλήνα της αντλίας. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί ρητίνη ειδικού ιξώδους για τη σωστή κυκλοφορία της ανάμεσα από τις ίνες.



Θ-1.12.8: Μέθοδος VARI.

Διαμόρφωση με αεροθάλαμο μέσω σακούλας και θετικής πίεσης (Pressure Bag Moulding)



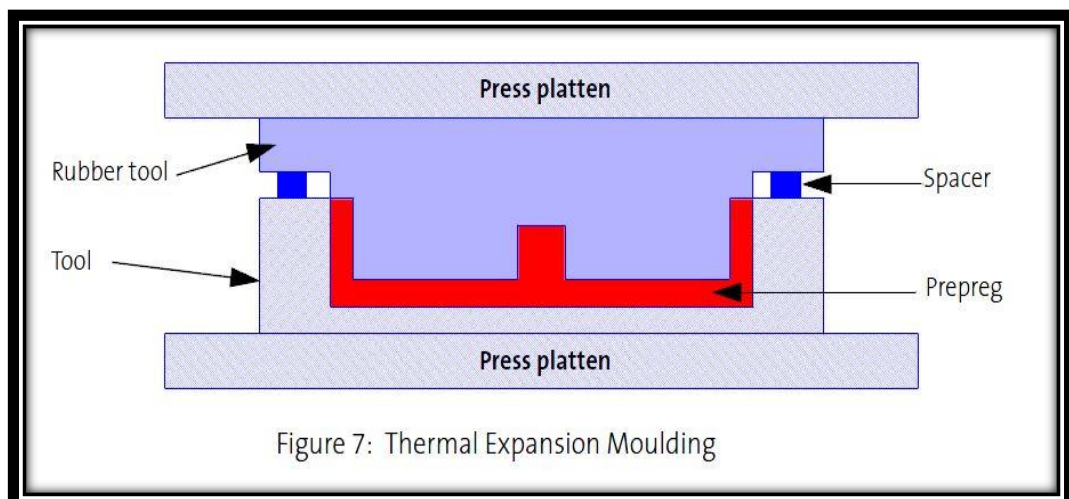
Θ-1.12.9: Αεροθάλαμος μέσω σακούλας και θετικής πίεσης (Pressure Bag Moulding).

Αυτή η μέθοδος είναι μια επέκταση του καλούπωματος με υποπίεση και σε autoclave και χρησιμοποιεί πλαστική σακούλα, συνήθως από σιλικόνη, στο πάνω μέρος της διαστρωμάτωσης. Ένα θερμό, συμπιεσμένο αέριο ή υγρό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή θερμότητας στην διαδικασία του cure και πίεσης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να υποβοηθηθεί και με κενό. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για απλά σχήματα, όπως είναι οι σωλήνες. [1.5]

Το καλούπι είναι διπλής όψευς, το οποίο διαμορφώνει και τις δύο επιφάνειες του τεμαχίου. Στην κάτω πλευρά είναι ένα στερεό καλούπι και στην άνω πλευρά είναι μια εύκαμπτη μεμβράνη, κατασκευασμένη από σιλικόνη ή ένα πολυμερές φιλμ, όπως είναι το nylon. Τα υλικά ενίσχυσης μπορούν να τοποθετηθούν είτε χειρωνακτικά, είτε αυτόματα. Αυτά περιλαμβάνουν μορφές συνεχών ινών διαμορφωμένα σε υφάσματα. Πιο συχνά, είναι prepreg σε μορφή υφασμάτων ή ταινιών με μια διεύθυνση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένα φιλμ ρητίνης εγκαθίσταται πάνω στο κάτω καλούπι και ξηρές ενισχύσεις τοποθετούνται πάνω του.

Το καλούπι κλείνει και τοποθετείται σε θερμαινόμενη πρέσα ή φούρνο. Τα στρώματα του υλικού αναγκάζονται να πιεστούν ενάντια στα τοιχώματα του καλουπιού από την ύπαρξη του αεροθαλάμου στο εσωτερικό του καλουπιού με αυξημένη πίεση. Το δοκίμιο αποπερατώνεται και απομακρύνεται από το ζεστό καλούπι. Η χρήση της αυξανόμενης πίεσης οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσοστό κατ' όγκο ινών στο σύνθετο και χαμηλής περιεκτικότητας κενού, για μεγαλύτερη κατασκευαστική αποτελεσματικότητα.

Thermal Expansion Moulding



Θ-1.12.10: Καλούπωμα με θερμική διαστολή.

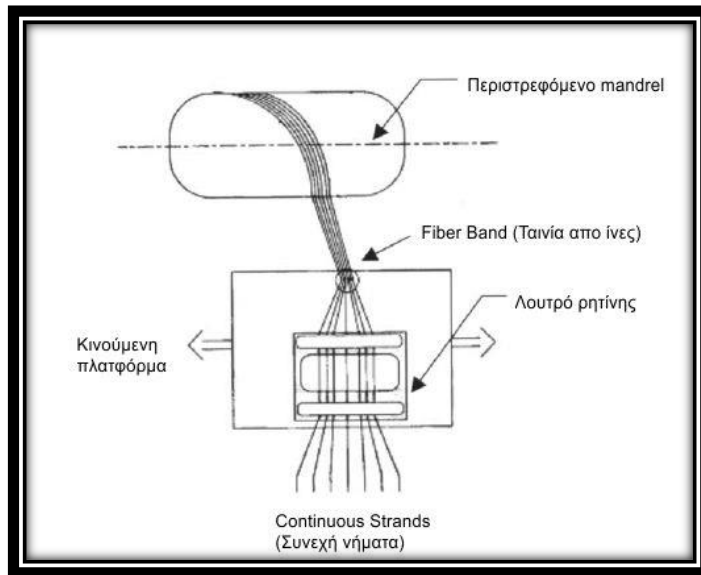
Γενικά χρησιμοποιείται για ενισχυμένες δομές με σύνθετη μορφή. Οι στρώσεις του prepreg τυλίγονται γύρω από μπλοκ πλαστικού ή αφρού και η διάταξη περιορίζεται με μεταλλική κοιλότητα. Εν συνεχεία θερμαίνεται. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία, μια υψηλή διαφορική θερμική διαστολή λαμβάνει χώρα μεταξύ πλαστικού και μετάλλου, καθώς το πλαστικό διαστέλλεται πολύ περισσότερο απ' ό τι το μέταλλο. Εφόσον το μέταλλο περιορίζει την όλη διάταξη, ασκούνται πολύ υψηλές πιέσεις που συμπιέζουν το lay up.

Αυτή η μέθοδος απαιτεί πολύ μικρό κεφάλαιο και τα εργαλεία είναι απλά και χαμηλού κόστους. Εξαρτήματα με πολύπλοκη γεωμετρία μπορούν να καλουπωθούν σε έναν θερμικό κύκλο, μειώνοντας τον αριθμό συνδέσμων και επιμέρους εξαρτημάτων, με αποτέλεσμα τη μεγάλη εξοικονόμηση βάρους και εξόδων παραγωγής. [1.5]

Περιέλιξη νήματος (filament winding)

Η μέθοδος της περιέλιξης νήματος χρησιμοποιείται για την κατασκευή σύνθετων δομών. Σε αυτή χρησιμοποιείται ένας περιστρεφόμενος άξονας γύρω από τον οποίον τυλίγεται μία συνεχής ίνα, η οποία εμποτίζεται επί τόπου σε ρητίνη ή είναι προεμποτισμένη. Για την αποπεράτωσή του, το τελικό τεμάχιο μπορεί είτε να θερμανθεί σε αυξημένη θερμοκρασία είτε να αφεθεί σε θερμοκρασία δωματίου έως ότου σκληρύνει η ρητίνη.

Η περιέλιξη υλικού (filament winding) (Εικόνα Θ-1.12.11) είναι μια κατεργασία που χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για την κατασκευή υψηλής απόδοσης δομών, οι οποίες αποτελούνται από σώματα εκ περιστροφής ή σχεδόν σώματα εκ περιστροφής. Η πιο κοινή διαδικασία είναι η υγρή περιέλιξη (wet winding), κατά την οποία προνήματα ξηρών ινών περνούν μέσα από λουτρό ρητίνης πριν από την περιέλιξη στο εργαλείο μορφής (mandrel). Το curing διεξάγεται συνήθως μέσα σε κλίβανο με ή χωρίς σακούλα κενού. Εγκάρσια περιέλιξη (hoop windings) εφαρμόζεται πάνω σε διαχωριστικά φύλλα για να παρέχεται πίεση συμπίεσης κατά τη διάρκεια του cure. [1.5]

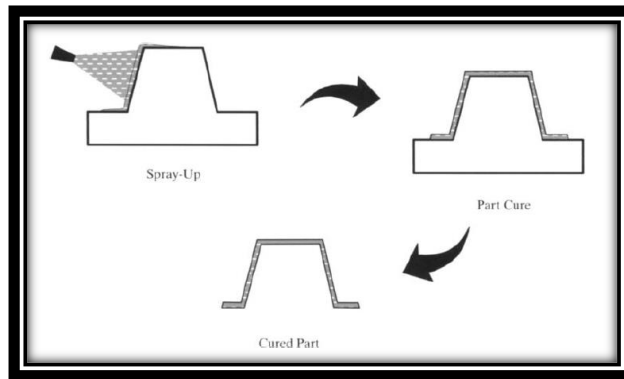


Θ-1.12.11: Περιέλιξη υλικού (filament winding).

Παραδείγματα προϊόντων που κατασκευάζονται με αυτή την μέθοδο είναι οι σωλήνες μεταφοράς ισχύος (άξονες ροπής) και οι ράβδοι ελέγχου. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν δοχεία πίεσης, κελύφη κινητήρων σε πυραύλους και κελύφη σε σωλήνες άντλησης πετρελαίου. [1.2]

Ο ψεκασμός (spray-up)

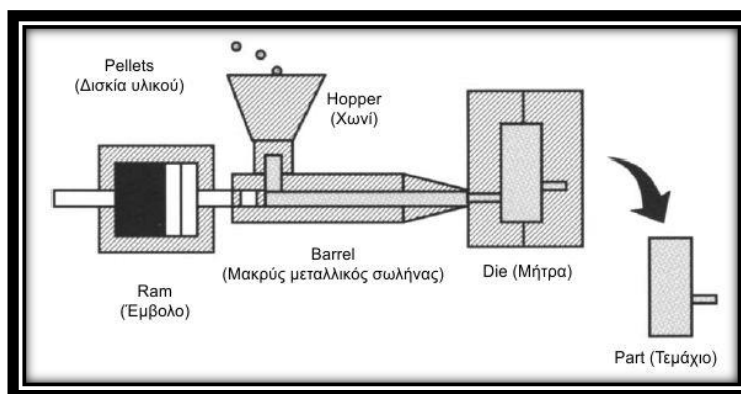
Ο ψεκασμός (spray-up) (ΕΙΚΟΝΑ Θ-1.12.12) είναι αρκετά πιο οικονομική διεργασία από την υγρή εναπόθεση (wet lay-up), αλλά οι μηχανικές ιδιότητες είναι αρκετά χαμηλότερες εξαιτίας της χρήσης τυχαία προσανατολισμένων κομμένων ινών. Κανονικά, συνεχή προνήματα από γυαλί τροφοδοτούνται σ' ένα ειδικό πιστόλι το οποίο τεμαχίζει τις ίνες σε μικρά μήκη και ταυτόχρονα τις αναμειγνύει είτε με πολυεστερική ή βινυλεστερική ρητίνη η οποία ψεκάζεται πάνω στο εργαλείο. Χειροκίνητη συμπίεση με κυλίνδρους χρησιμοποιείται πάλι για την συμπίεση της διαστρωμάτωσης. Curing με σακούλες κενού μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του τεμαχίου, αλλά συνήθως δε χρησιμοποιείται. Από τη στιγμή που οι ίνες είναι κοντές και ο προσανατολισμός είναι τυχαίος, αυτή η διαδικασία δεν χρησιμοποιείται για την κατασκευή δομικών στοιχείων που φέρουν φορτία. [1.2]



Θ-1.12.12: Διαδικασία spray-up.

Το καλούπωμα με έγχυση (injection molding)

Το καλούπωμα με έγχυση (injection molding) (ΕΙΚΟΝΑ Θ-1.12.13) είναι μια διεργασία υψηλού όγκου. Παρουσιάζει κάποιες ομοιότητες με τη διαδικασία της spray up και μπορεί να παράξει τεμάχια μικρού έως μεσαίου μεγέθους. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ίνες γυαλιού σαν ενίσχυση, ενώ η μήτρα είναι συνήθως θερμοπλαστική ρητίνη λόγω της γρήγορης κατεργασίας της και της υψηλότερης αντοχής της. Ωστόσο χρησιμοποιείται και θερμορρυθμιζόμενη ρητίνη ως μήτρα. Κατά το injection molding, σφαιρίδια (pellets) που περιέχουν ενσωματωμένες ίνες ή κομμένες ίνες με ρητίνη, τροφοδοτούνται στη χοάνη μιας μηχανής εκβολής. Εκεί θερμαίνονται έως την θερμοκρασία τήξεω τους και στη συνέχεια εγχέονται υπό υψηλή πίεση σε μια μεταλλική μήτρα καλούπι. Αφότου το θερμοπλαστικό τεμάχιο κρυώσει ή το θερμορρυθμιζόμενο υποστεί curing, απομακρύνεται και ο νέος κύκλος ξεκινά. [1.2]



Θ-1.12.13: Καλούπωμα με έγχυση (injection molding).

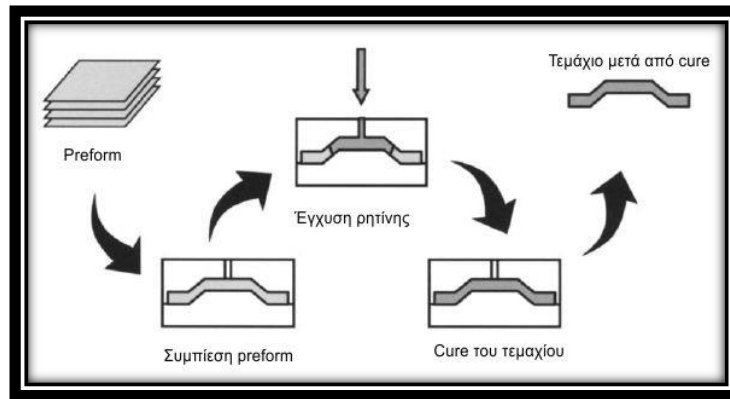
Υγρό καλούπωμα (liquid molding) RTM & VARTM

Ο όρος υγρό καλούπωμα (liquid molding), καλύπτει μια εκτενή σειρά διεργασιών. Στην κατηγορία αυτή ανήκει η διαμόρφωση με μεταφορά ρητίνης η οποία περιλαμβάνει πολυάριθμες παραλλαγές, που διαφέρουν στο μηχανικό μέρος του τρόπου εισαγωγής της ρητίνης στις ενισχύσεις μέσα στην κοιλότητα του καλουπιού.

Είναι μια επεξεργασία που χρησιμοποιεί ένα σετ από καλούπια διπλής όψευς, το οποίο διαμορφώνει και τις δύο επιφάνειες του τεμαχίου. Η κάτω πλευρά είναι ένα στερεό καλούπι και η άνω πλευρά μπορεί να είναι ένα στερεό ή εύκαμπτο καλούπι. Τα ελαστικά καλούπια μπορούν να κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά, σιλικόνη ή πολυμερή φιλμ, όπως είναι το nylon. Οι δύο πλευρές προσαρμόζονται μαζί για να παραχθεί η κοιλότητα του καλουπιού. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης μεταφοράς ρητίνης είναι ότι τα υλικά ενίσχυσης τοποθετούνται σε αυτήν την κοιλότητα και το σετ των καλουπιών κλείνει πριν την εισαγωγή του υλικού της μήτρας.

Στο καλούπωμα με μεταφορά ρητίνης (resin transfer molding, RTM), που απεικονίζεται στην ΕΙΚΟΝΑ Θ-1.12.14, μια ξηρή προφόρμα ή διαστρωμάτωση, τοποθετείται σε ανάλογη μεταλλική μήτρα και ρητίνη χαμηλού ιξώδους εγχέεται υπό πίεση, για να γεμίσει την μήτρα. Εφόσον αυτή η διαδικασία γίνεται σε καλούπια ακριβείας, είναι ικανή να διατηρήσει πολύ αυστηρές ανοχές στις διαστάσεις. Η μήτρα μπορεί να περιέχει εσωτερικά θερμαντήρες ή μπορεί να τοποθετηθεί σε εμβολοφόρο πρέσα με θερμαινόμενες πλάκες (heated platen press).

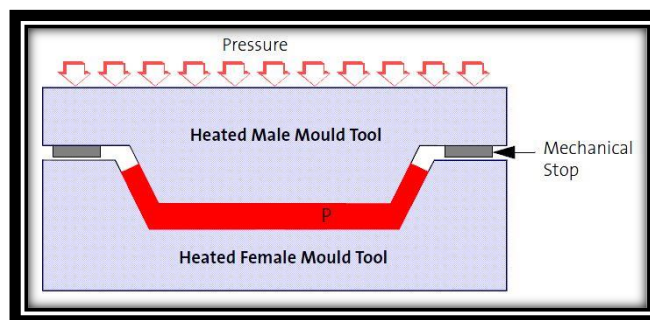
Μια παραλλαγή αυτής της διαδικασίας είναι η μεταφορά ρητίνης με υποπίεση {vacuum-assisted RTM (VARTM)}, στην οποία χρησιμοποιείται ένα μονόπλευρο εργαλείο μαζί με σακούλα κενού. Αντί να γίνεται η έγχυση της ρητίνης υπό πίεση, το κενό τραβάει την ρητίνη με τη χρήση ενός μέσου ροής που βοηθά να εμποτιστεί η προφόρμα. Αυτή η διαδικασία διαμόρφωσης επιτρέπει ακριβείς ανοχές και λεπτομερειακό σχηματισμό τελικού προϊόντος, αλλά μπορεί κάποιες φορές να αποτύχει να διαποτίσει πλήρως ορισμένες περιοχές του σύνθετου, προκαλώντας αδύναμα σημεία στην τελική δομή. Μπορεί να εκπληρωθεί είτε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, είτε σε μεγαλύτερη. [1.2]



Θ-1.12.14: Καλούπωμα με μεταφορά ρητίνης (Resin transfer molding).

Καλούπωμα σε πρέσα (press molding)

Το τμήμα του prepreg υφάσματος τοποθετείται στην κοιλότητα του καλούπιού. Το καλούπι κλείνει και το υλικό αποπερατώνεται μέσα σε αυτό, υπό την άσκηση πίεσης και θερμότητας. Η διαμόρφωση πίεσης προσφέρει εξαιρετικές λεπτομέρειες στα γεωμετρικά σχήματα, που κυμαίνονται από σχεδιαστικές και ανάγλυφες λεπτομέρειες έως πολύπλοκες καμπύλες και μηχανολογικά ακριβείς δομές. Ο μέγιστος χρόνος αποπεράτωσης είναι τα 20 λεπτά.



Θ-1.12.15: Διαδικασία καλουπώματος σε πρέσα.

Όπως και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις το ύφασμα διαστρωματώνεται στο καλούπι, ή προμορφοποιείται σε ξεχωριστό εργαλείο για να διευκολυνθεί η γρήγορη τοποθέτησή του στο ζεστό εργαλείο.

Τα καλούπια/εργαλεία συνήθως κατασκευάζονται από μηχανικά κατεργασμένο ή χυτό μέταλλο, και παράγονται σε ζευγάρια αρσενικό-θηλυκό. Ο χώρος μεταξύ τους καθορίζει τη μορφή και το πάχος του υπό κατασκευή εξαρτήματος.

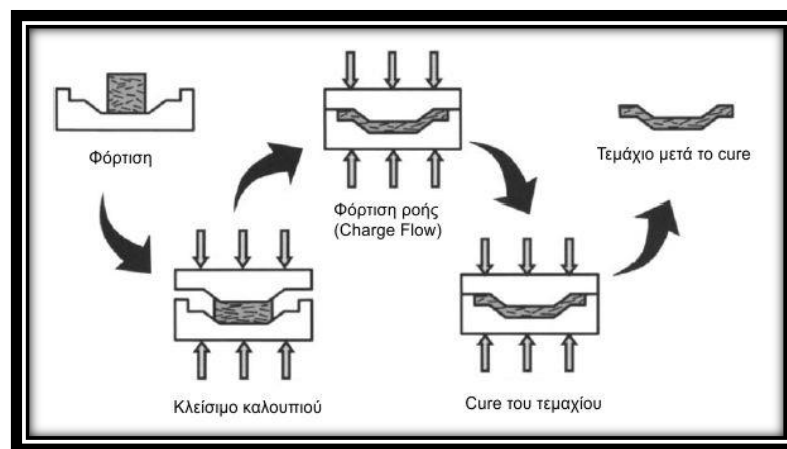
Η πίεση παράγεται, συνήθως, υδραυλικά και ο θερμικός κύκλος ελέγχεται από διάφορα μέσα θέρμανσης. Το εργαλείο μπορεί να θερμαίνεται άμεσα με ηλεκτρισμό, έλαιο ή ατμό, με διάλυτους μέσα στο ίδιο το εργαλείο στην περίπτωση απευθείας θέρμανσης με έλαιο ή ατμό. Στην περίπτωση χρήσης ηλεκτρισμού μπορεί να εγκατασταθούν θερμαντικά στοιχεία μέσα στο καλούπι. Σε μικρά εξαρτήματα, η θερμότητα μπορεί να εφαρμόζεται απευθείας μέσω θερμαινόμενων πλακών στην ίδια την πρέσα. [1.5]

Με αυτή την μέθοδο επιτυγχάνονται πολύ ακριβείς ανοχές και μπορούμε να έχουμε μεγάλο βαθμό αυτοματισμού. Οι θερμικοί κύκλοι cure μπορούν να οριστούν και να ελεγχθούν με μεγάλη ακρίβεια, ούτως ώστε η διαδικασία να παράγει συνεχώς εξαρτήματα υψηλής ποιότητας.

Εξαιτίας του υψηλού κόστους αρχικού εξοπλισμού, αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για μεγάλο όγκο παραγωγής.

Καλούπωμα με συμπίεση (compression molding)

Το καλούπωμα με συμπίεση (compression molding) (ΕΙΚΟΝΑ Θ-1.12.16) πρόκειται για μια ακόμα διεργασία που χρησιμοποιεί καλούπια ακριβείας. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ασυνεχές είτε τυχαία προσανατολισμένο SMC ή BMC. Μια προκαθορισμένη ποσότητα υλικού συγκεκριμένου βάρους τοποθετείται μεταξύ των δύο τμημάτων του καλουπιού και στη συνέχεια εφαρμόζεται καθορισμένη πίεση και θερμοκρασία. Το τετηγμένο σύνθετο ρέει για να γεμίσει το καλούπι και μετά γίνεται θερμική επεξεργασία πολύ γρήγορα μέσα σε 1-5 λεπτά ανάλογα με τον τύπο του πολυεστέρα ή του βινυλεστέρα που χρησιμοποιείται. Τα θερμοπλαστικά σύνθετα, που συνήθως αποτελούνται από ίνες γυαλιού ή πολυπροπυλένιο, καλουπώνονται επίσης υπό πίεση για την αυτοκινητοβιομηχανία. [1.2]



Θ-1.12.16: Καλούπωμα με συμπίεση (Compression molding).

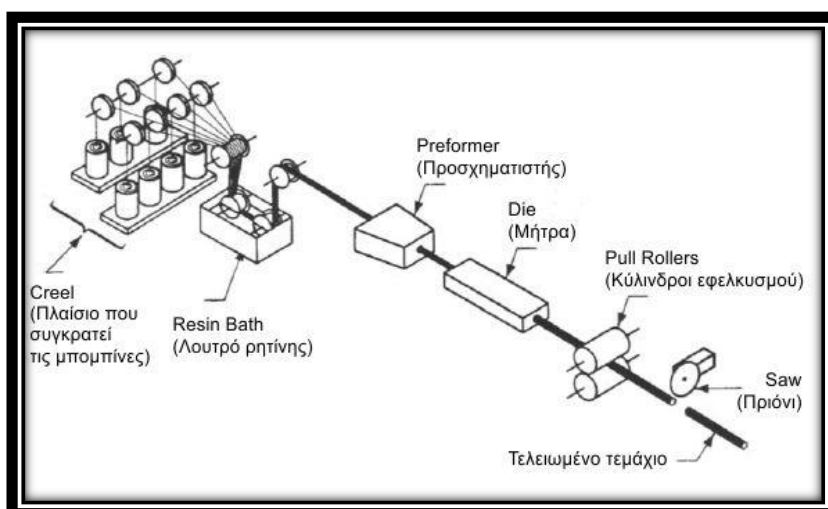
Η διέλαση (pultrusion)

Η διέλαση (pultrusion), όπως και η διαμόρφωση μεταφοράς ρητίνης, χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες για την κατασκευή εξαρτημάτων από ίνες γυαλιού με χρήση πολυεστερικών ρητινών. Τα τελευταία δέκα χρόνια όμως, η συγκεκριμένη διαδικασία παραγωγής εφαρμόζεται και για την παραγωγή σύνθετων - εξελιγμένων εξαρτημάτων από ίνες άνθρακα.

Είναι μια σχετικά απλή, συνεχόμενη διαδικασία, χαμηλού κόστους, κατά την οποία η ενίσχυση, συνήθως νήμα, δεσμίδα ινών ή mat υλικό, διέρχεται εφελκυσμένη μέσα από λουτρό θερμής ρητίνης και έπειτα περνάει από μία ή περισσότερες διατάξεις διαμόρφωσης (κύλινδροι, προφόρμες κτλ). Τα επικρατέστερα συστήματα ρητίνης είναι πολυεστέρες και βινυλεστέρες που υφίστανται γρήγορο curing.

Έπειτα, το υλικό μεταφέρεται σε μία θερμαινόμενη μήτρα, όπου υφίσταται πολυμερισμό και διαμορφώνεται στο τελικό του σχήμα. Περαιτέρω επεξεργασία μετά τον πολυμερισμό είναι η κοπή του τεμαχίου στο επιθυμητό μήκος, χωρίς την ανάγκη επιπλέον επεξεργασίας. Ένα μεγάλο εύρος διατομών υλικού, είτε συμπαγών είτε κούφιων (hollow), μπορεί να παραχθούν με διέλαση και η διαδικασία μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα για την παραγωγή ειδικών εξαρτημάτων και είναι κατάλληλη για οποιοδήποτε ημιμαλακό υλικό και γεωμετρικό σχήμα.

Στην ΕΙΚΟΝΑ Θ-1.12.17, παρουσιάζεται μια μάλλον εξειδικευμένη διεργασία παραγωγής σύνθετων, η οποία είναι ικανή για την κατασκευή μακρών τεμαχίων σταθερού πάχους. [1.2]



Θ-1.12.17: Διέλαση (pultrusion).

Άλλες μέθοδοι διαμόρφωσης

Άλλοι τύποι διαμόρφωσης είναι:

- Η διαδικασία χύτευσης σε καλούπι (casting)
- Η φυγοκεντρική χύτευση θερμοπλαστικής ρητίνης σε θερμαινόμενο περιστρεφόμενο δοχείο (centrifugal casting).

Ο ΠΙΝΑΚΑΣ 10 παρουσιάζει μία σύνοψη μερικών από τις μορφές προϊόντων και των κατεργασιών τους, ενώ ο ΠΙΝΑΚΑΣ 11 παρέχει μια σχετική σύγκριση μεταξύ της χρήσης ξηρής ίνας/ σκέτης ρητίνης (dry fiber/ neat resin) και προεμποτισμένου (prepreg) υλικού.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10. Τυπικές μορφές προϊόντος υλικού και διαδικασίες [1.2]

Διαδικασία Μορφή υλικού	Pultrusion (Διέλαση)	Resin Transfer molding (καλούπωμα με μεταφορά ρητίνης)	Compression molding (καλούπωμα υπό συμπίεση)	Filament winding (Περιέλιξη υλικού)	Hand lay-up (Χειρωνακτική διαστρωμάτωση)	Auto tape laying (αυτόματη στρώση ταινίας)
Ασυνεχής						
Sheet molding compound			■			
Bulk molding compound			■			
Τυχαία συνεχής						
Swirl mat (Περιστρεμμένα mat)/Neat resin (σκέτη ρητίνη)	■	■	■	■	■	
Προσανατολισμένη συνεχής						
Unidirectional tape (μονοδιευθυντική ταινία)			■		■	■
Woven prepreg (πλεκτό prepreg)			■		■	
Woven fabric (πλεκτό)	■	■		■	■	

ύφασμα)/Neat resin (σκέτη ρητίνη)						
Stitched material (ραμμένο υλικό) /Neat resin (σκέτη ρητίνη)		■				
Prepreg roving (προεμποτισμένο πρόνημα)				■		
Roving (Πρόνημα)/Neat resin (Σκέτη ρητίνη)	■			■	■	
Preform (προσχηματισμένο)/ Neat resin (Σκέτη ρητίνη)		■				

ΠΙΝΑΚΑΣ 11. Σύγκριση ξηρής ίνας/Σκέτης ρητίνης (Dry fiber/Neat resin) και προεμποτισμένου (prepreg). [1.2]

	Dry fiber/Neat resin (Ξηρή ίνα/ Σκέτη ρητίνη)	Prepreg
Κόστος	Χαμηλότερο	Υψηλότερο
Shelf life (διάρκεια ζωής αποθήκευσης)	Καλύτερος	Χειρότερος
Αποθήκευση	Καλύτερη	Χειρότερη
Συμπεριφορά υλικού (material handling)		
➤ Drapeability (ευελιξία)	Καλύτερη	Χειρότερη
➤ Tack (κολλώδης ιδιότητα)	Χειρότερο	Καλύτερο
Έλεγχος ρητίνης	Χειρότερο	Καλύτερο
Έλεγχος όγκου ίνας	Χειρότερος	Καλύτερος
Ποιότητα τεμαχίου	Χειρότερη	Καλύτερη

1.13 Βιβλιογραφία

- [1.1] Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, Δημήτρης Ι. Παντελής, (17)
- [1.2] Manufacturing Processes for Advanced Composites, F.C. Campbell, 2004
- [1.3] Johnson, Todd. "History of Composites." ThoughtCo, Aug. 25, 2020, [thoughtco.com/history-of-composites-820404](https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404)
- [1.4] Structural analysis of polymeric composite materials, Mark E. Tuttle, 2004
- [1.5] An Introduction to Advanced Composites and Prepreg Technology, Advanced Composites Group

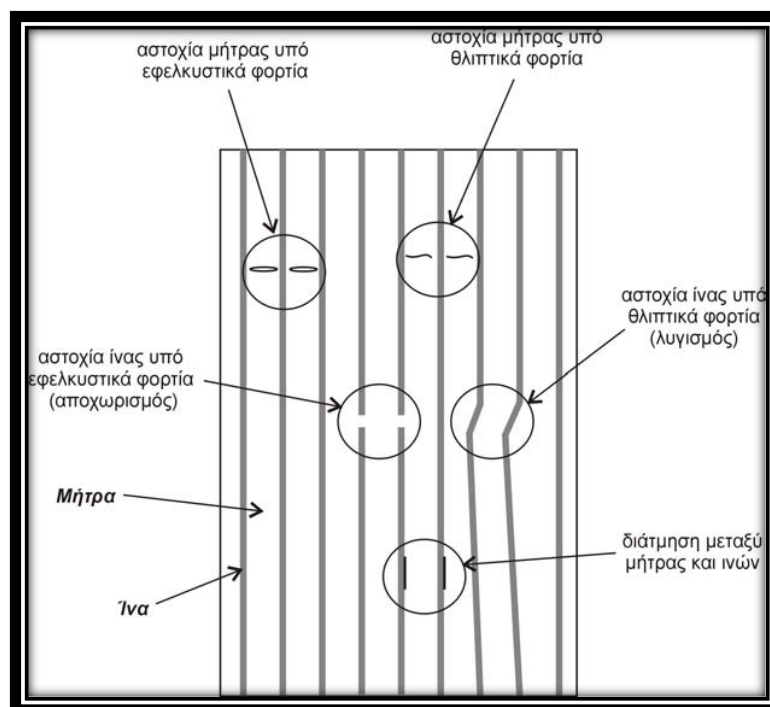
Κεφάλαιο 2 Η αστοχία στα σύνθετα υλικά

2.1 Εισαγωγή

Η αστοχία στα μέταλλα ορίζεται ως η δημιουργία ρωγμών και η διάδοσή τους μέσα στο υλικό. Στα σύνθετα υλικά, ωστόσο, δεν είναι διακριτός ο μακροσκοπικός ορισμός της αστοχίας. Σε ένα ετερογενές πολύστρωτο σύνθετο μπορεί να εμφανιστούν πολλές διαφορετικές τοπικές αστοχίες, που αναφέρονται ως βλάβες, πριν αυτές αναπτυχθούν με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση του φορτίου. Η συσσώρευση αυτή των βλαβών θα οδηγήσει σε διαχωρισμό του σύνθετου σε διαφορετικά κομμάτια.

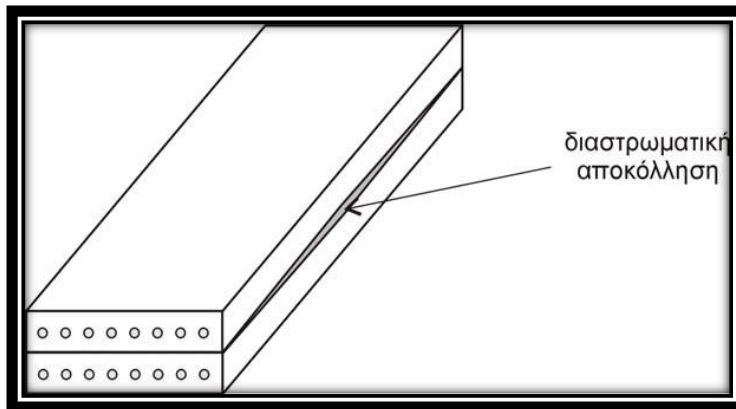
Σε ένα ινώδες σύνθετο υλικό, οι μηχανισμοί αστοχίας είναι πολύπλοκοι. Σε επίπεδο στρώσης, οι βασικοί μηχανισμοί αστοχίας, όπως φαίνεται στο σχήμα Θ-2.1, είναι οι εξής:

- Η αστοχία των ινών λόγω εφελκυστικών ή θλιπτικών φορτίων, που παρατηρείται αποχωρισμός ινών και λυγισμός ινών αντίστοιχα
- Η αστοχία της μήτρας λόγω εφελκυστικών ή θλιπτικών φορτίων
- Η διάτμηση μήτρας και ινών.



Θ-2.1: Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών αστοχίας σε μια ινώδη στρώση.

Αντίστοιχα, σε επίπεδο πολύστρωτης πλάκας, η πιο συχνή αστοχία που παρατηρείται είναι η αποκόλληση μεταξύ δύο στρώσεων που ονομάζεται διαστρωματική αποκόλληση ή delamination και απεικονίζεται στο σχήμα Θ-2.2.



Θ-2.2: Σχηματική αναπαράσταση της διαστρωματικής αποκόλλησης (delamination).

Τα σύνθετα υλικά μπορεί να αστοχήσουν λόγω υπέρβασης είτε των ορίων αντοχής τους, δηλαδή της ικανότητας τους να φέρουν φορτία, είτε των ορίων δυσκαμψίας τους, δηλαδή των επιτρεπόμενων ορίων παραμόρφωσής τους. Η δυνατότητα εκτίμησης των ορίων αυτών είναι πολύπλοκη, καθώς τα σύνθετα είναι ορθοτροπικά και η αντοχή τους μεταβάλλεται στις διάφορες διευθύνσεις. Στην πράξη, οι αντοχές που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν ένα σύνθετο είναι πέντε και αφορούν τις κύριες διευθύνσεις του.

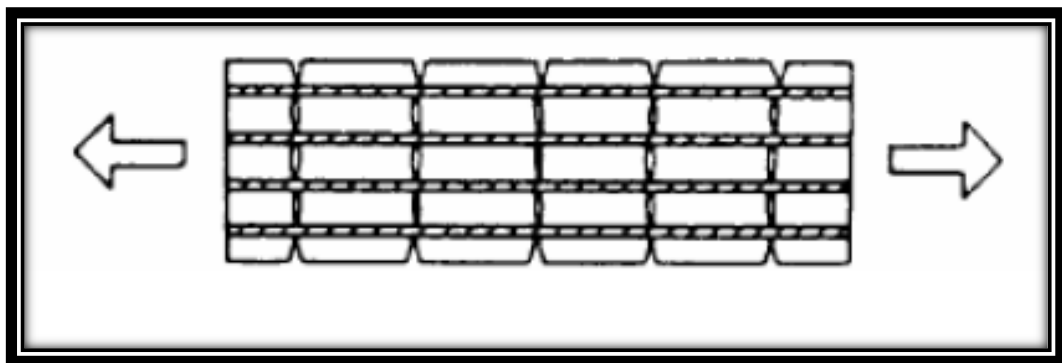
Εφελκυσμός στη διεύθυνση των ινών 1	Xt
Θλίψη στη διεύθυνση των ινών 1	Xc
Εφελκυσμός στη κάθετη διεύθυνση 2	Yt
Θλίψη στην κάθετη διεύθυνση 2	Yc
Διάτμηση στο επίπεδο 1-2	S

2.2 Τρόποι αστοχίας σε εφελκυσμό

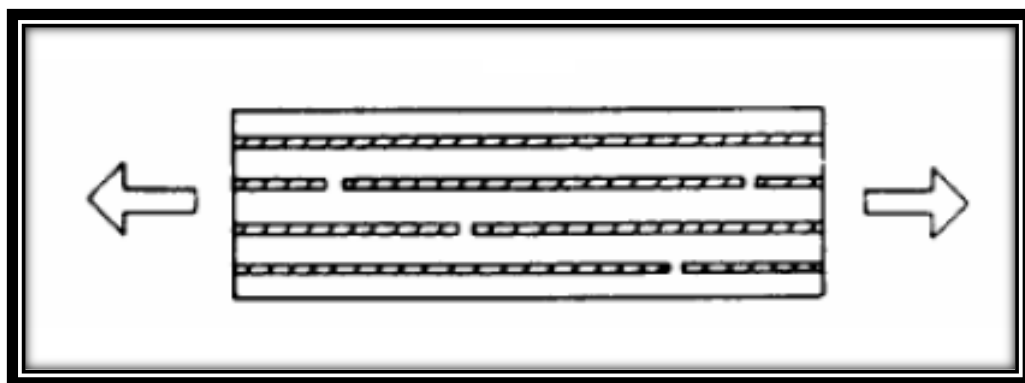
Η αστοχία ενός πολύστρωτου σύνθετου υλικού υπό εφελκυστικό φορτίο παράλληλο στη διεύθυνση των ινών εξαρτάται από τη σχέση των μέγιστων

παραμορφώσεων των ινών και της μήτρας. Για παράδειγμα, σε ένα τυπικό σύνθετο αποτελούμενο από υαλονήματα και πολυεστερική ρητίνη, όπου η μέγιστη παραμόρφωση της μήτρας είναι μικρότερη αυτής των ινών, πρώτα αστοχεί η μήτρα και το φορτίο τελικά φέρεται από τις ίνες, συνεπώς η αντοχή της στρώσης δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό (Σχήμα Θ-2.3). Αντίστοιχα, σε σύνθετο με ανθρακονήματα και πολυεστερική ή εποξική ρητίνη, πρώτα θραύονται οι ίνες και μετά η ρητίνη. Εάν ο δεσμός μεταξύ μήτρας και ινών είναι καλός, ακόμα και όταν έχουν σπάσει κάποιες ίνες άνθρακα, η μήτρα μπορεί μέσω διάτμησης να μεταφέρει το φορτίο από τις σπασμένες ίνες σε διπλανές άθικτες (Σχήμα Θ-2.4). Οι σπασμένες ίνες μπορούν να φέρουν ξανά φορτίο σε απόσταση δέκα με εκατό φορές τη διάμετρό της από το σημείο θραύσης της. Όταν αθροιστούν πολλά σπασίματα ινών στην ίδια εγκάρσια τομή τότε θραύεται και η στρώση.

Εάν το εφελκυστικό φορτίο ασκείται κάθετα στη διεύθυνση των ινών, τότε η αστοχία γίνεται είτε λόγω ρηγματώσεως της μήτρας είτε μέσω της διάτμησης ινών και μήτρας.



Θ-2.3: Ρηγματώση ρητίνης πριν την θραύση των ινών.

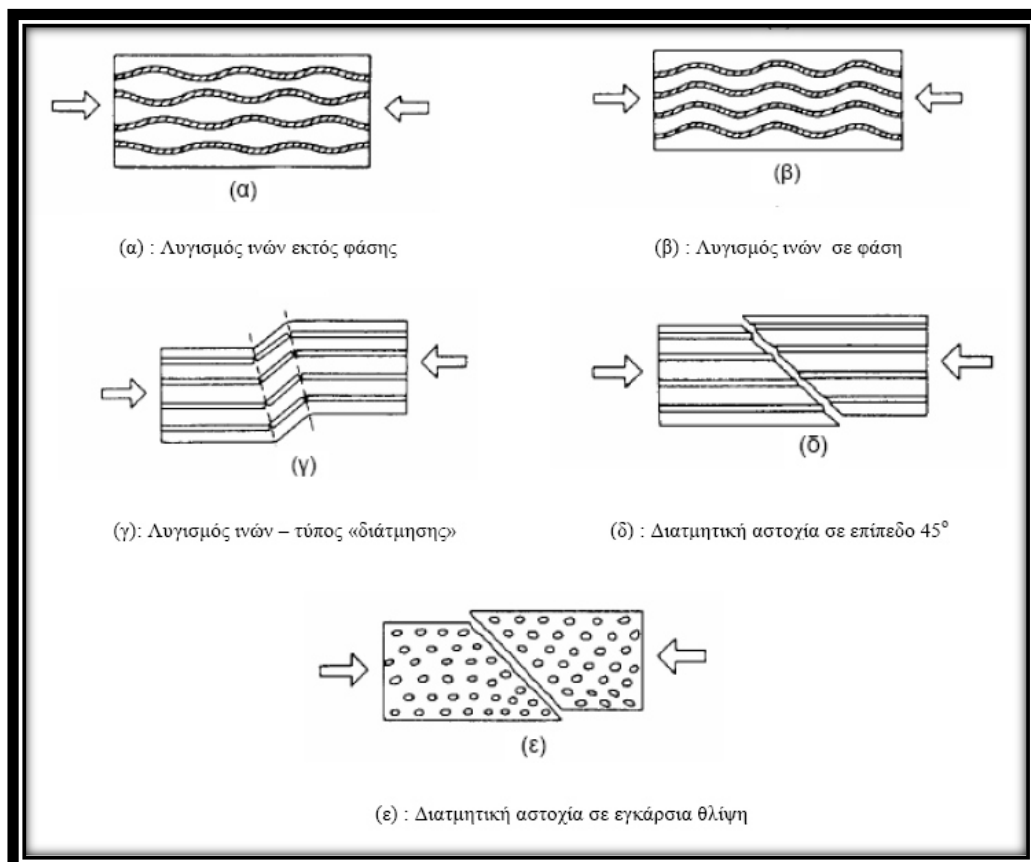


Θ-2.4: Θραύση ινών πριν την θραύση της ρητίνης.

2.3 Τρόποι αστοχίας σε θλίψη

Υπό την επίδραση θλιπτικού φορτίου κατά τη διεύθυνση των ινών η αστοχία μίας στρώσης χαρακτηρίζεται από το μικροσκοπικό λυγισμό των ινών μέσα στη ρητίνη. Οι ίνες συμπεριφέρονται ως κολώνες και η περιβάλλουσα ρητίνη δρα ως ελαστική έδραση. Μέσα σε στρώση μικρού όγκου ινών οι ίνες εμφανίζουν λυγισμό έκτασης, είτε εκτός φάσης (Σχήμα Θ-2.5α) είτε σε φάση (Σχήμα Θ-2.5β), ή λυγισμό διάτμησης, όπου δημιουργούνται έκκεντρες ζώνες (Σχήμα Θ-2.5γ). Στην περίπτωση σύνθετου με ίνες υψηλού μέτρου δυσκαμψίας, μπορεί να αστοχήσει η μήτρα σε επίπεδο 45° λόγω διάτμησης προτού εμφανιστεί λυγισμός στις ίνες (Σχήμα Θ-2.5δ). Αντίστοιχα, όταν το θλιπτικό φορτίο εφαρμόζεται κάθετα στις ίνες, η μήτρα αστοχεί με παρόμοιο τρόπο, πολλές φορές χωρίς τη θραύση ινών (Σχήμα Θ-2.5ε).

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αστοχία πολύστρωτων υλικών υπό την επίδραση θλιπτικού φορτίου αφορούν τις διάφορες ατέλειες που εντοπίζονται μέσα στο υλικό, όπως είναι για παράδειγμα η ατελής ένωση ινών και ρητίνης, η μη ευθυγράμμιση των ινών και η ατελής γειτνιάσή τους αλλά και τυχόν κενά, ειδικά στη διεπιφάνεια ινών και ρητίνης.



Θ-2.5: Τρόποι αστοχίας σε θλίψη μιας μονοαξονικής στρώσης.

2.4 Μορφές αστοχίας

Οι κυριότερες μορφές αστοχίας που παρατηρούνται στα σύνθετα υλικά είναι οι ακόλουθες:

α. Θραύση των ινών (fibre breakage)

Κατά τη διάδοση ρωγμής κάθετα στη διεύθυνση των ινών, οι ίνες θραύονται σταδιακά μέχρι να διαχωριστεί πλήρως το σύνθετο έλασμα. Η θραύση των ινών γίνεται όταν η παραμόρφωσή τους ξεπεράσει την παραμόρφωση θραύσης τους. Παρά το γεγονός ότι οι ίνες προσδίδουν την υψηλή αντοχή σε ένα σύνθετο υλικό, η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση των ινών αποτελεί ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται από το σύνθετο μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου.

β. Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας (matrix deformation and cracking)

Για να ολοκληρωθεί η θραύση ενός σύνθετου υλικού, πέρα από τη θραύση των ινών πρέπει να υπάρξει και θραύση της περιβάλλουσας μήτρας. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες χαρακτηρίζονται ως ψαθυρά υλικά, δηλαδή μπορούν να παραμορφωθούν σε πολύ περιορισμένο βαθμό πριν σπάσουν, σε αντίθεση με τις μεταλλικές μήτρες, όπου μπορούν να παραμορφωθούν πλαστικά σε μεγάλο βαθμό πριν τη θραύση τους. Συνεπώς, η ενέργεια που απορροφάται κατά την παραμόρφωση και τελικά θραύση της μήτρας σε μία πολυμερική ρητίνη είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη ενέργεια σε σύνθετο υλικό με μεταλλική μήτρα και άρα συνεισφέρει σε πολύ μικρότερο βαθμό στην συνολική απορροφούμενη ενέργεια.

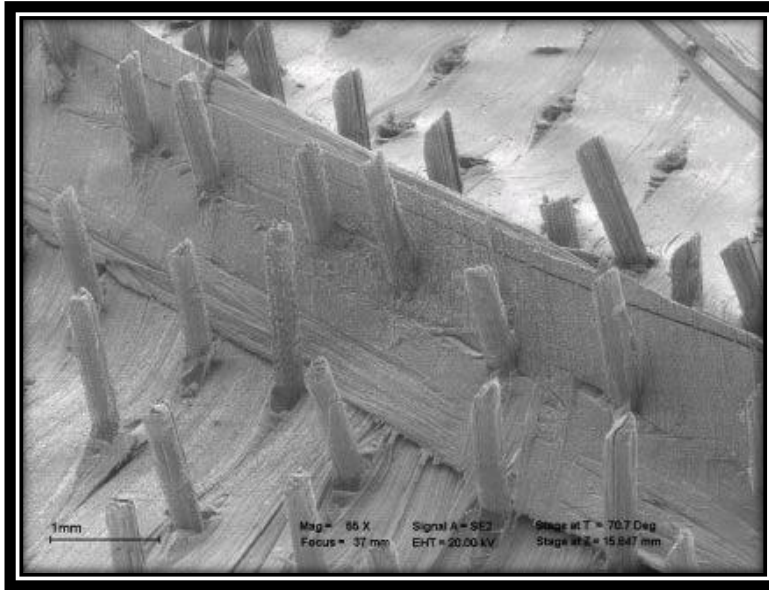
γ. Αποκόλληση ινών και μήτρας

Κατά τη θραύση των ινών, οι ίνες μπορεί να εκριζωθούν από τη μήτρα (pull-out) ή να αποκολληθούν από αυτή λόγω των δημιουργούμενων ρωγμών στη διεπιφάνειά τους (debonding cracks). Η διάδοση των ρωγμών αυτών σημαίνει «σπάσιμο» των χημικών ή δευτερευόντων δεσμών μεταξύ ίνας και μήτρας και οδηγεί σε μείωση αντοχής στη διεπιφάνεια και πιθανώς σε εκτεταμένη αποκόλληση.

δ. Διαστρωματική αποκόλληση

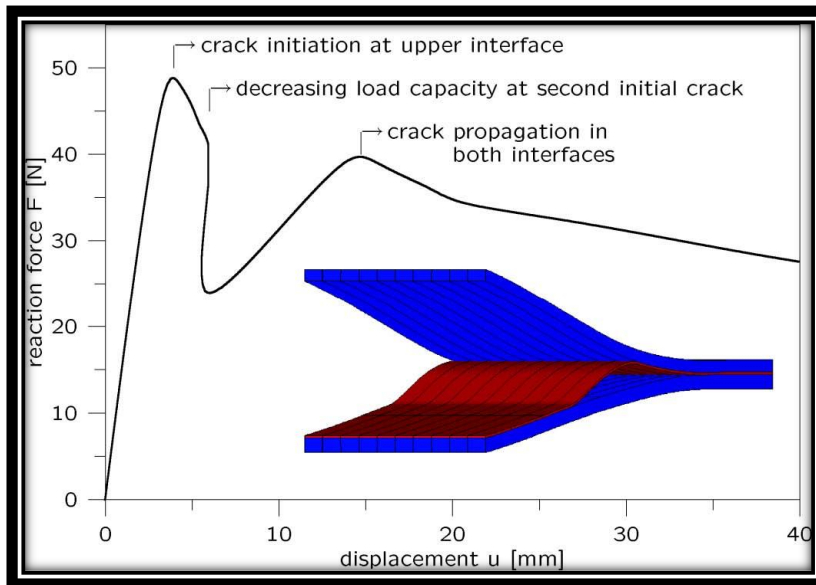
Κατά τη διάδοση ρωγμής μέσα σε πολύστρωτο σύνθετο έλασμα, η ρωγμή αυτή μπορεί να προσελκυσθεί προς τις ίνες μιας γειτονικής στρώσης, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που διαδίδεται στη διεπιφάνεια ινών και μήτρας. Εξαιτίας των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων στη μήτρα κοντά στο σημείο της αστοχίας, η ρωγμή μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ των στρώσεων και γι' αυτό και ονομάζεται ρωγμή διαστρωματικής αποκόλλησης. Τέτοιου τύπου ρωγμές εμφανίζονται συχνά σε πολύστρωτα

σύνθετα στα οποία εφαρμόζονται καμπτικά φορτία και απορροφούν ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της ενέργειας θραύσης.



Θ-2.6: Εσωτερική αστοχία.

Η συμπεριφορά ενός σύνθετου υλικού σε μακροσκοπικό επίπεδο επηρεάζεται από εσωτερικές αστοχίες μόνο όταν αυτές συγκεντρώνονται σε μεγάλο βαθμό.



Θ-2.7: Διαστρωματική αποκόλληση.

2.5 Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων λεπτότοιχων σωλήνων

Μόλις τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να ερευνάται η ικανότητα προστασίας δομών και συνδέσμων από σύνθετα υλικά σε περίπτωση σύγκρουσης, ενώ η αντοχή τους σε σύγκρουση υπό κάμψη και αξονική συμπίεση είναι ακόμα αντικείμενο μελέτης.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες, τα σύνθετα κελύφη κυλινδρικής ή τετραγωνικής διατομής παραμορφώνονται διαφορετικά από κελύφη συμβατικών υλικών όταν υφίστανται αξονική συμπίεση. Αντί για πλαστική παραμόρφωση, ο κύριος μηχανισμός κατάρρευσης είναι η εκτεταμένη εμφάνιση και διάδοση μικρορωγμών. Η διάδοση των μικρορωγμών αυτών εξαρτάται από τον προσανατολισμό των ινών αλλά και τις ιδιότητες τόσο των ινών όσο και της μήτρας.

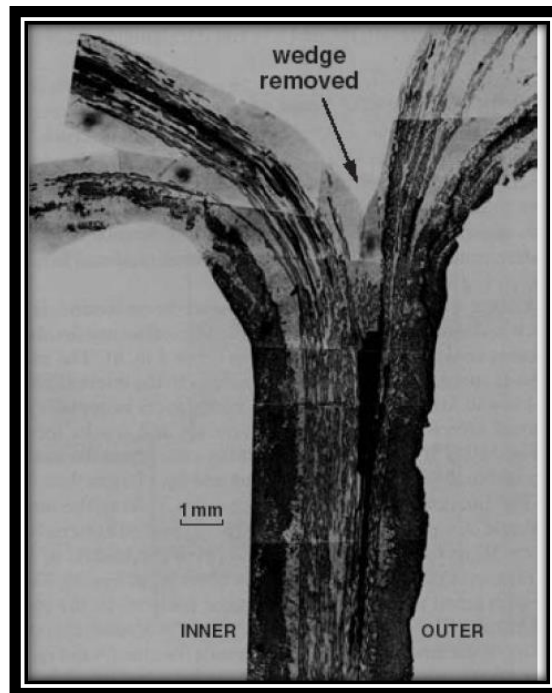
Παρατηρείται ότι οι σύνθετοι σωλήνες απορροφούν μεγάλο ποσό ενέργειας όταν η κατάρρευσή τους γίνεται με ελεγχόμενο, προοδευτικό και σταθερό τρόπο. Οι κύριοι τρόποι αστοχίας αξοσυμμετρικών σωλήνων από ινώδη σύνθετα υλικά υπό αξονική συμπίεση είναι οι εξής:

- Ο τρόπος κατάρρευσης I χαρακτηρίζεται από σταδιακή συντριβή με μικρορωγμές στο σύνθετο, ενώ απορροφάται μεγάλο ποσό ενέργειας κατά τη σύνθλιψη.
- Οι τρόποι II και III χαρακτηρίζονται από ψαθυρό σπάσιμο του σύνθετου και τελικά καταστροφική αστοχία, ενώ το απορροφούμενο ποσό ενέργειας είναι χαμηλό. Η διαφορά τους εντοπίζεται στη μορφή των ρωγμών που σχηματίζονται.
- Ο τρόπος κατάρρευσης IV χαρακτηρίζεται από προοδευτικό δίπλωμα και προσομοιάζει τον τρόπο κατάρρευσης λεπτότοιχου πλαστικού ή μεταλλικού σωλήνα. Η ενεργειακή απορρόφηση σε αυτήν την περίπτωση διατηρείται σε μέτρια επίπεδα.

Τρόπος κατάρρευσης I

Σε αυτόν τον τρόπο κατάρρευσης παρατηρείται συνεχής θρυμματισμός του υλικού στην περιοχή της παραμόρφωσης και κατάρρευση του δοκιμίου σταδιακά και σταθερά. Ο τρόπος κατάρρευσης I μπορεί να έχει τρεις διαφορετικές μορφές:

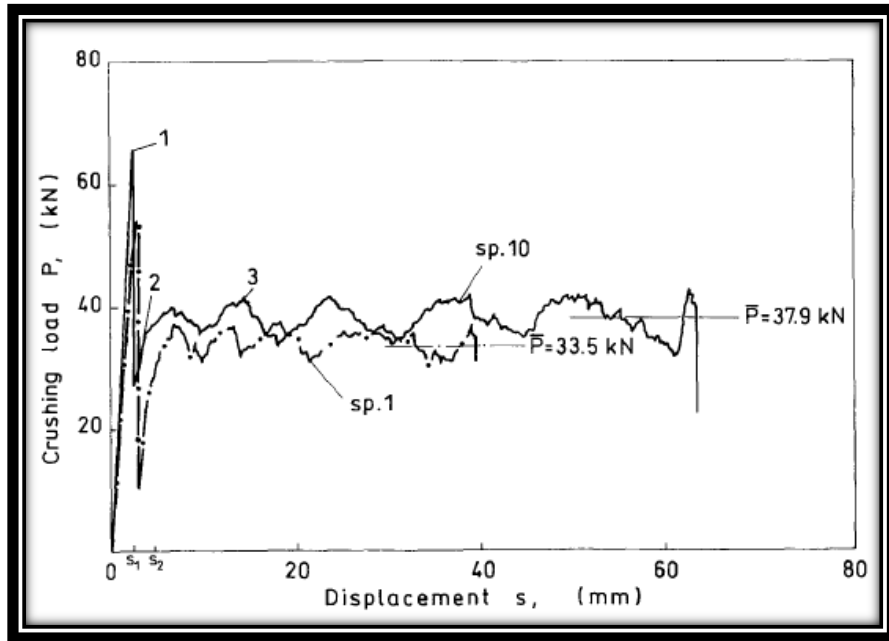
- α. Στην πρώτη μορφή, το κέλυφος καταρρέει σταδιακά επειδή σχηματίζονται συνεχή μέτωπα που εκτείνονται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται αξονικές διαρηγματώσεις (axial splits) στο εξωτερικό μέτωπο. Λόγω ομοιότητας αυτή η μορφή κατάρρευσης ονομάζεται και μανιτάρι (mushrooming failure) (Σχήμα Θ-2.8).



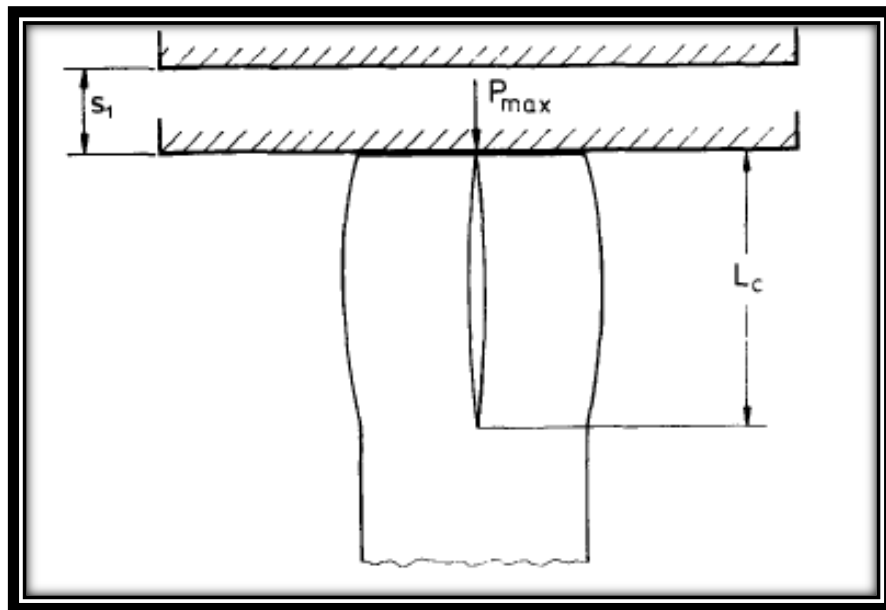
Θ-2.8: Μορφή “μανιτάρι”.

- β. Στη δεύτερη μορφή, το υλικό διαρρέει και θρυμματίζεται στρέφεται όλο προς τα μέσα σε όλη την περιφέρεια του δοκιμίου, ενώ δεν παρατηρούνται αξονικές διαρηγματώσεις.
- γ. Αντίστοιχα, στην τρίτη μορφή όλο το υλικό στρέφεται προς τα έξω, ενώ κύριο χαρακτηριστικό είναι οι εμφανείς αξονικές διαρηγματώσεις και η επέκταση της ζώνης παραμόρφωσης μέχρι τη βάση του κελύφους.

Στην Εικόνα Θ-2.9 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης λεπτότοιχου σύνθετου κελύφους σε αξονική συμπίεση. Αρχικά, το δοκίμιο υφίσταται ελαστική παραμόρφωση μέχρι να φτάσει το μέγιστο φορτίο P_{max} , που εξαρτάται από το υλικό και τη γεωμετρία του κελύφους. Αμέσως μετά παρατηρείται μια απότομη μείωση του φορτίου, η οποία οφείλεται στην εμφάνιση μιας κεντρικής ρωγμής στην άκρη του κελύφους (central intrawall crack) με μήκος L_c , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα Θ-2.10. Υπάρχει περίπτωση να σχηματιστούν και άλλες ενδοστρωματικές διαμήκεις ρωγμές εκατέρωθεν της κεντρικής επειδή, λόγω μη παραλληλότητας της πλάκας της πρέσας και του δοκιμίου, αναπτύσσονται καμπτικά φορτία. [2.1]



Θ-2.9: Τυπική μορφή διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης.

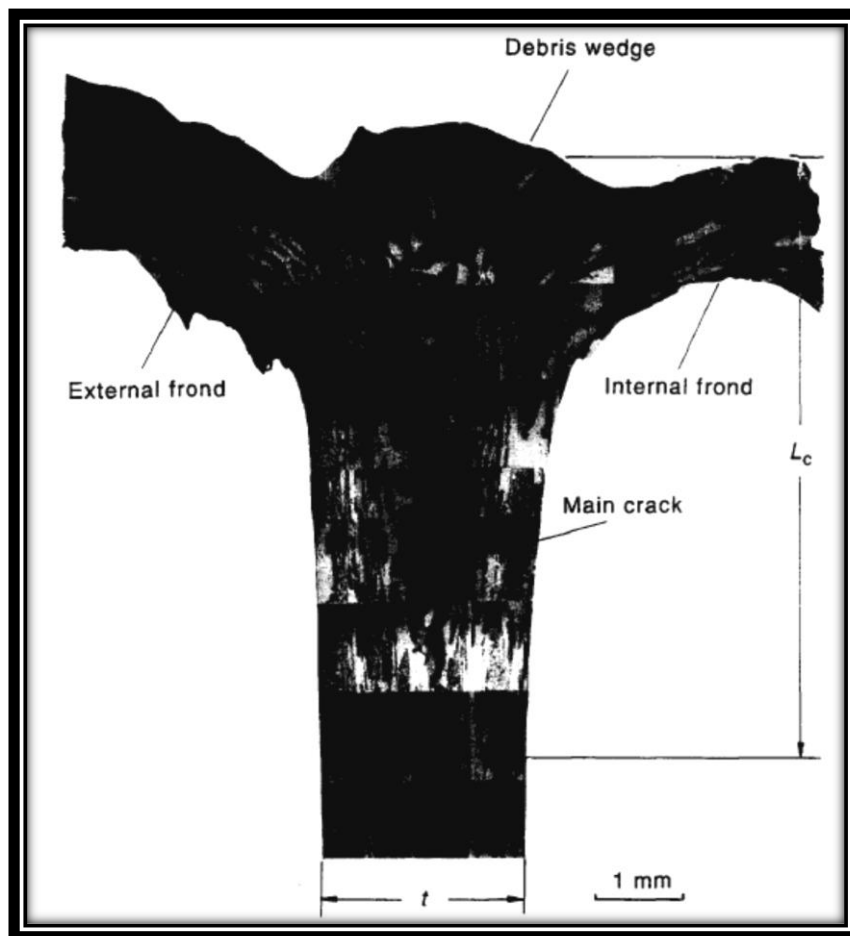


Θ-2.10: Κεντρική ρωγμή.

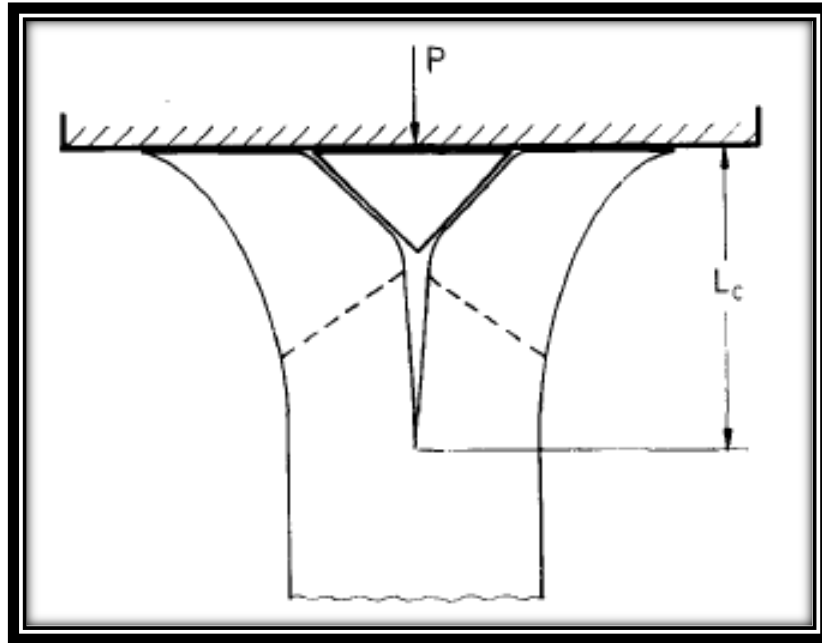
Η ενέργεια που απορροφάται κατά την αξονική συμπίεση μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την καμπύλη στο διάγραμμα φορτίου μετατόπισης. Η μορφή της καμπύλης μετά την αρχική απότομη πτώση του φορτίου εξαρτάται από τις συνθήκες της φόρτισης και τον τρόπο κατάρρευσης. Το μέγεθος του φορτίου θραύσης, η απορρόφηση ενέργειας και η σταθερότητα της φόρτισης είναι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον τρόπο θραύσης λεπτότοιχων

σύνθετων κελυφών. Μεγάλα ποσά ενέργειας διαχέονται όταν ένα κέλυφος καταρρέει με ελεγχόμενο, προοδευτικό και σταθερό τρόπο. Μετά την αρχική θραύση, λόγω της εμφάνισης αλληλουχίας μικρορωγμών (microcracking sequence), η καμπύλη του φορτίου – μετατόπισης παρουσιάζει πριονωτές διακυμάνσεις. Η δεύτερη αυτή φάση της συμπίεσης ονομάζεται post-crushing regime και εκτείνεται αμέσως μετά την απότομη πτώση του φορτίου αφού αυτό φτάσει το P_{max} . Το φορτίο αρχίζει και πάλι να αυξομειώνεται και έτσι δημιουργείται ταλάντωση γύρω από ένα μέσο φορτίο (mean post-crushing load \bar{P}).

Όταν μετά την εμφάνιση της κεντρικής ρωγμής το υλικό διαρρέει και προς τα μέσα και προς τα έξω, σχηματίζοντας έτσι το «μανιτάρι», δημιουργείται εκεί μια τριγωνική σφήνα (Εικόνες Θ-2.11 και Θ-2.12). Η σφήνα αυτή αποτελείται από κονιοποιημένο υλικό και οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ της πλάκας της πρέσας και των δεσμών υλικού που κάμπτονται εκατέρωθεν της ρωγμής. Ο σχηματισμός της σφήνας ολοκληρώνεται όταν αρχίζει η ταλάντωση του θλιπτικού φορτίου και στη συνέχεια καθ' όλη τη διάρκεια του post-crushing regime παραμένει σταθερή. [2.1]



Θ-2.11: Debris wedge, internal-external frond, main crack.



Θ-2.12: Σχηματισμός εσωτερικού μηχανισμού θραύσης.

Ο προσανατολισμός των ινών ενίσχυσης καθορίζει και τη συμπεριφορά τους κατά τη συμπίεση. Οι ίνες που ακολουθούν τη διεύθυνση της συμπίεσης κάμπτονται και, ανάλογα με τους περιορισμούς που θέτονται από τις άλλες ίνες και την ευκαμψία τους μπορεί να σπάσουν ή όχι. Αντίστοιχα, ίνες που είναι τοποθετημένες εγκάρσια στη διεύθυνση του φορτίου μπορούν να κινηθούν με θραύση προς τα έξω ή πάλι με θραύση και λυγισμό προς τα μέσα.

Η αναπτυσσόμενη διάτμηση και εφελκυσμός μεταξύ στρώσεων μπορεί να οδηγήσει στην μεταξύ τους αποκόλληση ή delamination. Εξαιτίας του λυγισμού των ινών και τελικά της θραύσης τους ή της διαστρωματικής αυτής διάτμησης που οδηγεί σε πολλές λεπτές στρώσεις χωρίς απαραίτητα τη θραύση ινών, εμφανίζονται και διαδίδονται διαστρωματικές ρωγμές κάθετα στις ίνες. Οι ρωγμές διαδίδονται μέσα στο υλικό χρησιμοποιώντας τις πιο αδύναμες περιοχές του κελύφους. Για παράδειγμα, σε περιοχές όπου υπάρχει περίσσεια ρητίνης ή που συνορεύουν εγκάρσιες ίνες οι ρωγμές που διαδίδονται συνήθως προκαλούν την καταστροφή των δεσμών ινών και μήτρας (debonding), ενώ αντίστοιχα σε περιοχές που συνορεύουν διαμήκειες και εγκάρσιες στρώσεις συνήθως προκαλείται αποκόλληση των στρώσεων αυτών (delamination).

Τρόπος κατάρρευσης II

Στο δεύτερο τρόπο κατάρρευσης, κύριο χαρακτηριστικό θεωρείται η καταστροφική αστοχία του κελύφους μετά από εκτεταμένη ψαθυρή θραύση. Τα

δοκίμια τετραγωνικής διατομής, όταν αστοχούν σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο, εμφανίζουν διαμήκεις ρωγμές στις γωνίες της βάσης τους. Αντίστοιχα, σε δοκίμια κυλινδρικής μορφής εμφανίζεται ρωγμή, είτε ελικοειδής είτε διαμήκης, που διαδίδεται στην περιφέρειά του.

Τρόπος κατάρρευσης III

Κύριο χαρακτηριστικό του τρόπου κατάρρευσης III είναι ο διαχωρισμός του κελύφους σε ακανόνιστα σχήματα εξαιτίας καταστροφικής αστοχίας από την περιφερειακή θραύση του υλικού του κελύφους περίπου στο μέσο του. Ο τρίτος τρόπος αστοχίας παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά που προσομοιάζουν τη συμπεριφορά PVC ή λεπτών μεταλλικών σωλήνων όταν αυτοί τίθενται σε συμπίεση και εκδηλώνουν λυγισμό.



Θ-2.13: Θραύση σε ακανόνιστα σχήματα.

Τρόπος κατάρρευσης IV

Στον τέταρτο και τελευταίο τρόπο κατάρρευσης, κύριο χαρακτηριστικό είναι οι γραμμές πτυχώσεως ή θραύσεως που εμφανίζονται σχεδόν από την έναρξη της φόρτισης και προσομοιάζουν τις αντίστοιχες πτυχώσεις σε μεταλλικούς ή PVC σωλήνες υπό θλιπτικό φορτίο.

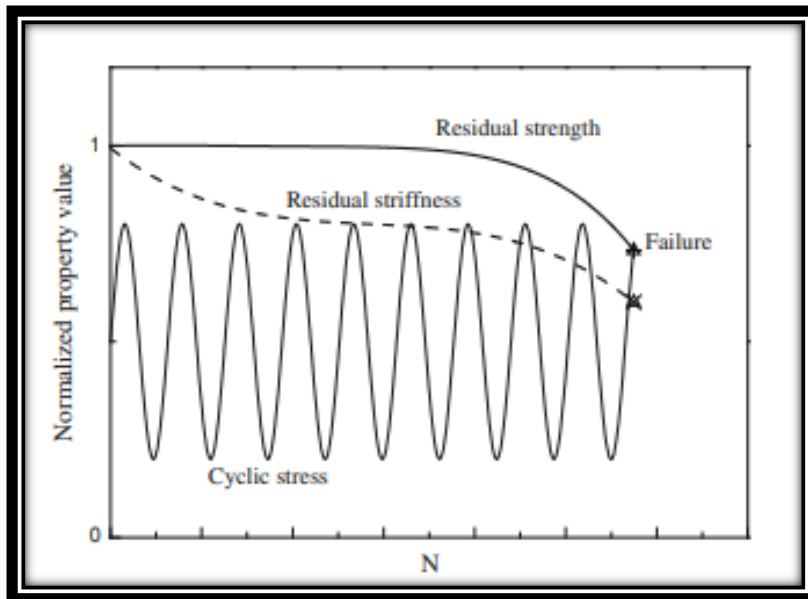
Από τους τέσσερεις διαφορετικούς τρόπους κατάρρευσης που παρουσιάστηκαν, πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι σημαντικά ποσά ενέργειας κατά την κατάρρευση απορροφούνται μόνο στον πρώτο τρόπο.

Όταν η εφαρμογή του φορτίου γίνεται στο άκρο ενός σωλήνα αναπτύσσονται τοπικά μικρές διαστρωματικές ρωγμές. Ανάλογα με το μήκος αυτών των ρωγμών και το αν θα συσσωρευθούν αστοχίες στα στρώματα του σύνθετου, ο τρόπος που καταρρέει τελικά ο σωλήνας μπορεί να είναι κάμψη του υλικού, εγκάρσια διάτμηση ή κάποιος συνδυασμός τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τέτοια δοκίμια καταρρέουν σύμφωνα με τον πρώτο και το δεύτερο τρόπο αστοχίας. Σε δοκίμια μικρού μήκους παρατηρείται συνήθως προοδευτική κατάρρευση, δηλαδή τρόπος κατάρρευσης I, ενώ σε μακρόστενα καταστροφική αστοχία που ακολουθεί τον τρόπο II.

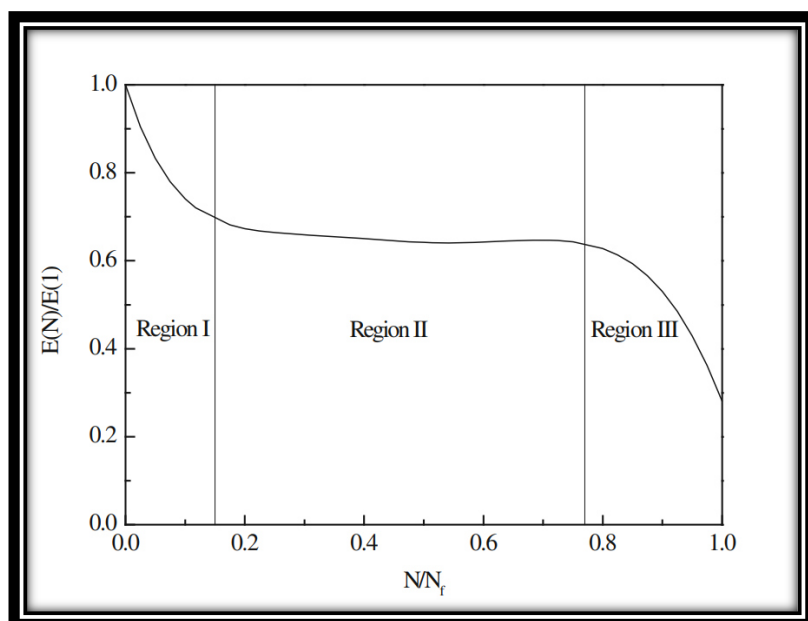
2.6 Κόπωση και αστοχία

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2.5, η αστοχία σύνθετων από carbon fiber λόγω κόπωσης δεν αποτελεί ουσιαστικό πρόβλημα όταν τα επίπεδα τάσεων κατά τη λειτουργία του τελικού προϊόντος διατηρούνται σε επίπεδα όπου δεν παρατηρείται ενδοστρωματική αποκόλληση ή αστοχία. Ένας τρόπος να υπολογιστεί ο βαθμός βλάβης λόγω κόπωσης σε ένα σύνθετο είναι η μέτρηση κάποιων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του, όπως η μέγιστη υπολειπόμενη αντοχή και η υπολειπόμενη δυσκαμψία. Το μέτρο της βλάβης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η εφαρμογή κυκλικής τάσης, η συχνότητα της τάσης και ο συνολικός αριθμός των κύκλων φόρτισης. Στο μοντέλο που βασίζεται στη δυσκαμψία, η υπολειπόμενη ακαμψία εκφράζεται ως συνάρτηση της αρχικής και του αριθμού των κύκλων. Η μεταξύ τους σχέση μπορεί να έχει οποιαδήποτε μαθηματική μορφή, για παράδειγμα γραμμική, σιγμοειδής ή σε δύναμη, καθώς εξαρτάται από τα πειραματικά δεδομένα.

Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης της δυσκαμψίας ως μέτρο της βλάβης σε σχέση με την υπολειπόμενη δύναμη είναι το ότι μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας μη καταστροφικές μεθόδους ενώ παράλληλα τα δεδομένα της ακαμψίας παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά σε σχέση με τα δεδομένα από τη μέτρηση της δύναμης. Επιπλέον, η υπολειπόμενη δύναμη μειώνεται ελάχιστα με την πάροδο των κύκλων μέχρι να φτάσει κοντά στο τέλος ζωής όπου και αλλάζει πιο έντονα. Αντίθετα, η υπολειπόμενη ακαμψία παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην εξέλιξη της βλάβης, αφού εμφανίζει μεγαλύτερες αλλαγές σε όλη την πάροδο της κόπωσης [2.3]. Ένα παράδειγμα υποβάθμισης της δύναμης και της ακαμψίας φαίνεται στο Σχήμα Θ-2.14, ενώ στο Σχήμα Θ-2.15 παρουσιάζεται σχηματική απεικόνιση της τυπικής καμπύλης υποβάθμισης δυσκαμψίας για σύνθετα υλικά. [2.2]



Θ-2.14: Υποβάθμιση δύναμης και δυσκαμψίας σε συνεχή κυκλική φόρτιση.



Θ-2.15: Σχηματική απεικόνιση της τυπικής καμπύλης υποβάθμισης δυσκαμψίας για σύνθετα υλικά.

Στην περιοχή I του Σχήματος Θ-2.15 που εκτείνεται μέχρι το 10% της ζωής σε κόπωση, παρατηρείται απότομη μείωση της ακαμψίας. Στην ενδιάμεση περιοχή II, η ακαμψία μειώνεται με σταθερή και μικρή κλίση. Τέλος, παρατηρείται έντονη μείωση κοντά στο τέλος της ζωής του υλικού δίνοντας μεγάλη κλίση στην καμπύλη. [2.2]

Χρησιμοποιώντας τα μοντέλα υποβάθμισης δύναμης και ακαμψίας μπορεί να υπολογιστεί η υπολειπόμενη δύναμη και ακαμψία σε διάφορες διευθύνσεις όταν τα διάφορα υλικά που χρησιμοποιούμε υποστούν κόπωση λόγω κυκλικής φόρτισης. Θέτοντας τις υπολειπόμενες δυνάμεις και ακαμψίες ως τις μέγιστες επιτρεπόμενες στο μοντέλο προσομοίωσης, εξασφαλίζεται ότι το δοκίμιο δεν αστοχεί εφόσον οι φορτίσεις που αναπτύσσονται είναι μικρότερες.

Αυτό ακριβώς το δεδομένο θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω όταν θα χρειαστεί να κάνουμε μοντελοποίηση και έλεγχο αντοχής σε κόπωση (Κεφάλαιο 5).

2.7 Βιβλιογραφία

[2.1] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous & M. B. Ioannidis, Analysis of Failure Mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fiberglass Composite Tubes, Thin-Walled Structures 24 (1996), 335-352.

[2.2] Fatigue in composites, Science and technology of the fatigue response of fiber-reinforced plastics, Edited by Bryan Harris, 2003

[2.3] 3D Fibre Reinforced Polymer Composites L. Tong , A.P. Mouritz and M.K. Bannister, Elsevier 2002

Κεφάλαιο 3 Εισαγωγικά στοιχεία ποδηλάτων

3.1 Ποδήλατο ορισμός

Ορισμός: (Δίκυκλο) Ποδήλατο ονομάζεται το μεταφορικό μέσο δύο τροχών το οποίο προωθείται κυρίως ή και αποκλειστικά μέσω πεταλιών από τη μυϊκή δύναμη του αναβάτη.

Αγωνιστικό ποδήλατο: Πρόκειται για ποδήλατο με σύστημα μετάδοσης πολλών ταχυτήτων, τιμόνι με πολλές λαβές, έτσι ώστε ο αναβάτης να μπορεί να μπει σε μια αεροδυναμική θέση, λάστιχο πάχους μικρότερου από 28mm και βάρος για πλήρως συναρμολογημένο ποδήλατο κάτω από 12 kg. Σε ειδικές περιπτώσεις το βάρος είναι κάτω από 5 κιλά.

Πλήρως συναρμολογημένο ποδήλατο: Το ποδήλατο που φέρει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα και στοιχεία για τη χρήση που προορίζεται.

Οι ορισμοί αυτοί δίνονται στο ISO 4210. Πρόκειται για τον Παγκόσμιο Κανονισμό που αφορά στην ασφάλεια και τις απαιτήσεις απόδοσης των αγωνιστικών ποδηλάτων και των εξαρτημάτων τους, τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά τη συναρμολόγησή τους. Ο κανονισμός αυτός αφορά αγωνιστικά ποδήλατα ερασιτεχνικής χρήσης για υψηλές ταχύτητες σε δημόσιους δρόμους, όπου η σέλλα μπορεί να προσαρμοστεί σε ύψος 635mm ή και περισσότερο.

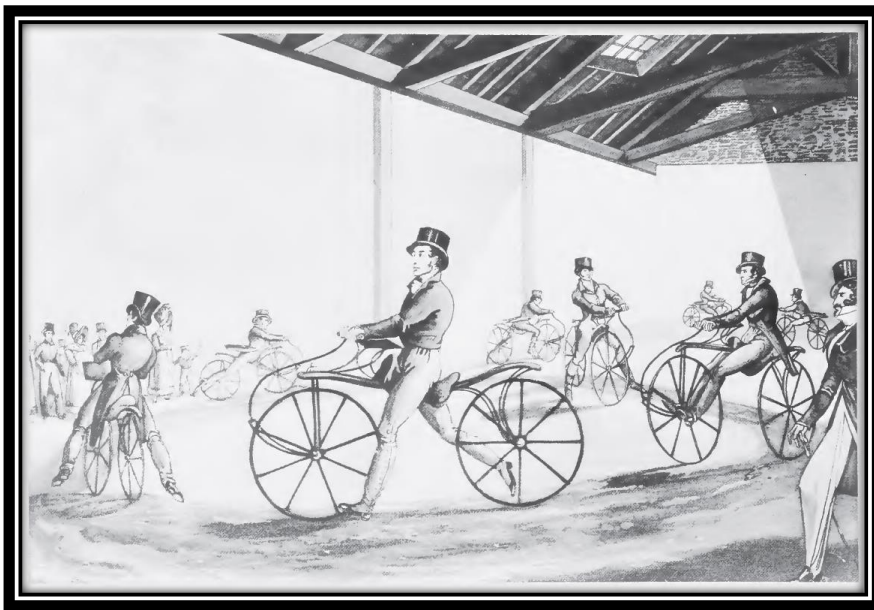
3.2 Ιστορική αναδρομή

Η εύρεση του πρώτου εφευρέτη του ποδηλάτου αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία, καθώς πλήθος ανθρώπων έχουν προσπαθήσει να πάρουν τα εύσημα. Το μόνο σίγουρο είναι ότι η σύγχρονη μορφή του ποδηλάτου οφείλεται στη συμβολή πολλών ανθρώπων.

Το 1418 ο Giovanni Fontana κατασκεύασε ένα όχημα με τέσσερις ρόδες κινούμενο από την ανθρώπινη μυϊκή δύναμη, στο οποίο η μετάδοση κίνησης γινόταν μέσω σχοινιού που συνέδεε τις ρόδες με γρανάζια. Στα τέλη του 15^{ου} αιώνα, και συγκεκριμένα το 1493, χρονολογούνται τα πρώτα σχέδια που απεικονίζουν μια πρώιμη μορφή ποδηλάτου και ανήκουν στον Leonardo Da Vinci. Ωστόσο, η αυθεντικότητα των σχεδίων αυτών έχει αμφισβητηθεί έντονα.

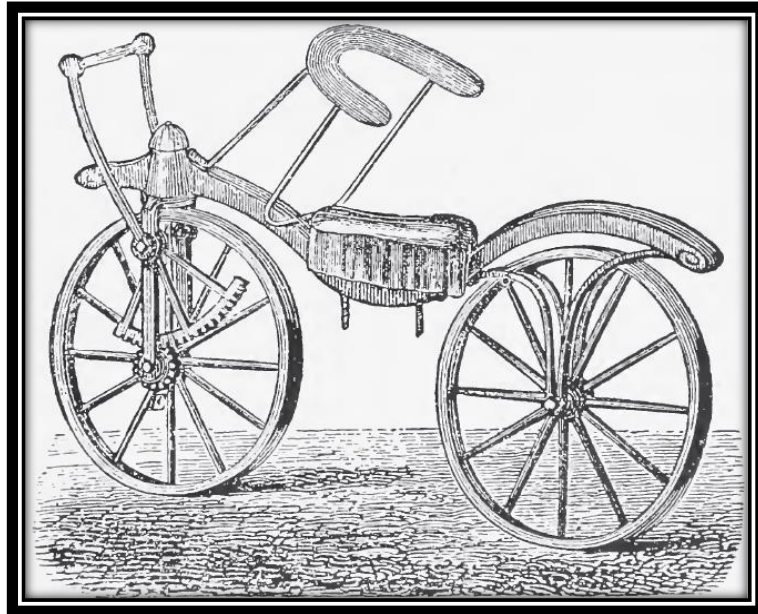
Πρώτος πρόγονος του ποδηλάτου μπορεί να θεωρηθεί το celerifere που εμφανίστηκε στη Γαλλία το 1791. Πρόκειται για δίτροχη κατασκευή, η οποία κινείται

όταν ο αναβάτης σπρώχνει με τα πόδια του το έδαφος και δεν προσέφερε δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης. Το 1793, η κατασκευή έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής στο Παρίσι με νέο όνομα, velocifere. Η δημοτικότητα του velocifere είχε πέσει κατά την πρώτη δεκαετία του 19^{ου} αιώνα, αλλά ανέκαμψε με την παρουσίαση μιας βελτιωμένης έκδοσής του από τον Nicéphore Niepce το 1816. Η νέα έκδοση του velocifere μπορεί να μην παρείχε ακόμα τη δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης αλλά λόγω των μεγαλύτερων τροχών της ήταν ταχύτερη, ελαφρύτερη και πιο άνετη στην οδήγηση. Τον επόμενο χρόνο, έχοντας πλέον τη δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης, ο Karl Drais μετονόμασε τη νέα κατασκευή σε velocipede, ή αλλιώς μηχανή τρεξίματος. Το velocipede έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλή αλλά για σύντομο μόνο χρονικό διάστημα, καθώς στη δεκαετία του 1820 ήταν πλέον σπάνια.



Θ-3.1: 1819 "Johnson's Pedestrian Hobby Horse Riding School in London".

Το 1821 ο Lewis Gompertz ανέπτυξε έναν μηχανισμό μετάδοσης κίνησης. Η μετατροπή αυτή πρόκειται για την πρώτη επιτυχημένη απόπειρα κατασκευής που βοηθούσε τον ποδηλάτη να προωθήσει το velocipede. Ο μηχανισμός αυτός αποτελούνταν από ένα μοχλό πακτωμένο σε τμήμα οδοντωτού τροχού. Το τμήμα αυτό του οδοντωτού τροχού συνεργαζόταν με ένα μικρότερο που έδινε κίνηση στην μπροστινή ρόδα όταν περιστρεφόταν προς τη μία κατεύθυνση και ήταν ελεύθερος προς την άλλη (καστάνια).



Θ-3.2: Χειροκίνητο velocipede σχεδιασμένο το 1821 από τον Gompertz στην Αγγλία.

Το επόμενο σημαντικό ορόσημο στην ιστορική πορεία του ποδηλάτου ήταν η εισαγωγή ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης. Το 1839 ο Σκωτσέζος σιδηρουργός Kirkpatrick Macmillan εφευρίσκει ένα τέτοιο σύστημα, όπου ο αναβάτης με πετάλια μπορούσε να κινήσει το ποδήλατο μέσω μοχλών συνδεδεμένων με τον πίσω τροχό. Το νέο velocipede μπορούσε να κινηθεί με ταχύτητες 16 έως 22 km/h. Η δουλειά του Macmillan αντιγράφηκε και βελτιώθηκε μέχρι και το 1863 όπου τα πετάλια τοποθετήθηκαν στον εμπρόσθιο τροχό στο Παρίσι από τον Pierre Michaux ή Pierre Lallement. Επιπλέον βελτιώσεις εφαρμόστηκαν από τους αδερφούς Hanlon, οι οποίοι μετέτρεψαν το velocipede έτσι ώστε να είναι προσαρμόσιμα τα πετάλια και η σέλλα, ενώ πρότειναν και τη χρήση λαστιχένιων δακτυλίων, τα πρώτα ελαστικά, για μείωση του θορύβου και καλύτερη πρόσφυση. Με αυτές τις μετατροπές το velocipede διαδόθηκε μέχρι και την Αμερική. Παρόλα αυτά, οι δρόμοι της εποχής, η άβολη θέση οδήγησης και το βάρος των πρώιμων αυτών ποδηλάτων αποτέλεσαν ανασταλτικούς παράγοντες στην ευρεία εξάπλωση και χρήση τους.

Η εξέλιξη του ποδηλάτου συνεχίστηκε με έντονους ρυθμούς στην Ευρώπη με πολλές νέες εφαρμογές που άλλαξαν ριζικά την εμφάνιση του velocipede. Τροχοί με συρμάτινες ακτίνες, πλαίσια από σωλήνες, λασπωτήρες, φρένα στον εμπρόσθιο τροχό, συμπαγή ελαστικά, μετάδοση κίνησης με αλυσοτροχούς και οι πρώτες μορφές εναλλακτών ταχυτήτων ήταν οι σημαντικότερες προσθήκες που έγιναν στο velocipede μέχρι και το 1870. Το 1871 εμφανίζεται το περίφημο Ariel από τον Άγγλο James Starley, ο οποίο θεωρείται ο πατέρας της βιομηχανίας του ποδηλάτου. Το χαρακτηριστικό του Ariel ήταν η χρήση συρμάτινων ακτινών στους τροχούς και η πολύ μεγάλη μπροστινή ρόδα. Ο σχεδιασμός του Ariel το καθιστούσε καινοτόμο για την εποχή του. Τα πετάλια ήταν και σε αυτό το μοντέλο κατευθειάν στον μπροστινό τροχό. Καθώς η μετάδοση κίνησης από τα πετάλια στον τροχό ήταν 1:1, η μεγάλη

μπροστινή ρόδα προσέφερε μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με τους προκατόχους του. Το νέο άνετο αυτό ποδήλατο βελτιώθηκε περαιτέρω από τον Starley και έγινε γνωστό ως Ordinary.



Θ-3.3: M. W. Wright, διάσημος Άγγλος ποδηλάτης του 1870, με το Ordinary.

Παρά τη μεγάλη δημοτικότητα που απέκτησε το Ordinary, παρέμενε ένα εξαιρετικά επικίνδυνο ποδήλατο. Το κέντρο βάρους του συστήματος ποδηλάτου-αναβάτη ήταν ελαφρώς πίσω από τον εμπρόσθιο τροχό, με αποτέλεσμα όταν χτύπαγε σε κάποιο εμπόδιο ή φρέναρε απότομα ο αναβάτης να εκτινάσσεται πάνω από τον τροχό ή να χτυπάει το κεφάλι του σε αυτόν. Στην προσπάθεια να σχεδιαστεί ένα ασφαλέστερο ποδήλατο, το οποίο να τοποθετεί τον αναβάτη πιο κοντά στο έδαφος, εμφανίστηκε το Safety. Μια ακόμα αξιοσημείωτη προσπάθεια είναι το Bicyclette του Lawson στην Αγγλία το 1879, ένα ποδήλατο ιδιαίτερα εξειδικευμένο για την εποχή του. Παρά το χαμηλότερο κέντρο βάρους του και τη μετάδοση κίνησης με αλυσοτροχούς στον πίσω τροχό, θεωρήθηκε μη θελκτικό και απέτυχε εμπορικά.

Τα ρουλεμάν ήταν το επόμενο στοιχείο που άρχισε να προστίθεται στα ποδήλατα κατά την ίδια περίοδο. Το μοντέλο Rover του John Kemp Starley (ανιψιού του James Starley) το 1885 αποτελεί μια από τις πιο πετυχημένες προσπάθειες της περιόδου και ο σχεδιασμός του με χαμηλούς τροχούς και αλυσοκίνηση επηρέασε το σχεδιασμό των ποδηλάτων μέχρι σήμερα. Το 1888 και 1889 κατοχυρώνεται από τον John Boyd Dunlop δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για πνευματικά ελαστικά στην Αγγλία και τις ΗΠΑ αντίστοιχα. Η ευρεσιτεχνία αυτή αναγνωρίστηκε ευρέως καθώς αύξησε τη μέση ταχύτητα των ποδηλάτων και μείωσε σε μεγάλο βαθμό τους κραδασμούς. Την ίδια περίοδο εμφανίστηκαν και οι πρώτοι μηχανισμοί πέδησης, οι οποίοι λειτουργούσαν με περιστροφή των πεταλιών αντίστροφα από τη φορά κίνησης.

Για τα επόμενα εξήντα σχεδόν χρόνια η δημοτικότητα του ποδηλάτου έπεσε στο ενήλικο κοινό. Η άνθιση της ποδηλασίας, όμως, ως άθλημα κατά τη δεκαετία του 1970 αποτέλεσε τη βάση για περαιτέρω εξελίξεις στο ποδήλατο. Η διεξαγωγή αγώνων ώθησε την ποδηλατική βιομηχανία σε μελέτες για τη γεωμετρία του ποδηλάτου, τα υλικά κατασκευής και την αεροδυναμική συμπεριφορά των πλαισίων και των εξαρτημάτων τους. Παράλληλα, η ανάπτυξη όλων των βιομηχανιών μέσων μεταφοράς οδήγησε στην ανάπτυξη ποδηλάτων με καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά, χαμηλότερο βάρος, μεγαλύτερη αντοχή και καλύτερη συνολική απόδοση. [3.1]

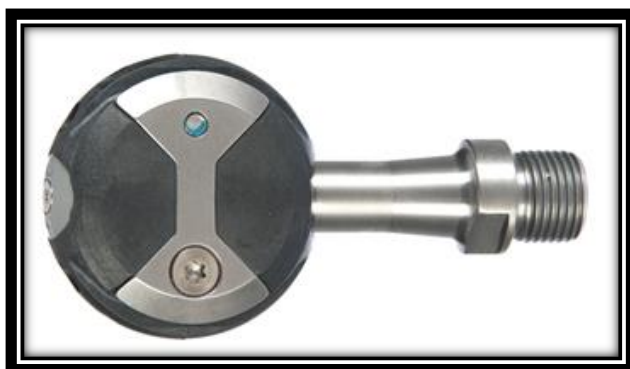
3.3 Υλικά κατασκευής ποδηλάτου και των εξαρτημάτων του

Τα πρώτα ποδήλατα που εμφανίστηκαν κατασκευάζονταν από ξύλο. Λόγω του μεγάλου βάρους τους, το επόμενο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους ήταν το μπαμπού. Στη συνέχεια, με σκοπό την αύξηση της αντοχής των ποδηλάτων, εισήχθη το σίδηρο ως κατασκευαστικό υλικό των σωλήνων του ποδηλάτου και των επιμέρους εξαρτημάτων του.

Το σίδηρο, ωστόσο, καθιστούσε τα πλαίσια ιδιαίτερα βαριά. Έτσι η επόμενη λογική επιλογή ήταν ένα μεταλλικό υλικό με χαμηλότερο βάρος. Το αλουμίνιο πληρούσε τις προδιαγραφές του βάρους, αλλά παράλληλα ήταν και πολύ πιο παραμορφώσιμο. Για να επιτευχθεί η απαραίτητη δυσκαμψία στο πλαίσιο, οι επιμέρους σωλήνες του πλαισίου απέκτησαν μεγαλύτερες διατομές. Παράλληλα με το αλουμίνιο, ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται το ασάλι και το τιτάνιο είτε στην κατασκευή ολόκληρου του πλαισίου είτε επιμέρους μικρών εξαρτημάτων του, π.χ. βίδες, άξονες μεσαίας τριβής και πετάλια.



Θ-3.4: Αλουμινένιος σκελετός ποδηλάτου. γνωστής αμερικανικής εταιρίας. Μοντέλο του 2011.



Θ-3.5: Πετάλια τιτανίου (Speedplay X1 Titanium Pedals).

Στη σύγχρονη εποχή υπάρχουν ακόμα πολλοί σκελετοί και εξαρτήματα από αλουμίνιο. Παρόλη τη δημοτικότητά τους, ο μεταλλικός σκελετός έχει ακόμα αυξημένο βάρος. Από τη στιγμή που η ποδηλασία άνθισε ως άθλημα, οι μελέτες και έρευνες των μεγάλων ποδηλατικών βιομηχανιών ανέδειξαν ένα νέο τύπο υλικού, τα σύνθετα υλικά. Το πιο σύνηθες και κατάλληλο για την εφαρμογή σύνθετο υλικό θεωρήθηκε το ανθρακόνημα, το οποίο συνδυάζει πολύ χαμηλό βάρος και υψηλή δυσκαμψία.

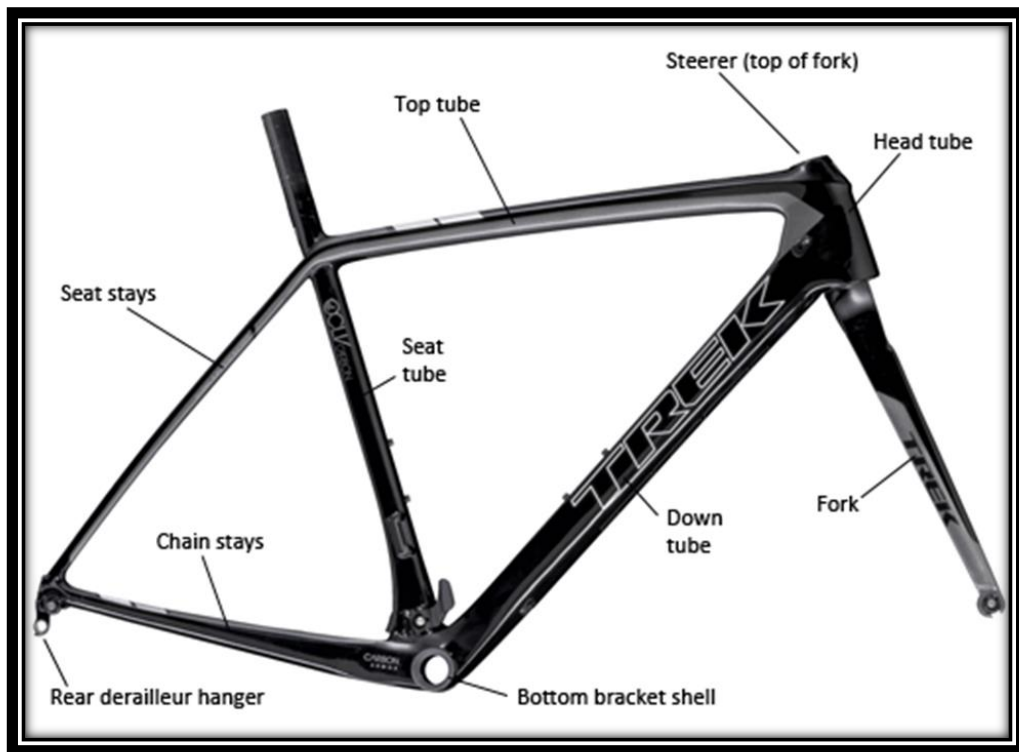
3.4 Ανατομία σκελετού ποδηλάτου

Το βασικό στοιχείο ενός ποδηλάτου είναι ο σκελετός του ή αλλιώς πλαίσιο (frame). Πάνω στο πλαίσιο προσαρμόζονται όλα τα περιφερειακά του ποδηλάτου, όπως τροχοί, πεταλιέρα, πιρούνι και άλλα. Ο πιο γνωστός τύπος σκελετού είναι ο σκελετός – διαμάντι. Το χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου τύπου ως προς τη μορφή του σκελετού είναι τα δύο τρίγωνα που σχηματίζει, το κεντρικό και το οπίσθιο ζευγαρωτό. Πέρα από τον κυρίαρχο τύπο σκελετού – διαμάντι, υπάρχουν και διαφορετικοί τύποι πλαισίων που έχουν αναπτυχθεί και μερικοί από αυτούς συναντώνται μέχρι και σήμερα.

Σωλήνες σκελετού

Το κεντρικό τρίγωνο του σκελετού – διαμάντι αποτελείται από τέσσερις σωλήνες: Το κούτελο (head tube), τον κάτω σωλήνα (down tube), τον άνω σωλήνα (top tube) και τον σωλήνα σέλλας (seat tube). Το πίσω τρίγωνο απαρτίζεται από τα άνω και κάτω ψαλίδια (seat stays και chain stays αντίστοιχα) και το σωλήνα σέλλας. Το head tube διαπερνάται από τον σωλήνα του πιρουνιού και συνδέεται με αυτό μέσω ρουλεμάν στα «ποτήρια» ή αλλιώς head sets. Ο κάτω σωλήνας συνδέει το κούτελο με τη μεσαία τριβή στο κάτω μέρος του σωλήνα σέλλας, ενώ ο άνω σωλήνας το κούτελο με το πάνω μέρος του σωλήνα σέλλας. Στο πίσω τρίγωνο, στην ένωση άνω και κάτω ψαλιδιών περνά ο άξονας του πίσω τροχού. Τα άνω ψαλίδια συνδέουν

τον πίσω τροχό με το πάνω τμήμα του σωλήνα σέλλας, ενώ τα κάτω ψαλίδια τον τροχό με τη μεσαία τριβή.



Θ-3.6: Τα μηχανικά μέρη ενός σκελετού-διαμάντι.

Κούτελο (Head tube)

Το κούτελο περιέχει το head set ή ποτήρια και τα ρουλεμάν στα οποία ενώνεται ο σωλήνας του πιρουνιού ή steerer.

Άνω σωλήνας (Top tube)

Ο άνω σωλήνας ενώνει την κορυφή του σωλήνα σέλλας με το κούτελο. Στον παραδοσιακό σκελετό ενός αγωνιστικού ποδηλάτου, ο άνω σωλήνας τοποθετείται οριζόντια ή με ελάχιστη κλίση προς το έδαφος. Κατά μήκος ή μέσω του σωλήνα αυτού ενσωματώνονται τα καλώδια ελέγχου, όπως τα καλώδια των πίσω φρένων ή πιθανώς και τα εμπρόσθια και οπίσθια καλώδια των εκτροχιαστών (Μηχανισμοί για την αλλαγή ταχυτήτων). Ο χώρος ανάμεσα στον άνω σωλήνα και της σέλλας καλείται clearance.

Κάτω σωλήνας (Down tube)

Ο κάτω σωλήνας ενώνει το περίβλημα της μεσαίας τριβής με το κούτελο. Και σε αυτόν τον σωλήνα μπορεί να ενσωματωθούν τα καλώδια των εκτροχιαστών, είτε

εσωτερικά, είτε κατά μήκος αυτού. Στον κάτω σωλήνα τοποθετούνται επίσης οι παγουροθήκες.

Κάθετος Σωλήνας (Seat tube)

Ο σωλήνας σέλλας ή αλλιώς κεντρικός σωλήνας στηρίζει τη σέλλα μέσω του λαιμού σέλλας (seatpost). Η θέση της σέλλας μπορεί να προσαρμοστεί με κατάλληλη ρύθμιση του βάθους εισχώρησης του λαιμού σέλλας μέσα στον κεντρικό σωλήνα. Στον σωλήνα αυτόν μπορεί να προσαρτηθεί επιπλέον παγουροθήκη ή να ενσωματωθούν τα καλώδια του εμπρόσθιου εκτροχιαστή.

Κάτω ψαλίδια (chainstays)

Τα κάτω ψαλίδια ενώνουν το περίβλημα της μεσαίας τριβής με τον άξονα του οπίσθιου τροχού και είναι παράλληλα με την αλυσίδα. Το καλώδιο του οπίσθιου εκτροχιαστή οδηγείται κατά μήκος των κάτω ψαλιδιών όταν έχει δρομολογηθεί προηγουμένως έστω και εν μέρει κατά μήκος του κάτω σωλήνα. Είναι πιθανό, επίσης, η βάση για το πίσω δισκόφρενο να είναι ενσωματωμένη στα chainstays.

Άνω ψαλίδια (Seat stays)

Τα άνω ψαλίδια συνδέουν τον άξονα του οπίσθιου τροχού με το επάνω μέρος του σωλήνα σέλλας και συχνά στο ίδιο σημείο που ενώνεται και ο άνω σωλήνας. Τα άνω ψαλίδια φέρουν το σημείο στήριξης της οπίσθιας ζάντας και μπορεί να φέρουν την έδραση του πίσω δισκόφρενου. Σε μια παραλλαγή του κλασσικού σκελετού διαμάντι, τα seat stays διαπερνούν το σωλήνα seat tube και φτάνουν λίγο πιο μπροστά από την ένωση του άνω σωλήνα με το σωλήνα της σέλλας. Στο σημείο αυτό δημιουργείται ένα μικρό τρίγωνο, το οποίο θεωρείται και χαρακτηριστικό αυτού του τύπου σκελετού που ονομάζεται Hellenic από τον κατασκευαστή Fred Hellens και πρωτοεμφανίστηκε το 1923.

Τα seat stays μπορούν είτε να ενωθούν σε δύο ξεχωριστά σημεία πάνω στο seat tube (dual stays), είτε να ενωθούν σε ένα σωλήνα πριν δημιουργήσουν τελικά την ένωση με το σωλήνα σέλλας (single seat stay, mono stay και wishbone). Άλλη παραλλαγή σύνδεσης των άνω ψαλιδιών με το σωλήνα σέλλας αποτελεί η διάταξη fastback seat stays. Σε αυτήν την παραλλαγή τα άνω ψαλίδια ενώνονται στην πίσω πλευρά του seat tube και όχι πλαγίως, όπως είναι το συνηθισμένο.

Πριν από κάποια χρόνια ήταν αρκετά συνηθισμένος και ο συνδυασμός υλικών σε σκελετούς ποδηλάτων και συγκεκριμένα ανθρακονήματα στα seat stays και αλουμίνιο στα υπόλοιπα τμήματα. Κατά το σχεδιασμό αυτό, ο σκελετός μπορεί να απορροφήσει καλύτερα τους κραδασμούς στα seat stays επειδή ακριβώς οι ίνες άνθρακα προσφέρουν καλύτερη απορρόφηση σε σχέση με το αλουμίνιο.



Θ-3.7: Παράδειγμα σκελετού με dual-stay seat stays.

Μεσαία Τριβή (Bottom bracket shell)

Μεσαία τριβή καλείται ο λεπτός και φαρδύς σωλήνας που βρίσκεται στο σημείο ένωσης του σωλήνα σέλλας, κάτω σωλήνα και κάτω ψαλιδιών. Σε παραλλαγές της παραδοσιακής γεωμετρίας του σκελετού, η μεσαία τριβή μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα, έτσι ώστε να μπορεί να τεντώσει ή να χαλαρώσει την αλυσίδα.

Ως προς το πλάτος του κελύφους υπάρχουν κάποια παραδοσιακά πρότυπα (πχ 68,70 ή 73 mm). Παρόλα αυτά, είναι πιθανό να υπάρχουν και μεγαλύτερου πλάτους μεσαίες τριβές, όπως 83 ή και 100 mm, οι οποίες συναντώνται σε ειδικά ποδήλατα βουνού ή χιονιού. Το βασικό χαρακτηριστικό του ποδηλάτου, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από το πλάτος της μεσαίας τριβής, είναι ο παράγοντας Q (Q factor) που προσδιορίζει το άνοιγμα των πεταλιών και είναι γνωστός και ως πέλμα του ποδηλάτου.

Στο τμήμα αυτό του σκελετού παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων, και συνεπώς απορρόφηση ενέργειας, κατά την οδήγηση ή ακόμα και τη στάση του ποδηλάτου.

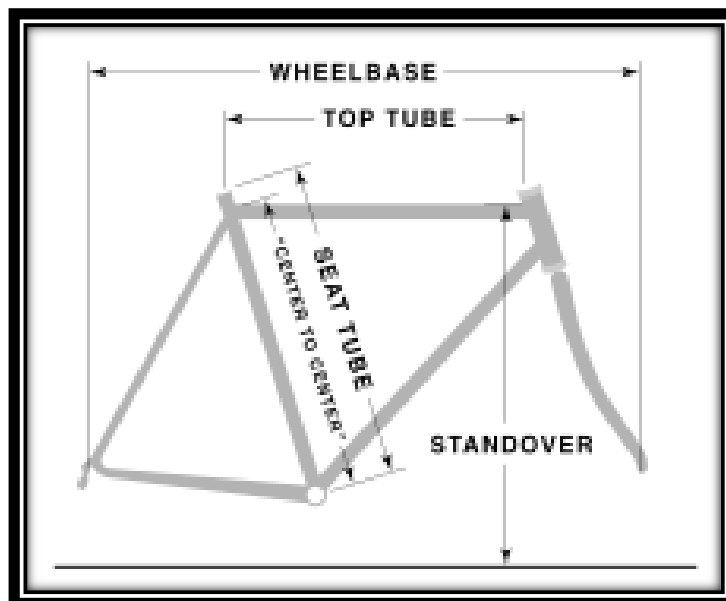
3.5 Γεωμετρία πλαισίου (σκελετού)

Η γεωμετρία του σκελετού καθορίζεται από το μήκος των επιμέρους σωλήνων και τις γωνίες που έχουν πάνω στο πλαίσιο. Μερικά από τα πιο χαρακτηριστικά μεγέθη που καθορίζουν τη γεωμετρία του σκελετού είναι τα παρακάτω:

- **Chain stay length:** η απόσταση από το κέντρο της μεσαίας τριβής μέχρι το κέντρο του άξονα του πίσω τροχού.
- **Top tube length (horizontal):** το οριζόντιο μήκος του άνω σωλήνα.
- **Seat tube length:** το μήκος του σωλήνα σέλλας από την κορυφή του έως το κέντρο της μεσαίας τριβής.
- **Seat tube angle:** η γωνία του σωλήνα σέλλας ως προς το έδαφος.
- **Head tube length:** το μήκος του κούτελου.
- **Head tube angle:** η γωνία του κούτελου ως προς το έδαφος.
- **Wheelbase:** η απόσταση μεταξύ εμπρόσθιου και οπίσθιου άξονα των τροχών.
- **Stack και Reach:** η απόσταση της κορυφής του κούτελου από τον άξονα της μεσαίας τριβής κατακόρυφα και οριζόντια αντίστοιχα.
- **BB Drop:** η κατακόρυφη απόσταση του άξονα της μεσαίας τριβής με τους άξονες των τροχών.
- **Standover height:** το μέσο ύψος που βρίσκεται ο άνω σωλήνας πάνω από το έδαφος.

Η τελική χρήση του ποδηλάτου είναι και αυτή που καθορίζει τη γεωμετρία του σκελετού του. Στα ποδήλατα δρόμου παραδείγματος χάριν η θέση του τιμονιού είναι πιο χαμηλά ως προς τη σέλλα, με σκοπό να θέσει τον αναβάτη σε κεκλιμένη και πιο αεροδυναμική θέση. Αντίθετα, σε άλλους τύπους ποδηλάτων, πχ ορεινής ποδηλασίας, πόλης και άλλα, δίνεται περισσότερη έμφαση στην άνεση του ποδηλάτη. Έτσι, με σκοπό να επιτρέπεται στον ποδηλάτη να λάβει μια όρθια θέση οδήγησης, το τιμόνι βρίσκεται ψηλότερα.

Μέγεθος σκελετού



Θ-3.8: Συνήθεις μετρούμενες διαστάσεις.

Ποδήλατα δρόμου και τριάθλου.

Σε ένα οδικό αγωνιστικό ποδήλατο, ο σχεδιασμός αποσκοπεί στη βέλτιστη μεταφορά ισχύος σε συνδυασμό με το ελάχιστο δυνατό βάρος και αεροδυναμική αντίσταση. Η παραδοσιακή γεωμετρία ενός ποδηλάτου δρόμου χαρακτηρίζεται από τον οριζόντιο άνω σωλήνα, ενώ σε περίπτωση που ο άνω σωλήνας είναι επικλινής, ο σκελετός χαρακτηρίζεται ως συμπαγούς γεωμετρίας.

Τα τυπικής γεωμετρίας πλαίσια ποδηλασίας δρόμου έχουν συνήθως μεγαλύτερο μεταξόνιο (wheelbase) το οποίο τους προσδίδει μεγαλύτερη άνεση κατά την οδήγηση και καλύτερη σταθερότητα. Αντίθετα, τα συμπαγούς γεωμετρίας πλαίσια ποδηλασίας δρόμου συνδυάζουν χαμηλότερο κέντρο βάρους με μικρότερο οπίσθιο τρίγωνο και μικρότερο μεταξόνιο, γεγονός που προσφέρει στο ποδήλατο ταχύτερο χειρισμό. Στη συμπαγή γεωμετρία πλαισίου, η κορυφή του σωλήνα σέλλας είναι χαμηλότερα από την κορυφή του κούτελου, γεγονός που μειώνει την τιμή του standover height και συνεπώς το ύψος του κέντρου βάρους.

Στα αγωνιστικά πλαίσια, με σκοπό ο αναβάτης να βρίσκεται σε πιο αεροδυναμική θέση, ο σωλήνας σέλλας έχει πιο απότομη γωνία (μεγαλύτερη) ως προς το έδαφος, γεγονός που κάνει το πλαίσιο λιγότερο άνετο (trade off θέσης και άνεσης). Αντίθετα, η μικρότερη γωνία του σωλήνα σέλλας αφαιρεί βάρος από τα χέρια, τους καρπούς και το λαιμό του αναβάτη, καθώς τον τοποθετεί να στηρίζεται περισσότερο στα κάτω οστά, κάνοντας το πλαίσιο πιο άνετο στην οδήγηση. Η υιοθέτηση της μικρότερης αυτής γωνίας επιβάλλει την επιμήκυνση των κάτω ψαλιδιών, ώστε το κέντρο βάρους να τοποθετηθεί πάλι στο κέντρο του ποδηλάτου (αλλιώς θα βρισκόταν πιο κοντά στον οπίσθιο τροχό), με αποτέλεσμα το μεταξόνιο να μεγαλώνει. Ένα όφελος του μακρύτερου αυτού μεταξονίου είναι η αποτελεσματικότερη απορρόφηση κραδασμών.



Θ-3.9: Ένα τυπικό αγωνιστικό ποδήλατο δρόμου.

Όλα τα αγωνιστικά ποδήλατα δρόμου υπόκεινται σε περιορισμούς ως προς τη μορφή και τη γεωμετρία τους από τις οδηγίες του οργανισμού UCI. Οι βασικότεροι από αυτούς παρουσιάζονται στην πορεία της εργασίας.

Στα ποδήλατα τριάθλου, ο αναβάτης τοποθετείται σε ακόμα χαμηλότερη, και συνεπώς πιο αεροδυναμική, θέση, με περιστροφή του προς τα εμπρός γύρω από τον άξονα της μεσαίας τριβής. Τα πλαίσια τείνουν να έχουν πιο κοντό μεταξόνιο, απότομη γωνία σωλήνα σέλλας ως προς το έδαφος και χαμηλό κούτελο, με αποτέλεσμα η σταθερότητά τους να μειώνεται. Τα πλαίσια αυτά δεν υπόκεινται στους κανονισμούς της UCI και είναι πιθανό να μη διαθέτουν την κλασική γεωμετρία του σκελετού – διαμάντι, όπως τα ποδήλατα δρόμου, με σκοπό τη βελτίωση της αεροδυναμικής τους συμπεριφοράς.



Θ-3.10: Ένα τυπικό αγωνιστικό ποδήλατο τριάθλου.

Ποδήλατα βουνού

Συχνή προσθήκη στα ποδήλατα βουνού είναι τα αμορτισέρ, τόσο για καλύτερη απορρόφηση των κραδασμών όσο και για ευκολία στο χειρισμό τους. Κυριότερες παραλλαγές των ποδηλάτων ορεινής ποδηλασίας είναι τα μοντέλα πλήρους ανάρτησης ή full suspension, με ανάρτηση τόσο στην πίσω ρόδα όσο και στο πιρούνι της μπροστινής ρόδας, και τα μοντέλα εμπρόσθιας ανάρτησης ή hardtail, με ανάρτηση μόνο στο πιρούνι. Στα σύγχρονα ποδήλατα full suspension περιέχεται μηχανισμός για την ενεργοποίηση των οπίσθιων αμορτισέρ. Στο συγκεκριμένο τύπο ποδηλάτου βουνού υπάρχουν πολλές παραλλαγές ενσωμάτωσης της οπίσθιας ανάρτησης για να καλύψουν τους διάφορους οδηγικούς σκοπούς.



Θ-3.11: Ένα τυπικό αγωνιστικό ποδήλατο βουνού.

3.6 Συνήθειες αστοχίες σε πλαίσια ποδηλάτων από σύνθετα υλικά

Δεδομένου ότι τα πλαίσια των αγωνιστικών ποδηλάτων δρόμου φτιάχνονται στην μεγάλη πλειοψηφία τους από ανθρακονήματα, είναι λογική η επιλογή τους ως κύριο υλικό κατασκευής του αγωνιστικού σκελετού δρόμου που σχεδιάστηκε και μελετήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Για το λόγο αυτό, θεωρήθηκε σημαντική η αναζήτηση και διαπίστωση των διαφόρων αστοχιών που μπορεί να παρουσιάσουν οι εν λόγω σκελετοί.

Οι σκελετοί ποδηλάτων από σύνθετα υλικά μπορούν να εμφανίσουν διάφορες βλάβες στη διάρκεια ζωής τους. Κάποιες μπορεί να οφείλονται σε απρόοπτα γεγονότα, όπως για παράδειγμα ατύχημα κατά την οδήγηση, άλλες λόγω της μη ορθής χρήσης του πλαισίου, ενώ ακόμα μπορεί να εμφανιστούν προβλήματα λόγω αστοχιών κατά την κατασκευή.

Κατά την οδήγηση, ο ποδηλάτης μπορεί να έχει πτώση λόγω αστάθειας ή λόγω πρόσκρουσης με άλλο όχημα ή εμπόδιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορεί να εφαρμοστεί κρουστικό φορτίο σε κάποιο τμήμα του σκελετού. Δεδομένου ότι τα ανθρακονήματα έχουν πολύ μικρή αντοχή σε πλευρική κρούση, είναι πολύ εύκολο να δημιουργηθούν τοπικά σπασίματα και αποκολλήσεις μίας ή και περισσότερων στρώσεων. Αντίστοιχες βλάβες μπορεί να προκύψουν εάν το πλαίσιο πέσει και χτυπήσει σε περιοχή που δεν είναι ιδιαίτερα ενισχυμένη ή αν κατά την οδήγηση εκτοξευθεί πέτρα από τις ρόδες πάνω στο σκελετό. Εάν δεν γίνει αντιληπτή η βλάβη και ο ποδηλάτης συνεχίσει τη χρήση, η αρχική ρωγμή διαδίδεται μέχρι και το ολοκληρωτικό σπάσιμο του πλαισίου.

Η ορθή χρήση ενός πλαισίου χαρακτηρίζεται από τα πρότυπα του ISO τα οποία πρέπει να πληροί. Τα πρότυπα αυτά προσπαθούν να προβλέψουν τις πιθανές φορτίσεις που μπορεί να δέχεται ένας σκελετός κατά τη διάρκεια ζωής του. Αφορούν διάφορα κρουστικά, δυναμικά και στατικά σενάρια, αλλά και σενάρια κυκλικών φορτίσεων στα οποία εισάγεται και η κόπωση του υλικού. Είναι πολύ εύκολο ο σκελετός να σπάσει ή να εμφανίσει τουλάχιστον ρωγμή σε κάποιες στρώσεις εάν εφαρμοστούν σε αυτόν φορτίσεις πέραν αυτών που περιγράφονται στα πρότυπα του ISO, καθώς δεν λαμβάνονται υπόψιν κατά το σχεδιασμό του. Ένα παράδειγμα τέτοιας φόρτισης είναι η προσάρτηση βάρους στον οριζόντιο ή άνω σωλήνα από τον αναβάτη όταν αυτό δεν προβλέπεται από τον κατασκευαστή ή η απότομη επαφή του παπουτσιού με τα άνω ψαλίδια ή seatstays.

Η διαδικασία κατασκευής ενός πλαισίου εγκυμονεί τους περισσότερους κινδύνους για μελλοντικές αστοχίες κατά τη χρήση του σκελετού αφού στα διάφορα στάδια της παραγωγής μπορεί λόγω λάθους ή αμέλειας να εμφανιστούν προβλήματα. Ξεκινώντας από το ίδιο το υλικό, υπάρχει περίπτωση η ρητίνη να έχει υπερβεί τις ώρες ζωής της, με αποτέλεσμα να μην μπορεί στη συνέχεια να κάνει σωστό curing και να μην περιβάλλει τις ίνες σε όλο τους το μήκος. Προχωρώντας στη διαδικασία της διαστρωμάτωσης, μπορεί ένα πατρόν να έχει λάθος σχήμα ή να τοποθετηθεί σε λάθος θέση, με αποτέλεσμα διαφορετική κατανομή τάσεων στο τελικό προϊόν που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία. Επιπλέον προβλήματα μπορεί να προκύψουν εάν οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά το στάδιο αυτό (θερμοκρασία, υγρασία κλπ.) δεν είναι οι κατάλληλες. Αποκόλληση μπορεί να προκληθεί και λόγω αμέλειας του εργάτη εάν κατά τη διαστρωμάτωση δε φοράει γάντια όταν ακουμπάει το υλικό. Η φυσική λιπαρότητα από τα χέρια του αποτρέπει τη σύνδεση των στρώσεων καθώς επηρεάζει τη ρητίνη. Κατά τη φάση του καλουπώματος, μπορεί το καλούπι να μην κλείσει σωστά ή να έχει φθορές. Σε αυτήν την περίπτωση στο τελικό προϊόν μπορεί να παρουσιαστεί περίσσεια ή έλλειψη ρητίνης στα προβληματικά σημεία ή να δημιουργηθεί bridge στην περιοχή που κλείνει το καλούπι.

Πολύ σημαντικό στάδιο στην παραγωγή ενός πλαισίου είναι η φάση της σκλήρυνσης ή curing της ρητίνης αφού ολοκληρωθεί το καλούπωμα. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη διαδικασία είναι η θερμοκρασία που εφαρμόζεται, αλλά και ο χρόνος παραμονής του πλαισίου σε αυτή, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3. Ένας θερμικός κύκλος σκλήρυνσης προσδιορίζει το χρόνο παραμονής του πλαισίου σε διάφορες θερμοκρασίες έτσι ώστε να ολοκληρωθεί το cure της ρητίνης. Η κάθε ρητίνη έχει συγκεκριμένους συνδυασμούς θερμοκρασίας και χρόνου παραμονής για τη σκλήρυνσή της. Αν η θερμοκρασία δεν φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο ή ο χρόνος του dwell είναι μικρότερος από τον απαραίτητο, η ρητίνη δεν κάνει σωστό curing. Κατά τη σκλήρυνση εφαρμόζεται ταυτόχρονα και πίεση στο καλούπι. Εάν η πίεση είναι χαμηλή ή και ατμοσφαιρική παρατηρείται αυξημένο πορώδες μέσα στο υλικό. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται σακούλα για την εφαρμογή της πίεσης, ένα πιθανό πρόβλημα είναι το σκάσιμο αυτής. Τότε, στο τελικό προϊόν μπορεί οι στρώσεις να μην έχουν ανοίξει

πλήρως και η ρητίνη να μην έχει κατανεμηθεί ομοιόμορφα ανάμεσα στις στρώσεις. Ένα ακόμα πρόβλημα που μπορεί να εμφανιστεί κατά το ψήσιμο του σκελετού αφορά στην υγρασία που μπορεί να έχει απορροφήσει το υλικό. Κατά τη θέρμανση του υλικού, η περιεχόμενη υγρασία εξατμίζεται και δημιουργούνται φυσαλίδες αέρα μέσα στο υλικό χωρίς αυτές να είναι απαραίτητα ορατές στην εξωτερική επιφάνεια. Εάν έχει εφαρμοστεί και πίεση κατά το ψήσιμο, οι φυσαλίδες αυτές περιέχουν πεπιεσμένο αέρα, με αποτέλεσμα να προκαλείται τελικά αποκόλληση. Τέλος, εάν χρησιμοποιείται αντλία για την εφαρμογή της υποπίεσης, το λάδι που χρησιμοποιείται μπορεί με λάθος χειρισμούς να περάσει μέσω του σωλήνα στα ανθρακονήματα και στο τελικό προϊόν να δημιουργηθεί ενδοστρωματική αποκόλληση.

Αστοχίες, ωστόσο, μπορεί να προκύψουν και κατά την τελική επεξεργασία του σκελετού. Εάν το πλαίσιο απαρτίζεται από διαφορετικά κομμάτια, οι ενώσεις των επιμέρους κομματιών μπορεί να είναι πηγές προβλημάτων. Μπορεί να δημιουργηθεί συγκέντρωση τάσεων πριν και μετά από το σημείο κόλλησης εάν αυτή γίνεται με μούφα (τμήμα του ενός κομματιού κολλιέται εσωτερικά σε τμήμα του διπλανού κομματιού). Η κόλληση των ξεχωριστών κομματιών μπορεί να δημιουργήσει ακόμα θέματα ευθυγράμμισης αλλά και σπάσιμο αν η κόλλα που χρησιμοποιείται δεν είναι αρκετή ή χαμηλής ποιότητας. Σε πολλά ανθρακονήματα πλαίσια προσκολλώνται και μεταλλικά τμήματα, όπως είναι τα νύχια στο ψαλίδι, η μεσαία τριβή ή τα ποτήρια στο headtube. Εκεί μπορεί να παρατηρηθεί γαλβανική οξείδωση εάν τα μεταλλικά κομμάτια είναι από αλουμίνιο και έρχονται σε άμεση επαφή με τις ίνες άνθρακα. Τέλος, πολλοί σκελετοί έχουν τρύπες σε διάφορα σημεία για να περνούν από μέσα τους τα καλώδια των φρένων και των ταχυτήτων, ενώ σχεδόν όλοι έχουν τρύπες για παγουροθήκη. Η δημιουργία τρύπας εισάγει μια ατέλεια στο πλαίσιο, η οποία δημιουργεί μικρορωγμές και καθώς αυτές διαδίδονται οδηγεί στο σπάσιμο του πλαισίου. Αυτό μπορεί να προληφθεί με κατάλληλη τοπική ενίσχυση του πλαισίου στα σημεία που προβλέπεται να γίνει μετά η τρύπα.

Ακολουθούν ενδεικτικές φωτογραφίες αστοχιών που έχει αντιμετωπίσει ο συγγραφέας κατά την πολυετή ενασχόληση με το αντικείμενο.



Θ-3.12: Αστοχία από την αλυσίδα μετά από αποτυχημένη προσπάθεια αλλαγής ταχύτητας.



Θ-3.13: Αστοχία γαλβανική οξείδωση στο σημείο της ένωσης του σκελετού με τον εμπρόσθιο εκτροχιαστή.



Θ-3.14: Αστοχία στο σημείο ένωσης με το παλουκόσελο που ξεκίνησε από ενδοστρωματική αποκόλληση μετά από πτώση σε λακούβα με τον αναβάτη καθιστό, διαδόθηκε και οδήγησε σε ολική θραύση των ινών.



Θ-3.15: Αστοχία στο σημείο ένωσης με τον οπίδιο εκτροχιαστή μετά από αποτυχημένη αλλαγή ταχύτητας όπου μπλόκαρε ο πίσω εκτροχιαστής και έσπασε το νύχι του σκελετού.



Θ-3.16: Αστοχία από έντονο φρενάρισμα στο σημείο αμέσως μετά τη βάση στήριξης του φρένου.



Θ-3.17: Αστοχία από πτώση σε λακούβα.



Θ-3.18: Αστοχία από γύρισμα τιμονιού.



Θ-3.19: Αστοχία από σχάρα μεταφοράς ποδηλάτου.



Θ-3.20: Κατασκευαστική αστοχία όπου μαγκώθηκε το carbon στην διαχωριστική επιφάνεια του καλουπιού και ουσιαστικά ελάττωσε σε τέτοιο βαθμό την αλληλοεπικάλυψη των στρώσεων ώστε να προκληθεί αστοχία.

3.7 Βιβλιογραφία

[3.1] Richard Ballantine, Richard Grant, Ultimate Bicycle Book, 1998

Κεφάλαιο 4 Σχεδιασμός βέλτιστου μοντέλου αγωνιστικού σκελετού δρόμου

4.1 Εισαγωγή

Για το σχεδιασμό ενός βέλτιστου μοντέλου αγωνιστικού σκελετού δρόμου πρέπει αρχικά να ορίσουμε όλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και συμπεριφορές αλλά και να ακολουθήσουμε συγκεκριμένους κανόνες που έχει θέσει η παγκόσμια ομοσπονδία ποδηλασίας (UCI). Στη συνέχεια πειραματιζόμαστε πάνω στο βέλτιστο αυτό μοντέλο ώστε να επιλύσουμε πιθανά προβλήματα.

Ένας βέλτιστος σκελετός είναι ελαφρύς, άκαμπτος, αεροδυναμικός, έχει καλή απόσβεση κραδασμών, σωστή οδική συμπεριφορά και είναι φυσικά ανθεκτικός σε όλες τις αναμενόμενες (πχ φορτία από τον ποδηλάτη) και μη αναμενόμενες (πχ πέτρες που εκτοξεύονται από τα λάστιχα) καταπονήσεις που ενδέχεται να αντιμετωπίσει στη διάρκεια ζωής του. Το κομμάτι της οδικής συμπεριφοράς εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία και δεν αποτελεί πρόβλημα αφού υπάρχουν ειδικά συστήματα σωματομέτρησης τα οποία μας δίνουν για τον κάθε αναβάτη το ιδανικό μέγεθος. Όλα τα άλλα χαρακτηριστικά όμως είναι αντικρουόμενα, αφού:

- Για να γίνει ένας σκελετός πολύ ελαφρύς, έχει μεγάλες και λεπτότοιχες τετραγωνικές ή ορθογωνικές διατομές οι οποίες του δίνουν χαμηλό βάρος και υψηλή δυσκαμψία όμως τον κάνουν κουραστικό στους κραδασμούς και κακό στην αεροδυναμική.
- Για να γίνει ένας σκελετός πολύ αεροδυναμικός, έχει διατομές που παραπέμπουν σε αεροτομές οι οποίες για να γίνουν ανθεκτικές πρέπει να ενισχυθούν αρκετά, ειδικά στο χείλος εκφυγής, με αποτέλεσμα να είναι μεν άκαμπτος και ανθεκτικός αλλά να είναι βαρύς και κουραστικός λόγω μεταφοράς κραδασμών στον αναβάτη.
- Για να γίνει άνετος ένας σκελετός πρέπει να είναι σχεδιασμένος ώστε να λειτουργεί σαν αποσβεστήρας αλλά σε αυτή την περίπτωση μειώνεται η

δυσκαμψία και η αντοχή αφού τα κομμάτια που είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν ως αναρτήσεις είναι πολύ λεπτά και έχουν ιδιαίτερο σχεδιασμό.

Όλα αυτά μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει απόλυτη σχεδιαστική λύση και θα πρέπει να αναζητήσουμε και νέες τεχνολογικές λύσεις για να λύσουμε το πρόβλημα. Για να αναζητήσουμε κάποια τεχνολογική λύση πρέπει να ξεκινήσουμε από ένα σκελετό που έχει σχετικά καλή συμπεριφορά σε όλους τους τομείς.

Για το σκοπό αυτό αποφασίστηκε να κατασκευαστεί ένας σκελετός για έναν καταξιωμένο αθλητή, τον πολλές φορές παγκόσμιο πρωταθλητή Χρήστο Γαρέφη, ο οποίος θα τον χρησιμοποιούσε και θα μας έδινε και εντυπώσεις σε πραγματικές συνθήκες ώστε να μη βασιζόμαστε μόνο σε εργαστηριακά δεδομένα.

Χρησιμοποιώντας το Shimano Bike Fitting Dynamic and Pedalling Analysis, το κορυφαίο σύστημα σωματομέτρησης, μετρήσαμε και πήραμε δεδομένα από τον αθλητή μας και βγάλαμε τη γεωμετρία του ποδηλάτου που θα πρέπει να φτιάξουμε. Το σύστημα αυτό, μαζί με το συνοδευτικό του λογισμικό, το εμπιστεύονται πάρα πολύ επαγγελματίες αθλητές για τα Custom Ποδήλατά τους εδώ και πολλές δεκαετίες και απετέλεσε την επιλογή μας για ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Η λογική που ακολουθεί αυτό το σύστημα είναι η ακόλουθη: Εξειδικευμένες ιατρικές και προπονητικές ομάδες μετράνε επαγγελματίες και ερασιτέχνες αθλητές και ανάλογα με τη χρήση που θα κάνει ο αναβάτης και τα ιδιαίτερα σωματικά χαρακτηριστικά του πχ ύψος, βάρος, ηλικία, ελαστικότητα κ.α. τον στήνουν πάνω στο ποδήλατο. Σε βάθος χρόνου τον παρακολουθούν και κάνουν αλλαγές αν και όπου χρειάζονται. Η γνώση αυτή καταχωρείτε σε βάσεις δεδομένων και κάθε φορά που κάποιος νέος αθλητής μετριέται έχει άμεσα διαθέσιμες στατιστικές πληροφορίες και προτάσεις για το πως πρέπει να στηθεί ο αναβάτης και ποιες διαστάσεις - γεωμετρία πρέπει να έχει το ποδήλατο του.

Οι μετρήσεις στην περίπτωση μας, έγιναν από το συγγραφέα ο οποίος έχει μεγάλη εμπειρία στο αντικείμενο αυτό, αφού έχει εκπαιδευτεί και το εφαρμόζει πάνω από 15 χρόνια. Οι μετρήσεις έγιναν στις εγκαταστάσεις της εταιρίας Grammarios Bikes, η οποία διαθέτει το πλήρες σύστημα σωματομέτρησης που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.

4.2 Bike Fitting

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ακόλουθη: Μετρήθηκαν τα βασικά σωματομετρικά δεδομένα στη μετρητική καλίμπρα που φαίνεται στην Εικόνα Θ-4.1. Αυτά είναι το ύψος, το μήκος των χεριών, των πατουσών, του κορμού, ο καβάλος και το άνοιγμα των ώμων. Ταυτόχρονα έγινε θερμικό πελματογράφημα και μέτρηση

ισχιακών οστών. Ακολούθως μετρήθηκαν τα μετατόρσια και τοποθετήθηκαν τα σχαράκια στα ειδικά παπούτσια που κουμπώνουν πάνω στα πετάλια (Εικόνα Θ-4.2 πάνω). Με τη χρήση του εξομοιωτή θέσης που φαίνεται στην Εικόνα Θ-4.2 κάτω υπολογίσαμε τη γωνία ισχίο – γόνατο και γόνατο – πέλμα και στήσαμε το σύστημα της δυναμικής ανάλυσης. Με τη βοήθεια καμερών (Εικόνα Θ-4.3) και του συστήματος ανάλυσης πεταλαρίσματος (Εικόνα Θ-4.4) αναλύσαμε τον τρόπο που πεταλάει ο αναβάτης και με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού καταλήξαμε στην τελική γεωμετρία. Όλες οι διαδικασίες των μετρήσεων ακολούθησαν αυστηρά τους κανόνες της Bike fitting ώστε να είμαστε σίγουροι για το αποτέλεσμα. [4.1-4.9]



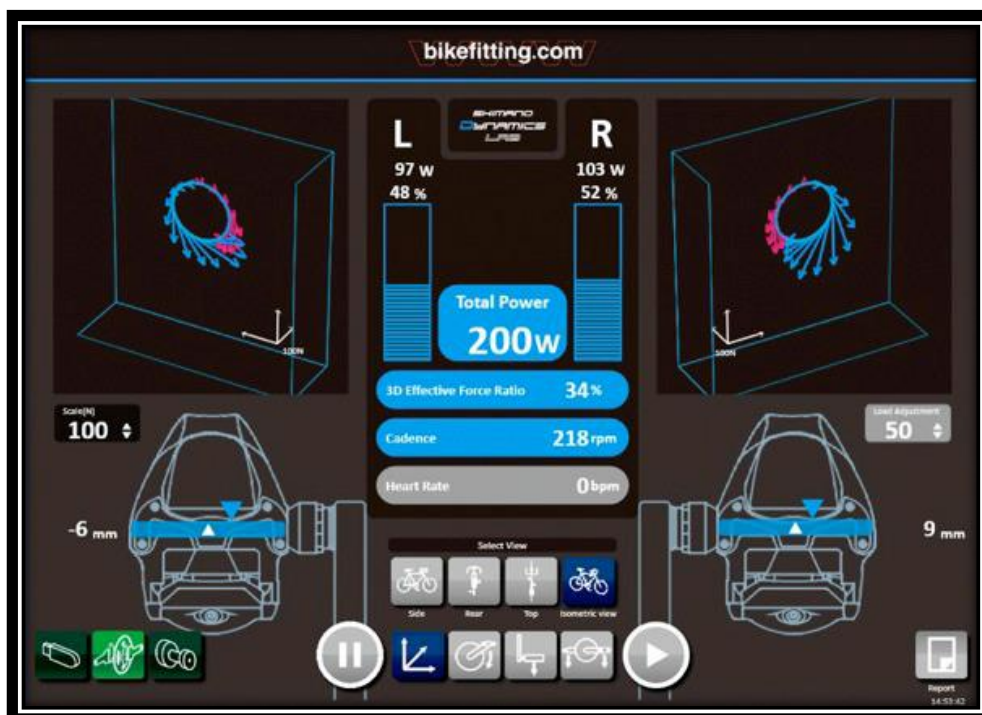
Θ-4.1: Μετρητική καλίμπρα Bike Fitting.



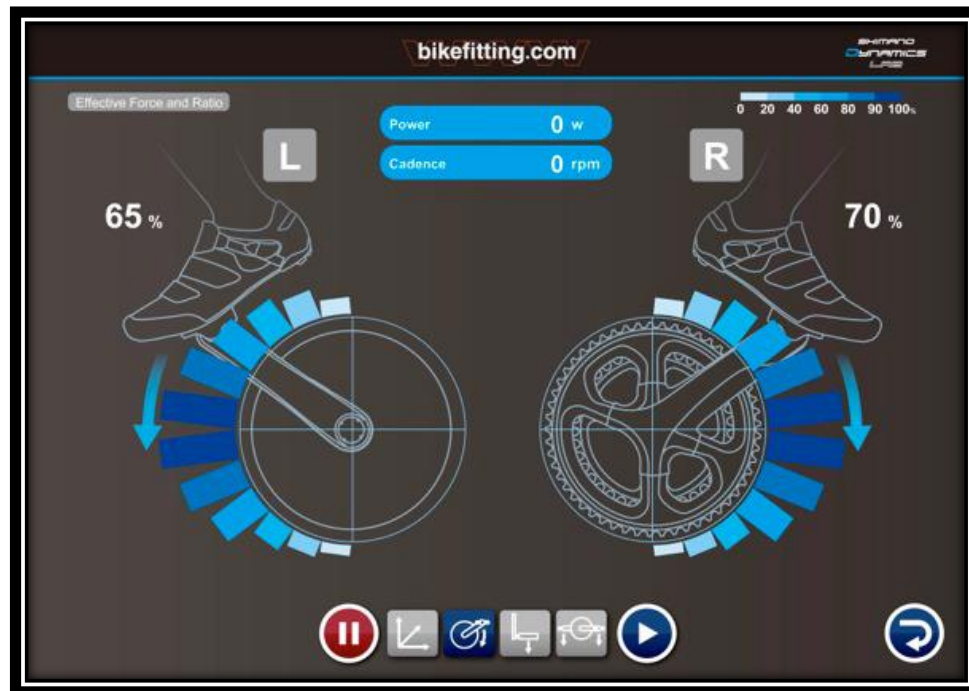
Θ-4.2: Σχαράκια (πάνω) και εξομοιωτής θέσης (κάτω).



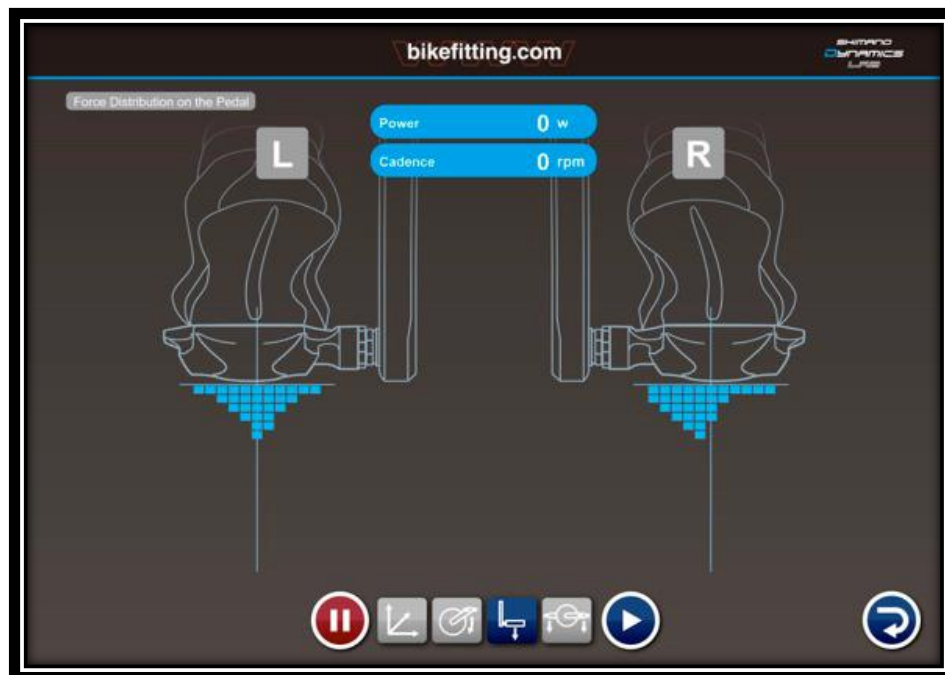
Θ-4.3: Κάμερα δυναμικής ανάλυσης. Θ-4.4: Σύστημα ανάλυσης πεταλαρίσματος.



Θ-4.5: Ανάλυση δυνάμεων και ροπών κατά την άσκηση.



Θ-4.6:Ανάλυση φορτίων ανά πόδι κατά τη διάρκεια του κύκλου πεταλαρίσματος.



Θ-4.7:Ανάλυση κατανομής φορτίου στο πετάλι.

Από τα παραπάνω πήραμε τις μετρήσεις που φαίνονται παρακάτω.

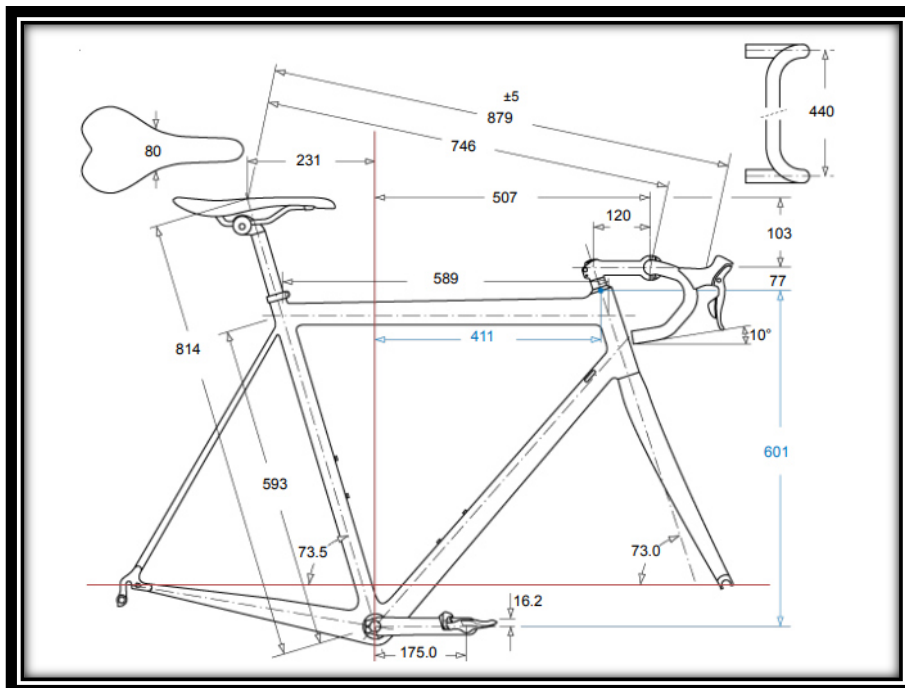
bikefitting.com
SHIMANO DYNAMICS LAB

Anthropometry

	Measured value		Calculated value Dimensions	Average value Dimensions
Height :	<input type="text" value="1844"/>	mm	1844	1844
Torso Height :	<input type="text" value="1508"/>	mm	581	607
Inseam Height :	<input type="text" value="927"/>	mm	927	896
Left Arm :	Left shoulder <input type="text" value="1508"/>	mm	Left hand <input type="text" value="836"/>	720
	Right shoulder <input type="text" value="1508"/>		Right hand <input type="text" value="840"/>	
Right Arm :	<input type="text" value="1508"/>	mm	716	707
Left Foot Length :	<input type="text" value="288"/>	mm	288	275
Right Foot Length :	<input type="text" value="288"/>	mm	288	275
Shoulder Width :	<input type="text" value="438"/>	mm	438	434

Θ-4.8: Τα σωματομετρικά στοιχεία του αθλητή.

Το αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η τελική γεωμετρία του ποδηλάτου που θα κατασκευάσουμε και η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα Θ-4.9:



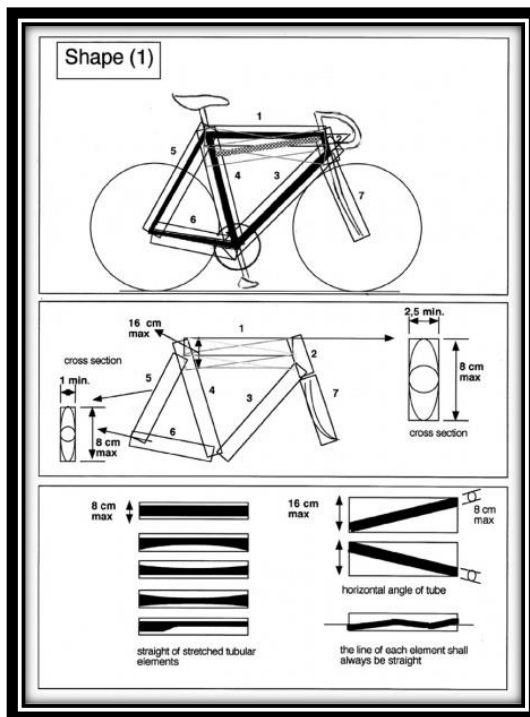
Θ-4.9: Η γεωμετρία του ποδηλάτου όπως προκύπτει από το πρόγραμμα του Bike Fitting.

4.3 Κανονισμοί διεθνούς οργανισμού ποδηλασίας UCI [4.10]

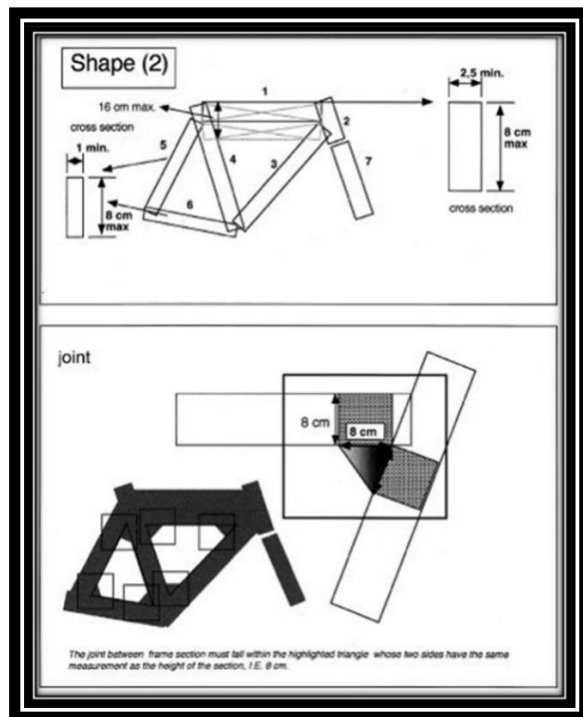
Για να χρησιμοποιηθεί ένα ποδήλατο σε αγώνες πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προϋποθέσεις – κανονισμούς, τους οποίους θέτει η παγκόσμια ομοσπονδία ποδηλασίας. Με βάση αυτούς τους κανονισμούς, το πλαίσιο πρέπει να αποτελείται από δύο τρίγωνα, το κυρίως και το πίσω, να ακολουθεί δηλαδή το παραδοσιακό πρότυπο σκελετού – σκελετός «διαμάντι». Τα τμήματα του σκελετού μπορεί να έχουν διατομή διαφόρων σχημάτων, π.χ. κύκλος, οβάλ, σταγόνας, πεπλατυσμένης διατομής ή οποιασδήποτε άλλης διατομής, αρκεί η μορφή κάθε τμήματος να περιλαμβάνει μια ευθεία γραμμή.

Σε κάθε στοιχείο του σκελετού, το μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος είναι 8 cm, ενώ το ελάχιστο πλάτος είναι 2,5 cm. Κατ' εξαίρεση, το πλάτος μπορεί να μειωθεί στο 1 cm για τα κάτω και άνω ψαλίδια, chain stays και seat stays αντίστοιχα.

Ο πάνω σωλήνας (top tube) μπορεί να έχει κλίση τέτοια ώστε η κάθετη μετρούμενη απόσταση από τον οριζόντιο να είναι μικρότερη ή ίση των 16 cm.



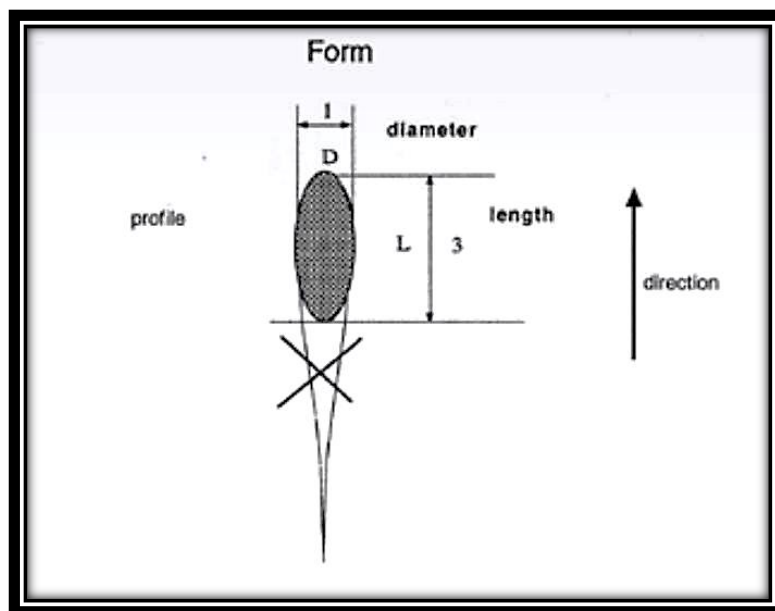
Θ-4.10: Περιορισμοί διατομών και μορφές αεροτομών των τμημάτων του πλαισίου.



Θ-4.11: Περιορισμοί ενώσεων των τμημάτων του πλαισίου.

Όταν για μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης χρησιμοποιείται σε οποιοδήποτε τμήμα του σκελετού διατομή σχήματος σταγόνας ή πτερυγίου, θα πρέπει ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο να μην υπερβαίνει το 3, δηλαδή:

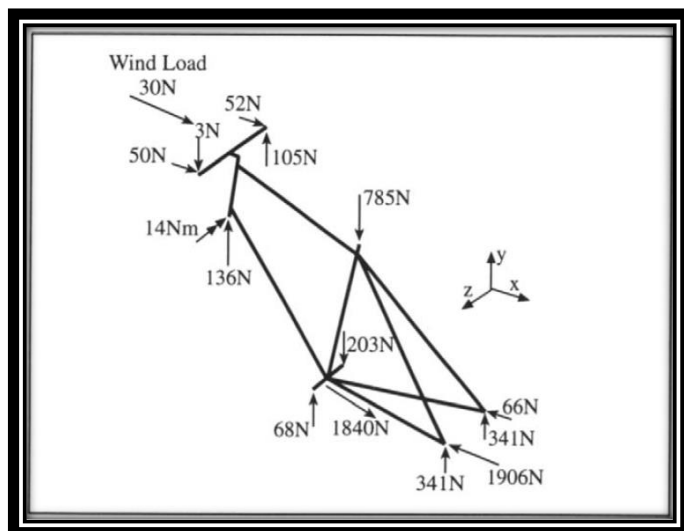
$$\frac{L}{D} \leq 3$$



Θ-4.12: Μορφή αεροτομής.

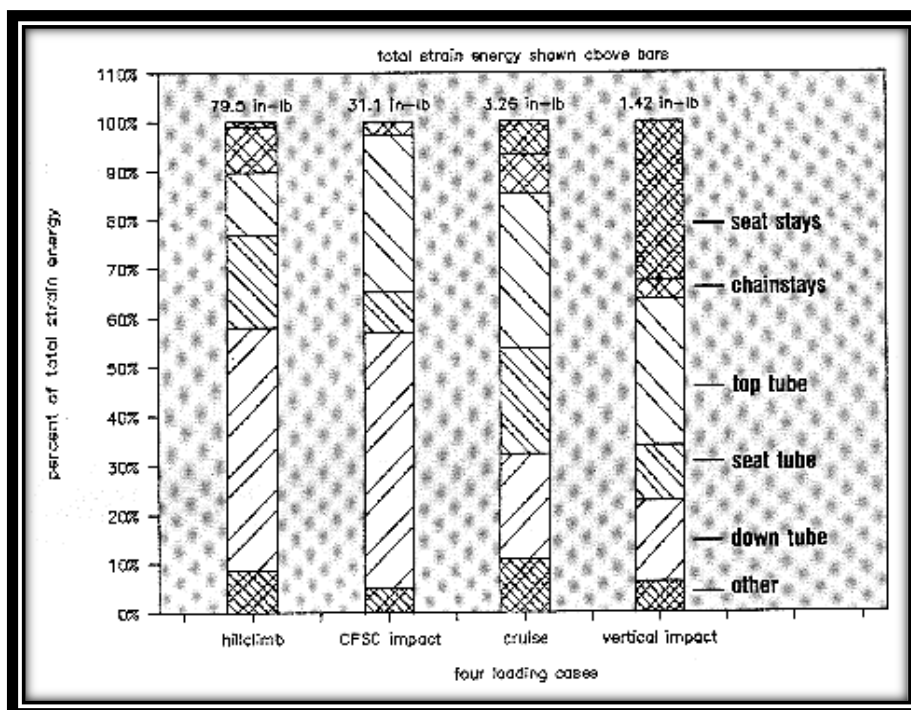
4.4 Κατανομή φορτίων σε αγωνιστικό πλαίσιο δρόμου

Από τη βιβλιογραφία [4.11][4.12][4.13][4.14] υπάρχουν πολλές αναφορές για την κατανομή φορτίων στο σκελετό σε διάφορες συνθήκες τις οποίες θα λάβουμε υπόψιν μας κατά τη διάρκεια του της επιλογής του σχήματος κάθε σωλήνα. Ενδεικτικά στην Εικόνα Θ-4.12 βλέπουμε τα φορτία κατά τη διάρκεια τυπικού πεταλαρίσματος.



Θ-4.13: Δυνάμεις σε σκελετό κατά τη διάρκεια τυπικού πεταλιάριατος.

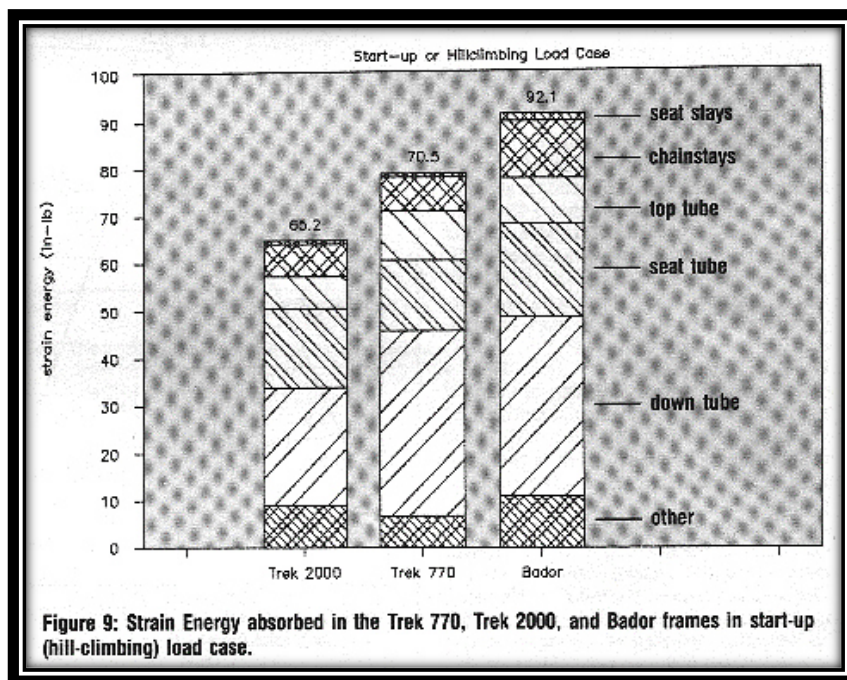
Στην Εικόνα Θ-4.14 βλέπουμε σε διάγραμμα την ενέργεια λόγω φορτίου την οποία παραλαμβάνει κάθε σωλήνας σε διάφορες περιπτώσεις φόρτισης. [4.14][4.15]



Θ-4.14: Απορρόφηση ενέργειας σε κάθε σωλήνα του πλαισίου Trek 770 σε διαφορετικά σενάρια φόρτισης.

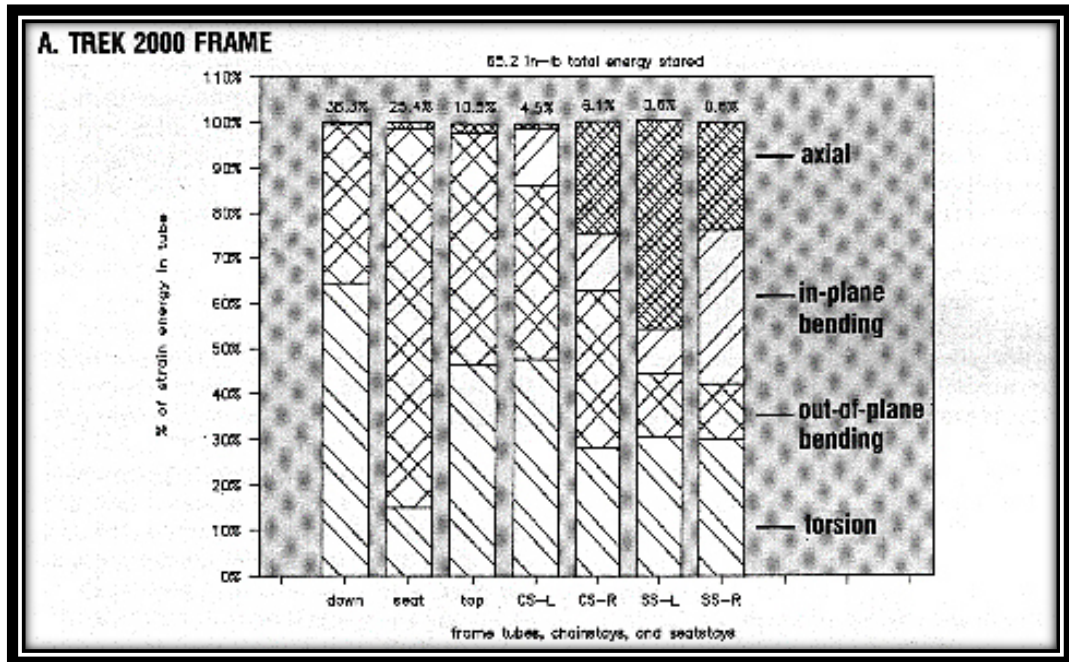
Πιο συγκεκριμένα: Η πρώτη μπάρα δείχνει τα φορτία που αντιμετωπίζει ένας σκελετός κατά την προσπάθεια ενός αναβάτη 68 κιλών να ξεκινήσει από στάση όσο το δυνατόν πιο γρήγορα και τα οποία είναι παρόμοια με αυτά που παρατηρούνται σε οδήγηση σε ανηφόρα, η δεύτερη μπάρα αφορά σύγκρουση από μπροστά με χαμηλή ταχύτητα πχ με σαμαράκι ή τοίχο, η τρίτη έντονο πεταλάρισμα από αναβάτη 73 κιλών που παράγει 400W ισχύος και η τέταρτη πτώση σε λακκούβα.

Ο σχεδιασμός και το σχήμα του σκελετού επηρεάζει κατά πολύ το συνολικό ποσό ενέργειας που θα λάβει ο σκελετός και θα παραμορφωθεί ελαστικά σε κάθε φόρτιση. Στην Εικόνα Θ-4.14 βλέπουμε πόσο διαφορετικά ποσά ενέργειας απορροφούν τρεις διαφορετικοί σκελετοί

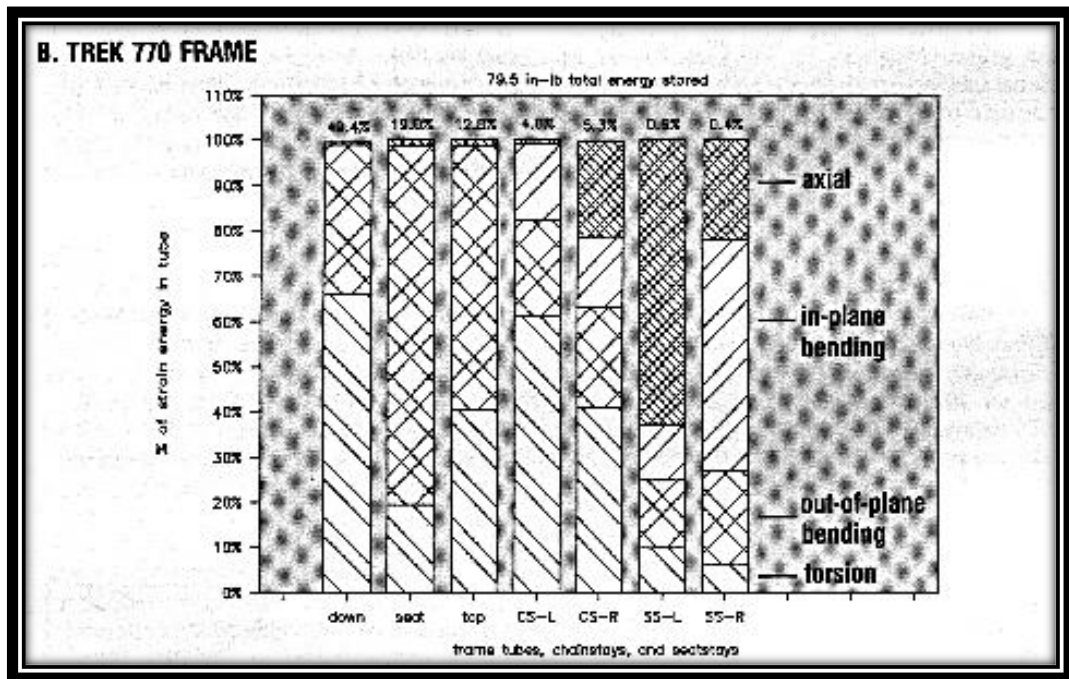


Θ-4.15: Απορρόφηση ενέργειας στους σωλήνες των πλαισίων Trek 770, Trek 2000 και Bador στο σενάριο στατικής εκκίνησης.

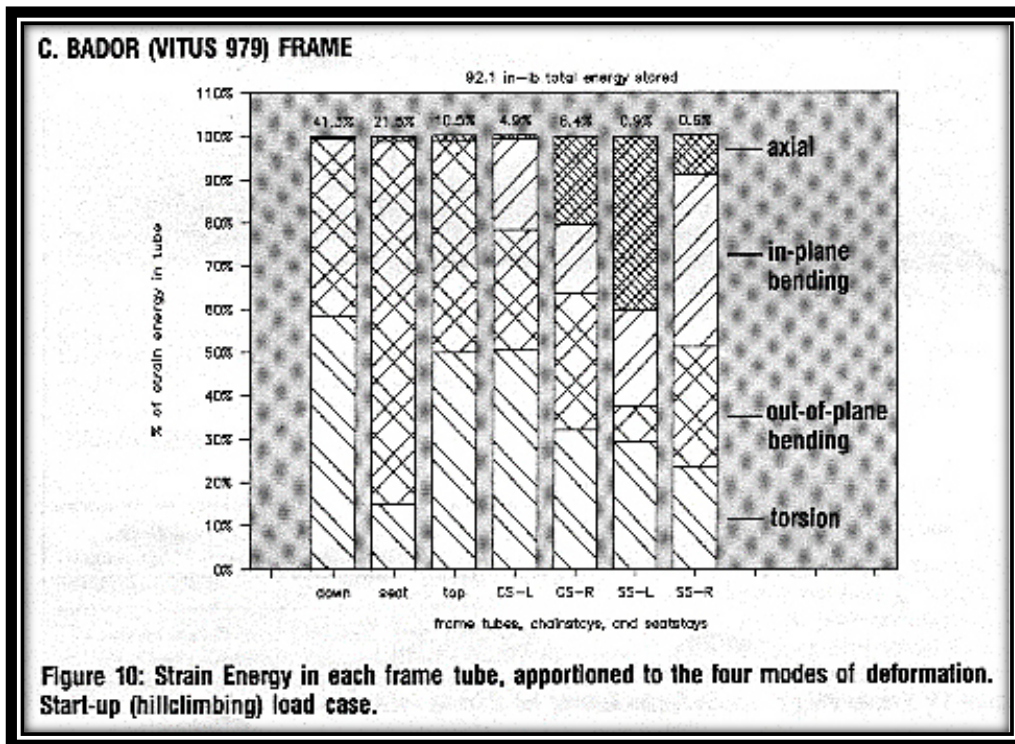
Επίσης πολύ χρήσιμο είναι το αποτέλεσμα που βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα και τα συμπεράσματα που βλέπουμε από αυτό. Σε αυτό παρατηρούμε τη διαφορετική κατανομή του φορτίου σε κάθε σωλήνα και το είδος φόρτισης που παραλαμβάνει (Σχήματα Θ-4.16, Θ-4.17 και Θ-4.18).



Θ-4.16: Κατανομή φορτίου και είδος φόρτισης σε κάθε σωλήνα στο πλαίσιο Trek 2000.



Θ-4.17: Κατανομή φορτίου και είδος φόρτισης σε κάθε σωλήνα στο πλαίσιο Trek 770.



Θ-4.18: Κατανομή φορτίου και είδος φόρτισης σε κάθε σωλήνα στο πλαίσιο Bador.

Αυτά τα δεδομένα μας δείχνουν πιο σημείο του σκελετού φορτίζεται περισσότερο σε διάφορα σενάρια χρήσης και με ποιο τρόπο. Αυτό μας οδηγεί στο να επιλέξουμε παρακάτω τη διατομή που θα χρησιμοποιήσουμε σε κάθε σωλήνα του σκελετού. Για παράδειγμα βλέπουμε στην εικόνα 4.14 ότι στην ανηφόρα ο διαγώνιος σωλήνας (downtube) παραλαμβάνει το μεγαλύτερο φορτίο άρα πρέπει να τον κάνουμε δύσκαμπτο ενώ τα πάνω ψαλίδια (seatstays) που απορροφούν κραδασμούς σε λακούβες πρέπει να γίνουν εύκαμπτα.

4.5 Διατομές σωλήνων προς εξέταση

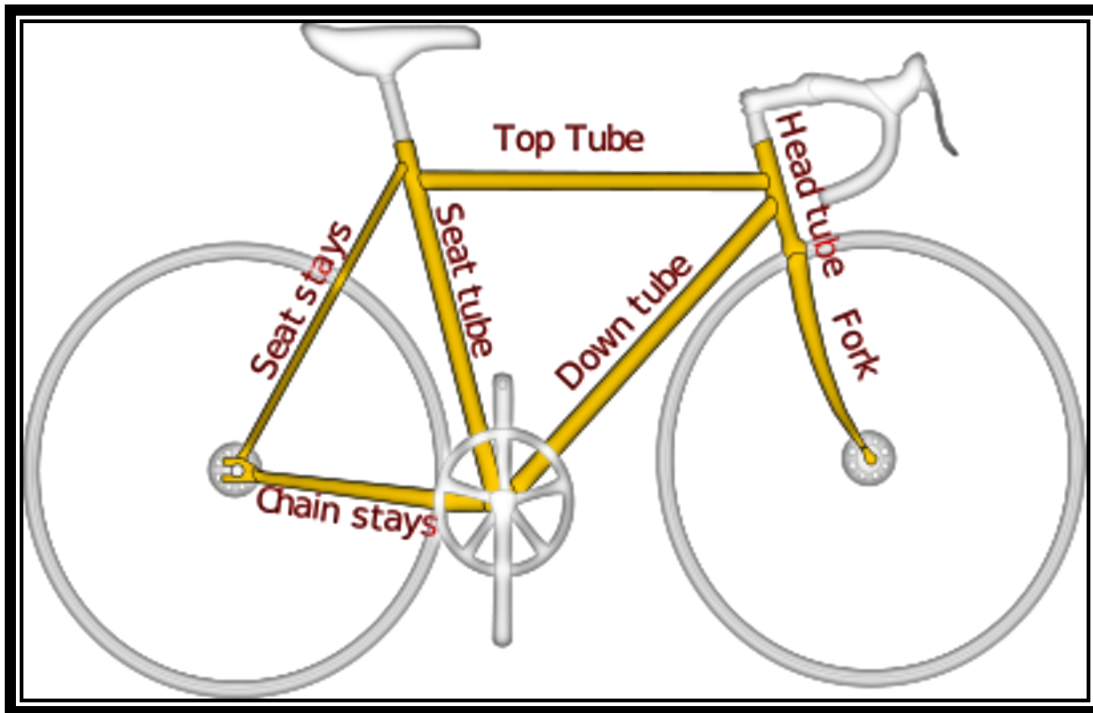
Έχοντας πλέον τη γεωμετρία που καθορίζει τη σωστή οδηγική συμπεριφορά και τους σχεδιαστικούς περιορισμούς από τους κανονισμούς μπορούμε να προχωρήσουμε σε ανάλυση των διαφορετικών σωλήνων του ποδηλάτου. Τι σχήμα όμως πρέπει να έχουν αυτοί οι σωλήνες αφού οι κανονισμοί δεν περιορίζουν τη μορφή τους; Ανάλογα με τη φόρτιση που αναμένεται να παραλάβουν και το ρόλο του κάθε σωλήνα μπορούμε να επιλέξουμε για ομάδα σχημάτων την οποία θα την αξιολογήσουμε και όταν θα γίνει τελικά η ένωση όλων των διατομών να την παραμετροποιήσουμε περαιτέρω. Με αυτόν

τον τρόπο μπορούμε να δοκιμάσουμε εύκολα και γρήγορα πολλές διαφορετικές διατομές πριν σχεδιάσουμε το τελικό μοντέλο το οποίο και θα βελτιστοποιήσουμε για να κερδίσουμε πολύ χρόνο σε σχέση με το να δοκιμάσουμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς.

Οι διατομές που σχεδιάζονται για κάθε τμήμα του πλαισίου του ποδηλάτου θα πρέπει να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις, οι οποίες παρουσιάζονται εν συντομία παρακάτω:

- Δεδομένου ότι θα χρησιμοποιηθεί καλούπι, θα πρέπει οι σωλήνες να αποτελούνται από απλά γεωμετρικά σχήματα και επιφάνειες.
- Για να αποφευχθεί η συγκέντρωση τάσεων, απορρίπτονται οι μικρές ακτίνες καμπυλότητας σε ακμές και κορυφές.
- Το βάρος πρέπει να είναι το μικρότερο δυνατό.
- Με σκοπό την εξοικονόμηση υλικού, πρέπει η επιφάνεια των σωλήνων να είναι επίσης περιορισμένη.
- Οι παραγόμενοι σωλήνες πρέπει να κατασκευάζονται με ασφάλεια και να λειτουργούν χωρίς να παρατηρηθεί θραύση ή ανεπιθύμητες παραμορφώσεις.
- Οι σωλήνες για κάθε τμήμα του πλαισίου θα πρέπει να είναι σύμφωνοι με τους κανονισμούς της UCI (Union Cyclist International).

Βλέποντας την Εικόνα Θ-4.19 παρατηρούμε τα διαφορετικά τμήματα του σκελετού. Με σκοπό να επικεντρωθούμε στο σκελετό, θα χρησιμοποιηθεί πιρούνι εμπορίου.

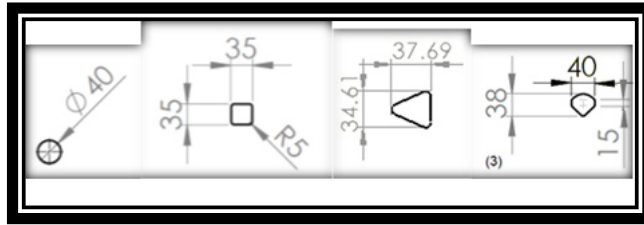


Θ-4.19: Διαφορετικοί σωλήνες ποδηλάτων.

Το κούτελο (head tube) προκύπτει από την ένωση του οριζόντιου (top tube) και του διαγώνιου (down tube) σωλήνα και λόγω της ένωσης αυτής το σχήμα του δεν είναι τυπική διατομή και για αυτό το λόγο θα παραμετροποιηθεί μόλις γίνει η ένωση των ξεχωριστών διατομών. Πρέπει να είναι λεπτός για αεροδυναμικούς λόγους αλλά και αρκετά άκαμπτος και ανθεκτικός αφού η στιβαρότητά του επηρεάζει τη σταθερότητα στην αλλαγή κατεύθυνσης. Επίσης η αντοχή πρέπει να είναι υψηλή αφού δέχεται όλα τα φορτία του δρόμου μέσω του πιρουνιού.

Ο οριζόντιος σωλήνας (top tube) δε δέχεται πολλά φορτία σε κανονικές συνθήκες και αρκεί να φροντίσουμε να αντέχει στις περιπτώσεις σύγκρουσης. Είναι ένα σημείο όπου μπορούμε να γλυτώσουμε βάρος μειώνοντας το πάχος του υλικού σε κάποια σημεία. Για το σημείο αυτό επιλέγουμε να δοκιμάσουμε τις εξής διατομές, όπως απεικονίζονται και στην Εικόνα Θ-4.20:

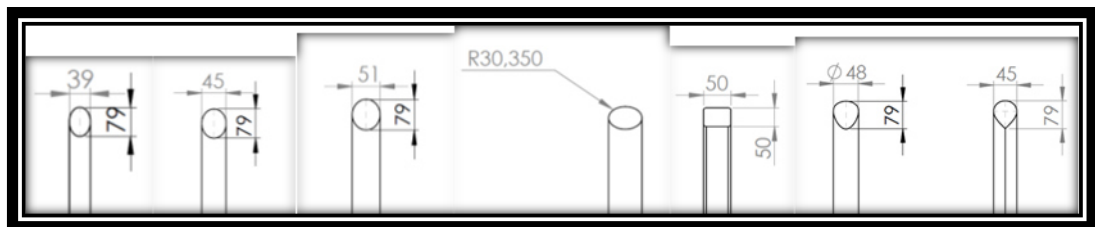
- Μία κυκλική με $\Phi 40\text{mm}$ (tt1-cylindrical 40)
- Μία τετραγωνική $35 \times 35\text{mm}$ (tt2-rectangular 35x35)
- Μία τριγωνική με μήκος 37.69 και πλάτος 34.61mm (tt3 triangular)
- Μία σύνθετης γεωμετρίας με μήκος 38mm και πλάτος 40mm (tt4 complex).



Θ-4.20: Διατομές οριζόντιου σωλήνα 1 έως 4.

Ο διαγώνιος σωλήνας (down tube) πρέπει να είναι πολύ αεροδυναμικός αλλά και πολύ ανθεκτικός αφού κατά τη διάρκεια του πεταλαρίσματος δέχεται πολλά στρεπτικά αλλά και αρκετά καμπτικά φορτία ενώ σε περιπτώσεις σύγκρουσης από εμπρός δέχεται 50+% του συνολικού φορτίου. Για το σημείο αυτό επιλέγουμε να δοκιμάσουμε τις εξής διατομές, όπως απεικονίζονται και στην Εικόνα Θ-4.21:

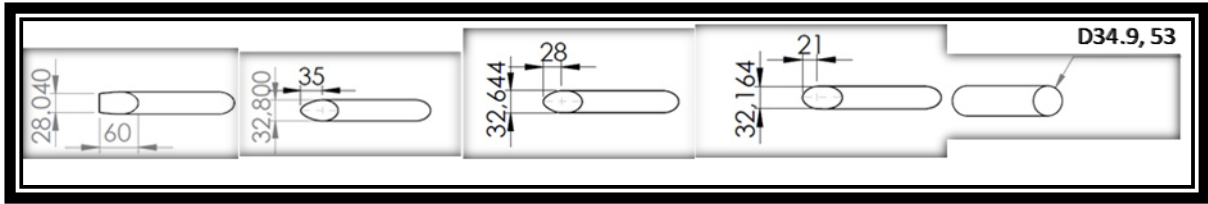
- Τρεις οβάλ με μήκος 79mm και πλάτος 39 (dt1-oval 45x79), 45 (dt2-oval 45x79) και 51 (dt3-oval 51x79)mm αντίστοιχα
- Μία κυκλική με $\Phi 60,7$ mm (dt4-cylindrical 60.70)
- Μία τετραγωνική 50 x 50 mm (dt5-rectangular 50x50)
- Δύο σύνθετης γεωμετρίας με μήκος 79mm και πλάτος 48 (dt6-complex 1) και 45 mm (dt7-complex 2) αντίστοιχα



Θ-4.21: Διατομές διαγώνιου σωλήνα 1 έως 7.

Ο κάθετος σωλήνας (seat tube) παραλαμβάνει το βάρος του αναβάτη και δέχεται κατά βάση τα φορτία πεταλαρίσματος. Το σχήμα του καλό είναι να κρύβει τον πίσω τροχό για αεροδυναμικούς λόγους. Για το σημείο αυτό επιλέγουμε να δοκιμάσουμε τις εξής διατομές, όπως απεικονίζονται και στην Εικόνα Θ-4.22:

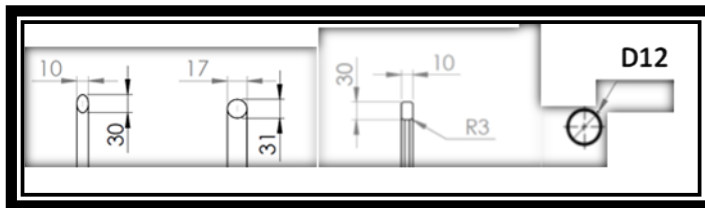
- Τέσσερις σύνθετης γεωμετρίας όπως φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα (st1-complex 1, st2-complex 2, st3-complex3, st4-complex4)
- Δύο κυκλικής διατομής με $\Phi 34.9$ (st5-cylindrical 34.9) και 53mm (st6-cylindrical 53) αντίστοιχα



Θ-4.22: Διατομές κάθετου σωλήνα 1 έως 6.

Τα πάνω ψαλίδια (seatstays) λαμβάνουν φορτίο ουσιαστικά μόνο σε λακκούβες οπότε αρκεί να αντέχουν σε αυτές. Είναι άλλο ένα σημείο όπου μπορούμε να γλυτώσουμε βάρος. Για το σημείο αυτό επιλέγουμε να δοκιμάσουμε τις εξής διατομές, όπως απεικονίζονται και στην Εικόνα Θ-4.23:

- Δύο οβάλ με διαστάσεις 10 x 30 (ss1-oval 10x30) και 17 x 31mm (ss2-oval 17x31)αντίστοιχα
- Μία ορθογωνική 10 x 30mm (ss3-rectangular 10x30)
- Μία κυκλική με $\Phi 12$ mm (ss4-cylindrical 12)

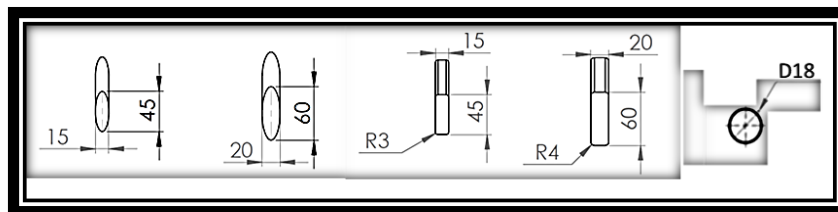


Θ-4.23: Διατομές πάνω ψαλιδιών 1 έως 4.

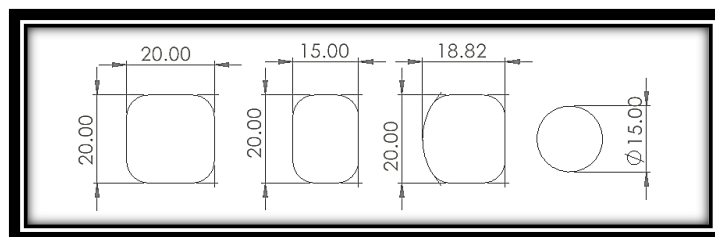
Τα κάτω ψαλίδια (chainstays) συγκρατούν τον τροχό και δέχονται σύνθετη καταπόνηση από το πεταλάρισμα. Πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτα στη μια κατεύθυνση για λόγους πεταλαρίσματος και ενδοτικά στην άλλη για λόγους άνεσης. Αλλά, ένα ομαλό σχήμα βοηθά στην ομαλοποίηση της ροής. Για το σημείο αυτό επιλέγουμε να δοκιμάσουμε τις εξής διατομές, όπως απεικονίζονται και στις Εικόνες Θ-4.24 και Θ-4.25:

- Δύο οβάλ με διαστάσεις 15 x 45 (cs1-oval 15x45)και 20 x 60mm (cs2-oval 20x60) αντίστοιχα
- Δύο ορθογωνικές 15 x 45 (cs1-rectangular 15x45) και 20 x 60mm (cs1-rectangular 20x60)αντίστοιχα
- Μία κυκλική με $\Phi 18$ mm (cs3-cylindrical 18)
- Μία σύνθετης γεωμετρίας όπου ξεκινώντας από τη μεσαία τριβή η διατομή του είναι αρχικά τετραγωνική 20 x 20mm, στη συνέχεια ορθογωνική 20 x 15mm,

μετά πομπέ στην εσωτερική μεριά 20 x 18.8mm και τέλος κυκλική με $\Phi 15\text{mm}$ (cs6-complex 15x45).



Θ-4.24: Διατομές κάτω ψαλιδιών 1 έως 5.



Θ-4.25: Διατομές κάτω ψαλιδιού 6 σε διάφορες θέσεις.

Οι δοκιμές που θα γίνουν στις διατομές είναι οι ακόλουθες: Αεροδυναμική αξιολόγηση, συμπεριφορά σε κάμψη και συμπεριφορά σε στρέψη. Ο σκοπός των στατικών δοκιμών είναι η εκτίμηση της μετατόπισης με σκοπό την εκτίμηση της δυσκαμψίας λόγω διαφορετικής γεωμετρίας. Δοκιμή σε καθαρή θλίψη δεν θα κάνουμε διότι δεν παρατηρείται.

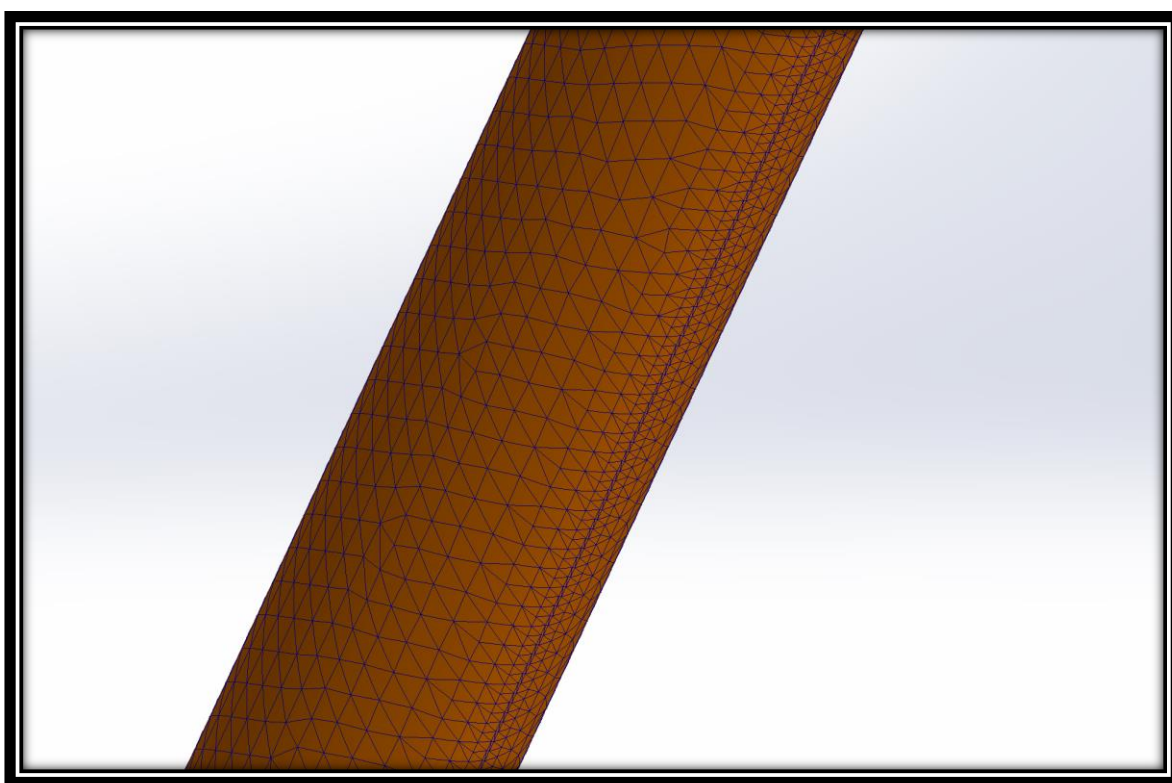
Για τις δοκιμές κάμψης και στρέψης οι σωλήνες σχεδιάζονται ως κελύφη σε κατακόρυφη διεύθυνση με το κάτω άκρο πακτωμένο και μοντελοποιούνται με το μήκος που προκύπτει από τις μετρήσεις του Bike Fitting.

Ως υλικό χρησιμοποιείται το T300 Woven με πάχος 0,23mm/στρώση σε διαστρωμάτωση $[\pm 45 / 0-90]_2$ σε όλους τους σωλήνες που αποτελεί μια τυπική Quassi ιστροπική διαστρωμάτωση και επιλέγεται λόγω ομοιόμορφης συμπεριφοράς και γρήγορων υπολογισμών. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται αναλυτικά στο παράρτημα στο τμήμα με τις ιδιότητες υλικών. Οι ιδιότητες αυτές μας δόθηκαν από την SHD composites η οποία μας προμήθευσε και τα υλικά για τη φάση της κατασκευής.

Για τη δοκιμή κάμψης χρησιμοποιείται δύναμη 250 N κάθετα στη διεύθυνση του σωλήνα στο πάνω άκρο του, ενώ για τη δοκιμή στρέψης ροπή 50 Nm στο πάνω άκρο του σωλήνα στη διεύθυνση του. Ο τρόπος φόρτισης είναι linear static.

Ο σχεδιασμός των διατομών έγινε σε Solidworks Premium. Η μοντελοποίηση έγινε σε Solidworks Simulation Premium και η αεροδυναμική αξιολόγηση σε Solidworks Flow Simulation.

Στο δομικό κομμάτι δημιουργήθηκε πλέγμα του οποίου τα στοιχεία μεταβάλλονται σε μέγεθος ανάλογα με την καμπυλότητα της διατομής και έχει στοιχεία από 1,5mm μέχρι 5mm και μεταβολή μέχρι 40% από στοιχείο σε στοιχείο (το συγκεκριμένο λογισμικό δημιουργεί αυτόματα το πλέγμα και δεν μας δίνει δυνατότητα για άλλες επιλογές). Παρακάτω φαίνεται ενδεικτική εικόνα από το πλέγμα στο downtube με σχήμα οβάλ 39 X 79 mm.



Θ-4.26: Πλέγμα στο downtube.

Ακολουθεί ενδεικτική φωτογραφία από τη δοκιμή κάμψης στην ίδια διατομή.

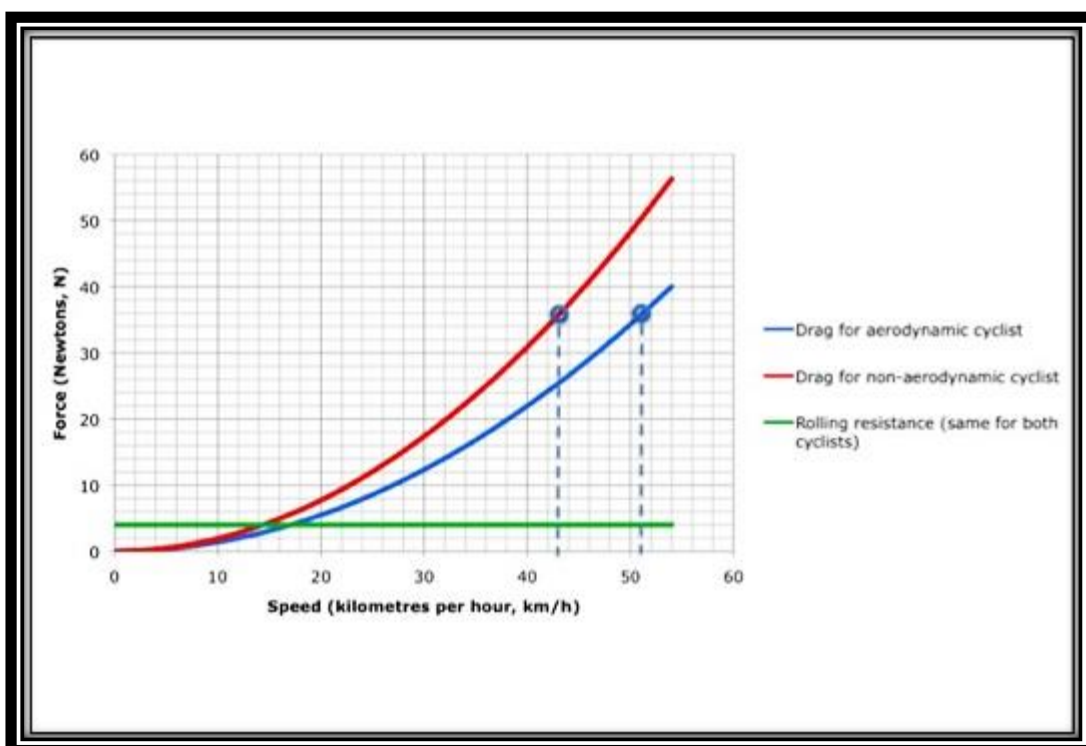


Θ-4.27: Αποτελέσματα δοκιμής στο downtube.

Ο τρόπος που γίνεται η αεροδυναμική μελέτη αναλύεται παρακάτω.

4.6 Αεροδυναμική συμπεριφορά.

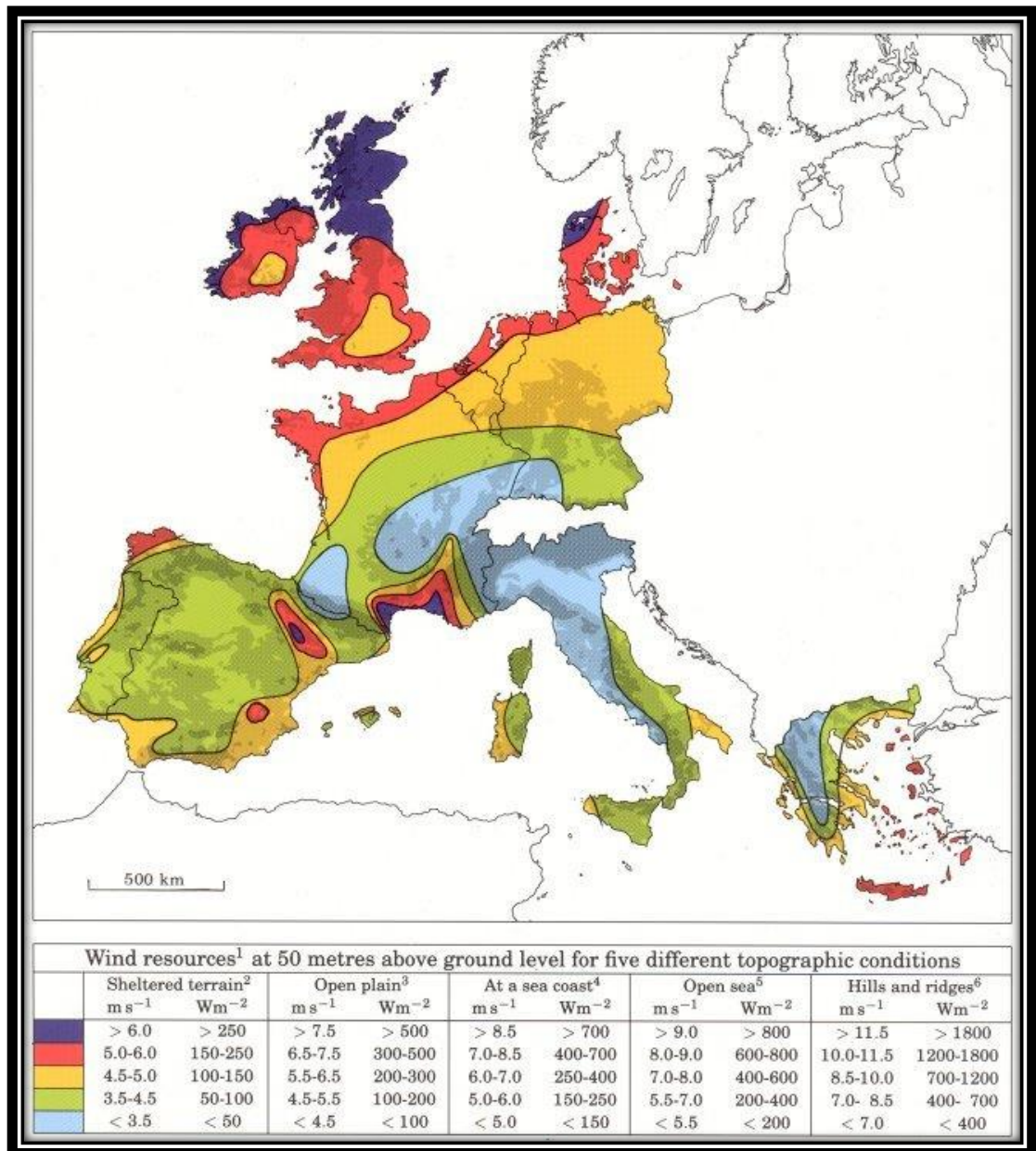
Η αεροδυναμική είναι πολύ σημαντική στην αγωνιστική ποδηλασία δρόμου. Ειδικά σε υψηλές ταχύτητες και σε επίπεδες διαδρομές αποτελεί πάνω από το 80% του συνόλου [4.11][4.15] όπως φαίνεται στην Εικόνα Θ-4.28. Χαρακτηριστική είναι και η διαφορά στη συνολική αντίσταση αν ο αναβάτης είναι με ή χωρίς αεροδυναμικά βοηθήματα.



Θ-4.28: Σύγκριση οπισθέλκουσας αεροδυναμικού και μη αεροδυναμικού ποδηλάτη σε σχέση με την ταχύτητα κίνησης.

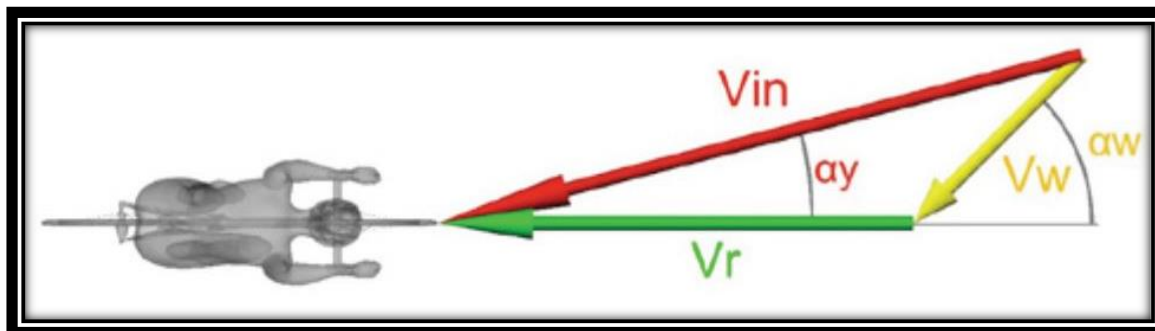
Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την αεροδυναμική συμπεριφορά πρέπει να αποφασίσουμε σε τι συνθήκες μας ενδιαφέρει να αποδίδει καλά το ποδήλατο. Σίγουρα ο σκελετός είναι μόνο ένα τμήμα του συνόλου αναβάτη - ποδηλάτου αλλά είναι πολύ σημαντικό διότι καθορίζει τη στάση του σώματος το οποίο αποτελεί τον πιο βασικό παράγοντα αντίστασης και δεύτερον «φτιάχνει ή χαλάει» τη ροή για τα εξαρτήματα που ακολουθούν. Με τις καιρικές συνθήκες να μεταβάλλονται και την ταχύτητα μεταξύ διαφορετικών αναβατών να ποικίλει σημαντικά δεν υπάρχει τέλεια λύση για όλες τις

συνθήκες. Μπορούμε όμως να κάνουμε μια καλή προσέγγιση άμα μελετήσουμε τα στατιστικά του καιρού [4.16] και επιλέξουμε συγκεκριμένες συνθήκες και ταχύτητες αναβάτη. Αυτά θα είναι για εμάς τα σημεία ελέγχου τα οποία είναι σημαντικά για εμάς και σε αυτά θα κάνουμε τη βελτιστοποίηση. Τα ίδια σημεία θα χρησιμοποιήσουμε και στο τελικό μοντέλο. Στην Εικόνα Θ-4.29 βλέπουμε στατιστικά στοιχεία για τον άνεμο στην Ευρώπη. Τα δεδομένα αυτά αν αναχθούν σε επίπεδο εδάφους σύμφωνα με τον οδηγό Wind atlas τότε έχουμε και τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε.



Θ-4.29: Χάρτης ανέμων Ευρώπης.

Επίσης ένα εξίσου σημαντικό στοιχείο είναι η κατεύθυνση του ανέμου κατά τη διάρκεια κίνησης του ποδηλάτη η οποία αλλάζει είτε λόγω του ότι μεταβλήθηκε ο άνεμος είτε λόγω του ότι έστριψε ο αναβάτης.



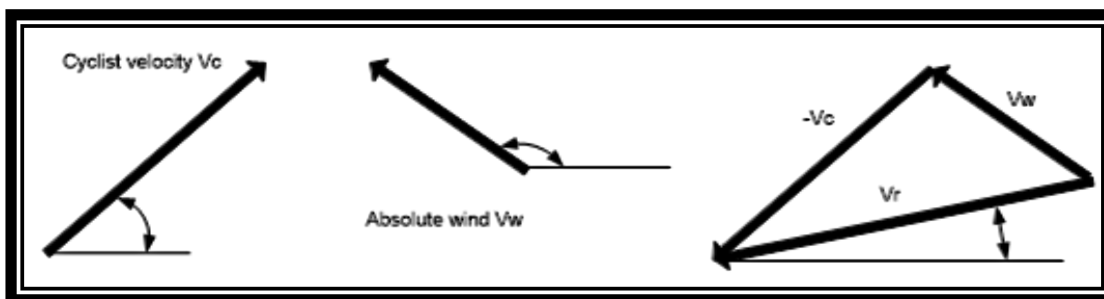
Θ-4.30: Συνισταμένη ταχύτητα κατά την κίνηση του ποδηλάτου.

Θέτοντας v_c την ταχύτητα του ποδηλάτου (προς ένα ακίνητο παρατηρητή), v_w τη ταχύτητα του απόλυτου αέρα (επίσης σε σχέση με ένα ακίνητο παρατηρητή), τότε η ταχύτητα του σχετικού αέρα v_r (ταχύτητα και κατεύθυνση αέρα όπως την αισθάνεται ο ποδηλάτης) δίνεται από τη σχέση:

$$v_r = v_w - v_c$$

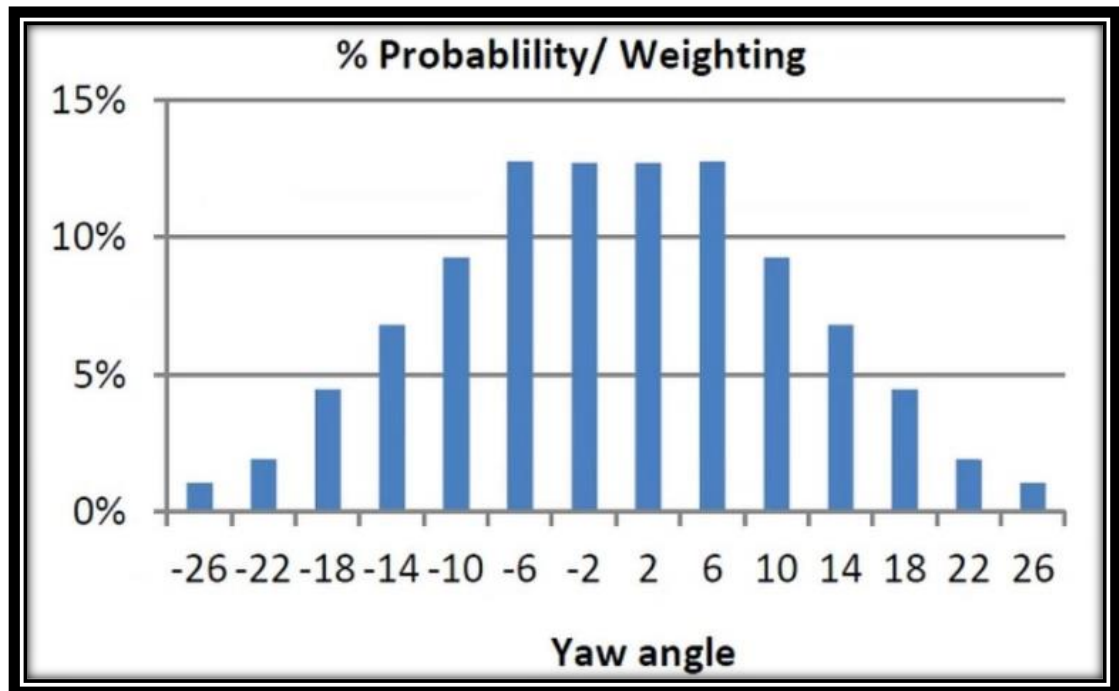
Θέτοντας a_c την κατεύθυνση του ποδηλάτου (ως προς ένα ακίνητο παρατηρητή) και a_w την κατεύθυνση του απόλυτου αέρα (ως προς τον ακίνητο παρατηρητή), τότε η κατεύθυνση του σχετικού αέρα a_r (η κατεύθυνση του αέρα όπως την αισθάνεται ο ποδηλάτης) θα είναι:

$$a_r = a_w + a_c + 180$$



Θ-4.31: Γωνία σχετικού αέρα.

Η πιθανότητα να έχει κάποια γωνία ο άνεμος φαίνεται στην Εικόνα Θ-4.29.



Θ-4.32: Διάγραμμα πιθανοτήτων της γωνίας σχετικού αέρα.

Με βάση τα παραπάνω αποφασίζουμε να διαλέξουμε και να δώσουμε έμφαση στα παρακάτω σημεία λειτουργίας:

Πίνακας 4.1: Σημεία λειτουργίας και οι βαρύτητές τους.

	Ταχύτητα αναβάτη (km/h)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Γωνία ανέμου (deg)	Βαρύτητα (%)	Drag (%)	Side force (%)
Σημείο λειτουργίας 1	45	0	0	10	85	15
Σημείο λειτουργίας 2	32	18	12	20	85	15
Σημείο λειτουργίας 3	32	18	7	35	85	15
Σημείο λειτουργίας 4	32	18	2	35	85	15

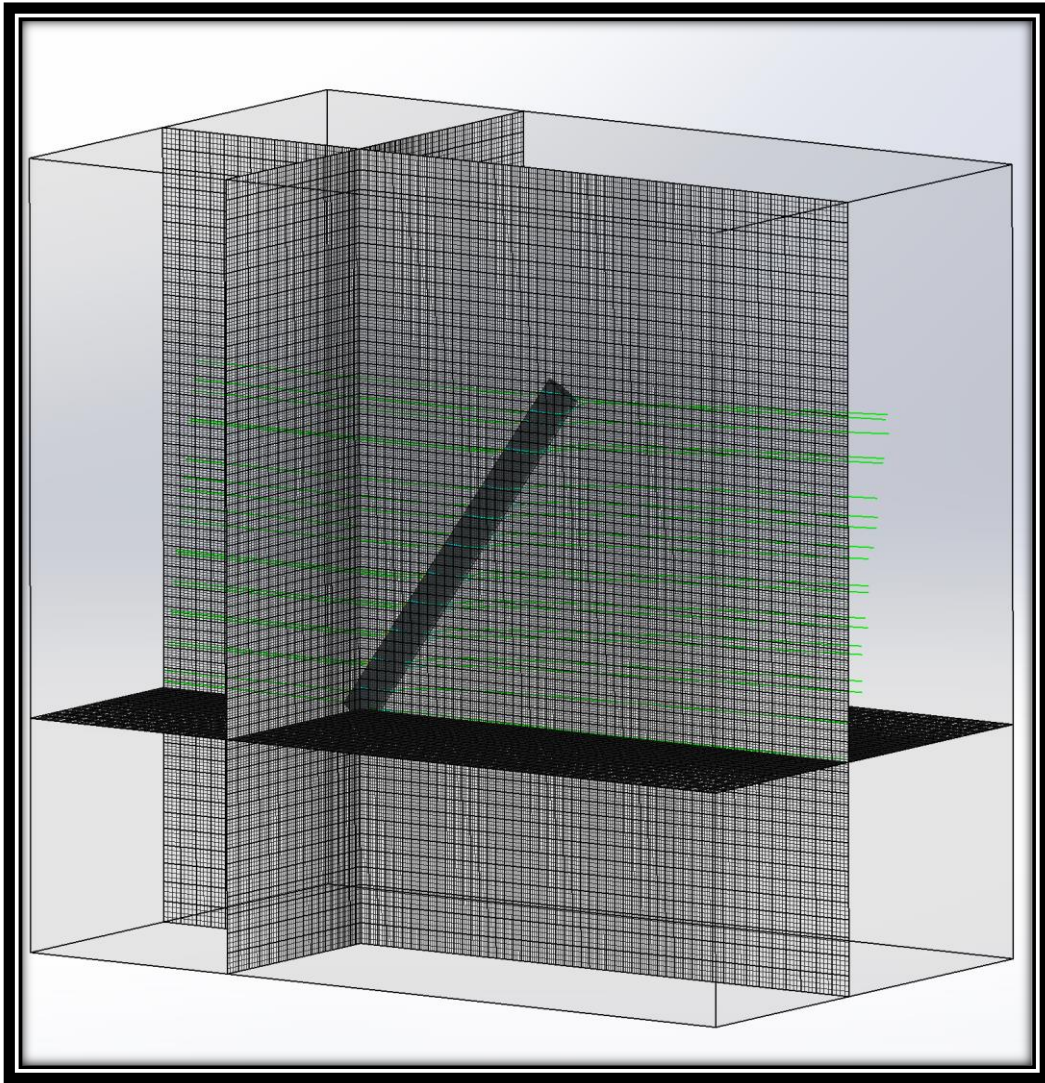
Η οπισθέλκουσα (drag) δίνει ουσιαστικά την ανθιστάμενη κατά την κίνηση του ποδηλάτη δύναμη ενώ η πλευρική δύναμη επηρεάζει την ευστάθειά του και την αίσθηση ασφάλειας κατά την οδήγηση. Και οι δύο δυνάμεις είναι σημαντικές, ωστόσο

στην αγωνιστική ποδηλασία είναι πιο κρίσιμη η μείωση της οπισθέλκουσας. Στη δική μας μελέτη επιλέγουμε σε κάθε σημείο λειτουργίας να υπολογίζεται μία συνολική δύναμη για κάθε σχέδιο σωλήνα που αποτελείται από το 85% του drag και το 15% του side force.

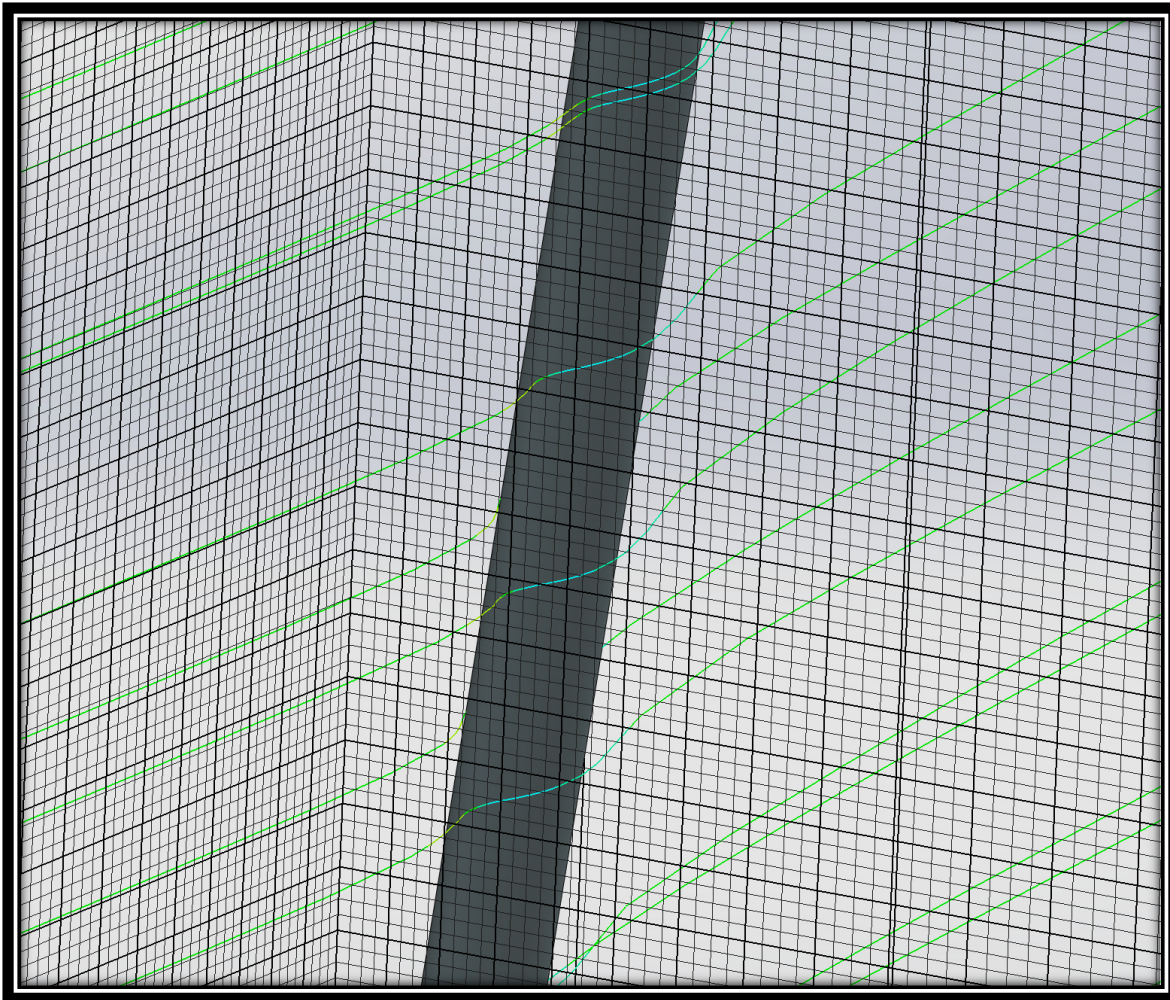
Το πρώτο σημείο λειτουργίας αντιπροσωπεύει την κίνηση του ποδηλάτη με 45km/h σε κατάσταση άπνοιας. Στα υπόλοιπα σημεία λειτουργίας εισάγεται και η ταχύτητα του αέρα. Από το χάρτη του Wind Atlas στην εικόνα Θ-4.29 παρατηρούμε ότι στην Ελλάδα ένας από τους πιο συχνούς ανέμους είναι μεταξύ 3 και 4 Beaufort. Έτσι επιλέγουμε σαν ταχύτητα ανέμου στα σημεία λειτουργίας 2, 3 και 4 τα 18 km/h που είναι κοντά στο πάνω όριο των 3 Beaufort (12 – 19 km/h). Κατά τη διάρκεια αγώνα ποδηλασίας δρόμου, ένας ποδηλάτης μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα 50 km/h. Έτσι στα σενάρια 2, 3 και 4 επιλέγεται σαν ταχύτητα του αναβάτη τα 32 km/h. Από τον πίνακα που φαίνεται στην Εικόνα Θ-4.29, είναι λογική η επιλογή των 2, 7 και 12 μοιρών ως γωνίες ανέμου.

Οι βαρύτητες που αποδίδονται σε κάθε σημείο λειτουργίας σχετίζονται με τη πιθανότητα ενός τέτοιου σεναρίου να προκύψει κατά την οδήγηση. Οι γωνίες ανέμου 2 και 7 μοίρες από τον πίνακα της Εικόνας Θ-4.32 έχουν περίπου ίδια πιθανότητα, ενώ οι 12 μοίρες έχουν κάτι παραπάνω από τη μισή. Σε σχέση με τα σενάρια 2, 3 και 4, το σενάριο 1 της άπνοιας έχει μικρότερη πιθανότητα να συμβεί κατά την οδήγηση. Έτσι προκύπτουν 10 % βαρύτητα για το σενάριο 1 της άπνοιας, 20% για το σενάριο 2 των 12 μοιρών και από 35% για τα σενάρια 3 και 4 των 7 και 2 μοιρών αντίστοιχα.

Για την αεροδυναμική μοντελοποίηση δημιουργήθηκε χωρίο 17m μήκος, 10m πλάτος και 5m ύψος. Το προς εξέταση δοκίμιο τοποθετήθηκε 5 μέτρα από την άκρη της μεγάλης πλευράς, στη μέση της σε ότι αφορά το πλάτος και στην αναμενόμενη θέση που θα είχε από τον δρόμο λόγω της θέσης του στο ποδήλατο. Το πλέγμα είναι δομημένο και τα στοιχεία του κύβοι οι οποίοι στα άκρα του χωρίου από 100mm x 100mm x 100mm και όσο πλησιάζουμε στο αντικείμενο κάθε κύβος διαιρείται 5 φορές σε κάθε πλευρά όπως φαίνεται στις ενδεικτικές φωτογραφίες που ακολουθούν. Αυτό γίνεται αρκετές φορές μέχρι τη στιγμή που το ελάχιστο στοιχείο θα είναι 1mm. Το λογισμικό χρησιμοποιεί μοντέλο τύρβης Modified k-e.



Θ-4.33: Δομημένο πλέγμα για το downtube.



Θ-4.34: Αποτελέσματα και γραμμές ροής για το downtube.

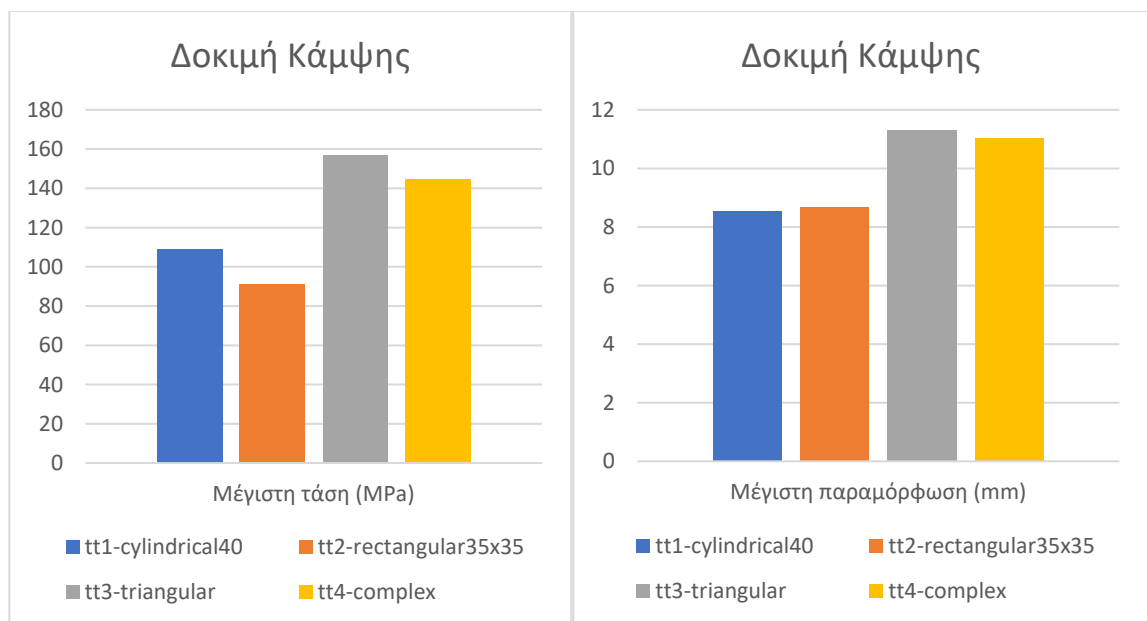
4.7 Αποτελέσματα αεροδυναμικών, καμπτικών και στρεπτικών δοκιμών και αξιολόγηση των σωλήνων.

Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, για κάθε σωλήνα του πλαισίου σχεδιάστηκαν και αναλύθηκαν διάφορες διατομές σε κάμψη, στρέψη και αεροδυναμικά φορτία. Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής παρουσιάζονται για κάθε τμήμα του σκελετού και στη συνέχεια αξιολογούνται έτσι ώστε να επιλεγθεί η κατάλληλη.

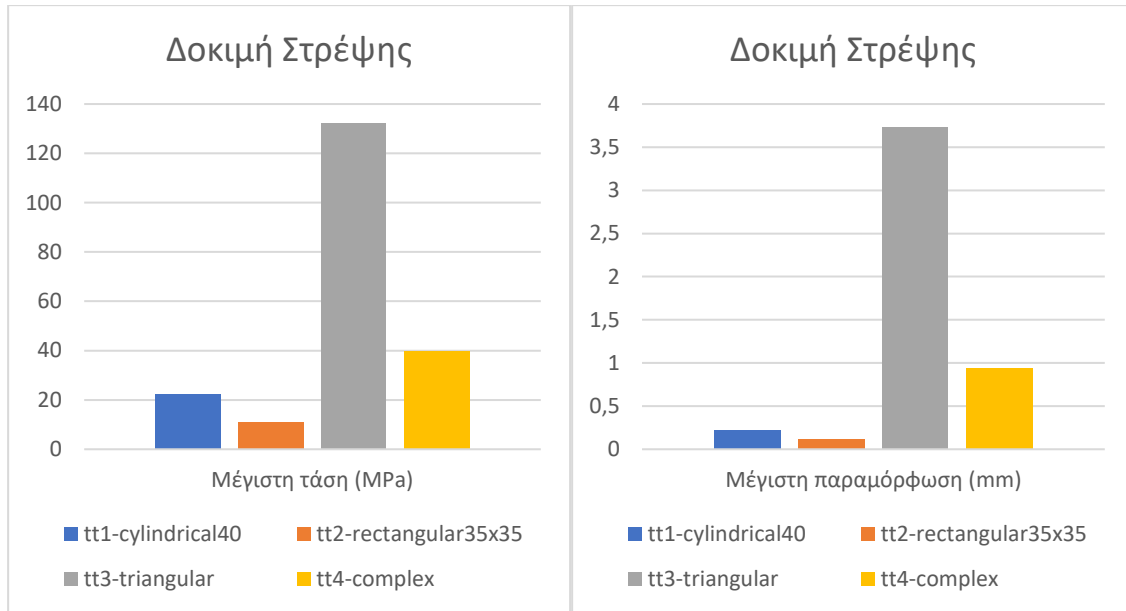
4.7.1 Οριζόντιος σωλήνας (Top tube)

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα καμπτικών και στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του top tube

Top tube	Κάμψη		Στρέψη	
	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)
tt1-cylindrical40	108.7	8.56	22.4	0.22
tt2-rectangular35x35	91.2	8.68	11.2	0.11
tt3-triangular	157	11.3	132.3	3.731
tt4-complex	144.7	11.03	39.73	0.936



Θ-4.35: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές του top tube.

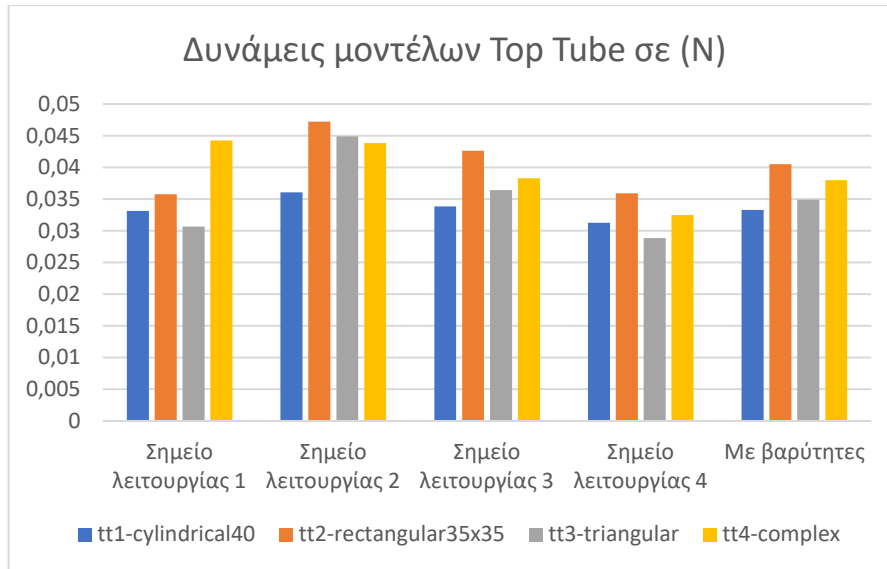


Θ-4.36: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του top tube.

Από τον Πίνακα 4.2 και τα γραφήματα των αποτελεσμάτων των στατικών δοκιμών, είναι φανερό ότι την καλύτερη συμπεριφορά εμφανίζει το δεύτερο μοντέλο με ορθογωνική διατομή 35 x 35mm. Παρουσιάζει τις χαμηλότερες μέγιστες τάσεις τόσο σε κάμψη όσο και σε στρέψη, ενώ έχει τη μικρότερη παραμόρφωση σε στρέψη και τη δεύτερη μικρότερη σε κάμψη. Η αμέσως επόμενη σε συμπεριφορά διατομή είναι η πρώτη, που έχει κυκλική διατομή Φ40. Έχει τη μικρότερη παραμόρφωση σε κάμψη, ενώ στα υπόλοιπα γραφήματα είναι η δεύτερη καλύτερη με μικρή διαφορά από την ορθογωνική 35 x 35 mm.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα αεροδυναμικών δοκιμών των διατομών του top tube.

Top Tube	Σημείο λειτουργίας 1	Σημείο λειτουργίας 2	Σημείο λειτουργίας 3	Σημείο λειτουργίας 4	Με βαρύτητας
tt1-cylindrical40	0.03315	0.03605	0.03385	0.03125	0.03331
tt2-rectangular35x35	0.035775	0.0472	0.04265	0.0359	0.04051
tt3-triangular	0.03066	0.0449	0.0364	0.02885	0.0348835
tt4-complex	0.04423	0.04385	0.0383	0.0325	0.037973



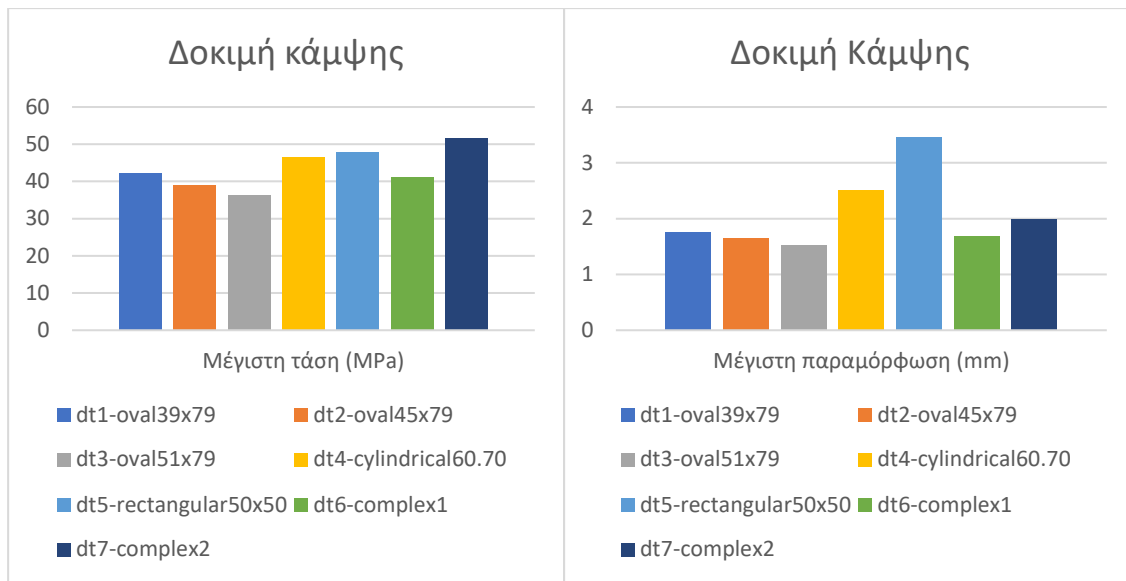
Θ-4.37: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές του top tube στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.

Από τον Πίνακα 4.3 και την Εικόνα Θ-4.32, οι δύο διατομές με την καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά στα τέσσερα σημεία λειτουργίας αλλά και συνολικά είναι η πρώτη (κυκλική με Φ40) και η τρίτη (τριγωνική). Συγκρίνοντας και τη στατική συμπεριφορά τους, επιλέγουμε ως διατομή του άνω σωλήνα την κυκλική Φ40 λόγω της καλύτερης αεροδυναμικής συμπεριφοράς και μικρών φορτίων και παραμορφώσεων.

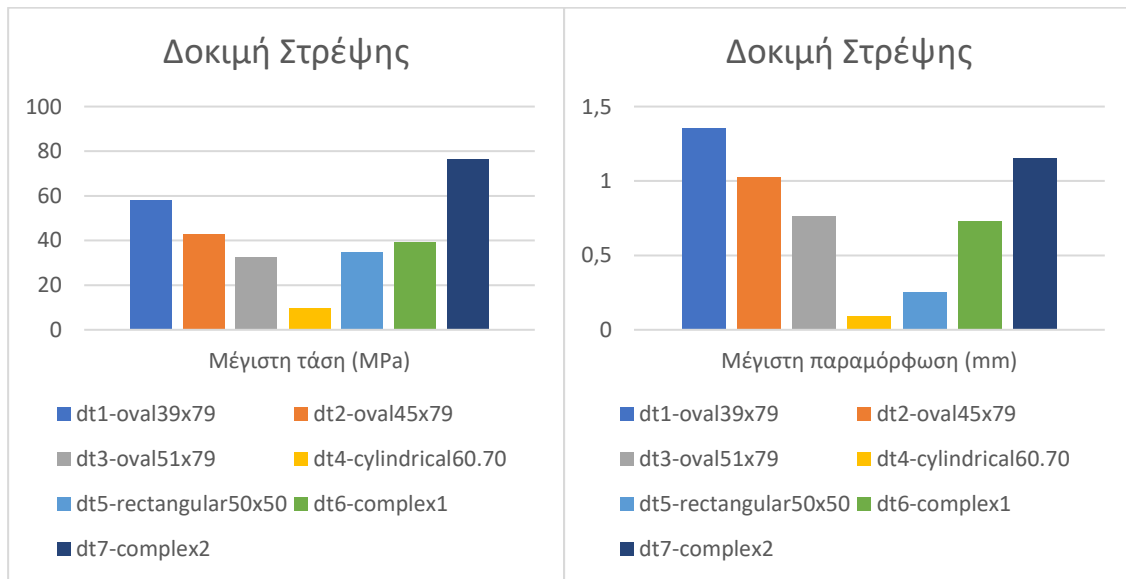
4.7.2 Down Tube

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα καμπτικών και στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του down tube

Down tube	Κάμψη		Στρέψη	
	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)
dt1-oval39x79	42.14	1.76	57.92	1.35
dt2-oval45x79	39.01	1.64	42.86	1.024
dt3-oval51x79	36.41	1.53	32.29	0.76
dt4-cylindrical60.70	46.36	2.5	9.63	0.09
dt5-rectangular50x50	47.84	3.46	34.77	0.25
dt6-complex1	41.2	1.68	39.15	0.73
dt7-complex2	51.54	2	76.3	1.15



Θ-4.38: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές του down tube.

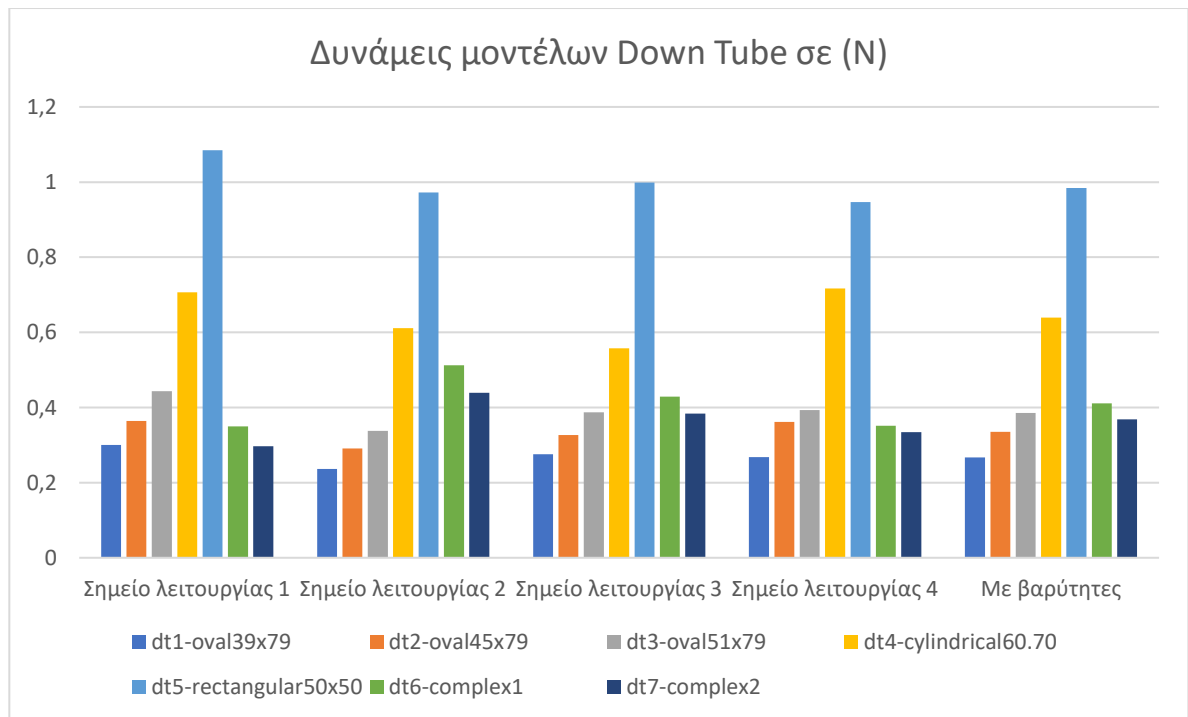


Θ-4.39: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του down tube.

Από τα γραφήματα των αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης προκύπτει ότι την καλύτερη συμπεριφορά σε κάμψη εμφανίζει η τρίτη διατομή (οβάλ 51 x 79), ενώ σε στρέψη η τέταρτη (κυκλική Φ60.7).

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα αεροδυναμικών δοκιμών των διατομών του down tube.

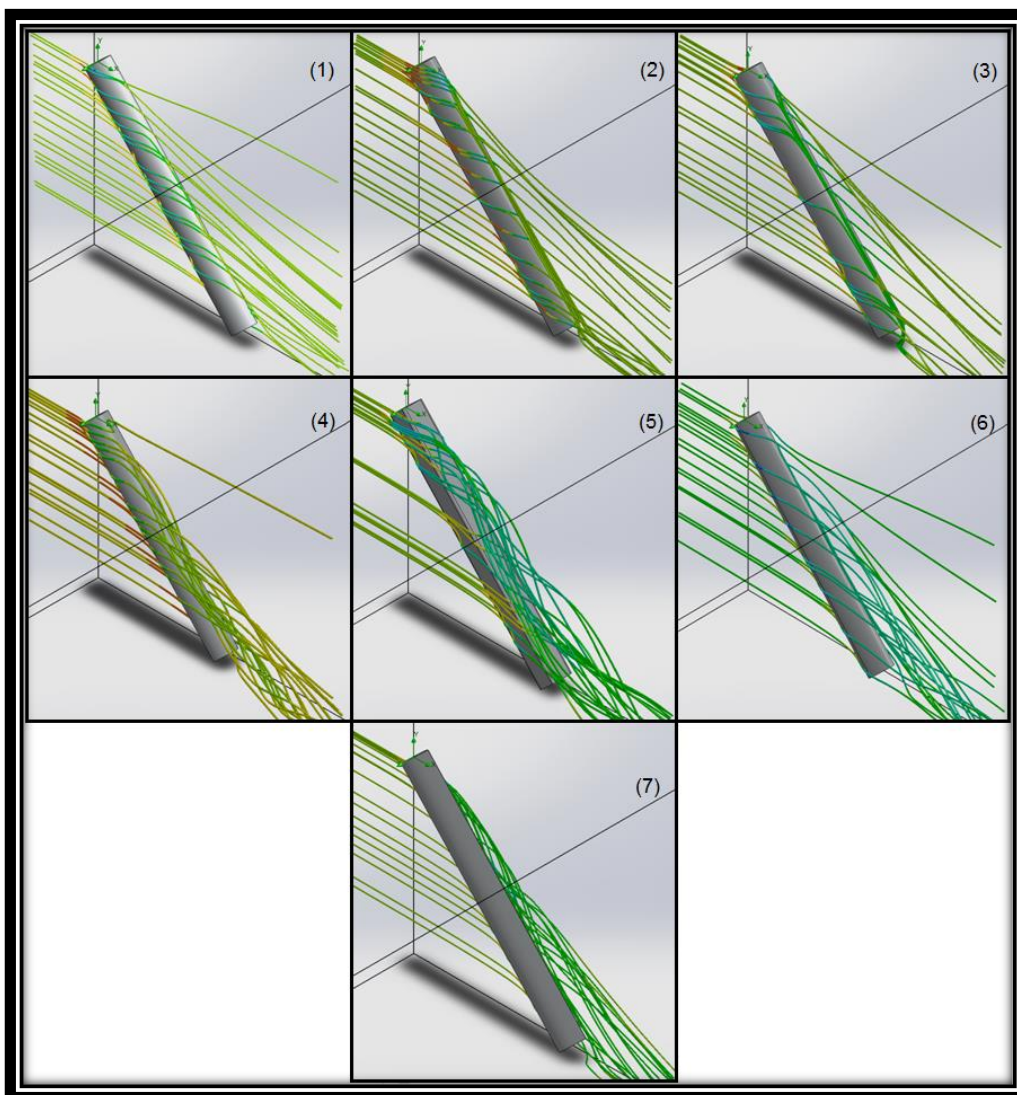
Down Tube	Σημείο λειτουργίας 1	Σημείο λειτουργίας 2	Σημείο λειτουργίας 3	Σημείο λειτουργίας 4	Με βαρύτητες
dt1-oval39x79	0.3004	0.23635	0.2754	0.26765	0.2673775
dt2-oval45x79	0.36445	0.29115	0.32655	0.36175	0.33558
dt3-oval51x79	0.44345	0.3381	0.38755	0.39285	0.385105
dt4-cylindrical60.70	0.7068	0.6109	0.5579	0.71705	0.6390925
dt5-rectangular50x50	1.08465	0.972	0.99895	0.9469	0.9839125
dt6-complex1	0.35	0.512	0.42925	0.3518	0.4107675
dt7-complex2	0.29715	0.4388	0.3837	0.3342	0.36874



Θ-4.40: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές του down tube στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.

Από το γράφημα των αποτελεσμάτων των αεροδυναμικών δοκιμών για τις διατομές του down tube παρατηρούμε ότι οι τρεις οβάλ διατομές και οι δύο σύνθετες έχουν σχετικά κοντινή συμπεριφορά, με καλύτερη αυτή της πρώτης (οβάλ 39 x 79).

Ο κάτω σωλήνας και το κούτελο είναι τα τμήματα του πλαισίου που έρχονται πρώτα σε επαφή με το μέτωπο του αέρα. Συνεπώς, καθορίζουν τη μορφή της ροής του αέρα γύρω από όλα τα υπόλοιπα τμήματα του σκελετού. Για το λόγο αυτό, μελετήθηκαν οι γραμμές ροής που δημιουργούνται κατά την ανάλυση και αυτές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Θ-4.41: Γραμμές ροής Διατομών 1-7 down tube.

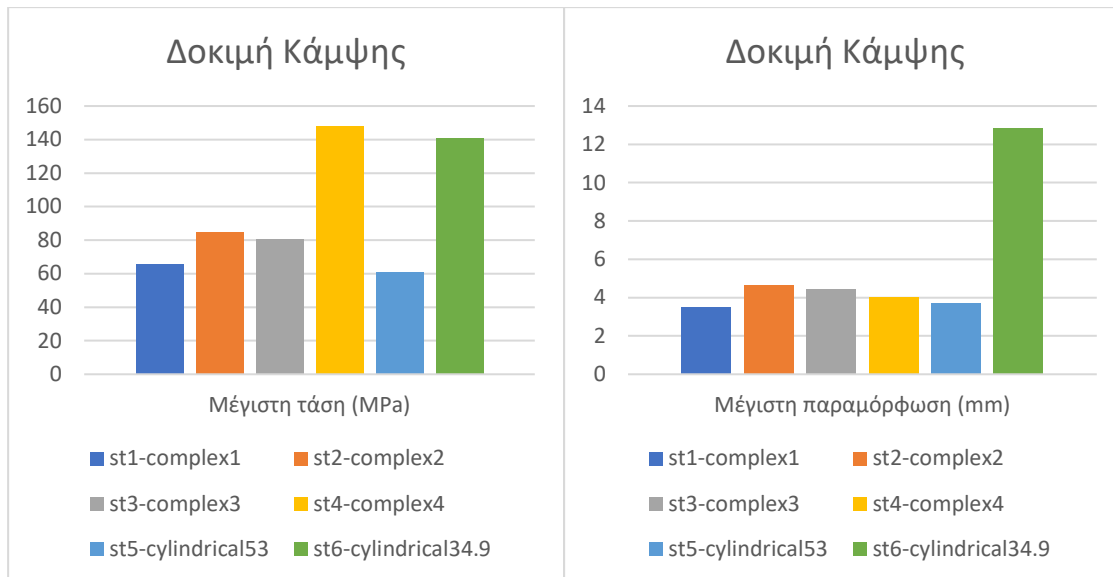
Σε αυτήν τη φάση αναζητήθηκε ο σωλήνας που, εκτός από μικρά αεροδυναμικά φορτία, δίνει την ομαλότερη ροή και δεν δημιουργεί έντονη τυρβώδη ροή. Επιπλέον, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο κάτω μέρος του κάτω σωλήνα, όπου αποκόλληση της ροής στο σημείο αυτό μπορεί να δημιουργήσει επιπλέον αντίσταση, δεδομένου ότι εκεί κινούνται τα πόδια του ποδηλάτη και η πεταλιέρα.

Είναι εμφανές από την παραπάνω εικόνα ότι η ροή είναι πιο γραμμική και με λιγότερες διαταραχές γύρω από τις οβάλ διατομές. Έτσι, σε συνδυασμό και με τα αποτελέσματα των στατικών και αεροδυναμικών προσομοιώσεων, συμπεραίνεται ότι για την περίπτωση του κάτω σωλήνα οι οβάλ διατομές είναι πιο κατάλληλες. Η πρώτη οβάλ διατομή εμφανίζει μεγάλη παραμόρφωση, καλά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και μικρή μάζα. Αντίστοιχα, η τρίτη οβάλ διατομή έχει μεγαλύτερη μάζα, καθώς είναι πιο ογκώδης, χειρότερα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και μικρή μέγιστη παραμόρφωση, ενώ η δεύτερη έχει ενδιαμέση συμπεριφορά. Συνεπώς, ως κατάλληλη διατομή για τον κάτω σωλήνα κρίνεται ένας συνδυασμός των οβάλ διατομών, με σκοπό την επίτευξη καλής αεροδυναμικής συμπεριφοράς στο χαμηλότερο δυνατό βάρος και με την απαραίτητη δυσκαμψία.

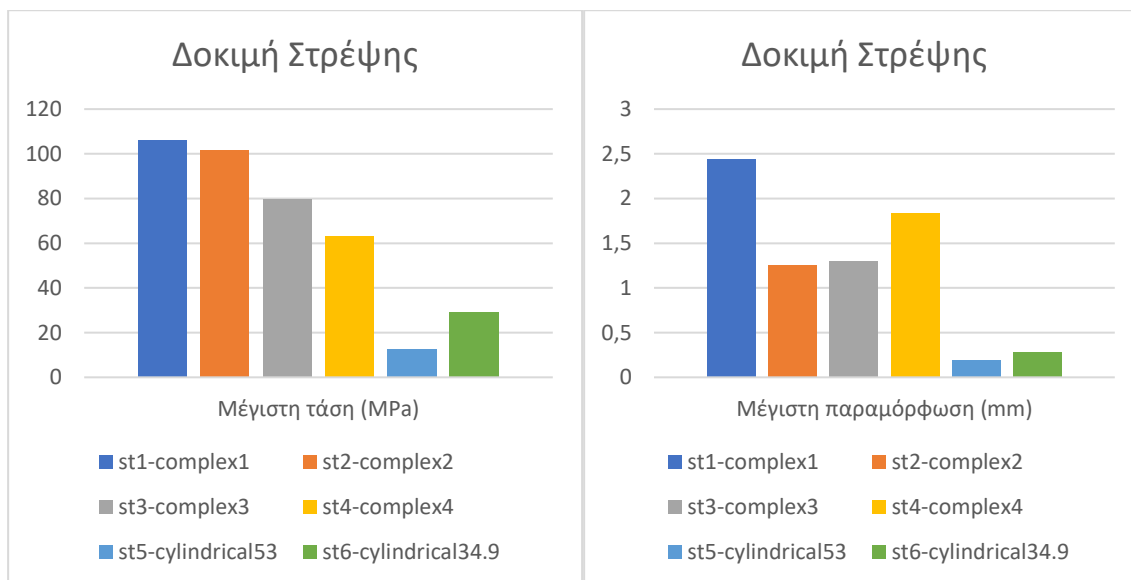
4.7.3 Seat Tube

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα καμπτικών και στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του seat tube

Seat tube	Κάμψη		Στρέψη	
	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)
st1-complex1	65.74	3.51	106.15	2.4385
st2-complex2	85.03	4.66	101.5	1.25
st3-complex3	80.69	4.44	79.85	1.3
st4-complex4	147.8	4.04	63.38	1.83
st5-cylindrical53	61.11	3.72	12.63	0.19
st6-cylindrical34.9	141.1	12.84	29.12	0.28



Θ-4.42: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές του seat tube

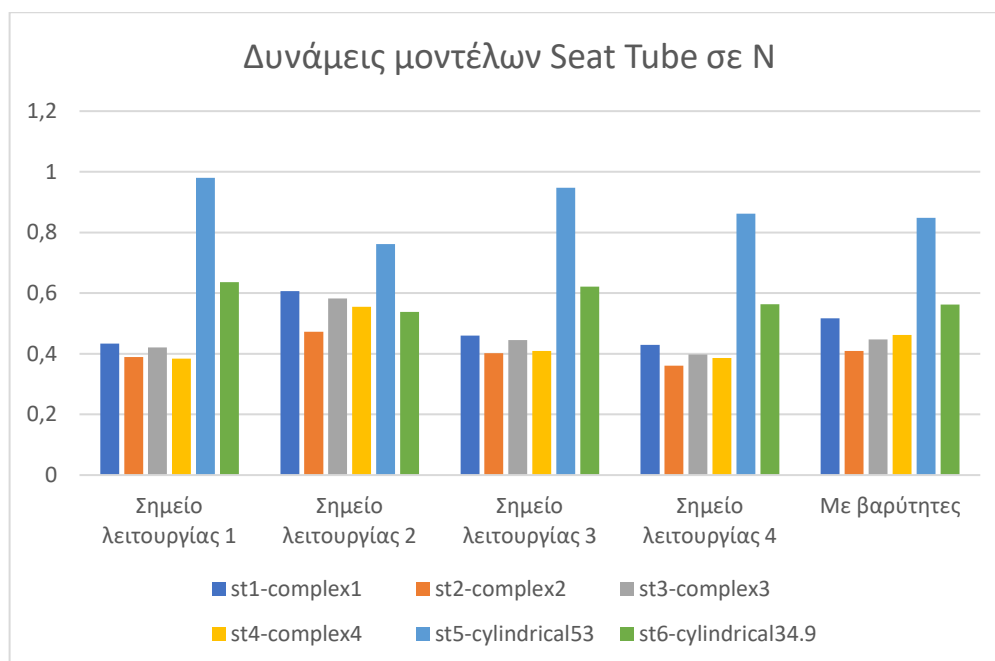


Θ-4.43: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές του seat tube.

Ο σωλήνας σέλλας ή αλλιώς seat tube δέχεται κυρίως καμπτικά φορτία κατά την οδήγηση. Συνεπώς, δίνουμε περισσότερη έμφαση στη δοκιμή κάμψης και ειδικά στη μέγιστη μετατόπιση, όπου την καλύτερη συμπεριφορά εμφανίζει η πρώτη σύνθετη διατομή (st1-complex1).

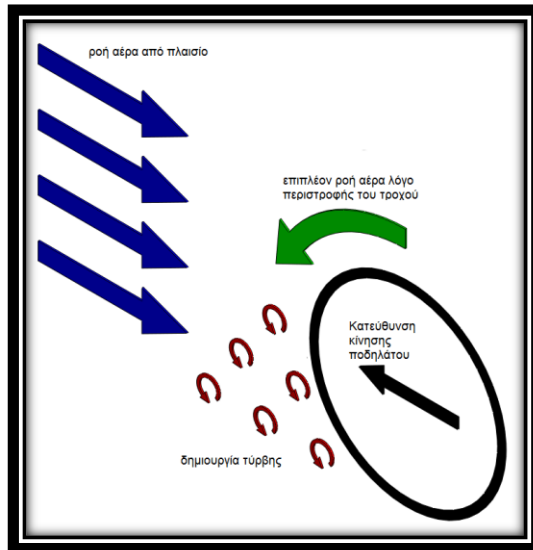
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα αεροδυναμικών δοκιμών των διατομών του seat tube.

Seat Tube	Σημείο λειτουργίας 1	Σημείο λειτουργίας 2	Σημείο λειτουργίας 3	Σημείο λειτουργίας 4	Με βαρύτητες
st1-complex1	0.4334	0.6068	0.45941	0.4289	0.5172025
st2-complex2	0.3891	0.47235	0.4015875	0.3603	0.4091275
st3-complex3	0.42087	0.58235	0.445092	0.39725	0.4469395
st4-complex4	0.38395	0.55445	0.409525	0.38555	0.4618175
st5-cylindrical53	0.98025	0.76175	0.947475	0.86165	0.84842
st6-cylindrical34.9	0.63655	0.5375	0.6216925	0.5629	0.5621575



Θ-4.44: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές του seat tube στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.

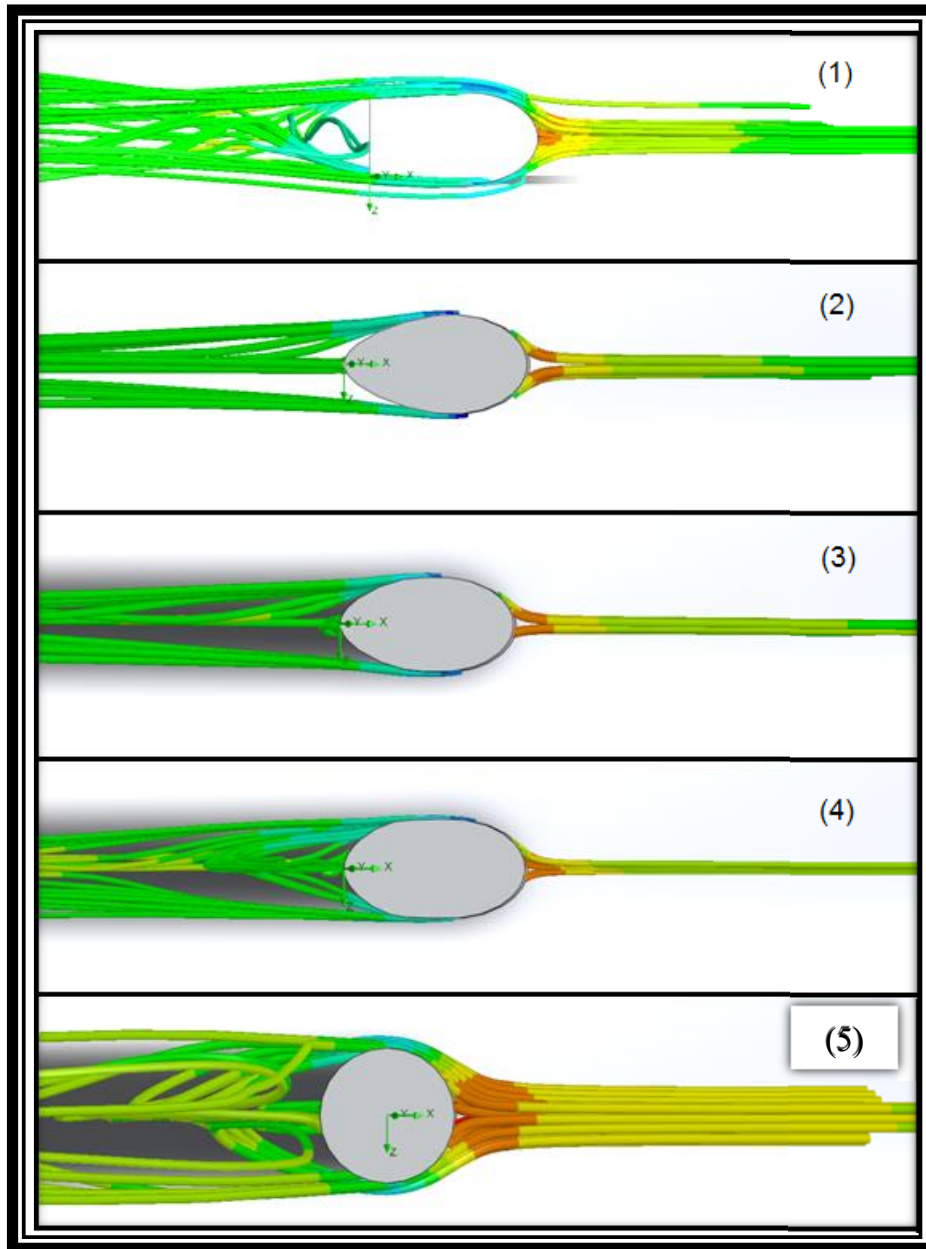
Σε αυτό το σημείο εξετάστηκαν οι γραμμές ροής του αέρα γύρω από τα διάφορα μοντέλα. Ζητούμενο είναι η μείωση της τάσης δημιουργίας τυρβώδους ροής στο κενό μεταξύ του πίσω μέρους του σωλήνα και του κινούμενου πίσω τροχού. Η δημιουργία αναταραχών της ροής αυξάνεται καθώς ο τροχός περιστρέφεται και δημιουργεί ένα ρεύμα αέρα που προσπίπτει στο πίσω μέρος του σωλήνα σέλλας.



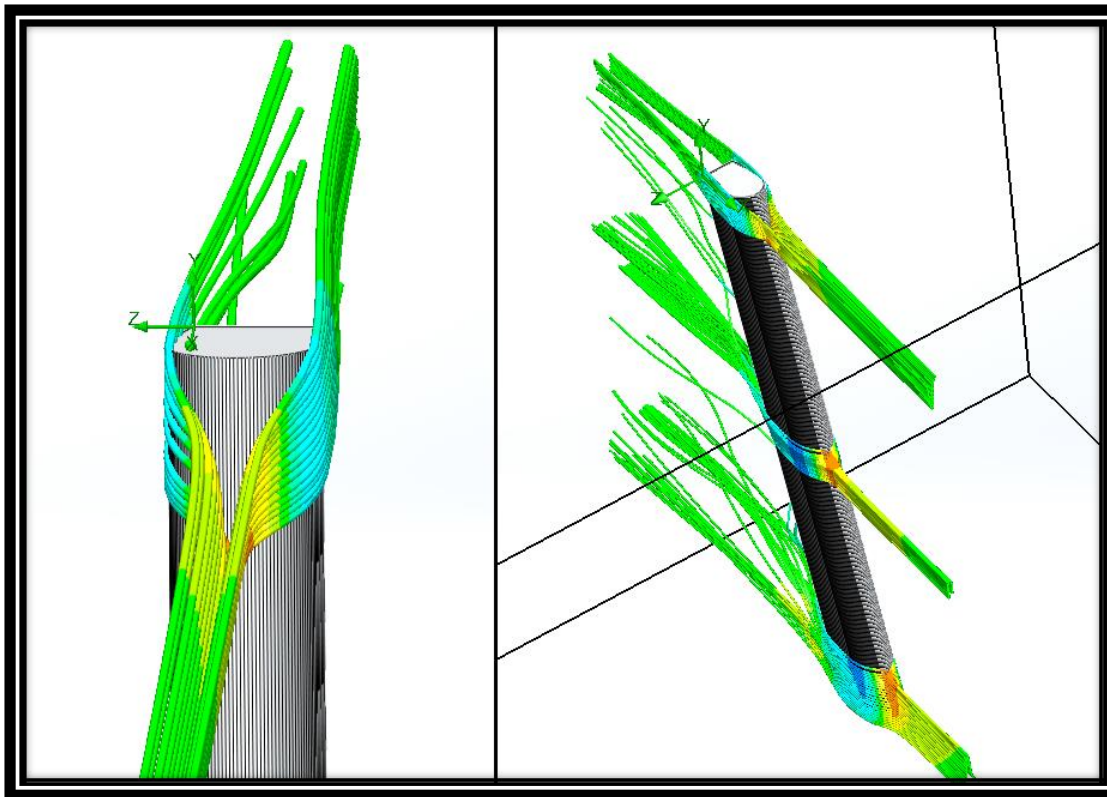
Θ-4.45: Δημιουργία τύρβης στο κενό μεταξύ σωλήνα σέλλας και πίσω τροχού.

Στα περισσότερα αγωνιστικά πλαίσια το κενό μεταξύ σωλήνα σέλλας και πίσω τροχού είναι πολύ μικρό έτσι ώστε να «κρύβεται» ένα μέρος του τροχού και να αποφεύγεται η μεγάλη ανάπτυξη τύρβης στο σημείο αυτό.

Παρατηρώντας τις γραμμές ροής γύρω από κάθε μοντέλο σωλήνα, είναι εμφανές ότι ο σωλήνας σύνθετης διατομής 1 χωρίζει τη ροή του αέρα σε δύο κομμάτια αριστερά και δεξιά από τον πίσω τροχό, ενώ οι υπόλοιποι διοχετεύουν τον αέρα κατευθείαν πάνω του. Επιπλέον, ο τροχός μπορεί να πλησιάσει περισσότερο το πίσω μέρος του σωλήνα 1, όπου εμφανίζεται μια περιοχή χαμηλής πίεσης. Ο σχεδιασμός αυτός του σωλήνα σύνθετης διατομής 1 ομαλοποιεί τη ροή του αέρα στο ελαστικό του πίσω τροχού, καθώς μειώνει την υψηλή πίεση που αντιμετωπίζει συνήθως η μπροστινή αιχμή του τροχού. Αντίστοιχα, ο τροχός «γεμίζει» το κενό της ροής, με αποτέλεσμα την μείωση της χαμηλής πίεσης στο σημείο αυτό. Με αυτούς τους τρόπους επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση της συνολικής αεροδυναμικής αντίστασης. Γι' αυτόν τον λόγο επιλέγεται ως διατομή του σωλήνα σέλλας η σύνθετη διατομή 1.



Θ-4.46: Γραμμές ροής σε κάθε μοντέλο του σωλήνα seat tube.

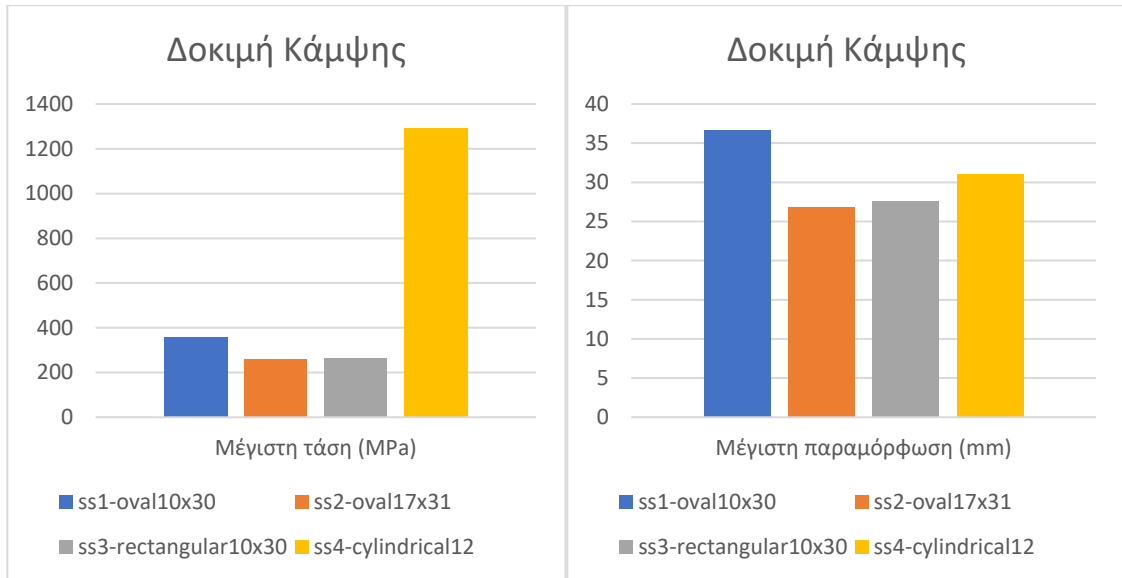


Θ-4.47: Γραμμές ροής γύρω από την πρώτη διατομή του σωλήνα seat tube.

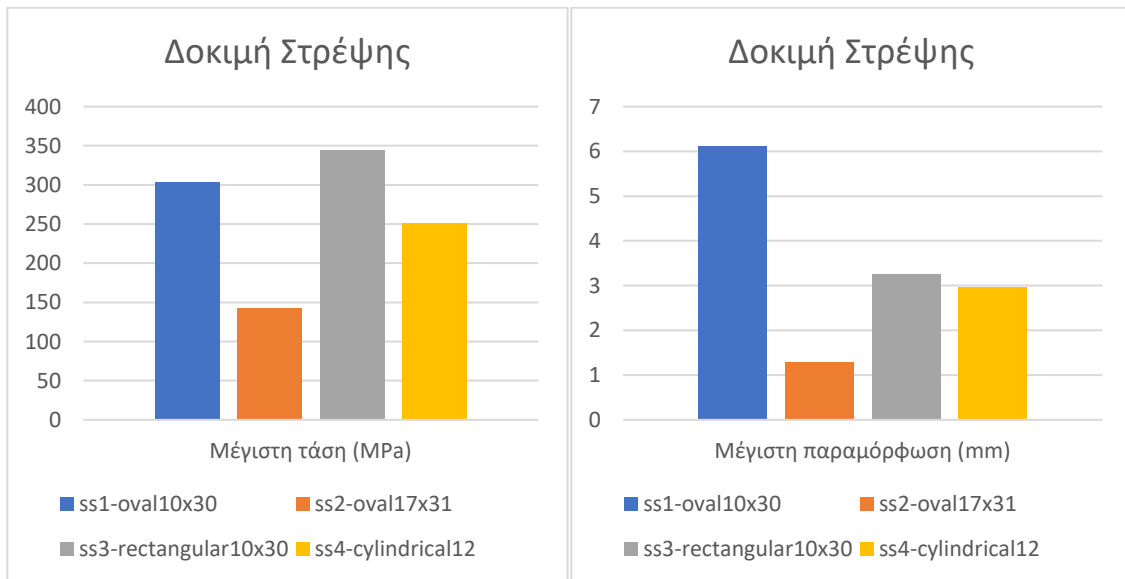
4.7.4 Seat Stays

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα καμπτικών και στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές των seat stays.

Seat stays	Κάμψη		Στρέψη	
	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)
ss1-oval10x30	356.2	36.68	303.5	6.12
ss2-oval17x31	261.8	26.84	142.9	1.29
ss3-rectangular10x30	262.6	27.58	344.7	3.25
ss4-cylindrical12	1293	31.08	250.6	2.96



Θ-4.48: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές των seat stays



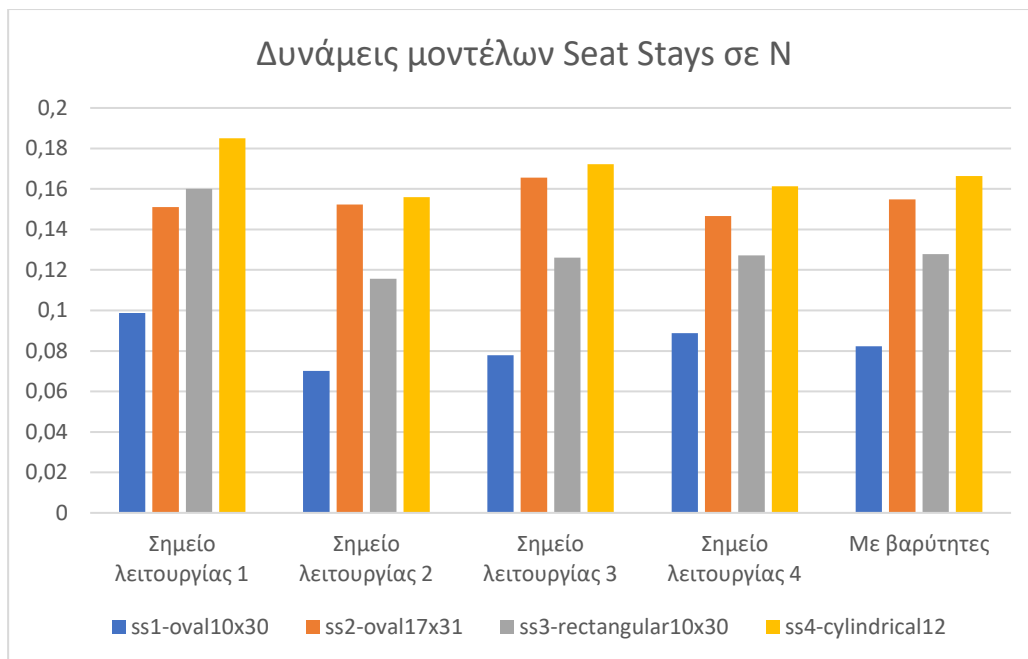
Θ-4.49: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές των seat stays

Την καλύτερη συμπεριφορά στις στατικές δοκιμές εμφανίζει η δεύτερη διατομή (οβάλ 17x 31). Στη δοκιμή κάμψης πολύ κοντινά αποτελέσματα παρουσιάζει και η τρίτη

διατομή (ορθογωνική 10 x 30) η οποία λόγω μικρότερων διαστάσεων έχει και συνολικά μικρότερο βάρος.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα αεροδυναμικών δοκιμών των διατομών των seat stays.

Seat Stays	Σημείο λειτουργίας 1	Σημείο λειτουργίας 2	Σημείο λειτουργίας 3	Σημείο λειτουργίας 4	Με βαρύτητες
ss1-oval10x30	0.0987	0.0701	0.07785	0.08885	0.082235
ss2-oval17x31	0.15105	0.1523	0.16565	0.14665	0.15487
ss3-rectangular10x30	0.16005	0.1156	0.1261	0.1272	0.12778
ss4-cylindrical12	0.185	0.1559	0.1722	0.16125	0.1663875



Θ-4.50: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές των seat stays στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.

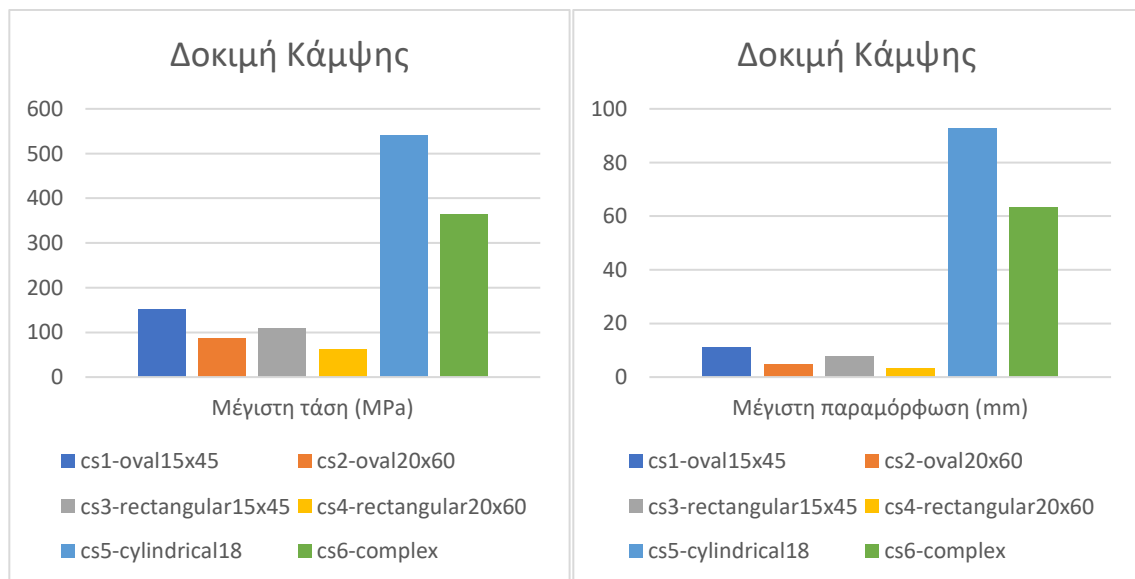
Η μικρή αεροδυναμική αντίσταση που εμφανίζει η πρώτη διατομή (οβάλ 10 x 30) σε συνδυασμό με τη μικρή μάζα της την καθιστούν ως την κατάλληλη για διατομή των άνω ψαλιδιών, παρά τη σχετικά μεγαλύτερη παραμόρφωσή της. Στους σωλήνες των άνω

ψαλιδιών η μεγαλύτερη παραμόρφωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί έως και επιθυμητή, καθώς βοηθά στην απορρόφηση κραδασμών πριν αυτοί φτάσουν στον αναβάτη.

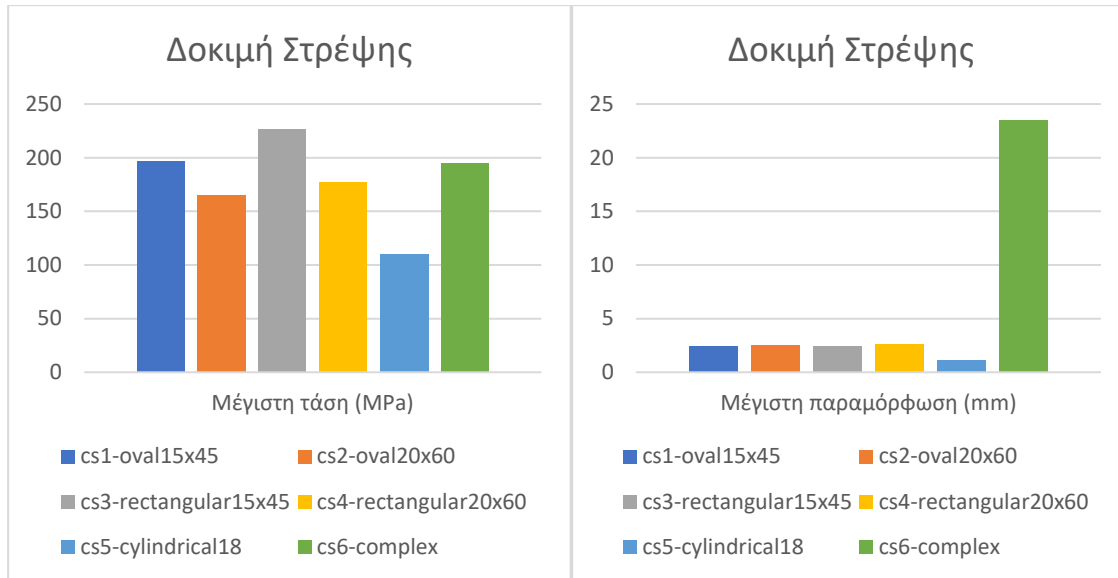
4.7.5 Chain Stays

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα καμπτικών και στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές των chain stays.

Chain stays	Κάμψη		Στρέψη	
	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (mm)
cs1-oval15x45	150.9	10.9	196.8	2.38
cs2-oval20x60	87.81	4.64	165.2	2.54
cs3-rectangular15x45	108.8	7.82	226.7	2.46
cs4-rectangular20x60	61.34	3.37	177.2	2.61
cs5-cylindrical18	540.6	92.79	109.7	1.11
cs6-complex	362.8	63.36	194.8	23.51



Θ-4.51: Γραφήματα αποτελεσμάτων καμπτικών δοκιμών για τις διατομές των chain stays.

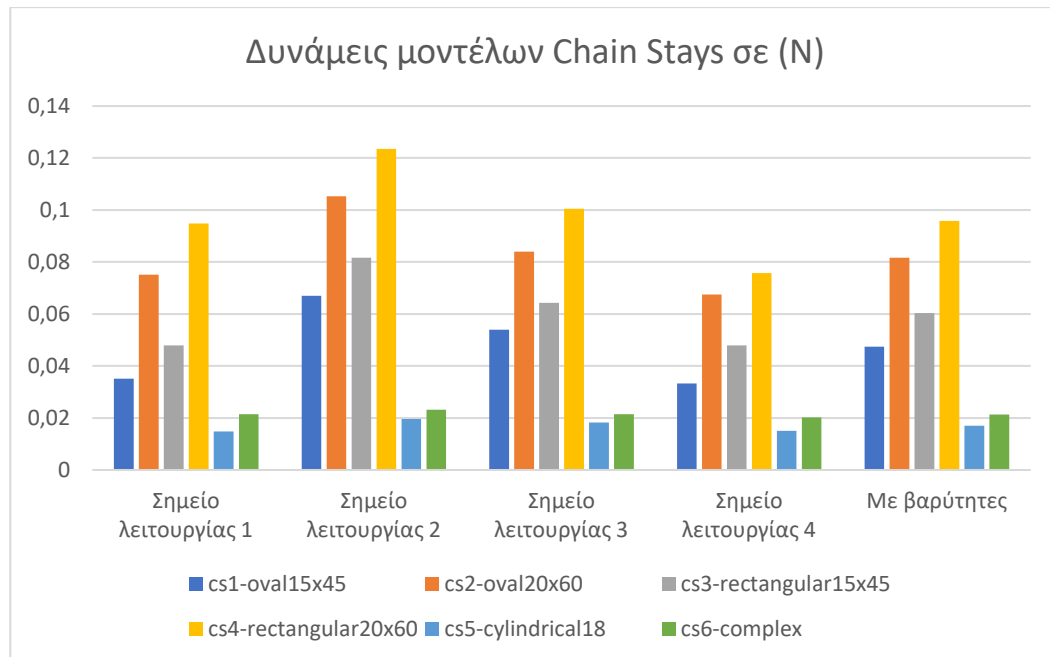


Θ-4.52: Γραφήματα αποτελεσμάτων στρεπτικών δοκιμών για τις διατομές των chain stays.

Από τη δοκιμή κάμψης είναι εμφανές ότι η πέμπτη και έκτη διατομή (κυκλική Φ18 και σύνθετη αντίστοιχα) εμφανίζουν αυξημένα φορτία και παραμορφώσεις οπότε δε θα χρησιμοποιηθούν ως chain stays. Από τις υπόλοιπες διατομές στη δοκιμή κάμψης παρατηρούμε ότι οι ορθογωνικές διατομές έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από τις αντίστοιχες οβάλ.

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα αεροδυναμικών δοκιμών των διατομών των chain stays.

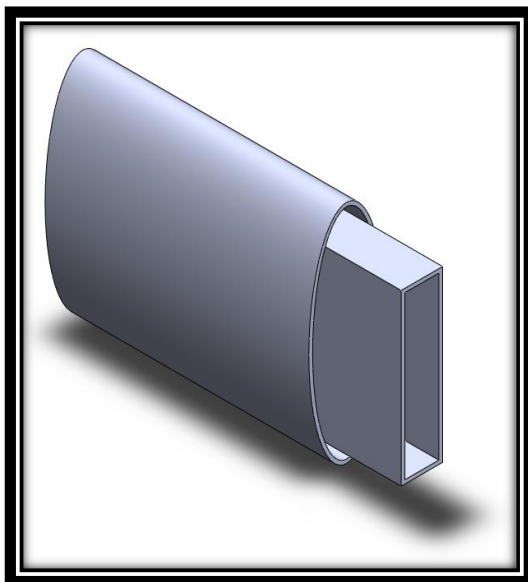
Chain Stays	Σημείο λειτουργίας 1	Σημείο λειτουργίας 2	Σημείο λειτουργίας 3	Σημείο λειτουργίας 4	Με βαρύτητες
cs1-oval15x45	0.03515	0.06695	0.05395	0.03325	0.047425
cs2-oval20x60	0.0751	0.1053	0.08405	0.0675	0.0816125
cs3-rectangular15x45	0.04795	0.08165	0.0643	0.04795	0.0604125
cs4-rectangular20x60	0.09485	0.12345	0.10045	0.07575	0.095845
cs5-cylindrical18	0.0148	0.01955	0.0182	0.0151	0.017045
cs6-complex	0.0215	0.02315	0.0214	0.0202	0.02134



Θ-4.53: Γράφημα δυνάμεων στις διατομές των chain stays στα διάφορα σημεία λειτουργίας και συνολικά.

Παρά την καλή αεροδυναμική τους συμπεριφορά, η πέμπτη και έκτη διατομή απορρίπτονται λόγω των αυξημένων φορτίων και μετατοπίσεων στις στατικές δοκιμές. Από τις υπόλοιπες, παρατηρούμε ότι οι οβάλ έχουν καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά σε σχέση με τις αντίστοιχες ορθογωνικές. Μεταξύ των δύο οβάλ διατομών επιλέγεται τελικά η δεύτερη (οβάλ 20 x 60) εξαιτίας των μικρών παραμορφώσεων που αναπτύσσει και συνεπώς της αυξημένης δυσκαμψία της.

Ένας καλός συμβιβασμός είναι η χρήση σωλήνων διαφορετικών διαστάσεων ως κάτω ψαλίδια σε κάθε πλευρά του σκελετού. Συγκεκριμένα, καθώς η δεξιά μεριά τείνει να παραμορφωθεί εντονότερα λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά το πεταλάρισμα, το δεξί κάτω ψαλίδι μπορεί να έχει μεγαλύτερο πάχος σε σχέση με το αριστερό. Συνεπώς, η ενίσχυση του δεξιού σωλήνα και ταυτόχρονα η ελάφρυνση του αριστερού, ο οποίος δε φέρει το ίδιο υψηλά φορτία, δεν αυξάνει το συνολικό βάρος του σκελετού. Τέλος, στην προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί η μειωμένη αεροδυναμική αντίσταση των οβάλ διατομών και να συνδυαστεί με τη στιβαρότητα των ορθογωνικών, κατά την κατασκευή του σκελετού γίνεται εκμετάλλευση των επικαλύψεων ώστε σε μια εξωτερικά οβάλ διατομή να σχηματιστεί εσωτερικά μια ορθογωνική. Συνεπώς είναι δυνατό να συνδυαστούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Το square-oval concept, όπως ονομάζεται, φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα Θ-4.54.



Θ-4.54: Square-Oval μορφή σωλήνων Κάτω Ψαλιδιών.

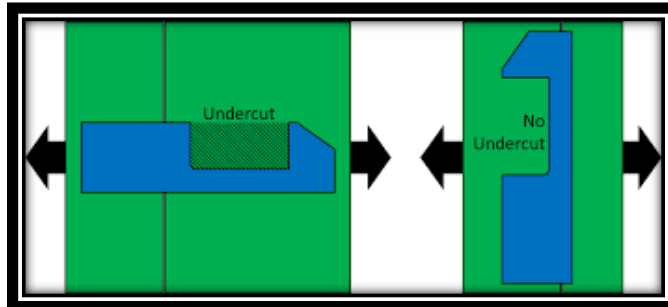
4.8 Σχεδιασμός τελικού μοντέλου του πλαισίου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συνδυάστηκε το γραμμικό μοντέλο που προέκυψε από την εφαρμογή του Bike Fitting με τη στατική και αεροδυναμική ανάλυση των σωλήνων που κρίθηκαν κατάλληλοι για κάθε τμήμα του πλαισίου του προηγούμενου κεφαλαίου. Αρχικά τοποθετήθηκαν οι διάφοροι σωλήνες στη σωστή θέση βάσει του γραμμικού μοντέλου. Το δύσκολο κομμάτι σε αυτήν την διαδικασία ήταν η δημιουργία των ενώσεων. Σε αυτό το σημείο λήφθηκαν υπόψιν οι εξής παράμετροι:

- Το άνοιγμα του πίσω άξονα επιλέχθηκε να είναι 130mm, διάσταση η οποία ενσωματώθηκε κατάλληλα στην τοποθέτηση των άνω και κάτω ψαλιδιών κατά την αεροδυναμική τους προσομοίωση.
- Το κούτελο (head tube), το οποίο δεν είχε μοντελοποιηθεί στην προηγούμενη ανάλυση, σχεδιάζεται αρχικά ως ένας απλός κύλινδρος.
- Με σκοπό να μπορέσει να διατηρηθεί το μικρό μήκος των κάτω ψαλιδιών, ο σωλήνας σέλλας ακολουθεί κατάλληλη καμπύλη ώστε να «αγκαλιάζει» τον οπίσθιο τροχό, γεγονός που βελτιώνει και την αεροδυναμική συμπεριφορά ολόκληρου του ποδηλάτου όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω.

- Τα κάτω ψαλίδια ακολουθούν και αυτά κατάλληλη καμπύλη ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ σκελετού και πεταλιέρας ή και του ποδιού του ποδηλάτη κατά την ποδηλασία.
- Μέσα από το κούτελο διέρχεται και συγκρατείται μέσω συγκεκριμένων ρουλεμάν η επέκταση του πιρουνιού ή αλλιώς steerer. Στο steerer στηρίζεται επίσης και το τιμόνι. Καθώς η προέκταση αυτή του πιρουνιού είναι σωλήνας διαστάσεων 1 1/8", υπολογίζοντας τις διαστάσεις των αντίστοιχων ρουλεμάν και ένα πάχος 3 mm στο τοίχωμα του κούτελου, ο σωλήνας σχεδιάζεται με Φ42.
- Επιλέγεται πιρούνι με διαστάσεις steerer 1 1/8" τόσο στο άνω όσο και στο κάτω μέρος του, καθώς ο τύπος αυτός επιτρέπει στο κούτελο πιο αεροδυναμικό σχεδιασμό.
- Στο σημείο της μεσαίας τριβής γίνεται η ένωση του σωλήνα σέλλας με τον κάτω σωλήνα και τα κάτω ψαλίδια. Μέσα από τη μεσαία τριβή περνά ο άξονας της πεταλιέρας, ο οποίος έχει και αυτός συγκεκριμένες διαστάσεις. Με βάση τη διάσταση του άξονα και το άνοιγμα του πλαισίου στο σημείο αυτό επιλέγεται πρότυπο μεσαίας τριβής τύπου BSA, το οποίο προσφέρει αξιοπιστία στο πλαίσιο και, καθώς κατασκευάζεται σε ένα κομμάτι, εμφανίζει σωστές κατασκευαστικές ανοχές και απουσιάζουν πιθανότητες λάθους κατά την ευθυγράμμιση. Τέλος στο σημείο αυτό μπορεί να διέρχονται μέσα από τον σκελετό καλώδια ταχυτήτων και φρένων.
- Το άνω μέρος του σωλήνα σέλλα ενώνεται με λαιμό σέλλας που επιλέγεται να έχει διάμετρο 27.2 mm. Η επιλογή αυτή γίνεται με σκοπό την καλύτερη απορρόφηση κραδασμών από το seat post και καλή αεροδυναμική συμπεριφορά. Για την καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά θα μπορούσε να επιλεγεί λαιμός σέλλας με κατάλληλη αεροτομή ως διατομή. Ωστόσο, τέτοιου τύπου seats posts έχουν συχνά αυξημένη στιβαρότητα και δεν εφαρμόζουν τόσο σωστά μέσα στο πλαίσιο, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει τριγμούς και, σε ορισμένες περιπτώσεις, τοπική αύξηση τάσεων και συνεπώς αστοχία του σκελετού.
- Το φρένο του οπίσθιου τροχού επιλέγεται να τοποθετηθεί στο κέντρο της ένωσης των άνω ψαλιδιών, συνεπώς το σημείο αυτό πρέπει να έχει επαρκή χώρο για την εφαρμογή του συγκεκριμένου εξαρτήματος.
- Καθώς το τελικό μοντέλο θα κατασκευαστεί σε καλούπια, τίθενται και κάποιοι κατασκευαστικοί περιορισμοί. Όλο το μοντέλο επιλέγεται να έχει τουλάχιστον G2 συνέχεια, έτσι ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα το καλούπι και να μην εμφανίζει ασυνέχειες στην επιφάνειά του. Επιπλέον, το

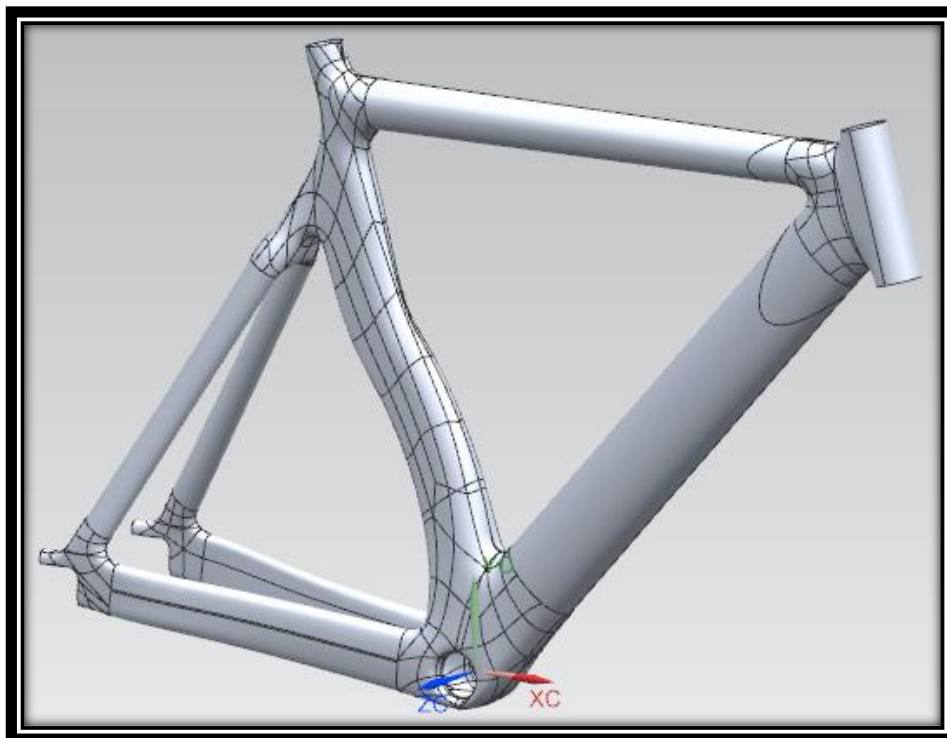
καλούπι δεν πρέπει να εμφανίζει υποκοπές, δηλαδή «αρνητικά» όπου οι επιφάνειες μπαίνουν η μία ως προς την άλλη στο επίπεδο που θα ανοίγει το καλούπι. Παρακάτω φαίνεται ενδεικτική επεξηγηματική φωτογραφία του τι είναι η υποκοπή (undercut).



Θ-4.55: Επεξήγηση υποκοπής.

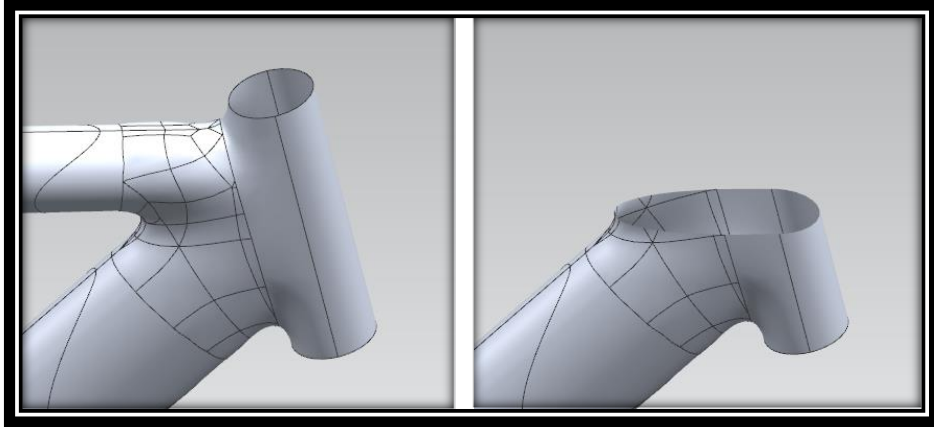
Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινιστεί ότι το τελικό καλούπι θα αποτελείται από τρία κομμάτια: ένα δεξί, ένα αριστερό και ένα μεσαίο κομμάτι το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στα ψαλίδια. Οι υποκοπές αυτές προσδιορίζονται ως προς τη διεύθυνση κατά την οποία αφαιρούνται τα κομμάτια του καλουπιού μετά το ψήσιμο.

Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους δημιουργήθηκε το τελικό μοντέλο, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



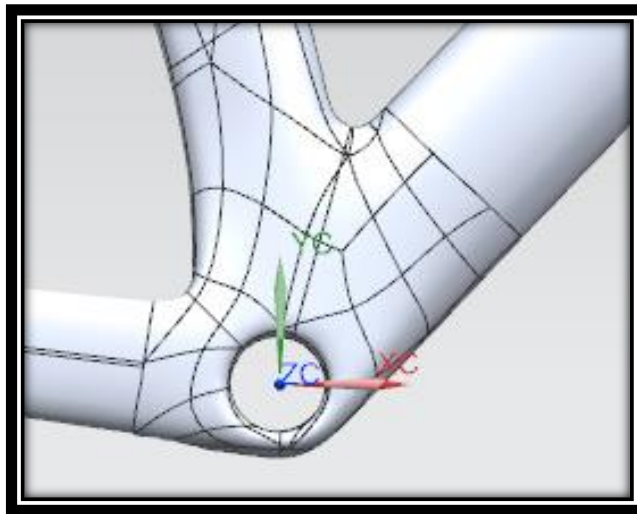
Θ-4.56: Τελικό μοντέλο πλαισίου.

Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι ενώ το κούτελο σχεδιάστηκε αρχικά ως απλός κύλινδρος, μετά την ένωσή του με τον άνω και κάτω σωλήνα έχει διατομή που θυμίζει αεροτομή. Έτσι, η αεροδυναμική συμπεριφορά του πλαισίου στο σημείο αυτό αναμένεται να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Θ-4.57: Ένωση σωλήνων κούτελου, top tube και down tube, ολόκληρη (αριστερά) και σε τομή (δεξιά).

Στο σημείο της μεσαίας τριβής παρατηρείται ότι η ένωση κάτω σωλήνα και σωλήνα σέλλας είναι τέτοια ώστε να υπάρχει αρκετός χώρος για τα καλώδια ταχυτήτων και φρένων που περνούν από εκεί.



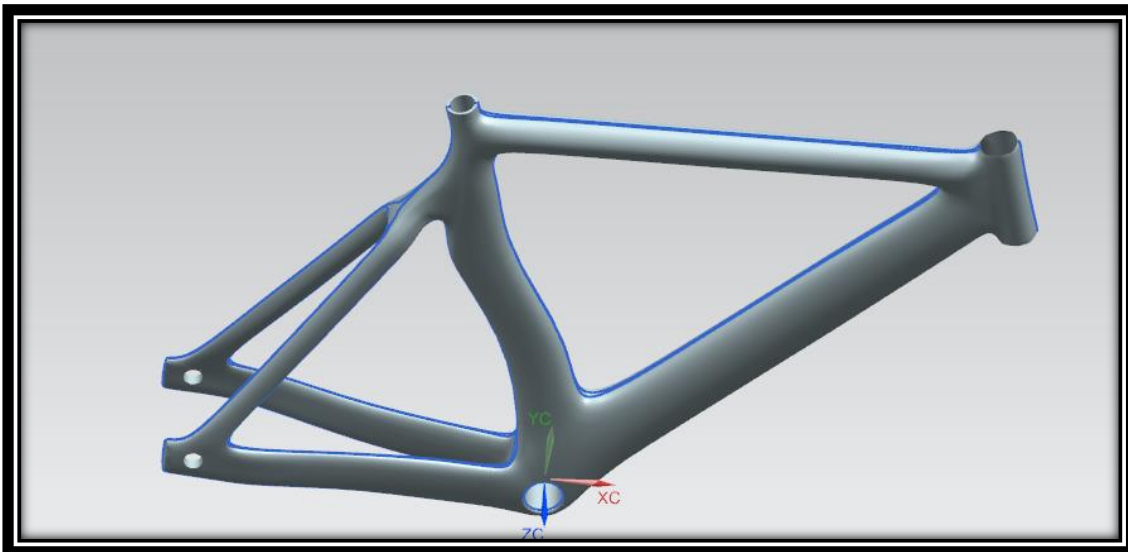
Θ-4.58: Μεσαία τριβή.

Συνολικά, παρατηρείται ότι το τελικό μοντέλο όντως έχει G2 συνέχεια όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα, αφού οι γραμμές δεν εμφανίζουν κάποια γωνία ή ασυνέχεια στην επιφάνεια του πλαισίου.



Θ-4.59: Ανάλυση συνέχειας στις επιφάνειες του πλαισίου.

Τέλος, εμφανίζονται πάνω στο μοντέλο οι parting lines που θα πρέπει να έχει το αντίστοιχο καλούπι. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποιο σημείο που να εμφανίζεται υποκοπή.



Θ-4.60: Parting Lines πάνω στις επιφάνειες του πλαισίου.

4.9 Βιβλιογραφία

- [4.1] Shimano Bike Fitting <https://www.bikefitting.com/en>
- [4.2] Retul Bike Fitting <https://www.retul.com/>
- [4.3] Bioracer bike fitting <https://bioracermotion.com/>
- [4.4] Guru bike fitting <http://www.gurucycling.com/the-experience/>
- [4.5] Purely custom <https://purelycustomfit.com/>
- [4.6] Cycling 3DMA <https://www.stt-systems.com/motion-analysis/3d-optical-motion-capture/cycling-3dma/>
- [4.7] Vertex fit Systems <http://vertexfitsystems.com/#whitepaper>
- [4.8] Steve Hogg's Cyclefit <https://www.stevehoggbikefitting.com/cyclefit/>
- [4.9] Selle Italia idmatch bike fitting <https://www.selleitalia.com/blog/idmatch-a-scientific-approach-for-wellness-and-performance/>
- [4.10] Clarification Guide of the UCI Technical Regulation—05.10.2021 version. 2021. Available online: <https://www.uci.org/equipment/bh2JJzw1eB0n876rX2iB1> (accessed on 12 January 2021).
- [4.11] A.G. Kitselis, C.S. Nikolakea, D.E. Manolakos, The design process of an optimized road racing bicycle frame, *Machines* 2022, 10, 149.
- [4.12] Lessard, Nemes, Lizotte (Utilization of FEA in the design of composite bicycle frames, *COMPOSITES* Volume 26 Number 1 1995
- [4.13] Peterson, Londry (Finite Element Structural Analysis, Bike Tech, *Bicycling Magazine's Newsletter for the Technical Enthusiast*, SUMMER 1986 VOLUME 5, NUMBER 2
- [4.14] <https://www.sheldonbrown.com/rinard/fea.htm>
- [4.15] Pinarello Dogma whitepaper
- [4.16] European Wind Atlas. Available online: <https://www.wasp.dk/wind-atlas/european-wind-atlas> (accessed on 12 January 2022).

Κεφάλαιο 5 Έλεγχος Προδιαγραφών ISO, CAE και διαστρωματώσεις πρωτοτύπου με πεπερασμένα στοιχεία

5.1 Πρότυπα ISO

Για να μπορέσει ένα καινούριο σχέδιο πλαισίου ποδηλάτου να περάσει στην παραγωγή, είναι αναγκαίο να έρχεται σε συμμόρφωση με τους κανονισμούς ασφαλείας που επιβάλλουν τα διεθνή πρότυπα κατασκευής ISO [5.1]. Με βάση αυτές τις πειραματικές προσομοιώσεις, είναι δυνατόν να υπάρξει μια εικόνα για τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέτοιου πλαισίου και αν είναι σύμφωνες με αυτές τις προδιαγραφές. Εφόσον τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, στη συνέχεια είναι δυνατό να γίνει οποιαδήποτε βελτιστοποίηση στα υλικά και τον τρόπο που θα γίνει η κατασκευή, και συγκεκριμένα η εναλλαγή των στρώσεων υλικού, εφόσον αναφερόμαστε σε πλαίσιο από CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic).

5.1.1 Δοκιμή πρόσκρουσης με προσπίπτουσα μάζα

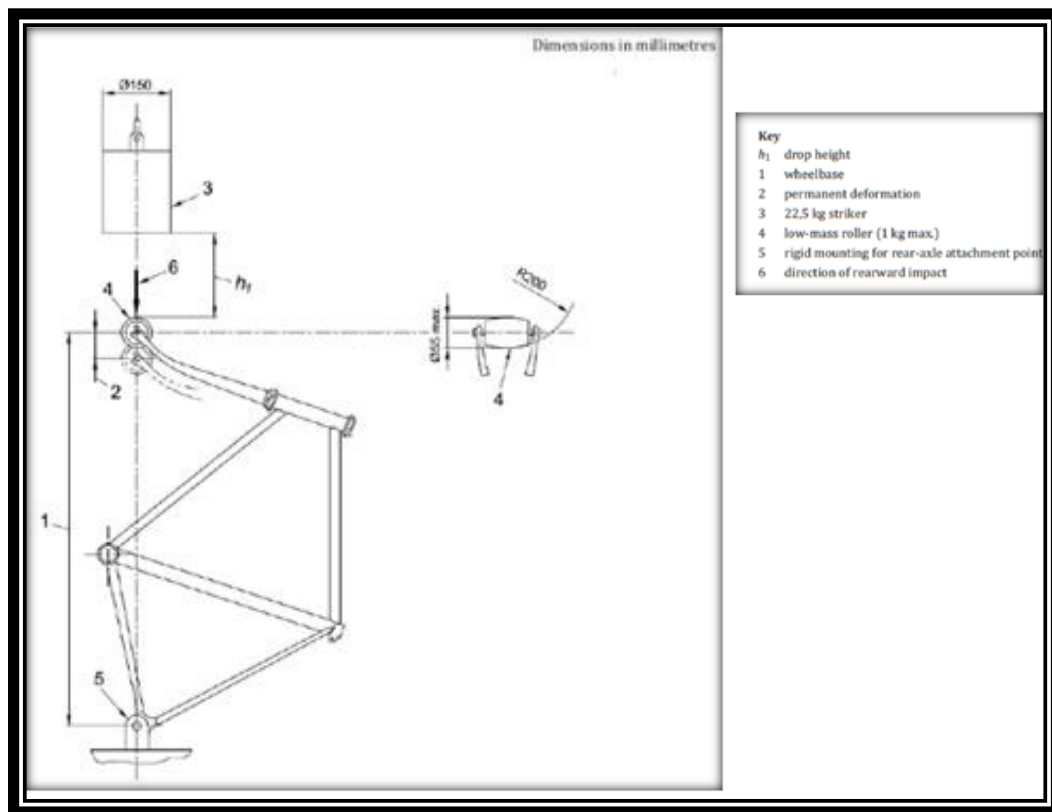
Για τη δοκιμή πρόσκρουσης με προσπίπτουσα μάζα, οι κανονισμοί αναφέρουν ότι στους κατασκευαστές των πλαισίων επιτρέπεται η διεξαγωγή της δοκιμής με τοποθέτηση ενός ομοιώματος εμπρόσθιου πιρουνιού στη θέση του κανονικού. Όταν ένα πλαίσιο είναι μετατρέψιμο σε αντρικό/γυναικείο με την αφαίρεση κάποιου σωλήνα, τότε η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιηθεί με το σωλήνα εκτός του πλαισίου. Όταν έχει τοποθετηθεί πιρούνι με ανάρτηση, τότε η δοκιμή πρέπει να εκτελεστεί με την ανάρτηση σε πλήρη έκταση. Όταν ένα οπίσθιο σύστημα ανάρτησης ενσωματώνεται στο πλαίσιο, πρέπει να εξασφαλιστεί η θέση της ανάρτησης σε ισοδύναμη θέση με εκείνη που θα βρισκόταν με έναν αναβάτη 80 κιλών να κάθεται στο ποδήλατο. Για ένα πλαίσιο ποδηλάτου για νεαρά άτομα, πρέπει να εξασφαλιστεί η έκταση σε ισοδύναμη θέση με εκείνη που θα βρισκόταν με έναν αναβάτη 40 kg να κάθεται στο ποδήλατο. Αν ο τύπος του συστήματος ανάρτησης δεν της επιτρέπει να είναι κλειδωμένη σε συγκεκριμένη θέση, το ελατήριο/αποσβεστήρας πρέπει να αντικατασταθεί από μια ράβδο με ένα στερεό σύνδεσμο κατάλληλου μεγέθους και με συνδέσμους παρόμοιους με εκείνους της μονάδας ελατηρίου/αποσβεστήρα. Στη συνέχεια, πρέπει να δημιουργηθεί ένας κύλινδρος από μάζα μικρότερη ή ίση με 1 kg και με διαστάσεις σύμφωνα με εκείνες που φαίνονται στο Σχήμα Θ-5.1 στο πιρούνι. Η σκληρότητα του κυλίνδρου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 60 HRC στην επιφάνεια κρούσης. Στην περίπτωση που ένα ομοίωμα πιρουνιού χρησιμοποιείται στη θέση του κανονικού, η γραμμή πρέπει να έχει στρογγυλεμένες άκρες ισοδύναμες προς το σχήμα του κυλίνδρου. Το πλαίσιο, πιρούνι ή ολόκληρο το σύστημα πιρουνιού-πλασίου πρέπει να συγκρατηθεί κάθετα με σύσφιξη με ένα άκαμπτο εξάρτημα από τον πίσω άξονα στα προσαρτημένα σημεία,

όπως φαίνεται στο Σχήμα Θ-5.1. Η εμβόλιμη μάζα των 22,5 kg προσαρμόζεται στον κύλινδρο στα άκρα του πιρουνιού ή στο στρογγυλό άκρο του ομοιώματος πιρουνιού και ύστερα γίνεται μέτρηση του μεταξονίου. Η εμβόλιμη μάζα τοποθετείται σε ύψος h_1 πάνω από τον χαμηλής μάζας κύλινδρο και αφήνεται να χτυπήσει τον άλλο κύλινδρο ή τον χαλύβδινο σωλήνα σε ένα σημείο, σύμφωνα με τα κέντρα των τροχών και κατά την διεύθυνση του πιρουνιού ή του σωλήνα. Τα ύψη πτώσης δίδονται στον Πίνακα 5.1. Η αναπήδηση της μάζας κρίνεται φυσιολογική. Όταν μάζα πλέον σταματήσει επάνω στον κύλινδρο ή στο ομοίωμα του πιρουνιού, γίνεται ξανά μέτρηση του μεταξονίου. Στην περίπτωση που η δοκιμή γίνεται με το κανονικό πιρούνι και εκείνο αστοχήσει, το πλαίσιο πρέπει να δοκιμαστεί με ένα ομοίωμα πιρουνιού.

Πίνακας 5.1. Υψομετρικές αποστάσεις πτώσης προσπίπτουσας μάζας

Dimensions in millimetres

Bicycle type	City and trekking bicycles	Young adult bicycles	Mountain bicycles	Racing bicycles
Drop height, h_1	180	180	360	212



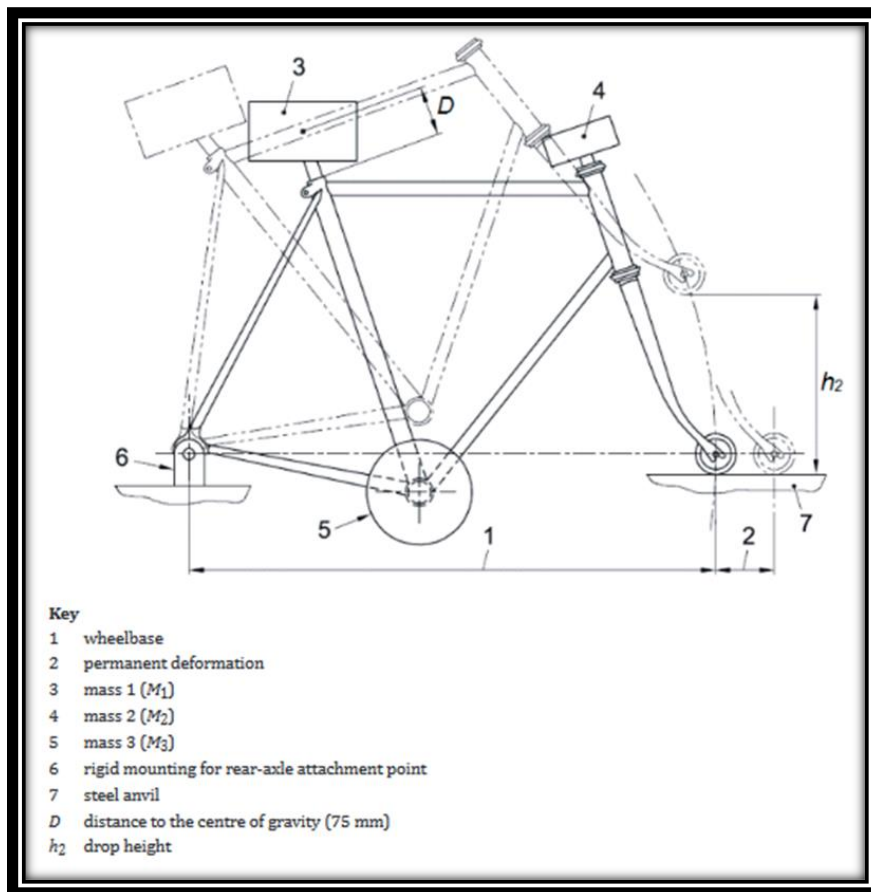
Θ-5.1: Διάταξη πλαισίου και εμπρόσθιου πιρουνιού στη δοκιμή πρόσκρουσης με προσπίπτουσα μάζα.

5.1.2 Δοκιμή πρόσκρουσης του πλαισίου

Για τη δοκιμή πρόσκρουσης του πλαισίου, οι κανονισμοί αναφέρουν ότι για τους κατασκευαστές ολόκληρων ποδηλάτων η διεξαγωγή του τεστ πρέπει να γίνει με το πλαίσιο εφοδιασμένο με το κατάλληλο μπροστινό πιρούνι. Για τους κατασκευαστές πλαισίων, όπου το πιρούνι που προορίζεται για το πλαίσιο δεν είναι διαθέσιμο, η δοκιμή μπορεί να γίνει με το πλαίσιο εφοδιασμένο με ένα πιρούνι το οποίο πληροί τις απαιτήσεις της δοκιμής πρόσκρουσης όπως περιγράφεται στο πρότυπο ISO 4210 - 2: 2014, 4.9.5. Όταν ένα πλαίσιο είναι μετατρέψιμο σε ανδρικό/γυναικείο με την προσθαφαίρεση κάποιου από τους σωλήνες, πρέπει να δοκιμαστεί χωρίς το συγκεκριμένο σωλήνα. Στην περίπτωση που υπάρχει ανάρτηση στο εμπρόσθιο πιρούνι είναι αναγκαίο να βρίσκεται σε αντίστοιχο μήκος χωρίς φόρτιση πριν την πρόσκρουση. Αν υπάρχει η επιλογή κλειδώματος της ανάρτησης σε συγκεκριμένη θέση, τότε θα πρέπει να κλειδωθεί στο προαναφερθέν μήκος. Στην περίπτωση όμως που δεν υπάρχει αυτή η επιλογή, θα πρέπει να γίνουν οι εξής ενέργειες: είτε να κλειδωθεί η ανάρτηση με κάποιο εξωτερικό μηχανισμό, είτε να αντικατασταθεί με κάποιο άλλο άκαμπτο πιρούνι, το οποίο καλύπτει τις προδιαγραφές που αναφέρονται στο πρότυπο ISO 4210-2:2014, 4.9.5 και με σταθερό μήκος, θεωρώντας έναν αναβάτη 80 kg (στην περίπτωση ποδηλάτου για νεαρά άτομα 40 kg) καθήμενο σε στάση όπως θα ήταν εάν το εμπρόσθιο πιρούνι του σκελετού διέθετε ανάρτηση. Στην περίπτωση που το πλαίσιο διαθέτει οπίσθια ανάρτηση, πρέπει να κλειδωθεί σε θέση η οποία είναι αντίστοιχη εκείνης που υπάρχει αναβάτης βάρους 80 kg (για ποδήλατα νεαρών ατόμων 40 kg). Εάν δεν υπάρχει η επιλογή κλειδώματος τότε πρέπει να αντικατασταθεί από έναν άκαμπτο σύνδεσμο κατάλληλου μήκους και συνδέσμων, παρόμοιων με εκείνους της ανάρτησης. Η δοκιμή διεξάγεται με τη διάταξη που βρίσκεται στο πρότυπο ISO 4210-2:2014, 4.8.2 ή, στην περίπτωση που ο κατασκευαστής δεν χρησιμοποιεί δικό του πιρούνι, με ένα πιρούνι κατάλληλο για το συγκεκριμένο πλαίσιο. Η διάταξη πλαισίου-πιρουνιού πακτώνεται στα πίσω ψαλίδια με τη δυνατότητα κάθετης περιστροφής μέσω αυτών (Σχήμα Θ-5.2). Το εμπρόσθιο πιρούνι πακτώνεται σε σταθερό σημείο με το πλαίσιο σε κανονική θέση χρήσης. Η μάζα M_1 στερεώνεται στο παλουκόσελο (Σχήμα Θ-5.2) σε απόσταση D ($= 75$ mm) από το σημείο του κέντρου μάζας με το κέντρο βάρους κατά μήκος του άξονα σέλας από το σημείο εισαγωγής. Οι μάζες M_2 και M_3 (Πίνακας 5.2) στερεώνονται στο επάνω μέρος του τιμονιού και της μεσαίας τριβής (Σχήμα Θ-5.2). Ύστερα γίνεται μέτρηση του μεταξονίου με τις τρεις μάζες στερεωμένες, και η διάταξη περιστρέφεται σε μια απόσταση h_2 μεταξύ του κυλίνδρου χαμηλής μάζας και του σταθερού σημείου, αφήνοντάς τη στο τέλος να κάνει ελεύθερη πτώση και πρόσκρουση επάνω στο σταθερό σημείο. Στο τέλος ξαναγίνεται η μέτρηση του μεταξονίου με τις μάζες στερεωμένες και τον κύλινδρο που βρίσκεται στο πιρούνι να ακουμπά επάνω στο σταθερό σημείο.

Πίνακας 5.2: Υψομετρικές αποστάσεις πτώσης και κατανομές μαζών στο παλουκόσελο, το τιμόνι και τη μεσαία τριβή

Bicycle type	City and trekking bicycles	Young adult bicycles	Mountain bicycles	Racing bicycles
Mass 1 Seat-post, M_1 kg	50	40	30	30
Mass 2 Steering head, M_2 kg	10	10	10	10
Mass 3 Bottom bracket, M_3 kg	30	20	50	50
Drop height, h_2 mm	200	200	300	200



Θ-5.2: Πειραματική διάταξη πλαισίου-εμπρόσθιου πιρουνιού για δοκιμή πρόσκρουσης πλαισίου.

5.1.3 Δοκιμή φόρτισης με δυνάμεις πεταλαρίσματος

Για τη δοκιμή πλαισίου σε φορτίσεις λόγω pedaling, οι κανονισμοί αναφέρουν για αρχή πως όλοι οι τύποι ποδηλατικών πλαισίων πρέπει να έχουν υποβληθεί σε αυτή τη δοκιμή προτού αρχίσει η παραγωγή τους σε μεγαλύτερη κλίμακα. Στην περίπτωση που δοκιμάζεται πλαίσιο με αρθρωτή ανάρτηση, το ελατήριο, η πίεση του αερίου ή ολόκληρος ο αποσβεστήρας θα πρέπει να ρυθμιστούν στη μέγιστη δυνατή σκληρότητα ή, στην περίπτωση πνευματικού αποσβεστήρα που δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί κάποια ρύθμιση, θα πρέπει να γίνει αντικατάσταση με κάποια άκαμπτη ράβδο, με την προϋπόθεση ότι τα σημεία ένωσης με το πλαίσιο και η πλευρική της δυσκαμψία βρίσκονται σε αντιστοιχία και προσομοιώνουν το αρχικό σύστημα απορρόφησης κραδασμών. Όσον αφορά στα πλαίσια των οποίων τα κάτω ψαλίδια δεν έχουν κάποια άρθρωση, αλλά η κίνησή τους στηρίζεται στην καμπτική τους συμπεριφορά, θα πρέπει να εξασφαλισθεί ότι οι αποσβεστήρες θα είναι ρυθμισμένοι στην ελάχιστη δυνατή σκληρότητα, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί επαρκώς η δοκιμή. Τέλος, όταν ένα πλαίσιο χρησιμοποιεί ρυθμιζόμενα στηρίγματα ή μοχλικά για να μεταβάλλει την αντίσταση κύλισης του ποδηλάτου ή την συμπεριφορά του, θα πρέπει να γίνει τέτοια ρύθμιση σε αυτά τα εξαρτήματα ώστε να μεταδίδεται το μέγιστο των δυνάμεων στο πλαίσιο. Προτού αρχίσει η δοκιμή, πρέπει να γίνει χρήση του χρησιμοποιούμενου πιρουνιού ή κάποιου ομοιώματός του, έχοντας τοποθετήσει τα προοριζόμενα για χρήση έδρανα στον εμπρός σωλήνα. Εάν χρησιμοποιηθεί ομοίωμα, θα πρέπει να έχει το ίδιο μήκος και δυσκαμψία με το αρχικό (είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί κάποιο δυνατότερο και σκληρότερο ομοίωμα, εφόσον είναι πολύ πιθανόν σε αυτού του είδους δοκιμές να προκληθεί αστοχία στο κανονικό). Για πλαίσια αντρικά/γυναικεία που μετατρέπονται με την προσθαφαίρεση κάποιου σωλήνα, τότε η δοκιμή πραγματοποιείται χωρίς τον επιπλέον σωλήνα. Γίνεται πάκτωση στο πλαίσιο με τον άξονα του εμπρός πιρουνιού, με την βοήθεια βάσης ύψους R_w (προκύπτει από την ακτίνα του τροχού ± 30 mm) και με το κέντρο να είναι ελεύθερο σε περιστροφή. Επίσης, πάκτωση γίνεται και στον άξονα στα πίσω ψαλίδια, ο οποίος συνδέεται με σταθερή κάθετη άρθρωση μήκους ίσου με την εμπρόσθια, και με την παροχή δυνατότητας περιστροφής ως προς αυτόν τον άξονα, προσφέροντας όμως ταυτόχρονα και πλευρική δυσκαμψία, έχοντας στο άκρο της άρθρωσης με το σταθερό σημείο κάποιον σφαιρικό σύνδεσμο.

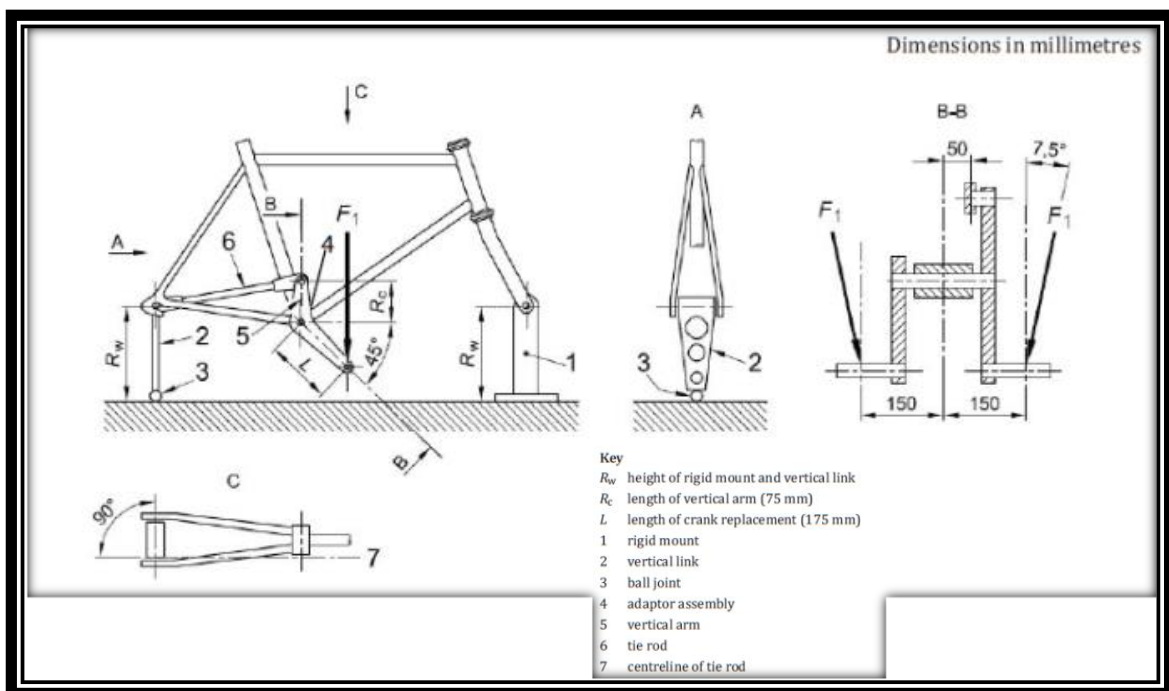
Εφόσον έχουν πραγματοποιηθεί τα παραπάνω, τοποθετείται η διάταξη της πεταλιέρας ή εναλλακτικά μια διάταξη ενός σκληρού και άκαμπτου ομοιώματος (Σχήμα Θ-5.3). Οι δύο αυτές περιπτώσεις περιγράφονται ως εξής: Α) Εάν χρησιμοποιηθεί η διάταξη της πεταλιέρας, και τα δυο πετάλια πρέπει να τοποθετηθούν σε εμπρόσθια και κλίνουσα προς τα εμπρός θέση, με γωνία 45 μοιρών (με ακρίβεια $\pm 2,0$ μοίρες), ως προς τον οριζόντα του ποδηλάτου, και με την αλυσίδα ασφαλισμένη στο δεύτερο από τα τρία κεντρικά γρανάζια ή γενικά στο μικρότερο υπάρχον. Το πίσω μέρος της αλυσίδας τοποθετείται στον πίσω άξονα καθέτως από αυτόν. Β) Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί διάταξη ομοιώματος (Σχήμα Θ-5.3), θα πρέπει να εξασφαλισθεί η

ελεύθερη περιστροφή γύρω από τον άξονα της μεσαίας τριβής και ότι το μήκος στα πετάλια είναι 175 mm (L), έχοντας κλίση προς τα εμπρός και κάτω, με γωνία 45 μοιρών (με ακρίβεια $\pm 2,0$ μοιρών) από τον ορίζοντα του ποδηλάτου. Ύστερα τα πετάλια σταθεροποιούνται με τη βοήθεια μιας κάθετης ράβδου (προς αντικατάσταση της αλυσίδας) και ενός ακρόμπαρου με σφαιρικούς συνδέσμους, συνδεδεμένου με τον πίσω άξονα καθέτως. Το μήκος της ράβδου (R_c) πρέπει να ανέρχεται στα 75 mm, με τον άξονα του ακρόμπαρου να είναι παράλληλος με το πλαίσιο και να έχει μήκος 50 mm. Κατά την εφαρμογή αυτών των δοκιμαστικών δυνάμεων, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι στην εφαρμογή στον ένα άξονα του πεντάλ υπάρχει πτώση στο 5% ή λιγότερο της κορυφής ισχύος πριν από την έναρξη εφαρμογής της δοκιμαστικής δύναμης στον άλλο άξονα του πεντάλ. Οι δυνάμεις αυτές εφαρμόζονται για 100.000 κύκλους φόρτισης, όπου ο κάθε κύκλος αντιστοιχεί στην εφαρμογή και την αφαίρεση των δύο δοκιμαστικών δυνάμεων κάθε φορά. Η μέγιστη πειραματική συχνότητα δίνεται από το πρότυπο ISO 4210-3:2014, 4.5.

Πίνακας 5.3: Εφαρμοζόμενες δυνάμεις πεταλιέρας

Forces in newtons

Bicycle type	City and trekking bicycles	Young adult bicycles	Mountain bicycles	Racing bicycles
Force, F_1	1 000	1 000	1 200	1 100



Θ-5.3: Πειραματική διάταξη δοκιμών κοπώσεως πλαισίου σε pedaling.

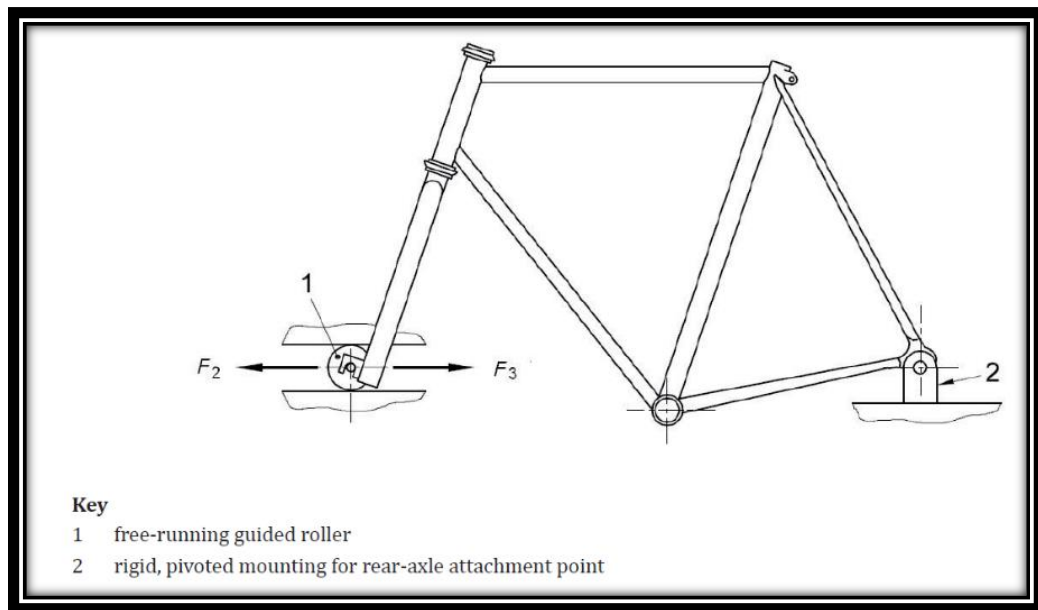
5.1.4 Δοκιμή κόπωσης πλαισίου με οριζόντιες δυνάμεις

Κατά την πειραματική δοκιμή κοπώσεως του πλαισίου σε οριζόντιες δυνάμεις, για τις περιπτώσεις πλαισίων που μετατρέπονται σε αντρικά/γυναικεία με την προσθαφαίρεση κάποιου επιπρόσθετου σωλήνα οι δοκιμές εκτελούνται χωρίς τον συγκεκριμένο σωλήνα. Γενικά δεν είναι απαραίτητη η τοποθέτηση του κανονικού πιρουνιού, δεδομένου του ότι οποιοδήποτε ομοίωμα ίδιου μήκους και ίδιας τοποθέτησης στα έδρανα του εμπρός σωλήνα είναι αρκετή. Στην περίπτωση που το εμπρόσθιο πιρούνι διαθέτει αποσβεστήρες, αυτοί θα πρέπει να κλειδωθούν σε θέση αντίστοιχη εκείνης που υπάρχει αναβάτης βάρους 80 kg (στην περίπτωση ποδηλάτου νεαρών ατόμων αντιστοιχούν 40 kg), είτε με ρύθμιση του ελατηρίου/αποσβεστήρα, είτε με κάποιο εξωτερικό μηχανισμό. Στην περίπτωση δοκιμών με πλαίσια που διαθέτουν ενσωματωμένη ανάρτηση με περιστρεφόμενους άξονες, τα κινητά μέρη κλειδώνονται σε θέση αντίστοιχη εκείνης με αναβάτη 80 kg επάνω στο ποδήλατο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με κλείδωμα της ανάρτησης σε κατάλληλη θέση, είτε με αντικατάσταση αυτής από άκαμπτο άξονα κατάλληλου μήκους (αντιστοιχίας με το μήκος φορτισμένης ανάρτησης). Η ταύτιση των οριζόντιων αξόνων σε σειρά (πίσω και εμπρός) θα πρέπει να έχει εξασφαλιστεί εξαρχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα Θ-5.4. Στην περίπτωση πλαισίων που δε διαθέτουν αρθρώσεις στην ανάρτηση, αλλά στηρίζονται στην καμπτική συμπεριφορά των πίσω ψαλιδιών, θα πρέπει να εξασφαλιστεί με ρύθμιση η ελάχιστη δυνατή αντίσταση των αποσβεστήρων, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί επαρκώς η δοκιμή. Τέλος, όταν ένα πλαίσιο χρησιμοποιεί ρυθμιζόμενα στηρίγματα ή μοχλικά για να μεταβάλλει την αντίσταση κύλισης του ποδηλάτου ή την συμπεριφορά του, θα πρέπει να γίνει τέτοια ρύθμιση σε αυτά τα εξαρτήματα ώστε να μεταδίδεται το μέγιστο των δυνάμεων στο πλαίσιο.

Πριν την έναρξη των δοκιμών, το πλαίσιο πακτώνεται σε κανονική στάση και με σταθεροποίηση των πίσω ψαλιδιών, με τρόπο που δεν εμποδίζει την κάθετη περιστροφή στο επίπεδο της πάκτωσης (Σχήμα Θ-5.4). Έπειτα γίνεται εφαρμογή δυναμικών φορτίων οριζοντίως με διεύθυνση εμπρός F_2 και πίσω F_3 στα σημεία πρόσδεσης τροχού του εμπρόσθιου πιρουνιού για C_1 κύκλους φορτίσεων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4 και στο Σχήμα Θ-5.4, με το πιρούνι περιορισμένο στον κάθετο άξονα, αλλά ελεύθερο κινήσεων στον οριζόντιο κατά την εφαρμογή των δυνάμεων. Η μέγιστη διατηρούμενη πειραματική συχνότητα δίνεται από το πρότυπο ISO 4210-3:2014, 4.5.

Πίνακας 5.4: Δυνάμεις και κύκλοι φορτίσεων στα σημεία πρόσδεσης τροχού του εμπρόσθιου πιρουνιού, κατά την πειραματική διαδικασία δοκιμών κοπώσεως του πλαισίου σε οριζόντιες δυνάμεις

Bicycle type	City and trekking bicycles	Young adult bicycles	Mountain bicycles	Racing bicycles
Forward force, F_2 N	450	450	1 200	600
Rearward force, F_3 N	450	450	600	600
Test cycles, C_1	100 000	100 000	50 000	100 000



Θ-5.4: Πειραματική διάταξη δοκιμών κοπώσεως του πλαισίου σε οριζόντιες δυνάμεις.

5.1.5 Δοκιμή κόπωσης πλαισίου με κατακόρυφη δύναμη

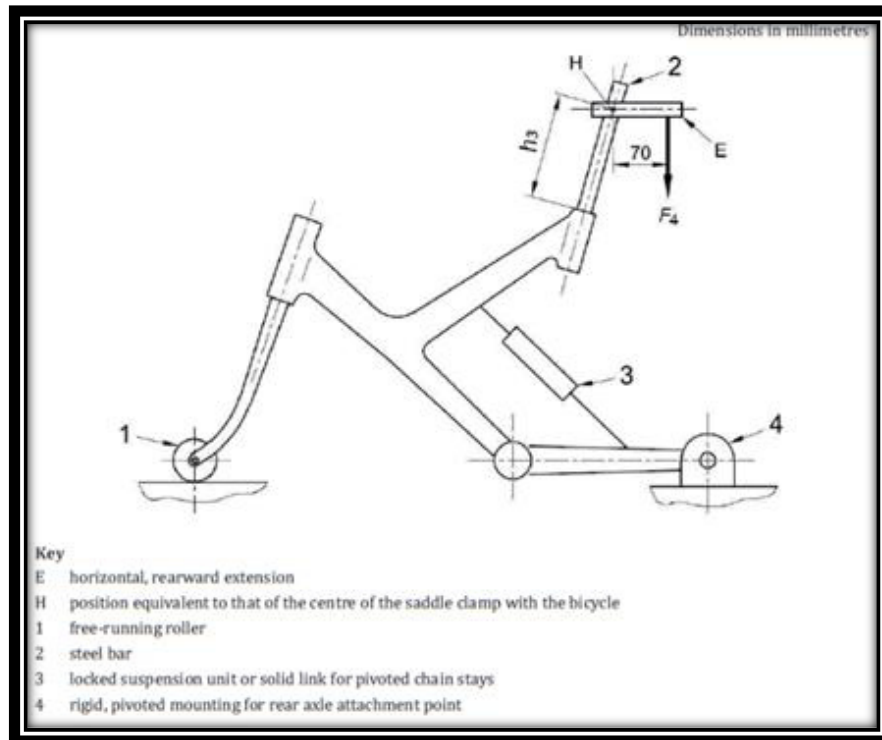
Κατά την πειραματική δοκιμή κοπώσεως του πλαισίου σε κατακόρυφη δύναμη, για τις περιπτώσεις πλαισίων που μετατρέπονται σε αντρικά/γυναικεία με την

προσθαφαίρεση κάποιου επιπρόσθετου σωλήνα οι δοκιμές εκτελούνται χωρίς το συγκεκριμένο σωλήνα. Όταν ένα πλαίσιο χρησιμοποιεί ρυθμιζόμενα στηρίγματα ή μοχλικά για να μεταβάλλει την αντίσταση κύλισης του ποδηλάτου ή τη συμπεριφορά του, θα πρέπει να γίνει τέτοια ρύθμιση σε αυτά τα εξαρτήματα ώστε να μεταδίδεται το μέγιστο των δυνάμεων στο πλαίσιο. Επιπλέον, η πίσω ανάρτηση είναι αναγκαίο να κλειδωθεί σε σταθερή θέση. Στην περίπτωση που το εμπρόσθιο πιρούνι διαθέτει αποσβεστήρες, αυτοί θα πρέπει να κλειδωθούν σε θέση αντίστοιχη εκείνης όπου υπάρχει αναβάτης βάρους 80 kg (στην περίπτωση ποδηλάτου νεαρών ατόμων αντιστοιχεί σε βάρος 40 kg), είτε με ρύθμιση του ελατηρίου/αποσβεστήρα, είτε με κάποιον εξωτερικό μηχανισμό. Πριν την έναρξη των δοκιμών, το πλαίσιο πακτώνεται σε κανονική στάση και με σταθεροποίηση των πίσω ψαλιδιών, με τρόπο που δεν εμποδίζει την κάθετη περιστροφή στον άξονα της πάκτωσης (Σχήμα Θ-5.5). Στο εμπρόσθιο πιρούνι τοποθετείται στα σημεία πρόσδεσης του τροχού περιστρεφόμενος άξονας, έτσι ώστε να επιτρέπεται η εμπρόσθια και οπίσθια κίνηση, στον οριζόντιο άξονα του σταθερού σημείου εφαρμογής του πιρουνιού. Στη συνέχεια τοποθετείται ο σωλήνας πάκτωσης της σέλλας στο ελάχιστο δυνατό βάθος εισόδου, ή σε ισοδύναμο με 75 mm βάθος από την κορυφή του σωλήνα, σταθεροποιώντας τον με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή του χρησιμοποιούμενου σφικτήρα. Το μήκος του σωλήνα πάκτωσης της σέλλας τίθεται 250 mm σε περίπτωση που δεν δίνονται άλλες περιορισμοί ως προς το μέγιστο ύψος της σέλλας από τον κατασκευαστή του πλαισίου. Σε τελικό στάδιο εφαρμόζονται κύκλοι φορτίσεων με δυνάμεις F_4 , κάθετων στον σωλήνα πάκτωσης της σέλλας με διεύθυνση προς το επίπεδο πάκτωσης του πλαισίου σε ένα σημείο 70 mm πίσω από το σημείο τομής του σωλήνα και άκαμπτης ατσάλινης πλάκας E, όπως φαίνεται στο Σχήμα Θ-5.5. Οι κύκλοι φόρτισης ανέρχονται στους 50.000. Οι δυνάμεις αναφέρονται στον Πίνακα 5.5. Η μέγιστη διατηρούμενη πειραματική συχνότητα δίνεται από το πρότυπο ISO 4210-3:2014, 4.5.

Πίνακας 5.5: Ποσά δυνάμεων που ασκούνται στον σωλήνα πάκτωσης της σέλλας

Forces in newtons

Bicycle type	City and trekking bicycles	Young adult bicycles	Mountain bicycles	Racing bicycles
Force, F_4	1 000	500	1 200	1 200



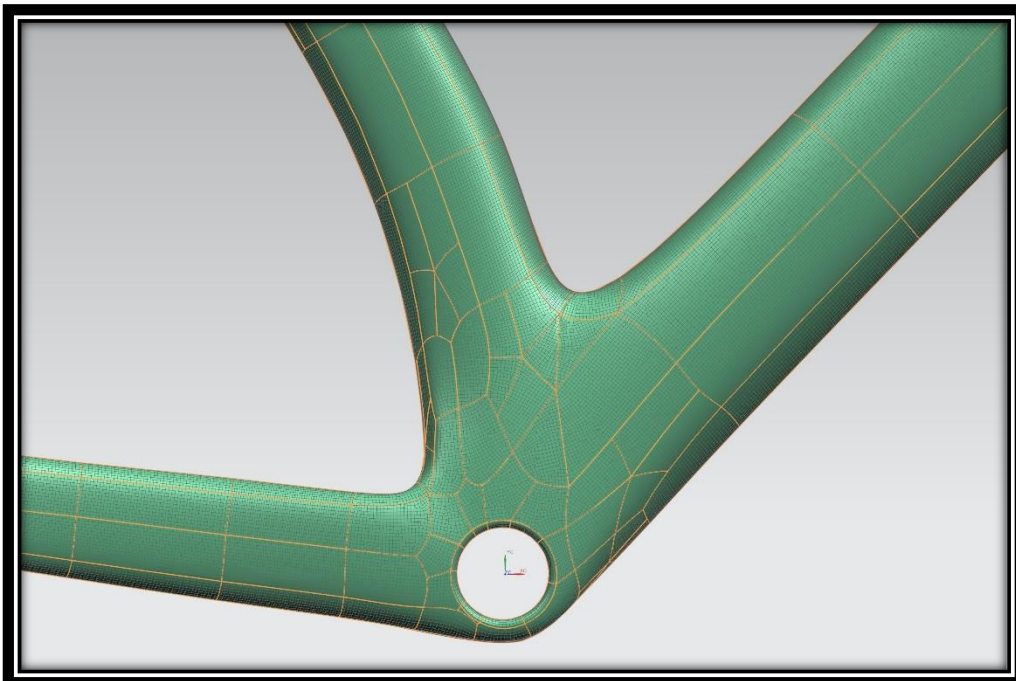
Θ-5.5: Πειραματική διάταξη δοκιμών κοπώσεως του πλαισίου σε κάθετες δυνάμεις.

5.2 Μοντελοποίηση προδιαγραφών ISO

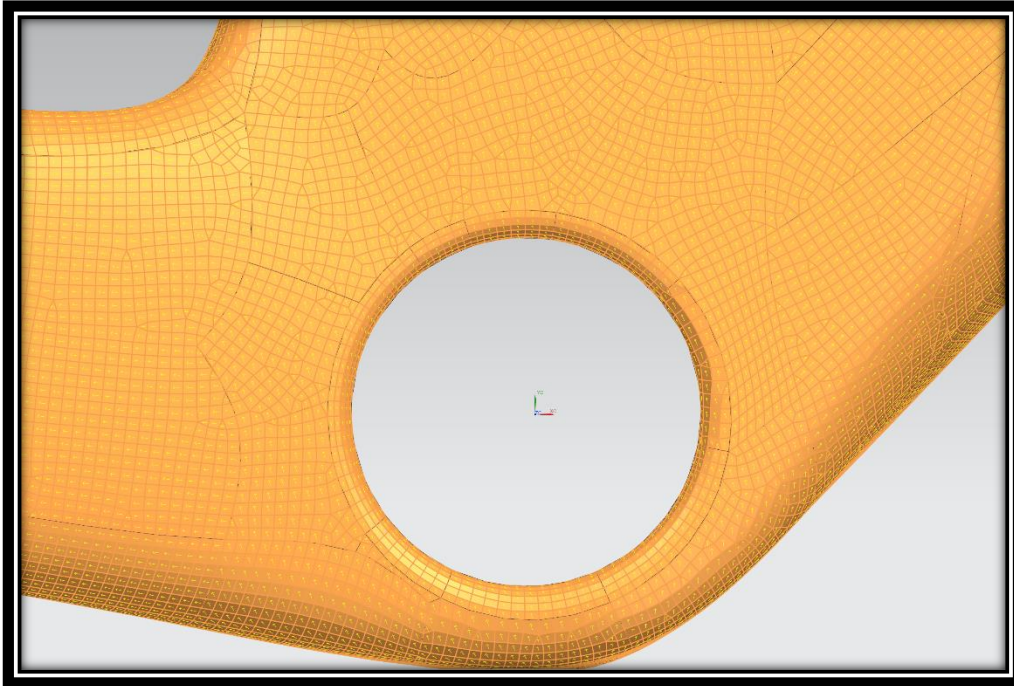
Κατά την αρχική μοντελοποίηση των προτύπων του ISO που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, ο σκελετός επιλέγεται να μοντελοποιηθεί ως αλουμινένιος και πάχους 2 mm, ενώ τα περιφερειακά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε κάθε τεστ μοντελοποιήθηκαν σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Siemens Simcenter 3D. Το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι Cquad4 και χρησιμοποιήθηκε μέθοδος subdivision. Το μέγεθος των στοιχείων είναι 1,5mm και χρησιμοποιείται μέθοδος curved based variation με τιμή 40,4040%. Ακολουθούν ενδεικτικές φωτογραφίες από το πλέγμα.



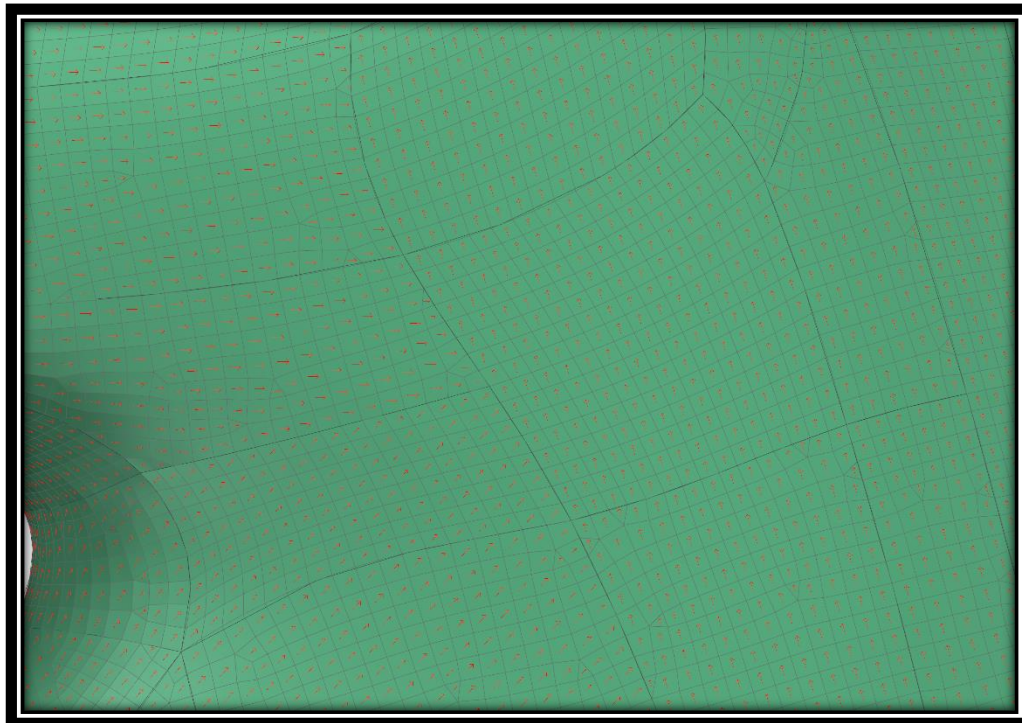
Θ-5.6: Ολόκληρος ο σκελετός με το πλέγμα.



Θ-5.7: Το πλέγμα στην περιοχή της μεσαίας τριβής.



Θ-5.8: Το πλέγμα στην περιοχή της μεσαίας τριβής μαζί με τις κατευθύνσεις των ινών.



Θ-5.9: Το πλέγμα στην περιοχή του κούτελου μαζί με τις κατευθύνσεις των ινών όπως προκύπτουν από το draping.

5.2.1 Δοκιμή πρόσκρουσης με πύπτουσα μάζα

Κατά τη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προτύπου, σχεδιάζεται αντικείμενο κυλινδρικής μορφής διαμέτρου 150 mm, όπως υποδεικνύεται στις προδιαγραφές του ISO, κατάλληλου ύψους και πυκνότητας ώστε η μάζα του να είναι 22,5 kg.

Στον σκελετό προσαρτάται ομοίωμα πιρουνιού όμοιο με αυτό του προτύπου και ολόκληρο το ποδήλατο τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση. Το κυλινδρικό αντικείμενο τοποθετείται 212 mm από την επιφάνεια του κυλίνδρου στο άκρο του πιρουνιού.

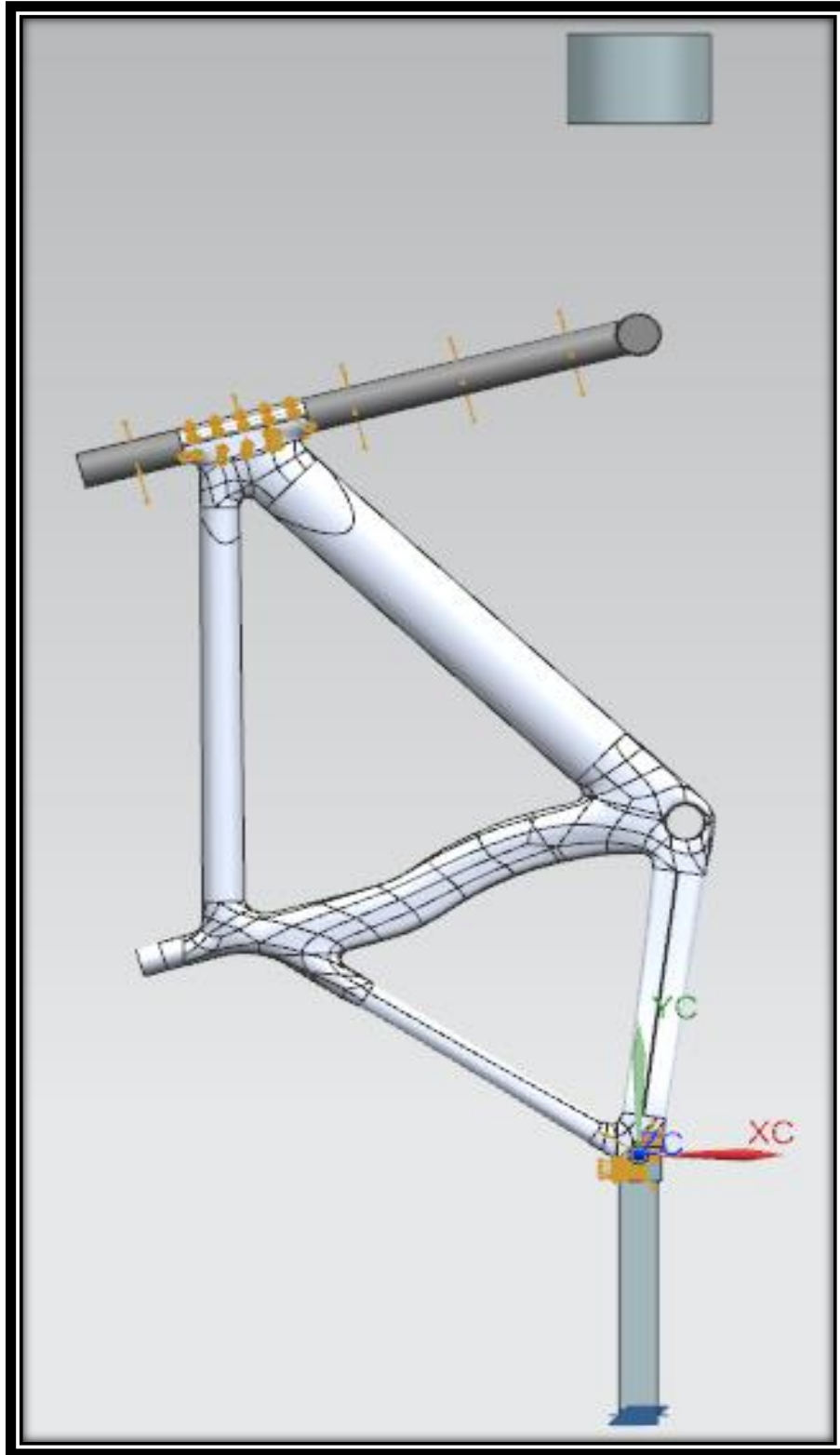
Ο πίσω άξονας του ποδηλάτου πακτώνεται μέσω κατακόρυφου άκαμπτου συνδέσμου και το ομοίωμα πιρουνιού ενώνεται με το σκελετό με “glue contact” (πάκτωση), έτσι ώστε η φόρτιση από την κρούση να περάσει σχεδόν αυτούσια στο πλαίσιο.

Ως φορτίο προσδιορίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας, που επιδρά σε όλο το σύστημα.

Τα κίτρινα βέλη που εμφανίζονται στην Εικόνα Θ-5.10 προσομοιάζουν τις επαφές τύπου “glue contact” (πάκτωση) που μοντελοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη προσομοίωση, ενώ τα αντίστοιχα μπλε τους περιορισμούς κίνησης, που στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται στο κάτω άκρο του άκαμπτου συνδέσμου και προσομοιώνουν την πάκτωσή του.

Το φορτίο που προκύπτει από τη βαρυτική έλξη δεν εμφανίζεται με τη μορφή κάποιου βέλους στο γραφικό περιβάλλον, καθώς ασκείται σε ολόκληρο το σύστημα, ωστόσο σημειώνεται ότι είναι στην κατεύθυνση του άξονα $-YC$.

Ο τύπος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε είναι Non linear dynamic και ο solver ο Sol 402 non linear kinematics.



Θ-5.10 : Απεικόνιση δοκιμής πίπτουσας μάζας.

5.2.2 Δοκιμή πρόσκρουσης του πλαισίου

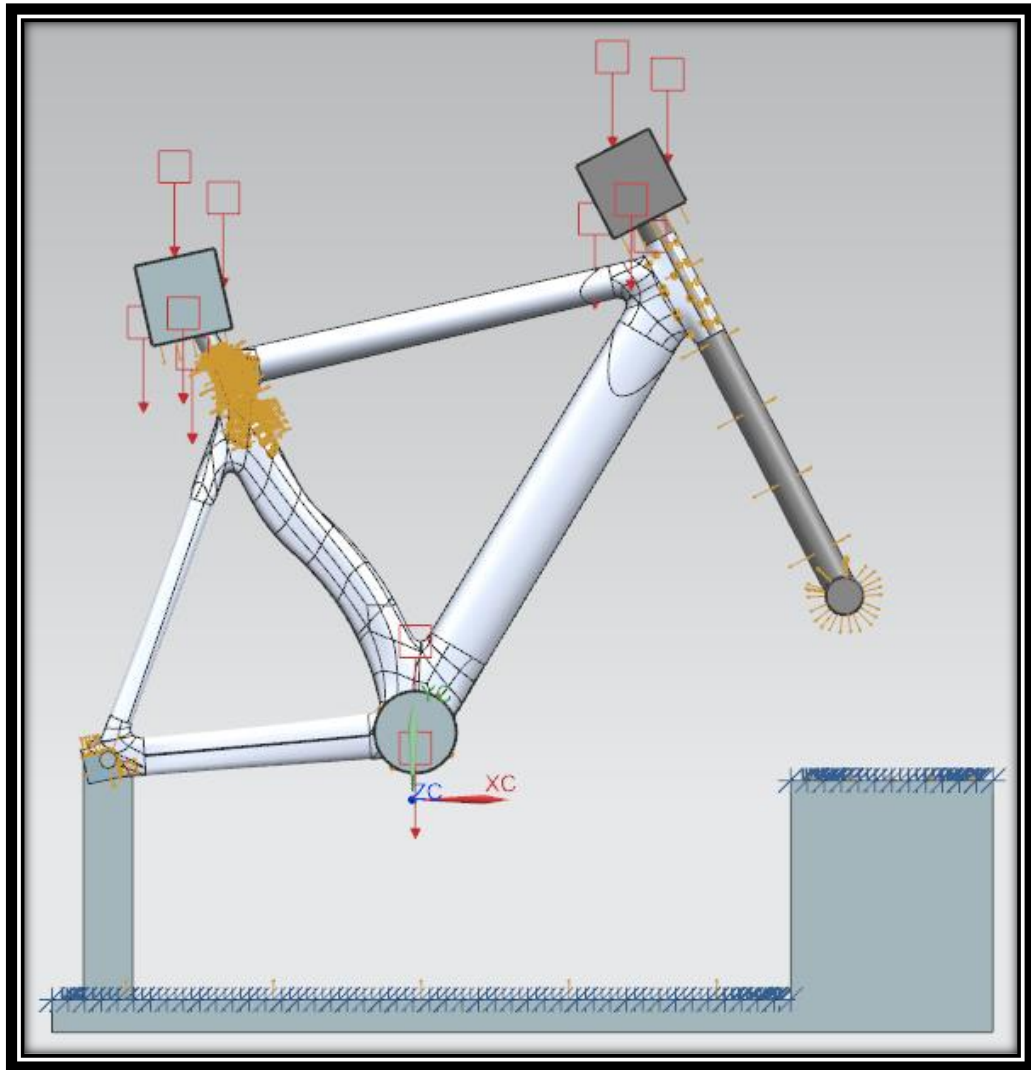
Κατά τη δοκιμή πτώσης και κρούσης του πλαισίου, τοποθετείται και πάλι το ομοίωμα του εμπρόσθιου πιρουνιού και ενώνεται με το κούτελο του σκελετού. Τοποθετούνται αντικείμενα κατάλληλης μάζας στα σημεία που υποδεικνύονται από το πρότυπο.

Συγκεκριμένα τοποθετείται μάζα 30 kg σε απόσταση 75 mm από την κορυφή του σωλήνα σέλλας, μάζα 10 kg στην κορυφή του σωλήνα πρόσδεσης του πιρουνιού ή steerer και δυο μάζες 25 kg εκατέρωθεν της μεσαίας τριβής.

Οι μάζες ενώνονται μέσω επαφών τύπου “glue contact” (πάκτωση) με το πλαίσιο, ενώ ο οπίσθιος άξονας με επαφή τύπου “surface to surface contact με συντελεστή τριβής $\mu=0.5$. Το άκρο του πιρουνιού τοποθετείται σε ύψος 200 mm από την επιφάνεια επαφής με το πάτωμα. Ως φόρτιση επιλέγεται η επιτάχυνση της βαρύτητας κατά τον άξονα $-ZC$.

Στην Εικόνα Θ-5.11 τα κίτρινα βέλη προσδιορίζουν τις επαφές, τα μπλε την πάκτωση του πατώματος και τα κόκκινα τη διεύθυνση της φόρτισης.

Ο τύπος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε είναι Non linear dynamic και ο solver ο Sol 402 non linear kinematics.



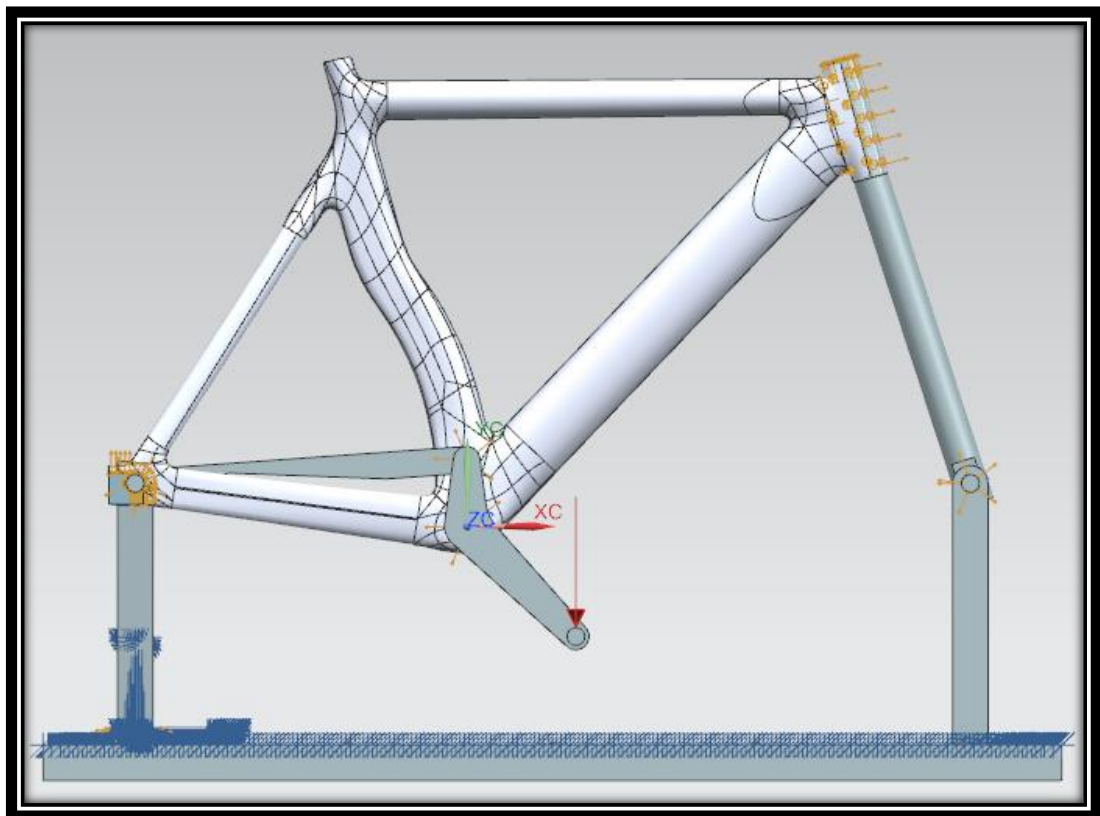
Θ-5.11: Απεικόνιση της δοκιμής πρόσκρουσης του σκελετού.

5.2.3 Δοκιμή φόρτισης με δυνάμεις πεταλαρίσματος

Κατά τη δοκιμή κόπωσης με δυνάμεις πεταλαρίσματος (pedaling), ως ομοίωμα εμπρόσθιου πιρουνιού τοποθετείται σωλήνας ο οποίος στο κάτω άκρο του φέρει άξονα όμοιο με τον εμπρόσθιο άξονα του ποδηλάτου. Ο εμπρόσθιος και ο οπίσθιος άξονες τοποθετούνται στο ίδιο ύψος με τη βοήθεια κατακόρυφων συνδέσμων. Μεταξύ αξόνων και συνδέσμων οι επαφές είναι τύπου “surface to surface contact” με συντελεστή τριβής ολίσθησης $\mu=0.5$. Το άνω άκρο του ομοιώματος πιρουνιού ενώνεται μέσω επαφής τύπου “glue contact” (πάκτωση) με το πλαίσιο. Σχεδιάζεται ένα ομοίωμα πεταλιέρας και αλυσίδα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αντίστοιχου προτύπου του ISO. Ο άξονας του ομοιώματος πεταλιέρας που διέρχεται μέσα από τη μεσαία τριβή ενώνεται

με “surface to surface contact” με το πλαίσιο. Όμοια, το άκρο του ομοιώματος αλυσίδας ενώνεται με τον οπίσθιο άξονα με “surface to surface contact”, ενώ το άλλο του άκρο με “glue contact” (πάκτωση) με το πάνω άκρο του ομοιώματος πεταλιέρας. Ο εμπρόσθιος κατακόρυφος σύνδεσμος πακτώνεται, ενώ στον οπίσθιο, το κάτω άκρο του οποίου σχεδιάζεται ως ημισφαίριο, περιορίζονται μόνο οι μετατοπίσεις στους άξονες X,Y και Z, ενώ οι περιστροφές αφήνονται ελεύθερες. Οι δυνάμεις των 1100N που εφαρμόζονται υπό γωνία 7.5° χωρίζονται κατάλληλα σε δύο δυνάμεις, η μία κατακόρυφη και η άλλη κατά τον άξονα της μεσαίας τριβής. Οι δυνάμεις εκατέρωθεν του σκελετού εφαρμόζονται εναλλάξ για 100.000 κύκλους φόρτισης με συχνότητα εφαρμογής μικρότερη των 10 Hz.

Ο τύπος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρχικά Linear static για να στήσουμε το μοντέλο και να βεβαιωθούμε ότι δουλεύει με χρήση του solver Sol 101 Linear Statics – Global Constrains. Μετά η ανάλυση έγινε Non linear dynamic και ο solver ο Sol 402 non linear kinematics + Advanced Durability (Fatigue)



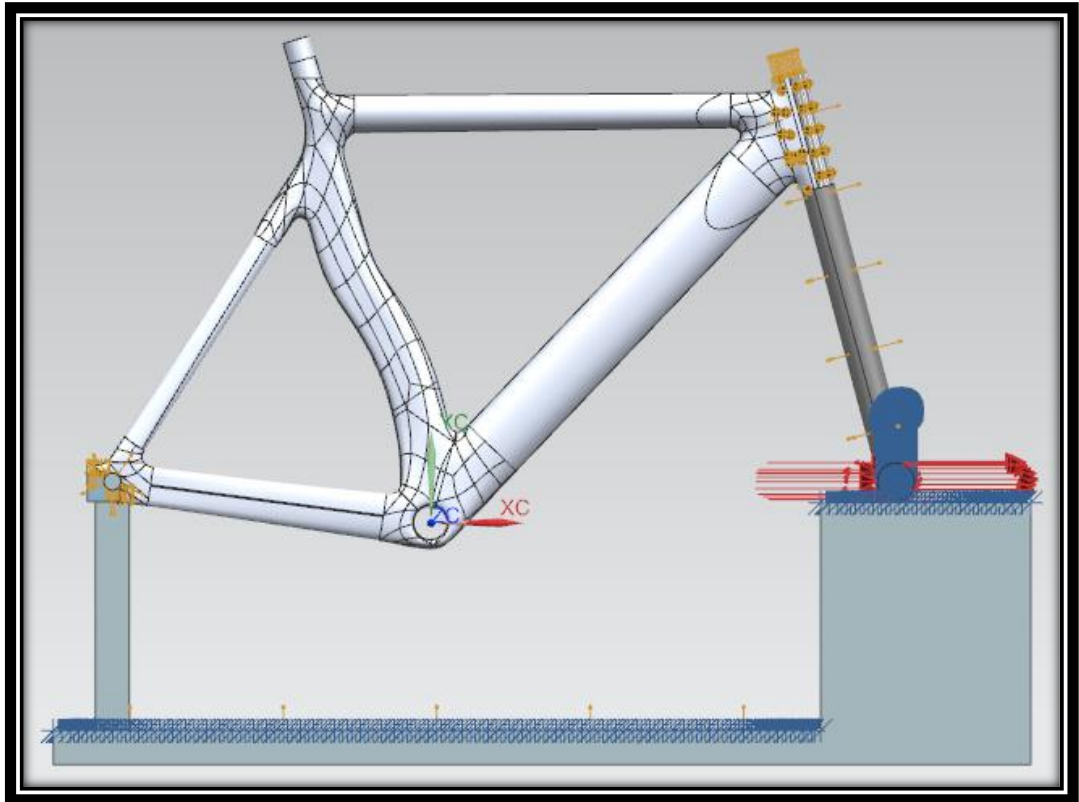
Θ-5.12: Απεικόνιση δοκιμής κόπωσης με δυνάμεις πεταλαρίσματος.

5.2.4 Δοκιμή κόπωσης πλαισίου με οριζόντιες δυνάμεις

Για τη δοκιμή κόπωσης του πλαισίου κατά την εφαρμογή οριζόντιων δυνάμεων, τοποθετείται ξανά ομοίωμα πιρουνιού ενωμένο μέσω “glue contact” (πάκτωση) με το πλαίσιο, ενώ το κάτω άκρο του επιτρέπεται να κινηθεί μόνο κατά τη διεύθυνση XC. Ο οπίσθιος κατακόρυφος σύνδεσμος που στηρίζει τον πίσω άξονα του πλαισίου ενώνεται με “surface to surface contact” με το σκελετό και πακτώνεται στο κάτω άκρο του.

Εφαρμόζονται εναλλάξ δυνάμεις μεγέθους 600 N στο κάτω άκρο του πιρουνιού για 100.000 κύκλους φόρτισης και μέγιστη συχνότητα 10 Hz. Στην εικόνα Θ-5.13 εμφανίζεται ως φόρτιση η δύναμη F_2 του προτύπου με κόκκινα βέλη, ενώ οι επαφές και οι περιορισμοί εμφανίζονται με κίτρινα και μπλε βέλη αντιστοίχως.

Ο τύπος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρχικά Linear static για να στήσουμε το μοντέλο και να βεβαιωθούμε ότι δουλεύει με χρήση του solver Sol 101 Linear Statics – Global Constrains. Μετά η ανάλυση έγινε Non linear dynamic και ο solver ο Sol 402 non linear kinematics + Advanced Durability (Fatigue)



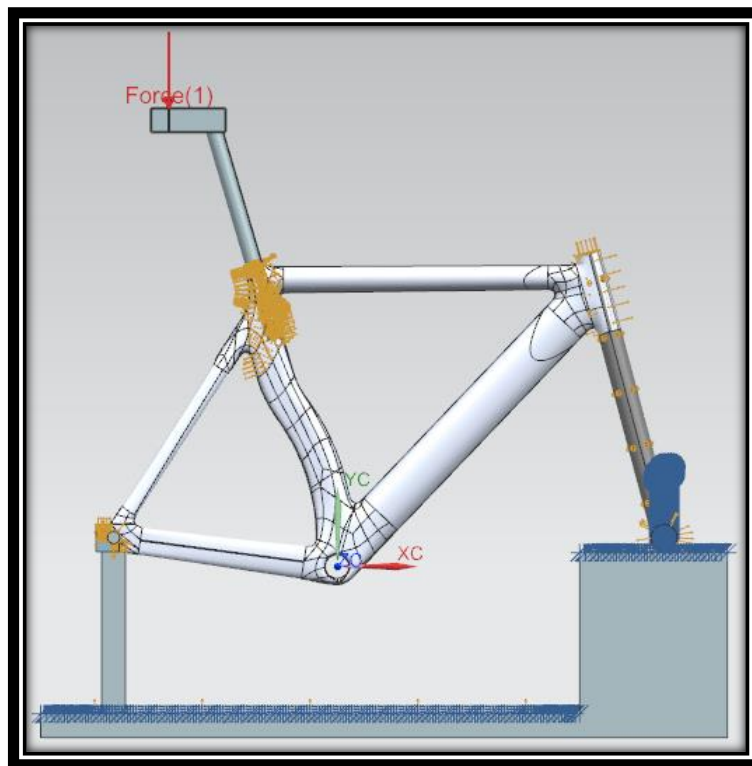
Θ-5.13: Απεικόνιση δοκιμής κόπωσης με οριζόντιες δυνάμεις.

5.2.5 Δοκιμή κόπωσης πλαισίου με κατακόρυφη δύναμη

Για τη μοντελοποίηση της δοκιμής κόπωσης με κατακόρυφη δύναμη στην κορυφή της σέλλας χρησιμοποιήθηκε η ίδια βασική διάταξη με αυτήν της προσομοίωσης με οριζόντιες δυνάμεις. Η βασική προσθήκη είναι το ομοίωμα της σέλλας ενσωματωμένο στο λαιμό του και ενωμένο μέσω “glue contact” (πάκτωση) με την κορυφή του σωλήνα σέλλας του πλαισίου.

Το μήκος του λαιμού σέλλας είναι βάσει του προτύπου 250 mm, ενώ το ομοίωμα σέλλας έχει κατάλληλο μήκος έτσι ώστε η κατακόρυφη δύναμη να εφαρμοστεί στο σημείο που προβλέπεται από το πρότυπο ISO. Η δύναμη των 1200 N εμφανίζεται για 50.000 κύκλους φόρτισης με μέγιστη συχνότητα εφαρμογής της στα 10 Hz.

Ο τύπος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρχικά Linear static για να στήσουμε το μοντέλο και να βεβαιωθούμε ότι δουλεύει με χρήση του solver Sol 101 Linear Statics – Global Constrains. Μετά η ανάλυση έγινε Non linear dynamic και ο solver ο Sol 402 non linear kinematics + Advanced Durability (Fatigue)



Θ-5.14: Απεικόνιση δοκιμής κόπωσης με κατακόρυφη δύναμη.

5.3 Υλικά Πειραματισμού

Όπως προαναφέρθηκε, στις αρχικές προσομοιώσεις των προτύπων το πλαίσιο μοντελοποιήθηκε ως αλουμινένιος σκελετός πάχους 2 mm σε όλα τα τμήματά του. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το κράμα αλουμινίου Al 7075 T651. Οι προσομοιώσεις αυτές κατέδειξαν συγκέντρωση φορτίων σε συγκεκριμένες περιοχές του πλαισίου, διαφορετικές για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα πρότυπα, ενώ εμφάνισαν σχεδόν μηδενικά φορτία σε άλλες. Συνεπώς κρίθηκε απαραίτητη η μεταβολή του πάχους του σκελετού σε κάθε ξεχωριστό τμήμα του πλαισίου, ώστε να ενισχυθούν περιοχές που αναμένεται να εμφανίσουν υψηλά φορτία και να ελαφρύνουν άλλες που φέρουν από ελάχιστα έως μηδενικά φορτία. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψε ένα μοντέλο για το αλουμινένιο πλαίσιο του οποίου οι σωλήνες είχαν μεταβλητό πάχος και πάνω στον οποίο η κατανομή των φορτίων ήταν πιο ομαλή και παντού είχαμε συντελεστή ασφαλείας πάνω από 1,4.

Για την εύρεση της κατάλληλης διαστρωμάτωσης, αρχικά μοντελοποιήθηκε ο σκελετός ως Quasi ιστροπικός με ίδιο αριθμό στρώσεων σε κάθε τμήμα του. Στην πρώτη περίπτωση ως υλικό της διαστρωμάτωσης χρησιμοποιήθηκε το M46J πλεκτό CFRP ύφασμα, ενώ στη δεύτερη το T300 επίσης πλεκτό ύφασμα. Στην πορεία, χρησιμοποιώντας ως βάση το μοντέλο του πλαισίου με μεταβλητά πάχη ανά τμήμα, αναπτύχθηκαν Quasi ιστροπικές διαστρωματώσεις με μεταβλητό αριθμό στρώσεων ανά σωλήνα του πλαισίου. Στη συνέχεια, ανάλογα με τη συγκέντρωση των φορτίων σε κάθε διεύθυνση των πλεκτών στρώσεων και τις συνολικές μετατοπίσεις του σκελετού (δείγμα της δυσκαμψίας του) δοκιμάστηκαν επιπλέον συνταγές διαστρωματώσεων με σκοπό την εύρεση αυτή που προσδίδει καλά χαρακτηριστικά δυσκαμψίας με το μικρότερο δυνατό βάρος και επιτρεπτά όρια φορτίων. Στις νέες αυτές διαστρωματώσεις πέρα από τα πλεκτά υλικά M46J (0,22mm πάχος, twill 2x2, 200g/sqm, 42%RW) και T300 (0,22mm πάχος, 0,22mm πάχος, twill 2x2, 200g/sqm, 42%RW) χρησιμοποιήθηκαν και μονοδιευθυντικά και συγκεκριμένα τα T700 (0,17mm πάχος, 150g/sqm, 36%RW) και M46J UD (0,17mm πάχος, 150g/sqm, 36%RW). Άλλα υλικά που δοκιμάστηκαν όπως τα T800, T1000, M40J, M55J, M60J δεν επιλέχθηκαν το καθένα για διαφορετικό λόγο ενώ γωνίες διαφορετικές των 0,90,45,-45 δεν προτιμήθηκαν αν και δοκιμάστηκαν για κατασκευαστικούς λόγους καθώς και για το ότι δεν προσέφεραν κάποια ουσιαστική διαφορά. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.6 και αναλυτικά στο παράρτημα στο τμήμα με τις ιδιότητες υλικών. Οι ιδιότητες αυτές μας δόθηκαν από την SHD composites η οποία μας προμήθευσε τα υλικά για τις κατασκευές μας. Οι συνταγές των διαστρωματώσεων που ακολουθούν αποτελούν ένα μικρό μέρος των συνολικών δοκιμών που έγιναν και αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά το πλήθος και το εύρος των αλλαγών που δοκιμάστηκαν. Τα αναλυτικά τους αποτελέσματα παρατίθενται στο παράρτημα στο τμήμα με την ανάλυση διαστρωματώσεων.

Πίνακας 5.6: Ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση του πλαισίου

Ιδιότητες	T300 W	T700 UD	M46J W	M46J UD
E1 (GPa)	70,00	135	85	175
E2 (GPa)	70,00	10	85	8
E3 (GPa)	7,00	10	8,5	8
G12 (GPa)	5,00	5	5	5
G13 (GPa)	5,00	5	5	5
G23 (GPa)	5,00	5	5	5
ν_{12}	0,10	0,3	0,1	0,3
ν_{13}	0,10	0,3	0,1	0,3
ν_{23}	0,10	0,3	0,1	0,3
ST1 (MPa)	600,00	1500	350	1000
ST2 (MPa)	600,00	50	350	40
ST3 (MPa)	35,00	30	35	30
SC1 (MPa)	570,00	1200	150	850
SC2 (MPa)	570,00	250	150	200
SC3 (MPa)	35,00	30	35	30
SS12 (MPa)	90,00	70	35	60
SS13 (MPa)				
SS23 (MPa)				
XT1 %	0,85	1,05	0,4	0,55
XT2 %	0,85	0,5	0,4	0,5
XT3 %				
XC1 %	0,80	0,85	0,15	0,45
XC2 %	0,80	2,5	0,15	2,5
XC3 %				
XS12 %	1,80	1,4	0,7	1,2
XS13 %				
XS23 %				
Thermal Expansion Coefficient A1 (Strain/K)	2,10	-0,3	1,1	-0,3
A2 (Strain/K)	2,10	28	1,1	25
A3 (Strain/K)				
ILSS (MPa)	98,04	88,23529412	78,43137255	78,43137255
density g/cm ³	1,44	1,393776354	1,484400043	1,522132752

Στους παρακάτω Πίνακες 5.7-5.18 παρατίθενται οι δοκιμασμένες διαστρωματώσεις και τα αντίστοιχα υλικά.

Πίνακας 5.7: Σενάριο διαστρωμάτωσης M46J Woven Quasi

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	M46J Woven 0/90	2	M46J Woven 0/90	3	M46J Woven 0/90	4	M46J Woven 0/90
9	M46J Woven ±45	10	M46J Woven ±45	11	M46J Woven ±45	12	M46J Woven ±45
17	M46J Woven 0/90	18	M46J Woven 0/90	19	M46J Woven 0/90	20	M46J Woven 0/90
25	M46J Woven ±45	26	M46J Woven ±45	27	M46J Woven ±45	28	M46J Woven ±45
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	M46J Woven 0/90	6	M46J Woven 0/90	7	M46J Woven 0/90	8	M46J Woven 0/90
13	M46J Woven ±45	14	M46J Woven ±45	15	M46J Woven ±45	16	M46J Woven ±45
21	M46J Woven 0/90	22	M46J Woven 0/90	23	M46J Woven 0/90	24	M46J Woven 0/90
29	M46J Woven ±45	30	M46J Woven ±45	31	M46J Woven ±45	32	M46J Woven ±45

Πίνακας 5.8. Σενάριο διαστρωμάτωσης T300 Woven Quasi

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	T300 Woven 0/90	2	T300 Woven 0/90	3	T300 Woven 0/90	4	T300 Woven 0/90
9	T300 Woven ±45	10	T300 Woven ±45	11	T300 Woven ±45	12	T300 Woven ±45
17	T300 Woven 0/90	18	T300 Woven 0/90	19	T300 Woven 0/90	20	T300 Woven 0/90
25	T300 Woven ±45	26	T300 Woven ±45	27	T300 Woven ±45	28	T300 Woven ±45
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	T300 Woven 0/90	6	T300 Woven 0/90	7	T300 Woven 0/90	8	T300 Woven 0/90
13	T300 Woven ±45	14	T300 Woven ±45	15	T300 Woven ±45	16	T300 Woven ±45
21	T300 Woven 0/90	22	T300 Woven 0/90	23	T300 Woven 0/90	24	T300 Woven 0/90
29	T300 Woven ±45	30	T300 Woven ±45	31	T300 Woven ±45	32	T300 Woven ±45

Πίνακας 5.9. 1^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	T300 Woven ±45	2	T300 Woven ±45	3	T300 Woven ±45	4	T300 Woven ±45
9	T300 Woven 0/90	10	T300 Woven 0/90	11	T300 Woven 0/90	12	T300 Woven 0/90
17	T300 Woven ±45	18	T300 Woven ±45	19	T300 Woven ±45	20	T300 Woven ±45
25	T300 Woven 0/90	26	T300 Woven 0/90	27	T300 Woven 0/90	28	T300 Woven 0/90
33	T300 Woven ±45			34	T300 Woven ±45	35	T300 Woven ±45
37	T300 Woven 0/90			38	T300 Woven 0/90	39	T300 Woven 0/90
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	T300 Woven ±45	6	T300 Woven ±45	7	T300 Woven ±45	8	T300 Woven ±45
13	T300 Woven 0/90	14	T300 Woven 0/90	15	T300 Woven 0/90	16	T300 Woven 0/90
21	T300 Woven ±45	22	T300 Woven ±45	23	T300 Woven ±45	24	T300 Woven ±45
29	T300 Woven 0/90	30	T300 Woven 0/90	31	T300 Woven 0/90	32	T300 Woven 0/90
						36	T300 Woven ±45
						40	T300 Woven 0/90

Πίνακας 5.10. 2^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	T300 Woven ±45	2	T300 Woven ±45	3	T300 Woven ±45	4	T300 Woven ±45
9	T300 Woven 0/90	10	T300 Woven 0/90	11	T300 Woven 0/90	12	T300 Woven 0/90
17	T300 Woven ±45	18	T300 Woven ±45	19	T300 Woven ±45	20	T300 Woven ±45
25	T300 Woven 0/90	26	T300 Woven 0/90	27	T300 Woven 0/90	28	T300 Woven 0/90
33	T300 Woven ±45			34	T300 Woven ±45		
37	T300 Woven 0/90			38	T300 Woven 0/90		
41	T300 Woven ±45						
43	T300 Woven 0/90						
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	T300 Woven ±45	6	T300 Woven ±45	7	T300 Woven ±45	8	T300 Woven ±45
13	T300 Woven 0/90	14	T300 Woven 0/90	15	T300 Woven 0/90	16	T300 Woven 0/90
21	T300 Woven ±45	22	T300 Woven ±45	23	T300 Woven ±45	24	T300 Woven ±45
29	T300 Woven 0/90	30	T300 Woven 0/90	31	T300 Woven 0/90	32	T300 Woven 0/90
				35	T300 Woven ±45	36	T300 Woven ±45
				39	T300 Woven 0/90	40	T300 Woven 0/90
						42	T300 Woven ±45
						44	T300 Woven 0/90

Πίνακας 5.11. 3^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	T300 Woven ±45	2	T300 Woven ±45	3	T300 Woven ±45	4	T300 Woven ±45
9	T300 Woven 0/90	10	T700 UD 0	11	T700 UD 0	12	T700 UD 0
17	T300 Woven ±45	18	T300 Woven ±45	19	T300 Woven ±45	20	T300 Woven 0/90
25	T300 Woven 0/90	26	T300 Woven 0/90	27	T700 UD 0	28	T700 UD 0
33	T300 Woven ±45			34	T300 Woven ±45	35	T700 UD 0
38	T300 Woven 0/90			39	T700 UD 0		
42	T300 Woven ±45						
44	T300 Woven 0/90						
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	T300 Woven ±45	6	T300 Woven ±45	7	T300 Woven ±45	8	T300 Woven ±45
13	T700 UD 0	14	T700 UD 0	15	T700 UD 0	16	T700 UD 0
21	T300 Woven ±45	22	T300 Woven ±45	23	T300 Woven ±45	24	T300 Woven ±45
29	T300 Woven 0/90	30	T300 Woven 0/90	31	T700 UD 0	32	T700 UD 0
				36	T300 Woven ±45	37	T300 Woven ±45
				40	T300 Woven 0/90	41	T300 Woven 0/90
						43	T300 Woven ±45
						45	T700 UD 0

Πίνακας 5.12. 4^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	T300 Woven ±45	2	T300 Woven ±45	3	T300 Woven ±45	4	T300 Woven ±45
9	T300 Woven 0/90	10	T700 UD 0	11	T700 UD 0	12	T700 UD 0
17	T300 Woven ±45	18	T300 Woven ±45	19	T300 Woven ±45	20	T300 Woven 0/90
25	T300 Woven 0/90			26	T700 UD 0	27	T700 UD 0
30	T300 Woven ±45			31	T300 Woven ±45	32	T700 UD 0
35	T300 Woven 0/90			36	T700 UD 0		
39	T300 Woven ±45						
41	T300 Woven 0/90						
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	T300 Woven ±45	6	T300 Woven ±45	7	T300 Woven ±45	8	T300 Woven ±45
13	T700 UD 0	14	T700 UD 0	15	T700 UD 0	16	T700 UD 0
21	T300 Woven ±45	22	T300 Woven ±45	23	T300 Woven ±45	24	T300 Woven ±45
				28	T700 UD 0	29	T700 UD 0
				33	T300 Woven ±45	34	T300 Woven ±45
				37	T700 UD 0	38	T700 UD 0
						40	T300 Woven ±45
						42	T700 UD 0

Πίνακας 5.13. 5^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	M46J UD +45	2	M46J UD +45	3	M46J UD +45	4	M46J UD +45
9	M46J UD -45	10	M46J UD -45	11	M46J UD -45	12	M46J UD -45
17	M46J UD 0	18	M46J UD 0	19	M46J UD 0	20	M46J UD 0
25	M46J UD 90			26	M46J UD +45	27	M46J UD 90
30	M46J UD +45			31	M46J UD -45	32	M46J UD 0
35	M46J UD -45			36	M46J UD 0	37	M46J UD 0
40	M46J UD 0			41	M46J UD +45	42	M46J UD 0
44	M46J UD 90			45	M46J UD -45		
47	M46J UD +45			48	M46J UD 0		
50	M46J UD -45						
51	M46J UD 0						
52	M46J UD 90						
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	M46J UD +45	6	M46J UD +45	7	M46J UD +45	8	M46J UD +45
13	M46J UD -45	14	M46J UD -45	15	M46J UD -45	16	M46J UD -45
21	M46J UD 0	22	M46J UD 0	23	M46J UD 0	24	M46J UD 0
				28	M46J UD +45	29	M46J UD +45
				33	M46J UD -45	34	M46J UD -45
				38	M46J UD 0	39	M46J UD 0
						43	M46J UD +45
						46	M46J UD -45
						49	M46J UD 0

Πίνακας 5.14. 6^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	M46J Woven ±45	2	T300 Woven ±45	3	M46J Woven ±45	4	M46J Woven ±45
9	M46J Woven 0/90	10	T700 UD 0	11	M46J UD 0	12	M46J UD 0
17	M46J Woven ±45	18	T300 Woven ±45	19	M46J Woven ±45	20	M46J Woven 0/90
25	M46J Woven 0/90			26	M46J UD 0	27	M46J UD 0
30	M46J Woven ±45			31	M46J Woven ±45	32	M46J UD 0
35	M46J Woven 0/90			36	M46J UD 0		
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	T300 Woven ±45	6	T300 Woven ±45	7	M46J Woven ±45	8	M46J Woven ±45
13	T700 UD 0	14	T700 UD 0	15	M46J UD 0	16	M46J UD 0
21	T300 Woven ±45	22	T300 Woven ±45	23	M46J Woven ±45	24	M46J Woven ±45
				28	M46J UD 0	29	M46J UD 0
				33	M46J Woven ±45	34	M46J Woven ±45
				37	M46J UD 0	38	M46J UD 0
						39	M46J Woven ±45
						40	M46J UD 0

Πίνακας 5.15. 7^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	M46J Woven ±45	2	M46J Woven ±45	3	M46J Woven ±45	4	M46J Woven ±45
9	M46J Woven 0/90	10	M46J UD 0	11	M46J UD 0	12	M46J UD 0
17	M46J Woven ±45	18	M46J Woven ±45	19	M46J Woven ±45	20	M46J Woven 0/90
25	M46J Woven 0/90			26	M46J UD 0	27	M46J UD 0
30	M46J Woven ±45			31	M46J Woven ±45	32	M46J UD 0
35	M46J Woven 0/90			36	M46J UD 0		
39	M46J Woven ±45						
41	M46J Woven 0/90						
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	M46J Woven ±45	6	M46J Woven ±45	7	M46J Woven ±45	8	M46J Woven ±45
13	M46J UD 0	14	M46J UD 0	15	M46J UD 0	16	M46J UD 0
21	M46J Woven ±45	22	M46J Woven ±45	23	M46J Woven ±45	24	M46J Woven ±45
				28	M46J UD 0	29	M46J UD 0
				33	M46J Woven ±45	34	M46J Woven ±45
				37	M46J UD 0	38	M46J UD 0
						40	M46J Woven ±45
						42	M46J UD 0

Πίνακας 5.16. 8^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	M46J Woven ±45	2	M46J Woven ±45	3	M46J Woven ±45	4	M46J Woven ±45
9	M46J Woven 0/90	10	M46J Woven 0/90	11	M46J UD 0	12	M46J UD 0
17	M46J Woven ±45			18	M46J Woven ±45	19	M46J Woven 0/90
22	M46J Woven 0/90			23	M46J UD 0	24	M46J UD 0
27	M46J Woven ±45			28	M46J Woven ±45	29	M46J UD 0
32	M46J Woven 0/90			33	M46J UD 0		
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	M46J Woven ±45	6	M46J Woven ±45	7	M46J Woven ±45	8	M46J Woven ±45
13	M46J Woven 0/90	14	M46J Woven 0/90	15	M46J UD 0	16	M46J UD 0
				20	M46J Woven ±45	21	M46J Woven ±45
				25	M46J UD 0	26	M46J UD 0
				30	M46J Woven ±45	31	M46J Woven ±45
				34	M46J UD 0	35	M46J UD 0
						36	M46J Woven ±45
						37	M46J UD 0

Πίνακας 5.17. 9^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	M46J Woven ±45	2	M46J Woven ±45	3	M46J Woven ±45	4	M46J Woven ±45
9	M46J Woven 0/90	10	M46J UD 0	11	M46J UD 0	12	M46J UD 0
17	M46J Woven ±45	18	M46J Woven ±45	19	M46J Woven ±45	20	M46J Woven 0/90
25	M46J Woven 0/90	26	M46J UD 0	27	M46J UD 0	28	M46J UD 0
33	M46J Woven ±45	34	M46J Woven ±45	35	M46J Woven ±45	36	M46J UD 0
41	M46J Woven 0/90	42	M46J UD 0	43	M46J UD 0	44	M46J Woven ±45
49	M46J Woven ±45			50	M46J Woven ±45	51	M46J UD 0
54	M46J Woven 0/90			55	M46J UD 0	56	M46J Woven 0/90
59	M46J Woven ±45					60	M46J UD 0
62	M46J Woven 0/90						
64	M46J Woven ±45						
65	M46J Woven 0/90						
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	M46J Woven ±45	6	M46J Woven ±45	7	M46J Woven ±45	8	M46J Woven ±45
13	M46J UD 0	14	M46J UD 0	15	M46J UD 0	16	M46J UD 0
21	M46J Woven ±45	22	M46J Woven ±45	23	M46J Woven ±45	24	M46J Woven ±45
29	M46J UD 0	30	M46J UD 0	31	M46J UD 0	32	M46J UD 0
37	M46J Woven ±45	38	M46J Woven ±45	39	M46J Woven ±45	40	M46J Woven ±45
45	M46J UD 0	46	M46J UD 0	47	M46J UD 0	48	M46J UD 0
				52	M46J Woven ±45	53	M46J Woven ±45
				57	M46J UD 0	58	M46J UD 0
						61	M46J Woven ±45
						63	M46J UD 0

Πίνακας 5.18. 10^ο Σενάριο διαστρωμάτωσης

	HEADTUBE		TOPTUBE		DOWNTUBE		SEAT TUBE
1	T700 UD +45	2	T700 UD +45	3	T700 UD +45	4	T700 UD +45
9	T700 UD -45	10	T700 UD -45	11	T700 UD -45	12	T700 UD -45
17	T700 UD 0	18	T700 UD 0	19	T700 UD 0	20	T700 UD 0
25	T700 UD 90			26	T700 UD +45	27	T700 UD 90
30	T700 UD +45			31	T700 UD -45	32	T700 UD 0
35	T700 UD -45			36	T700 UD 0	37	T700 UD 1
40	T700 UD 0			41	T700 UD +45	42	T700 UD 2
44	T700 UD 90			45	T700 UD -45		
47	T700 UD +45			48	T700 UD 0		
50	T700 UD -45						
51	T700 UD 0						
52	T700 UD 90						
53	T700 UD 90						
	SEATSTAY (LEFT)		SEATSTAY (RIGHT)		CHAINSTAY (LEFT)		CHAINSTAY (RIGHT)
5	T700 UD +45	6	T700 UD +45	7	T700 UD +45	8	T700 UD +45
16	T700 UD -45	14	T700 UD -45	15	T700 UD -45	16	T700 UD -45
21	T700 UD 0	22	T700 UD 0	23	T700 UD 0	24	T700 UD 0
				28	T700 UD +45	29	T700 UD +45
				33	T700 UD -45	34	T700 UD -45
				38	T700 UD 0	39	T700 UD 0
						43	T700 UD +45
						46	T700 UD -45
						49	T700 UD 0

5.4 Συμπεράσματα ανάλυσης

Η επιλογή της κατάλληλης συνταγής διαστρωμάτωσης εξαρτήθηκε από συγκεκριμένες παραμέτρους που αφορούν τη συμπεριφορά του τελικού πλαισίου. Αρχικά, επιδιώκεται ένα κατά το δυνατόν χαμηλό βάρος σε συνδυασμό με επιτρεπτά φορτία και μετατοπίσεις. Άρα, η τελική διαστρωμάτωση θα πρέπει να έχει τον ελάχιστο αριθμό στρώσεων με τον οποίο τα φορτία κατά τις διάφορες προσομοιώσεις δεν ξεπερνούν το 70-80% του μέγιστου φορτίου που μπορεί να φέρει κάθε στρώση σε κάθε διεύθυνσή της. Επίσης θα πρέπει να ικανοποιεί όλα τα κριτήρια αστοχίας που μπορούν να εφαρμοστούν ανά περίπτωση, πχ τα Hill, Hoffman, Tsai Wu , Max Strain, Max Stress, Von Mises Yield, Von Mises Ultimate, Puck, LaRC02.

Όσον αφορά στις μετατοπίσεις ή αλλιώς στη στιβαρότητα του πλαισίου, επιλέγεται η τελική συνταγή διαστρωμάτωσης η οποία προσφέρει μεγάλη δυσκαμψία στο σύστημα μετάδοσης, δηλαδή μικρή πλευρική μετατόπιση στα κάτω ψαλίδια, το κάτω

μέρος του σωλήνα σέλλας και τον κάτω σωλήνα, και στο κούτελο, έτσι ώστε το πιρούνι και ο σκελετός να μη στρεβλώνουν όταν το ποδήλατο στρίβει. Παράλληλα, είναι απαραίτητο συγκεκριμένες περιοχές του πλαισίου, όπως ο άνω σωλήνας, τα άνω ψαλίδια και το πάνω μέρος του σωλήνα σέλλας, να είναι πιο ενδοτικά, δηλαδή να εμφανίζουν μετατοπίσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα Z, έτσι ώστε να μπορούν να απορροφηθούν οι κραδασμοί του οδοστρώματος και να προσφέρουν ένα βαθμό άνεσης στον αναβάτη.

Με τα παραπάνω κριτήρια υπόψιν, η διαστρωμάτωση που επιλέχθηκε και εμφάνιζε τον καλύτερο συνδυασμό χαμηλού βάρους, φορτίων και μετατοπίσεων είναι το 8^ο Σενάριο Διαστρωμάτωσης.

5.4.1 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Drop Test

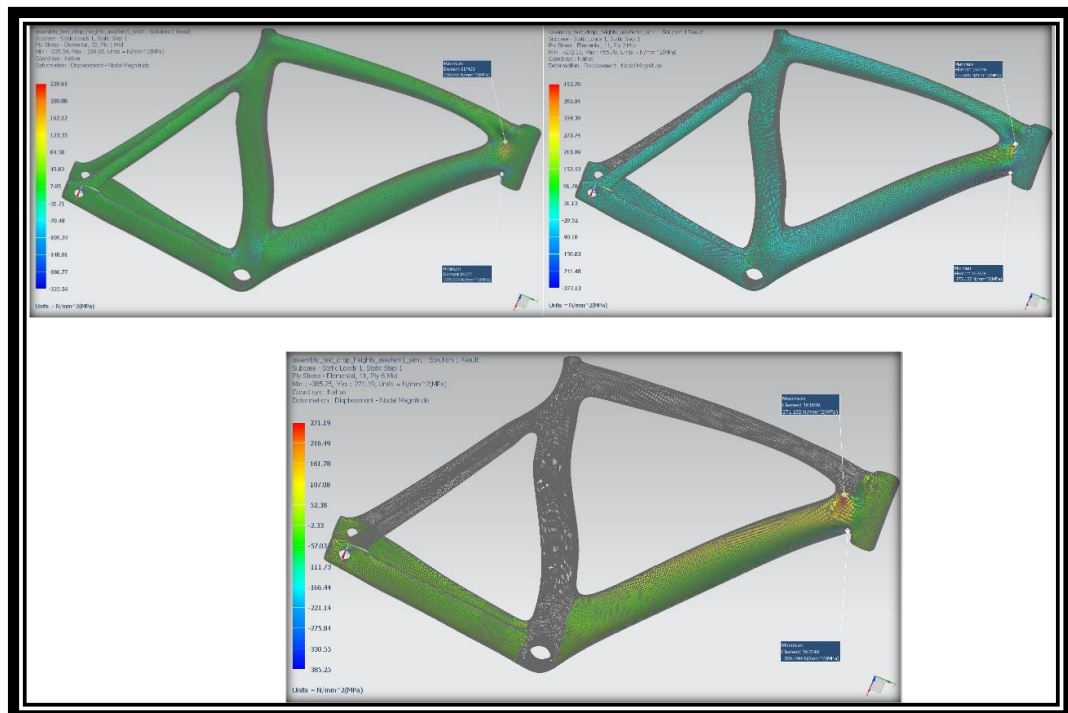
Κατά την πειραματική διαδικασία του Drop Test, όσον αφορά στις παραμορφώσεις του σκελετού λόγω τάσεων, παρατηρήθηκε εφελκυσμός, κυρίως στα πίσω ψαλίδια στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον εμπρός σωλήνα και στα πίσω ψαλίδια στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στο κάτω κέντρο του σκελετού στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 0.5 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στον επάνω και κάτω σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον κάτω και στον εμπρός σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον εμπρός και τον κάτω σωλήνα, καθώς και στο κέντρο του σκελετού, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 1.5 χιλιοστό. Οι άξονες αυτοί να σημειωθεί πως έχουν οριστεί με βάση το επίπεδο του κάθε σωλήνα ξεχωριστά (X άξονας/οριζόντια διεύθυνση σωλήνα, Y άξονας/κάθετη διεύθυνση σωλήνα). Στις παρακάτω απεικονίσεις ενδέχεται κάποια από τα κομμάτια του σκελετού να έχουν ένα σκοτεινό γκρι χρώμα, πράγμα το οποίο οφείλεται στην απεικόνιση του υπολογιστικού προγράμματος όταν δεν υπάρχουν πλέον στρώσεις στα συγκεκριμένα κομμάτια σκελετού (π.χ. κανονική απεικόνιση 6^{ης} στρώσης εμπρός σωλήνα, ενώ οι στρώσεις του επάνω σωλήνα περιορίζονται στις 4).

Στο 8^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην ένωση μεταξύ άνω και κάτω σωλήνα, στη 2^η στρώση που φτάνουν το μέγιστο των 455 MPa, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 272 MPa. Στο ίδιο σημείο παρατηρούνται κατά τον Y άξονα στην 1^η στρώση μέγιστα 239 MPa, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 134 MPa. Επίσης παρατηρούνται θλιπτικές τάσεις κατά τον X άξονα στην ένωση κάτω και εμπρός σωλήνα, στην 6^η στρώση μέγιστης τιμής 385 MPa με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 281 MPa. Στο ίδιο σημείο παρατηρούνται τάσεις κατά τον Y άξονα στην 1^η στρώση με μέγιστη τιμή τα 225 MPa, και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 213 MPa. Τα μέγιστα τιμών τάσεων που παρατηρούνται στις παραπάνω στρώσεις στα προαναφερθέντα σημεία δεν ξεπερνούν τα όρια αντοχής τάσεων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Άρα, στα προβληματικά σημεία δε συνιστάται η προσθαφαίρεση στρώσεων λόγω καλής συμπεριφοράς και λίγων στρώσεων. Στον υπόλοιπο σκελετό θα

μπορούσε να γίνει αφαίρεση στρώσεων ή αντικατάσταση με ελαφρύτερες μικρότερης αντοχής σε σημεία με μικρή φόρτιση.

Πίνακας 5.19: Αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στη δοκιμή Drop Test

	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-3,85E+05	-1,13E+04	0,00E+00	-1,62E+03	3,19E-14	0,00E+00	1,87E+05
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	4,56E+05	-6,03E+03	0,00E+00	4,90E+03	1,04E+04	9,20E+03	2,31E+05
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-2,73E+04	2,26E+05	0,00E+00	-9,71E+03	8,61E+00	1,99E+03	9,96E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-7,42E+03	2,40E+05	0,00E+00	1,50E+04	-9,76E+03	-4,85E+03	1,24E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,85E+04	3,81E+04	0,00E+00	4,75E+03	-7,15E+02	1,13E+03	2,87E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,85E+04	3,81E+04	0,00E+00	4,75E+03	-7,15E+02	1,13E+03	2,87E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	1,17E+05	3,61E+04	0,00E+00	-2,76E+04	9,94E+03	4,01E+03	4,91E+04
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	2,36E+05	2,96E+03	0,00E+00	1,63E+04	3,98E+03	-2,29E+03	1,18E+05
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	3,95E+03	-6,57E+04	0,00E+00	-1,62E+03	-1,36E+05	4,96E+04	3,49E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-8,21E+04	2,14E+04	0,00E+00	-1,50E+03	5,23E+04	-3,42E+04	5,18E+04
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	2,23E+03	-6,20E+04	0,00E+00	-1,69E+03	9,98E+02	-4,32E+04	3,21E+04
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	3,95E+03	-6,57E+04	0,00E+00	-1,62E+03	-1,36E+05	4,96E+04	3,49E+04
Min Maximum Shear Stress	2	chainstay_right	Interlaminar	1,97E+02	1,96E+02	0,00E+00	3,78E-01	-1,14E+01	4,23E+00	6,65E-01
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	4,56E+05	-6,03E+03	0,00E+00	4,90E+03	1,04E+04	9,20E+03	2,31E+05



Θ-5.15: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.

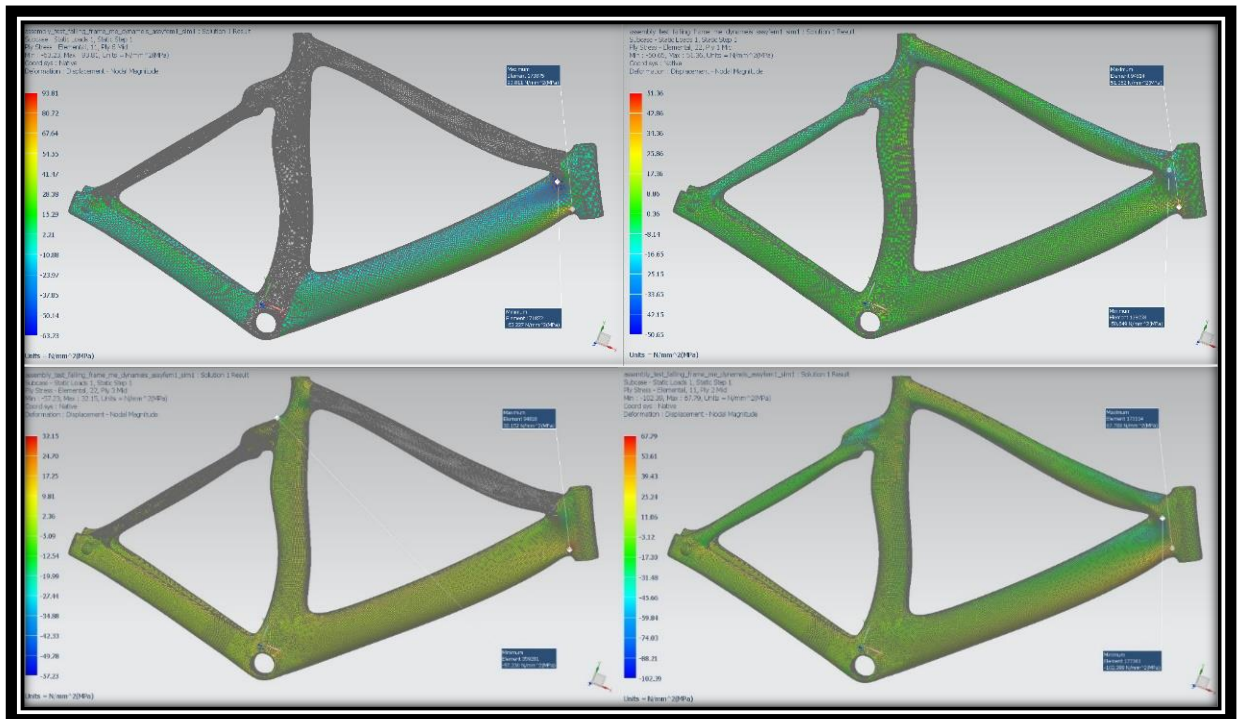
5.4.2 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Falling Frame Test

Κατά την πειραματική διαδικασία του Falling Frame, όσον αφορά στις παραμορφώσεις του σκελετού λόγω τάσεων, παρατηρήθηκε εφελκυσμός, κυρίως στον κάτω σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στα πίσω ψαλίδια στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στο δεξί κάτω ψαλίδι, στην ένωση των ψαλιδιών με το σωλήνα σέλλας και στο κάτω κέντρο του σκελετού στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δεν ξεπέρασε τα 0.32 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στα πίσω ψαλίδια και στη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον κάτω και τον άνω σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον εμπρός και τον κάτω σωλήνα κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει τα 0.5 χιλιοστά.

Στο 8^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 93.8 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 70 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 51.4 MPa στην 1^η στρώση στο ίδιο σημείο, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 50.5 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 102 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 69 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 57 MPa στην 3^η στρώση στην ένωση άνω ψαλιδιών με το σωλήνα σέλλας, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 51 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στη δοκιμή Falling Frame Test

	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² 2 (kPa)	mN/mm ² 2 (kPa)	mN/mm ² 2 (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² 2 (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-1,02E+05	1,28E+03	0,00E+00	-1,10E+03	-2,26E+03	-1,70E+03	5,18E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	9,38E+04	2,50E+03	0,00E+00	-4,25E+02	1,28E-14	0,00E+00	4,57E+04
Min Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-1,81E+04	-5,72E+04	0,00E+00	-4,95E+03	-3,04E+02	-2,59E+02	2,02E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	5,81E+03	5,14E+04	0,00E+00	2,25E+03	6,47E+00	-4,35E+02	2,29E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	5,11E+03	-1,71E+04	0,00E+00	-1,70E+03	3,25E+02	-5,68E+02	1,13E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	5,11E+03	-1,71E+04	0,00E+00	-1,70E+03	3,25E+02	-5,68E+02	1,13E+04
Min Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	-4,43E+04	-4,79E+04	0,00E+00	-5,90E+03	-5,18E+01	-1,22E+02	6,17E+03
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-5,76E+04	-8,22E+02	0,00E+00	6,31E+03	-3,36E-13	0,00E+00	2,91E+04
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	1,76E+04	-5,28E+03	0,00E+00	4,68E+02	-1,27E+04	8,33E+03	1,14E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-1,23E+03	1,52E+04	0,00E+00	3,86E+02	3,51E+04	-1,17E+04	8,23E+03
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-1,61E+03	1,64E+04	0,00E+00	4,93E+02	-4,09E+02	-1,28E+04	9,03E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-8,75E+02	1,44E+04	0,00E+00	4,27E+02	-5,92E+01	1,02E+04	7,65E+03
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_left	Interlaminar	1,02E+01	9,67E+00	0,00E+00	-2,72E-01	4,36E-01	-5,59E+00	3,89E-01
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	-1,02E+05	1,28E+03	0,00E+00	-1,10E+03	-2,26E+03	-1,70E+03	5,18E+04



Θ-5.16: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.

5.4.3 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Horizontal Forces Test

Κατά την πειραματική διαδικασία του Horizontal Forces, όσον αφορά στις παραμορφώσεις του σκελετού λόγω εφαρμογής τάσεων, για την πρώτη περίπτωση παρατηρήθηκε εφελκυσμός κυρίως στον κάτω σωλήνα και τον εμπρός στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στα πίσω ψαλίδια στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στο δεξί κάτω ψαλίδι, στην ένωση των ψαλιδιών με το σωλήνα της σέλλας και στην ένωση κάτω σωλήνα με εμπρός, καθώς και στο κάτω κέντρο του σκελετού στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 0.3 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στα πίσω ψαλίδια και στη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον άνω σωλήνα και στον κάτω στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον κάτω σωλήνα, στη μέση και στο αριστερό κάτω ψαλίδι κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 0.25 χιλιοστά. Για τη δεύτερη περίπτωση παρατηρήθηκε εφελκυσμός κυρίως στον κάτω σωλήνα και τον εμπρός στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στα πίσω ψαλίδια και στο σωλήνα σέλλας στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στο δεξί κάτω ψαλίδι, στην ένωση των ψαλιδιών με το σωλήνα σέλλας και στην ένωση κάτω σωλήνα με εμπρός, καθώς και στο κάτω κέντρο, το δεξί κάτω ψαλίδι και στην ένωση κάτω με εμπρός σωλήνα του σκελετού στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως

δεν ξεπέρασε τα 0.3 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στα πίσω ψαλίδια και στη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον άνω σωλήνα και στον κάτω στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον κάτω σωλήνα, στη μέση και στο αριστερό κάτω ψαλίδι κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει τα 0.3 χιλιοστά.

Στο 8^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 76.6 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 56.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 45.3 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 42.4 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 74.7 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 46.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα 40.1 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 25.2 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 74.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 46.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 40.1 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 25.2 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 76.6 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 6^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 56.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 45.3 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 42.4 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

Πίνακας 5.21: Συνολικά αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στις δύο περιπτώσεις της δοκιμής Horizontal Forces Test

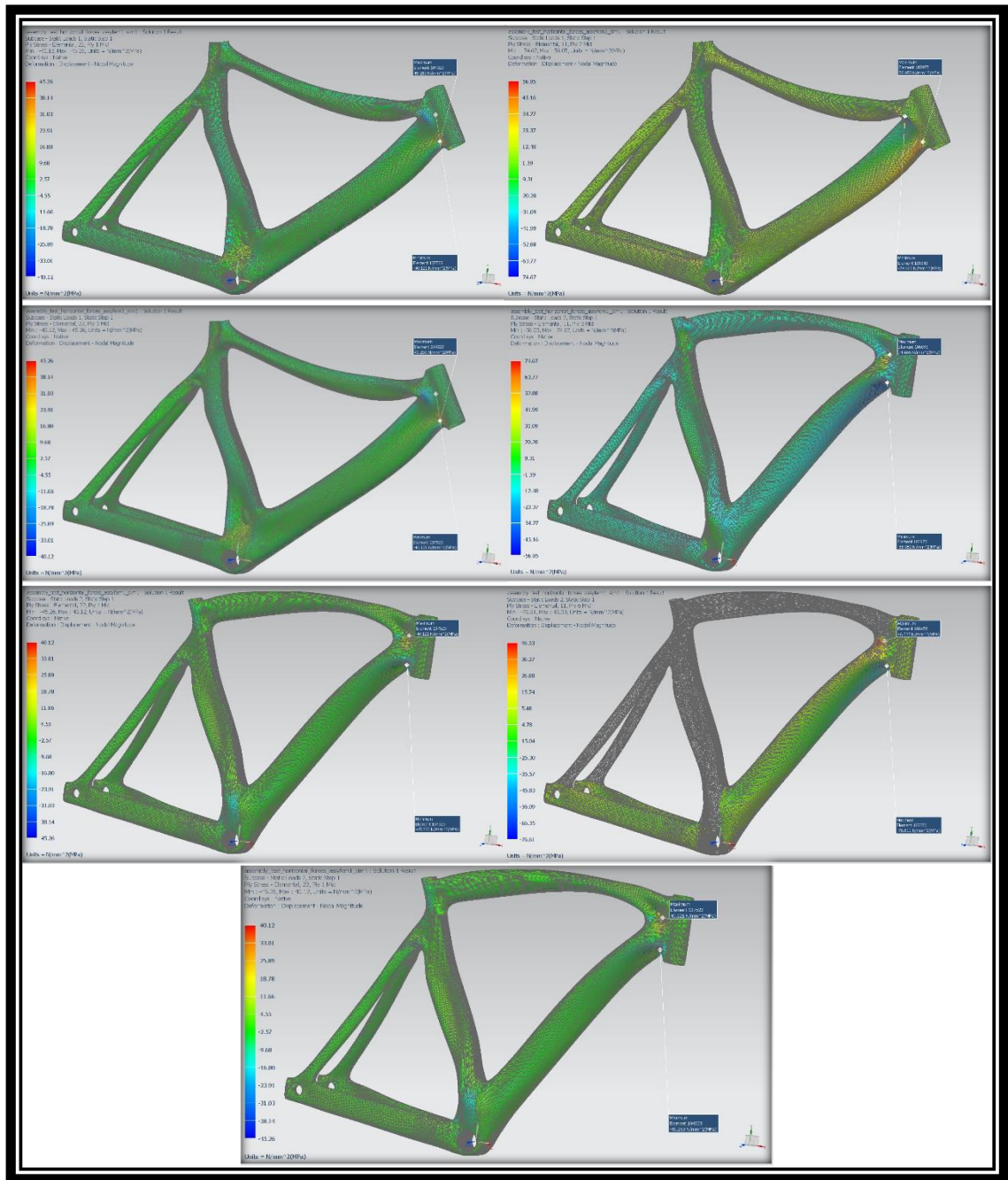
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	6	down_tube	Interlaminar	-7,66E+04	-2,14E+03	0,00E+00	-3,81E+02	5,79E-15	0,00E+00	3,72E+04
Max Stress 11	1	6	down_tube	Interlaminar	7,66E+04	2,14E+03	0,00E+00	3,81E+02	-5,79E-15	0,00E+00	3,72E+04
Min Stress 22	2	1	head_tube	Interlaminar	-1,80E+03	-4,53E+04	0,00E+00	-1,91E+03	-1,28E+03	6,65E+02	2,18E+04
Max Stress 22	1	1	head_tube	Interlaminar	1,80E+03	4,53E+04	0,00E+00	1,91E+03	1,28E+03	-6,65E+02	2,18E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	2,98E+03	-4,21E+03	0,00E+00	-6,50E+02	7,96E+01	-1,16E+02	3,66E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	2,98E+03	-4,21E+03	0,00E+00	-6,50E+02	7,96E+01	-1,16E+02	3,66E+03
Min Stress 12	2	1	down_tube	Interlaminar	2,01E+04	3,08E+03	0,00E+00	-4,61E+03	1,66E+03	7,02E+02	9,68E+03
Max Stress 12	1	1	down_tube	Interlaminar	-2,01E+04	-3,08E+03	0,00E+00	4,61E+03	-1,66E+03	-7,02E+02	9,68E+03
Min Stress 23	2	3	head_tube	Interlaminar	4,39E+02	-1,38E+04	0,00E+00	-4,47E+02	-2,98E+04	1,13E+04	7,14E+03
Max Stress 23	1	3	head_tube	Interlaminar	-4,39E+02	1,38E+04	0,00E+00	4,47E+02	2,98E+04	-1,13E+04	7,14E+03
Min Stress 31	1	3	head_tube	Interlaminar	-4,39E+02	1,38E+04	0,00E+00	4,47E+02	2,98E+04	-1,13E+04	7,14E+03
Max Stress 31	2	3	head_tube	Interlaminar	4,39E+02	-1,38E+04	0,00E+00	-4,47E+02	-2,98E+04	1,13E+04	7,14E+03
Min Maximum Shear Stress	1	5	chainstay_right	Interlaminar	-7,80E-01	-8,15E-01	0,00E+00	-1,20E-02	4,72E+00	2,02E+00	2,14E-02
Max Maximum Shear Stress	1	2	down_tube	Interlaminar	-7,47E+04	1,12E+03	0,00E+00	-9,78E+02	-1,75E+03	-1,61E+03	3,79E+04

Πίνακας 5.22: Αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στην πρώτη περίπτωση της δοκιμής Horizontal Forces Test

	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-7,47E+04	1,12E+03	0,00E+00	-9,78E+02	-1,75E+03	-1,61E+03	3,79E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	7,66E+04	2,14E+03	0,00E+00	3,81E+02	-5,79E-15	0,00E+00	3,72E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	1,86E+03	-4,01E+04	0,00E+00	-2,71E+03	1,78E+03	7,88E+02	2,12E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	1,80E+03	4,53E+04	0,00E+00	1,91E+03	1,28E+03	-6,65E+02	2,18E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,98E+03	-4,21E+03	0,00E+00	-6,50E+02	7,96E+01	-1,16E+02	3,66E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,98E+03	-4,21E+03	0,00E+00	-6,50E+02	7,96E+01	-1,16E+02	3,66E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	4,38E+03	1,35E+04	0,00E+00	-2,95E+03	-1,62E+02	-5,51E+02	5,42E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-2,01E+04	-3,08E+03	0,00E+00	4,61E+03	-1,66E+03	-7,02E+02	9,68E+03
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	1,59E+04	-4,16E+03	0,00E+00	2,79E+02	-1,03E+04	6,87E+03	1,01E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-4,39E+02	1,38E+04	0,00E+00	4,47E+02	2,98E+04	-1,13E+04	7,14E+03
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-4,39E+02	1,38E+04	0,00E+00	4,47E+02	2,98E+04	-1,13E+04	7,14E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-6,55E+01	1,30E+04	0,00E+00	4,85E+02	1,23E+03	8,82E+03	6,54E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	-7,80E-01	-8,15E-01	0,00E+00	-1,20E-02	4,72E+00	2,02E+00	2,14E-02
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	-7,47E+04	1,12E+03	0,00E+00	-9,78E+02	-1,75E+03	-1,61E+03	3,79E+04

Πίνακας 5.23: Αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στη δεύτερη περίπτωση της δοκιμής Horizontal Forces Test

	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-7,66E+04	-2,14E+03	0,00E+00	-3,81E+02	5,79E-15	0,00E+00	3,72E+04
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	7,47E+04	-1,12E+03	0,00E+00	9,78E+02	1,75E+03	1,61E+03	3,79E+04
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-1,80E+03	-4,53E+04	0,00E+00	-1,91E+03	-1,28E+03	6,65E+02	2,18E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-1,86E+03	4,01E+04	0,00E+00	2,71E+03	-1,78E+03	-7,88E+02	2,12E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,98E+03	4,21E+03	0,00E+00	6,50E+02	-7,96E+01	1,16E+02	3,66E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,98E+03	4,21E+03	0,00E+00	6,50E+02	-7,96E+01	1,16E+02	3,66E+03
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	2,01E+04	3,08E+03	0,00E+00	-4,61E+03	1,66E+03	7,02E+02	9,68E+03
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-4,38E+03	-1,35E+04	0,00E+00	2,95E+03	1,62E+02	5,51E+02	5,42E+03
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	4,39E+02	-1,38E+04	0,00E+00	-4,47E+02	-2,98E+04	1,13E+04	7,14E+03
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-1,59E+04	4,16E+03	0,00E+00	-2,79E+02	1,03E+04	-6,87E+03	1,01E+04
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	6,55E+01	-1,30E+04	0,00E+00	-4,85E+02	-1,23E+03	-8,82E+03	6,54E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	4,39E+02	-1,38E+04	0,00E+00	-4,47E+02	-2,98E+04	1,13E+04	7,14E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	7,80E-01	8,15E-01	0,00E+00	1,20E-02	-4,72E+00	-2,02E+00	2,14E-02
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	7,47E+04	-1,12E+03	0,00E+00	9,78E+02	1,75E+03	1,61E+03	3,79E+04



Θ-5.17: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.

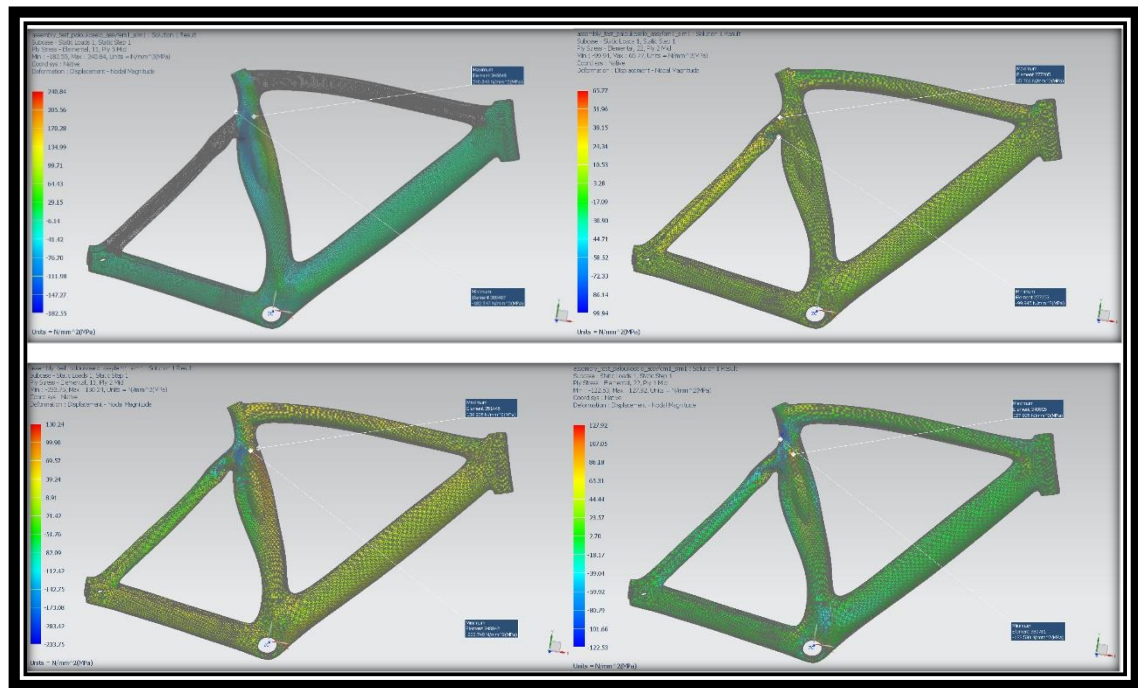
5.4.4 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Vertical Forces Test

Κατά την πειραματική διαδικασία των δοκιμών vertical forces, όσον αφορά στις παραμορφώσεις του σκελετού λόγω εφαρμογής τάσεων, παρατηρήθηκε εφελκυσμός, κυρίως στον κεντρικό σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Χ, στον άνω σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Υ και στην ένωση άνω ψαλιδιών με τον κεντρικό σωλήνα, καθώς και στον κεντρικό σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Ζ, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 0.8 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στον επάνω και εμπρός σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Χ, στις ενώσεις άνω ψαλιδιών με κεντρικό σωλήνα και κάτω σωλήνα με τον κεντρικό στην εφαρμογή κατά τον άξονα Υ και στα ίδια σημεία με την περίπτωση του Υ άξονα μαζί με το αριστερό ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα Ζ, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει τα 0.7 χιλιοστά.

Στο 8^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον Χ άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 240.8 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 184.2 MPa. Κατά τον Υ άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 233.7 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 182.6 MPa. Επίσης κατά τον Χ άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 233.8 MPa στον κεντρικό σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 182.6 MPa. Κατά τον Υ άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω ψαλιδιών και κεντρικού σωλήνα 122.5 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 105.9 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

Πίνακας 5.24: Αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στη δοκιμή Vertical Forces Test

	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-2,34E+05	1,06E+04	0,00E+00	-8,60E+03	2,13E+03	-1,29E+04	1,22E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	2,41E+05	2,97E+04	0,00E+00	1,63E+04	1,48E-13	1,87E-12	1,07E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,90E+04	-1,23E+05	0,00E+00	-3,53E+03	3,39E+03	5,67E+03	4,19E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	6,84E+04	1,92E+05	0,00E+00	1,90E+04	-1,84E+03	-2,55E+03	6,45E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,15E+03	-1,19E+04	0,00E+00	-2,23E+02	2,43E+02	-4,11E+02	2,89E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,15E+03	-1,19E+04	0,00E+00	-2,23E+02	2,43E+02	-4,11E+02	2,89E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	2,38E+05	2,98E+04	0,00E+00	-1,74E+04	-1,81E-13	2,04E-12	1,06E+05
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	6,83E+04	7,75E+04	0,00E+00	1,99E+04	-5,13E+03	-9,57E+02	2,05E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-6,65E+04	1,21E+03	0,00E+00	3,82E+01	-2,12E+04	-1,05E+03	3,39E+04
Max Stress 23	1	seatstay_left	Interlaminar	1,31E+04	-3,37E+04	0,00E+00	-6,71E+03	1,95E+04	9,99E+03	2,43E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,41E+03	-1,87E+04	0,00E+00	-1,31E+03	6,73E+02	-3,21E+04	8,73E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	4,23E+04	1,15E+05	0,00E+00	1,34E+04	-4,35E+03	3,44E+04	3,88E+04
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_left	Interlaminar	-3,19E-01	-1,78E-01	0,00E+00	3,72E-02	-2,67E+01	3,60E+00	7,99E-02
Max Maximum Shear Stress	2	seat_tube	Interlaminar	-2,34E+05	1,06E+04	0,00E+00	-8,60E+03	2,13E+03	-1,29E+04	1,22E+05



Θ-5.18: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.

5.4.5 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Pedaling Forces Test

Κατά την πειραματική διαδικασία των δοκιμών Pedaling Forces, όσον αφορά στην παραμόρφωση του σκελετού λόγω εφαρμογής τάσεων, για την πρώτη περίπτωση παρατηρήθηκε εφελκυσμός κυρίως στο δεξί άνω ψαλίδι και τον κεντρικό σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στο αριστερό κάτω ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον άνω σωλήνα μαζί με την ένωση άνω, κάτω και εμπρός σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 1.8 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στο αριστερό κάτω ψαλίδι και στην ένωση του εμπρός σωλήνα με τον άνω και κάτω σωλήνα, όπου στους τελευταίους η θλίψη συνεχίζεται περίπου μέχρι τη μέση τους, στην εφαρμογή κατά τον άξονα X. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στη δεξιά πλευρά της ένωσης μεσαίας τριβής με κεντρικό, κάτω σωλήνα και δεξί κάτω ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και σε ολόκληρη τη μεσαία τριβή κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 2.2 χιλιοστά. Για τη δεύτερη περίπτωση παρατηρήθηκε εφελκυσμός κυρίως στον κεντρικό σωλήνα και το αριστερό πάνω ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στο αριστερό κάτω ψαλίδι και τη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 2 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στο άνω αριστερό ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στο κάτω δεξί ψαλίδι και τη

μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στη μεσαία τριβή κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 2 χιλιοστά.

Στο 8^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 347.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 256.2 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 239.8 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 208.8 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 253.7 MPa στη μεσαία τριβή στην 5^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 240.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 170.9 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 130.8 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 305.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 245.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 250 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 140.7 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 304.4 MPa στο ίδιο σημείο στην 5^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 245.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 250 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 140.7 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

Πίνακας 5.25: Συνολικά αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στις δύο περιπτώσεις της δοκιμής Pedaling Forces Test

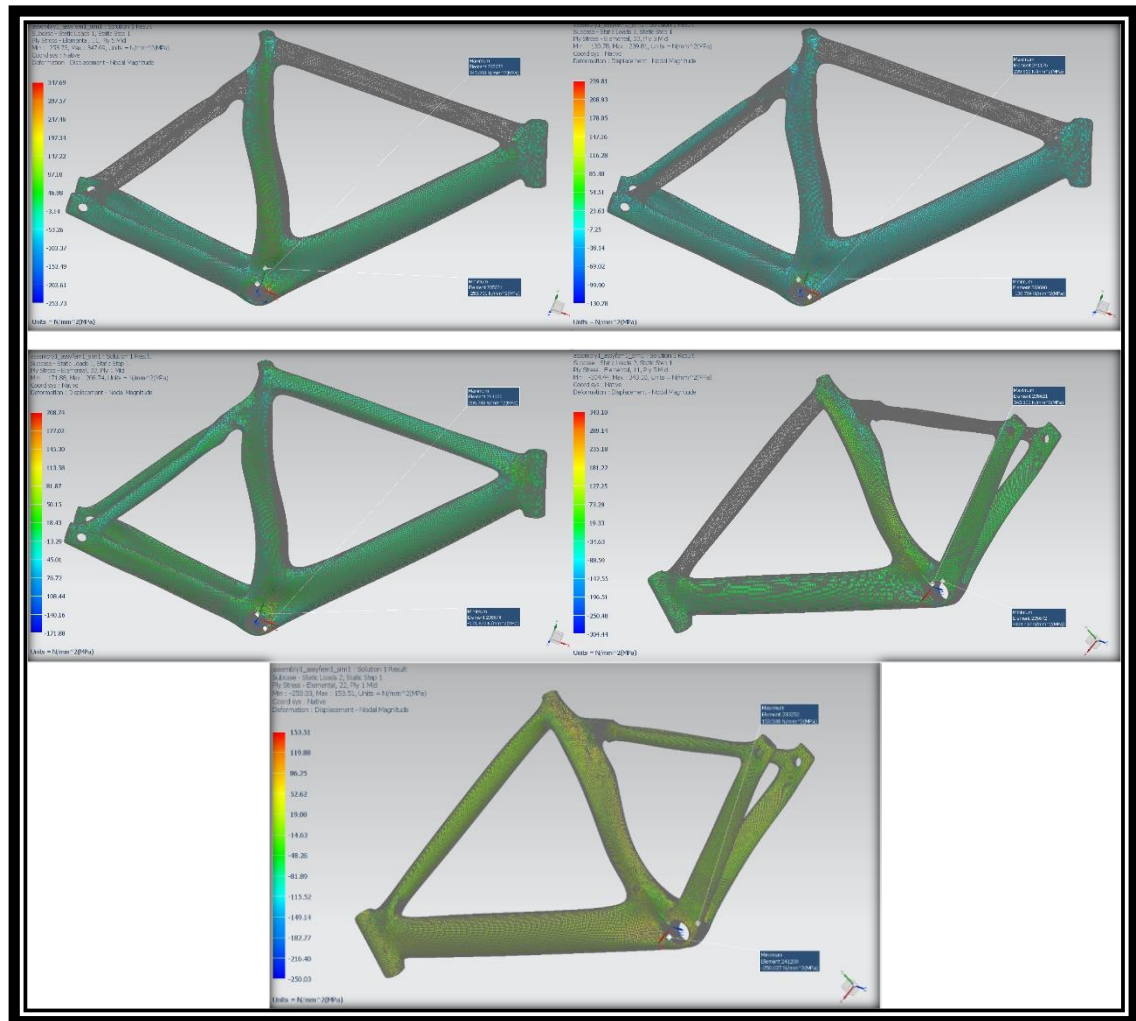
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	5	seat_tube	Interlaminar	-3,04E+05	-7,04E+03	0,00E+00	4,98E+03	7,89E-14	0,00E+00	1,49E+05
Max Stress 11	1	5	seat_tube	Interlaminar	3,48E+05	7,57E+03	0,00E+00	-1,71E+03	-1,16E-13	0,00E+00	1,70E+05
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	2,49E+03	-2,50E+05	0,00E+00	-1,36E+04	-6,16E+03	2,31E+03	1,27E+05
Max Stress 22	1	3	seat_tube	Interlaminar	-7,16E+04	2,40E+05	0,00E+00	1,42E+04	6,48E+03	-1,29E+02	1,56E+05
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,44E+04	-5,91E+03	0,00E+00	1,25E+03	5,90E+01	-1,26E+02	4,43E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,44E+04	-5,91E+03	0,00E+00	1,25E+03	5,90E+01	-1,26E+02	4,43E+03
Min Stress 12	1	5	seat_tube	Interlaminar	-2,24E+02	-8,09E+02	0,00E+00	-2,62E+04	4,06E-13	0,00E+00	2,62E+04
Max Stress 12	2	5	seat_tube	Interlaminar	1,63E+04	-2,24E+03	0,00E+00	2,67E+04	-4,28E-13	0,00E+00	2,82E+04
Min Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-8,90E+04	1,38E+04	0,00E+00	1,84E+04	-5,39E+04	4,80E+04	5,46E+04
Max Stress 23	1	2	seat_tube	Interlaminar	-1,37E+05	1,74E+04	0,00E+00	-1,70E+04	5,12E+04	5,44E+04	7,89E+04
Min Stress 31	1	3	seat_tube	Interlaminar	-7,50E+03	2,31E+04	0,00E+00	-1,60E+03	9,99E+03	-1,13E+05	1,54E+04
Max Stress 31	2	3	seat_tube	Interlaminar	1,27E+04	5,22E+03	0,00E+00	-2,62E+03	-7,56E+03	1,29E+05	4,56E+03
Min Maximum Shear Stress	2	2	head_tube	Interlaminar	-1,86E+01	-2,07E+01	0,00E+00	-1,03E+00	-2,76E+00	1,88E+00	1,48E+00
Max Maximum Shear Stress	2	1	seat_tube	Interlaminar	1,32E+05	-2,15E+05	0,00E+00	-2,12E+03	-1,24E+04	9,05E+02	1,73E+05

Πίνακας 5.26: Αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στην πρώτη περίπτωση της δοκιμής Pedaling Forces Test

	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	-2,54E+05	-5,81E+03	0,00E+00	-7,27E+03	-2,70E-14	0,00E+00	1,24E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	3,48E+05	7,57E+03	0,00E+00	-1,71E+03	-1,16E-13	0,00E+00	1,70E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-2,02E+04	-1,72E+05	0,00E+00	2,17E+03	1,28E+04	-3,62E+03	7,59E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-7,16E+04	2,40E+05	0,00E+00	1,42E+04	6,48E+03	-1,29E+02	1,56E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,44E+04	-5,91E+03	0,00E+00	1,25E+03	5,90E+01	-1,26E+02	4,43E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,44E+04	-5,91E+03	0,00E+00	1,25E+03	5,90E+01	-1,26E+02	4,43E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-2,24E+02	-8,09E+02	0,00E+00	-2,62E+04	4,06E-13	0,00E+00	2,62E+04
Max Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	4,69E+04	1,56E+05	0,00E+00	2,29E+04	2,01E+03	2,52E+03	5,89E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-4,73E+03	-2,28E+02	0,00E+00	1,71E+03	-4,13E+04	-1,71E+04	2,82E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,37E+05	1,74E+04	0,00E+00	-1,70E+04	5,12E+04	5,44E+04	7,89E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-7,50E+03	2,31E+04	0,00E+00	-1,60E+03	9,99E+03	-1,13E+05	1,54E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-5,68E+04	2,22E+05	0,00E+00	1,80E+04	1,74E+04	5,68E+04	1,41E+05
Min Maximum Shear Stress	4	head_tube	Interlaminar	-2,46E+01	-1,97E+01	0,00E+00	-3,65E-01	-2,08E+00	4,79E+00	2,45E+00
Max Maximum Shear Stress	1	seat_tube	Interlaminar	-2,11E+05	1,35E+05	0,00E+00	1,18E+03	1,65E+04	1,07E+03	1,73E+05

Πίνακας 5.27: Αποτελέσματα 8^{ου} σεναρίου στη δεύτερη περίπτωση της δοκιμής Pedaling Forces Test

	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	-3,04E+05	-7,04E+03	0,00E+00	4,98E+03	7,89E-14	0,00E+00	1,49E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	3,43E+05	7,61E+03	0,00E+00	-4,92E+02	4,09E-14	0,00E+00	1,68E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	2,49E+03	-2,50E+05	0,00E+00	-1,36E+04	-6,16E+03	2,31E+03	1,27E+05
Max Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-4,47E+04	1,54E+05	0,00E+00	2,60E+03	1,18E+04	-2,34E+03	9,92E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,28E+04	-8,95E+03	0,00E+00	-1,84E+03	2,09E+02	-3,93E+02	1,10E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,28E+04	-8,95E+03	0,00E+00	-1,84E+03	2,09E+02	-3,93E+02	1,10E+04
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-1,36E+05	-1,77E+05	0,00E+00	-1,92E+04	3,82E+03	2,37E+02	2,81E+04
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	1,63E+04	-2,24E+03	0,00E+00	2,67E+04	-4,28E-13	0,00E+00	2,82E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-8,90E+04	1,38E+04	0,00E+00	1,84E+04	-5,39E+04	4,80E+04	5,46E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-3,36E+04	9,87E+02	0,00E+00	-2,87E+02	4,71E+04	1,45E+04	1,73E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,92E+03	-1,02E+04	0,00E+00	-1,30E+04	-7,61E+03	-2,64E+04	1,36E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,27E+04	5,22E+03	0,00E+00	-2,62E+03	-7,56E+03	1,29E+05	4,56E+03
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-1,86E+01	-2,07E+01	0,00E+00	-1,03E+00	-2,76E+00	1,88E+00	1,48E+00
Max Maximum Shear Stress	1	seat_tube	Interlaminar	1,32E+05	-2,15E+05	0,00E+00	-2,12E+03	-1,24E+04	9,05E+02	1,73E+05



Θ-5.19: Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης.

5.4.6 Συνολική αξιολόγηση 8ου σεναρίου διαστρωμάτωσης

Αναλυτικά, οι έξι στρώσεις στο κούτελο του πλαισίου προσφέρουν την απαραίτητη δυσκαμψία τόσο ως προς την κάμψη (πλεκτές στρώσεις $0^{\circ}/90^{\circ}$) όσο και ως προς τη στρέψη (πλεκτές στρώσεις $\pm 45^{\circ}$). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι στρεβλώσεις του σημείου αυτού στις στροφές. Στον κάτω σωλήνα, οι τρεις πλεκτές στρώσεις $\pm 45^{\circ}$ αντιτίθενται στη στρέψη του σωλήνα, ενώ οι μονοδιευθυντικές 0° εξασφαλίζουν τη στιβαρότητά του σε κάμψεις, με σκοπό να μη δαπανάται μεγάλο ποσό ενέργειας κατά το πεταλάρισμα. Στα κάτω ψαλίδια υιοθετείται η λογική του αυξημένου πάχους στο δεξιό ψαλίδι έναντι του αριστερού. Όπως και στον κάτω σωλήνα, οι πλεκτές $\pm 45^{\circ}$ στρώσεις αντιτίθενται στις στρέψεις, ενώ οι μονοδιευθυντικές 0° στις κάμψεις. Στα άνω ψαλίδια

και τον άνω σωλήνα, καθώς δεν εμφανίζονται υψηλά φορτία, οι δύο πλεκτές στρώσεις $0^{\circ}/90^{\circ}$ και $\pm 45^{\circ}$ είναι αρκετές ώστε να προσφέρουν μια σχετική δυσκαμψία σε κάμψη και στρέψη, ενώ παράλληλα καθιστούν το πλαίσιο ενδοτικό ώστε να απορροφάται ένα μεγάλο μέρος των κραδασμών του οδοστρώματος πριν «φτάσει» στον αναβάτη μέσω της σέλλας και του τιμονιού αντίστοιχα. Τέλος, ο σωλήνας σέλλας εμφανίζει δύο πλεκτές στρώσεις $0^{\circ}/90^{\circ}$ και $\pm 45^{\circ}$ και τρεις μονοδιευθυντικές 0° . Ο συνδυασμός αυτός του προσφέρει ιδιαίτερη δυσκαμψία που είναι απαραίτητη στο κάτω τμήμα του που φέρει το σύστημα μετάδοσης. Καθώς στο άνω τμήμα του οι μονοδιευθυντικές στρώσεις δε φέρουν σημαντικά φορτία ενώ παράλληλα η δυσκαμψία που προσδίδουν στο σωλήνα δεν επιτρέπει την απορρόφηση κραδασμών, επιλέγεται οι μονοδιευθυντικές 0° να τοποθετηθούν ως εξής: η πρώτη σε όλο το μήκος του σωλήνα σέλλας, η δεύτερη στα $2/3$ του μήκους του και να συμπεριλαμβάνεται στη μεσαία τριβή και η τελευταία μόνο στο κάτω $1/3$ του μήκους του. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την απορρόφηση κραδασμών στο άνω μέρος του σωλήνα και ιδιαίτερα υψηλή δυσκαμψία στο κάτω μέρος του που φέρει το σύστημα μετάδοσης, χωρίς επιπλέον αύξηση των φορτίων σε οποιαδήποτε προσομοίωση των προτύπων του ISO.

5.5 Βιβλιογραφία

[5.1] ISO 4210-6, Cycles-Safety Requirements for bicycles Part 6, ISO 2014. Available online: <https://www.iso.org/standard/78081.html> (accessed on 12 January 2022).

Κεφάλαιο 6ο Κατασκευή πρωτότυπου πλαισίου

6.1 Εισαγωγή

Έχοντας καταλήξει στην επιθυμητή μορφή και την κατάλληλη συνταγή διαστρωμάτωσης του πλαισίου στα προηγούμενα δύο κεφάλαια, το επόμενο βήμα στην κατασκευή του βέλτιστου σκελετού ποδηλασίας δρόμου είναι η κατασκευή καλουπιών και η δημιουργία πρωτότυπων σκελετών οι οποίοι θα δοκιμαστούν τόσο εργαστηριακά με βάση το ISO όσο και σε πραγματικές συνθήκες από έμπειρους επαγγελματίες αθλητές. Τα καλούπια και οι πρωτότυποι σκελετοί κατασκευάστηκαν με τη χρήση αυτόκλειστου (autoclave).

6.2 Κατασκευή του καλουπιού

Η μορφή και το υλικό του καλουπιού καθορίζονται από διάφορους παράγοντες που αφορούν τόσο στη διαδικασία κατασκευής του πλαισίου όσο και στα επιθυμητά χαρακτηριστικά οδηγικής συμπεριφοράς του τελικού προϊόντος.

Καθώς η παραγωγή του πλαισίου μπορεί συχνά να γίνεται από ένα μόνο άτομο, τα καλούπια είναι απαραίτητο να έχουν χαμηλό βάρος έτσι ώστε να είναι εύκολα διαχειρίσιμα κατά τη διαδικασία του lay up αλλά και του ξεκαλουπώματος. Παράλληλα, πρέπει να αντέχουν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 120 έως και 200 °C, έτσι ώστε να καλύπτονται οι θερμοκρασίες curing πληθώρας εποξικών ρητινών. Επιπρόσθετα, η διεπιφάνεια καλουπιού – σκελετού πρέπει να μην εμφανίζει ατέλειες, έτσι ώστε η επιφάνεια του τελικού προϊόντος να είναι λεία και αισθητικά τέλεια. Τέλος, το καλούπι πρέπει να έχει υψηλή δυσκαμψία και μικρή διαστολή στις θερμοκρασίες ψησίματος, ώστε το τελικό προϊόν να μην εμφανίζει στρεβλώσεις και έντονες μεταβολές σε συγκεκριμένες διαστάσεις όπου συναρμολογούνται περιφερειακά εξαρτήματα και αναμένονται συγκεκριμένες ανοχές.

Πέρα από τους κατασκευαστικούς παράγοντες, τίθενται και περιορισμοί που αναφέρονται στη συμπεριφορά που αναμένεται να έχει το πλαίσιο κατά την οδήγηση. Εκτός από το σχήμα και τη συνταγή διαστρωμάτωσης, ιδιαίτερη βαρύτητα στη συμπεριφορά και την αντοχή του πλαισίου έχει το κατά πόσον το τελικό προϊόν

αποτελείται από πολλαπλά κομμάτια τα οποία ενώνονται για να σχηματίσουν το σκελετό.

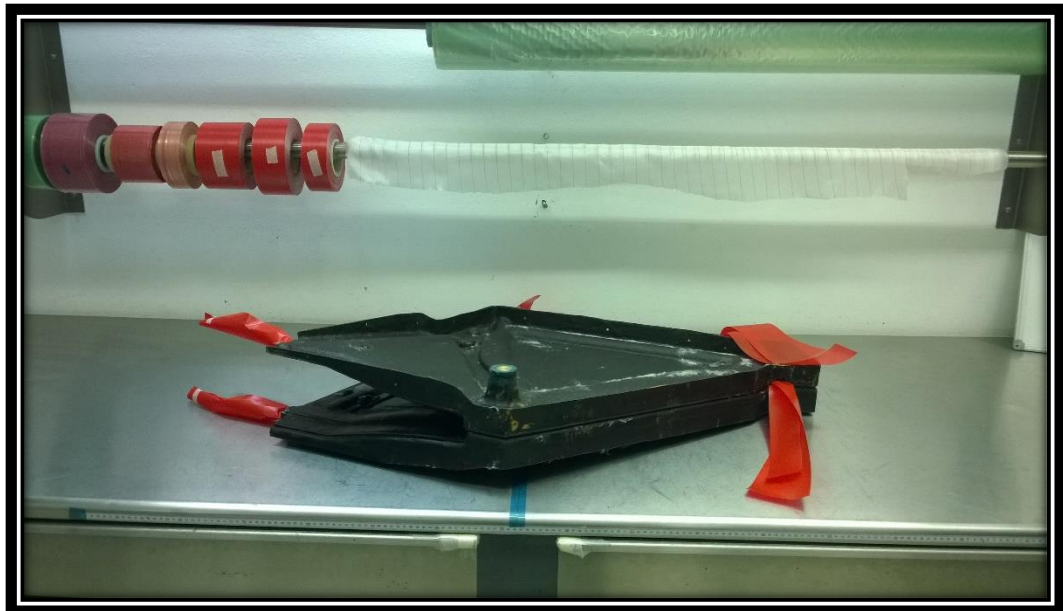
Με σκοπό την καλύτερη δυνατή ποιότητα, επιλέχθηκε ολόκληρος ο σκελετός να παράγεται ως ένα κομμάτι, δηλαδή να είναι πραγματικό *monocoque*. Η επιλογή αυτή καθιστά τη δημιουργία των καλουπιών και την παραγωγή των προϊόντων αρκετά δυσκολότερη μεν αλλά με σημαντικά πλεονεκτήματα δε.

Κύρια μειονεκτήματα της παραγωγής ενός πλαισίου *monocoque* είναι το ιδιαίτερα μεγάλο μέγεθος των καλουπιών και η δυσκολία κατάλληλου χωρισμού τους έτσι ώστε να μη δημιουργούνται υποκοπές. Η ύπαρξη υποκοπών καθιστά αδύνατη την κατασκευή του πλαισίου, καθώς μετά το “ψήσιμο” και τη στερεοποίηση των ανθρακονημάτων το προϊόν δεν μπορεί να βγει από το καλούπι.

Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει είναι σημαντικότερα από τις δυσκολίες αυτές. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ο σκελετός αποτελείται από πολλά κομμάτια, είναι μεν πιο εύκολη η παραγωγή καθώς τα καλούπια είναι σημαντικά μικρότερα, αλλά προκύπτουν προβλήματα κατά τη συναρμολόγηση του σκελετού. Τα επιμέρους τμήματα πρέπει να κολληθούν σε ειδικές καλίμπρες με μεγάλη ακρίβεια. Παρόλα αυτά, στο στάδιο αυτό είναι πολύ εύκολο να εμφανιστούν προβλήματα ευθυγράμμισης, που στη συνέχεια μπορεί να επηρεάσουν με καταστροφικό τρόπο το πλαίσιο. Επιπλέον, για να αντέξει η κόλληση των επιμέρους κομματιών, δημιουργούνται κατάλληλες επιφάνειες κόλλησης μεγάλου εμβαδού. Στα σημεία της κόλλησης το πάχος του σκελετού είναι αρκετά μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα εκατέρωθεν της ένωσης να υπάρχει υψηλή συγκέντρωση φορτίων που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία κατά την κόπωση του πλαισίου. Ακόμα, αν οι κολλήσεις αυτές γίνονται σε σημεία που το πλαίσιο αναμένεται να είναι πιο ενδοτικό, δεν επιτρέπεται η μέγιστη απορρόφηση των κραδασμών και χάνεται μέρος της άνεσης του αναβάτη. Όταν το πλαίσιο κατασκευάζεται ως *monocoque*, επιτυγχάνεται τέλεια ευθυγράμμιση από το καλούπι, ενώ η κατανομή των φορτίων και η απορρόφηση των κραδασμών είναι ομαλή όπως φάνηκε και στις προσομοιώσεις στο γραφικό περιβάλλον.

Έχοντας επιλέξει τη λύση του *monocoque* έπρεπε να επιλέξουμε και το υλικό του καλουπιού. Η επιλογή του carbon ήρθε ως η λογικότερη επιλογή αφού είναι σημαντικά ελαφρύτερο από αλουμινένιο ή ατσάλινο καλούπι, έχει τον ίδιο συντελεστή θερμικής διαστολής με το αντικείμενο που παράγει, άρα δεν είναι απαραίτητο το εν θερμώ ξεκαλούπωμα, είναι πιο εύκολη η διαχείριση υποκοπών και δεν απαιτεί καθόλου χρόνο σε κοστοβόρες κατεργασίες CNC (ένα τέτοιο μεταλλικό καλούπι θα ήθελε τρεις μήνες κατεργασία).

Η κατασκευή του καλουπιού έγινε στις εγκαταστάσεις της Advanced Composites στην Αγγλία με τη βοήθεια εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού. Το καλούπι αυτό κατασκευάστηκε σε τέσσερα κομμάτια: Ένα δεξί εξωτερικό κομμάτι σε όλο το μήκος του σκελετού, ένα αριστερό εξωτερικό κομμάτι σε όλο το μήκος του σκελετού, ένα κομμάτι το οποίο τοποθετείται εσωτερικά ανάμεσα στα κάτω ψαλίδια και ένα τελευταίο εσωτερικά ανάμεσα στα άνω ψαλίδια.. Για να γίνει η κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν δυο κομμάτια ξύλου τα οποία βιδώθηκαν στην διεπιφάνεια επαφής του καλουπιού μεταξύ τους και διαμορφώθηκαν αρχικά στο σχήμα του σκελετού εξωτερικά. Μετά χωρίστηκαν, η κάθε πλευρά τοποθετήθηκε σε πλάκα εφαρμογής και στρώθηκε το απαραίτητο carbon. Αφού ψήθηκαν, διαμορφώθηκε το ξύλο εσωτερικά στο σχήμα του σκελετού και το σύνολο τοποθετήθηκε ξανά μαζί. Τώρα στρώθηκε carbon εσωτερικά με αποκολλητική ταινία ανάμεσα στα πάνω και τα κάτω ψαλίδια και ξαναψήθηκε. Αφαιρέθηκαν τα εξωτερικά κομμάτια και τώρα επιστρατεύονται οι ορθοτροπικές ιδιότητες του υλικού και για την αφαίρεση του καλουπιού από τα εσωτερικά ψαλίδια λόγω υποκοπών. Παραμορφώνουμε λοιπόν το τμήμα του καλουπιού για τα κάτω εσωτερικά ψαλίδια και το αφαιρούμε. Μετά απλά τραβάμε το τμήμα του καλουπιού για τα πάνω εσωτερικά ψαλίδια και το καλούπι μας είναι σχεδόν έτοιμο αφού μετά από εφαρμογή mold sealer και αποκολλητικών είναι έτοιμο για παραγωγή σκελετών.



Θ-6.1 Το καλούπι των ανθρακονημάτων έτοιμο για χρήση.

Για την παραγωγή του καλουπιού έγινε χρήση autoclave. Η συνταγή διαστρωμάτωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

- Οι πρώτες τέσσερις στρώσεις που τοποθετήθηκαν στη διεπιφάνεια καλούπιού – σκελετού είναι πλεκτό υφάσμα T300, με βάρος 200 gr/m² και ακολουθούν τη σειρά ($\pm 45^\circ$, $0^\circ/90^\circ$)₂.
- Στο καλούπι του σκελετού μεγέθους L τοποθετούνται επιπλέον έξι στρώσεις πλεκτού υφάσματος T300, μεγαλύτερου όμως βάρους 600 gr/m² και ακολουθούν τη σειρά ($\pm 45^\circ$, $0^\circ/90^\circ$)₃.
- Αντίστοιχα, για το καλούπι του μεγέθους M τοποθετούνται δώδεκα στρώσεις επιπλέον στις αρχικές τέσσερις. Και εδώ οι πλεκτές στρώσεις είναι από T300 βάρους 600 gr/m² ακολουθούν τη σειρά ($\pm 45^\circ$, $0^\circ/90^\circ$)₆.

Η εποξική μήτρα που επιλέχθηκε για τα ανθρακονημάτινα καλούπια είναι τύπου tooling της εταιρίας Advanced Composites. Η εποξική αυτή έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσής της T_g όταν υφίσταται post curing. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν το καλούπι να “ψηθεί” πολλές φορές χωρίς όμως να μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά αντοχής του υλικού και χωρίς να εμφανίζει στρεβλώσεις.

6.3 Κατασκευή πρωτότυπου σε autoclave

Επόμενο στάδιο στην όλη διαδικασία ήταν η κατασκευή ενός πρωτότυπου πλαισίου στις ίδιες εγκαταστάσεις όπου παράχθηκε το ανθρακονημάτινο καλούπι. Όπως και το καλούπι, ο πρωτότυπος σκελετός “ψηθήκε” σε autoclave. Οι συνθήκες κατά το cure του σκελετού ήταν οι εξής:

- Θέρμανση από τους 20°C στους 120°C με ρυθμό 3°C / min
- Ισοθερμικό κράτημα στους 120°C για μία ώρα
- Πίεση $p=8\text{bar}$ καθ’ όλη τη διάρκεια του curing

Η εξωτερική επιφάνεια του πρωτότυπου αυτού ήταν άριστη: η ρητίνη είχε κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε όλο το πλαίσιο και δεν υπήρχαν καθόλου φυσαλίδες αέρα. Συνεπώς, σε ένα πλαίσιο που παράγεται με αυτή τη διαδικασία και δεν έχει

εξωτερικές ατέλειες εξαλείφεται το επιπλέον βάρος που προσθέτει η βαφή ή ο στόκος που χρησιμοποιείται σε πολλά ποδήλατα μαζικής παραγωγής. Συνήθως σε ένα πλαίσιο από autoclave χρησιμοποιούνται περίπου 30 gr βαφής για αισθητικούς κυρίως λόγους. Σε περίπτωση που δε χρησιμοποιείται autoclave, η ποσότητα της βαφής αυξάνεται ανάλογα με την ποιότητα επιφανείας του πλαισίου. Αν δεν υπάρχουν πολλές ατέλειες μπορεί να χρησιμοποιηθεί περίπου 120-130 gr βαφής, ενώ αν υπάρχουν εμφανείς ατέλειες και πρέπει να χρησιμοποιηθεί και στόκος για να εξομαλύνει τα συγκεκριμένα σημεία το επιπρόσθετο αυτό βάρος ανέρχεται στα 300 gr.



Θ-6.2 Ο πρωτότυπος σκελετός πριν το ξεκαλούπωμα.

Το πρωτότυπο αυτό δόθηκε στη συνέχεια σε επαγγελματίες ποδηλάτες έτσι ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του κατά την οδήγηση. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών έδειξαν ότι το πλαίσιο από autoclave είναι ιδιαίτερα άκαμπτο, σε σημείο όμως που δεν απορροφά τους κραδασμούς κατά την οδήγηση και δεν είναι καθόλου άνετο. Επιπλέον, παρατηρήθηκε αστοχία η οποία προκλήθηκε από πέτρα που εκσφενδονίστηκε από την μπροστινή ρόδα πάνω στο σκελετό. Από την έκταση της ζημιάς συμπεραίνουμε ότι το πλαίσιο είναι ιδιαίτερα ψαθυρό.

Η ιδιαίτερα αυξημένη δυσκαμψία και ψαθυρότητα του σκελετού, σε συνδυασμό με το πολύ μεγάλο κόστος τόσο της χρήσης όσο και της απόκτησης ενός autoclave μας οδήγησε στην αναζήτηση μιας νέας μεθόδου παραγωγής των πλαισίων.

Η νέα αυτή μέθοδος θέλουμε να έχει μικρό παραγωγικό κόστος, να συνδυάζει την εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας και το χαμηλό πορώδες που παράγεται μέσω του autoclave με την απορρόφηση κραδασμών κατά την οδήγηση και τις κρούσεις που θα είχε ένα πλαίσιο που θα παραγόταν με χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες.

6.4 Κατασκευή πρωτοτύπου με νέα μέθοδο

Η λύση που θα εφαρμόζαμε θα έπρεπε να περιλαμβάνει ψήσιμο με τη χρήση ενός συμβατικού κλίβανου για την επίτευξη κατάλληλης θερμοκρασίας κατά το curing σε συνδυασμό με υποπίεση από αντλία κενού. Αυτό είναι πολύ οικονομικό και εφαρμόσιμο σε πολλές περιπτώσεις κατασκευών.

Με αυτήν την τεχνική παράχθηκε ένα δεύτερο πρωτότυπο, το οποίο αναμενόταν να έχει παρόμοιο αποτέλεσμα με αυτό που παράχθηκε σε autoclave. Οι συνθήκες κατά το ψήσιμο ήταν αντίστοιχες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο autoclave με διαφοροποίηση στην πίεση:

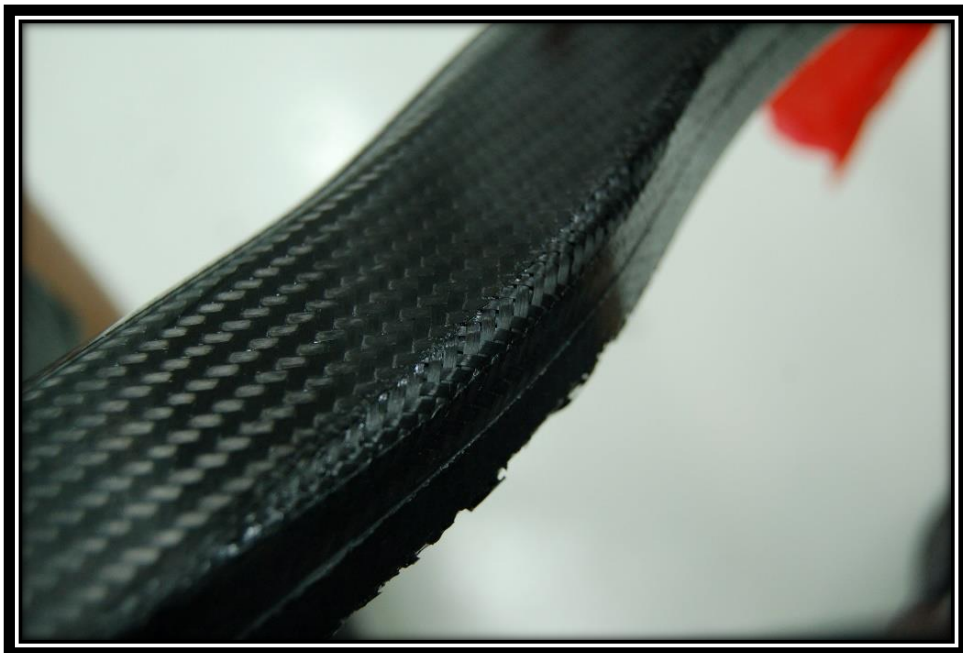
- Θέρμανση από τους 20°C στους 120°C με ρυθμό 3°C / min
- Ισοθερμικό κράτημα στους 120°C για μία ώρα
- Υποπίεση $p=1\text{bar}$ καθ' όλη τη διάρκεια του curing

Μετά τη διαδικασία του curing και το “ξεκαλούπωμα”, παρατηρήθηκαν κάποιες ατέλειες τόσο στην εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού όσο και ανάμεσα στις στρώσεις του carbon σε σχέση με το πρωτότυπο που παράχθηκε σε autoclave. Βασική ατέλεια που παρατηρήθηκε εκ πρώτης όψεως ήταν ότι οι σακούλες δεν είχαν ανοίξει πλήρως, με αποτέλεσμα η εξωτερική επιφάνεια του σκελετού να μην ταυτίζεται με την εσωτερική του καλουπιού. Συνεπάγεται, λοιπόν, ότι η υποπίεση του 1 bar δεν ήταν αρκετή για να πιέσει τις στρώσεις στα τοιχώματα και να προσδώσει στον σκελετό τέλεια εξωτερική επιφάνεια.

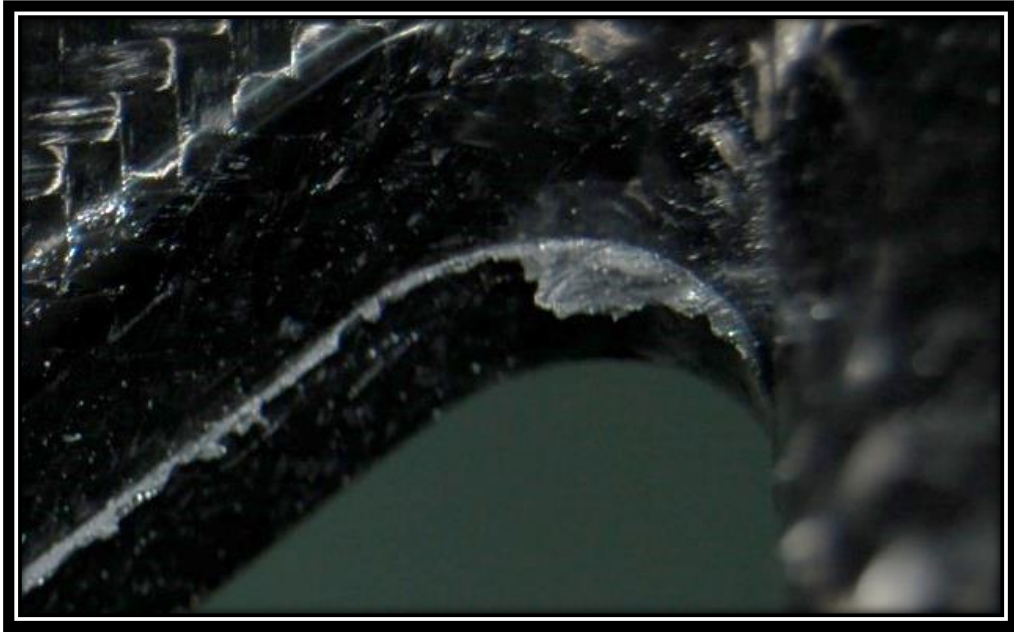


Θ-6.3: Κενό στις στρώσεις επειδή δεν άνοιξαν πλήρως οι σακούλες.

Επιπλέον, λόγω απειρίας στο στρώσιμο των υφασμάτων, παρατηρήθηκαν bridge σε συγκεκριμένα σημεία ενώσεων του καλουπιού.



Θ-6.4: Bridge λόγω στρωσίματος υφασμάτων και χαμηλής πίεσης.



Θ-6.5: Μάγκωμα υφασμάτων ανάμεσα στις επιφάνειες κλεισίματος του καλουπιού.



Θ-6.6 Συνδυασμός προβλημάτων από χαμηλή πίεση στις σακούλες και τον τρόπο τοποθέτησής τους εσωτερικά στο σκελετό.

Με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του, ο σκελετός συναρμολογήθηκε ξανά ως ποδήλατο και δοκιμάστηκε από έμπειρους επαγγελματίες αθλητές. Το αποτέλεσμα σε ότι αφορά την άνεση ήταν τουλάχιστον εντυπωσιακό ενώ και η οδηγική συμπεριφορά σε όχι τέλειο δρόμο είχε βελτιωθεί σημαντικά. Σκόπιμη οδήγηση σε δρόμο με πετραδάκια, χαλίκια, λακούβες κτλ δεν οδήγησαν σε αστοχία από κρούση. Στην δυσκαμψία δεν παρατηρήθηκε αισθητή διαφορά. Αεροδυναμικά το ποδήλατο είχε την ίδια αίσθηση στα περισσότερα κομμάτια αν και οι πόροι στην επιφάνεια θεωρητικά θα έπρεπε να βελτιώσουν λίγο την αεροδυναμική λόγω του ότι δημιουργούν το φαινόμενο της μπάλας του γκολφ.



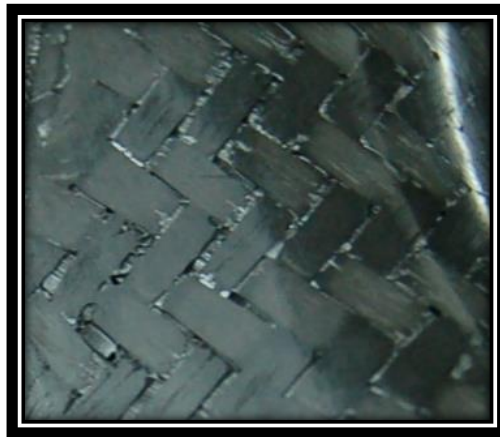
Θ-6.7 Ο Παγκόσμιος πρωταθλητής Χρήστος Γαρέφης δοκιμάζει το ποδήλατο κάνοντας και ρεκόρ διαδρομής σε αγώνα λόγω του ότι δεν πονούσε η μέση του χάρη στην αυξημένη άνεση και των ειδικών χαρακτηριστικών του σκελετού, δυσκαμψία- αεροδυναμικής – οδηγικής συμπεριφοράς.

Μετά τις δοκιμές και με σκοπό να συγκριθεί η ενδοστρωματική κατάσταση των δύο πρωτοτύπων, κόπηκαν σε διάφορα τμήματα τόσο κατά μήκος όσο και κατά πλάτος και συγκρίθηκε η εσωτερική τους δομή.

Ενώ στο πρωτότυπο που παράχθηκε σε autoclave δεν εμφανιζόντουσαν σχεδόν καθόλου φυσαλίδες ή ατέλειες στις τομές, στο πρωτότυπο που παράχθηκε με τη νέα μέθοδο το πορώδες ήταν εμφανώς αυξημένο και μαθηματικά βέβαιο ότι θα αστοχούσε σε βάθος χρόνου αφού οι εσωτερικές φυσαλίδες θα λειτουργούσαν ως

μηχανισμός triggering (σκανδάλης), θα είχαμε ενδοστρωματική αποκόλληση και εν τέλει αστοχία.

Ιδανικά θα θέλαμε με κάποιο τρόπο να είχαμε πορώδες εφάμιλλο με του autoclave και ελαστική συμπεριφορά σαν του κλίβανου. Δυστυχώς δεν υπήρχε λύση για το πρόβλημα αυτό αλλά το ενδιαφέρον της εφαρμογής μας έκανε να ερευνήσουμε το αντικείμενο με σκοπό να βρεθεί λύση για αυτό το πρόβλημα



Θ-6.8 Εμφανείς φυσαλίδες στην επιφάνεια του σκελετού που παράχθηκε στον κλίβανο.

6.5 Νέοι στόχοι έρευνας

Πιο συγκεκριμένα η έρευνά μας στρέφεται στους εξής τομείς:

- 1) Στο να αξιολογήσουμε ή και να ποσοτικοποιήσουμε την επίδραση της χαμηλής πίεσης στην ελαστικότητα και το πορώδες.
- 2) Στο να αξιολογήσουμε τους κύκλους πολυμερισμού και το πως αυτοί θα μπορούσαν να μεταβάλουν το πορώδες και την ελαστική συμπεριφορά.
- 3) Στο να αναζητήσουμε τρόπο να μειωθεί το πορώδες με χρήση υποπίεσης.

- 4) Στο να μελετηθεί ο τρόπος αλληλοεπικάλυψης των στρώσεων διότι επηρεάζουν άμεσα την αντοχή της όποιας κατασκευής αφού είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ των ξεχωριστών τμημάτων υλικών που μπαίνουν στο καλούπι και αναμένεται να φυλακίζουν και τον περισσότερο αέρα.

Κεφάλαιο 7 Η επίδραση του κύκλου πολυμερισμού στις ιδιότητες απορρόφησης κραδασμών κατασκευών ενισχυμένων με σύνθετα υλικά.

7.1 Εισαγωγή

Η ικανότητα απορρόφησης κραδασμών αποτελεί μία από τις βασικές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών που καθορίζουν τον τρόπο κατασκευής, το τελικό κόστος, τα όρια αντοχής κλπ. του τελικού προϊόντος και έχει υπάρξει πολλές φορές αντικείμενο συζήτησης στην επιστημονική κοινότητα [7.1, 7.2].

Σε πολλές περιπτώσεις οι κραδασμοί δημιουργούν προβλήματα στις κατασκευές, όπως αστοχία του υλικού από τις φορτίσεις ή απλά δημιουργία μιας άβολης κατάστασης για τον χρήστη [7.3 – 7.5]. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, τα τελευταία χρόνια μελετώνται οι μηχανισμοί απορρόφησης των σύνθετων υλικών σε σχέση με μέταλλα και κράματα [7.6], καθώς και οι δυνατότητες ενίσχυσης των ικανοτήτων απορρόφησης τους, τόσο σε μακροσκοπικό όσο και σε μικροσκοπικό επίπεδο [7.7].

Στην παραγωγή πλαισίων με προ-εμποτισμένα φύλλα ανθρακονημάτων οι βασικές παράμετροι παρασκευής τους που μπορεί να επηρεάσουν την ελαστικότητα και απορροφητική ικανότητα και πρέπει να ελεγχθούν είναι η θερμοκρασία, η πίεση και οι κύκλοι πολυμερισμού. Υπάρχουν μελέτες που υποδεικνύουν ότι οι θερμοκρασίες κατά τους κύκλους πολυμερισμού της παρασκευής, ακόμα και αν πρόκειται για παραγωγή σε autoclave ή με έγχυση ρητίνης με χρήση υποπίεσης (VARTM), μπορεί να επιδράσουν στο τελικό προϊόν [7.8 – 7.17]. Η πίεση κενού μπορεί, επίσης, να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών [7.18 – 7.20]. Διαφορετικοί κύκλοι πολυμερισμού, με παραλλαγές στον χρόνο που αφήνεται το υλικό να ρευστοποιηθεί και να σκληρύνει η ρητίνη, φαίνεται να επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες εξαιτίας χημικών, θερμικών και άλλων αλλαγών μέσα στο υλικό (όπως χαλάρωση, ερπυσμός κλπ.) [7.21 – 7.31]. Ενώ όλα τα παραπάνω είναι σημαντικοί παράγοντες που αλλάζουν τα απορροφητικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, οι εξωτερικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο, όπως είναι εμφανές και στη διαθέσιμη βιβλιογραφία [7.32 – 7.37].

Υπάρχουν πολλοί τρόποι ελέγχου και μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Όσον αφορά στον έλεγχο της ικανότητας απορρόφησης κραδασμών τους, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία διατάξεων που έχουν μελετηθεί, με

διαφορετικούς τρόπους διεξαγωγής των πειραμάτων και εξαγωγής αποτελεσμάτων. Τα πειραματικά δοκίμια έχουν διάφορες μορφές (κελύφη, κυλινδρικοί σωλήνες, τετραγωνικής διατομής σωλήνες κλπ.) και οι πειραματικές τεχνικές (υπολογιστική ανάλυση και φυσική πειραματική διαδικασία) διαφέρουν ανάλογα με τη μελέτη και την τελική εφαρμογή του υλικού [7.38 – 7.48]. Σε αυτήν την περίπτωση, ωστόσο, θα μελετηθεί μια νέα απλή μέθοδος μέτρησης της απορρόφησης κραδασμών σε κυλινδρικούς σωλήνες από προ-εμποτισμένες ίνες άνθρακα, με τη ρίψη μιας σφαιρικής μάζας πάνω τους και την παρατήρηση των αποσβεστικών ικανοτήτων τους.

7.2 Πειραματική διαδικασία

7.2.1 Σκοπός του πειράματος

Με το πείραμα που δημιουργείται θέλουμε να εξετάσουμε εάν επηρεάζεται η αποσβεστική ικανότητα ανθρακονημάτινων σωλήνων όταν διαφοροποιούνται οι κύκλοι θέρμανσης και πολυμερισμού της ρητίνης κατά την κατασκευή τους. Έτσι κατασκευάζονται οκτώ κυλινδρικά δοκίμια με δύο διαφορετικές διαστρωματώσεις, σε διαφορετικές πιέσεις, θερμοκρασίες και χρόνους παραμονής.

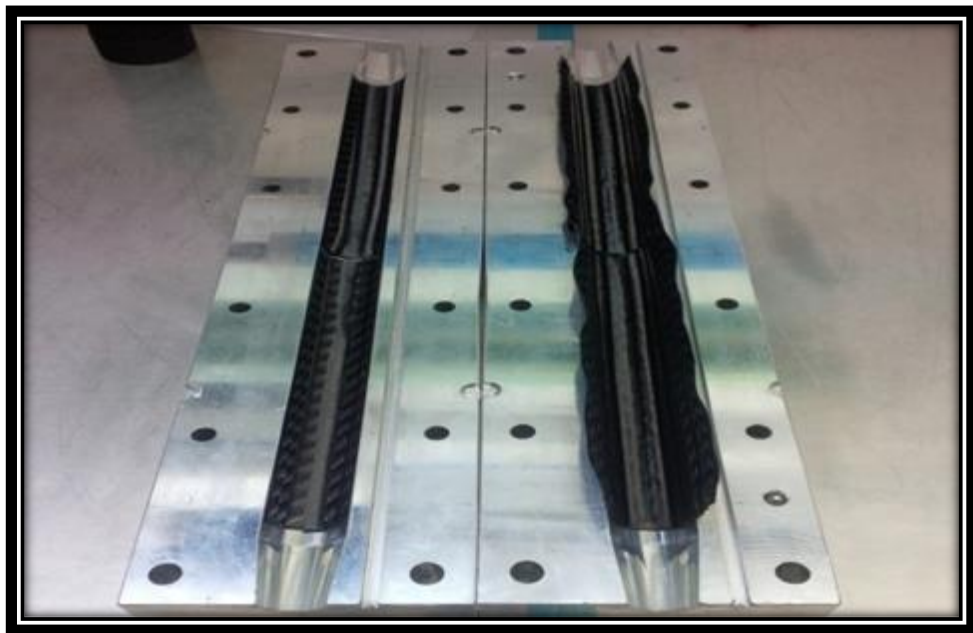
7.2.2 Πειραματικά υλικά

Όλα τα παραπάνω δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη διαστρωμάτωσή τους να γίνεται χειρωνακτικά με προ-εμποτισμένα υφάσματα ανθρακονημάτων. Αυτά τα υφάσματα διατέθηκαν από την TORAYCA, και συγκεκριμένα ο τύπος T300 πλεκτό, με 36% ρητίνη κατά βάρος και πάχος 0.35 χιλιοστά [7.49]. Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε στα υφάσματα αυτά ήταν η VTC401, από την SHD Composites. Το μέτρο ελαστικότητας για την εποξική ρητίνη VTC401 είναι 7.56 GPa, ενώ η εφελκυστική αντοχή αυτής της ρητίνης προβλέπεται να είναι 29.6 MPa [7.50].

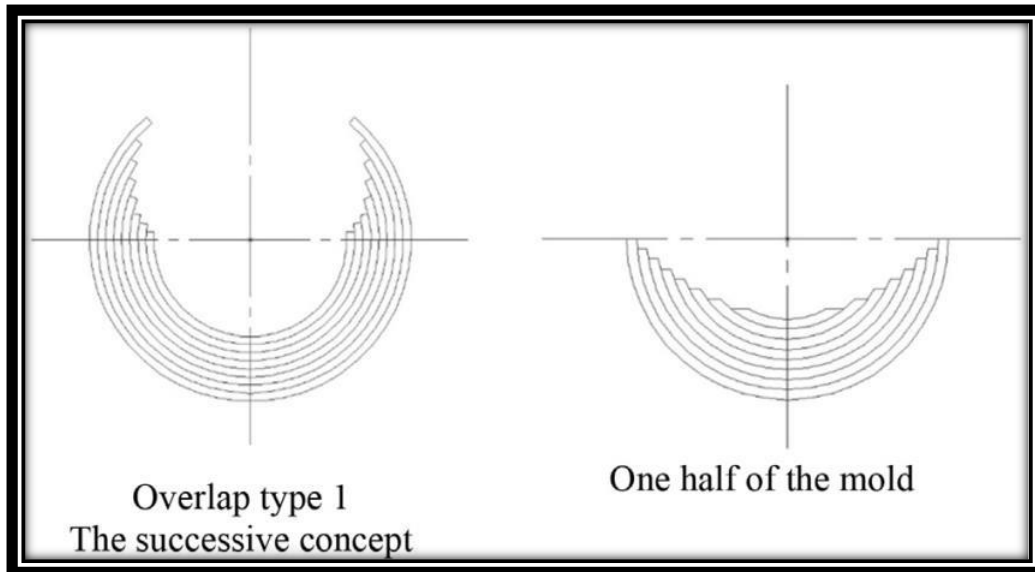
7.2.3 Διαδικασία κατασκευής των σωλήνων

Όλα τα δοκίμια παράχθηκαν με τη χρήση αλουμινένιου καλουπιού, όπως φαίνεται στην εικόνα 1. Τα προ-εμποτισμένα φύλλα κόπηκαν στο χέρι με ψαλίδι και χάρακα και εφαρμόστηκαν στο καλούπι σύμφωνα με τη λογική του διαδοχικού

τύπου επικάλυψης των στρώσεων. Για να χρησιμοποιηθεί ο κάθε τύπος επικάλυψης, οι στρώσεις, οι οποίες είχαν ορθογωνικό σχήμα, κόπηκαν αρχικά στο χέρι από το προ-εμποτισμένο φύλλο στις σωστές διαστάσεις με τη χρήση χάρακα και ψαλιδιού. Στη συνέχεια, ανάλογα με την κάθε συνταγή διαστρωμάτωσης, κολλήθηκαν οι επιμέρους στρώσεις και πάλι με τη βοήθεια ενός χάρακα για να τοποθετηθεί σωστά κάθε στρώση κατά τη διαστρωμάτωση. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στο εργαστήριο ήταν 20°C και τα επίπεδα υγρασίας ήταν στα 45-47% RH. Στη συνέχεια οι στρώσεις τοποθετήθηκαν μέσα στο καλούπι για να σχηματιστούν οι σωλήνες. Το καλούπι αποτελείται από δύο κομμάτια, το καθένα από τα οποία δημιουργεί το μισό σωλήνα. Μετά την τοποθέτηση μέσα στο καλούπι, μία σακούλα κενού τοποθετήθηκε μέσα στο καλούπι για την παραγωγή της επιθυμητής κατανομής πίεσης. Στο εσωτερικό, ο αέρας συμπιέστηκε μέσω ενός συμπιεστή. Με το καλούπι κλειστό, η σακούλα πίεσε τις στρώσεις από το ένα μισό του καλουπιού να επικαλύψουν τις στρώσεις στο άλλο μισό. Στη συνέχεια το καλούπι μεταφέρθηκε μέσα στο φούρνο και οι σωλήνες υψηλής πίεσης πέρασαν μέσα από τον φούρνο προς τον συμπιεστή για να διατηρηθεί σταθερή η πίεση μέσα στο καλούπι.



Θ-7.1: Τοποθέτηση στρώσεων μέσα στο καλούπι.



Θ-7.2: Επικάλυψη στρώσεων μέσα στο καλούπι.

Μετά το τέλος των κύκλων πολυμερισμού μέσα στο φούρνο (ο οποίος σχεδιάστηκε και διατέθηκε από την εταιρία Gram Carbon, και ο οποίος διαθέτει ηλεκτρονικά θερμοστοιχεία για ακρίβεια στη μέτρηση της θερμοκρασίας, σύστημα καταγραφής δεδομένων, αντλία πίεσης και σωλήνες υψηλής πίεσης για τα καλούπια), τα δοκίμια υπέστησαν κατάλληλη επεξεργασία και μετρήθηκαν, έτσι ώστε να πληρούν τις επιθυμητές προδιαγραφές μήκους. Για ακρίβεια στη μέτρηση του μήκους, του πάχους τοιχώματος και της εσωτερικής και εξωτερικής διαμέτρου, χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρονικό παχύμετρο και ένα κυλινδρόμετρο για τρεις μετρήσεις σε τρία διαφορετικά σημεία για να υπάρξει μια μέση τιμή για κάθε δοκίμιο. Μετά, τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε μια υψηλής ακριβείας ηλεκτρονική ζυγαριά. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2.

7.2.4 Διαδικασία διαστρωμάτωσης και κύκλοι πολυμερισμού

Κατά τη διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων, χρειάστηκε να αποφασίσουμε πόσα διαφορετικά σενάρια διαστρωμάτωσης θα χρησιμοποιηθούν και τι διαφοροποιήσεις στους κύκλους πολυμερισμού έπρεπε να δοκιμαστούν, έτσι ώστε να υπάρξει καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που επηρεάζουν τις ελαστικές ιδιότητες. Τελικά αποφασίστηκε να δοκιμαστούν δύο συνταγές διαστρωμάτωσης (σωλήνες με 4 και 6 στρώσεις), όπως φαίνεται στον πίνακα 7.1.

Οι κύκλοι θέρμανσης είχαν διαφοροποιήσεις επίσης, καθώς κάποια δοκίμια παρασκευάστηκαν υπό υψηλή-μέση-χαμηλή πίεση, με υψηλή ή χαμηλή

θερμοκρασία φούρνου και μεγάλα ή σύντομα διαστήματα ψησίματος. Αυτές οι παραλλαγές έγιναν για να διαφοροποιηθεί το κάθε δοκίμιο από τα άλλα, με την ελπίδα ότι αυτές οι αλλαγές θα εμφάνιζαν μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες στη συνέχεια. Οι κύκλοι θέρμανσης φαίνονται στον πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.1: Συνταγές διαστρωμάτωσης

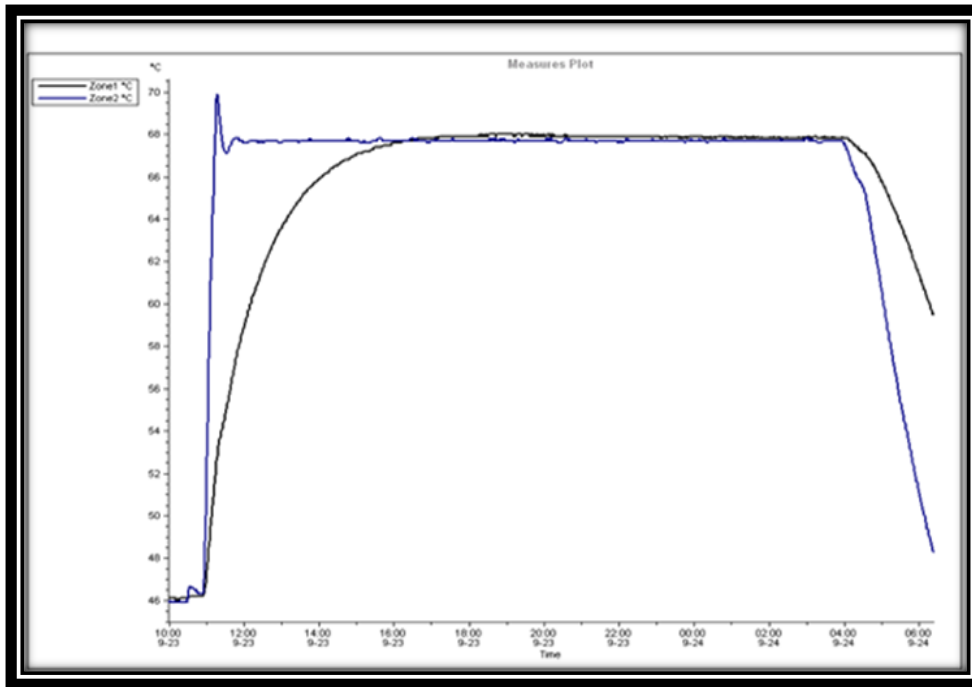
	Δοκίμια 4 στρώσεων	Δοκίμια 6 στρώσεων
Συνταγή διαστρωμάτωσης	±45° Woven	±45° Woven
	0-90 Woven	0-90 Woven
	0-90 Woven	0-90 Woven
	0-90 Woven	±45° Woven
	±45° Woven	0-90 Woven
		±45° Woven

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη των δοκιμών

Δοκίμια	Βάρος (gr)	Μέσο μήκος (mm)	Μέση εσωτερική διάμετρος (mm)	Μέση εξωτερική διάμετρος (mm)	Μέγιστο / Ελάχιστο πάχος τοιχώματος (mm)
Δοκίμιο 1	12.2	50.056	27.9	31.5	2.79 / 1.39
Δοκίμιο 2	10.9	49.78	28.04	31.5	2.37 / 1.3
Δοκίμιο 3	15.9	49.573	26.49	31.5	3.13 / 2.11
Δοκίμιο 4	15.8	49.89	29.59	31.5	3.2 / 2.06
Δοκίμιο 5	12.1	49.65	27.51	31.5	2.72 / 1.29
Δοκίμιο 6	15.7	50.086	26.67	31.5	3.07 / 2
Δοκίμιο 7	15.9	50.056	26.62	31.5	2.92 / 1.98
Δοκίμιο 8	10.35	49.95	28.42	31.5	2.11 / 2.29

Πίνακας 7.3: Κύκλοι θέρμανσης των δοκιμών

Δοκίμια	Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (C°)	Χρόνος curing (hrs)	Αριθμός στρώσεων
Δοκίμιο 1	7	120±2	3	4
Δοκίμιο 2	1.5	67±2	18	4
Δοκίμιο 3	1.5	67±2	18	6
Δοκίμιο 4	7	120±2	3	6
Δοκίμιο 5	3	120±2	3	4
Δοκίμιο 6	3	120±2	3	6
Δοκίμιο 7	7	67±2	18	6
Δοκίμιο 8	7	67±2	18	4



Θ-7.3: Διάγραμμα θερμοκρασίας (μπλε γραμμή) και καλουπιού (μαύρη γραμμή) κατά τον κύκλο πολυμερισμού.

7.2.5 Εξοπλισμός και η πειραματική διαδικασία

7.2.5.1 Εξοπλισμός

Όλη η πειραματική διαδικασία διενεργήθηκε με τη χρήση μιας ιδιοσυσκευής κάθετης συγκράτησης στην οποία ήταν προσαρτημένος ένας διάφανος ακρυλικός σωλήνας μήκους 50 εκατοστών και εσωτερικής διαμέτρου 10 χιλιοστών. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μεταλλικά spacers για την σωστή τοποθέτηση του κάτω άκρου του σωλήνα πάνω στην ιδιοσυσκευή, μια ακόμα συσκευή συγκράτησης στην οποία ήταν προσαρτημένος ένα χάρακας με κλίμακα από 0 έως 400 χιλιοστά, μια ατσάλινη σφαίρα ρουλεμάν με διάμετρο 7.95 χιλιοστά και βάρος 2.1 γραμμάρια, μια ατσάλινη ορθογωνική πλάκα εξωτερικών διαστάσεων 12 x 36 x 150 χιλιοστά και βάρους 502.8 γραμμαρίων, ένα γωνιόμετρο, μια λάμπα, μια πλάκα εφαρμογής με προσαρμοζόμενα πόδια και μια βιντεοκάμερα πάνω σε τρίποδο. Όλη η διάταξη του πειράματος φαίνεται στην εικόνα Θ-7.4.



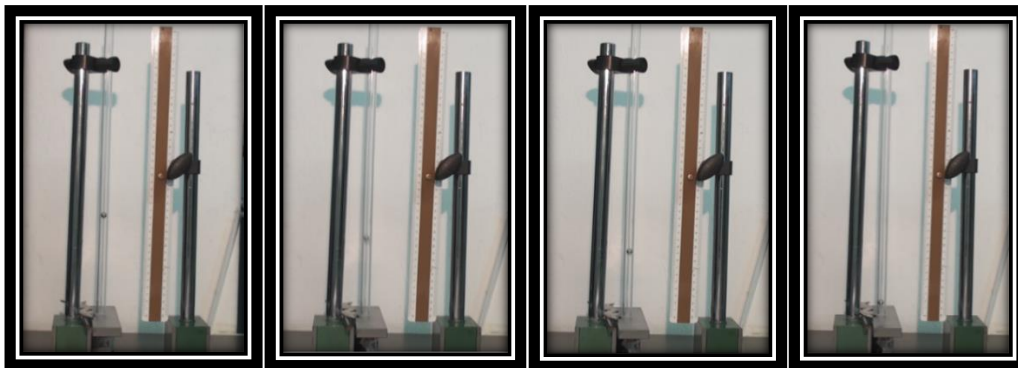
Θ-7.4: Πειραματική διάταξη και δοκίμια.

7.2.5.2 Πειραματική διαδικασία

Αρχικά, έπρεπε να διαπιστωθεί αν το τραπέζι που χρησιμοποιήθηκε είχε σωστή ευθυγράμμιση, οπότε έγιναν προσαρμογές στα πόδια του με τη χρήση υδροστάθμης ακριβείας. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν πάνω του οι συσκευές συγκράτησης, με τον ακρυλικό σωλήνα συγκρατημένο στη μία και τον χάρακα στην άλλη. Ο ακρυλικός σωλήνας ήταν απέναντι από τον χάρακα. Κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε κάτω από τον ακρυλικό σωλήνα με την ασάλινη πλάκα πάνω του. Το κάτω άκρο του σωλήνα τοποθετήθηκε 1 χιλιοστό πιο ψηλά από την πάνω μεριά της πλάκας, έτσι ώστε να μπορεί να περνά ο αέρας. Το γωνιόμετρο χρησιμοποιήθηκε για να διορθωθεί η γωνία του ακρυλικού σωλήνα, έτσι ώστε να είναι σε κατακόρυφη θέση σε σχέση με την ορθογωνική πλάκα, και ένα μεταλλικό spacer για να ασφαλίσει τη θέση του σωλήνα μετά από κάθε μέτρηση.

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, το επόμενο βήμα ήταν να τοποθετηθεί η κάμερα στη θέση της, να τεθεί το είδος του βίντεο σε Hi Speed και να αρχίσει η καταγραφή. Στη συνέχεια η ατσάλινη σφαίρα αφέθηκε να πέσει ελεύθερα μέσα στον ακρυλικό σωλήνα, να προσκρούσει στην ατσάλινη πλάκα, που ήταν πάνω στο δοκίμιο, και να αναπηδήσει σε έναν επαναλαμβανόμενο κύκλο. Με τον ακρυλικό σωλήνα να δρα ως οδηγός για τη σφαίρα, εξασφαλίστηκε το ότι η σφαίρα κινήθηκε κατακόρυφα. Το διάκενο του 1 χιλιοστού μεταξύ του σωλήνα και της πλάκας διασφάλιζε την ελεύθερη μετακίνηση του αέρα, έτσι ώστε να μην παρεμβάλλεται στην κίνηση της σφαίρας.

Η καταγραφή του βίντεο ολοκληρωνόταν όταν η σφαίρα σταμάταγε να κινείται. Η μέτρηση του ύψους αναπήδησης γινόταν με τη βοήθεια του χάρακα, που ήταν τοποθετημένος έτσι ώστε να μετρά από την πάνω μεριά της πλάκας όπου αναπηδούσε η σφαίρα. Για κάθε δοκίμιο μετρήθηκαν 10 ύψη αναπήδησης, το ένα μετά το άλλο. Για λόγους ακριβείας της μέτρησης, τα δοκίμια υπέστησαν το τεστ ρίψης δέκα φορές το καθένα. Το ακριβές ύψος αναπήδησης μετρήθηκε με τη βοήθεια ενός προγράμματος προβολής βίντεο στον υπολογιστή σε αργή κίνηση 0.20 x της κανονικής ταχύτητας. Στην εικόνα Θ-7.5 παρουσιάζονται στιγμιότυπα του βίντεο σε αργή κίνηση για καλύτερη κατανόηση.



Θ-7.5: Στιγμιότυπα του βίντεο σε αργή κίνηση.

7.3 Αποτελέσματα

7.3.1 Μέσο ύψος αναπήδησης

Μετά την εξέταση όλων των συλλεγμένων βίντεο σε αργή κίνηση, σημειώθηκαν τα μέγιστα ύψη που έφτανε η σφαίρα μετά την πρόσκρουση στην ατσάλινη πλάκα για δέκα συνεχόμενες συγκρούσεις. Ο λόγος που έγινε αυτό ήταν για να ληφθεί μία

όσο το δυνατόν ακριβέστερη μέτρηση του ρυθμού και του τρόπου απορρόφησης της κινητικής ενέργειας της σφαίρας από τα δοκίμια. Η πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκε δέκα φορές για κάθε δοκίμιο για την παραγωγή μιας μέσης τιμής του ύψους αναπήδησης. Οι τιμές για κάθε δοκίμιο, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων, ο συντελεστής μεταβλητότητάς τους καθώς και οι % μεταβολές μεταξύ των υψών αναπήδησης παρουσιάζονται στους πίνακες 7.4, 7.5, 7.6 και 7.7 αντίστοιχα.

Πίνακας 7.4: Ύψος αναπήδησης στις πρώτες δέκα συγκρούσεις σε κάθε δοκίμιο.

Αριθμός Σύγκρουσης	Ύψος αναπήδησης ανά δοκίμιο (cm)							
	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3	Δοκίμιο 4	Δοκίμιο 5	Δοκίμιο 6	Δοκίμιο 7	Δοκίμιο 8
1η	31.47	32.01	32.27	32.48	31.7	33.05	33.2	33.07
2η	23.85	25.14	25.84	25.04	24.61	26.09	25.96	25.32
3η	19.02	19.75	21.15	20.77	19.35	21,21	21.08	19.98
4η	14.81	15.88	17.5	16	15.55	17.09	17.02	16.46
5η	11.84	13.24	14.55	13.4	12.41	14.35	13.79	13.73
6η	9.81	11.14	12.29	11.42	10.42	12.05	11.72	11.4
7η	8.23	9.51	10.6	9.67	8.83	10.21	9.93	9.81
8η	7.06	8.25	9.21	8.3	7.5	8.73	8.66	8.37
9η	6.01	7.09	7.92	7.27	6.49	7.64	7.55	7.23
10η	5.07	6.17	6.91	6.31	5.63	6.63	6.6	6.32

Πίνακας 7.5: Τυπική απόκλιση ύψους αναπήδησης στις πρώτες δέκα συγκρούσεις σε κάθε δοκίμιο.

Αριθμός Σύγκρουσης	Τυπική απόκλιση							
	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3	Δοκίμιο 4	Δοκίμιο 5	Δοκίμιο 6	Δοκίμιο 7	Δοκίμιο 8
1η	0,617	0,681	0,777	0,838	0,674	0,509	0,599	0,331
2η	1,297	1,152	0,721	1,194	0,897	0,728	0,989	0,766
3η	1,298	1,677	0,769	1,302	0,938	0,780	0,725	0,921
4η	0,990	1,229	0,821	1,152	0,716	1,212	0,738	1,037
5η	0,805	0,955	0,542	1,139	0,564	1,057	0,795	0,997
6η	0,666	0,722	0,547	0,812	0,694	0,904	0,796	1,037
7η	0,529	0,604	0,486	0,927	0,584	0,915	0,535	0,855
8η	0,634	0,596	0,440	0,817	0,630	0,779	0,499	0,676
9η	0,421	0,501	0,474	0,789	0,616	0,650	0,495	0,559
10η	0,279	0,483	0,508	0,755	0,450	0,512	0,515	0,550

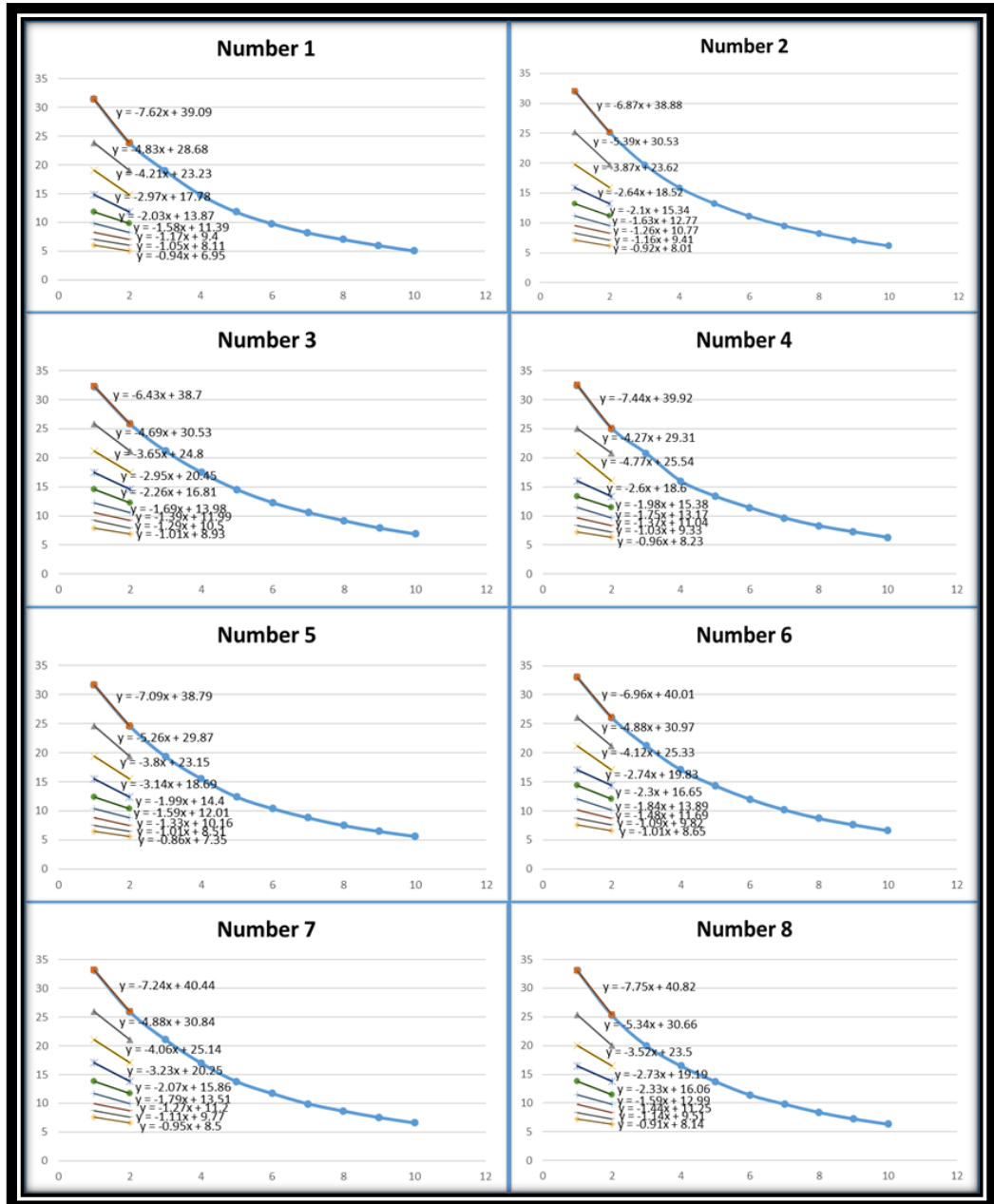
Πίνακας 7.6: Συντελεστής μεταβλητότητας ύψους αναπήδησης στις πρώτες δέκα συγκρούσεις σε κάθε δοκίμιο.

Αριθμός Σύγκρουσης	Συντελεστής μεταβλητότητας							
	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3	Δοκίμιο 4	Δοκίμιο 5	Δοκίμιο 6	Δοκίμιο 7	Δοκίμιο 8
1η	0,020	0,021	0,023	0,025	0,020	0,015	0,018	0,010
2η	0,054	0,046	0,027	0,046	0,034	0,028	0,037	0,029
3η	0,068	0,085	0,036	0,062	0,044	0,037	0,033	0,043
4η	0,067	0,076	0,046	0,068	0,041	0,071	0,041	0,058
5η	0,068	0,070	0,036	0,080	0,039	0,074	0,054	0,067
6η	0,067	0,063	0,044	0,067	0,057	0,075	0,063	0,084
7η	0,063	0,062	0,045	0,090	0,057	0,089	0,049	0,081
8η	0,088	0,070	0,047	0,092	0,072	0,088	0,052	0,074
9η	0,068	0,069	0,058	0,101	0,081	0,084	0,060	0,071
10η	0,053	0,076	0,071	0,111	0,067	0,075	0,071	0,080

Πίνακας 7.7: Επί τοις εκατό μείωση του ύψους αναπήδησης μεταξύ συνεχόμενων συγκρούσεων σε κάθε δοκίμιο

Σετ Συγκρούσεων	Μείωση ύψους σφαίρας ανά δοκίμιο							
	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3	Δοκίμιο 4	Δοκίμιο 5	Δοκίμιο 6	Δοκίμιο 7	Δοκίμιο 8
1η - 2η	-24.21%	-21.46%	-19.93%	-22.91%	-22.37%	-21.06%	-21.81%	-23.44%
2η - 3η	-20.25%	-21.44%	-18.15%	-17.05%	-21.37%	-18.70%	-18.80%	-21.09%
3η - 4η	-22.13%	-19.59%	-17.26%	-22.97%	-19.64%	-19.42%	-19.26%	-17.62%
4η - 5η	-20.05%	-16.62%	-16.86%	-16.25%	-20.19%	-16.03%	-18.98%	-16.59%
5η - 6η	-20.05%	-15.86%	-15.53%	-14.78%	-16.04%	-16.03%	-15.01%	-16.97%
6η - 7η	-17.15%	-14.63%	-13.75%	-15.32%	-15.26%	-15.27%	-15.27%	-13.95%
7η - 8η	-16.11%	-13.25%	-13.11%	-14.17%	-15.06%	-14.50%	-12.79%	-14.68%
8η - 9η	-14.22%	-14.06%	-14.01%	-12.41%	-13.47%	-12.49%	-12.82%	-13.62%
9η - 10η	-14.87%	-12.98%	-12.75%	-13.20%	-13.25%	-13.22%	-12.58%	-12.59%

7.3.2 Απώλεια ύψους σφαίρας μετά τις συγκρούσεις



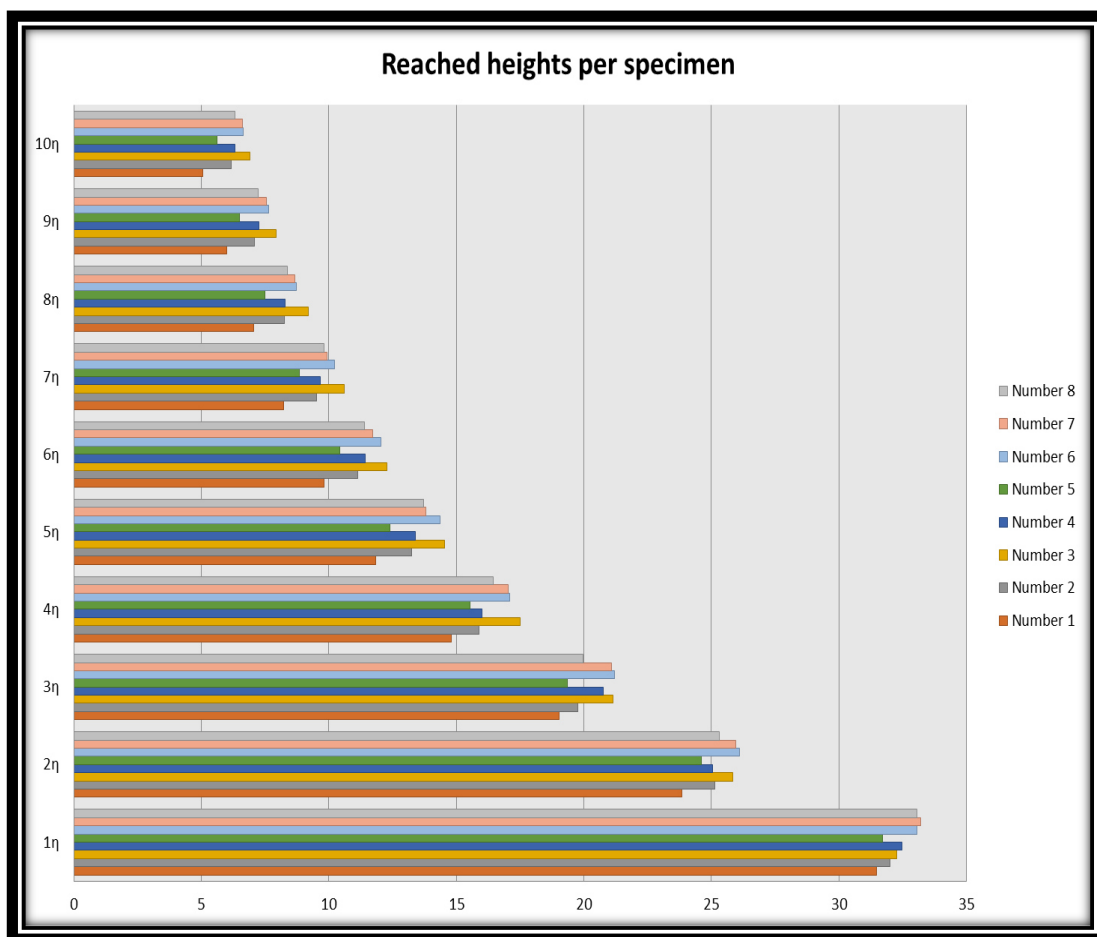
Θ-7.6: Διαγράμματα μεταβολής γραμμικής κλίσης ανά δοκίμιο.

Η επόμενη μέτρηση που λήφθηκε ήταν η γραμμική μεταβολή της κλίσης, που παράχθηκε από τα μέσα ύψη αναπήδησης μετά την κάθε κρούση. Η μαθηματική σχέση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η $Y=aX+b$ (Y = εξαρτημένη μεταβλητή, b =σταθερά, a =συντελεστής γραμμικής μεταβολής, X =ανεξάρτητη μεταβλητή). Η σχέση αυτή χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τα δεδομένα και να εξηγήσει τη σχέση μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής και μίας ή παραπάνω ανεξάρτητων, τοποθετώντας μία μόνο γραμμή στο διάγραμμα. Για κάθε σετ συνεχόμενων συγκρούσεων, παράχθηκε μια γραμμική κλίση. Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Έτσι δημιουργήθηκαν διάφορα γραφήματα, που δείχνουν τη συμπεριφορά κάθε δοκιμίου κάθε φορά που η σφαίρα προσέκρουε στην αστάλινη πλάκα από πάνω του, με συνέπεια την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας από το δοκίμιο. Τα γραφήματα παρουσιάζονται παραπάνω στην εικόνα Θ-7.6.

7.3.3 Γραφική σύγκριση της συμπεριφοράς κάθε δοκιμίου

Για να υπάρξει μια πιο απλή απεικόνιση της συμπεριφοράς των παραπάνω δοκιμίων, δημιουργήθηκε ένα γράφημα με τα ύψη μετά από κάθε αναπήδηση για κάθε δοκίμιο. Ο σκοπός της δημιουργίας αυτού του γραφήματος ήταν η εύκολη σύγκριση μεταξύ των δοκιμίων, σχετικά με τον τρόπο που φαίνεται να απορροφούν την κινητική ενέργεια της σφαίρας, πόσο σταδιακή είναι αυτή η απορρόφηση κλπ. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να κάνουν πιο εύκολη τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τους παρατηρητές, σε σχέση με το ποιος συνδυασμός συνταγής και κύκλου πολυμερισμού θα είναι πιο κατάλληλος για κάθε εφαρμογή στο μέλλον.

Το γράφημα αυτό παρουσιάζει τον αριθμό υψών αναπήδησης της σφαίρας, βάζοντας μαζί όλα τα ύψη για κάθε δοκίμιο. Τα ύψη αυτά τοποθετήθηκαν επίτηδες πολύ κοντά, με διαφορετικά χρώματα έτσι ώστε να μπορούν να διακριθούν από τα άλλα. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στην εικόνα Θ-7.7.



Θ-7.7: Γράφημα απεικόνισης του ύψους κάθε αναπήδησης για κάθε δοκίμιο.

7.4 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων

7.4.1 Απορρόφηση κινητικής ενέργειας

Πριν δούμε τα αποτελέσματα, αρχικά περιμέναμε ότι τα πιο εύκαμπτα δοκίμια θα απορροφούσαν περισσότερη κινητική ενέργεια της σφαίρας, με αποτέλεσμα αυτή να αναπηδάει σε χαμηλότερο ύψος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή ότι τα πιο στιβαρά δοκίμια έκαναν τη σφαίρα να αναπηδήσει σε χαμηλότερο ύψος από τα πιο εύκαμπτα.

Η παραπάνω διαπίστωση είναι λογική, εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς στο μέγεθος της σφαίρας και των εξεταζόμενων δοκιμίων. Συγκρινόμενη με την ατσάλινη πλάκα και τους σωλήνες από CFRP, οι διαστάσεις και το βάρος της σφαίρας είναι σαφώς μικρότερα. Συνεπώς, όταν η σφαίρα προσέκρουε σε τόσο μεγάλη

πλάκα και δοκίμια, το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα και ήχο. Η θερμότητα στη συνέχεια διαχεόταν στον περιβάλλοντα αέρα και τα άλλα αντικείμενα. Συνεπώς, η μπάλα έχανε το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής της ενέργειας μετά την κρούση όταν χρησιμοποιήθηκαν πιο στιβαρά δοκίμια, επειδή αυτά μπορούν να απορροφήσουν περισσότερη ενέργεια πριν εισέλθουν στην πλαστική περιοχή. Το ποσοστό της απώλειας της κινητικής ενέργειας του συστήματος κατά την κρούση δίνεται από την σχέση

$$f = \frac{K_i - K_f}{K_i} = \frac{m_1 * u_{i1}^2 - (m_1 + m_2) * u_f^2}{m_1 * u_{i1}^2} = \frac{m^2}{m_1 + m_2} \quad (7.1) \quad [7.51]$$

Η απώλεια κινητικής ενέργειας φτάνει το 100% σε περιπτώσεις όπου το κινούμενο σώμα είναι πολύ πιο ελαφρύ από το στατικό (i.e., if $m_2 \gg m_1$), όπου η χαμένη κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα.

Από τα αποτελέσματα, φαίνεται το πιο στιβαρό δοκίμιο να είναι το Δοκίμιο 1, αφού εμφανίζει το μικρότερο ύψος αναπήδησης για την σφαίρα. Τα πιο εύκαμπτα δοκίμια από την άλλη, ήταν τα δοκίμια 3 και 6, έχοντας τις περισσότερες φορές τα υψηλότερα ύψη αναπήδησης της σφαίρας. Συγκρίσιμα με τα 3 και 6 ήταν τα δοκίμια 2, 4 και 8 ενώ το δοκίμιο 5 ήταν κάπου στη μέση.

Ένας άλλος τρόπος κατανόησης των παραπάνω φαινομένων είναι οι επί τοις εκατό διαφορές μεταξύ των σετ απωλειών ύψους αναπήδησης για κάθε δοκίμιο. Όπως φαίνεται, όσο πιο στιβαρό είναι το δοκίμιο, τόσο μεγαλύτερη η επί τοις εκατό μείωση του ύψους αναπήδησης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι σε κάθε αναπήδηση της σφαίρας ένα μεγαλύτερο ποσό κινητικής ενέργειας χάθηκε σε πιο στιβαρά δοκίμια. Αυτό είναι εμφανές κατά τη σύγκριση του πιο στιβαρού με το πιο εύκαμπτο δοκίμιο, δοκίμια 1 και 6 αντίστοιχα, όπου το πρώτο έχει σημαντικά μεγαλύτερες απώλειες από το άλλο.

7.4.2 Το φαινόμενο Rebound

Εκτός από την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας, υπήρχε ακόμα ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων για κάθε δοκίμιο. Σε κάποια από τα εύκαμπτα δοκίμια, η σφαίρα έχανε ύψος με πιο αργό ρυθμό.

Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια που εμφάνιζαν αυτήν τη συμπεριφορά ήταν αυτά που είχαν 6 στρώσεις, υποδεικνύοντας το ότι οι επιπλέον στρώσεις λειτουργούσαν σαν «ελατήρια». Μακροσκοπικά, αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση στο ύψος αναπήδησης της σφαίρας και ένα πιο μικρό ρυθμό μείωσης του ύψους, δημιουργώντας έτσι το λεγόμενο “rebound” effect. Αυτό περιγράφεται ως *Impulsive Force*, όπου το $f(t)$ είναι μη μηδενικό κατά το σύντομο χρονικό διάστημα της επαφής t_1 και t_2 . Το vector impulse που σχετίζεται με αυτή τη δύναμη είναι

$$I = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \quad (7.2) \quad [7.51].$$

Το φαινόμενο αυτό ήταν εμφανές όταν μελετήθηκε η γραμμική μεταβολή και οι συντελεστές γραμμικής μεταβολής των κλίσεων που προέκυψαν για κάθε δοκίμιο. Παρατηρώντας τη συμπεριφορά της τροχιάς της σφαίρας στα δοκίμια με 6 στρώσεις και συγκρίνοντας την με αυτή των δοκιμίων με 4 στρώσεις, καταλήξαμε στο ότι οι παραγόμενες κλίσεις για κάθε σετ απωλειών ύψους μετά την κρούση ήταν λιγότερο απότομες. Έτσι ακόμα και αν είχαμε ένα πιο στιβαρό δοκίμιο, όπου η απώλεια κινητικής ενέργειας ήταν εμφανής, το φαινόμενο αναπήδησης στα δοκίμια των 6 στρώσεων διασφάλιζε ότι η απώλεια του ύψους θα γινόταν με ένα πιο σταθερό και γραμμικό ρυθμό, δίνοντας στη σφαίρα μια μικρή ώθηση.

7.4.3 Η επίδραση του χρόνου ψήσιματος, της πίεσης και της θερμοκρασίας

Οι συνθήκες κατά τους κύκλους πολυμερισμού στο ψήσιμο του δοκιμίου έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη μετέπειτα συμπεριφορά των εξεταζόμενων δοκιμίων. Ο τρόπος απορρόφησης της κινητικής ενέργειας από τη σφαίρα ήταν διαφορετικός, εξαιτίας των μεταβλητών χρόνων των κύκλων πολυμερισμού, της ασκούμενης εσωτερικής πίεσης και της θερμοκρασίας.

Από τα αποτελέσματα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα πιο στιβαρά δοκίμια προέκυψαν εφαρμόζοντας υψηλή πίεση μέσα στο καλούπι. Η υψηλή πίεση οδήγησε σε μικρό ποσοστό πορώδους στη δομή των δοκιμίων, που τα έκανε πιο δυνατά και λιγότερο εύκαμπτα, σε σχέση με τα άλλα που παράχθηκαν σε χαμηλή πίεση. Ακόμα και όταν είχαμε μεγάλους κύκλους θέρμανσης σε χαμηλή θερμοκρασία, όπου τα δοκίμια που παράγονται είναι πιο εύκαμπτα, με την εφαρμογή υψηλής πίεσης μέσα στο καλούπι, το τελικό προϊόν μπορεί να προκύψει πολύ πιο στιβαρό.

Έτσι, για τη δημιουργία δοκιμών από προ-εμποτισμένο ύφασμα CFRP με σκοπό να είναι πολύ ενδοτικά, πρέπει να χρησιμοποιηθούν χαμηλές θερμοκρασίες, χαμηλή πίεση και μεγάλοι κύκλοι θέρμανσης. Από την άλλη, αν θέλουμε ένα στιβαρό προϊόν, οι συνθήκες μέσα στον φούρνο πρέπει να είναι ακριβώς οι αντίθετες.

7.5 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη μελέτη εξετάστηκε η επίδραση της εφαρμοζόμενης πίεσης, της θερμοκρασίας και του κύκλου θέρμανσης ενός σωλήνα από προ-εμποτισμένα υφάσματα CFRP. Τα δοκίμια που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας 3 διαφορετικούς κύκλους θέρμανσης, σε διαστρωματώσεις με 4 ή 6 στρώσεις. Η επίδραση όλων των παραμέτρων μετρήθηκε, καθώς και οι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας και της ελαστικής συμπεριφοράς όλων των δοκιμών.

Από αυτό το πείραμα μπορούμε να εξάγουμε κάποια αποτελέσματα:

- Η χρήση της διαστρωμάτωσης με 6 στρώσεις οδηγεί σε προϊόντα πιο ικανά να έχουν ιδιότητες αναπήδησης σε σχέση με αυτά που έχουν 4 στρώσεις, κάτι που είναι χρήσιμο όταν είναι απαραίτητη η άμεση απορρόφηση κρουστικών φορτίων.
- Μεγάλοι κύκλοι θέρμανσης με χαμηλή πίεση και θερμοκρασία μέσα στο καλούπι μπορούν να δημιουργήσουν εύκαμπτα τελικά προϊόντα, αλλά μία μέση στιβαρότητα μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή των χαμηλών πιέσεων σε υψηλές. Τα πιο στιβαρά δοκίμια μπορούν να δημιουργηθούν με σύντομους κύκλους θέρμανσης, όπου η εφαρμοζόμενη πίεση και θερμοκρασία είναι σε υψηλά επίπεδα.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν επίσης μια νέα προσέγγιση στην εξέταση των ελαστικών ιδιοτήτων σωλήνων από CFRP, οπότε μπορούμε να εξάγουμε και από εκεί μερικά συμπεράσματα.

- Ακόμα και όταν τα αποτελέσματα των δοκιμών ήταν αντίθετα των αναμενόμενων (πιο στιβαρά δοκίμια, υψηλότερα ύψη αναπήδησης από τη σφαίρα), εξαιτίας των διαφορών στις διαστάσεις μεταξύ της σφαίρας και των διαφόρων εξαρτημάτων και των δοκιμών, εξήχθησαν αποτελέσματα που έδειχναν τους μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας από μια διαφορετική σκοπιά.
- Η διάταξη του πειράματος ήταν από τις πιο απλές και οικονομικές λύσεις για πειραματισμό με τις ελαστικές ιδιότητες των CFRP. Απαιτεί μόνο ακρίβεια κατά τις μετρήσεις, με τη χρήση απλών αντικειμένων που

μπορούν να βρεθούν εύκολα και με χαμηλό κόστος. Είναι μια πολύ καλή λύση για μικρά εργαστήρια και νέες επιχειρήσεις που αντιμετωπίζουν αντίστοιχα θέματα, κρατώντας υπ' όψη την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα.

7.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

[7.1] A. Treviso, B. Van Genechten, D. Mundo, M. Tournour, Damping in composite materials: Properties and models, *Composites Part B*, 78, (2015) ,144-15

[7.2] R.D. Adams, M.R. Maheri, Damping in advanced polymer–matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 355, (2003), 126–130

[7.3] Edson Cocchieri Botelho, Rogério Almeida Silva, Luiz Cláudio Pardini, Mirabel Cerqueira Rezende, A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/epoxy/aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures, *Materials Research*, Vol. 9, No. 3, 247-256, 2006

[7.4] Joachim Vanwalleghem, Study of damping and vibration behaviour of flax-carbon composite bicycle racing frames, *Faculteit Ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent, Academiejaar 2009-2010*

[7.5] Katherine Hay, Dynamic Properties of Hybrid Composite Hollow Cylinders: Application for Bicycle Handlebars, *Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, December, 2014*

[7.6] R. Chandra, S.P. Singh, K. Gupta, Damping studies in Fiber-reinforced composites - a review, *Composite Structures* 46, (1999), 41-51

[7.7] Ioana C. Finegan, Ronald F. Gibson, Recent research on enhancement of damping in polymer composites, *Composite Structures* 44, (1999), 89-98

[7.8] Michelle Leali Costa, Edson Cocchieri Botelho, Jane Maria Faulstich de Paiva, Mirabel Cerqueira Rezende, Characterization of Cure of Carbon/Epoxy Prepreg Used in Aerospace Field, *Materials Research*, Vol. 8, No. 3, 317-322, 2005

[7.9] C. Gernaat, S. Alavi-Soltani, M. Guzman, A. Rodriguez, B. Minaie, Correlation Between Viscoelastic and Mechanical Properties for an Out-of-Autoclave Polymer Composite, *Department of Mechanical Engineering, Wichita State University, Wichita, KS 67260*

[7.10] Yeong K. Kim, Isaac M. Daniel, Cure Cycle Effect on Composite Structures Manufactured by Resin Transfer Molding, Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol. 36, No. 14/2002

[7.11] Ahmed Khattab, Cure Cycle Effect on High-Temperature Polymer Composite Structures Molded by VARTM, Journal of Composites, Volume 2013, Article ID 162657

[7.12] Tien Minh Vo, Cure Temperature Variation and Hygrothermal Effects on an Out-Of-Autoclave Polymer Composite, Bachelor of Science, Department of Mechanical Engineering, Wichita State University, 2009

[7.13] Dai Ping, Wang Yanbing, Huang Zhixiong, Effect of Thermal Crosslink Conditions on Dynamic Mechanical Behaviors of Flexible Epoxy, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. Dec. 2008

[7.14] Ryan J. Thorpe, Experimental Characterization of the Viscoelastic Behavior of a Curing Epoxy Matrix Composite from Pre-Gelation to Full Cure, University of British Columbia (Vancouver), April 2013

[7.15] Khalil Ur Rehman Vora, Mechanical Properties Evolution During Cure for Out-Of-Autoclave Carbon-Epoxy Prepregs, Bachelor of Engineering, NED University of Engineering and Technology, 2006

[7.16] S. Alavi-Soltani, S. Sabzevari, H. Koushyar and B. Minaie, Thermal, rheological, and mechanical properties of a polymer composite cured at different isothermal cure temperatures, Journal of Composite Materials 0(0), 2011

[7.17] Arash Montazeri, Alireza Khavandi, Jafar Javadpour, Abbas Tcharkhtchi, Viscoelastic properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using two different curing cycles, Materials and Design 31, 2010, 3383-3388

[7.18] Vasileios M. Drakonakis, James C. Seferis, Charalambos C. Doumanidis, Curing Pressure Influence of Out-of-Autoclave Processing on Structural Composites for Commercial Aviation, Advances in Materials Science and Engineering Volume 2013, Article ID 356824

[7.19] F.Y.C. Boey, S.W. Lye, Effects of Vacuum and Pressure in an Autoclave Curing Process for a Thermosetting Fibre-Reinforced Composite, Journal of Materials Processing Technology, 23 (1990), 121-131

[7.20] John Edward Neira, José Daniel Diniz, The Effect of Processing Conditions on the Viscoelastic Properties of Polymer Matrix Composites, 19th International Congress of Mechanical Engineering, November 5-9, 2007, Brasília, DF

[7.21] J. Zhang, B.L. Fox, Characterization and Analysis of Delamination Fracture and Nanocreep Properties in Carbon Epoxy Composites Manufactured by Different Processes, *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, No. 14, 2006

[7.22] Sung Yi, Harry H. Hilton, M. Fouad Ahmad, Cure Cycle Simulations of Composites with Temperature and Cure Dependent Anisotropic Viscoelastic Properties and Stochastic Delaminations, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 5:81-101,1998

[7.23] Jyotishkumar Parameswaran Pillai, Jürgen Pionteck, Rudiger Haßler, Christophe Sinturel, Viju Susan Mathew, Sabu Thomas, Effect of Cure Conditions on the Generated Morphology and Viscoelastic Properties of a Poly(acrylonitrile–butadiene–styrene) Modified Epoxy–Amine System, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51, 2586–2595

[7.24] R.Olivier, J.P. Cottu, B. Ferret, Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates, *Composites* 26, (1995),509-515

[7.25] Ling Liu, Bo-Ming Zhang, Dian-Fu Wang, Zhan-Jun Wu, Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates, *Composite Structures* 73 (2006) 303–309

[7.26] Hoda Koushyar, Seyed Alavi-Soltani, Bob Minaie, Melanie Violette, Effects of variation in autoclave pressure, temperature, and vacuum-application time on porosity and mechanical properties of a carbon fiber/epoxy composite, *Journal of Composite Materials* 46(16), 1985–2004

[7.27] J. Zhang, B. Fox, Manufacturing Process on the Mode I Interlaminar Fracture Toughness and Nanocreep Properties of CFRP, Victorian Centre for Advanced Materials Manufacturing School of Engineering and Technology, Deakin University Geelong, VIC 3217, Australia

[7.28] Christian Brauner, Tim B. Block, Holger Purol, Axel S. Herrmann, Microlevel manufacturing process simulation of carbon fiber/epoxy composites to analyze the effect of chemical and thermal induced residual stresses, *Journal of Composite Materials* 0(0), 1–21,2012

[7.29] S. Hernández, F. Sket, C. González, J. LLorca, Optimization of curing cycle in carbon fiber-reinforced laminates: Void distribution and mechanical properties, *Composites Science and Technology* 85 (2013), 73–82

[7.30] O. Dimiriev, S. Mischenko, Optimization of Curing Cycles for Thick-wall Products of the Polymeric Composite Materials, *Advances in Composites Materials - Ecodesign and Analysis*

[7.31] J.B. Johnson, C.N. Owston, The effect of cure cycle on the mechanical properties of carbon- fibre/epoxide resin, COMPOSITES, MAY 1973

[7.32] M. Akay, Aspects of Dynamic Mechanical Analysis in Polymeric Composites, Composites Science and Technology 47 (1993) 419-423

[7.33] H. Hanselka, U. Hoffmann, Damping Characteristics of Fibre Reinforced Polymers, Technische Mechanik, Band 10, Heft 2, 1999, 91-101

[7.34] W. Stark, M. Jaunich, J. McHugh, Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of epoxy carbon-fibre prepregs partially cured in a discontinued autoclave analogue process, Polymer Testing 41, 2015, 140-148

[7.35] Onur Coban, Mustafa Ozgur Bora, Tamer Sinmazcelik, Volkan Gunay, Effect of Fiber Orientation on Viscoelastic Properties of Polymer Matrix Composites Subjected to Thermal Cycles, POLYMER COMPOSITES, 2010

[7.36] A. De Fenza, E. Monaco, F. Amoroso, L. Lecce, Experimental approach in studying temperature effects on composite material structures realized with viscoelastic damping treatments, Journal of Vibration and Control, 2016, Vol. 22(2) 358–370

[7.37] B. Benchekchou, M. Coni, H. V. C. Howarth, R. G. White, Some aspects of vibration damping improvement in composite materials, Composites Part B 29B (1998) 809–817

[7.38] Armando Perez-Pena, Andres A. Garcia-Granada, Joaquin Menacho, Jose J. Molins, Guillermo Reyes, A methodology for damping measurement of engineering materials: application to a structure under bending and torsion loading, Journal of Vibration and Control, 1–11, 2014

[7.39] Riccardo Vescovini, Chiara Bisagni, A procedure for the evaluation of damping effects in composite laminated structures, Progress in Aerospace Sciences 78, (2015), 19–29

[7.40] Jean-Marie Berthelot, Mustapha Assarar, Youssef Sefrani, Abderrahim El Mahi, Damping analysis of composite materials and structures, Composite Structures 85, (2008), 189–204

[7.41] Jean-Marie Berthelot, Damping analysis of laminated beams and plates using the Ritz method, Composite Structures 74, (2006), 186–201

[7.42] E.C. Botelho, A.N. Campos, E. de Barros, L.C. Pardini, M.C. Rezende, Damping behavior of continuous fiber/metal composite materials by the free vibration method, Composites: Part B 37, (2006), 255–263

- [7.43] Ahmed Maher, Fawkia Ramadan, Mohamed Ferra, Modeling of vibration damping in composite structures, *Composite Structures* 46, (1999), 163-170
- [7.44] E. C. Botelho, M.L. Costa, L.C. Pardini, M.C. Rezende, Processing and hygrothermal effects on viscoelastic behavior of glass fiber/epoxy composites, *Journal of Materials Science* 40, (2005), 3615 – 3623
- [7.45] Jinshui Yang, Jian Xiong, Li Ma, Guoqi Zhang, Xintao Wang, Linzhi Wu, Study on vibration damping of composite sandwich cylindrical shell with pyramidal truss-like cores, *Composite Structures* 117, (2014), 362–372
- [7.46] Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials E 756-04, ASTM International
- [7.47] R. Rikards, A. Chate, Vibration and Damping Analysis of Laminated Composite and Sandwich Shells, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 4209-232,1997
- [7.48] M.R. Maheri, R.D. Adams, Vibration Properties of Structural FRP Composites, *JSME International Journal Series A*, Vol. 42, No.3, 1999
- [7.49] T300 Data Sheet, TORAYCA
- [7.50] A. Kitselis, N.A. Traiforos, D.E. Manolakos, The effect of resonance on the void content in CFRP tubes, *Composites Part B*, 106, (2016), 164-171
- [7.51] <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/301/lectures/node76.html>, November 18, 2016

Κεφάλαιο 8 Η επίδραση του συντονισμού στην κατασκευή σωλήνων ενισχυμένων με ίνες άνθρακα.

8.1 Εισαγωγή

Έχοντας καταλήξει σε μία μέθοδο για τη διατήρηση της ελαστικότητας των ανθρακονημάτινων σωλήνων, το επόμενο πείραμα που σχεδιάστηκε αφορά τη μείωση του πορώδους που παρατηρείται όταν το πλαίσιο παράγεται με το συνδυασμό φούρνου και αντλίας κενού. Η παρουσία κενών και ασυνεχειών στην μικροδομή κατασκευών από σύνθετα υλικά είναι ένα συνηθισμένο κατασκευαστικό ελάττωμα. Η δραστική μείωση ή ακόμα και η εξάλειψη των ατελειών αυτών αναμένεται να οδηγήσει στην αύξηση της ποιότητας και τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής.

Η ύπαρξη πορώδους και ασυνεχειών στη δομή κατασκευών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα είναι το αποτέλεσμα είτε του αέρα, που παγιδεύεται ανάμεσα στις στρώσεις κατά την διαδικασία της διαστρωμάτωσης, είτε προέρχεται από την υγρασία, η οποία εμπεριέχεται σε διαλυμένη μορφή στη ρητίνη και απελευθερώνεται από αυτήν κατά τη διάρκεια του κύκλου πολυμερισμού κυρίως στο φούρνο [8.1 – 8.3].

Επιπλέον, στις προεμποτισμένες ίνες άνθρακα, από τις οποίες κατασκευάζονται συνήθως πολλά εξαρτήματα ενισχυμένα με ανθρακονήματα, υπάρχει πάντα ένας αρχικός πληθυσμός από φυσαλίδες αέρα, κυρίως λόγω της ατελούς εμποτίσης των ινών με ρητίνη από τον προμηθευτή [8.4]. Ο αρχικός αυτός πληθυσμός φυσαλίδων αέρα είναι εκείνος που οδηγεί στην εμφάνιση των κατασκευαστικών ελαττωμάτων και κενών στη μικροδομή της κατασκευής κατά το κύκλο του πολυμερισμού της, σε περίπτωση που αυτές οι φυσαλίδες δεν εγκαταλείψουν έγκαιρα τη δομή της κατασκευής.

Στο τελικό προϊόν, ένα υψηλό ποσοστό κενών και ασυνεχειών στη δομή του προϊόντος υποδηλώνει ότι η ρητίνη δεν έχει πλήρως εμποτίσει τις ίνες κατά το κύκλο πολυμερισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη επαρκή συνάφεια των ινών, το οποίο οδηγεί στη μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής, όπως επίσης και σε φθορά των ινών λόγω της αμοιβαίας τριβής τους και της συγκέντρωσης τάσεων στα σημεία ασυνέχειας της δομής του υλικού. Αυτό ενδέχεται να οδηγήσει σε ρωγμές στο εσωτερικό της κατασκευής, όπως επίσης και σε αποκόλληση των στρώσεων με τις γειτονικές τους (delamination) [8.5, 8.6]. Επίσης, η ύπαρξη πορώδους συμβάλλει στην απορρόφηση υγρασίας από το εξάρτημα, το οποίο επίσης μειώνει τη συνάφεια της μήτρας και των ινών [8.7].

Πολλές έρευνες και μελέτες έχουν ασχοληθεί με την επίδραση του πορώδους στις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής [8.8 – 8.16]. Για αυτούς τους λόγους είναι πολύ σημαντικό να διατηρηθεί το κατ' όγκον ποσοστό του πορώδους κάτω από ένα ορισμένο ποσό, τυπικά λιγότερο από 1% για τις αεροπορικές κατασκευές και 5% για άλλες εφαρμογές [8.17, 8.18].

Με κύριο γνώμωνα τη μείωση του κόστους, έχουν γίνει διάφορες μελέτες για την παραγωγή ανθρακονημάτων προϊόντων χωρίς τη χρήση autoclave [8.19 – 8.22]. Για τη μείωση του αυξημένου πορώδους, το οποίο είναι αποτέλεσμα της μη χρήσης υψηλής πίεσης κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού, ορισμένοι ερευνητές προτείνουν την εισαγωγή μηχανικών δονήσεων κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού [8.23 – 8.25]. Έχει προταθεί [8.26] ότι η χρήση χαμηλόσυχνων δονήσεων κατά τη διαδικασία πολυμερισμού της κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε μείωση έως και 50% του αριθμού των ασυνεχειών και κενών της δομής, μεταξύ δοκιμών κατασκευασμένων με και χωρίς δονήσεις.

8.2 Πειραματική διαδικασία:

8.2.1 Σκοπός του πειράματος:

Ο σκοπός αυτού του πειράματος είναι να διερευνήσει την ικανότητα επιβολής μηχανικών δονήσεων, και συγκεκριμένα συντονισμού, κατά τον κύκλο πολυμερισμού κατασκευής σωλήνων ενισχυμένων με ίνες άνθρακα, ως προς τη μείωση του ποσοστού πορώδους της κατασκευής.

Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν 24 δοκίμια εξωτερικής διαμέτρου 31.5 mm κάνοντας χρήση τεσσάρων διαφορετικών κύκλων πολυμερισμού, όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Πίνακα 8.1. Η επιλογή αυτών των κύκλων έγινε με κριτήριο την καλύτερη σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων ως προς το πορώδες της κατασκευής.

Πίνακας 8.1: Οι κύκλοι πολυμερισμού

Διαδικασία πολυμερισμού	Χρόνος πολυμερισμού (h)	Πίεση (bar)	Συντονισμός
1	4.5	7	Όχι
2	4.5	1	Όχι
3	30	1	Ναι
4	4.5	1	Ναι

8.2.2 Πειραματικά υλικά

Όλα τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από προεμποτισμένες ίνες άνθρακα μέσω χειρωνακτικής διαστρωμάτωσης των υλικών, αρχικά στην επίπεδη επιφάνει μιας πλάκας για την δημιουργία της στοίβας των υλικών (laminare kit) και έπειτα με την τοποθέτηση της στοίβας στην επιφάνεια του τελικού καλουπιού.

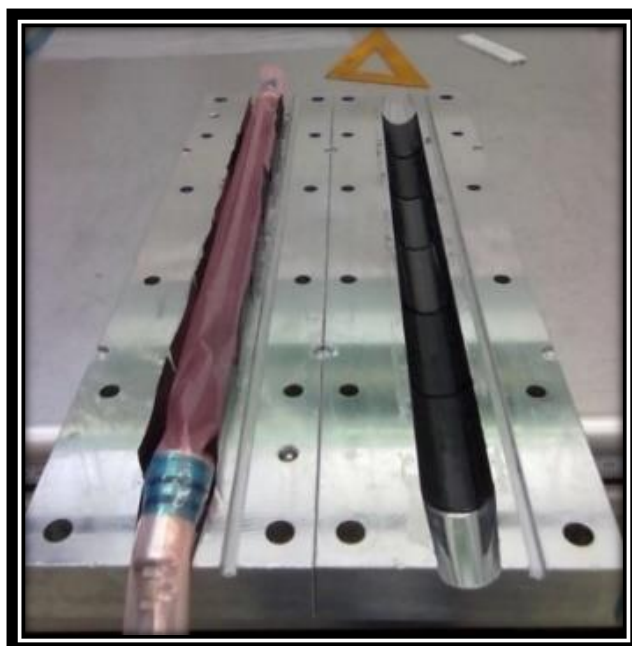
Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σωλήνων ήταν T300 πλεκτές (0°-90°) και μονοδιευθυντικές T700, και οι δύο τύποι ίνας είναι κατασκευασμένες από την εταιρεία Torayca. Το φύλλο με τις προεμποτισμένες μονοδιευθυντικές ίνες T700 εμπεριέχει 36% κατά βάρος ποσοστό σε ρητίνη, ενώ το πλεκτό φύλλο T300 43% κατά βάρος σε ρητίνη. Το αρχικό ποσοστό πορώδους και φυσαλίδων αέρα στα προεμποτισμένα φύλλα άνθρακα ήταν κάτω από 1% [8.27]. Το πάχος του πλεκτού φύλλου T300 μετρήθηκε σε 0.35 mm ενώ του μονοδιευθυντικού T700 σε 0.17 mm. Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η VTC401 από την εταιρεία SHD Composites. Το μέτρο ελαστικότητας της VTC401 μήτρας προσδιορίστηκε σε 7.56 GPa, ενώ η αντοχή της σε εφελκυσμό σε 29.6 MPa με την εκτέλεση ενός πειράματος εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ISO 527-5 [8.28].

8.2.3 Εξοπλισμός και η πειραματική διαδικασία :

Ο πειραματικός εξοπλισμός περιελάμβανε μια μηχανή Instron 4482, ελεγχόμενη μέσω υπολογιστή από κατάλληλο software, έναν φούρνο σχεδιασμένο από την Gram Carbon, μια αντλία κενού συνδεδεμένη με σωληνάκια υψηλής πίεσης, ένα αλουμινένιο καλούπι για την κατασκευή των σωλήνων, τον πνευματικό δονητή και ένα σετ από θερμοστοιχεία για τη λήψη των δεδομένων της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του κύκλου πολυμερισμού της κατασκευής των σωλήνων.

Τα δοκίμια κατασκευαστήκαν τοποθετώντας τις στοίβες των υλικών στο εσωτερικό κατάλληλα διαμορφωμένου καλουπιού. Το καλούπι αποτελούταν από δύο μέρη, κάθε ένα για την δημιουργία του μισού κυλίνδρου. Οι στρώσεις από το ένα κομμάτι του καλουπιού επικάλυπταν τις στρώσεις του δεύτερου μισού του καλουπιού με ένα συγκεκριμένο τύπο επικάλυψης, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα Θ-8.1.

Η δημιουργία της στοίβας των υλικών (laminates kit) έγινε με τη χρήση χάρακα προκειμένου να μετρηθεί με ακρίβεια η θέση της κάθε στρώσης σχετικά με τις γειτονικές της, όπως επίσης και οι διαστάσεις της. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες σε αυτό το κατασκευαστικό στάδιο μετρήθηκαν σε 21° Celsius και η σχετική υγρασία σε 52% RH.



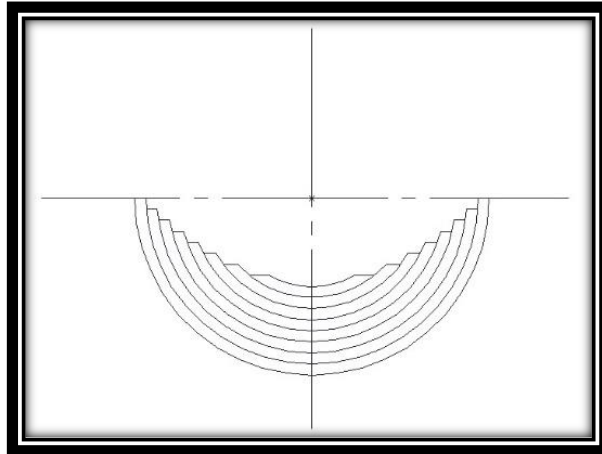
Θ-8.1: Η διαστρωμάτωση στη επιφάνεια του καλουπιού.

Για κάθε κύκλο πολυμερισμού κατασκευάστηκαν έξι δοκίμια με τρεις διαφορετικές διαστρωματώσεις, όπως αυτές παρουσιάζονται στο Πίνακα 8.2.

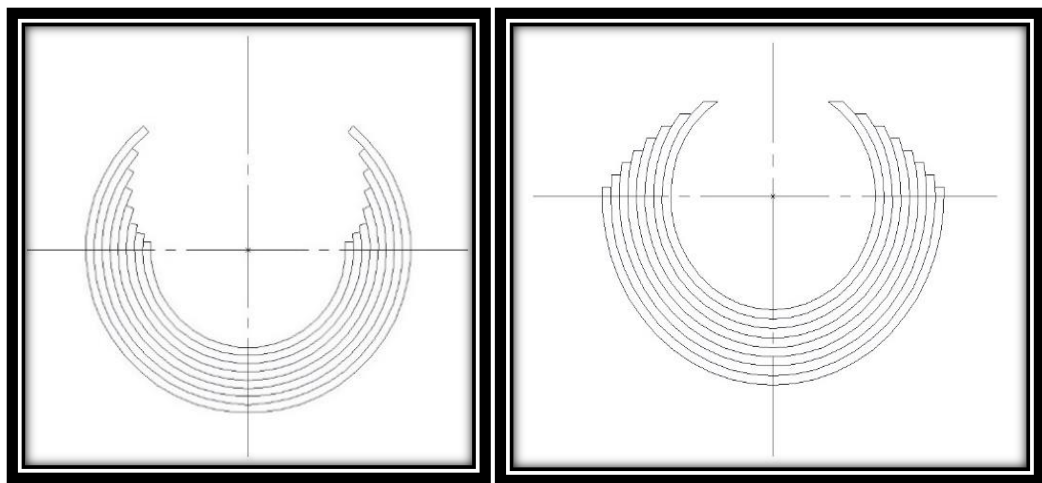
Πίνακας 8.2: Οι 3 διαφορετικοί τύποι διαστρωμάτωσης των δοκιμών

Δοκίμιο τύπου 1	Δοκίμιο τύπου 2	Δοκίμιο τύπου 3
UD90 T700	T300W 0/90	T300W ±45
UD0 T700	UD0 T700	T300W 0/90
UD90 T700	T300W ±45	T300W ±45
UD0 T700	UD90 T700	T300W 0/90
UD90 T700	T300W 0/90	T300W ±45
UD0 T700	UD0 T700	T300W 0/90
UD90 T700	T300W ±45	T300W ±45
UD0 T700	UD90 T700	T300W 0/90

Για κάθε τύπο διαστρωμάτωσης που παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.2, δύο διαφορετικά δοκίμια κατασκευάστηκαν, ένα με τον σειριακό τύπο επικάλυψης στρώσεων και ένα με τον διαδοχικό όπως αυτοί φαίνονται στο Σχήμα Θ-8.3.

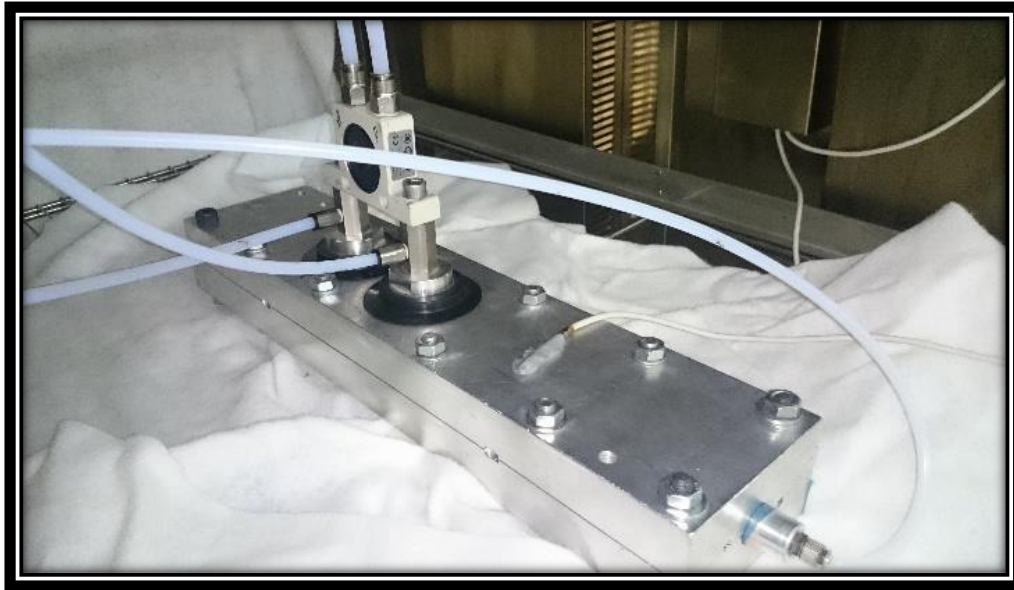


Θ-8.2: Το ένα μέρος του καλουπιού, όμοιο σε κάθε περίπτωση.



Θ-8.3: Τύποι επικάλυψης στρώσεων δοκιμίων: αριστερά διαδοχικός , δεξιά σειριακός.

Μια σακούλα κενού τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του καλουπιού για την δημιουργία της κατάλληλης κατανομής πίεσης στην επιφάνεια του και στην συνέχεια το καλούπι τοποθετήθηκε στο φούρνο. Όταν ήταν επιθυμητό, αναλόγως του κύκλου πολυμερισμού, ο πνευματικός δονητής τοποθετήθηκε πάνω στο καλούπι στο εσωτερικό του φούρνου για την εισαγωγή των μηχανικών δονήσεων κατά το στάδιο του πολυμερισμού της κατασκευής, όπως φαίνεται στο Σχήμα Θ-8.4. Ο συντονισμός του καλουπιού επιτεύχθηκε με τη μέτρηση και καταγραφή του μέγιστου πλάτους ταλάντωσης της κίνησης ενός αριθμού αλουμινένιων σφαιριδίων που τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του καλουπιού. Ο συντονισμός εφαρμόστηκε καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου πολυμερισμού της κατασκευής.



Θ-8.4: Ο πνευματικός δονητής.

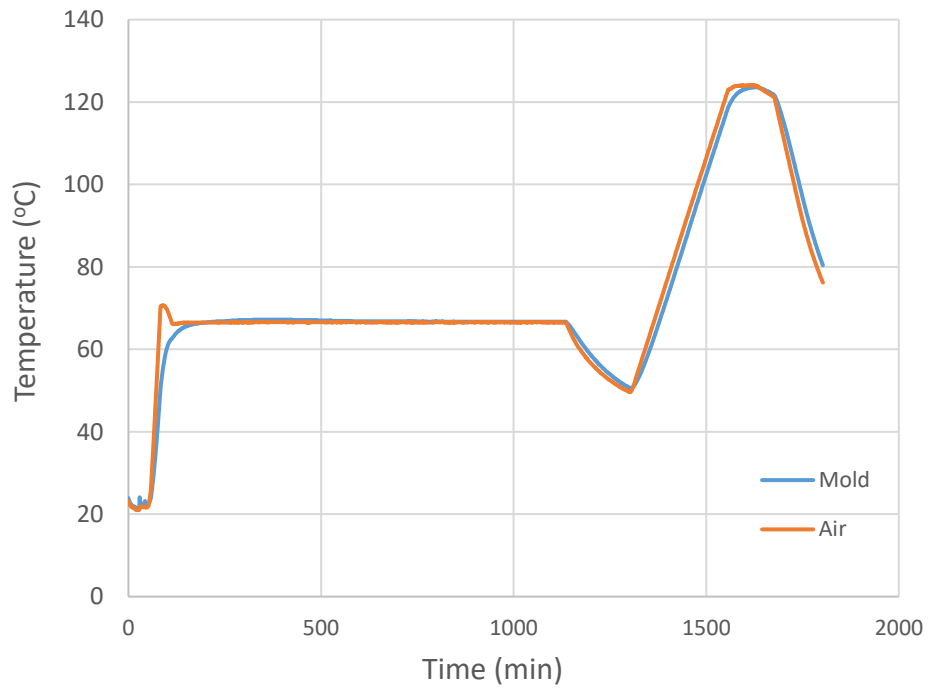
Η διαδικασία πολυμερισμού πραγματοποιήθηκε σε 8 στάδια για την διαδικασία πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας, και σε τέσσερα για αυτήν της σύντομης χρονικής διάρκειας [8.29]. Τα στάδια του πολυμερισμού παρουσιάζονται στο Πίνακα 8.3 και 8.4 αντίστοιχα. Ο πραγματικός κύκλος πολυμερισμού της κατασκευής, που προέκυψε από τα δεδομένα που συνέλεξαν τα θερμοστοιχεία, παρουσιάζεται στο Σχήμα Θ-8.5 για τον πολυμερισμό μακράς διάρκειας και στο σχήμα Θ-8.6 για τον πολυμερισμό σύντομης διάρκειας.

Πίνακας 8.3: Στάδια πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας

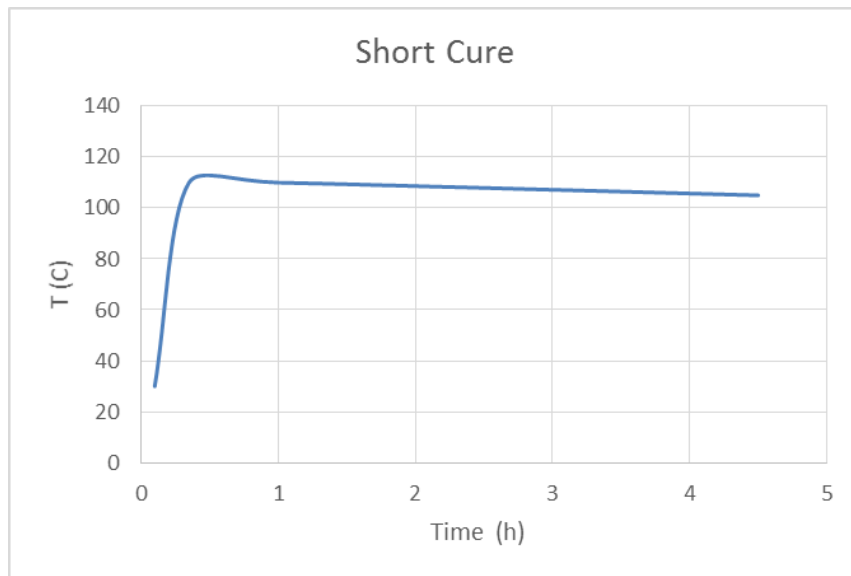
Διαδικασία πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας		
Στάδιο	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (h)
1	25	0,05
2	75	0,30
3	67	1
4	67	18
5	35	20
6	125	25
7	122	27
8	40	30

Πίνακας 8.4: Στάδια πολυμερισμού σύντομης χρονικής διάρκειας

Διαδικασία πολυμερισμού σύντομης χρονικής διάρκειας		
Στάδιο	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (h)
1	30	0,1
2	110	0,35
3	110	1
4	105	4,5

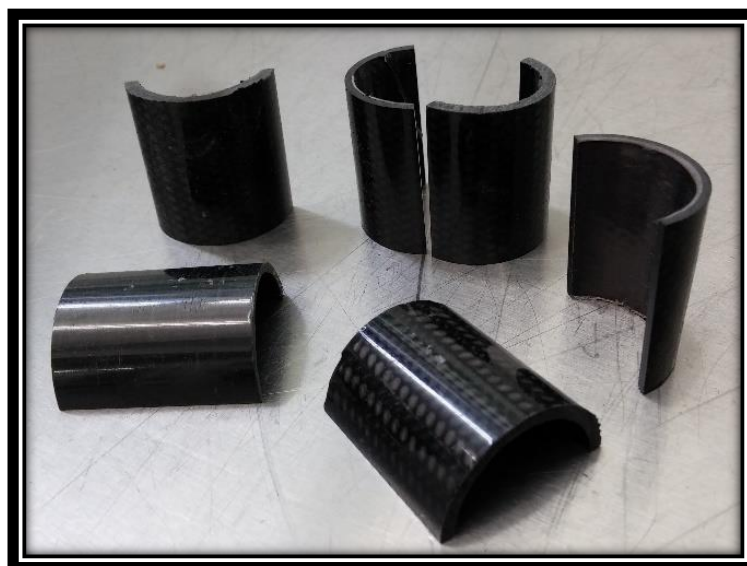


Θ-8.5: Διαδικασία πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας.



Θ-8.6: Διαδικασία πολυμερισμού σύντομης χρονικής διάρκειας.

Μετά το τέλος της διαδικασίας πολυμερισμού των δοκιμών και την έξοδό τους από το φούρνο, τα δοκίμια κατεργάστηκαν στις τελικές τους διαστάσεις. Οι αρχικοί κύλινδροι που προέκυψαν από το καλούπι είχαν μήκος 70 mm και κόπηκαν στην μέση δημιουργώντας δύο δοκίμια μήκους 35 mm έκαστο. Το ένα από αυτά τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση για την διεξαγωγή του πειράματος θλίψης και τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής, ενώ το δεύτερο κόπηκε αξονικά για την μέτρηση του αριθμού και του τύπου των κατασκευαστικών ελαττωμάτων της δομής της κατασκευής. Όλες οι τελικές επιφάνειες των δοκιμών που προέκυψαν λειάνθηκαν και καθαρίστηκαν.



Θ-8.7: Αξονική τομή των δοκιμών.

Έπειτα, καταγράφηκαν για κάθε δοκίμιο οι ακριβείς διαστάσεις και τα βάρη, κάνοντας χρήση μιας ζυγαριάς υψηλής ακριβείας και ενός ψηφιακού παχύμετρου.

Για τον προσδιορισμό του πορώδους στη διατομή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος scanning υψηλής ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε Flatbed Scanner Epson L655 και σαρώθηκαν με ανάλυση 4800 dpi. Για κάθε δοκίμιο ελέγχθηκαν τρεις διατομές για τον προσδιορισμό του πορώδους. Αυτές ήταν οι δύο πλευρές του κυλίνδρου, που στη συνέχεια θα υποβάλλονταν στο πείραμα της θλίψης, και η πλευρά της αξονικής τομής του δοκιμίου, που προέκυψε από το τομή του δεύτερου μισού του αρχικού κυλίνδρου των 70mm.

Στην συνέχεια, έγινε η εισαγωγή των εικόνων στο πρόγραμμα Matlab και έγινε χρήση των φίλτρων ανάλυσης και επεξεργασίας εικόνας που διαθέτει το λογισμικό. Από τις εικόνες αφαιρέθηκαν οι σκιές, τονίστηκαν οι ακμές, ενισχύθηκαν τα χρώματα και παρήχθησαν οι ασπρόμαυρες φωτογραφίες, όπως αυτές παρουσιάζονται παρακάτω για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Το λευκό χρώμα στην πρώτη σειρά φωτογραφιών κάθε περίπτωσης αντιπροσωπεύει τη δομή του υλικού, ενώ η κατανομή του πορώδους σε κάθε επιφάνεια παρουσιάζεται στην ακριβώς από κάτω φωτογραφία. Η αξονική τομή του δοκιμίου παρουσιάζεται κάτω από τις φωτογραφίες της εγκάρσιας τομής και ακολουθεί την ίδια λογική. Το ποσοστό του πορώδους σε κάθε εικόνα προσδιορίστηκε διαιρώντας τον αριθμό των pixels που αντιπροσωπεύουν τα κενά στη μικροδομή της κατασκευής και έχουν ένα συγκεκριμένο εμβαδόν, με τον συνολικό αριθμό των pixels της επιφάνειας της διατομής όπου καταλαμβάνει το συνολικό εμβαδόν. Ενδεικτικά η διαδικασία της επεξεργασίας εικόνας φαίνεται παρακάτω:



Σε κάθε ομάδα δοκιμών δόθηκε ένα συγκεκριμένο όνομα. Ο δείκτης 1 προσδιορίζει τα δοκίμια με διαδοχικό τύπο επικάλυψης των στρώσεων, ενώ ο δείκτης 2 το σειριακό.

Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε τεστ θλίψης. Η ταχύτητα κίνησης της επιφάνειας συμπίεσης της μηχανής θλίψης ορίστηκε σε 5 mm/min και τα δοκίμια συμπίεστηκαν σε μήκος 15 mm. Όποια δοκίμια αστόχησαν με μη αναμενόμενο τρόπο δεν συμπεριελήφθηκαν στα αποτελέσματα του πειράματος.

Η τάση, η οποία ασκήθηκε σε κάθε δοκίμιο, υπολογίστηκε διαιρώντας το θλιπτικό φορτίο που ασκούσε κάθε χρονική στιγμή η μηχανή στην επιφάνεια της διατομής κάθε δοκιμίου, σύμφωνα με το παρακάτω τύπο [8.30].

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (8.1)$$

Όπου:

σ : τάση (Μρα)

F: θλιπτικό φορτίο (N)

A: ονομαστική επιφάνεια διατομής δοκιμίου (mm^2) $A = \pi \cdot (r_{\text{out}} - r_{\text{in}})^2$

r_{in} , r_{out} (mm) : η μέση εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του σωλήνα

Η παραμόρφωση :

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (8.2)$$

Όπου:

Δh : η μετατόπιση της κινούμενης πλάκας της μηχανής (mm)

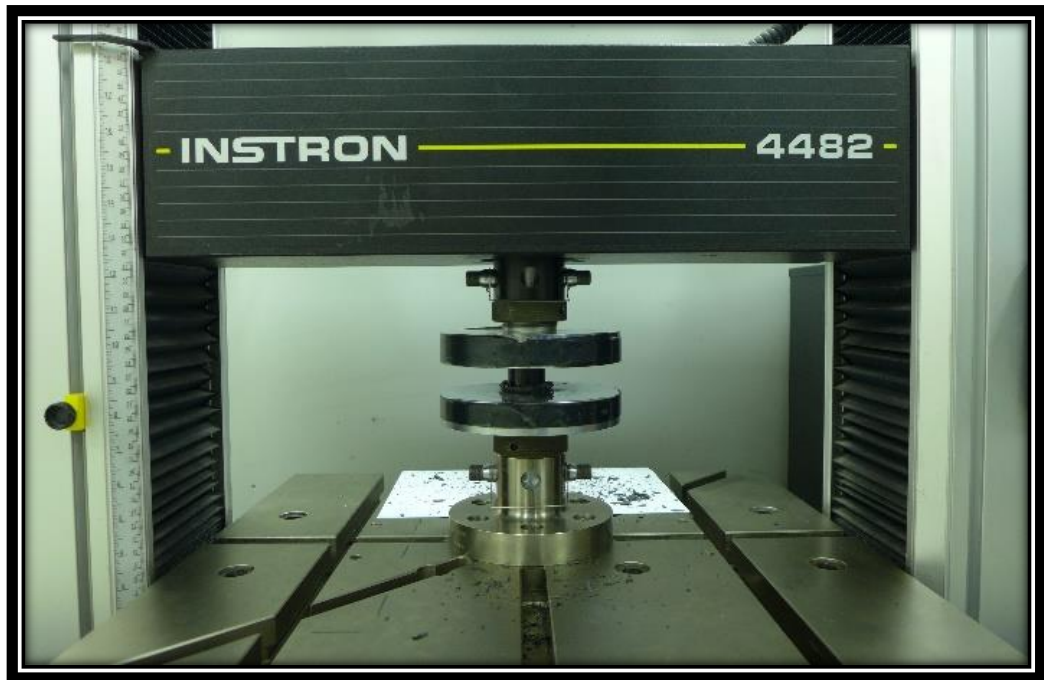
h_0 : το αρχικό μήκος του κάθε δοκιμίου (mm)

Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίστηκε με χρήση της παρακάτω εξίσωσης :

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (8.3)$$

Όπου:

σ_2 , σ_1 : οι τιμές τάσης για παραμόρφωση $\varepsilon_2=0.015$ and $\varepsilon_1=0.005$ αντίστοιχα από την γραμμική-ελαστική περιοχή της καμπύλης $\sigma - \varepsilon$.



Θ-8.8: Το πείραμα της θλίψης.



Θ-8.9: Τα δοκίμια μετά την θλίψη.

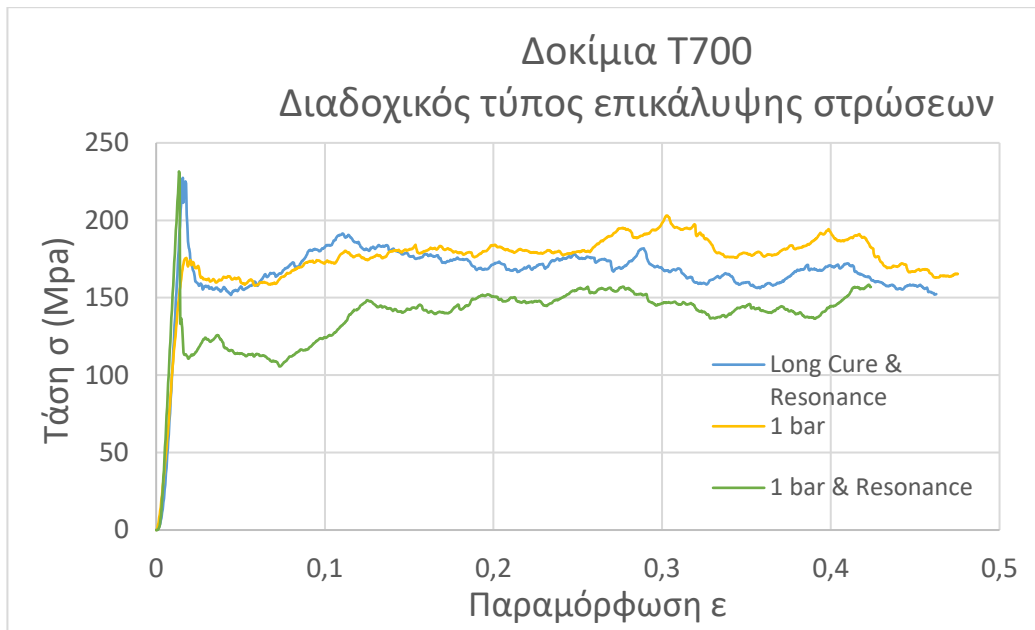
8.3 Αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα Θ-8.10 έως Θ-8.15 υπό την μορφή διαγραμμάτων. Τα δοκίμια κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με τον τύπο της διαστρωμάτωσής τους, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει μια ευθεία σύγκριση σχετικά με την επίδραση των διαφορετικών κύκλων πολυμερισμού της κατασκευής των δοκιμίων στις μηχανικές τους ιδιότητες.

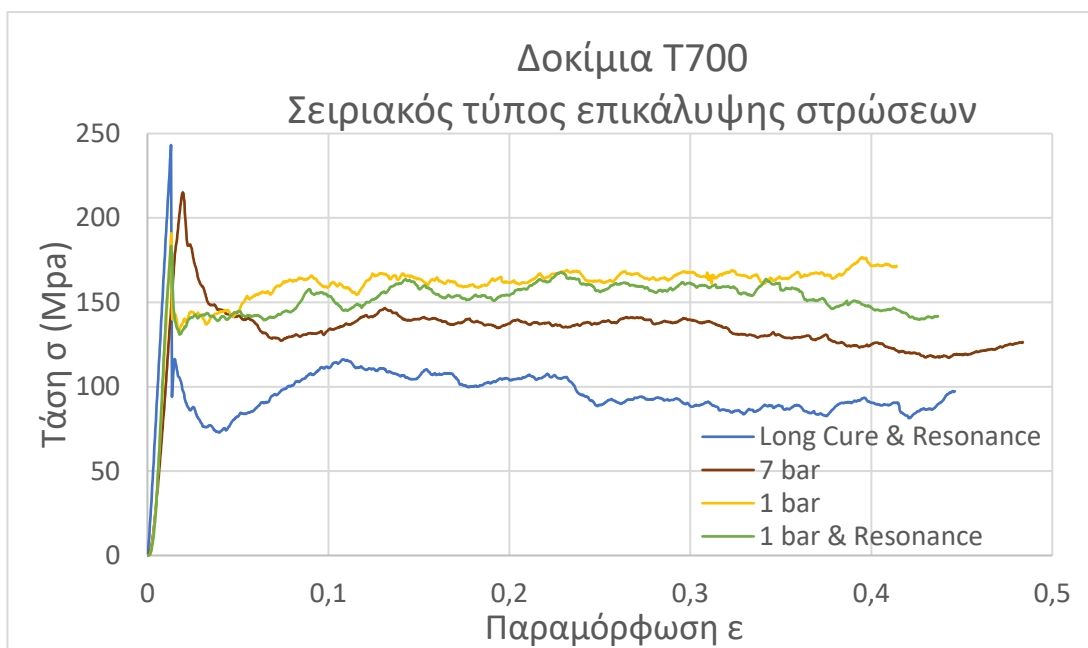
Ο μηχανισμός κατάρρευσης των δοκιμών και τα διάφορα χαρακτηριστικά στάδια αυτού παρουσιάζονται στο τέλος κάθε περίπτωσης. Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου δοκιμίου φαίνονται στο διπλανό γράφημα που παρατίθεται ξανά κυρίως για λόγους πληρότητας.

Η πρώτη εικόνα είναι ενώ το δοκίμιο βρίσκεται ακόμα στην γραμμική – ελαστική περιοχή της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης (σ - ϵ). Η δεύτερη εικόνα είναι αφού το δοκίμιο έχει μόλις ξεπεράσει το μέγιστο θλιπτικό φορτίο που μπορεί να αντέξει. Μετά το σημείο αυτό η κατασκευή μπορεί να υποστεί μόνο μόνιμη παραμόρφωση και το θλιπτικό φορτίο που μπορεί να αναλάβει πέφτει σημαντικά σε σχέση με την ελαστική περιοχή. Χαρακτηριστικό της μετάβασης στην περιοχή κατάρρευσης είναι ένας δυνατός κρότος κατά τη συμπίεση του δοκιμίου, το οποίο υποδηλώνει και την πρώτη ρωγμή στη δομή της κατασκευής και αποκόλλησης των στρώσεων μεταξύ τους (delamination). Η τρίτη εικόνα είναι από το μέσο περίπου της περιοχής κατάρρευσης του δοκιμίου, ενώ η τελευταία εικόνα από το τέλος της συμπίεσής του.

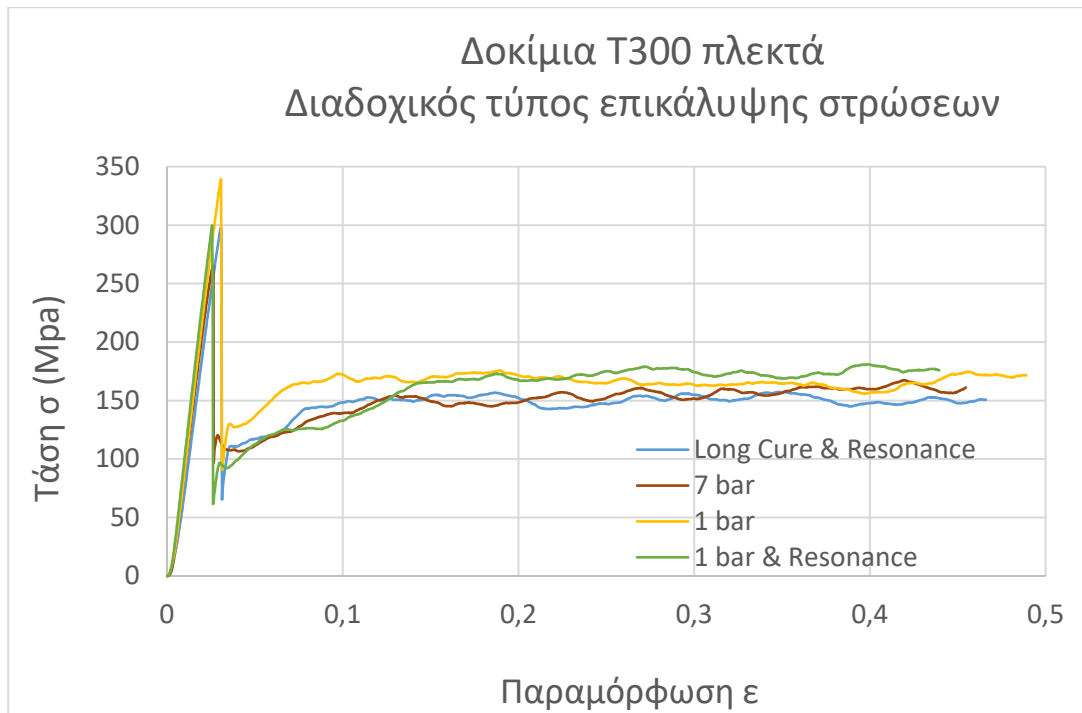
Τέλος ο Πίνακας 8.5 περιλαμβάνει τις τιμές που υπολογίστηκαν για το ποσοστό του πορώδους, του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε θλίψη για κάθε δοκίμιο.



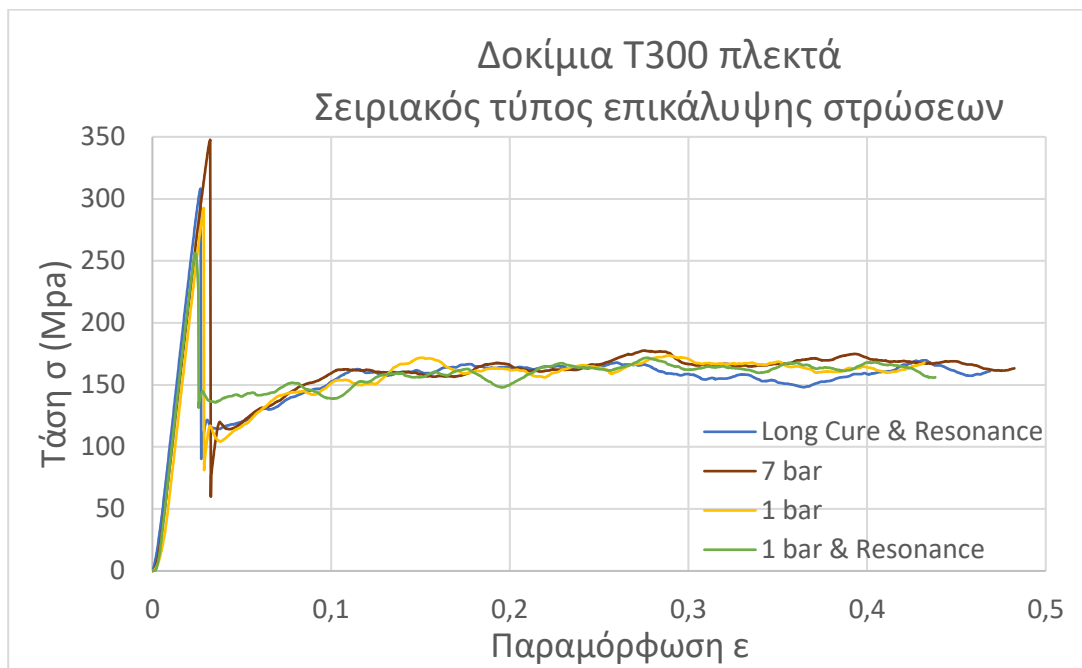
Θ-8.10: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια από T700 με διαδοχικό τύπο επικάλυψης.



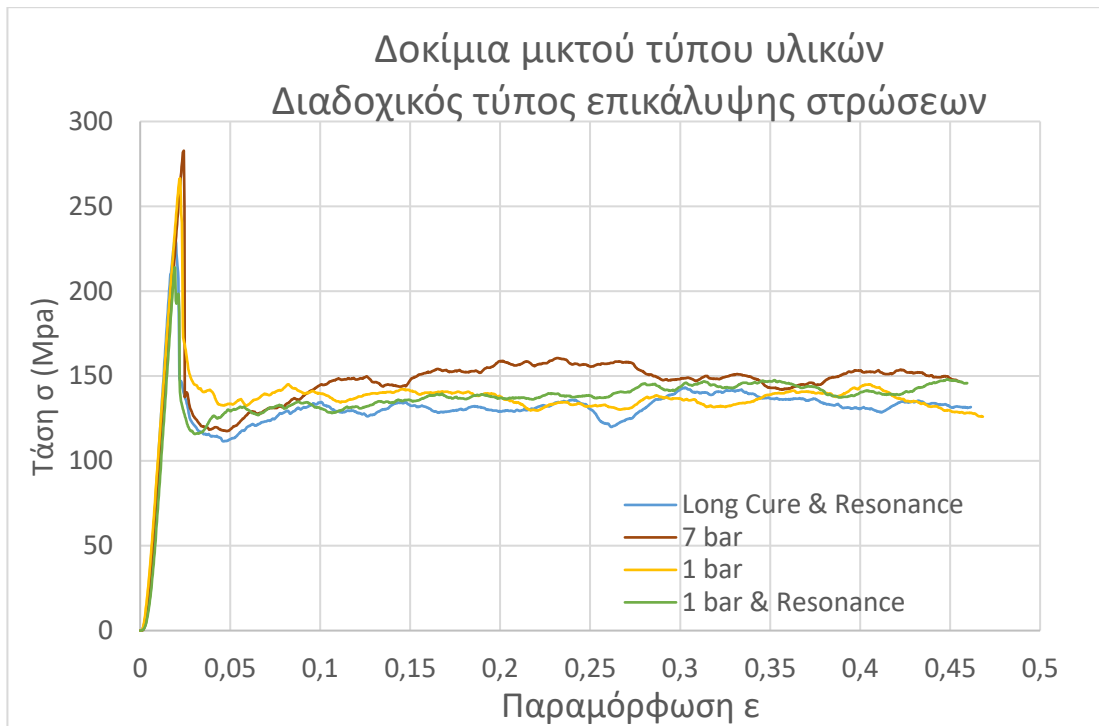
Θ-8.11: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια από T700 με σειριακό τύπο επικάλυψης.



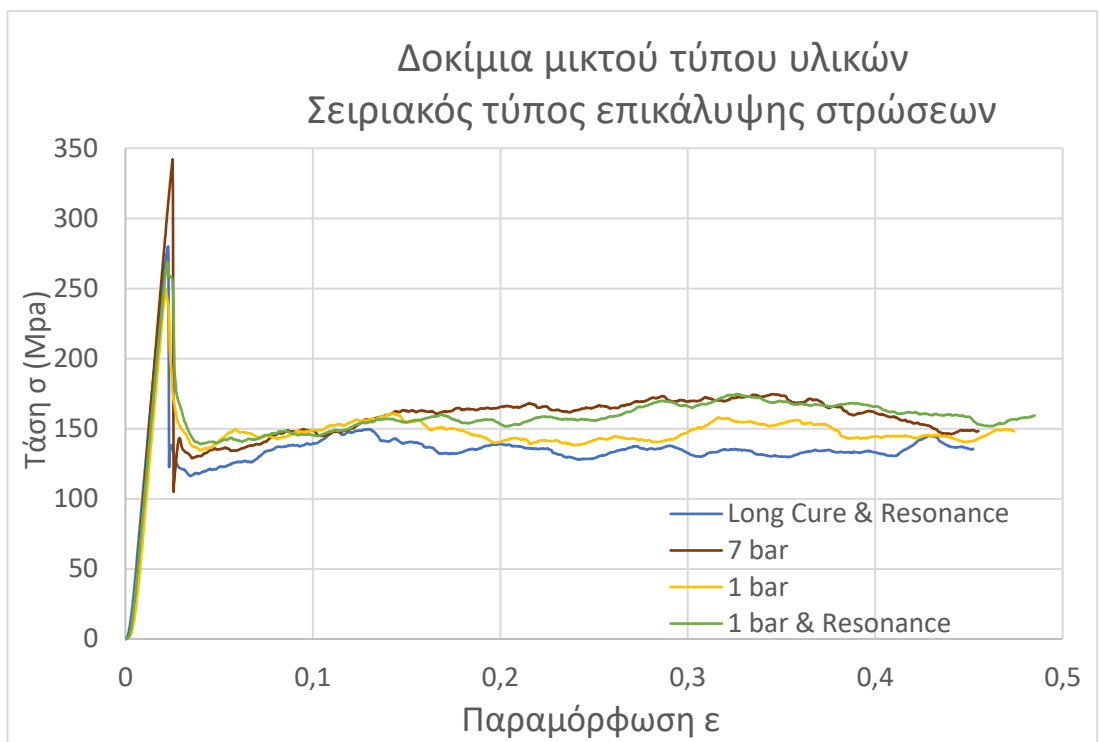
Θ-8.12: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια από T300 πλεκτό με διαδοχικό τύπο επικάλυψης.



Θ-8.13: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια από T300 πλεκτό με σειριακό τύπο επικάλυψης.



Θ-8.14: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια μικτού τύπου υλικών με διαδοχικό τύπο επικάλυψης.



Θ-8.15: Πειραματικά Αποτελέσματα για τα δοκίμια μικτού τύπου υλικών με σειριακό τύπο επικάλυψης.

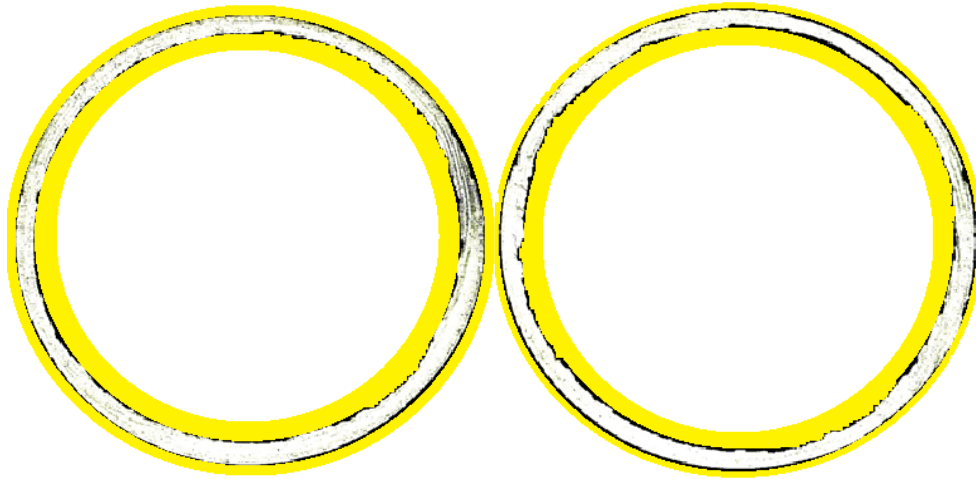
Κύκλος Πολυμερισμού 1

Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 7 bar, Συντονισμός Όχι
Διαστρωμάτωση 1 (UD T700), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

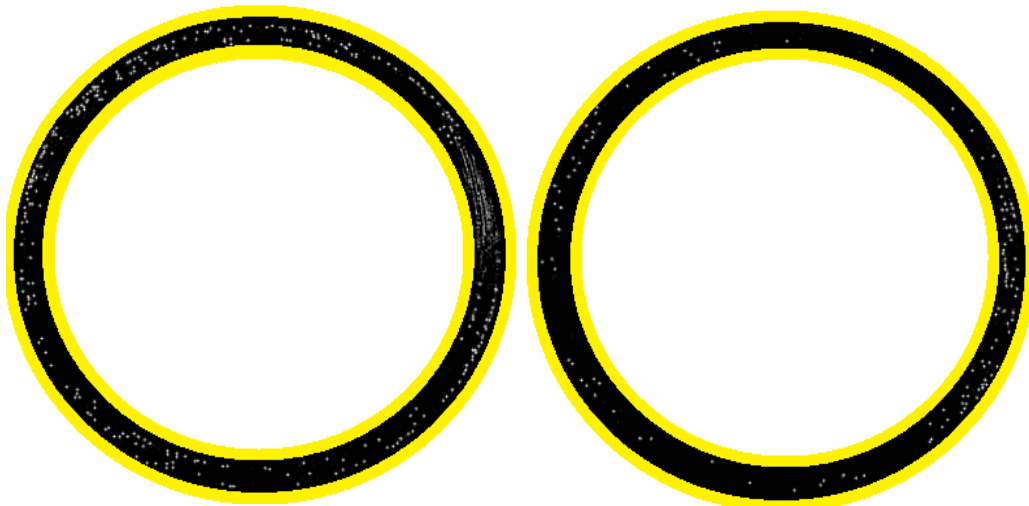
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 2.4816%

Ποσοστό = 0.63229%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

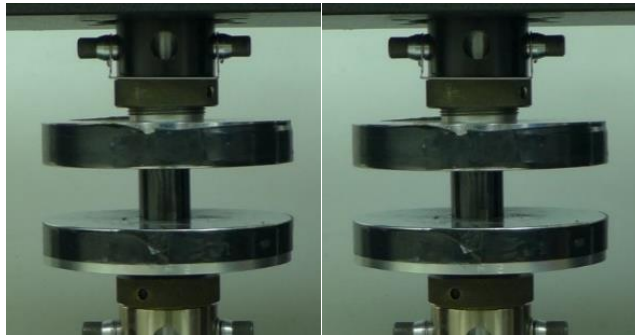
Πορώδες στην αξονική τομή



Ποσοστό πορώδους = 0.13336%

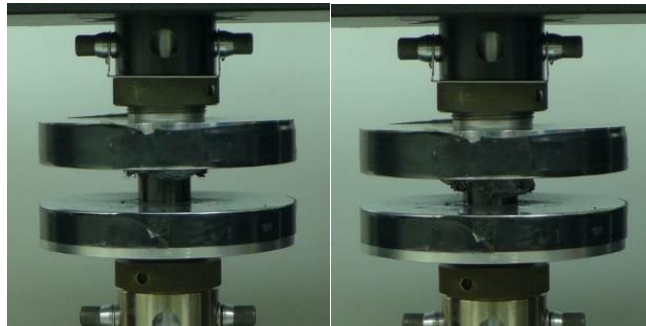
Μηχανισμός κατάρρευσης

Έναρξη
της
συμπίεσης



Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης

Σύντομος σχολιασμός :

Εμφανής είναι εδώ η θέση του διαδοχικού τύπου επικάλυψης στρώσεων. Στην περιοχή του συνδέσμου επικάλυψης στρώσεων παρατηρείται, σε αυτή την περίπτωση, αυξημένο ποσοστό πόρων και ασυνεχειών στην δομή του υλικού. Η κατάρρευση του δοκιμίου ακολουθεί το αναμενόμενο τύπο κατάρρευσης, τύπου μανιταροποίησης.

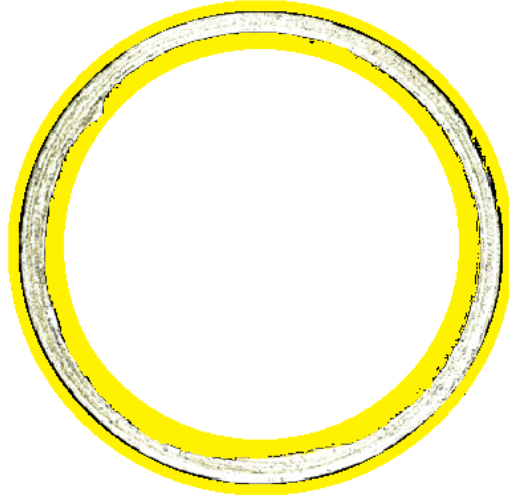
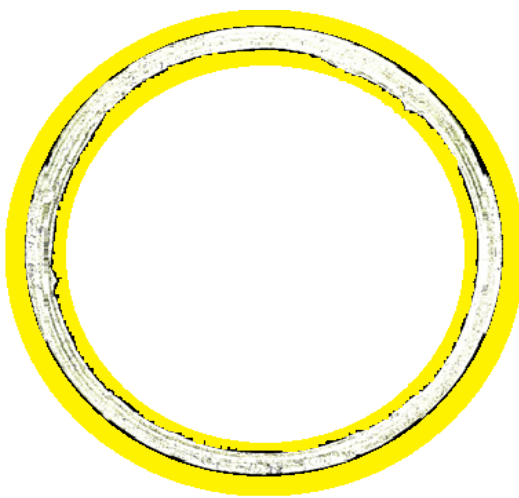
Κύκλος Πολυμερισμού 1

Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 7 bar, Συντονισμός Όχι
Διαστρωμάτωση 1 (UD T700), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

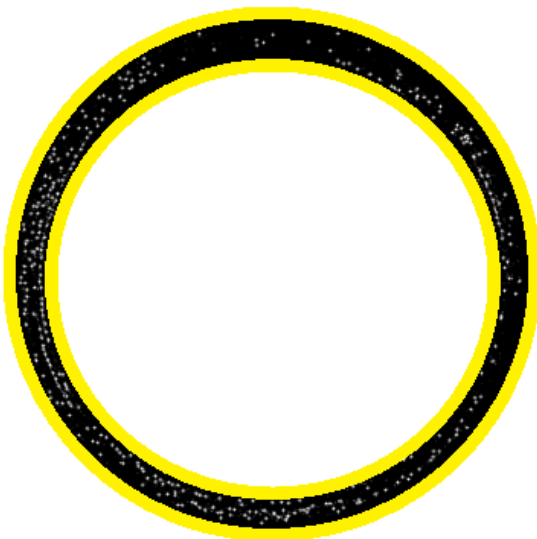
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

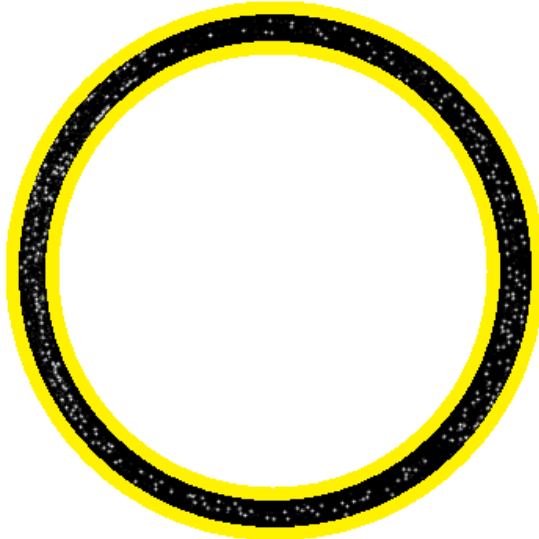
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 2.0143%



Ποσοστό = 2.681%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

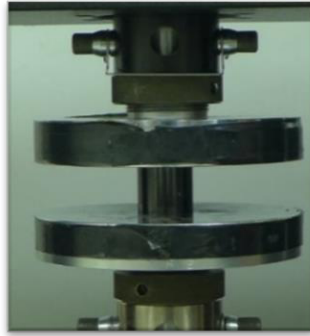
Πορώδες στην αξονική τομή



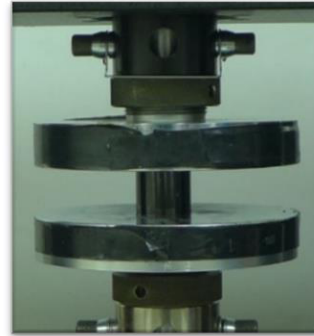
Ποσοστό πορώδους = 0.13336%

Μηχανισμός κατάρρευσης

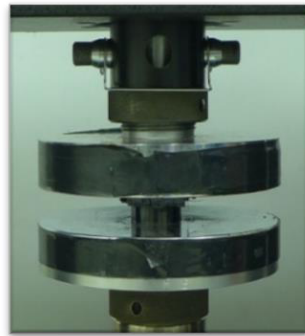
Έναρξη
της
συμπίεσης



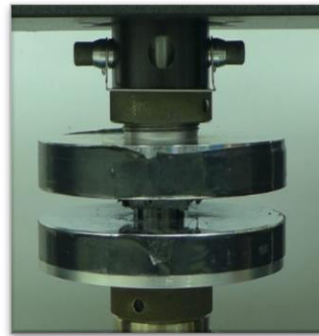
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

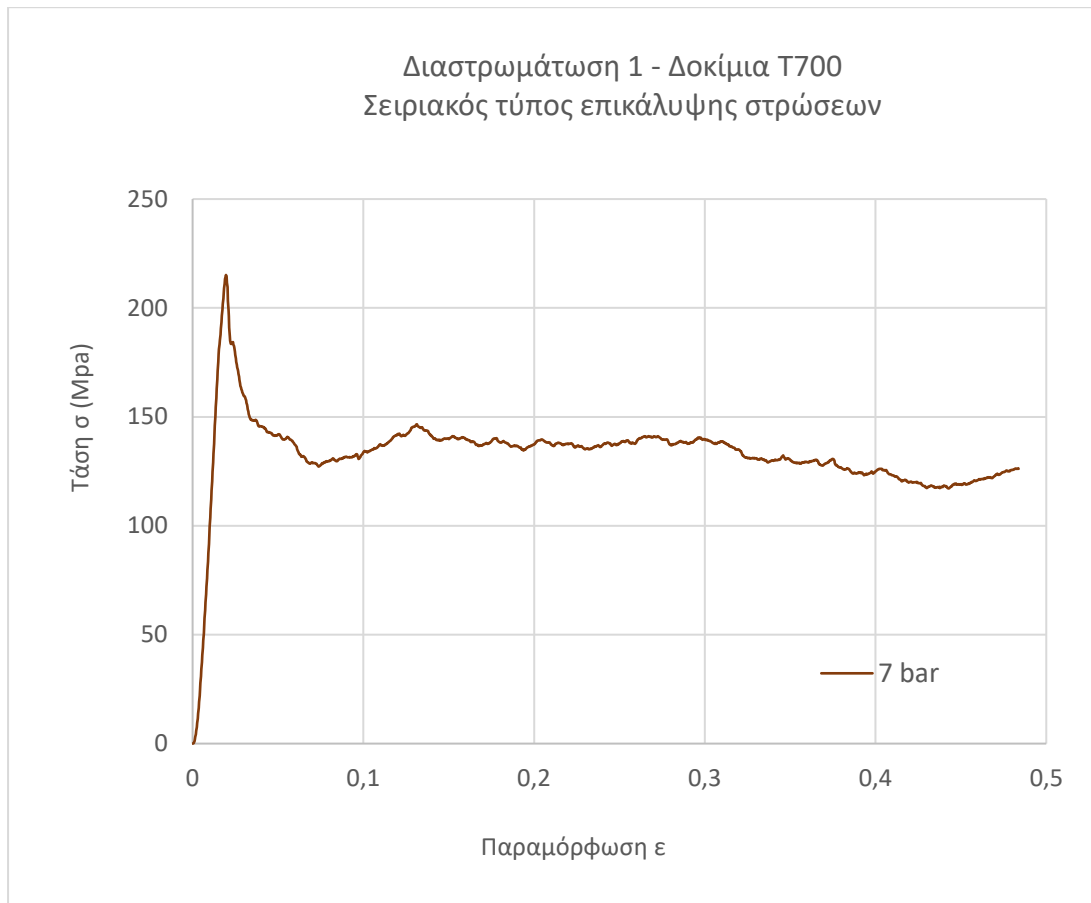


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.16: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 1

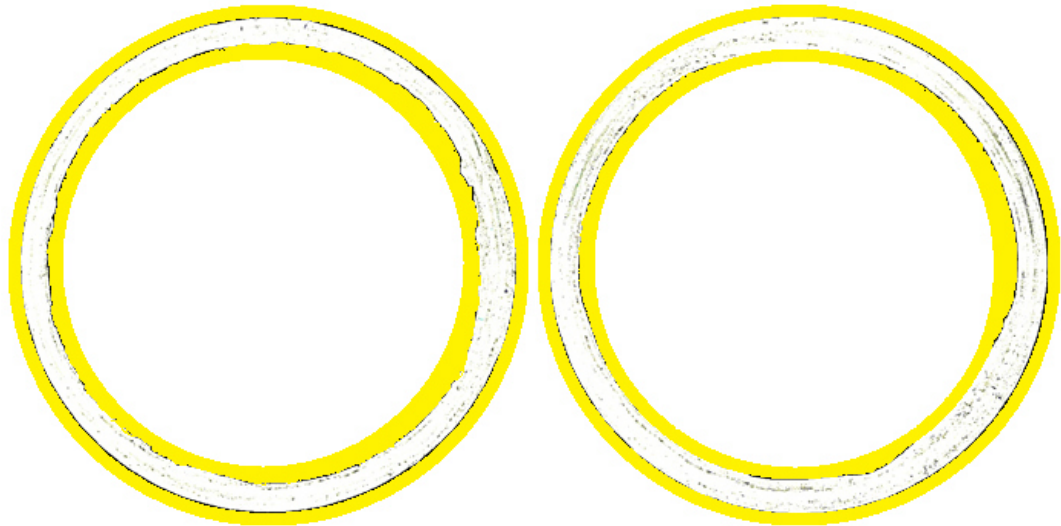
Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 7 bar, Συντονισμός Όχι

Διαστρωμάτωση 2 (Mixed materials), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

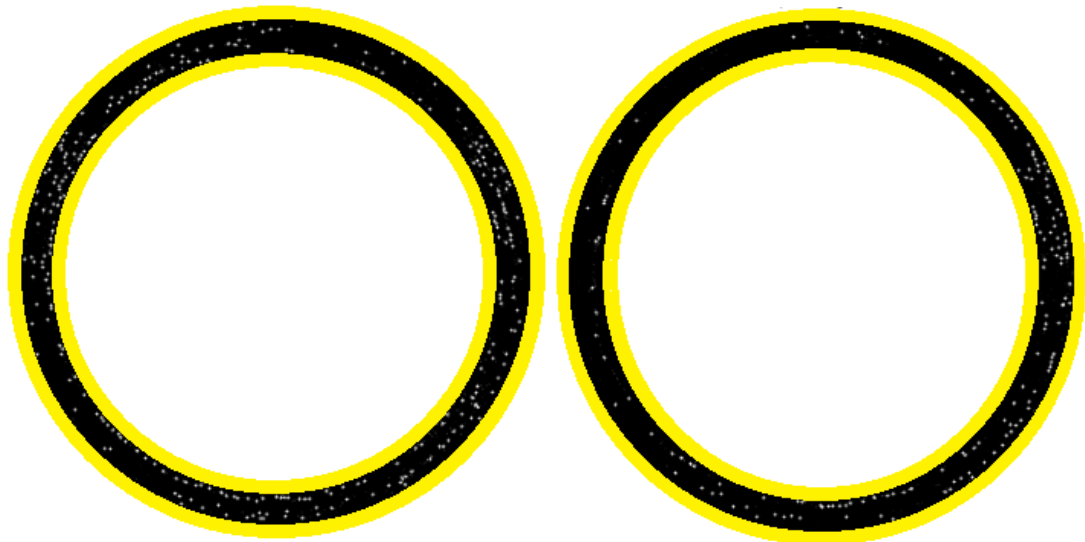
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.87204%

Ποσοστό = 0.48158%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

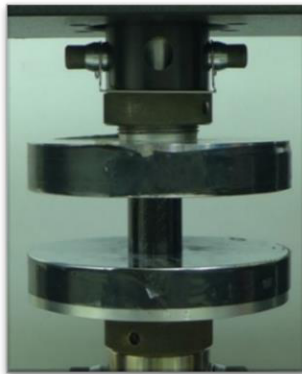
Πορώδες στην αξονική τομή



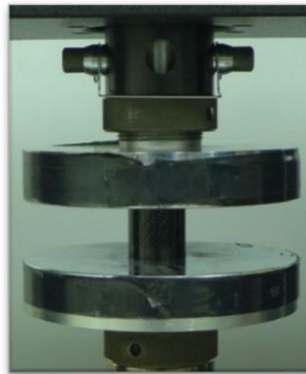
Ποσοστό πορώδους = 0.12297%

Μηχανισμός κατάρρευσης

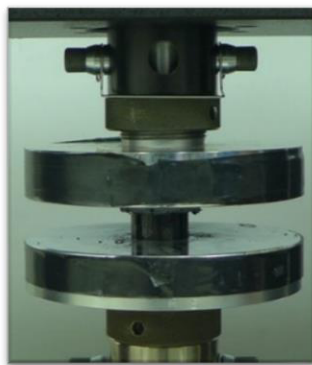
Έναρξη
της
συμπίεσης



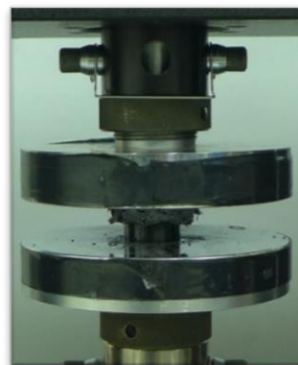
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

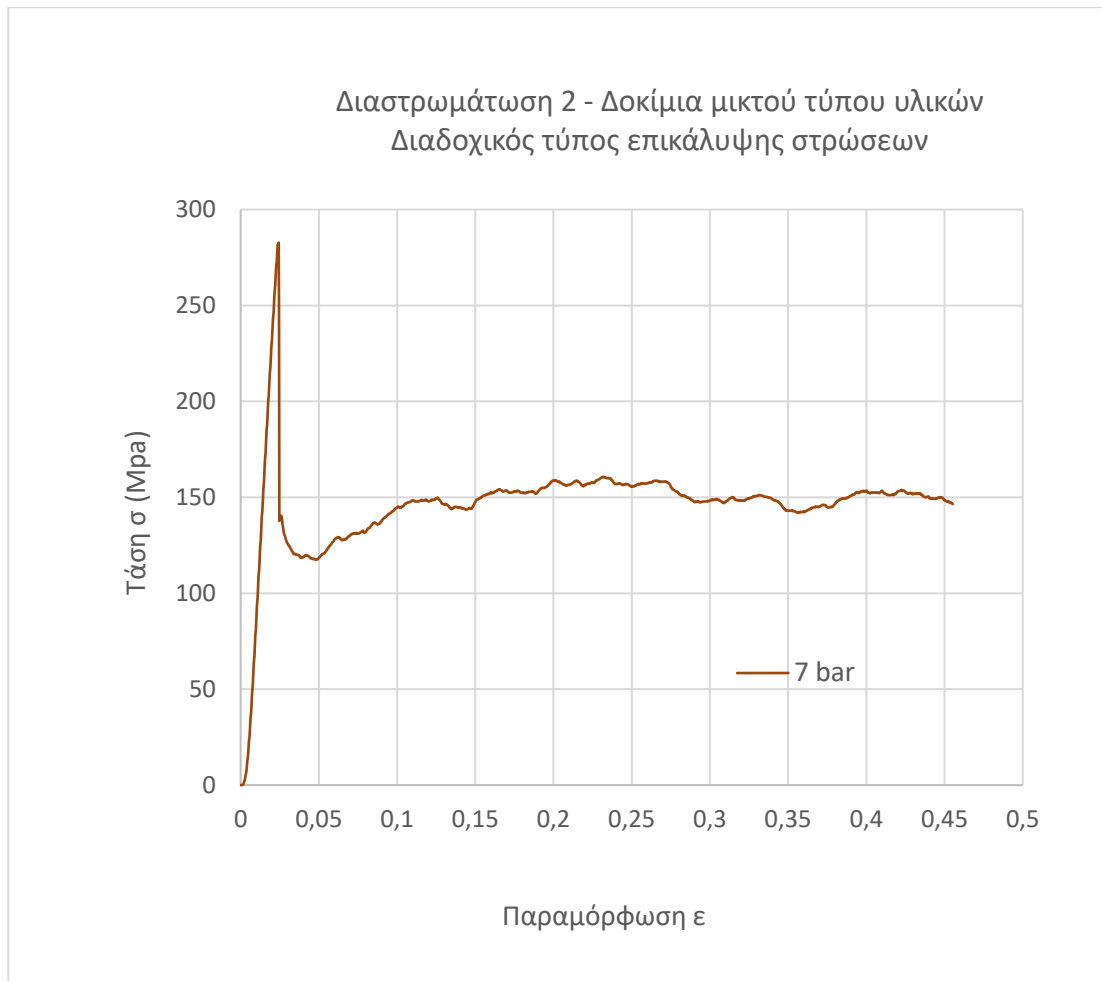


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.17: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

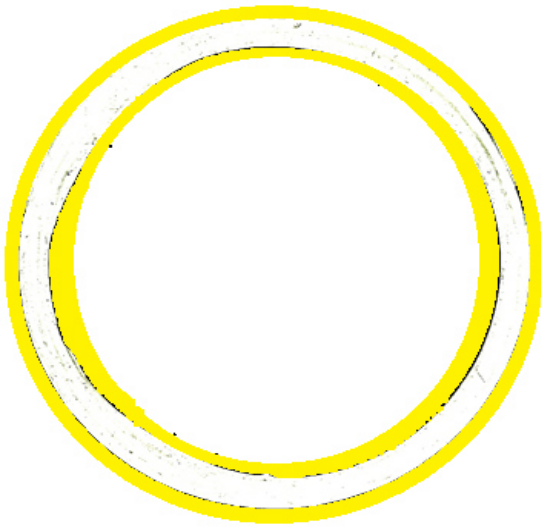
Κύκλος Πολυμερισμού 1

Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 7 bar, Συντονισμός Όχι

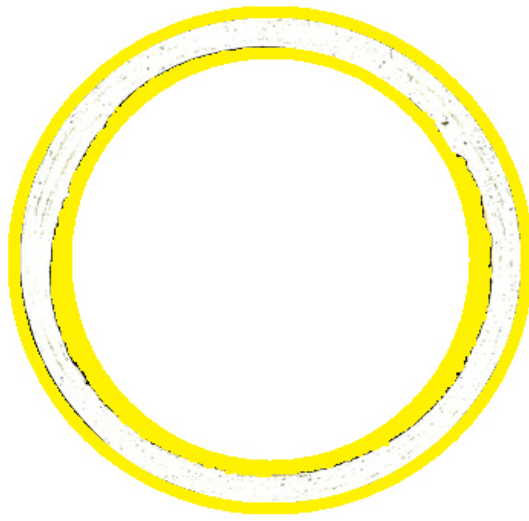
Διαστρωμάτωση 2 (Mixed materials), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

Η δομή του υλικού

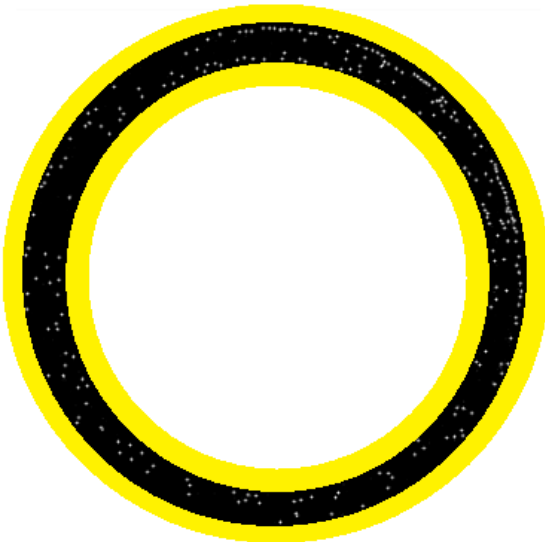
Πλευρά 1



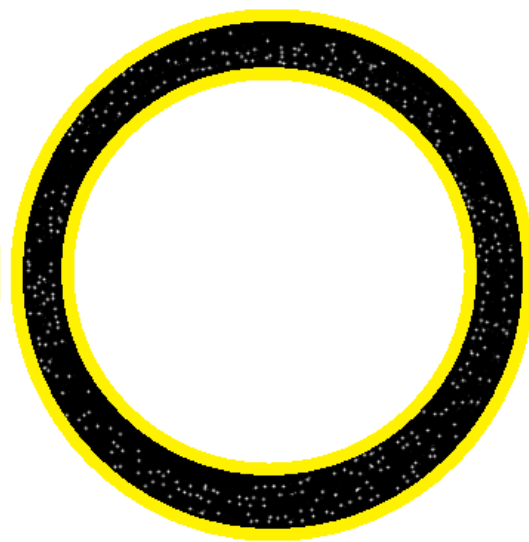
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.42743%



Ποσοστό = 0.66327%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

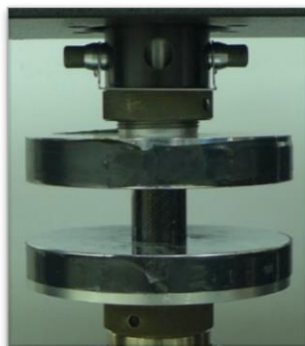
Πορώδες στην αξονική τομή



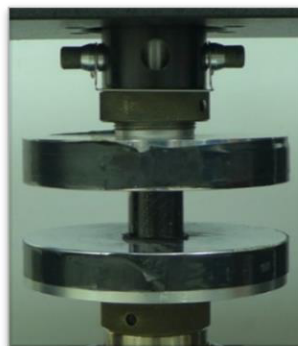
Ποσοστό πορώδους = 0.11506%

Μηχανισμός κατάρρευσης

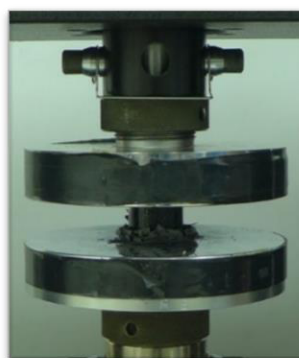
Έναρξη της συμπίεσης



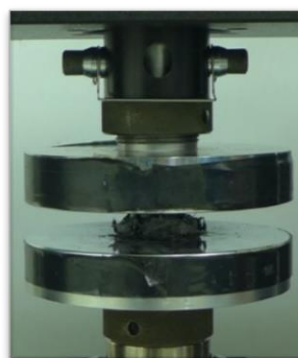
Είσοδος στην περιοχή κατάρρευσης



Στο ενδιάμεσο της περιοχής κατάρρευσης



Τέλος της θλίψης





Θ-8.18: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

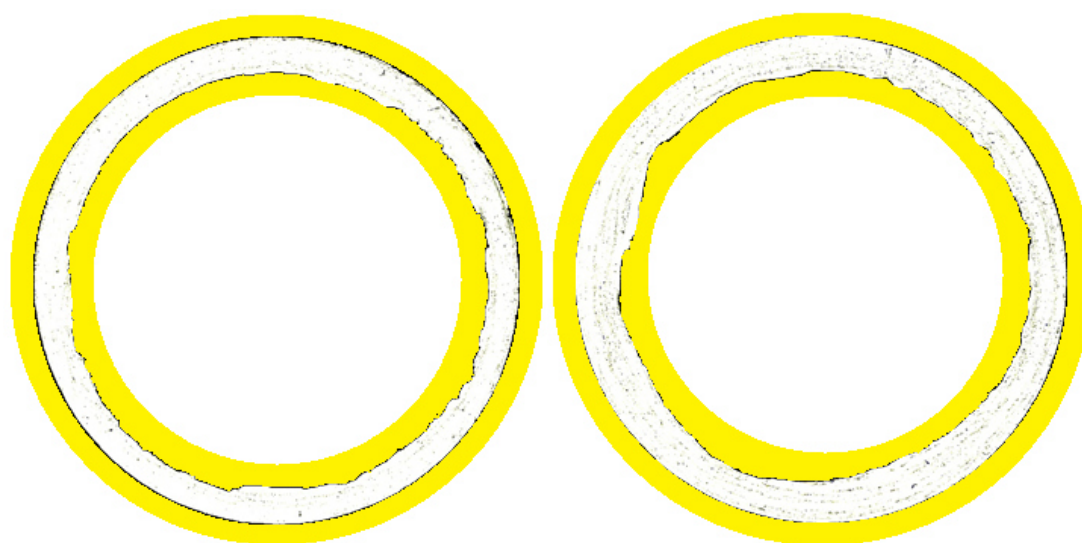
Κύκλος Πολυμερισμού 1

Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 7 bar, Συντονισμός Όχι
Διαστρωμάτωση 3 (T300), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

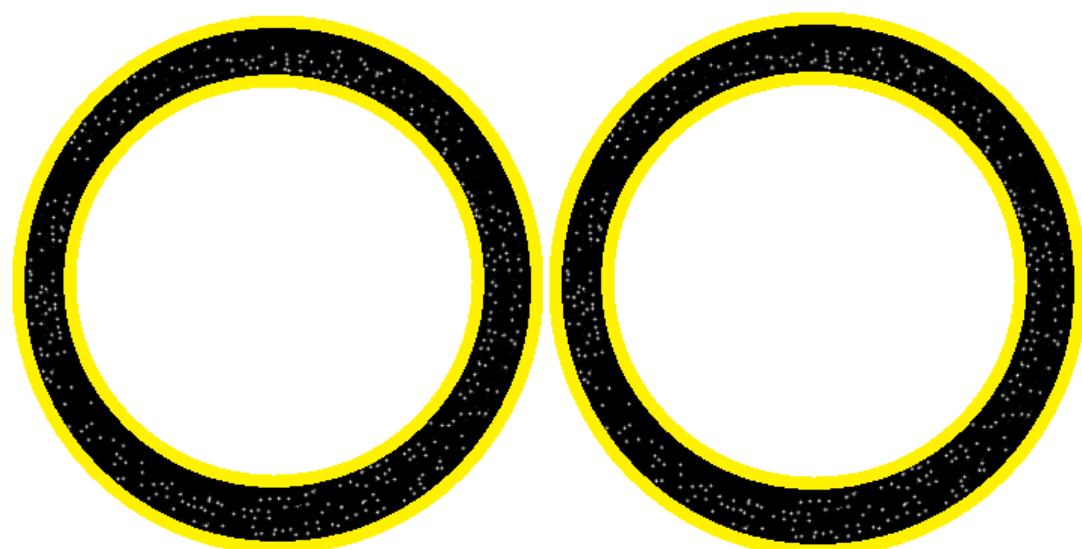
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



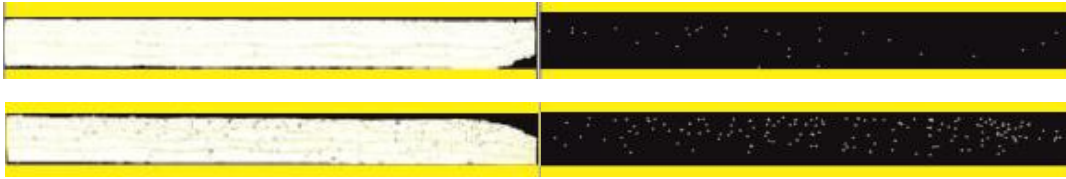
Ποσοστό = 0.66327%

Ποσοστό = 0.66327%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

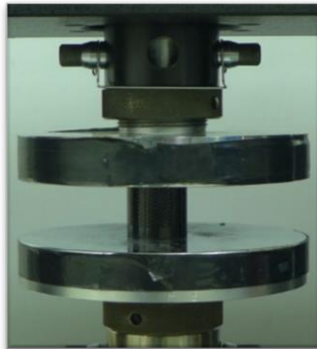
Πορώδες στην αξονική τομή



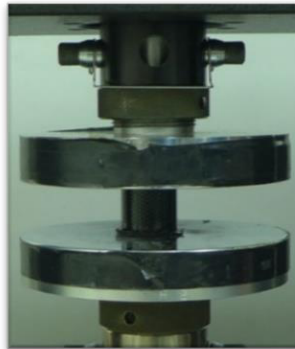
Ποσοστό πορώδους = 0.55788%

Μηχανισμός κατάρρευσης

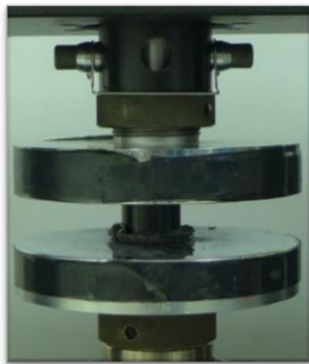
Έναρξη
της
συμπίεσης



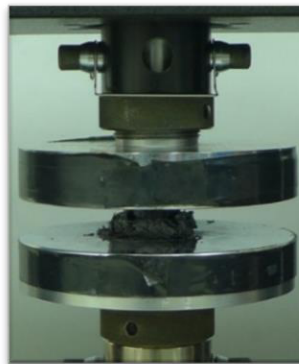
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

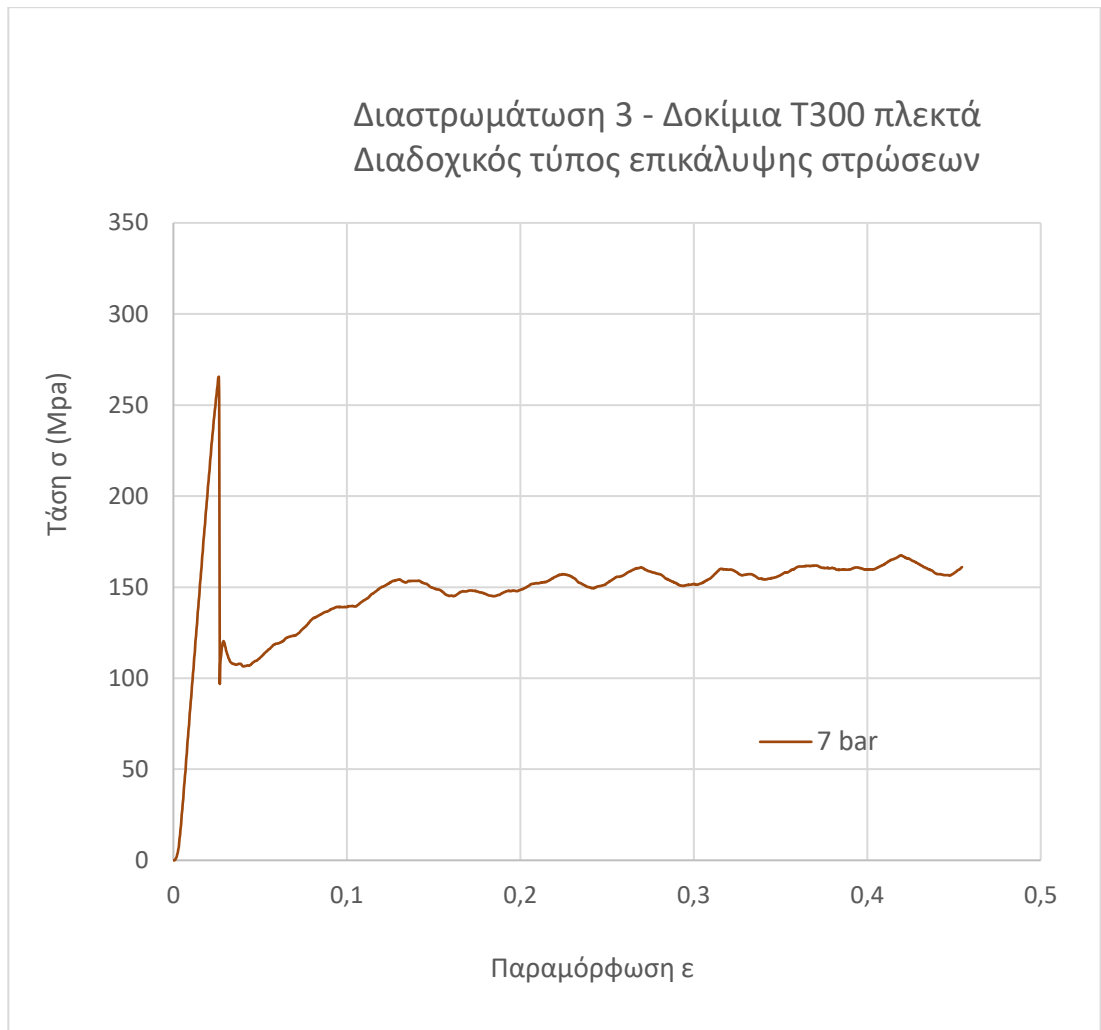


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





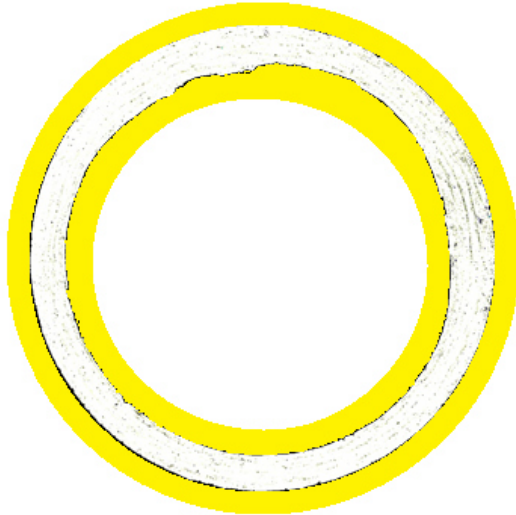
Θ-8.19: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 1

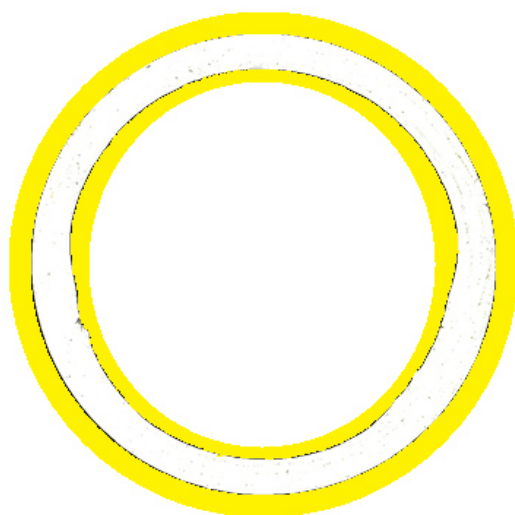
Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 7 bar, Συντονισμός Όχι
Διαστρωμάτωση 3 (T300), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

Η δομή του υλικού

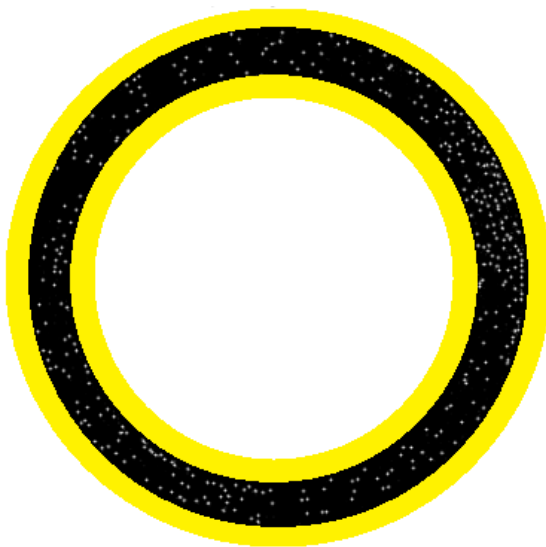
Πλευρά 1



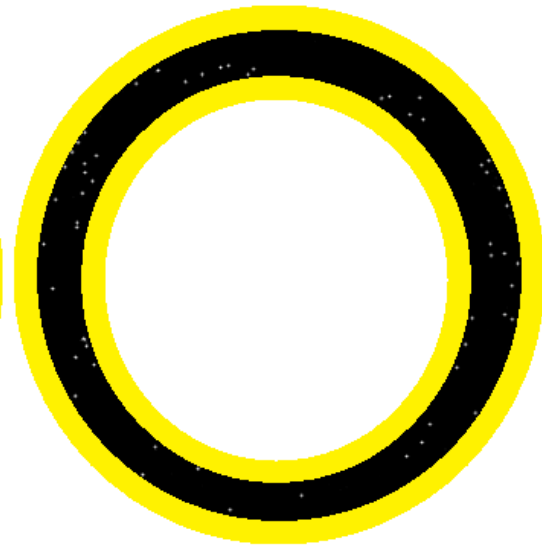
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.57422%

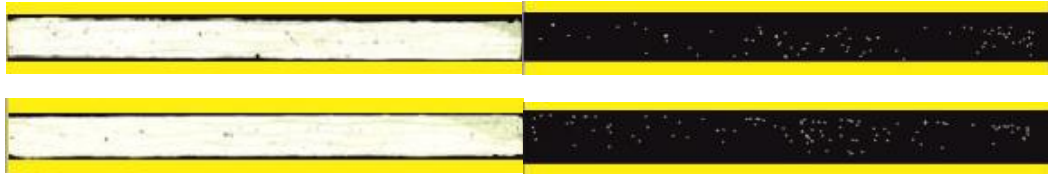


Ποσοστό = 0.074089%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

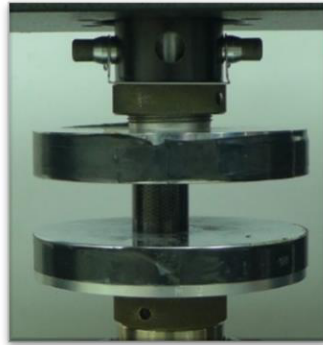
Πορώδες στην αξονική τομή



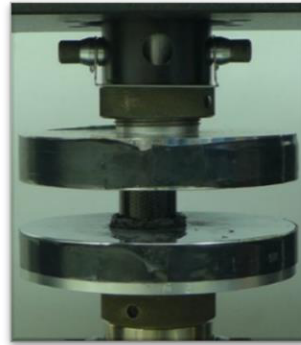
Ποσοστό πορώδους = 0.47098%

Μηχανισμός κατάρρευσης

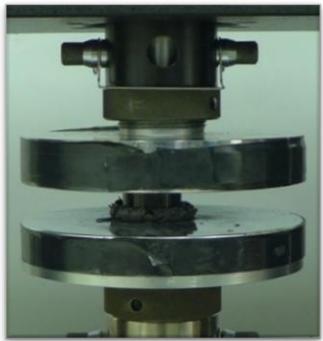
Έναρξη
της
συμπίεσης



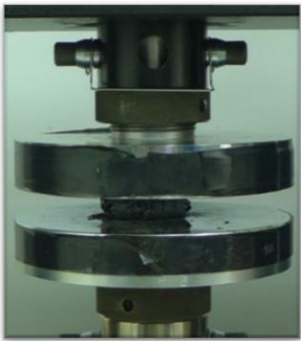
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

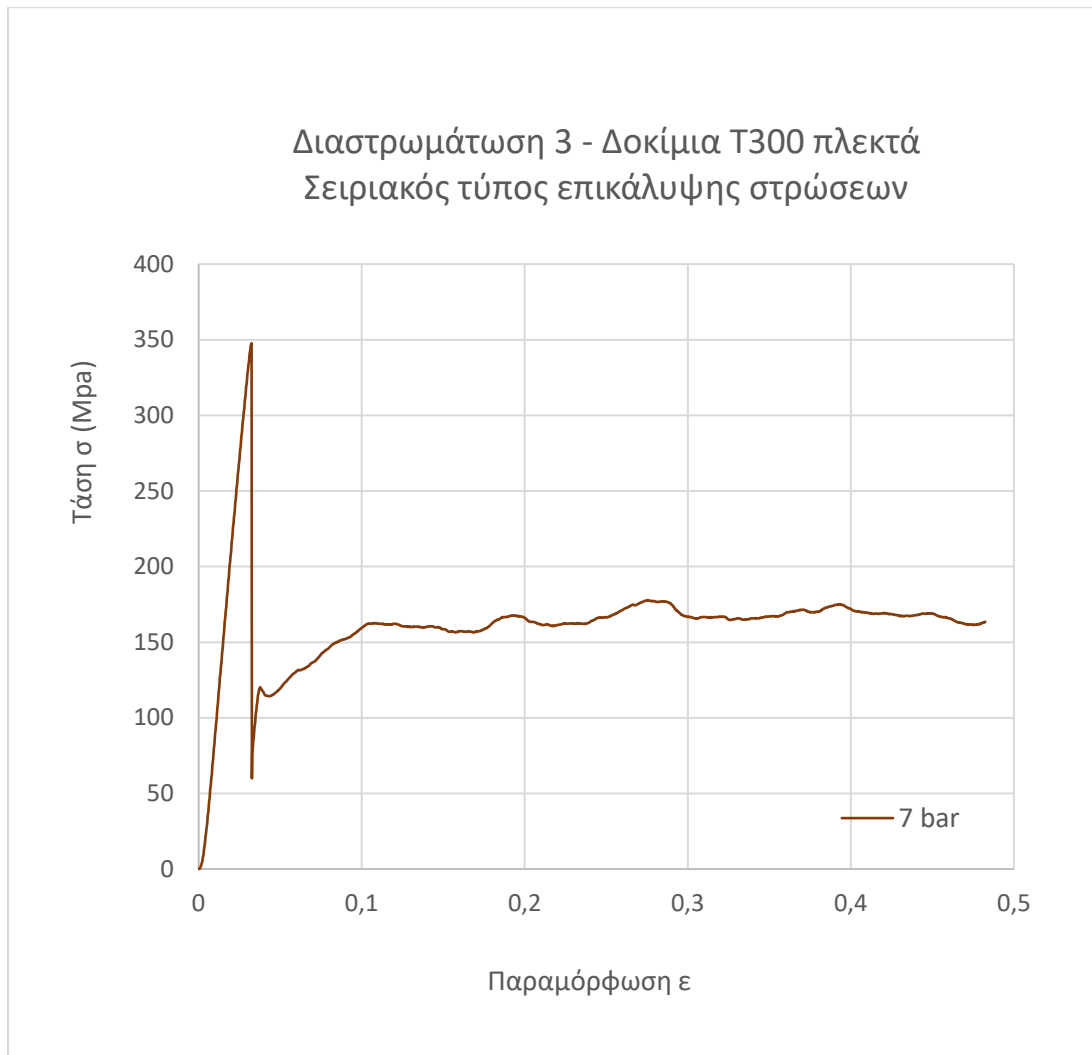


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





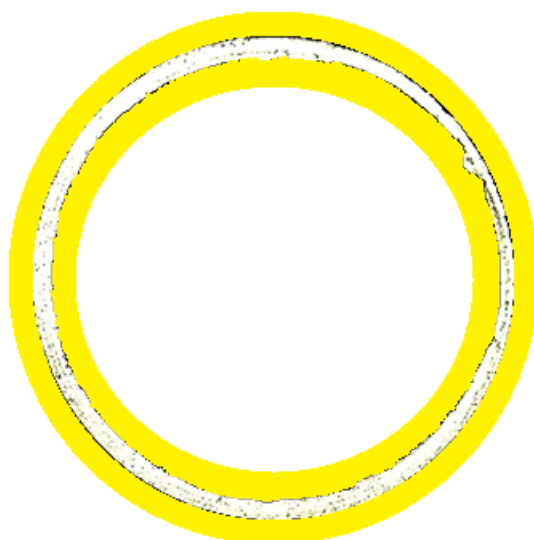
Θ-8.20: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 1 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 2

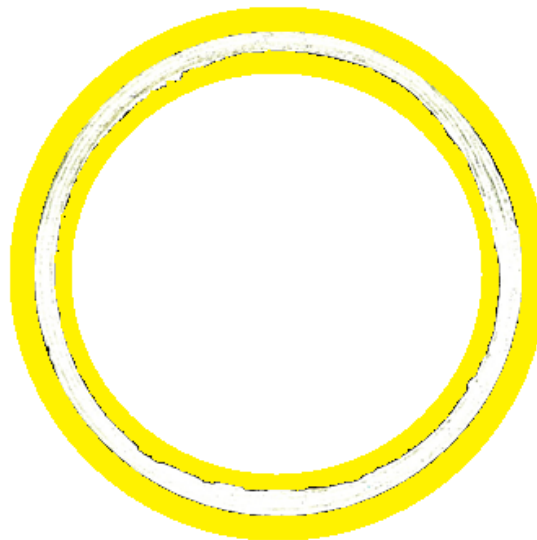
Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Όχι
Διαστρωμάτωση 1 (UD T700), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

Η δομή του υλικού

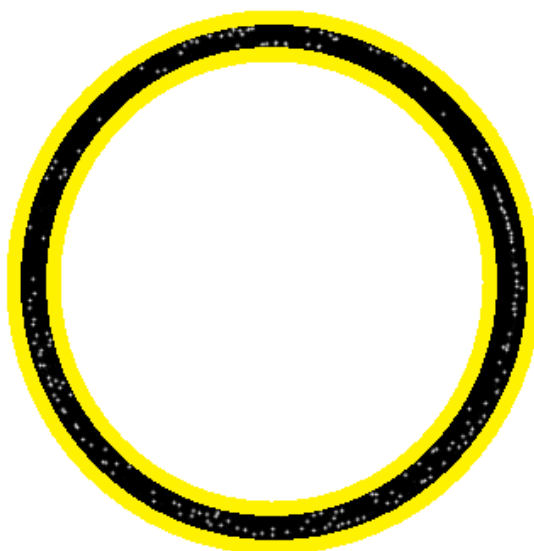
Πλευρά 1



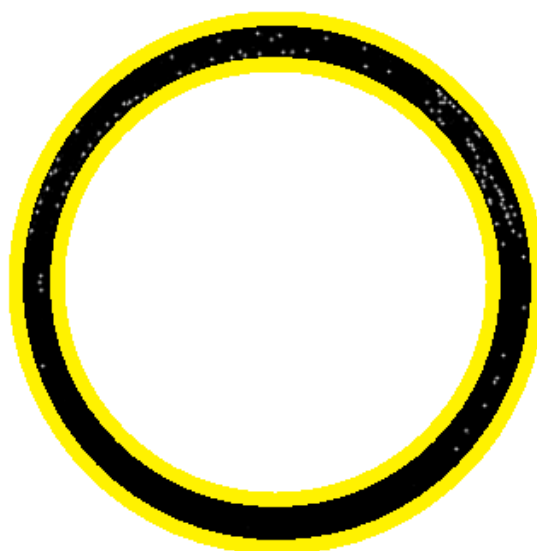
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.99881%



Ποσοστό = 0.4135%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

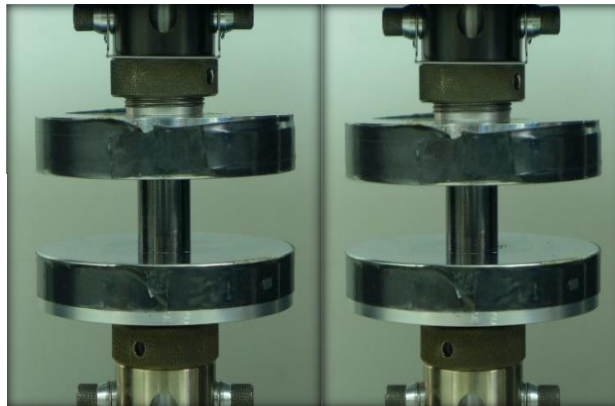
Πορώδες στην αξονική τομή



Ποσοστό πορώδους = 0.11858%

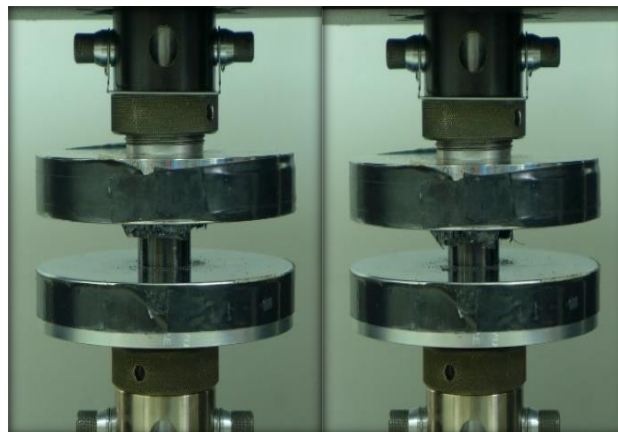
Μηχανισμός κατάρρευσης

Έναρξη
της
συμπίεσης

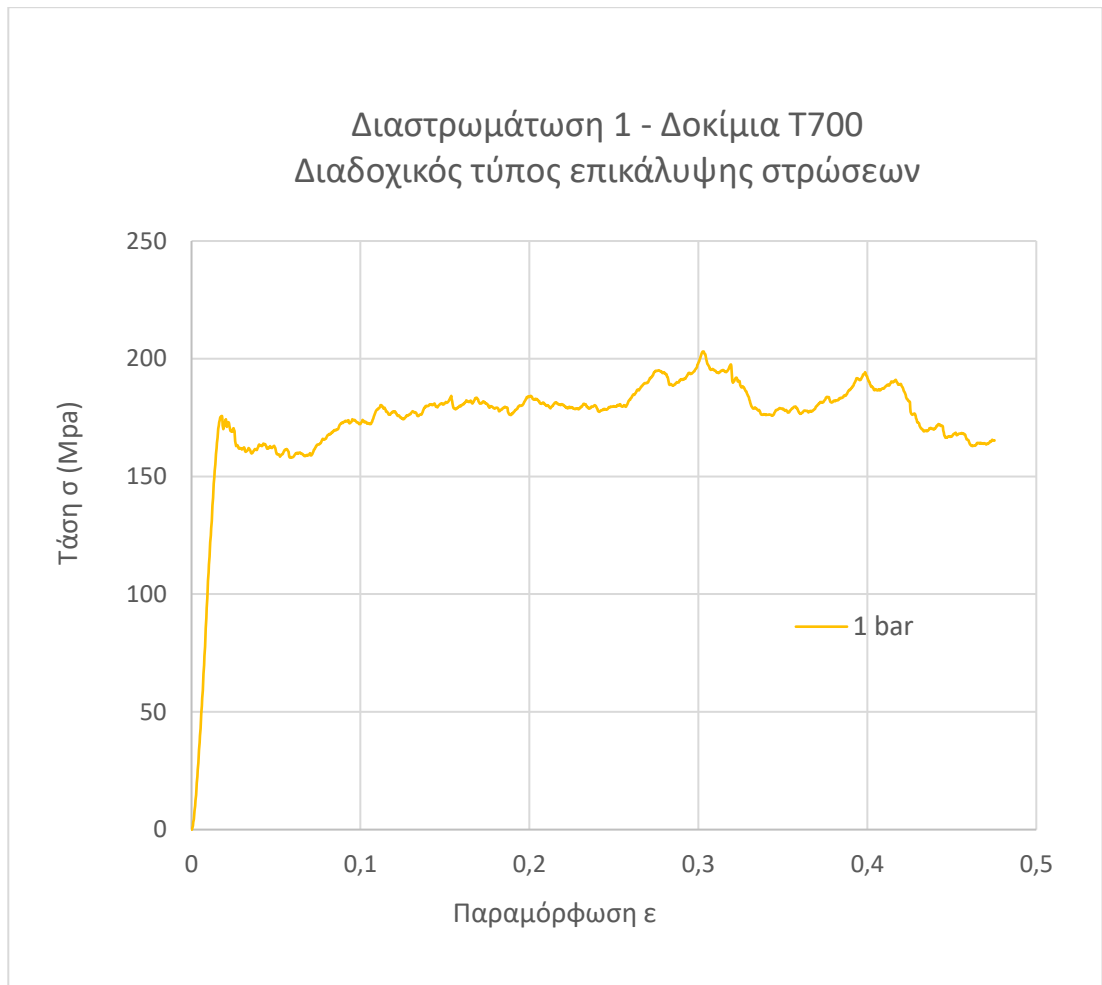


Είσοδος
στην περιοχή
κατάρρευσης

Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης



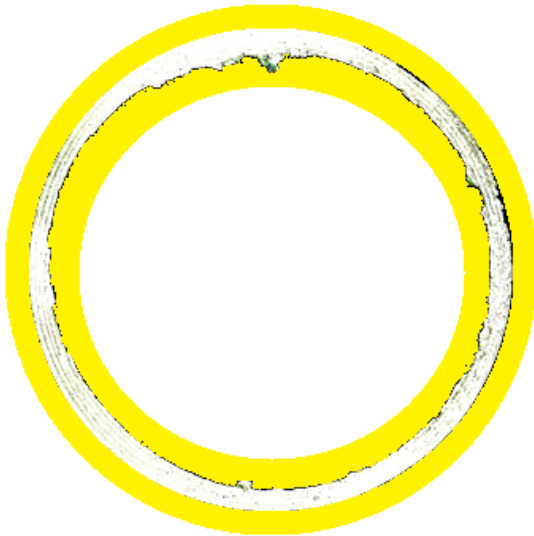
Θ-8.21: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 2

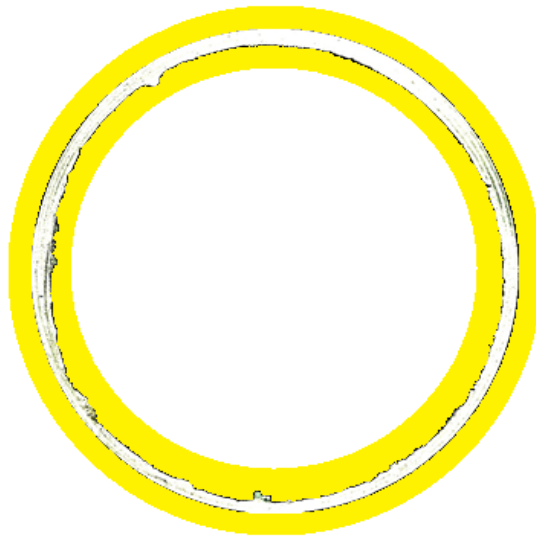
Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Όχι
Διαστρωμάτωση 1 (UD T700), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

Η δομή του υλικού

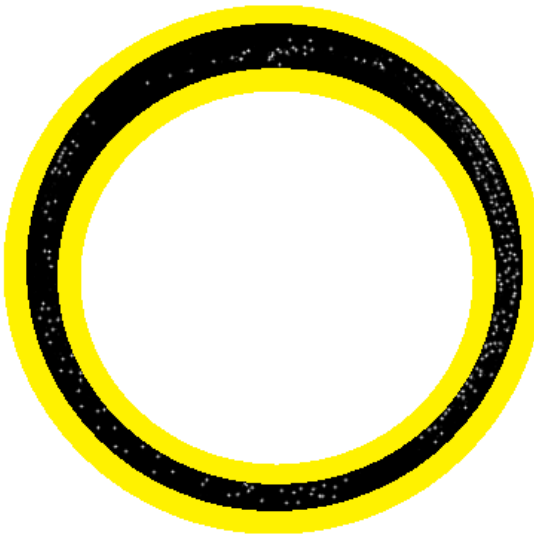
Πλευρά 1



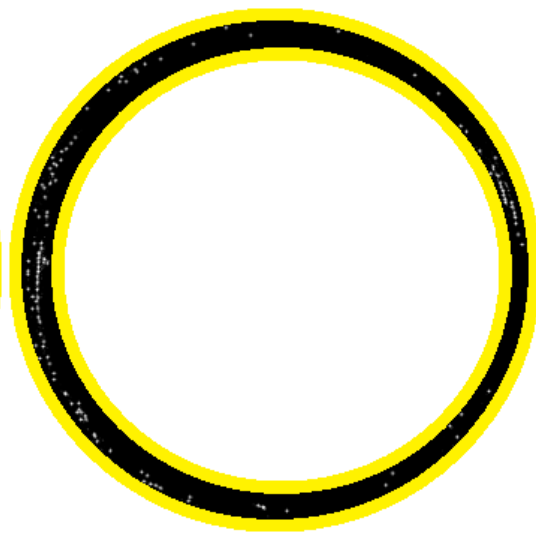
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 1.086%



Ποσοστό = 1.075%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

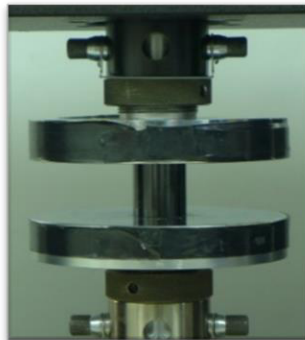
Πορώδες στην αξονική τομή



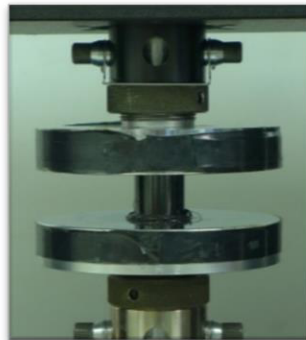
Ποσοστό πορώδους = 0.25504%

Μηχανισμός κατάρρευσης

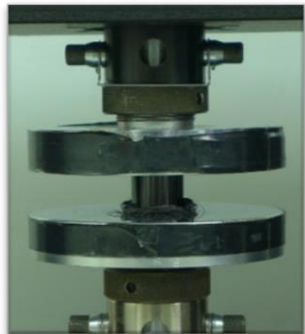
Έναρξη
της
συμπίεσης



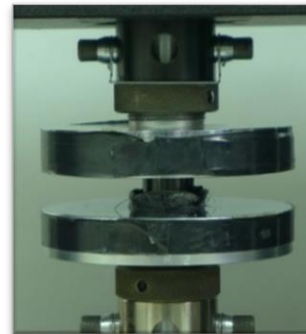
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

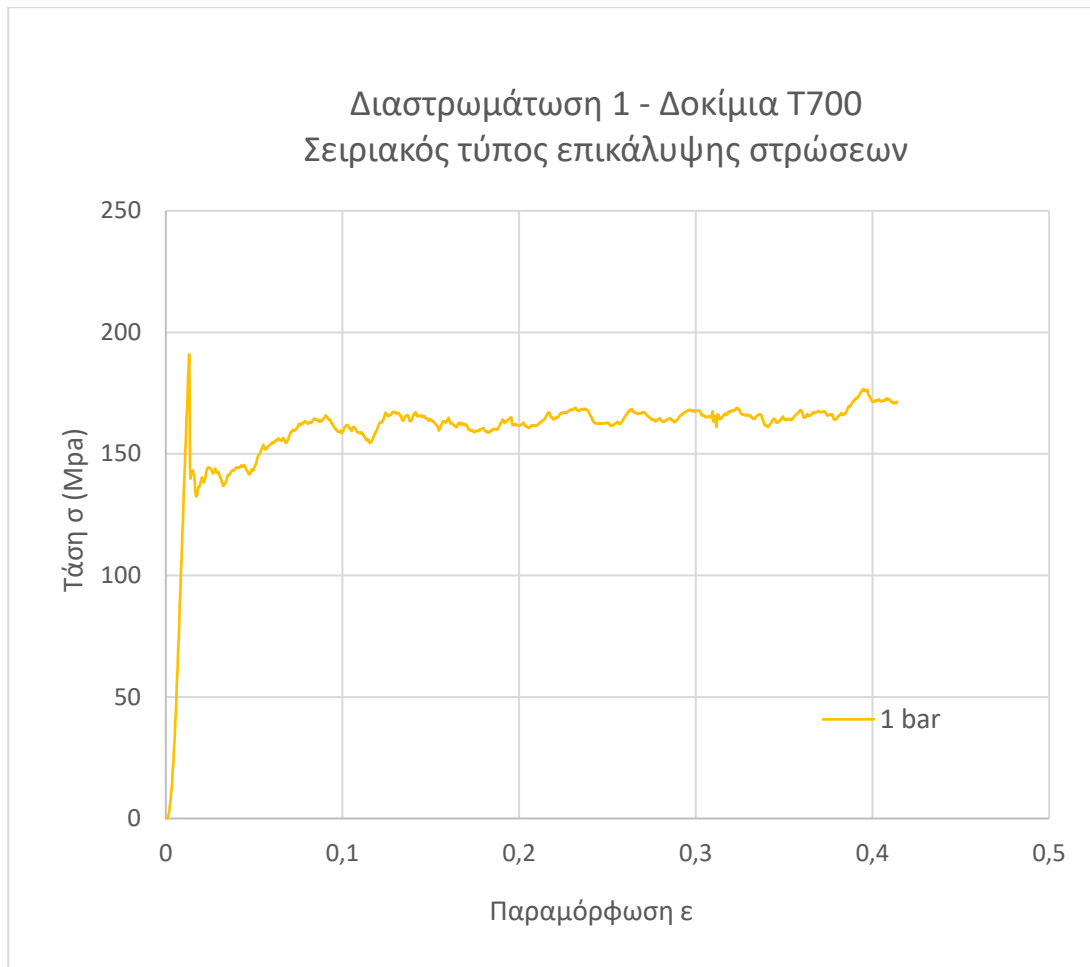


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.22: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

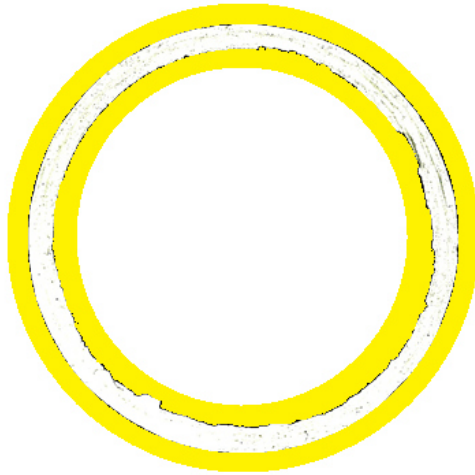
Κύκλος Πολυμερισμού 2

Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Όχι

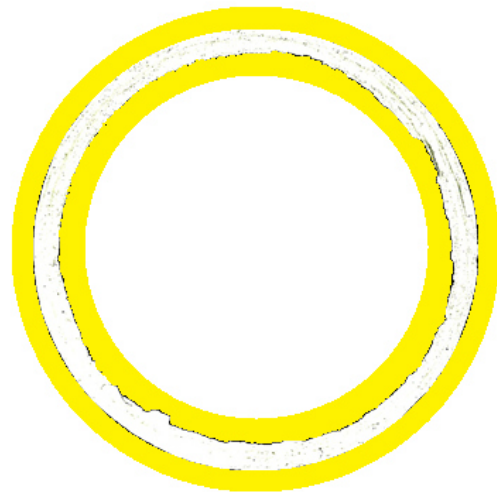
Διαστρωμάτωση 2 (Mixed materials), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

Η δομή του υλικού

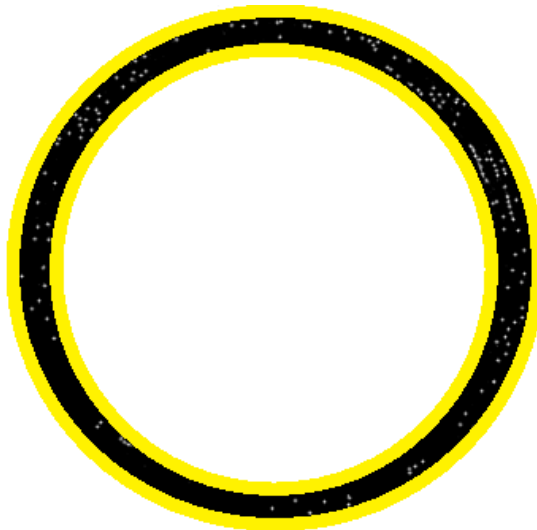
Πλευρά 1



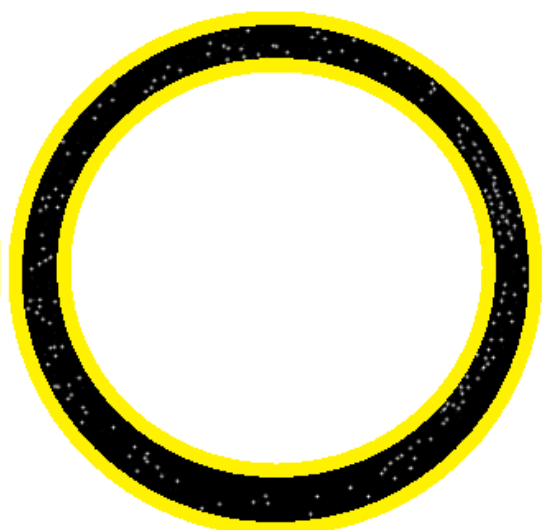
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.37996%



Ποσοστό = 0.4263%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

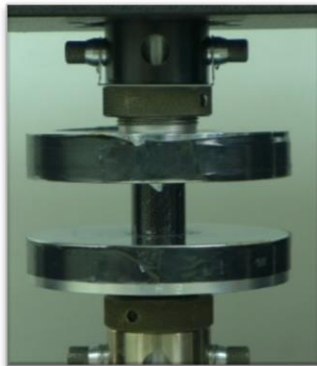
Πορώδες στην αξονική τομή



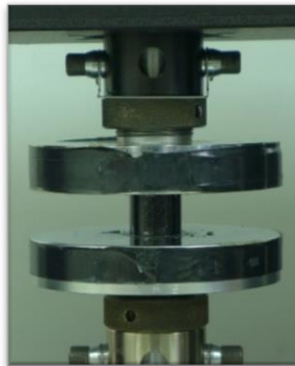
Ποσοστό πορώδους = 0.0965%

Μηχανισμός κατάρρευσης

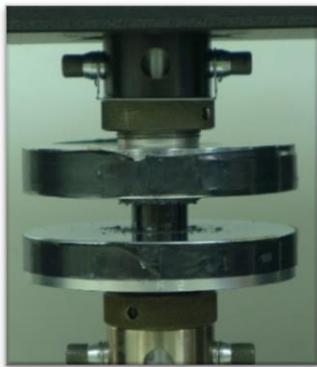
Έναρξη
της
συμπίεσης



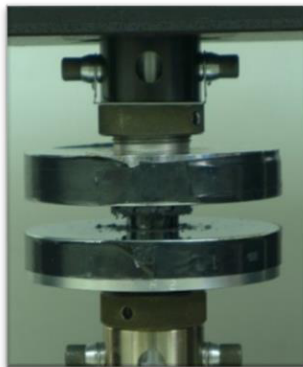
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης



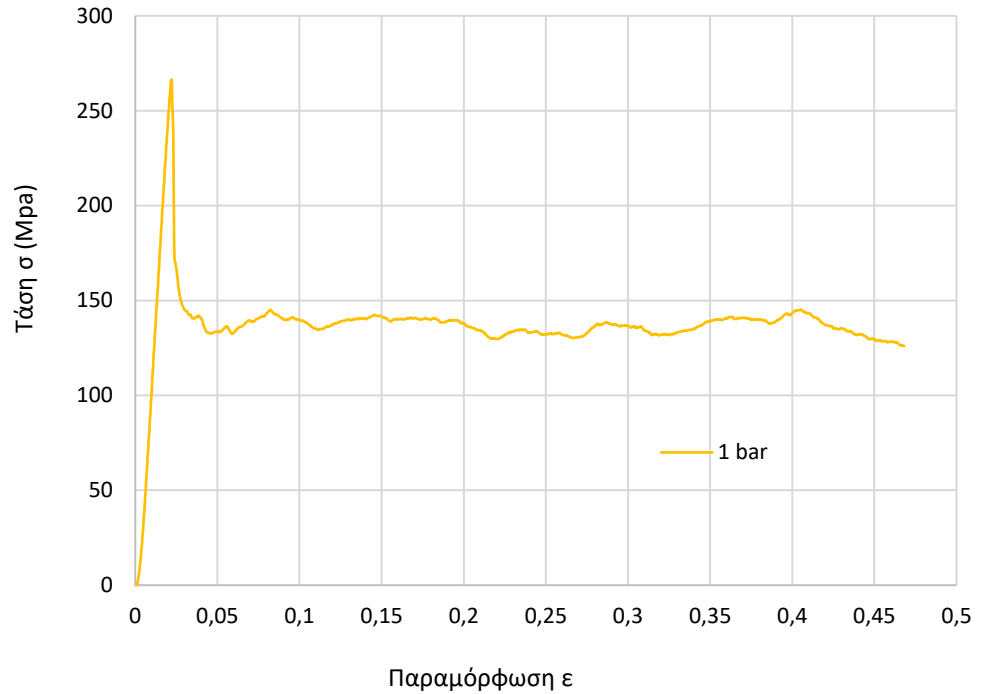
Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης



Διαστρωμάτωση 2 - Δοκίμια μικτού τύπου υλικών
Διαδοχικός τύπος επικάλυψης στρώσεων



Θ-8.23: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

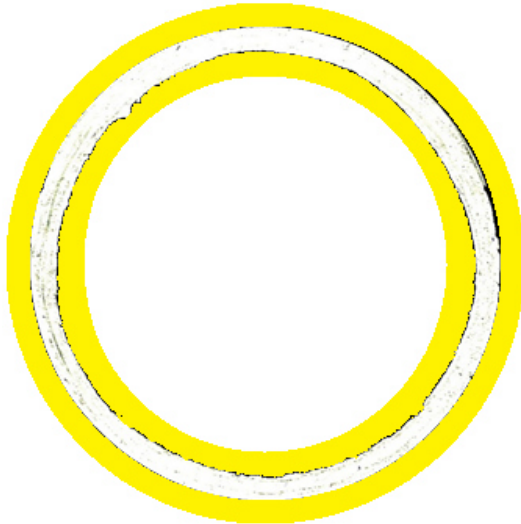
Κύκλος Πολυμερισμού 2

Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Όχι

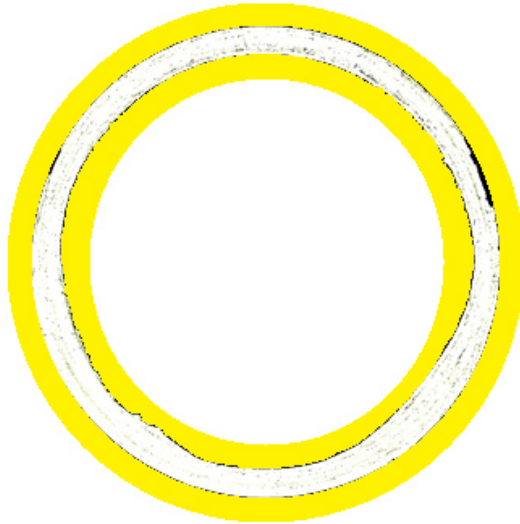
Διαστρωμάτωση 2 (Mixed materials), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

Η δομή του υλικού

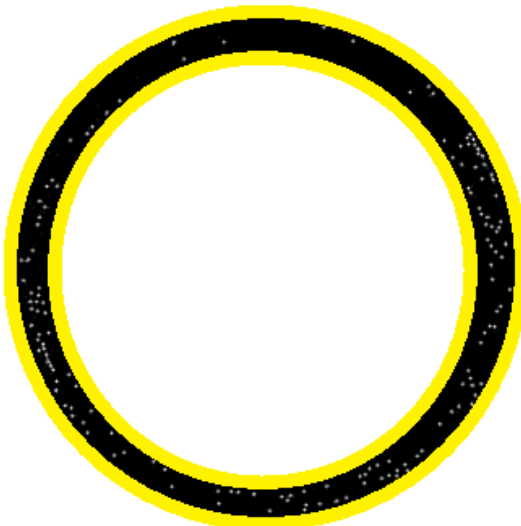
Πλευρά 1



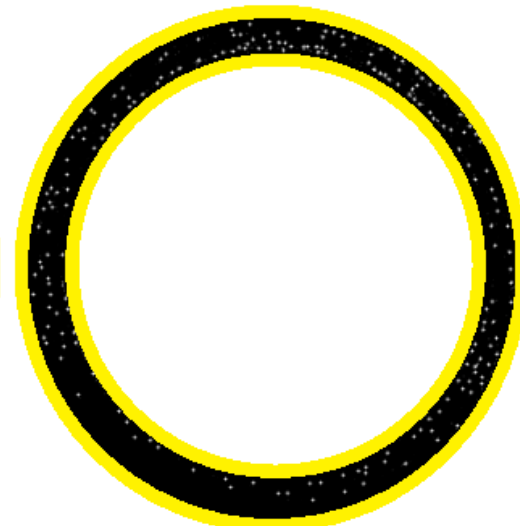
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.45654%



Ποσοστό = 0.65377%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

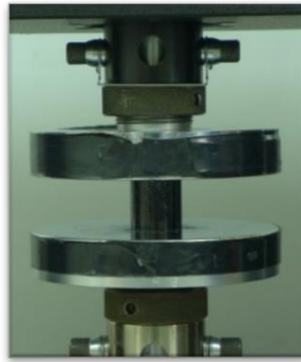
Πορώδες στην αξονική τομή



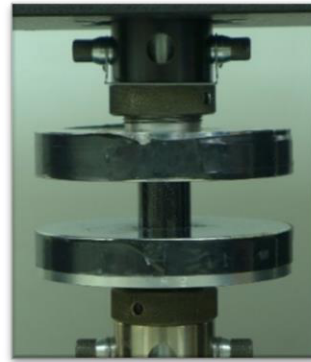
Ποσοστό πορώδους = 0.084497%

Μηχανισμός κατάρρευσης

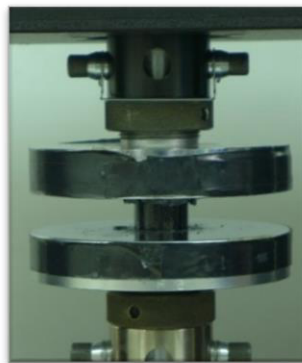
Έναρξη της συμπίεσης



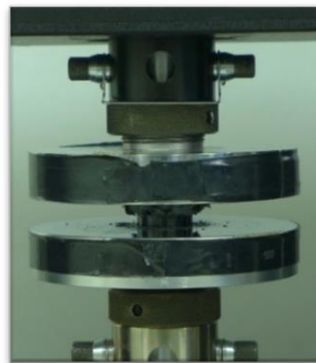
Είσοδος στην περιοχή κατάρρευσης

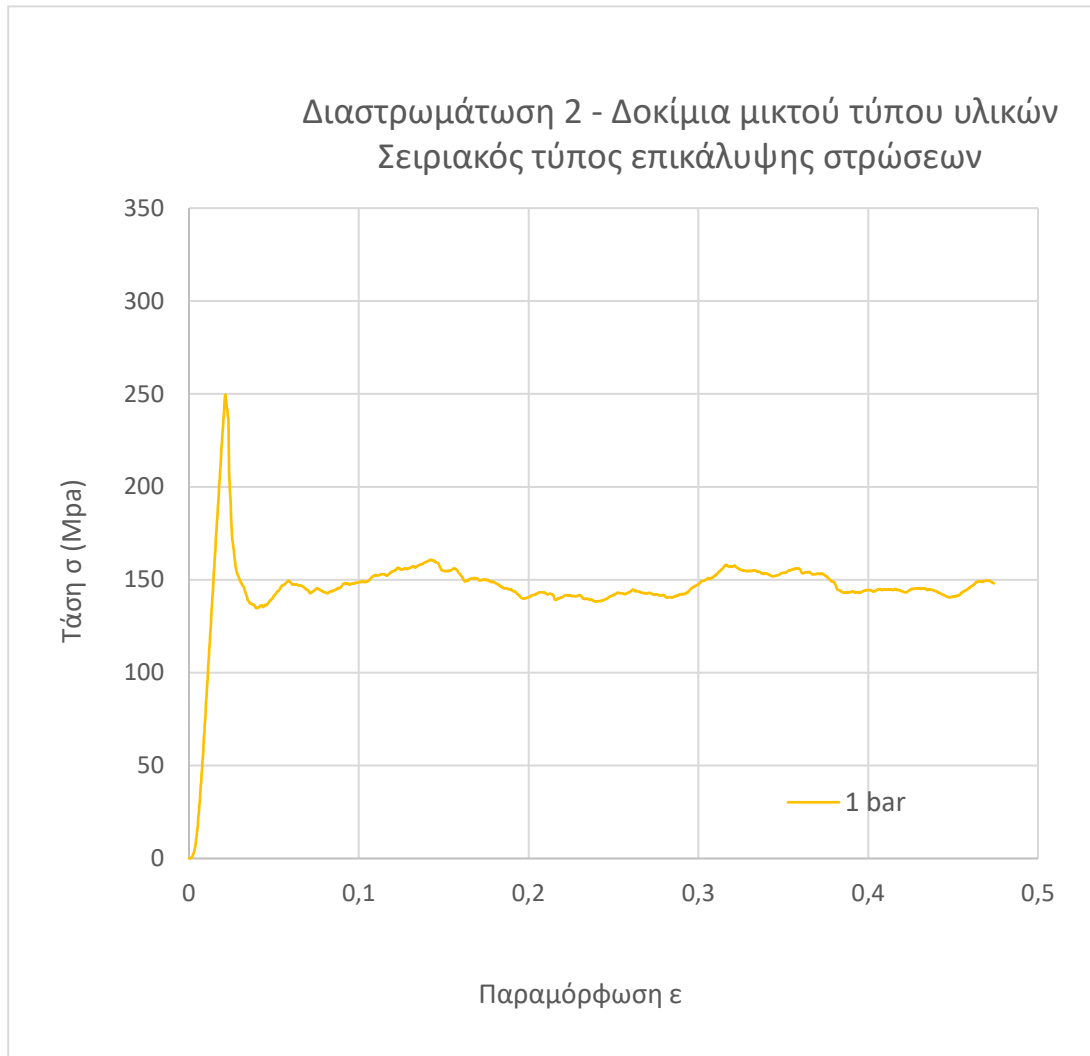


Στο ενδιάμεσο της περιοχής κατάρρευσης



Τέλος της θλίψης





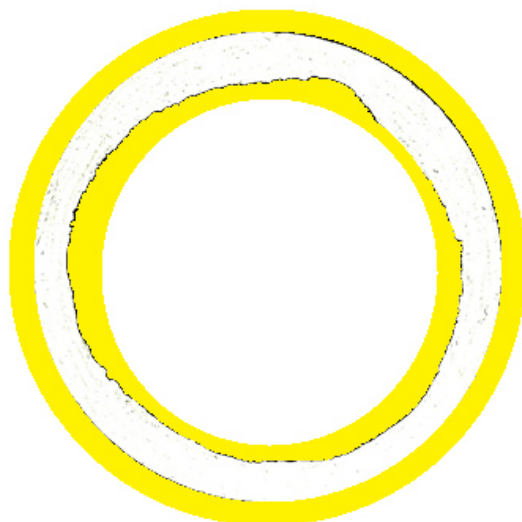
Θ-8.24: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 2

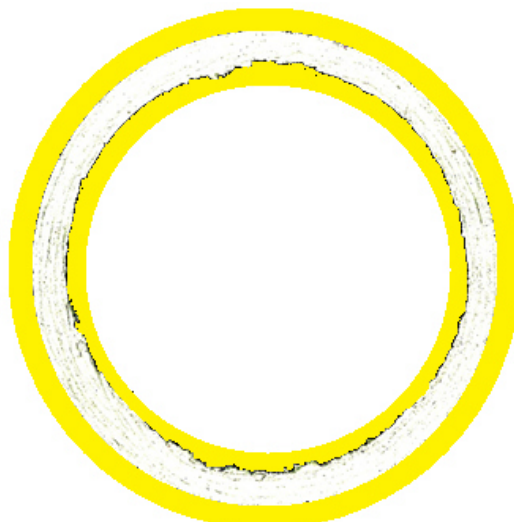
Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Όχι
Διαστρωμάτωση 3 (T300), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

Η δομή του υλικού

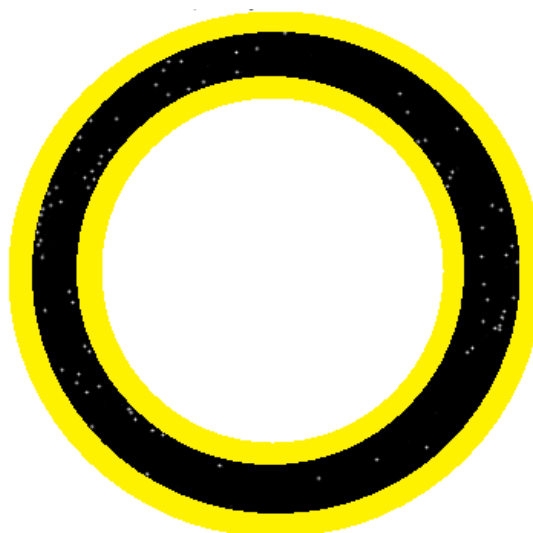
Πλευρά 1



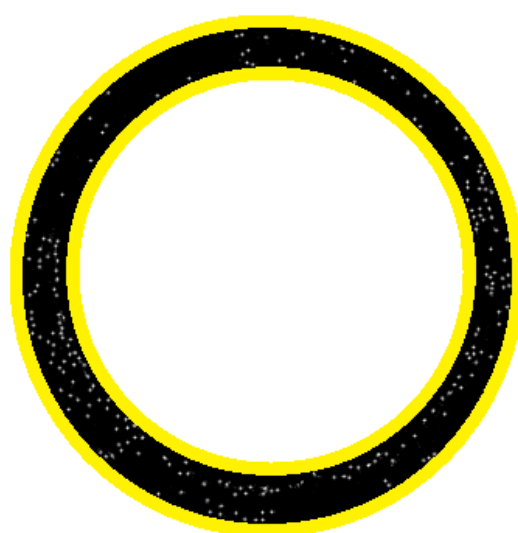
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.11206%



Ποσοστό = 0.57427%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

Πορώδες στην αξονική τομή



Ποσοστό πορώδους = 0.084497%

Μηχανισμός κατάρρευσης

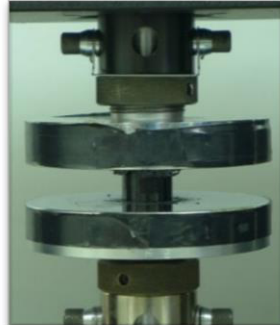
Έναρξη
της
συμπίεσης



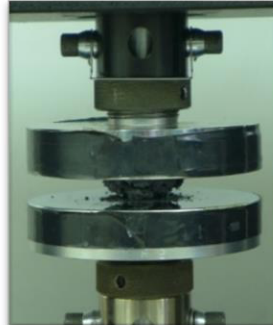
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

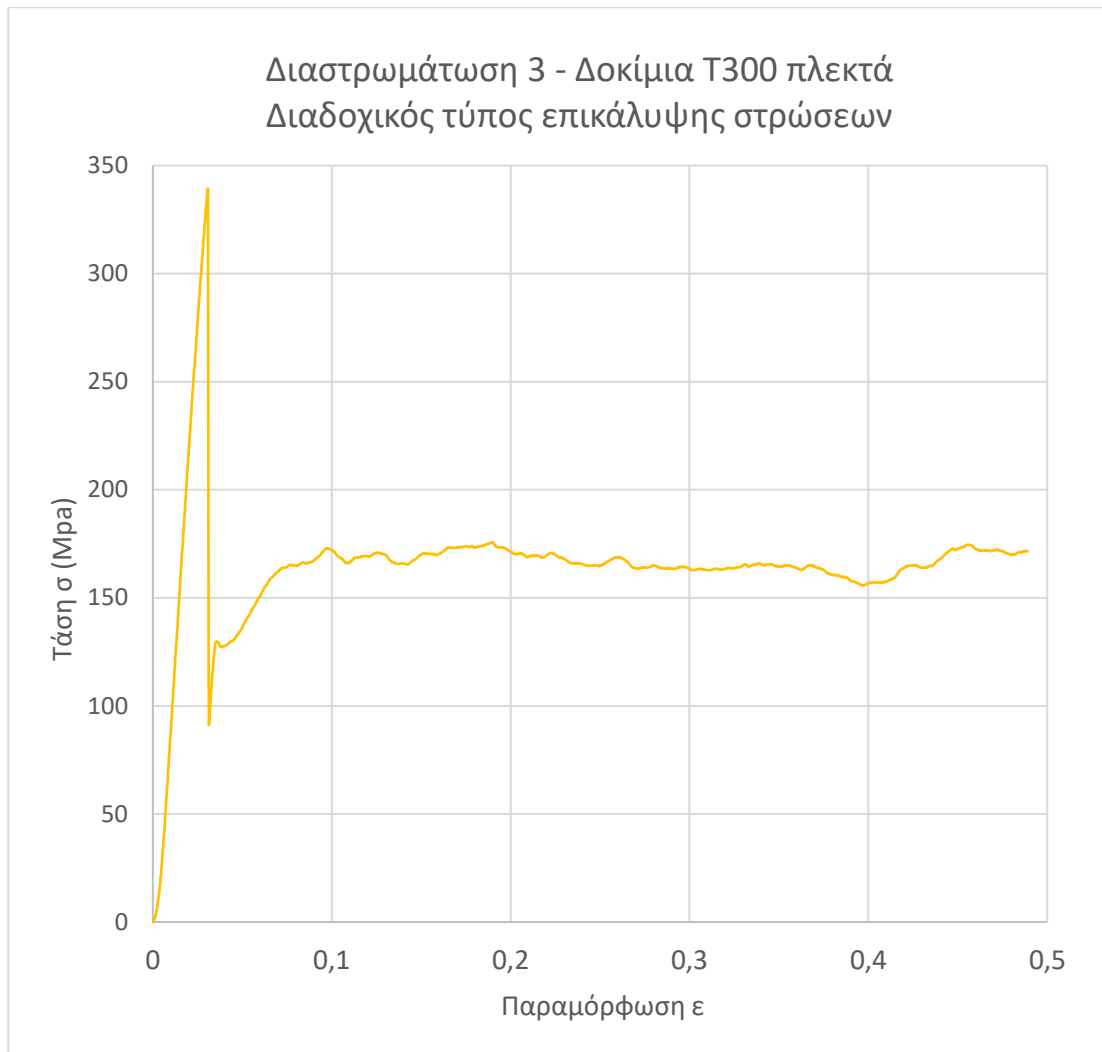


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





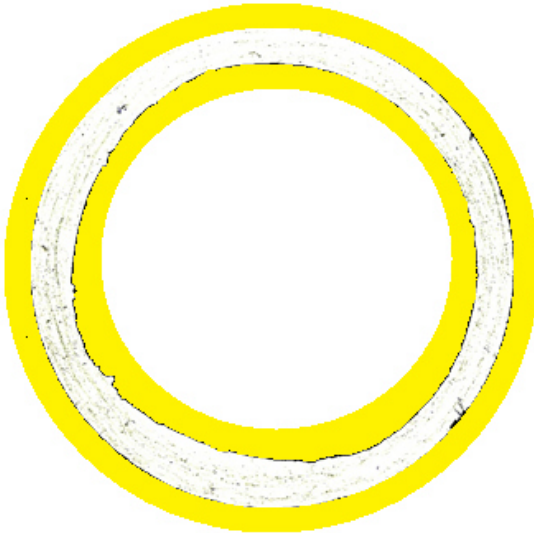
Θ-8.25: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 2

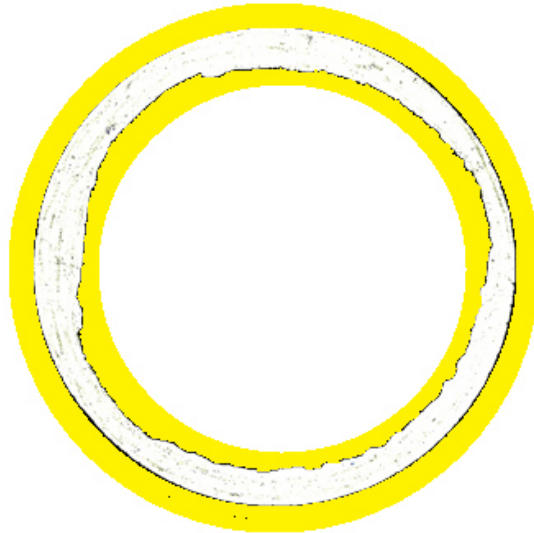
Χρόνος πολυμερισμού 4,5 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Όχι
Διαστρωμάτωση 3 (T300), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

Η δομή του υλικού

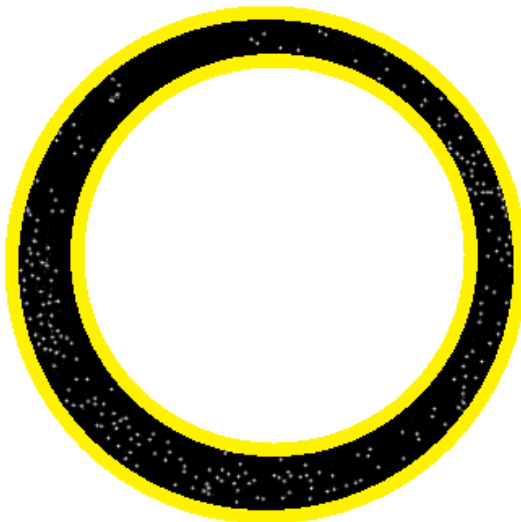
Πλευρά 1



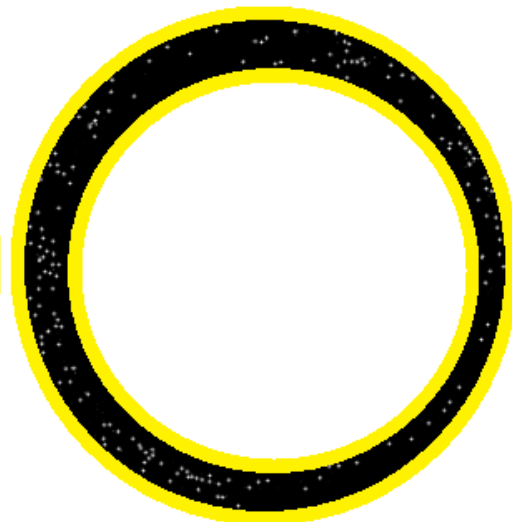
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.49714%

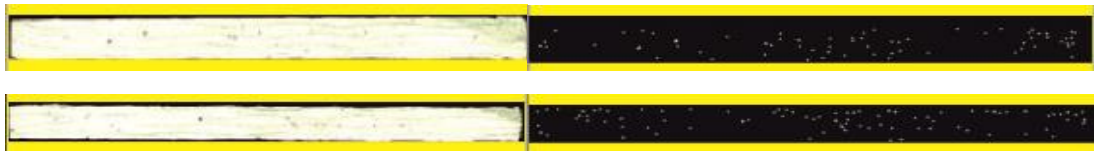


Ποσοστό = 0.36488%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

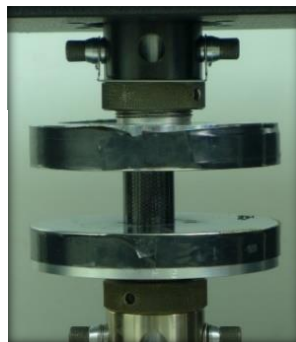
Πορώδες στην αξονική τομή



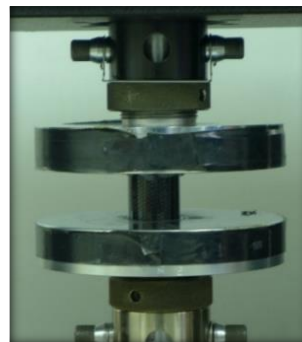
Ποσοστό πορώδους = 0.49103%

Μηχανισμός κατάρρευσης

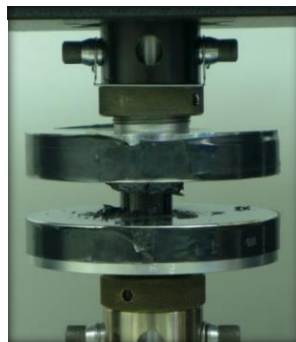
Έναρξη
της
συμπίεσης



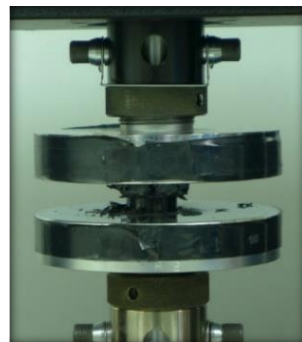
Είσοδος
στην περιοχή
κατάρρευσης

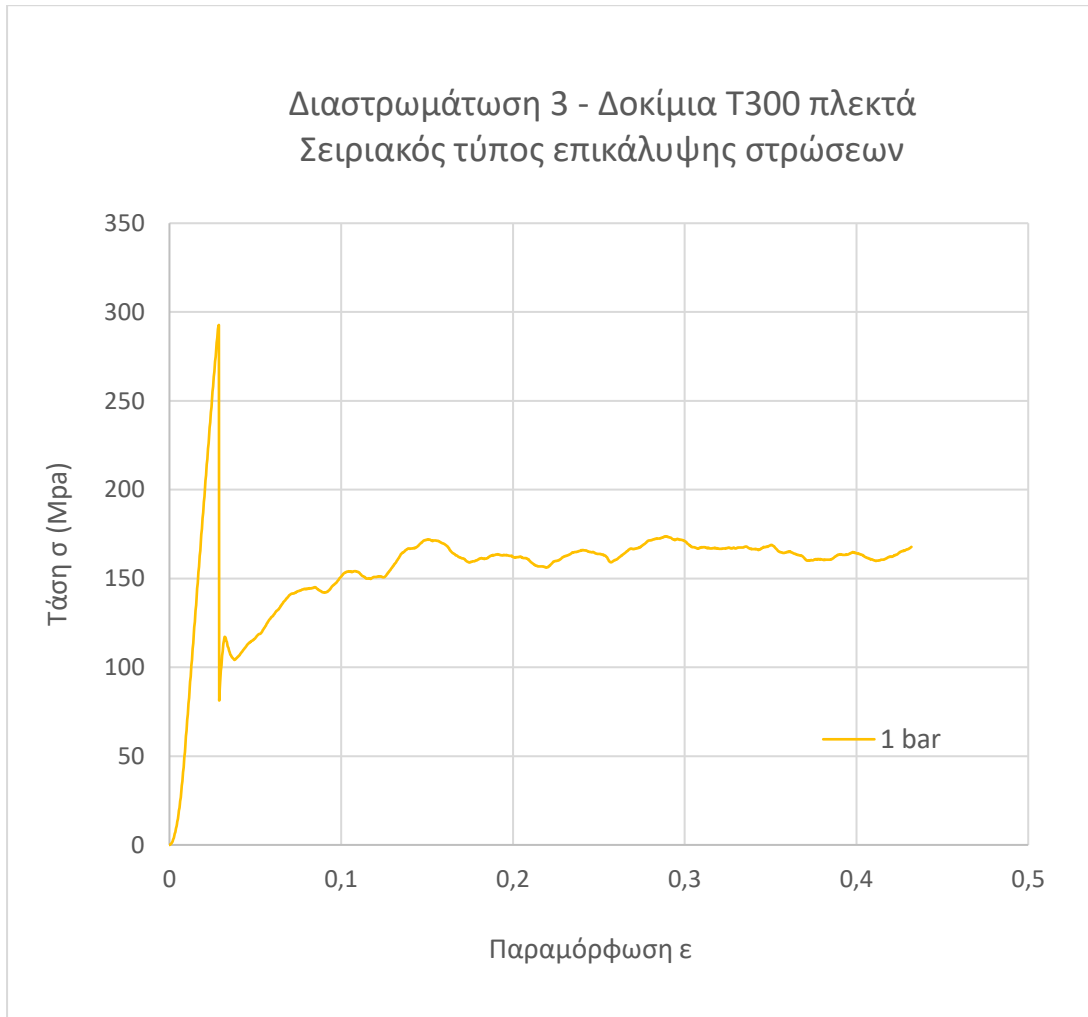


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος
της θλίψης





Θ-8.26: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 2 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

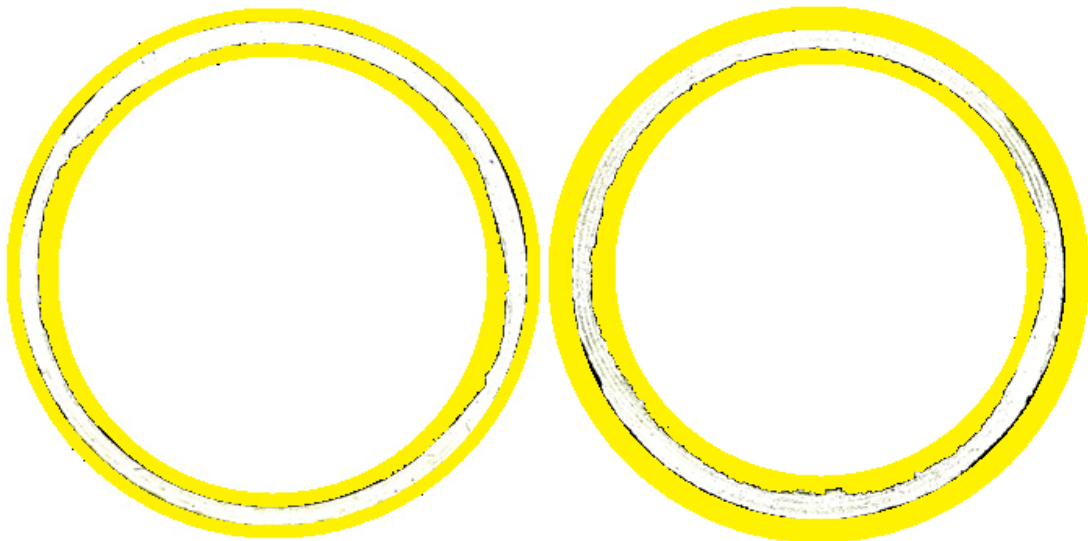
Κύκλος Πολυμερισμού 3

Χρόνος πολυμερισμού 30 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι
Διαστρωμάτωση 1 (UD T700), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

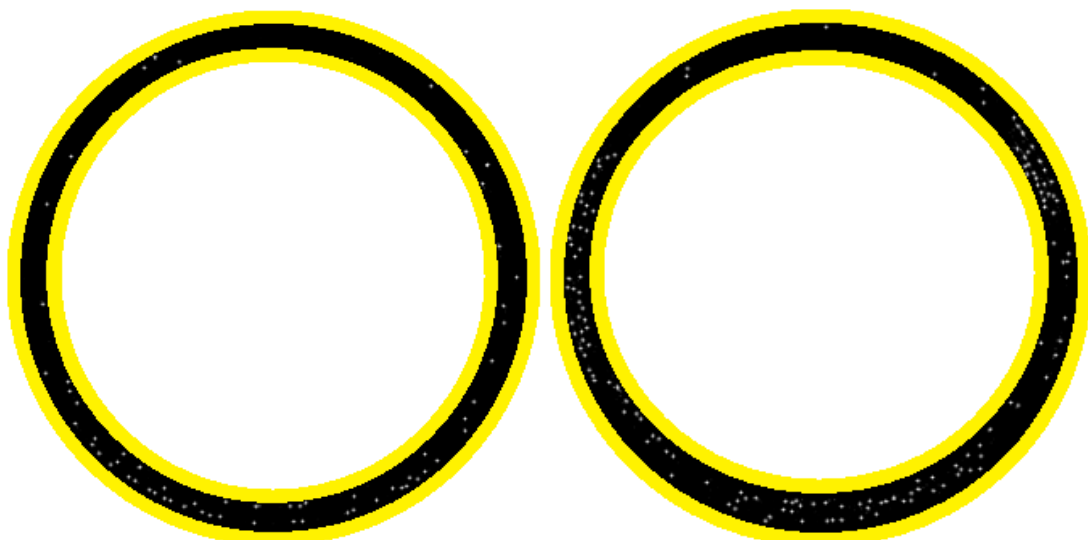
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.19626%

Ποσοστό = 0.60959%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

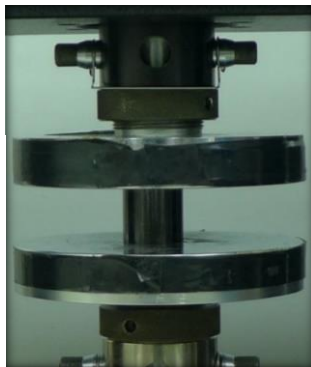
Πορώδες στην αξονική τομή



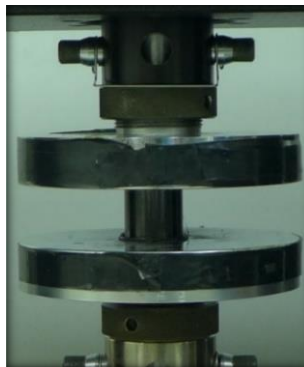
Ποσοστό πορώδους = 0.88033%

Μηχανισμός κατάρρευσης

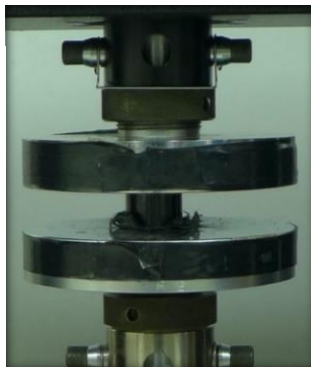
Έναρξη της συμπίεσης



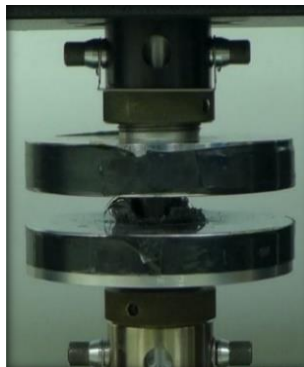
Είσοδος στην περιοχή κατάρρευσης

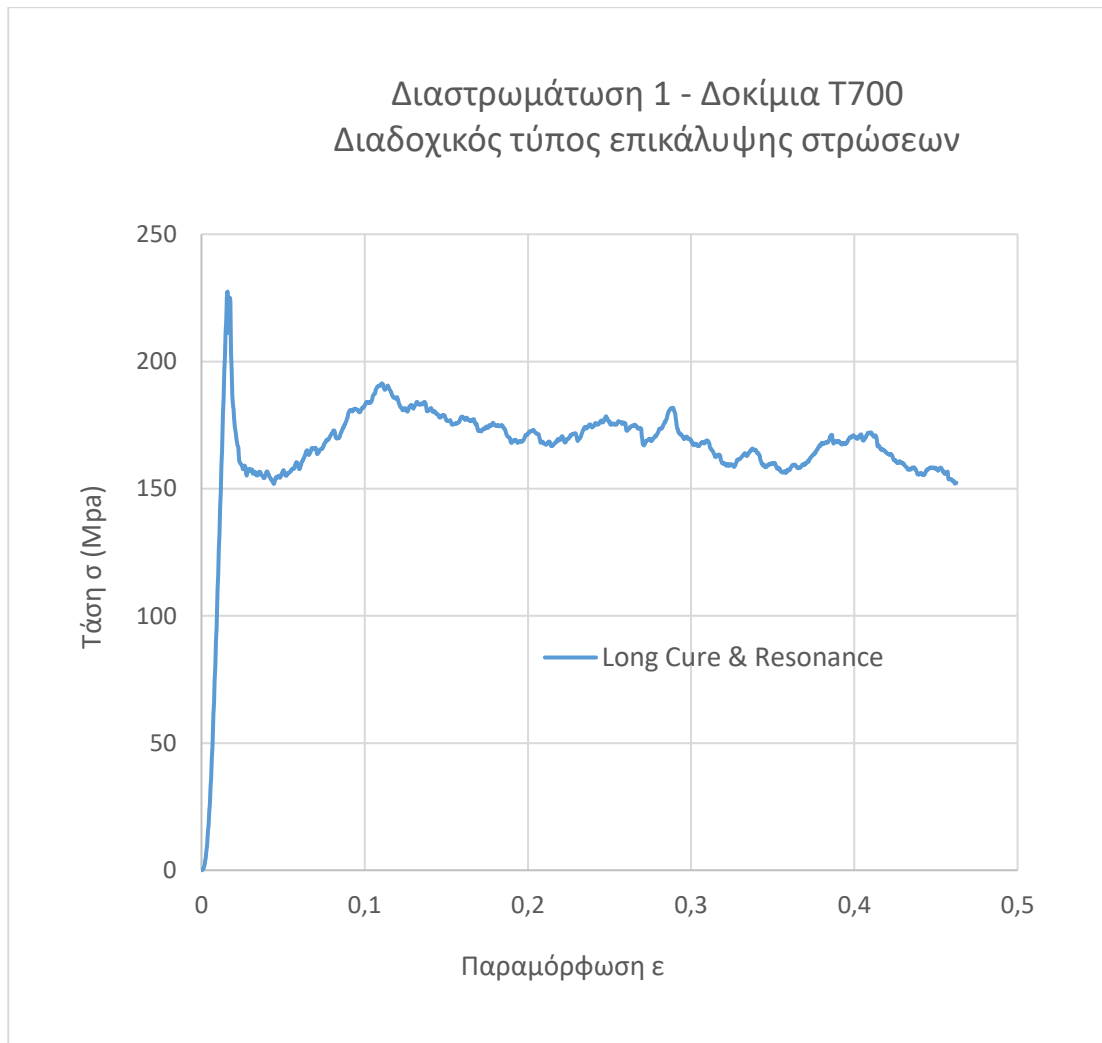


Στο ενδιάμεσο της περιοχής κατάρρευσης



Τέλος της θλίψης





Θ-8.27: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

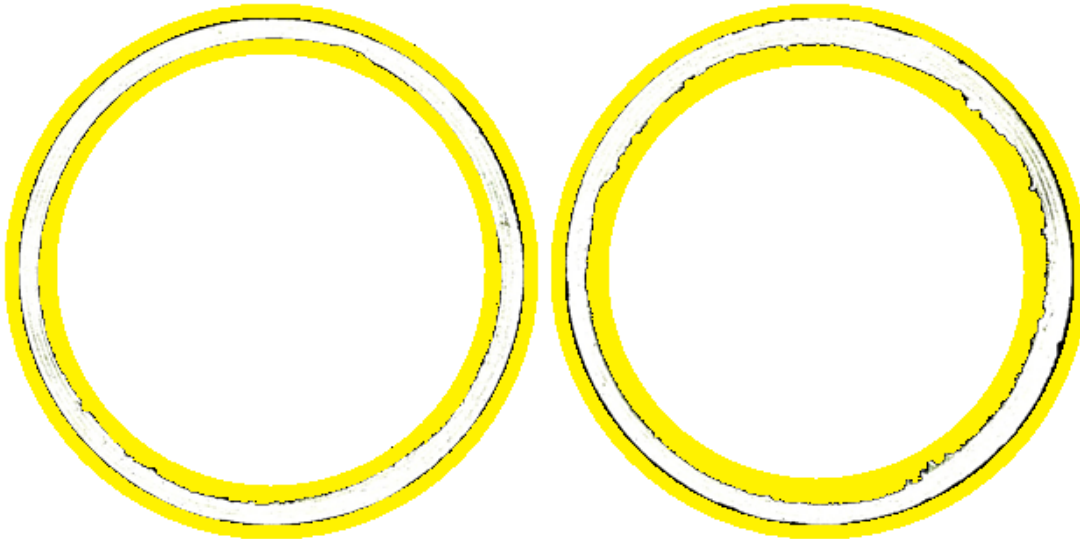
Κύκλος Πολυμερισμού 3

Χρόνος πολυμερισμού 30 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι
Διαστρωμάτωση 1 (UD T700), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

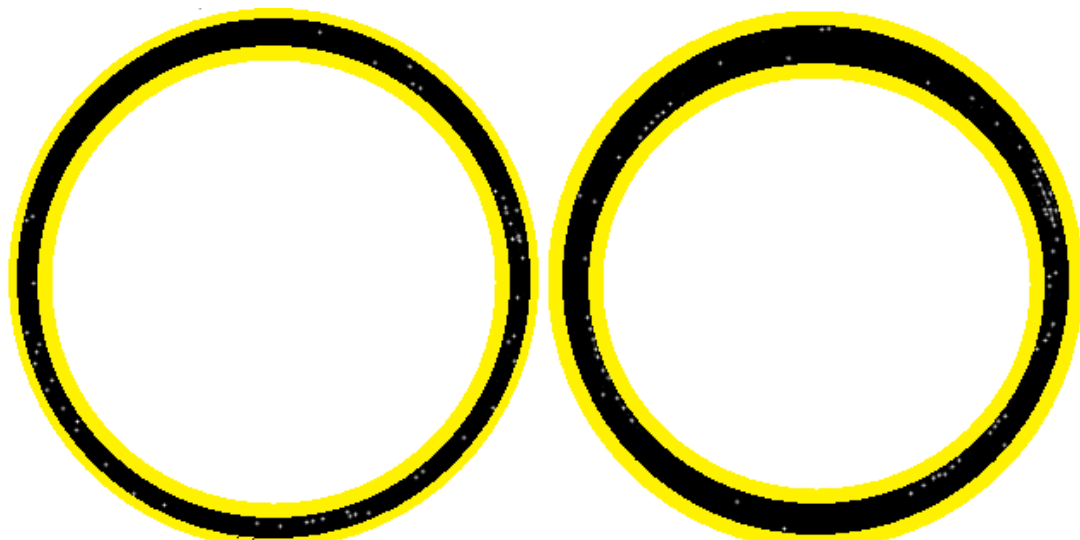
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



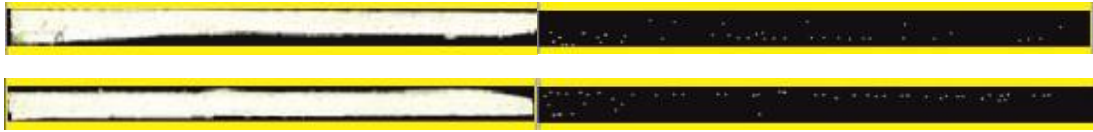
Ποσοστό = 0.14796%

Ποσοστό = 0.371%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

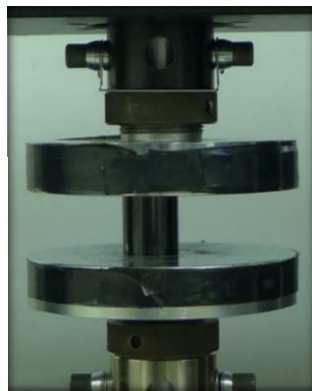
Πορώδες στην αξονική τομή



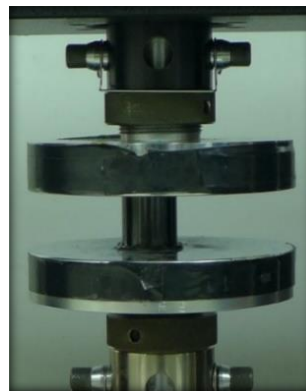
Ποσοστό πορώδους = 0.44523%

Μηχανισμός κατάρρευσης

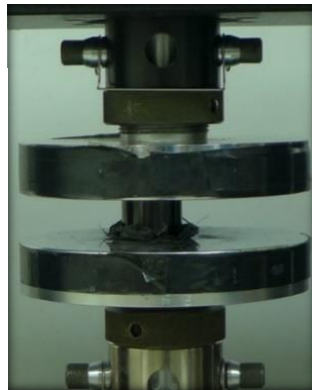
Έναρξη
της
συμπίεσης



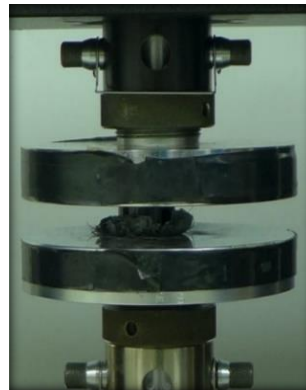
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

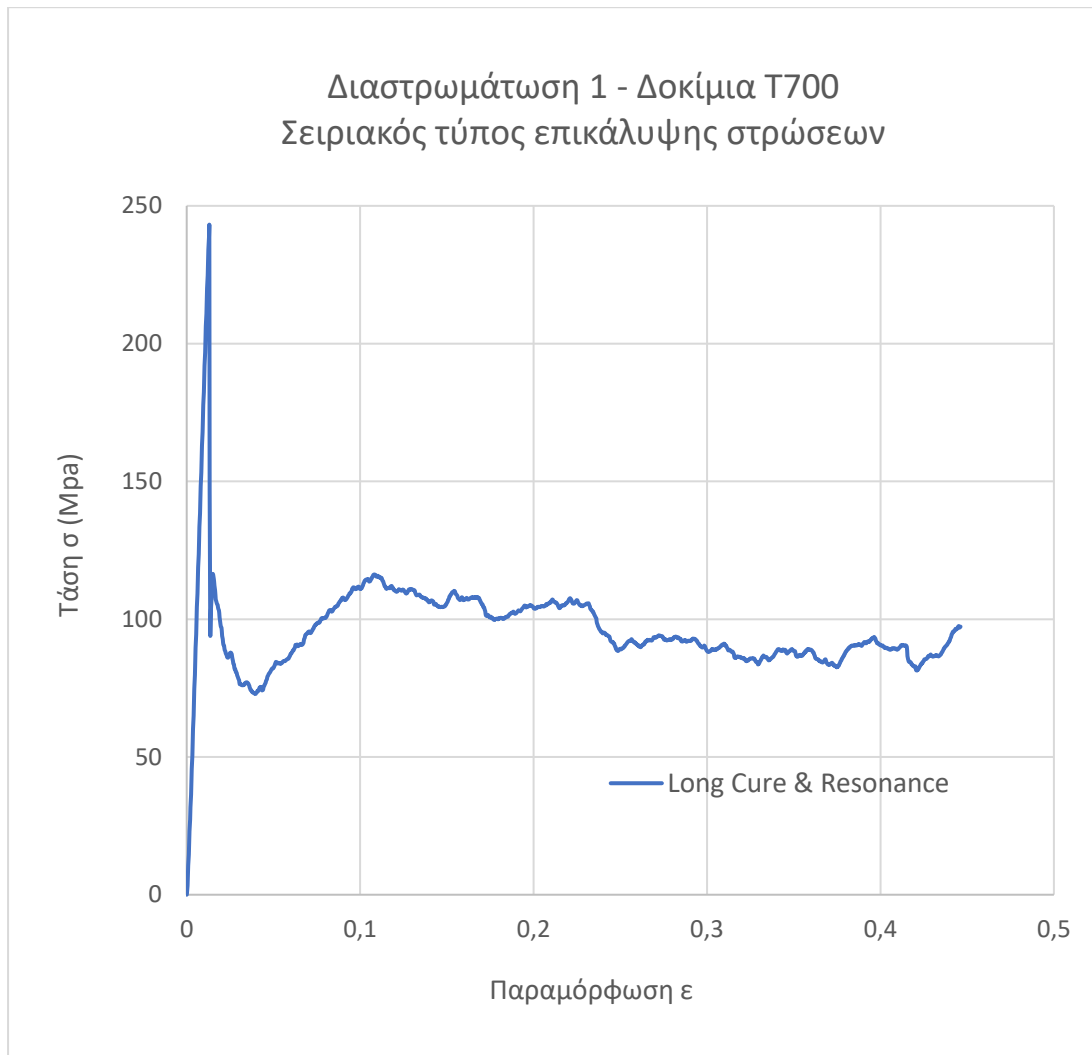


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.28: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 3

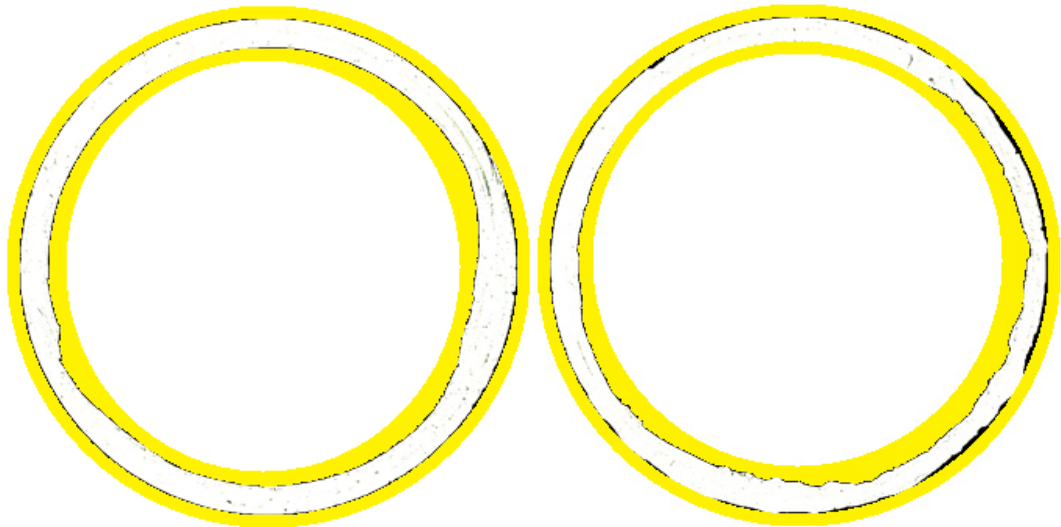
Χρόνος πολυμερισμού 30 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι

Διαστρωμάτωση 2 (Mixed Materials), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

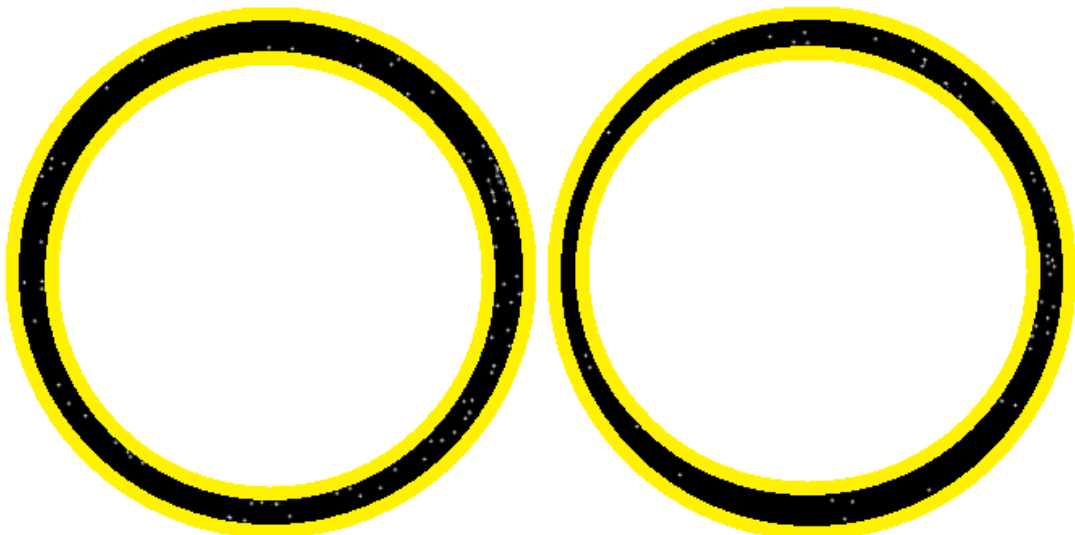
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.23495%

Ποσοστό = 0.11363%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

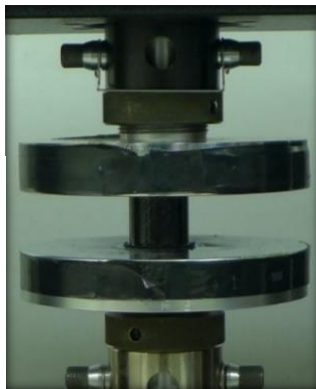
Πορώδες στην αξονική τομή



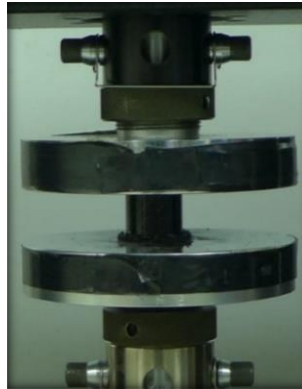
Ποσοστό πορώδους = 0.16355%

Μηχανισμός κατάρρευσης

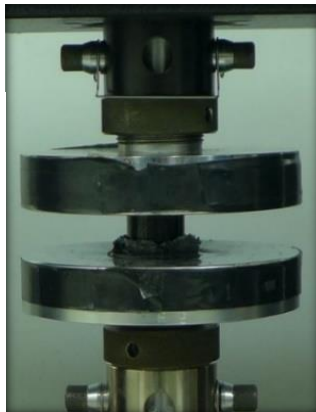
Έναρξη
της
συμπίεσης



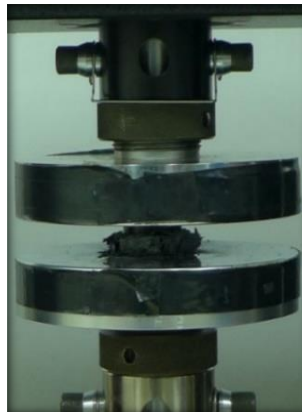
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

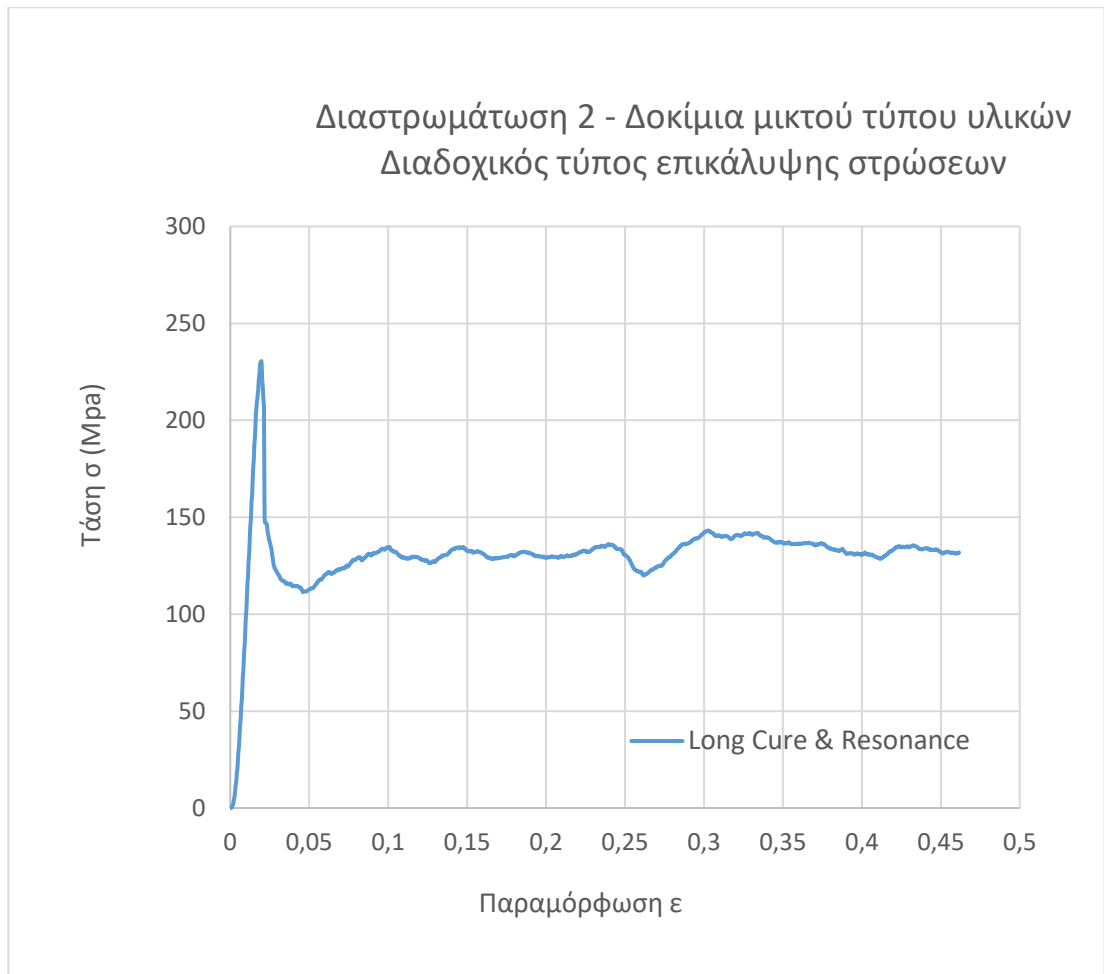


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.29: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 3

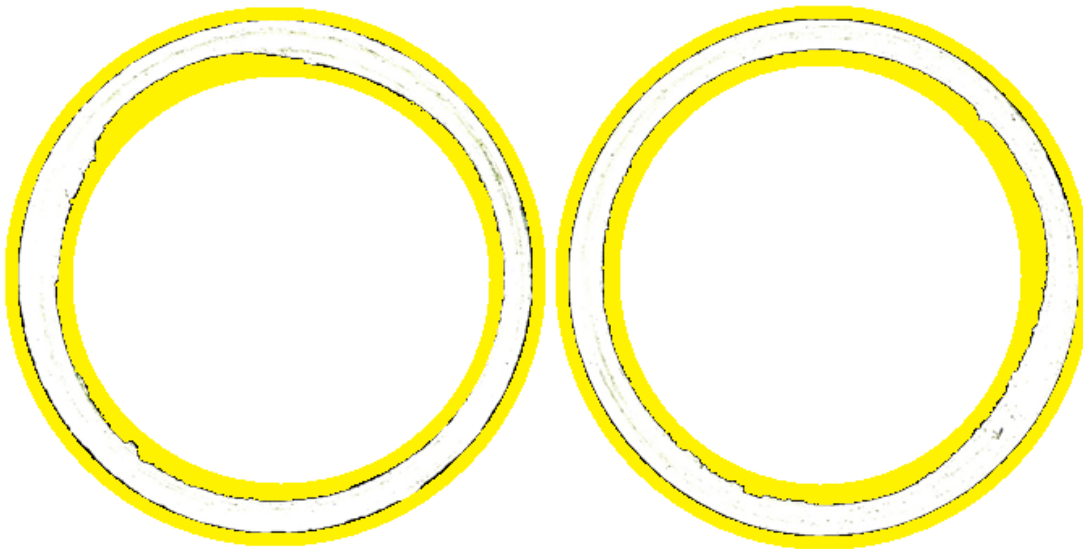
Χρόνος πολυμερισμού 30 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι

Διαστρωμάτωση 2 (Mixed Materials), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

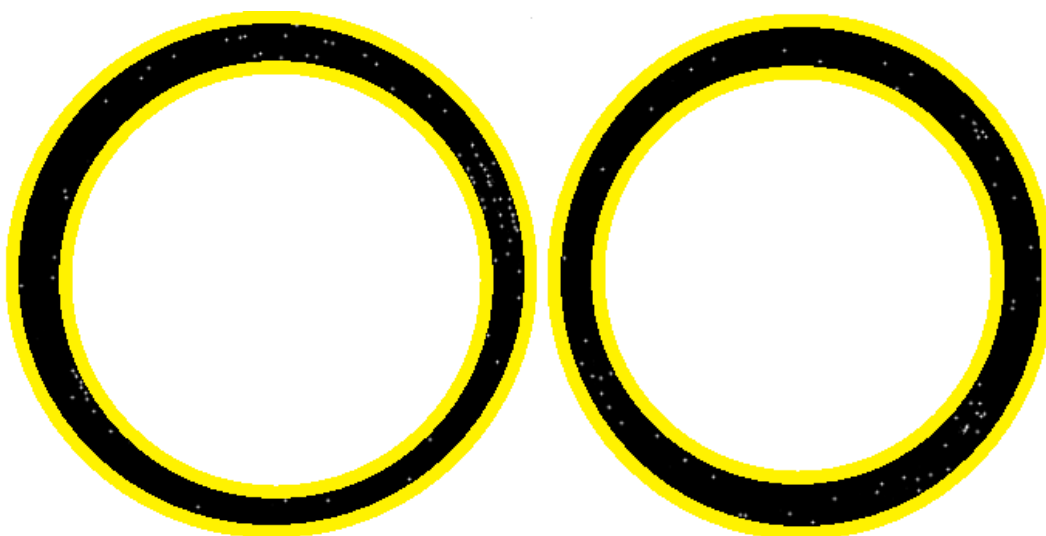
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.1321%

Ποσοστό = 0.1212%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

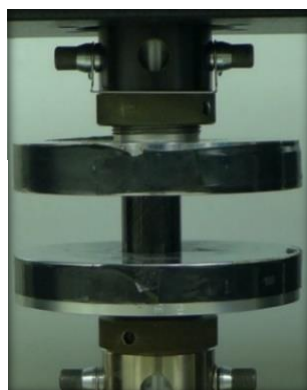
Πορώδες στην αξονική τομή



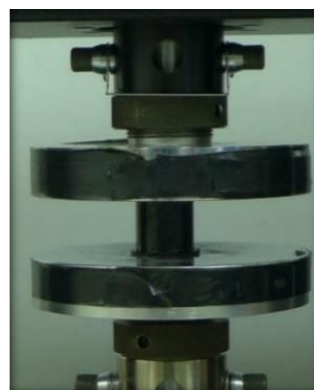
Ποσοστό πορώδους = 0.29381%

Μηχανισμός κατάρρευσης

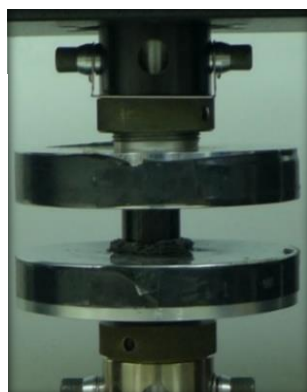
Έναρξη της συμπίεσης



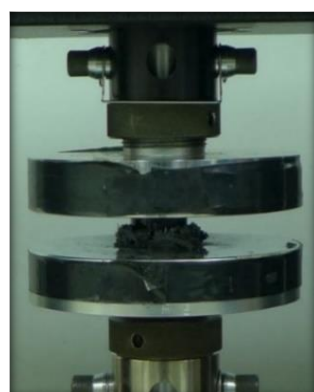
Είσοδος στην περιοχή κατάρρευσης



Στο ενδιάμεσο της περιοχής κατάρρευσης



Τέλος της θλίψης





Θ-8.30: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

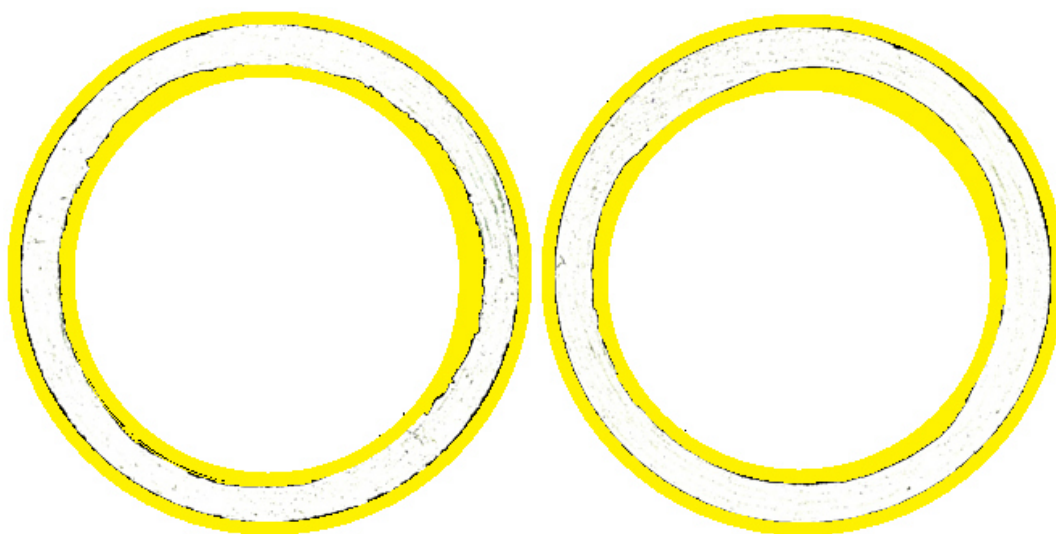
Κύκλος Πολυμερισμού 3

Χρόνος πολυμερισμού 30 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι
Διαστρωμάτωση 3 (T300), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

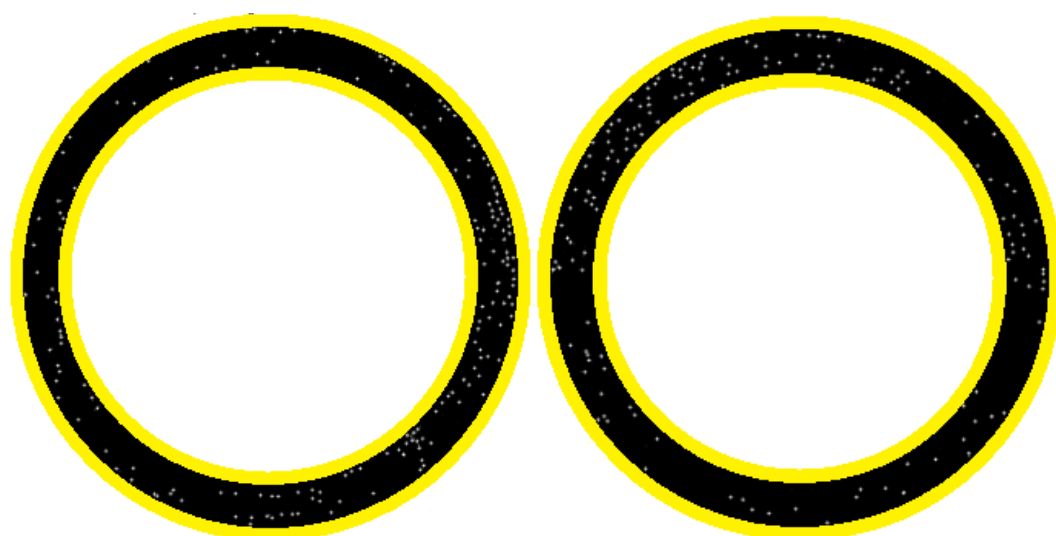
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



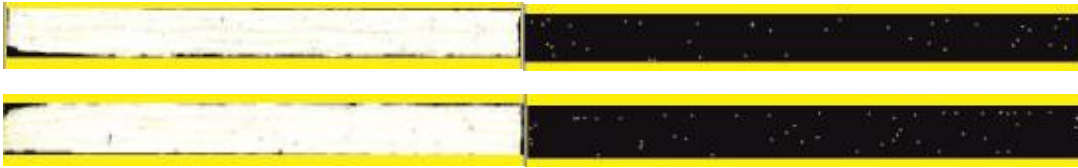
Ποσοστό = 0.28979%

Ποσοστό = 0.19989%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

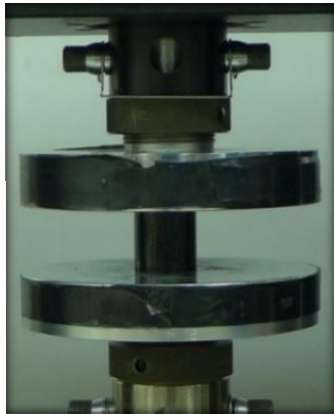
Πορώδες στην αξονική τομή



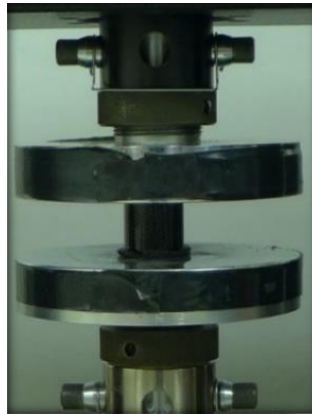
Ποσοστό πορώδους = 0.20308%

Μηχανισμός κατάρρευσης

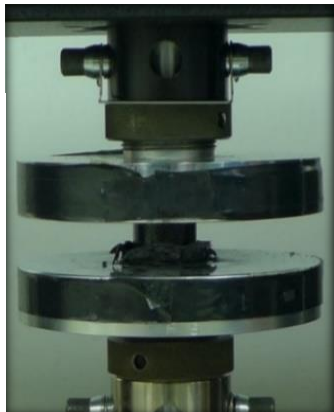
Έναρξη
της
συμπίεσης



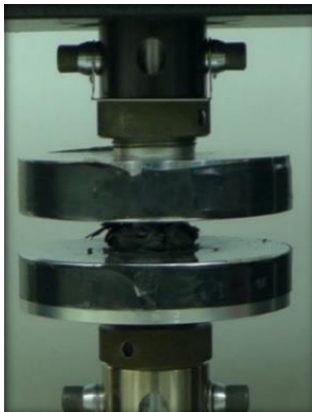
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

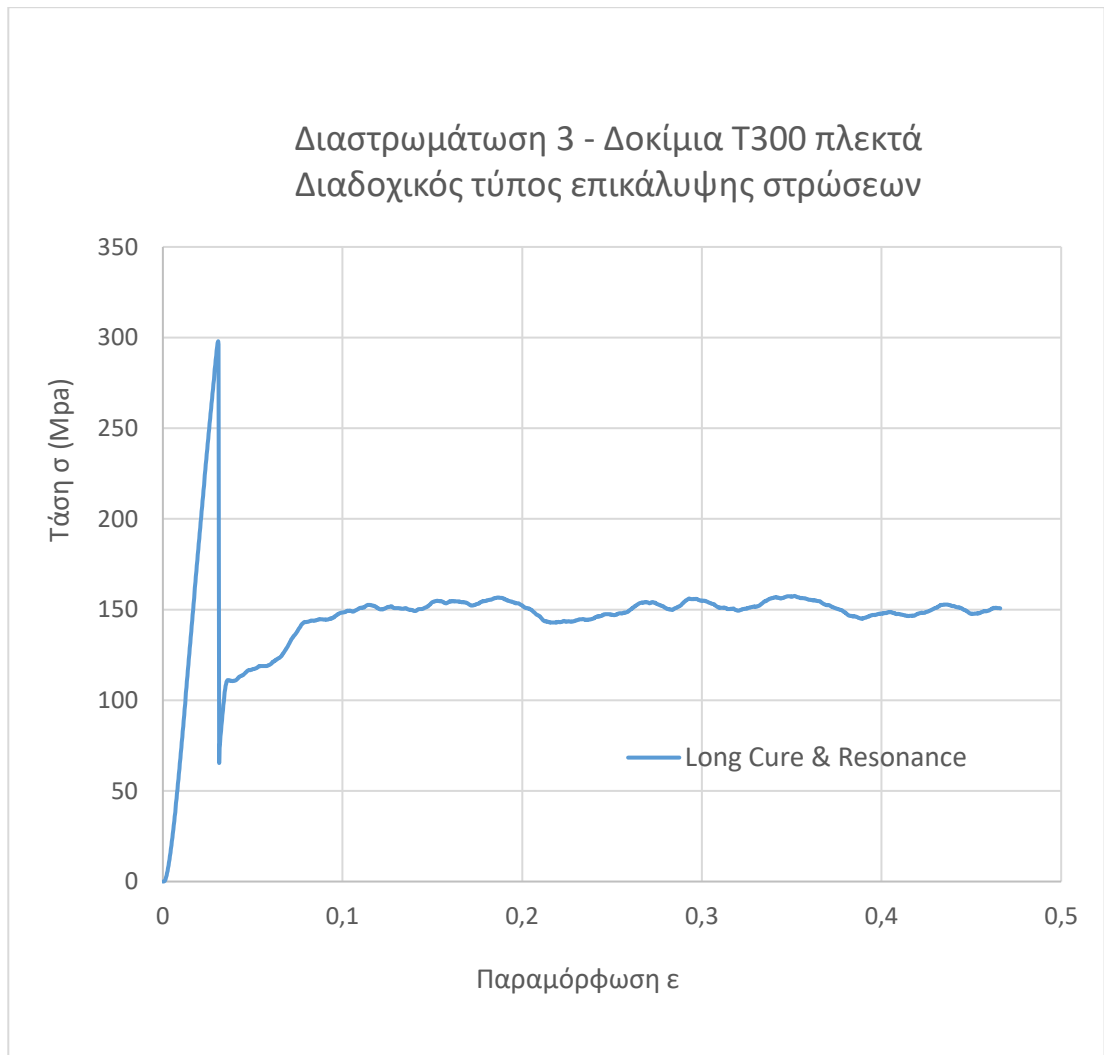


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.31: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

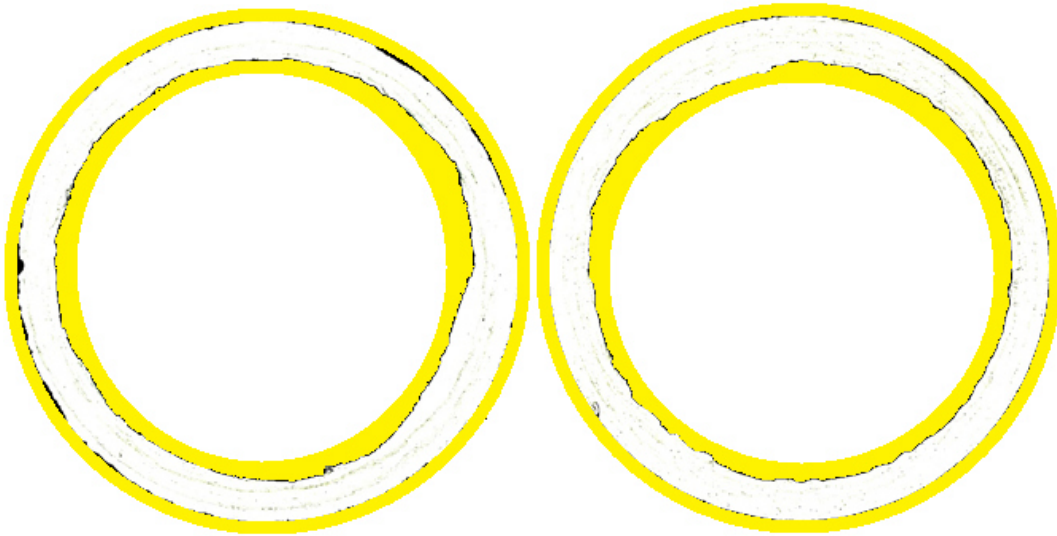
Κύκλος Πολυμερισμού 3

Χρόνος πολυμερισμού 30 h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι
Διαστρωμάτωση 3 (T300), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

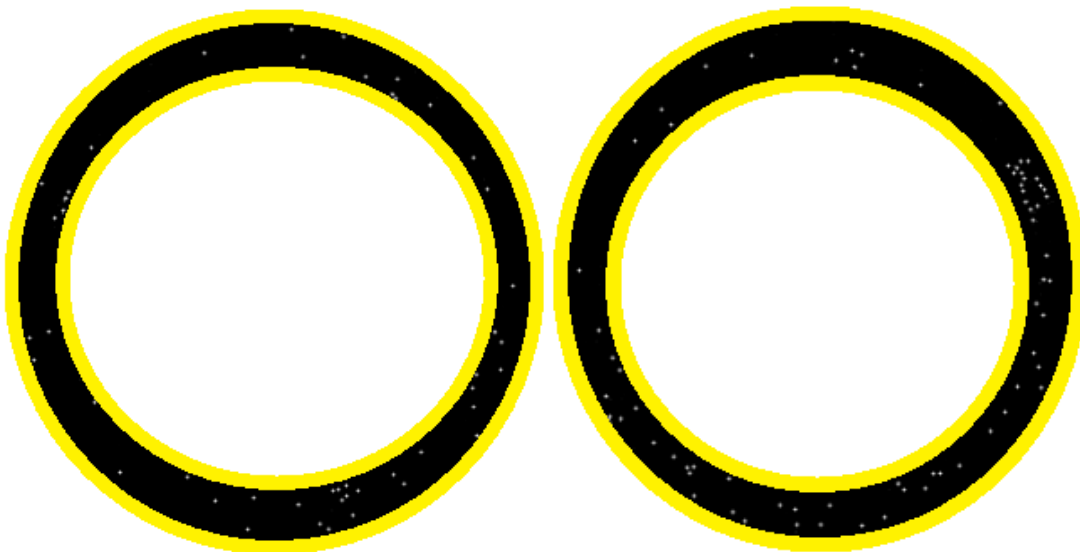
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.073123%

Ποσοστό = 0.10587%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

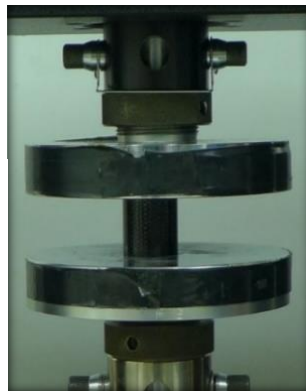
Πορώδες στην αξονική τομή



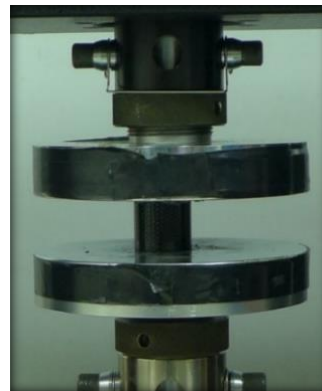
Ποσοστό πορώδους = 0.1566%

Μηχανισμός κατάρρευσης

Έναρξη
της
συμπίεσης



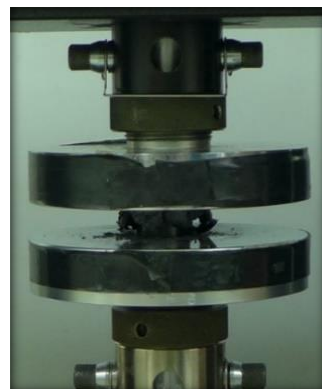
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

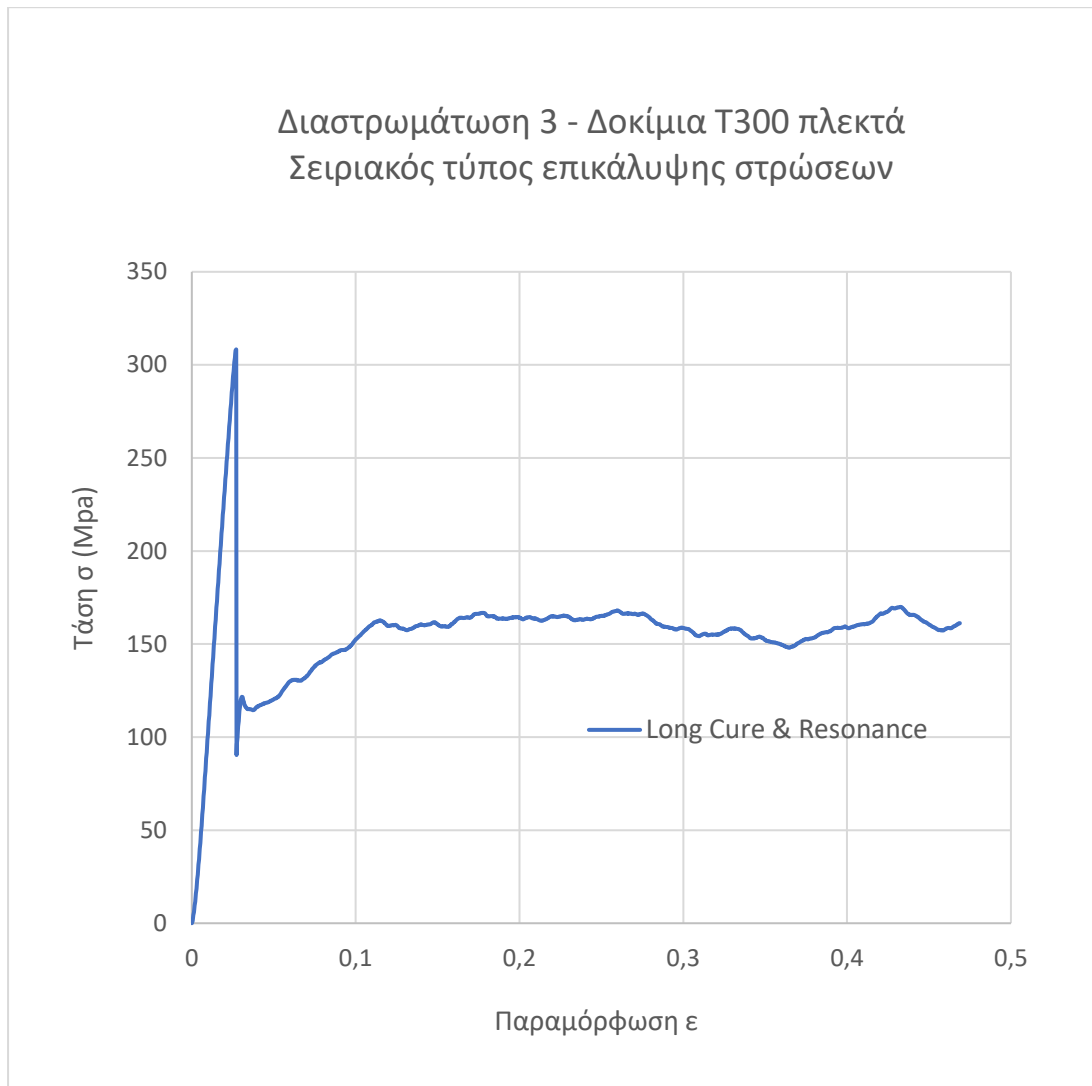


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





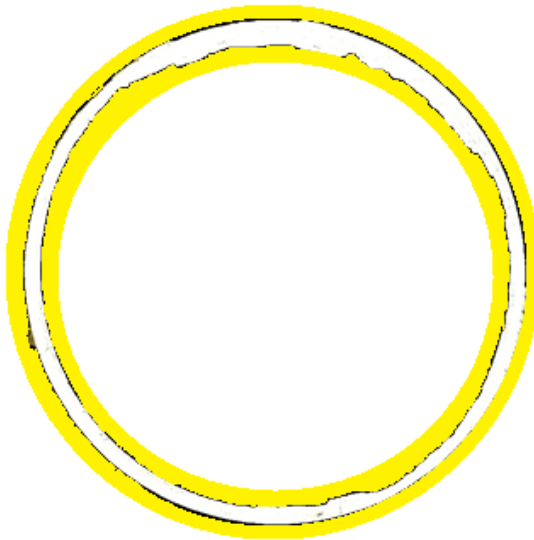
Θ-8.32: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 3 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 4

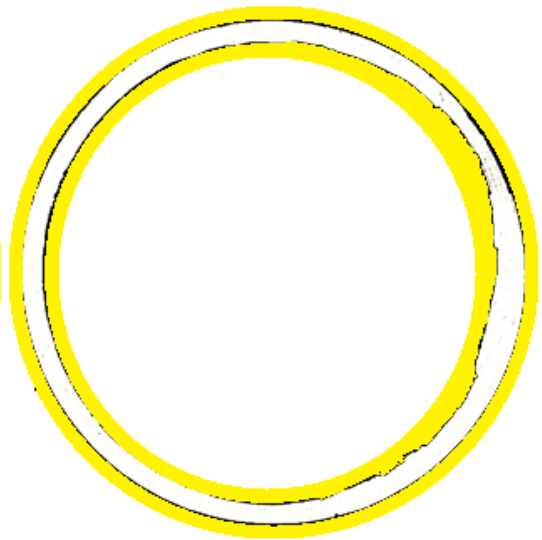
Χρόνος πολυμερισμού 4,5h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι
Διαστρωμάτωση 1 (UD T700), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

Η δομή του υλικού

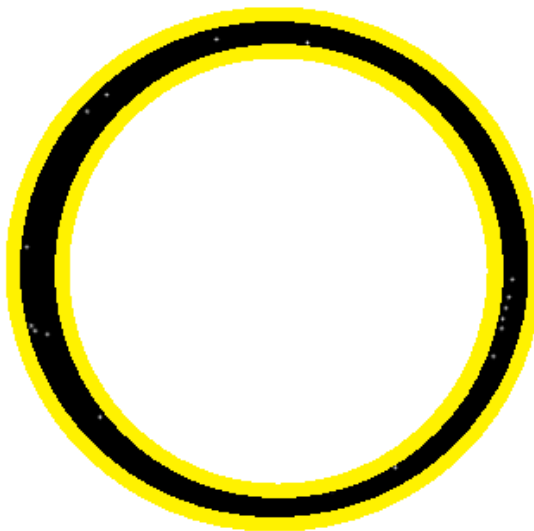
Πλευρά 1



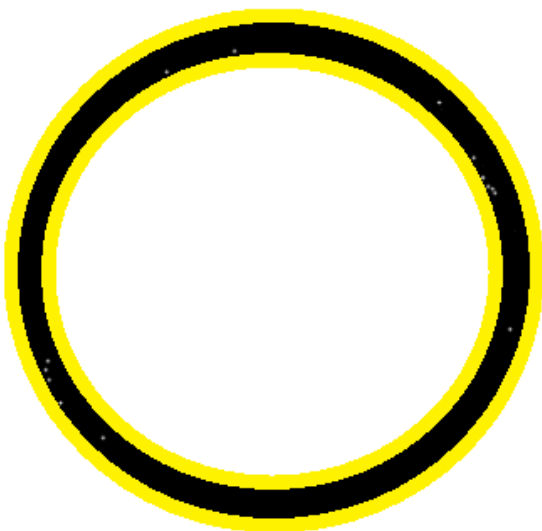
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.09747%

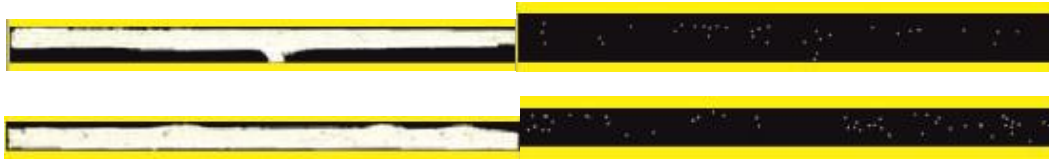


Ποσοστό = 0.035866%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

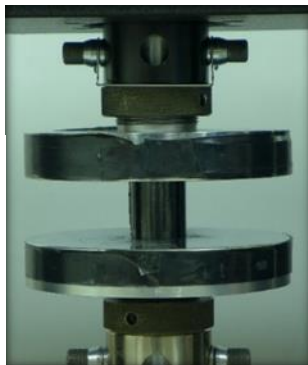
Πορώδες στην αξονική τομή



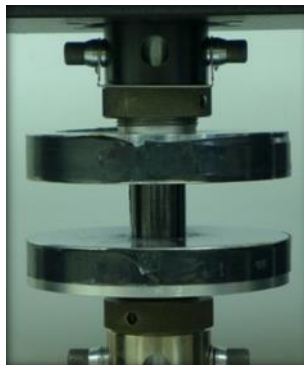
Ποσοστό πορώδους = 0.44845%

Μηχανισμός κατάρρευσης

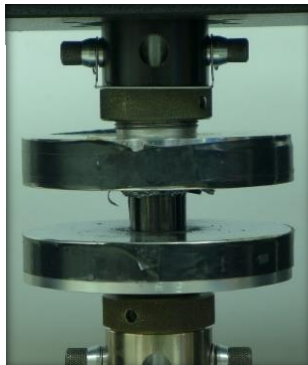
Έναρξη
της
συμπίεσης



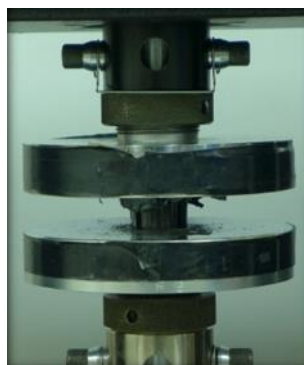
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

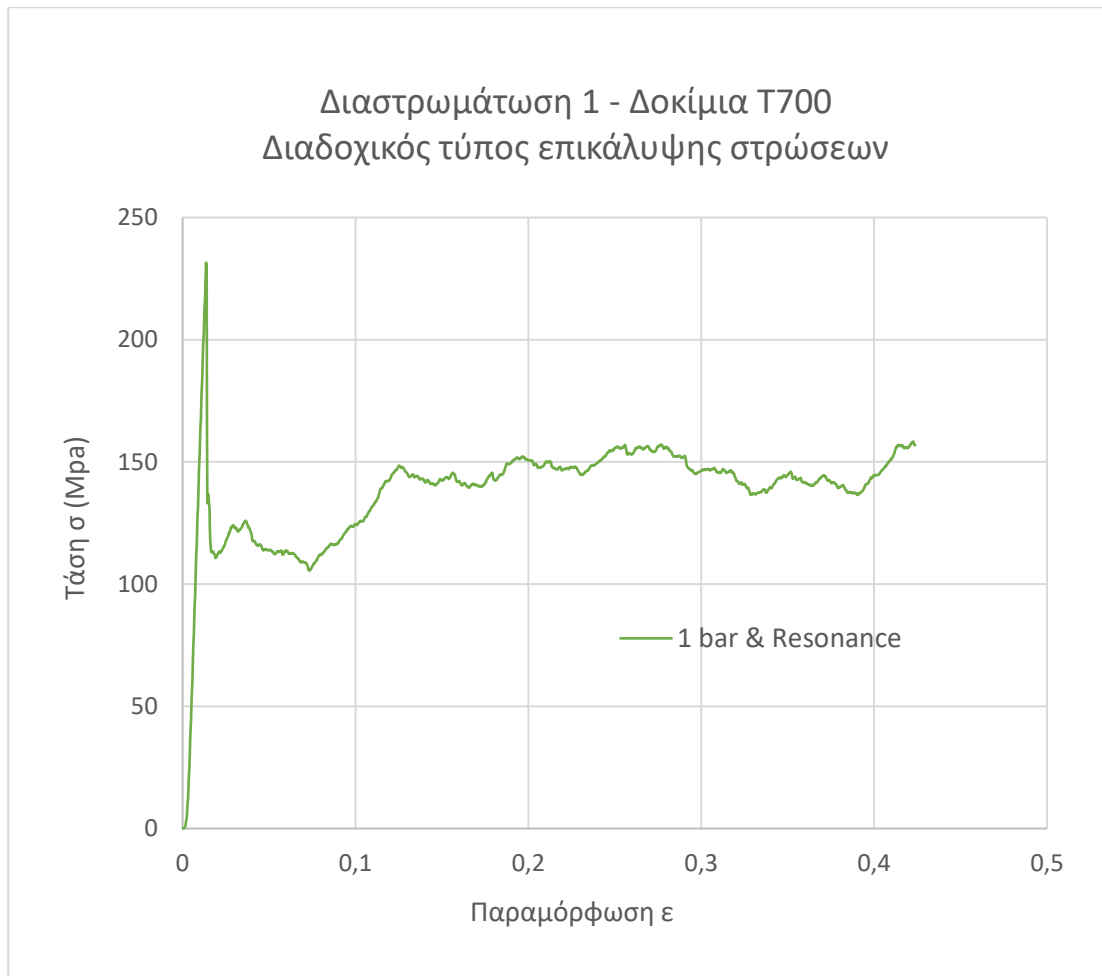


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.33: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

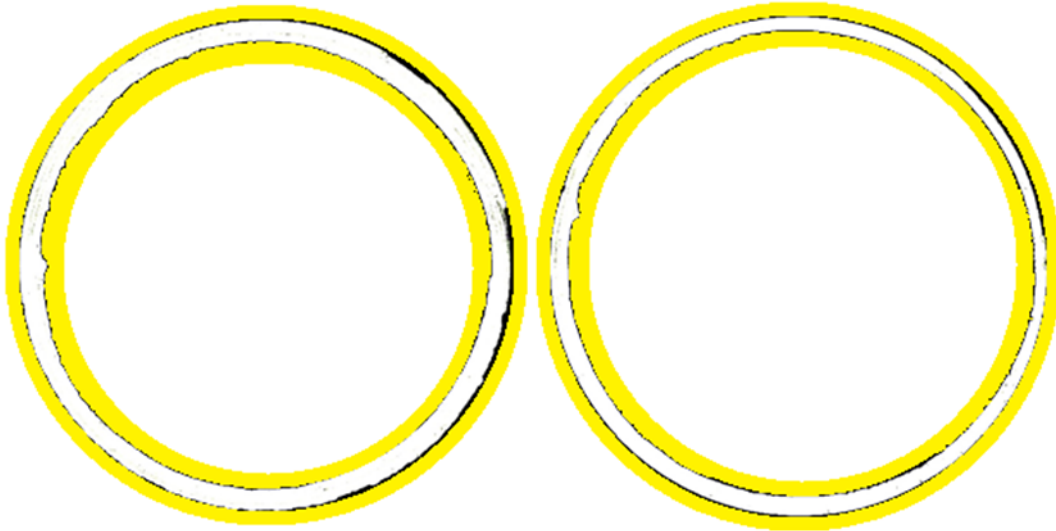
Κύκλος Πολυμερισμού 4

Χρόνος πολυμερισμού 4,5h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι
Διαστρωμάτωση 1 (UD T700), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

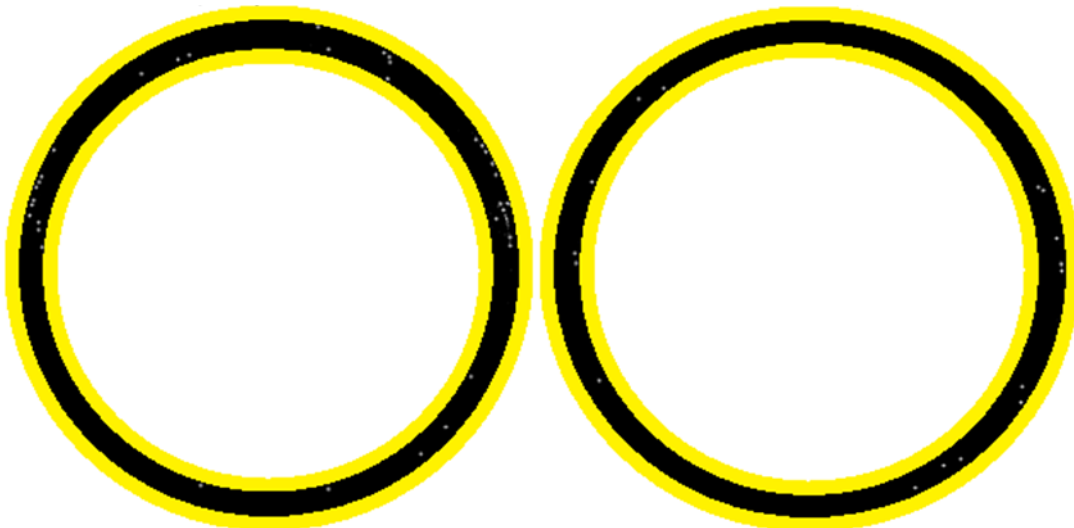
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.19466%

Ποσοστό = 0.065443%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

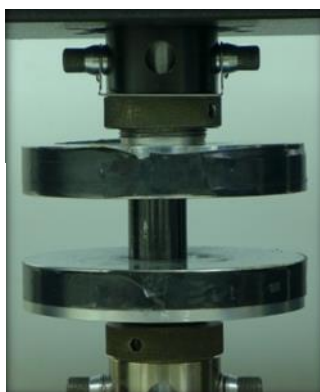
Πορώδες στην αξονική τομή



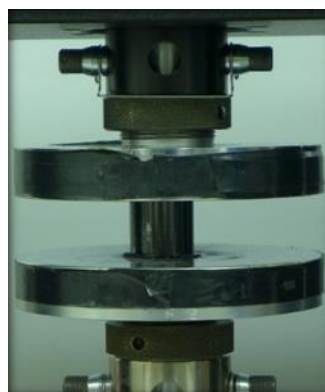
Ποσοστό πορώδους = 0.35498%

Μηχανισμός κατάρρευσης

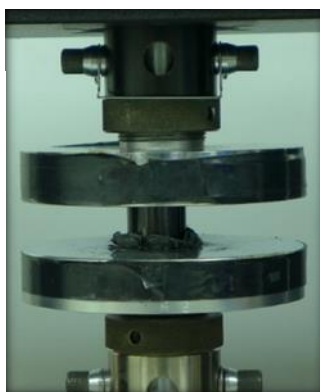
Έναρξη
της
συμπίεσης



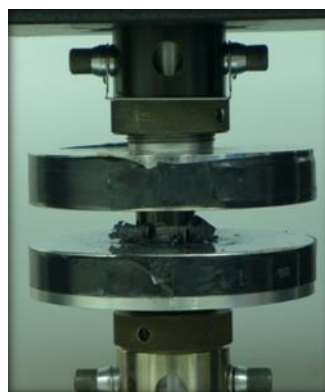
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

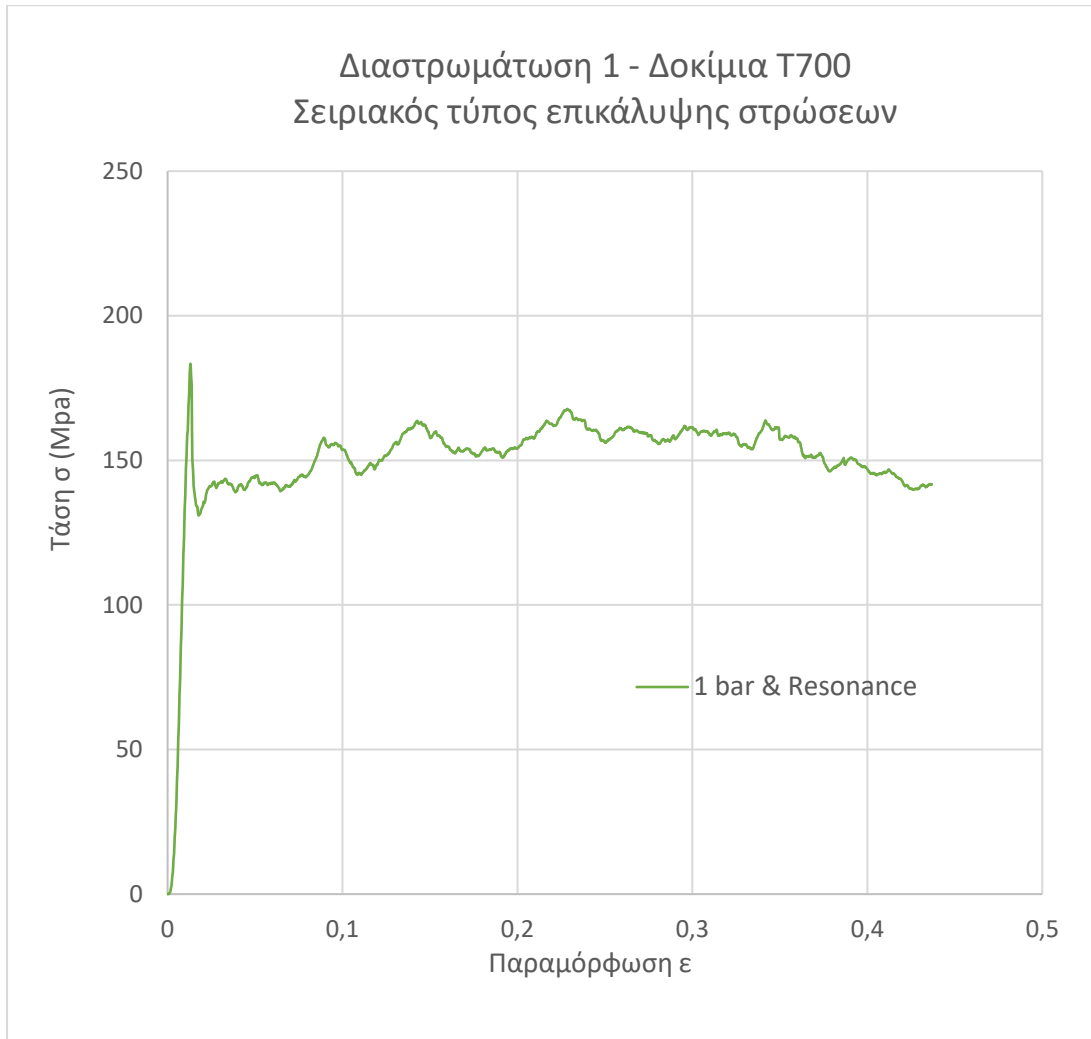


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.34: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Κύκλος Πολυμερισμού 4

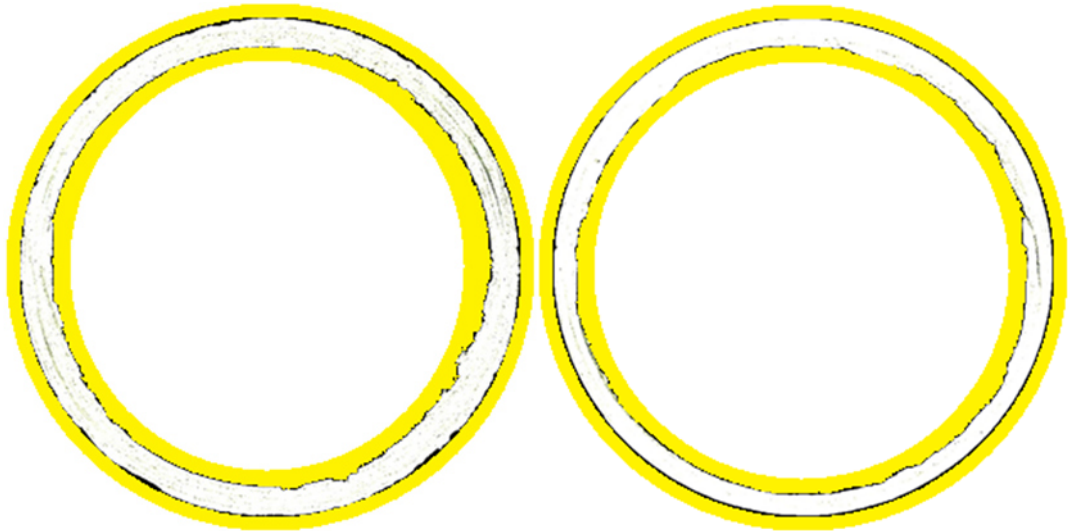
Χρόνος πολυμερισμού 4,5h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι

Διαστρωμάτωση 2 (Mixed materials), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

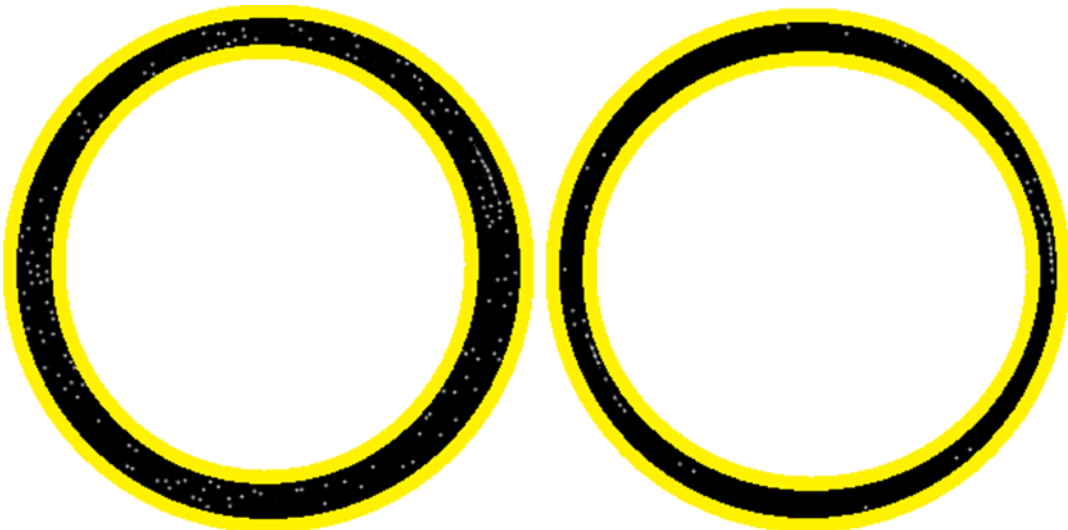
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.38413%

Ποσοστό = 0.2256%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

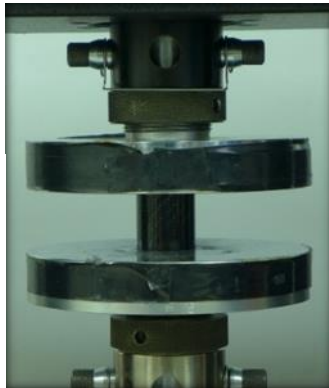
Πορώδες στην αξονική τομή



Ποσοστό πορώδους = 0.13199%

Μηχανισμός κατάρρευσης

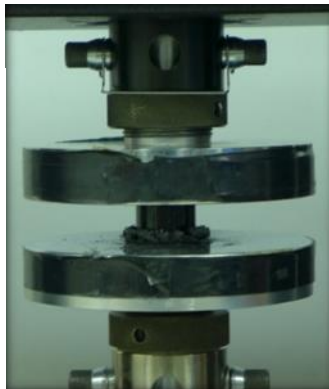
Έναρξη
της
συμπίεσης



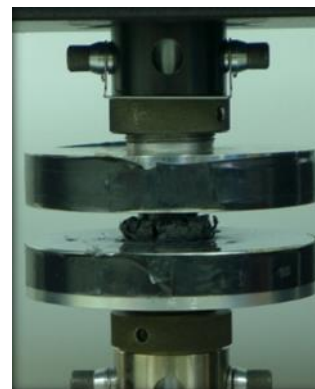
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

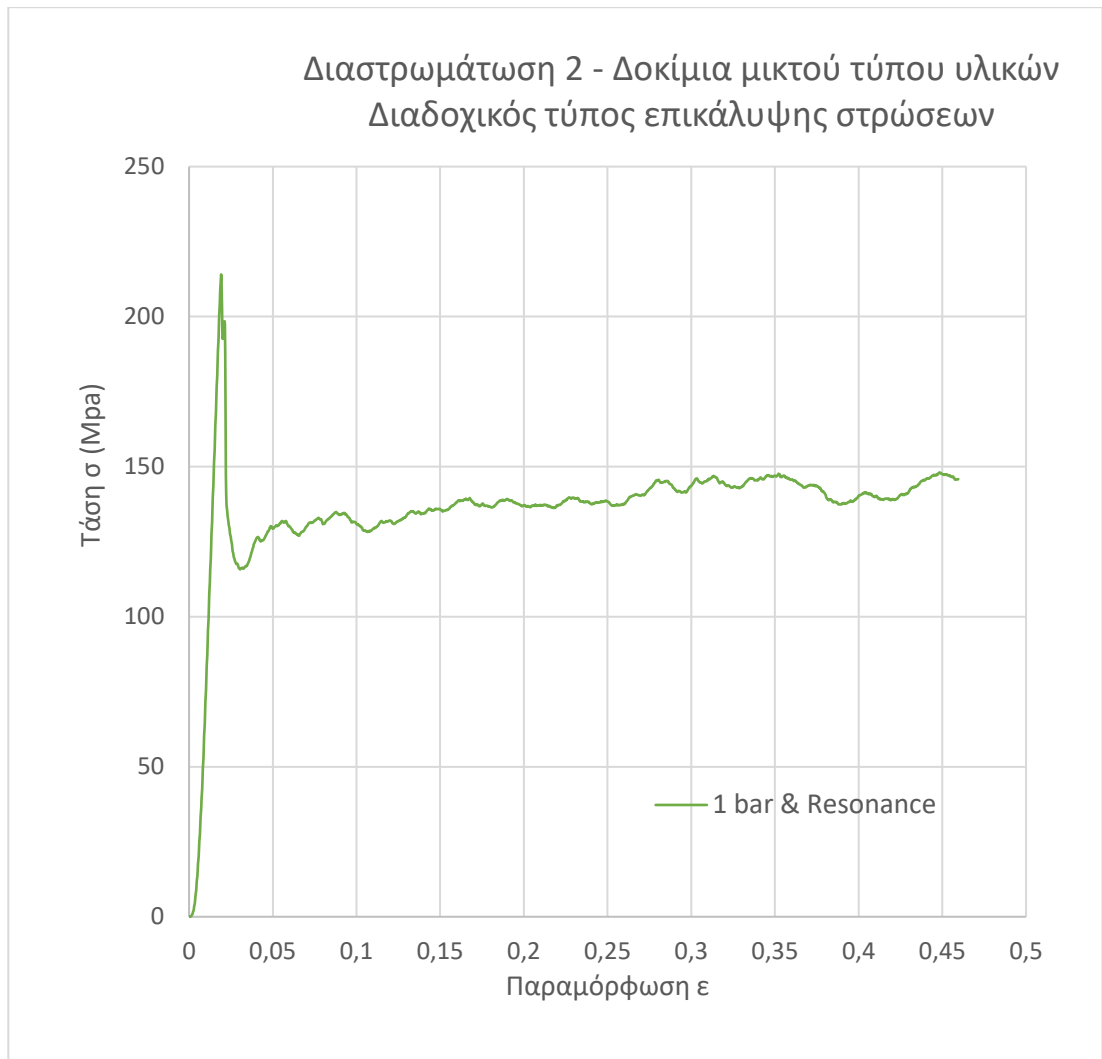


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.35: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

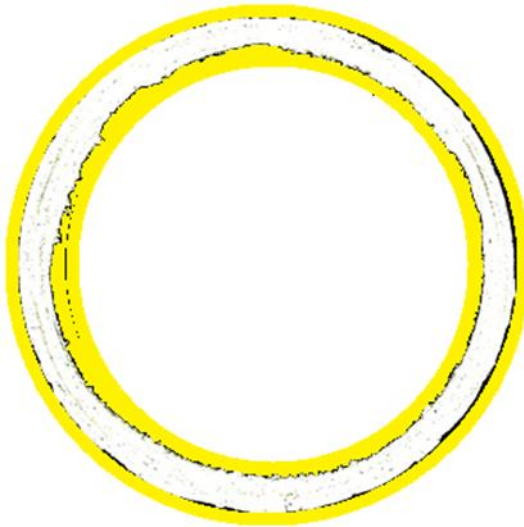
Κύκλος Πολυμερισμού 4

Χρόνος πολυμερισμού 4,5h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι

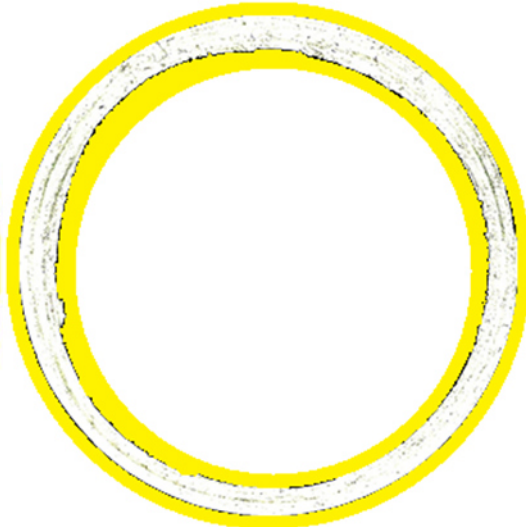
Διαστρωμάτωση 2 (Mixed materials), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

Η δομή του υλικού

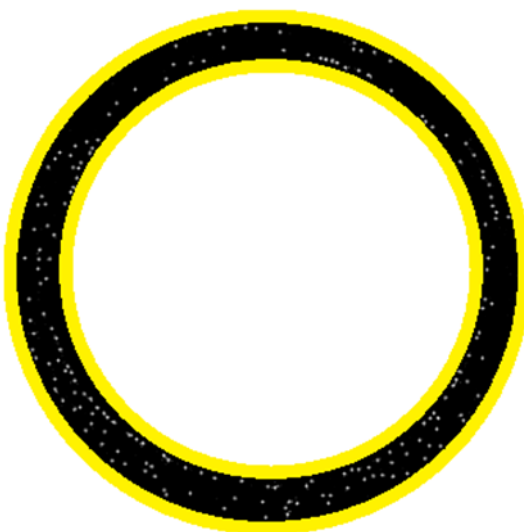
Πλευρά 1



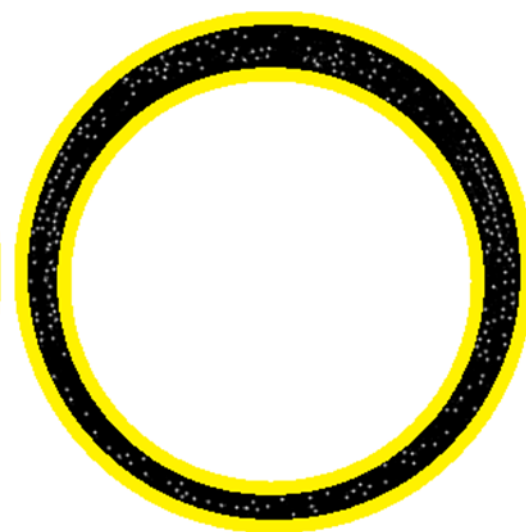
Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.4866%



Ποσοστό = 0.94432%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

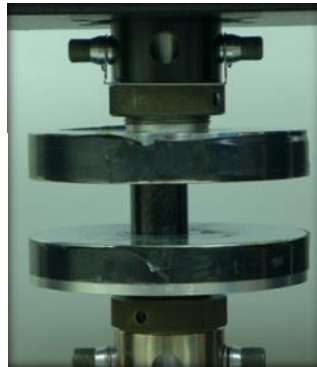
Πορώδες στην αξονική τομή



Ποσοστό πορώδους = 0.26144%

Μηχανισμός κατάρρευσης

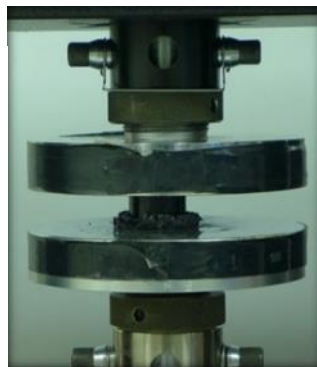
Έναρξη
της
συμπίεσης



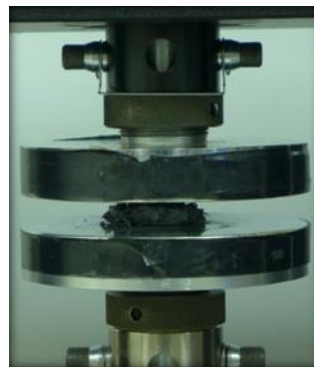
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης



Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.36: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T700-T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

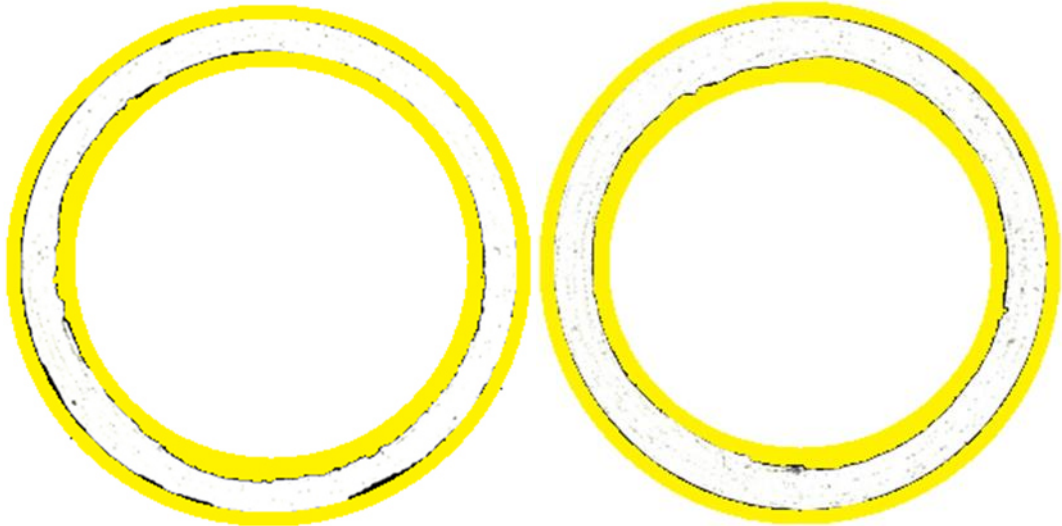
Κύκλος Πολυμερισμού 4

Χρόνος πολυμερισμού 4,5h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι
Διαστρωμάτωση 3 (T300), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 1 διαδοχικός

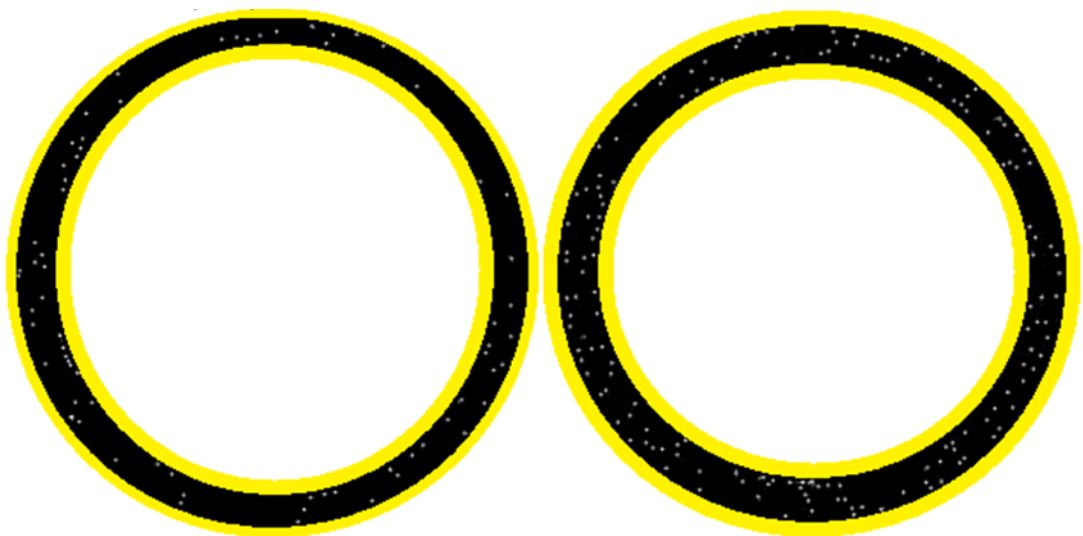
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.16709%

Ποσοστό = 0.36102%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

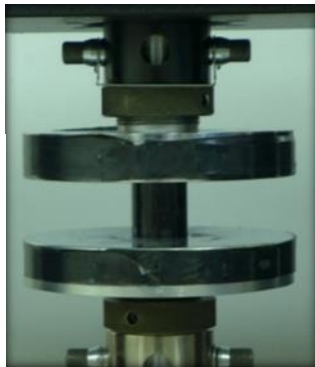
Πορώδες στην αξονική τομή



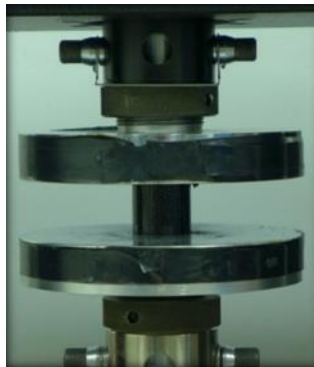
Ποσοστό πορώδους = 0.18879%

Μηχανισμός κατάρρευσης

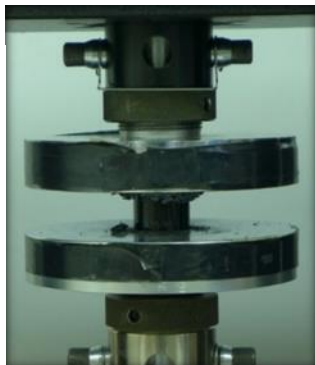
Έναρξη
της
συμπίεσης



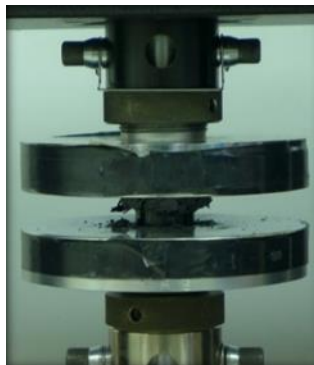
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

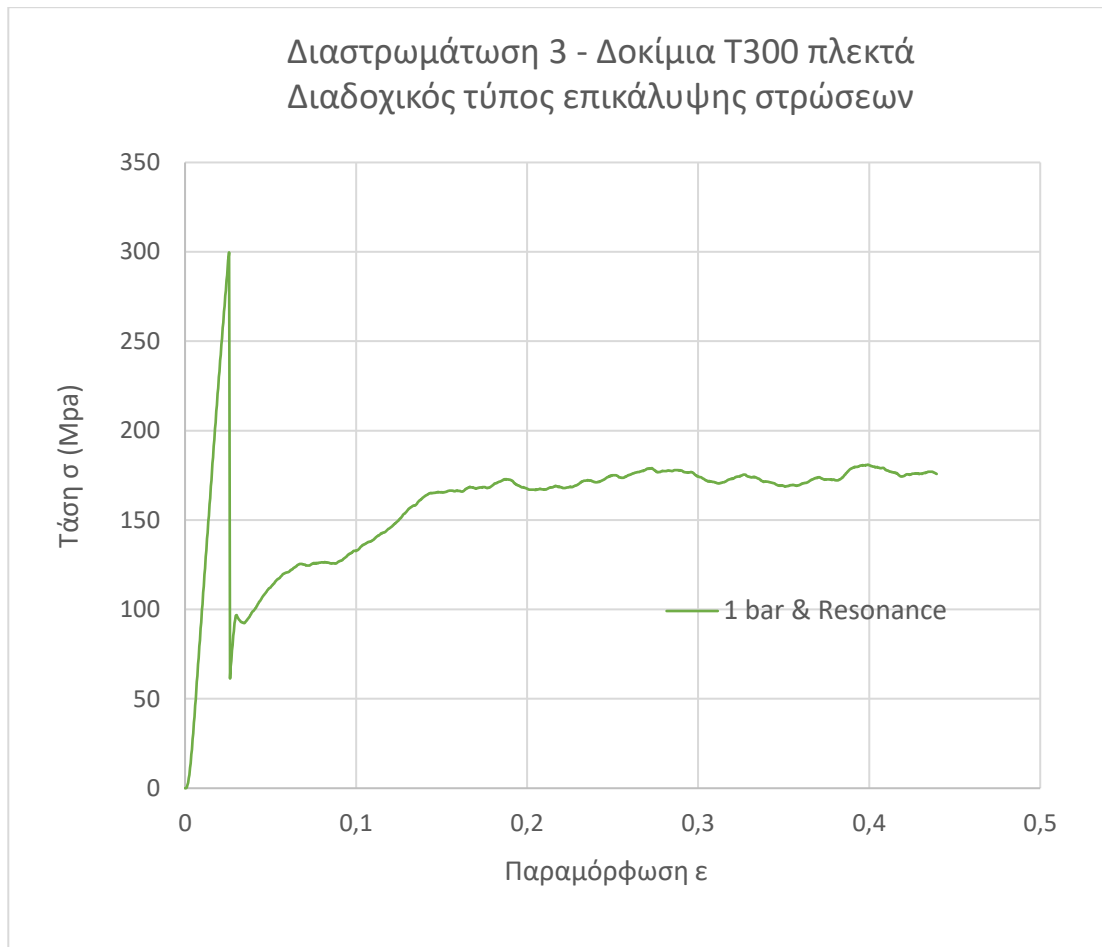


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.37: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και διαδοχικό τύπο επικάλυψης.

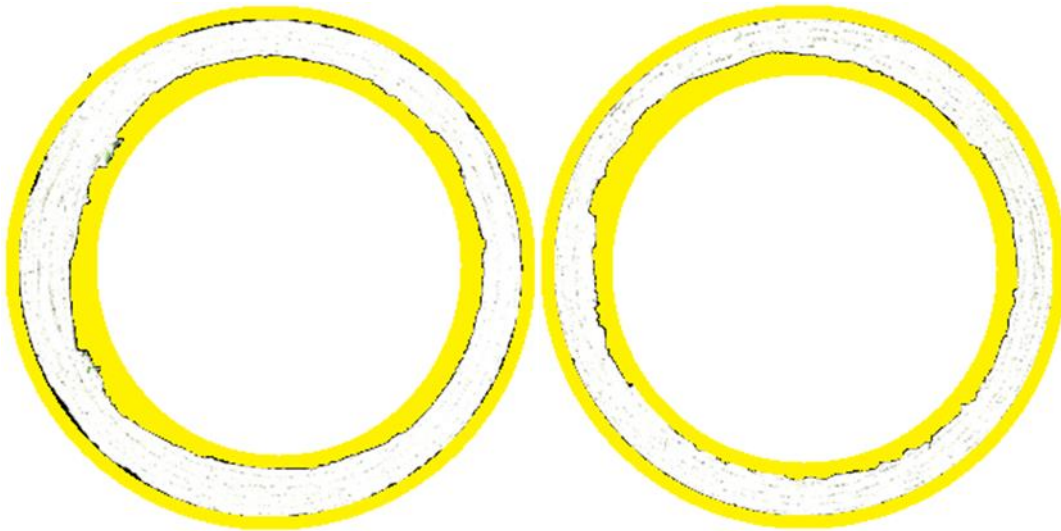
Κύκλος Πολυμερισμού 4

Χρόνος πολυμερισμού 4,5h, Πίεση 1 bar, Συντονισμός Ναι
Διαστρωμάτωση 3 (T300), Τύπος επικάλυψης στρώσεων 2 σειριακός

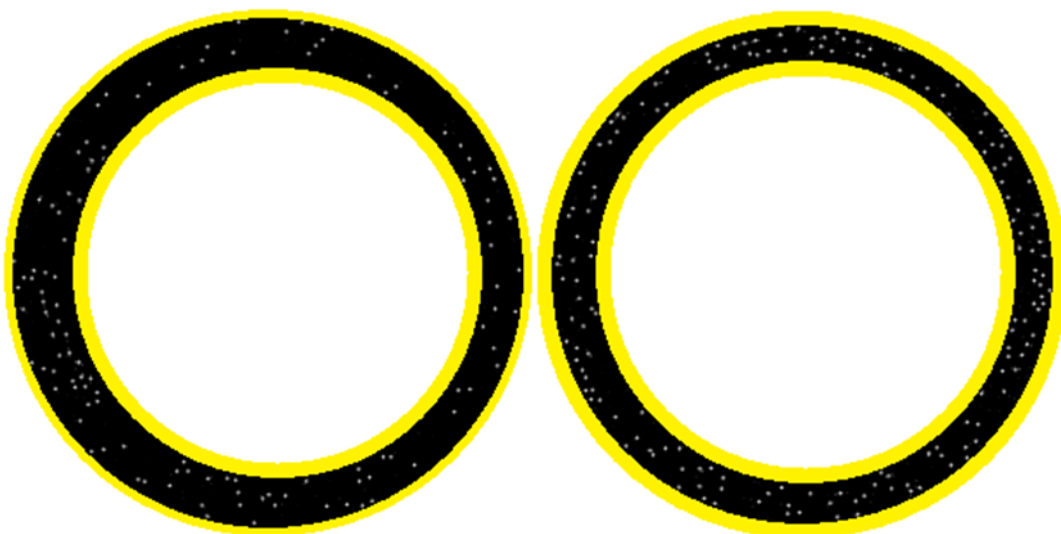
Η δομή του υλικού

Πλευρά 1

Πλευρά 2



Κατανομή Πορώδους στις αντίστοιχες επιφάνειες



Ποσοστό = 0.228%

Ποσοστό = 0.39653%

Αξονική τομή

Η δομή του υλικού

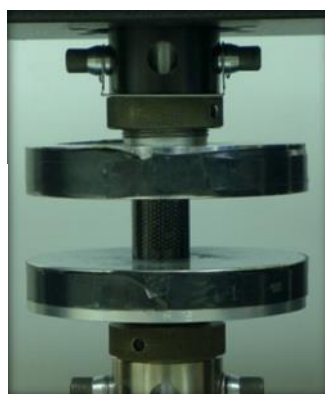
Πορώδες στην αξονική τομή



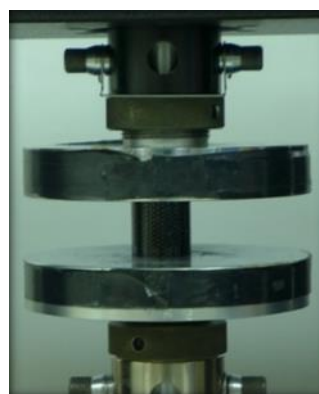
Ποσοστό πορώδους = 0.18622%

Μηχανισμός κατάρρευσης

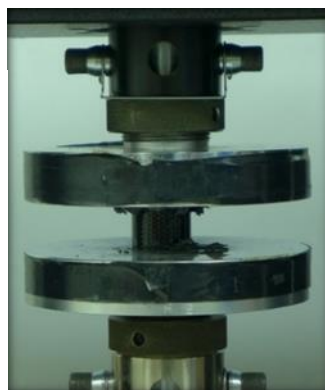
Έναρξη
της
συμπίεσης



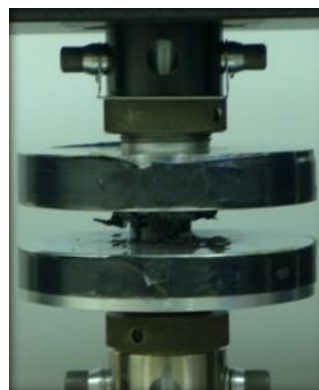
Είσοδος στην
περιοχή
κατάρρευσης

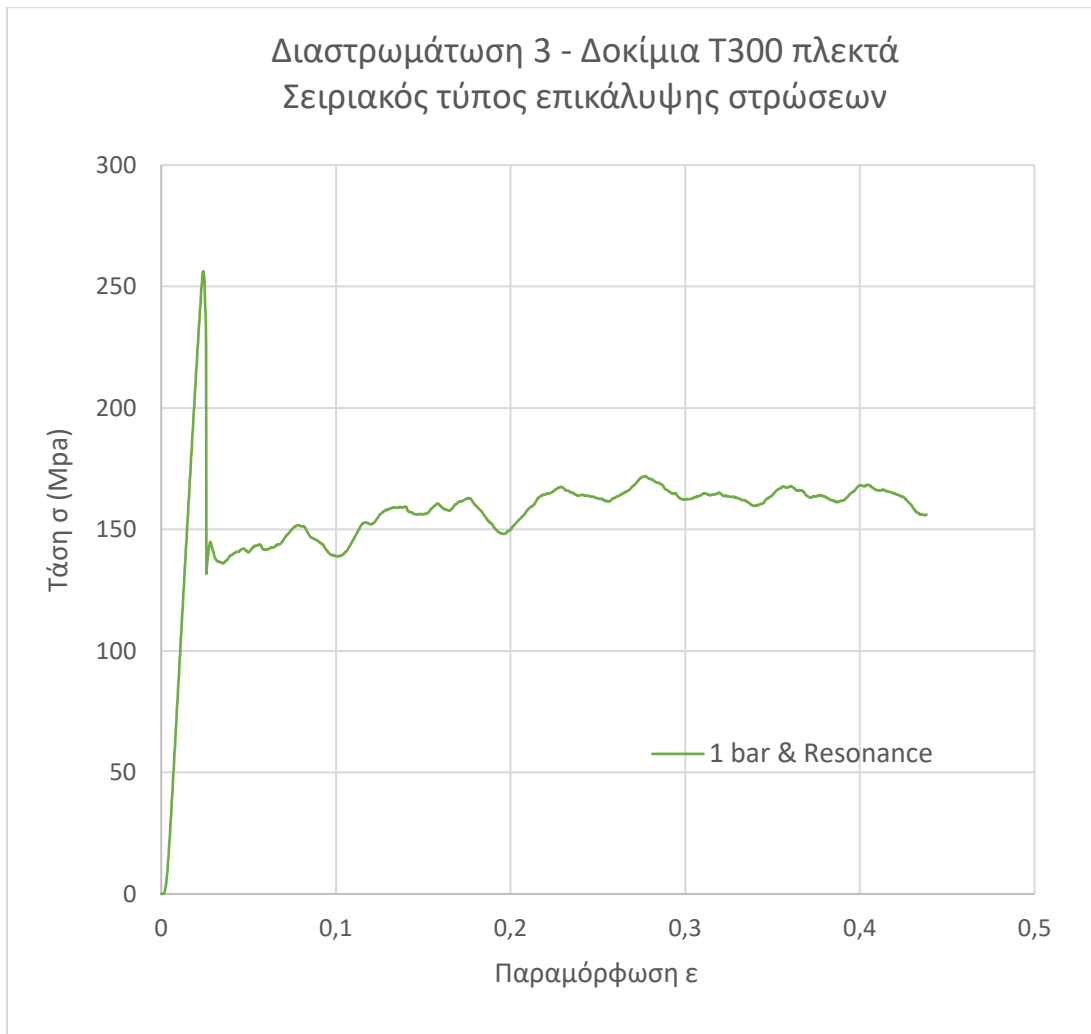


Στο
ενδιάμεσο
της
περιοχής
κατάρρευ-
σης



Τέλος της
θλίψης





Θ-8.38: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων T300W, με τον κύκλο πολυμερισμού 4 και σειριακό τύπο επικάλυψης.

Πίνακας 8.5: Ποσοστό Πορώδους & Μηχανικές Ιδιότητες

Κύκλος Πολυμερισμού	Τύπος Διαστρωμάτωσης – Τύπος επικάλυψης στρώσεων	Πάχος σωλήνα στο σημείο της επικάλυψης των στρώσεων (mm)	Μέσο ποσοστό πορώδους στην επιφάνεια της εγκάρσιας τομής των κυλίνδρων (%)	Ποσοστό πορώδους στην επιφάνεια της αξονικής τομής (%)	Αντοχή σε θλίψη (Mpa)	E (Gpa)
1	1-1	1.6	1,5569 ± 0,9247	0,13336	-	-
	1-2	1.5	2,3477 ± 0,3334	0,31527	215,147	14,357
	2-1	2.2	0,6768 ± 0,1952	0,12297	282,797	14,213
	2-2	1.9	0,2727 ± 0,0159	0,11506	342,170	16,074
	3-1	2.9	0,2508 ± 0,1767	0,55788	265,566	12,048
	3-2	2.4	0,6190 ± 0,0443	0,47098	347,700	12,145
2	1-1	1.3	0,7062 ± 0,2927	0,11858	203,049	13,446
	1-2	1.3	1,0805 ± 0,0055	0,25504	190,959	19,810
	2-1	2.1	0,4031 ± 0,0232	0,09650	266,492	14,497
	2-2	2.0	0,5552 ± 0,0986	0,08450	249,654	14,436
	3-1	2.2	0,3432 ± 0,2311	0,58460	339,403	12,752
	3-2	2.6	0,4310 ± 0,0661	0,49103	292,738	11,436
3	1-1	1.3	0,4029 ± 0,2067	0,88033	227,449	19,255
	1-2	1.5	0,2595 ± 0,1115	0,44523	243,180	19,480
	2-1	1.9	0,1743 ± 0,0607	0,16355	230,560	15,877
	2-2	2.3	0,1267 ± 0,0055	0,29381	279,993	14,976
	3-1	2.9	0,2448 ± 0,0450	0,20308	297,980	10,574
	3-2	2.4	0,0895 ± 0,0164	0,15660	308,320	12,845
4	1-1	1.5	0,0667 ± 0,0308	0,44845	231,565	21,740
	1-2	1.3	0,1301 ± 0,0646	0,35498	183,374	20,991
	2-1	2.1	0,3049 ± 0,0793	0,13199	214,064	12,227
	2-2	1.9	0,7155 ± 0,2289	0,26144	268,562	14,252
	3-1	2.6	0,2641 ± 0,0970	0,18679	299,728	13,309
	3-2	2.6	0,3123 ± 0,0843	0,18622	256,276	12,799

8.4 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι σε γενικές γραμμές ήταν αναμενόμενο. Τα δοκίμια τα οποία περιείχαν μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους εμφάνισαν μειωμένες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με εκείνα που περιείχαν μικρότερο ποσοστό πορώδους στον ίδιο κύκλο πολυμερισμού.

Όλα τα δοκίμια εμφάνισαν τύπο κατάρρευσης μορφής μανιταριού. Μετά το πρώτο γραμμικό τμήμα της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης, όπου προσδιορίστηκε το μέτρο ελαστικότητας [E (Gra)] του δοκιμίου, τα δοκίμια εισήλθαν στην περιοχή μόνιμης παραμόρφωσης, όπου πλέον μπορούν να αναλάβουν ένα σχετικά σταθερό θλιπτικό φορτίο μέχρι το τέλος της συμπίεσης τους, το οποίο τέθηκε σε 15mm κατακόρυφη μετατόπιση της πλάκας της μηχανής θλίψης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Συγκρίνοντας τους διαφορετικούς κύκλους πολυμερισμού μεταξύ τους, σχετικά με την ικανότητά τους να παράγουν κατασκευές με αυξημένες μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε θλίψη και μέτρο ελαστικότητας), μπορούμε να πούμε ότι η χρήση υψηλής πίεσης στο εσωτερικό του καλουπιού, όπως και ο κύκλος πολυμερισμού με την επιβολή μηχανικών δονήσεων για μεγάλη χρονική διάρκεια (30h), έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα όταν κατασκευάζονται κυλινδρικά δοκίμια με υλικά μικτής διαστρωμάτωσης (τύπος 2&3), το οποίο άλλωστε είναι και το σύνηθες στις περισσότερες εμπορικές κατασκευές. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι σε αυτούς τους δύο κύκλους πολυμερισμού ο αέρας που εγκλωβίστηκε, είτε μέσα στην ρητίνη είτε κατά την διαδικασία της διαστρωμάτωσης, έχει σε μεγάλο βαθμό εγκαταλείψει την κατασκευή κατά την διάρκεια του κύκλου πολυμερισμού της. Κατά τον κύκλο πολυμερισμού των 7 bar αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της αυξημένης πίεσης στο εσωτερικό του καλουπιού, το οποίο προσομοιώνει τη χρήση αυτόκλειστου (autoclave), ενώ κατά την επιβολή δονήσεων για μεγάλη χρονική διάρκεια ο αέρας έχει αρκετό χρόνο να εγκαταλείψει την κατασκευή υποβοηθούμενος από το συντονισμό του καλουπιού, αφότου η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης έχει επιτευχθεί στο εσωτερικό του καλουπιού.

Ένα ακόμα στοιχείο που δείχνει την επίδραση του συντονισμού κατά το κύκλο πολυμερισμού είναι ότι, τόσο στη μακρά όσο και στη σύντομη χρονική διάρκεια επιβολής δονήσεων, προσδιορίστηκε το ελάχιστο ποσοστό πορώδους στην επιφάνεια της διατομής των κυλίνδρων.

Όταν συγκρίνουμε τους δύο τύπους επικάλυψης στρώσεων σχετικά με την επίδραση που έχουν στην αντοχή θλίψης των δοκιμίων, παρατηρούμε ότι ο σειριακός τύπος επικάλυψης στρώσεων (τύπος 2) δίνει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με το διαδοχικό τύπο (τύπος 1) στον κύκλο πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας με την παράλληλη επιβολή μηχανικών δονήσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου, όπως φαίνεται στο Πίνακα 8.5. Είναι επίσης εμφανές από τον

πίνακα ότι ο σειριακός τύπος επικάλυψης στρώσεων παράγει κατασκευές με το μεγαλύτερο μέσο καταστροφικό φορτίο στις περισσότερες των περιπτώσεων. Ο διαδοχικός τύπος επικάλυψης στρώσεων (τύπος 1) φαίνεται να υπερτερεί στον κύκλο πολυμερισμού σύντομης χρονικής διάρκειας, όπου δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για το αέρα που έχει παγιδευτεί στο σειριακό τύπο επικάλυψης στρώσεων να εγκαταλείψει την κατασκευή υπό αυτές τις συνθήκες.

Το ποσοστό του πορώδους στη διατομή των δοκιμών που κατασκευάστηκαν με την χρήση του σειριακού τύπου επικάλυψης των στρώσεων είναι ελάχιστο όταν χρησιμοποιείται ο κύκλος πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας με την επιβολή συντονισμού καθ' όλη τη διάρκειά του. Ο σειριακός τύπος επικάλυψης στρώσεων εμφανίζει, επίσης, το ελάχιστο ποσοστό πορώδους και στην αξονική τομή των δοκιμών στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Ενδιαφέρον, εδώ, παρουσιάζει το γεγονός ότι το πάχος των δοκιμών στο σημείο της επικάλυψης των στρώσεων στο διαδοχικό τύπο επικάλυψης (τύπος 1) ήταν - στις περισσότερες περιπτώσεις - μεγαλύτερο από το αντίστοιχο πάχος του σειριακού συνδέσμου (τύπος 2). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει τον αυξημένο αριθμό κενών και φυσαλίδων αέρα παγιδευμένων στην περιοχή του διαδοχικού συνδέσμου, το οποίο είναι ένας επιπλέον λόγος για τις μειωμένες μηχανικές ιδιότητες του συνδέσμου.

Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει από το πείραμα είναι ότι η χρήση του κύκλου πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας με την επιβολή συντονισμού στο καλούπι μέσω της χρήσης δονητή, σε συνδυασμό με τη χρήση σειριακού τύπου επικάλυψης στρώσεων, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή κατασκευών με βελτιωμένα χαρακτηριστικά όσον αναφορά στη μείωση του ποσοστού του πορώδους τους και στην παράλληλη αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής, όταν αυτή αποτελείται από διαφορετικά υλικά διαστρωμάτωσης. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων δίνεται ο παρακάτω πίνακας.

Πίνακας 8.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων

Ποιος τύπος επικάλυψης στρώσεων έχει την υψηλότερη αντοχή σε θλίψη ;			
Κύκλος Πολυμερισμού	Διαστρωμάτωση 1	Διαστρωμάτωση 2	Διαστρωμάτωση 3
1	-	2	2
2	1	1	1
3	2	2	2
4	1	2	1
Ποιος τύπος επικάλυψης στρώσεων έχει το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας E (Gra);			

Κύκλος Πολυμερισμού	Διαστρωμάτωση 1	Διαστρωμάτωση 2	Διαστρωμάτωση 3
1	-	2	2
2	2	1	1
3	2	1	2
4	1	2	1
Ποιος τύπος επικάλυψης στρώσεων έχει το μεγαλύτερο μέσο φορτίο κατάρρευσης;			
Κύκλος Πολυμερισμού	Διαστρωμάτωση 1	Διαστρωμάτωση 2	Διαστρωμάτωση 3
1	-	2	2
2	1	2	1
3	1	2	2
4	2	2	2
Ποιος τύπος επικάλυψης στρώσεων έχει το μικρότερο ποσοστό πορώδους στην επιφάνεια της εγκάρσιας τομής των κυλίνδρων ;			
Κύκλος Πολυμερισμού	Διαστρωμάτωση 1	Διαστρωμάτωση 2	Διαστρωμάτωση 3
1	1	2	1
2	1	1	1
3	2	2	2
4	1	1	1
Ποιος τύπος επικάλυψης στρώσεων έχει το μικρότερο ποσοστό πορώδους στην επιφάνεια της αξονικής τομής ;			
Κύκλος Πολυμερισμού	Διαστρωμάτωση 1	Διαστρωμάτωση 2	Διαστρωμάτωση 3
1	1	2	2
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	1	2
Ποιος κύκλος πολυμερισμού έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ελάχιστου ποσοστού πορώδους στην επιφάνεια της εγκάρσιας τομής των κυλίνδρων ;			
Τύπος επικάλυψης στρώσεων	Διαστρωμάτωση 1	Διαστρωμάτωση 2	Διαστρωμάτωση 3
1	4	3	3
2	4	3	3

8.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε το αποτέλεσμα της επιβολής συντονισμού κατά τον κύκλο πολυμερισμού παραγωγής σωλήνων ενισχυμένων με ίνες άνθρακα. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν κάνοντας χρήση τεσσάρων διαφορετικών κύκλων πολυμερισμού και με δύο διαφορετικούς τύπους επικάλυψης στρώσεων, το σειριακό και το διαδοχικό τύπο. Ερευνήθηκε η επίδραση που έχουν αυτές οι παράμετροι στις μηχανικές ιδιότητες των κυλινδρικών δοκιμίων ενισχυμένων με ίνες άνθρακα, όπως και στο ποσοστό του πορώδους στην επιφάνεια δύο διαφορετικών διατομών των δοκιμίων.

Τα παρακάτω συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν από το πείραμα:

- Η χρήση του κύκλου πολυμερισμού μακράς χρονικής διάρκειας με την επιβολή συντονισμού στο καλούπι που περιέχει τον προς κατασκευή σωλήνα μπορεί να επιφέρει αυξημένες μηχανικές ιδιότητες στην τελική κατασκευή με ελάχιστο ποσοστό πορώδους, όταν αυτό συνδυάζεται επίσης με τη χρήση σειριακού τύπου επικάλυψης στρώσεων.
- Αυτά τα συμπεράσματα ισχύουν επίσης και για τον κύκλο πολυμερισμού των 7 bar χωρίς την επιβολή συντονισμού.

Κατά συνέπεια, οι δύο αυτοί κύκλοι πολυμερισμού προτείνονται για την κατασκευή εξαρτημάτων που υπόκεινται σε υψηλές τάσεις κατά την λειτουργία τους, όπως επίσης και σε περιπτώσεις που απαιτείται μειωμένο ποσοστό πορώδους της κατασκευής και μικρή συνολική παραμόρφωση κατασκευής .

Επιπλέον:

- Ο σειριακός τύπος επικάλυψης στρώσεων παράγει εξαρτήματα με αυξημένες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με το διαδοχικό τύπο επικάλυψης στρώσεων.
- Ο διαδοχικός τύπος επικάλυψης στρώσεων είναι ευκολότερος στην κατασκευή συγκριτικά με το σειριακό και είναι η προτεινόμενη λύση σε σύνθετες γεωμετρικά κατασκευές.

Η επιβολή συντονισμού κατά τον κύκλο πολυμερισμού παραγωγής σωλήνων ενισχυμένων με ίνες άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή κατασκευών με μειωμένο ποσοστό πορώδους, αλλά η παραμονή του καλουπιού στο εσωτερικό του φούρνου για μεγάλη χρονική διάρκεια, αφότου έχει επιτευχθεί η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης στο εσωτερικό του καλουπιού, κρίνεται απαραίτητη προκειμένου ο αέρας που έχει παγιδευτεί, είτε ανάμεσα στις στρώσεις κατά τη διαδικασία της διαστρωμάτωσης είτε μέσα στη ρητίνη, να εγκαταλείψει έγκαιρα τη δομή της κατασκευής.

Μελλοντική εργασία πάνω σε αυτό το θέμα προτείνεται η μελέτη διαφορετικών κύκλων πολυμερισμού στην παραγωγή κυλινδρικών δοκιμών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα, όπως επίσης και ο έλεγχος των δοκιμών αυτών σε πείραμα κόπωσης.

8.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

[8.1] S.S. Tavares, V. Michaud, J.A.E. Manson, Through thickness air permeability of prepregs during cure, *Compos. Part A* 40 (2009) 1587–1596.

[8.2] K. Jackson, M. Crabtree, Autoclave quality composites tooling for composite from vacuum bag only processing. In: 47th International SAMPE symposium; 2002, 800–807.

[8.3] J.L. Kardos, M.P. Dudukovic, R. Dave, Void growth and resin transport during processing of thermosetting-matrix composites, *Adv Polym Sci* 80 (1986) 102–123.

[8.4] L.K. Grunenfelder, S.R. Nutt, Void formation in composite prepregs - Effect of dissolved moisture, *Compos Sci Technol* 70 (2010) 2304–2309.

[8.5] F.Y.C. Boey, S.W. Lye, Void reduction in autoclave processing of thermoset composites - Part 1: High pressure effects on void reduction, *Composites* 23 (4) (1992) 261-265.

[8.6] A.E. Scott, I. Sinclair, S.M. Spearing, M.N. Mavrogordato, W. Hepples, Influence of voids on damage mechanisms in carbon/epoxy composites determined via high resolution computed tomography, *Compos Sci Technol* 90 (2014) 147-153

[8.7] J. Muric-Nesic, P. Compston, Z.H. Stachurski, On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fiber reinforced polymer composites, *Compos. Part A* 42 (3) (2011) 320-327

[8.8] P. Olivier, J.P. Cottu, B. Ferret, Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates, *Composites* 26 (1995) 509-515

[8.9] S.R. Ghiorse, Effect of void content on the mechanical properties of carbon/epoxy laminates. *SAMPE Quart* 24 (1992) 54-59

[8.10] H. Zhu, B. Wu, D. Li, D. Zhang, Y. Chen, Influence of voids on the tensile performance of carbon/epoxy fabric laminates, *J Mater Sci Technol* 27 (2011) 69–73.

[8.11] A. Chambers, J. Earl, C. Squires, M. Suhot, The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications, *Int J Fatigue* 28 (2006) 1389-1398

- [8.12] N.C.W Judd, W.W. Wright, Voids and their effects on the mechanical properties of composites – an appraisal. *SAMPE J* 10 (1978) 10-14
- [8.13] L. Liu, B. Zhang, Z. Wu, D. Wang, Effects of cure pressure induced voids on the mechanical strength of carbon/epoxy laminates, *J Mater Sci Technol* 21 (1) (2005) 87–91
- [8.14] H. Huang, R. Talreja, Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites, *Compos Sci Technol* 65 (2005) 1964-1981
- [8.15] J. Tang, W.I. Lee, G.S. Springer, Effects of cure pressure on resin flow, voids, and mechanical properties, *J Compos Mater* 21 (1987) 421-440
- [8.16] M.L. Costa, S.F.M. Almeida, M.C. Rezende, The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates, *Compos Sci Technol* 61 (2001) 2101–2108
- [8.17] L. Liu, B.M. Zhang, D.F. Wang, Z.J. Wu, Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Compos Struct* 73 (3) (2006) 303-309
- [8.18] K. Kocatepe, Effect of low frequency vibration on porosity of LM25 and LM6 alloys, *Mater Des* 28(6) (2007) 1767–1775
- [8.19] C. Nightingale, R. Day, Flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fibre/epoxy composites cured thermally and with microwave radiation, *Compos Part A* 33 (2002) 1021-1030
- [8.20] L.W. Davies, R.J. Day, D. Bond, A. Nesbitt, J. Ellis, E. Gardon, Effect of cure cycle heat transfer rates on the physical and mechanical properties of an epoxy matrix composite, *Compos Sci Technol* 67 (2007) 1892–1899
- [8.21] S. Hernandez, F. Sket, J.M. Molina-Aldareguva, C. Gonzalez, J. LLorca, Effect of curing cycle on void distribution and interlaminar shear strength in polymer–matrix composites, *Compos Sci Technol* 71 (2011) 1331-1341
- [8.22] S.L. Agius, K.J.C. Magniez, B.L. Fox, Cure behaviour and void development within rapidly cured out-of-autoclave composites, *Compos Part B* 47 (2013) 230-237
- [8.23] W.R. Stabler, G.B. Tatterson, R.L. Sadler, A.H. El-Shiekh, Void minimization in the manufacturing of carbon fiber composites by RTM, *SAMPE Q* 23 (2) (1992) 38–42
- [8.24] J. Muric-Nesic, P. Compston, N. Noble, Z.H. Stachurski, Effect of low frequency vibrations on void content in composite materials, *Compos Part A* 40 (4) (2009) 548–551

[8.25] J. Muric-Nesic, P. Compston, Z.H. Stachurski, On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fibre reinforced polymer composites, Compos Part A 42 (2011) 320-327

[8.26] S.R. Ghiorse, R.M. Jurta, Effects of low frequency vibration processing on carbon/epoxy laminates, Composites 22 (1) (1991) 3–8

[8.27] ASTM D2734-09: Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics

[8.28] EN ISO 527-5:2014: Plastics - Determination of tensile properties of plastics - Part 5: Test condition for unidirectional fiber reinforced plastic composites.

[8.29] S. Hernández , F. Sket , C. González, J. LLorca, Optimization of curing cycle in carbon fiber-reinforced laminates: Void distribution and mechanical properties, Compos Sci Technol 85 (2013) 73-82

[8.30] ASTM D695-02a: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics¹

Κεφάλαιο 9 Η επίδραση του τύπου επικάλυψης στρώσεων στις μηχανικές ιδιότητες κατασκευών ενισχυμένων με σύνθετα υλικά

9.1 Εισαγωγή

Ιδανικά, όταν σχεδιάζονται κατασκευές ενισχυμένες με ίνες άνθρακα στις οποίες η μέγιστη αντοχή της κατασκευής είναι ένας βασικός παράγοντας σχεδιασμού, είναι πάντα επιθυμητό η τελική κατασκευή να αποτελείται από συνεχόμενες ίνες άνθρακα. Όμως, στις περισσότερες των περιπτώσεων, αυτό δεν είναι εφικτό λόγω κατασκευαστικών περιορισμών και περιορισμών κόστους. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται σύνδεσμοι που λειτουργούν ως δίοδοι μεταφοράς φορτίων μεταξύ των διαφόρων εξαρτημάτων της κατασκευής. Η βελτίωση της αντοχής αυτών των συνδέσμων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων ολόκληρης της κατασκευής.

Ειδικά για τους συνδέσμους που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές από σύνθετα υλικά υπάρχουν δύο κατηγορίες συνδέσμων, οι μηχανικοί σύνδεσμοι και οι σύνδεσμοι που βασίζονται στη δύναμη της συνάφειας μεταξύ των συνδεόμενων εξαρτημάτων (adhesive joints). Ο μηχανικός σύνδεσμος μπορεί να αποσυναρμολογηθεί, να επιθεωρηθεί και να επιδιορθωθεί όταν χρειάζεται, αλλά οι σπές του συνδέσμου αναπτύσσουν περιοχές με υψηλές τάσεις, αυξάνοντας την πιθανότητα για την εμφάνιση ρωγμών στη μήτρα της κατασκευής καθώς και την πιθανότητα για το διαχωρισμό/αποκόλληση των στρώσεων της κατασκευής.

Οι σύνδεσμοι που βασίζονται στη δύναμη της συνάφειας για τη μεταφορά φορτίων μεταξύ των συνδεόμενων εξαρτημάτων δεν εμφανίζουν τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι μηχανικοί σύνδεσμοι, καθώς η μεταφορά φορτίου μεταξύ των εξαρτημάτων γίνεται πιο ομοιόμορφα. Ωστόσο, οι σύνδεσμοι αυτοί είναι ευαίσθητοι σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, και είναι επιρρεπείς σε κατασκευαστικά ελαττώματα, τα οποία επηρεάζουν την ποιότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του συνδέσμου. Συνεπώς, έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα για τη διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των συνδέσμων από σύνθετα υλικά. [9.1 – 9.7]

Ένας συνήθως χρησιμοποιούμενος σύνδεσμος που βασίζεται στη δύναμη της συνάφειας για τη μεταφορά φορτίων μεταξύ των συνδεόμενων εξαρτημάτων είναι ο σύνδεσμος single lap. Έχει διερευνηθεί η επίδραση διαφόρων εξαρτημάτων προς σύνδεση, συγκολλητικών ουσιών και μεθόδων συγκόλλησης στις μηχανικές ιδιότητες και το μηχανισμό αστοχίας του συνδέσμου single lap [9.8 – 9.12].

Μελετώντας το σύνδεσμο single lap, ο Kairouz και ο Matthews [9.13] διαπίστωσαν ότι το φορτίο αστοχίας αυξάνεται με αύξηση της αναλογίας του μήκους επικάλυψης προς το πάχος των εξαρτημάτων που συνδέονται.

Ο Song [9.14] διερεύνησε την επίδραση τεσσάρων μεθόδων κατασκευής στη διατμητική αντοχή του συνδέσμου single lap σε κατασκευές από σύνθετα υλικά. Διαπίστωσε ότι το φορτίο αστοχίας ήταν υψηλότερο στους παχύτερους συνδέσμους και μικρότερο στα δοκίμια με μεγαλύτερο μήκος επικάλυψης. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι η χρήση της κατασκευαστικής μεθόδου συμπολυμερισμού του συνδέσμου με την κατασκευή (co-cured) χωρίς τη χρήση επιπλέον συγκολλητικής ουσίας μπορεί να παράγει συνδέσμους με υψηλότερη ή παρόμοια αντοχή σε σχέση με τις άλλες μεθόδους κατασκευής που ερεύνησαν.

Οι σύνδεσμοι που κατασκευάζονται με τη μέθοδο του συμπολυμερισμού έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κοινούς συνδέσμους που βασίζονται στη δύναμη της συνάφειας για τη μεταφορά φορτίων μεταξύ των συνδεόμενων εξαρτημάτων. Δεν απαιτούν επιπλέον συγκολλητική ουσία ούτε επιφανειακή επεξεργασία του σύνθετου υλικού και χρησιμοποιούν περίσσεια ρητίνης για τη σύνδεση των δύο μερών. Σε ένα τυπικό τέτοιο σύνδεσμο οι στρώσεις από ένα τμήμα της κατασκευής επικαλύπτουν τις στρώσεις του παρακείμενου τμήματος για να δημιουργήσουν το σύνδεσμο όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία πολυμερισμού της κατασκευής. Μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη δημιουργία συνδέσμων συμπολυμερισμού διαφόρων τύπων είναι η τοποθέτηση των στρώσεων με την προσαρμογή της θέσης τους σε σχέση με τα παρακείμενα στρώματα. Ο Lee [9.15] μελέτησε τις στατικές και δυναμικές δυνατότητες ανάληψης ροπής των συνδέσμων που κατασκευάζονται με συμπολυμερισμό και τις συνέκρινε με τους συμβατικούς συνδέσμους που βασίζονται στη δύναμη της συνάφειας για τη μεταφορά φορτίων μεταξύ των συνδεόμενων εξαρτημάτων. Πολλοί άλλοι ερευνητές [9.16 – 9.21] έχουν επίσης διερευνήσει διάφορες μεθόδους για την πρόβλεψη των φορτίων αστοχίας των συνδέσμων single lap.

Παρόλο που ο σύνδεσμος single lap αντιπροσωπεύει την απλούστερη γενική περίπτωση, έχουν προταθεί εναλλακτικοί τύποι συνδέσμων για την αντιμετώπιση του φαινομένου συγκέντρωσης τάσεων που παρατηρείται στις δύο άκρες του συνδέσμου single lap. Έχουν μελετηθεί και προταθεί για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος οι σύνδεσμοι Double lap, step lap καθώς και διάφοροι σύνδεσμοι συμπολυμερισμού [9.22 – 9.36]. Παρόμοιες μέθοδοι σύνδεσης ερευνήθηκαν για την αποτελεσματική μεταφορά φορτίων από υβριδικό εξάρτημα ενισχυμένο με ίνες άνθρακα και τιτάνιο σε εξάρτημα ενισχυμένο με ίνες άνθρακα [9.37 – 9.39].

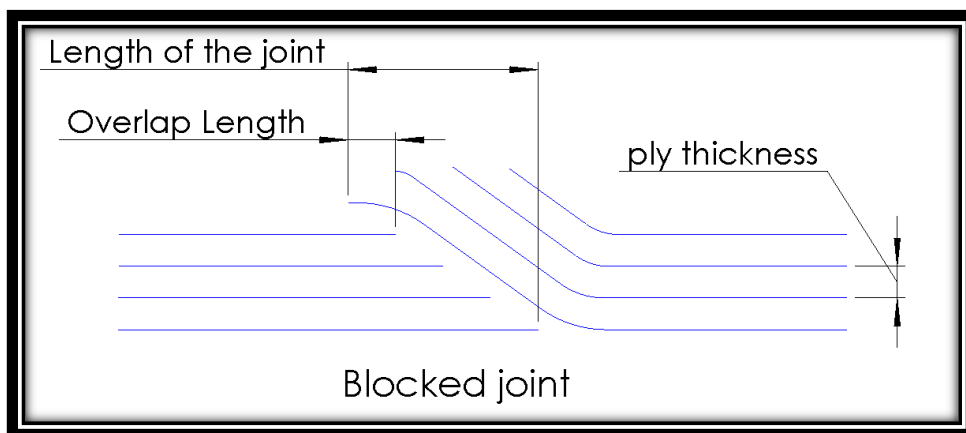
Η παρούσα μελέτη διερευνά το σύνδεσμο step lap που κατασκευάζεται με συμπολυμερισμό και μία υβριδική εκδοχή του με την ονομασία blocked. Δεδομένου ότι ο μηχανισμός αστοχίας και οι μηχανικές ιδιότητες του συνδέσμου επηρεάζονται εκτός από τη διαμόρφωση του και από το μήκος του, σε αυτή τη μελέτη γίνεται

συσχέτιση μεταξύ του πάχους κάθε στρώματος με το μήκος επικάλυψης κάθε στρώσης.

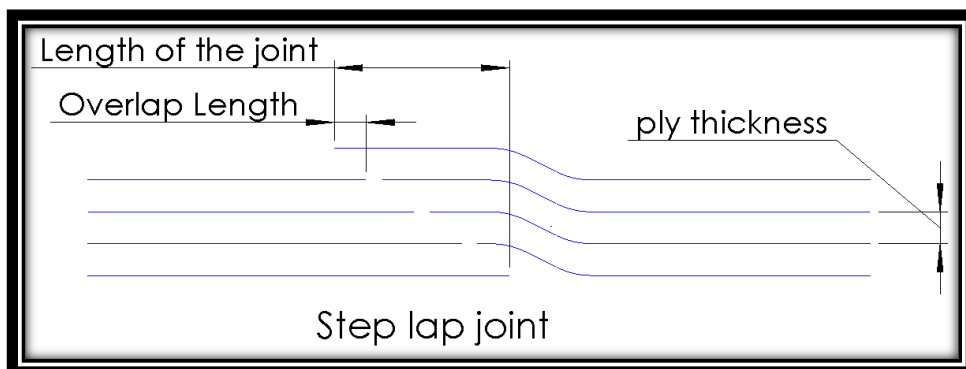
9.2 Πειραματική διαδικασία

9.2.1 Σκοπός του πειράματος

Ο σκοπός του πειράματος που πραγματοποιήθηκε ήταν ο προσδιορισμός της αντοχής σε κάμψη του σειριακού και του διαδοχικού τύπου επικάλυψης στρώσεων, με μεταβλητή το μήκος του συνδέσμου, και η συσχέτιση – σύγκριση με την αντοχή σε κάμψη των δοκιμών χωρίς επικάλυψη ινών (κατασκευασμένα με συνεχόμενες ίνες) για χρήση στην πιστοποίηση κώδικα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Ένας επιπλέον στόχος του πειράματος ήταν ο προσδιορισμός του μηχανισμού κατάρρευσης των δύο τύπων επικάλυψης στρώσεων. Η γεωμετρία του κάθε συνδέσμου φαίνεται στις Εικόνες Θ-9.1 και Θ-9.2.



Θ-9.1: Ο διαδοχικός τύπος επικάλυψης στρώσεων.



Θ-9.2: Ο σειριακός τύπος επικάλυψης στρώσεων.

9.2.2 Πειραματικά υλικά

Όλα τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από προεμποτισμένες ίνες άνθρακα σύμφωνα με τη διαστρωμάτωση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.1.

Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σωλήνων ήταν T300 πλεκτές (0°-90°) και μονοδιευθυντικές T700 και οι δύο τύποι ίνας κατασκευασμένες από την εταιρεία Torayca. Το φύλλο με τις προεμποτισμένες μονοδιευθυντικές ίνες T700 εμπεριέχει 36% κατά βάρος σε ρητίνη, ενώ το πλεκτό φύλλο T300 43% κατά βάρος σε ρητίνη. Το αρχικό ποσοστό πορώδους και φυσαλίδων αέρα στα προεμποτισμένα φύλλα άνθρακα ήταν κάτω από 1%. Το πάχος του πλεκτού φύλλου T300 μετρήθηκε σε 0.35 mm ενώ του μονοδιευθυντικού T700 σε 0.17 mm. Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η VTC401 από την εταιρεία SHD Composites. Το μέτρο ελαστικότητας της VTC401 μήτρας προσδιορίστηκε σε 7.56 GPa, ενώ η αντοχή της σε εφελκυσμό σε 29.6 MPa με την εκτέλεση ενός πειράματος εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ISO 527-5 [9.40].

Πίνακας 9.1: Η διαστρωμάτωση των δοκιμών

T300 Woven 0-90
T700 UD 0
T300 Woven ±45
T700 UD 0
T300 Woven 0-90
T700 UD 0
T300 Woven ±45
T700 UD 0

9.2.3 Εξοπλισμός και η πειραματική διαδικασία

Ο πειραματικός εξοπλισμός περιελάμβανε μια μηχανή Instron 4482, ελεγχόμενη μέσω υπολογιστή από κατάλληλο software, ένα φούρνο σχεδιασμένο από την Gram Carbon, μια αντλία κενού συνδεδεμένη με σωληνάκια υψηλής πίεσης, μια αλουμινένια πλάκα για τη διαστρωμάτωση των δοκιμών και ένα σετ από

θερμοστοιχεία για τη λήψη των δεδομένων της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του κύκλου πολυμερισμού της κατασκευής των δοκιμών.

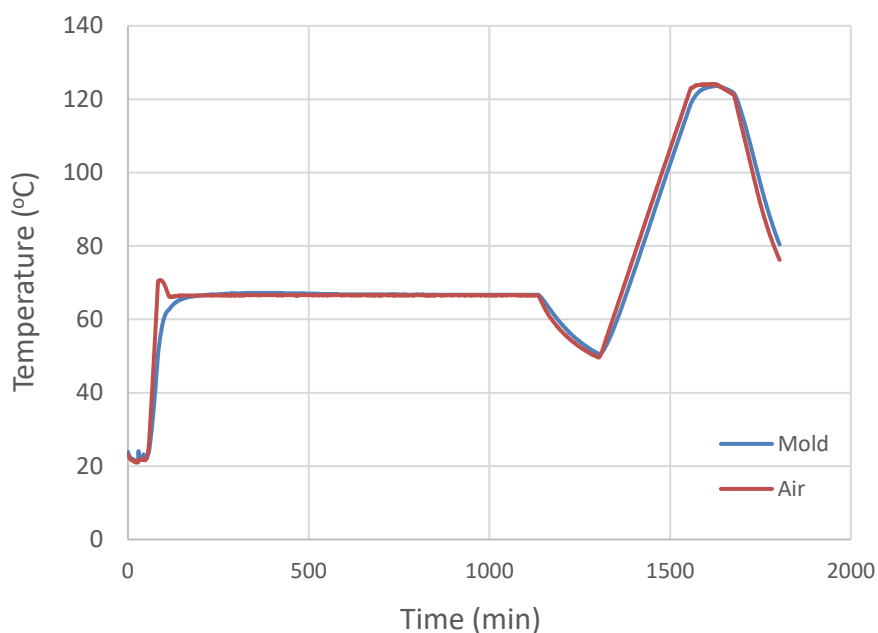
Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν μέσω χειρωνακτικής διαστρωμάτωσης δημιουργώντας τη στοίβα των υλικών στην επιφάνεια επίπεδης αλουμινένιας πλάκας. Για κάθε τύπο επικάλυψης στρώσεων κατασκευάστηκαν τέσσερις ομάδες δοκιμών. Κάθε ομάδα χαρακτηριζόταν από διαφορετικό μήκος του συνδέσμου επικάλυψης στρώσεων. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν 1mm, 10 φορές το πάχος κάθε στρώσης, 15 φορές και 20 φορές το πάχος κάθε στρώσης μετατόπιση της στρώσης σχετικά με την προηγούμενή της στρώση. Η ακρίβεια της γεωμετρίας του συνδέσμου εξασφαλίστηκε μέσω της χρήσης ενός χάρακα για τη μέτρηση της θέσης κάθε στρώσης κατά τη διαδικασία της διαστρωμάτωσης.

Είκοσι δοκίμια κατασκευάστηκαν στο σύνολο για κάθε τύπο επικάλυψης στρώσεων, πέντε για κάθε υποπερίπτωση. Ένας επιπλέον αριθμός πέντε δοκιμών κατασκευάστηκαν χωρίς επικάλυψη στρώσεων (με συνεχόμενες ίνες). Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες σε αυτό το κατασκευαστικό στάδιο μετρήθηκαν σε 21° Celsius και η σχετική υγρασία σε 52% RH.

Ο κύκλος πολυμερισμού των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο φούρνο με τη χρήση σακούλας κενού για τη δημιουργία της κατάλληλης κατανομής πίεσης στην επιφάνεια των δοκιμών για χρονική διάρκεια 30 ωρών. Η διαδικασία πολυμερισμού πραγματοποιήθηκε σε οκτώ στάδια, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2. Ο πραγματικός κύκλος πολυμερισμού που προέκυψε από τη χρήση των θερμοστοιχείων παρουσιάζεται στο Σχήμα Θ-9.3.

Πίνακας 9.2: Διαδικασία πολυμερισμού

Στάδιο	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (h)
1	25	0,05
2	75	0,30
3	67	1
4	67	18
5	35	20
6	125	25
7	122	27
8	40	30



Θ-9.3: Ο κύκλος πολυμερισμού

Μετά το τέλος της διαδικασίας πολυμερισμού των δοκιμών και την έξοδό τους από το φούρνο, τα δοκίμια κατεργάστηκαν στις τελικές τους διαστάσεις, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου ISO 14125 [9.41]. Έπειτα, οι διαστάσεις και τα βάρη των δοκιμών μετρήθηκαν με ακρίβεια με τη χρήση μίας ζυγαριάς υψηλής ακριβείας και ενός ψηφιακού παχύμετρου.

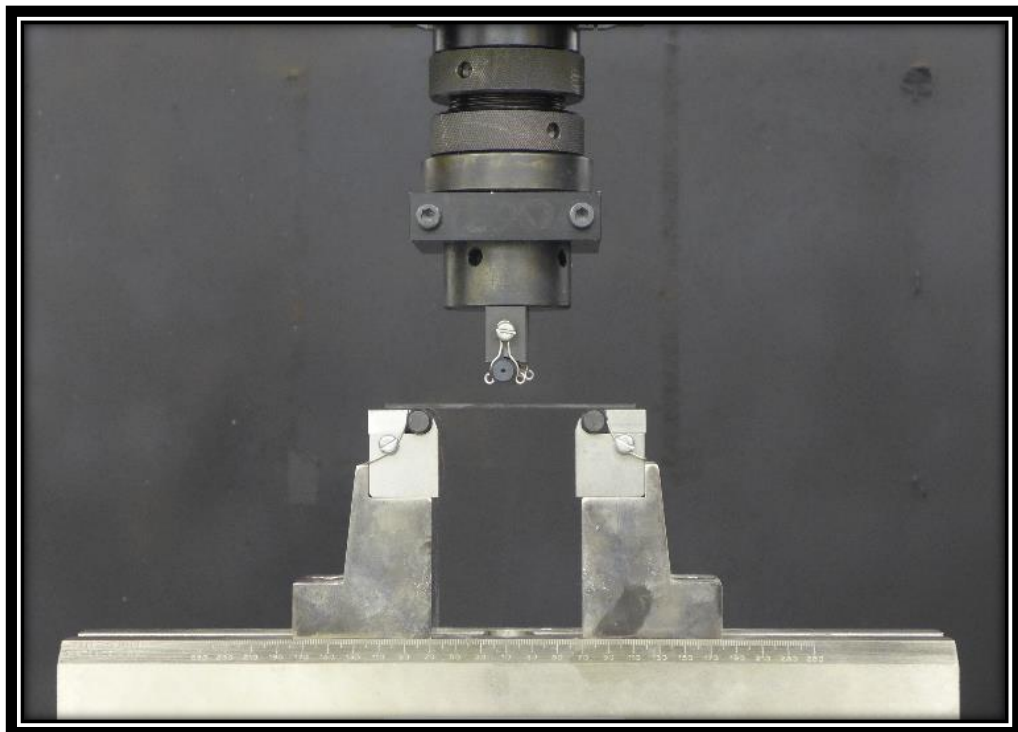
Σε κάθε ομάδα δοκιμών δόθηκε μία συγκεκριμένη κωδική ονομασία. Ο δείκτης 1 υποδηλώνει το σύνδεσμο *step lap*, ενώ ο δείκτης 2 το σύνδεσμο *blocked*. Το γράμμα A δόθηκε στα δοκίμια χωρίς επικάλυψη στρώσεων. Οι υπόλοιπες ομάδες δοκιμών ακολούθησαν την ονοματολογία που παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.3.

Πίνακας 9.3: Κωδική ονομασία των ομάδων

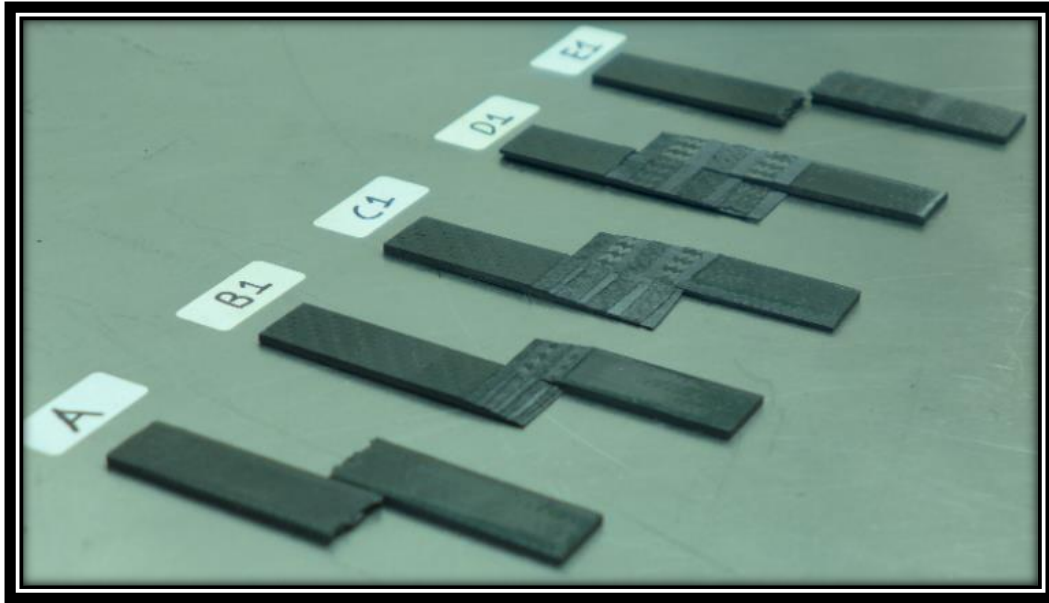
Τύπος επικάλυψης στρώσεων	Μήκος συνδέσμου			
	1 mm	10 x πάχος στρώσης	15 x πάχος στρώσης	20 x πάχος στρώσης
1	B1	C1	D1	E1
2	B2	C2	D2	E2

Έπειτα, όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πείραμα κάμψης τριών σημείων, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου ISO 14125 [9.41]. Η βάση της διάταξης του πειράματος κάμψης τριών σημείων ρυθμίστηκε σε απόσταση 70 mm, με σκοπό την καλύτερη τοποθέτηση των δοκιμίων κάτω από το κινούμενο μέρος της διάταξης. Η περιοχή του συνδέσμου της επικάλυψης των στρώσεων τοποθετήθηκε με προσοχή κάτω ακριβώς από το κέντρο του κινούμενου μέρους της διάταξης. Η καμπτική τάση και παραμόρφωση κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14125 [9.41].

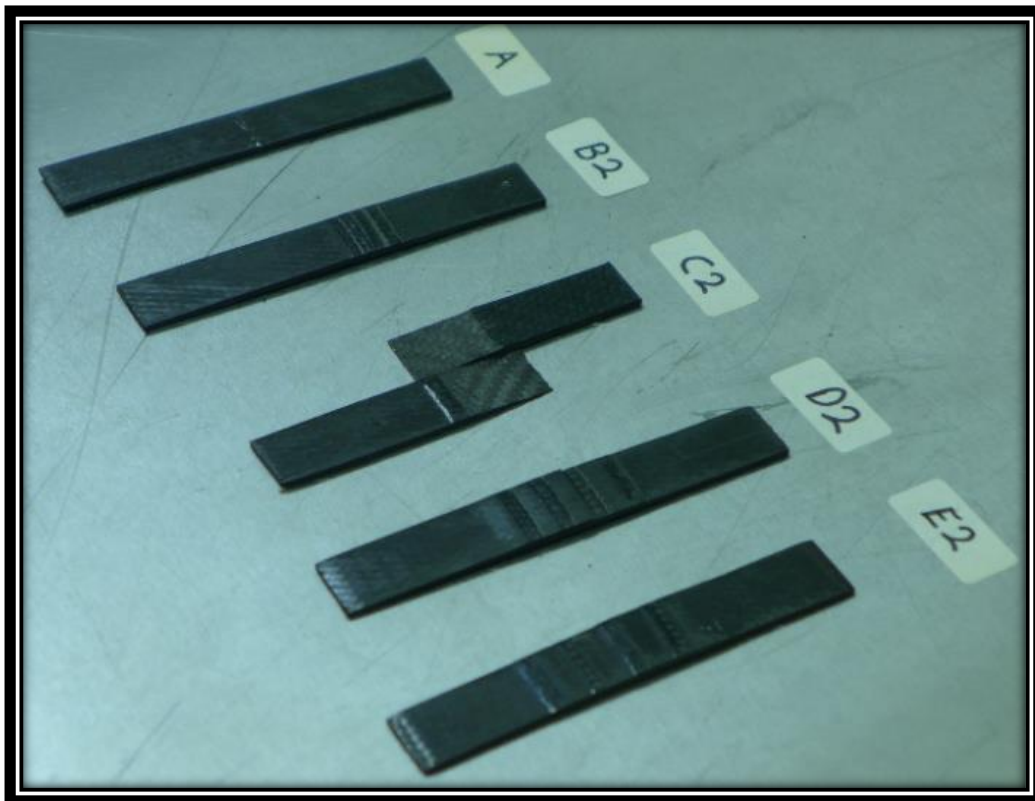
Τα δοκίμια τα οποία δεν συμφωνούσαν με τις προδιαγραφές του προτύπου ή αστόχησαν κατά μη αναμενόμενο τρόπο και σε μη αναμενόμενο σημείο απορρίφθηκαν από το πείραμα και δεν συμπεριλήφθηκαν στα αποτελέσματα του.



Θ-9.4: Το πείραμα κάμψης τριών σημείων.



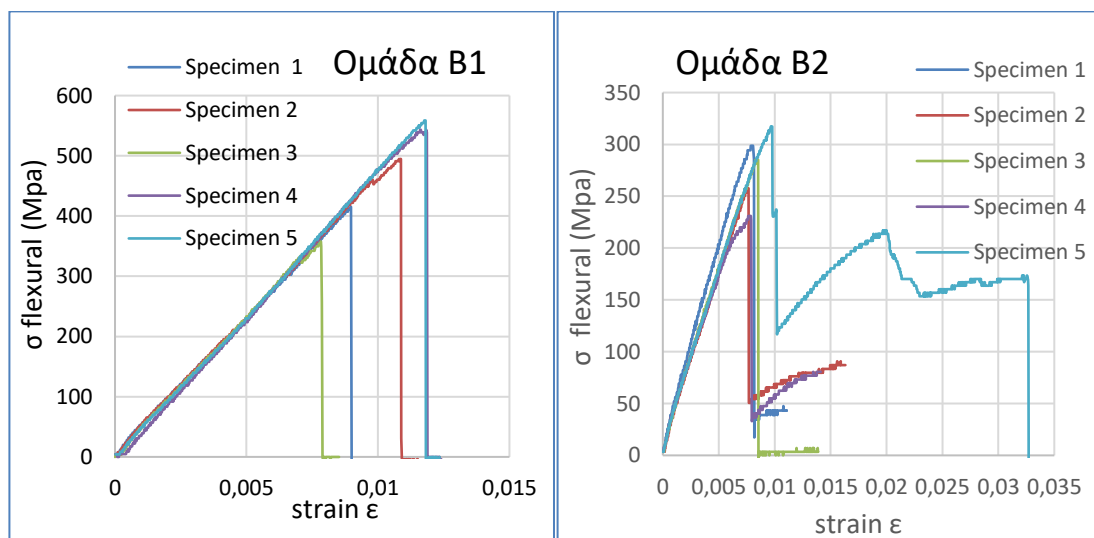
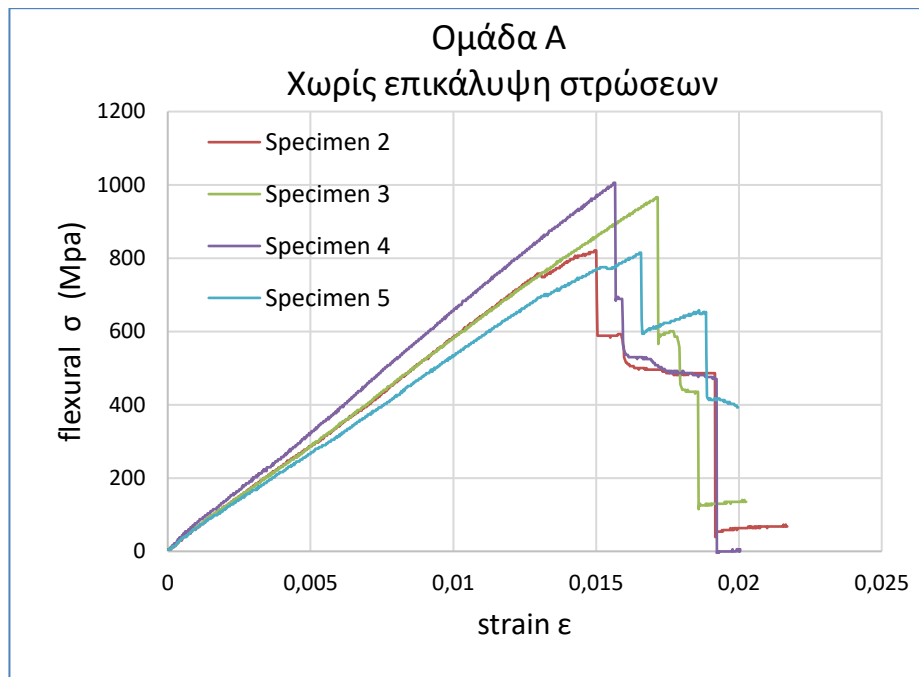
Θ-9.5: Δοκίμα συνδέσμου τύπου step lap.

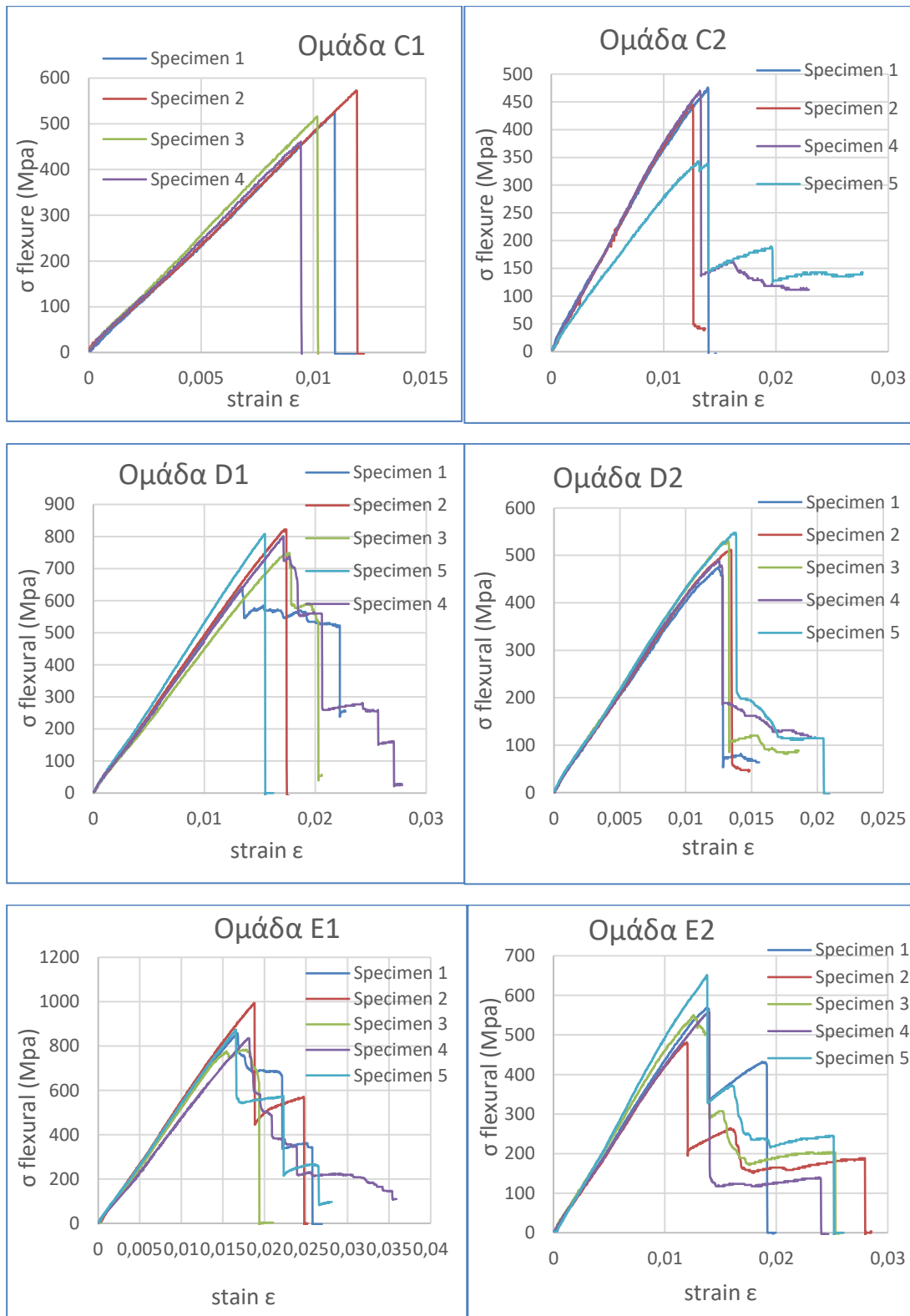


Θ-9.6: Δοκίμα συνδέσμου τύπου blocked.

9.3 Αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων, όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 9.7. Τα δοκίμια κατηγοριοποιήθηκαν με βάση τη γεωμετρία του τύπου επικάλυψης των στρώσεων, όπως επίσης και με το μήκος του συνδέσμου. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει μια άμεση σύγκριση των δύο τύπων επικάλυψης στρώσεων και του μήκους του συνδέσμου σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων.



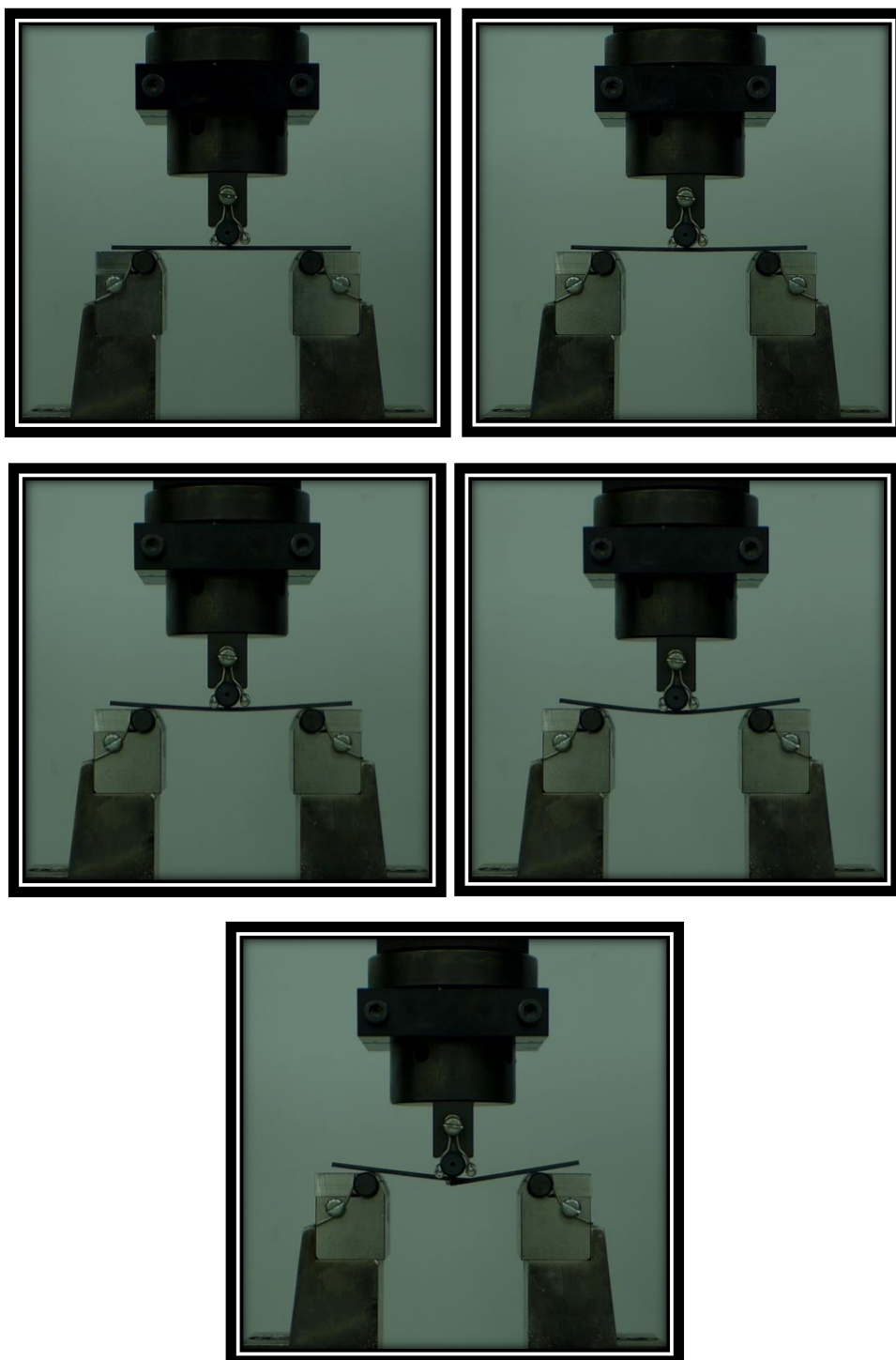


Θ-9.7: Διαγράμματα τάσης σ (MPa) – παραμόρφωσης ϵ .

Τα διαφορετικά στάδια του μηχανισμού κατάρρευσης των δοκιμίων παρουσιάζονται στη συνέχεια για διάφορους τύπους δοκιμίων. Παρουσιάζονται οι διαδοχικές χαρακτηριστικές εικόνες από την έναρξη της κάμψης έως το πέρας της ελαστικής περιοχής παραμόρφωσης και την είσοδο στην περιοχή κατάρρευσης πριν την τελική κατάρρευσή του.

Η πρώτη εικόνα είναι από την έναρξη της κάμψης. Η δεύτερη εικόνα όσο ακόμα το δοκίμιο βρίσκεται στη γραμμική-ελαστική περιοχή της παραμόρφωσής του. Η τρίτη εικόνα είναι αμέσως μετά την επίτευξη της καμπτικής αντοχής του δοκιμίου. Μετά από αυτό το σημείο το δοκίμιο εισέρχεται στην περιοχή κατάρρευσης και το καμπτικό φορτίο που μπορεί να παραλάβει μειώνεται σημαντικά μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής στην δομή του δοκιμίου, σηματοδοτώντας το τέλος της ελαστικής περιοχής. Η τέταρτη εικόνα είναι από το μέσο περίπου της περιοχής κατάρρευσής του δοκιμίου, ενώ η τελευταία εικόνα λήφθηκε μετά το τέλος της κάμψης του δοκιμίου.

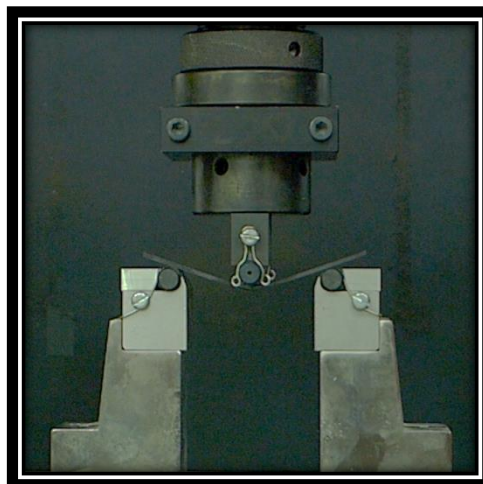
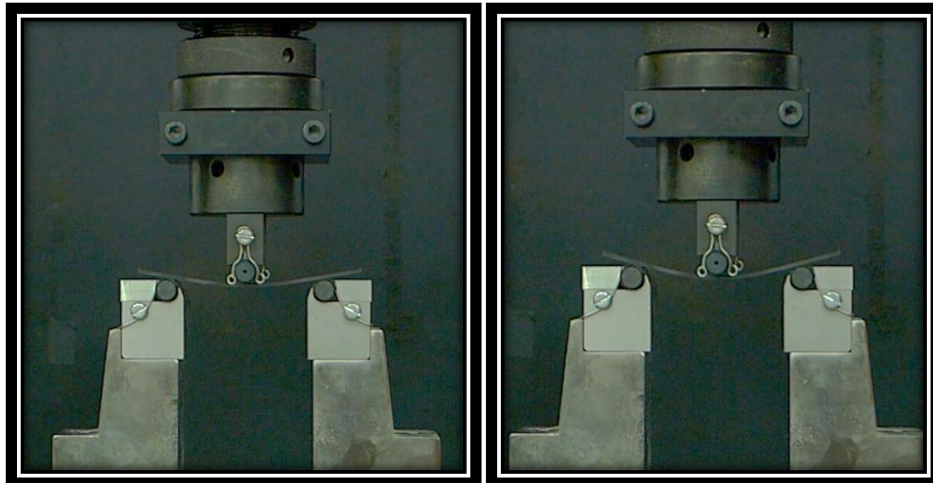
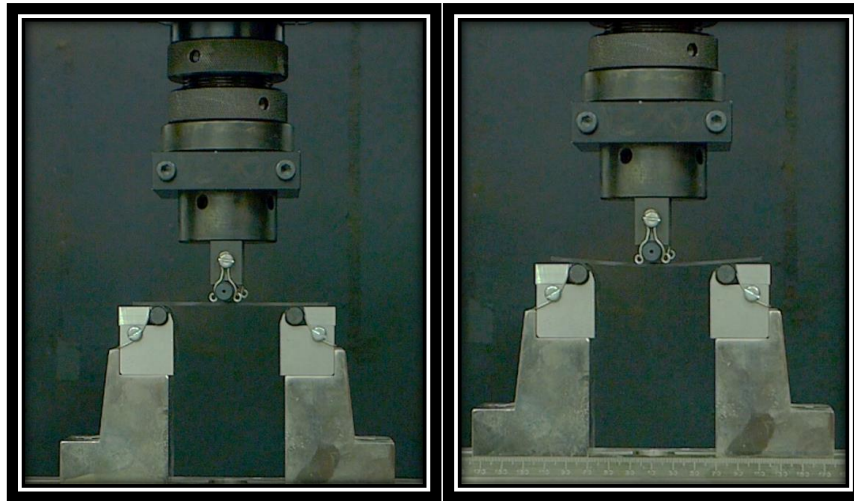
Σύνδεσμος Step lap. Δοκίμο κατηγορίας E1



Θ-9.8: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 5 της κατηγορίας E1.

Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου δοκιμίου παρουσιάζονται στο ανάλογο γράφημα με σκούρο μπλε χρώμα (δοκίμιο πέντε).

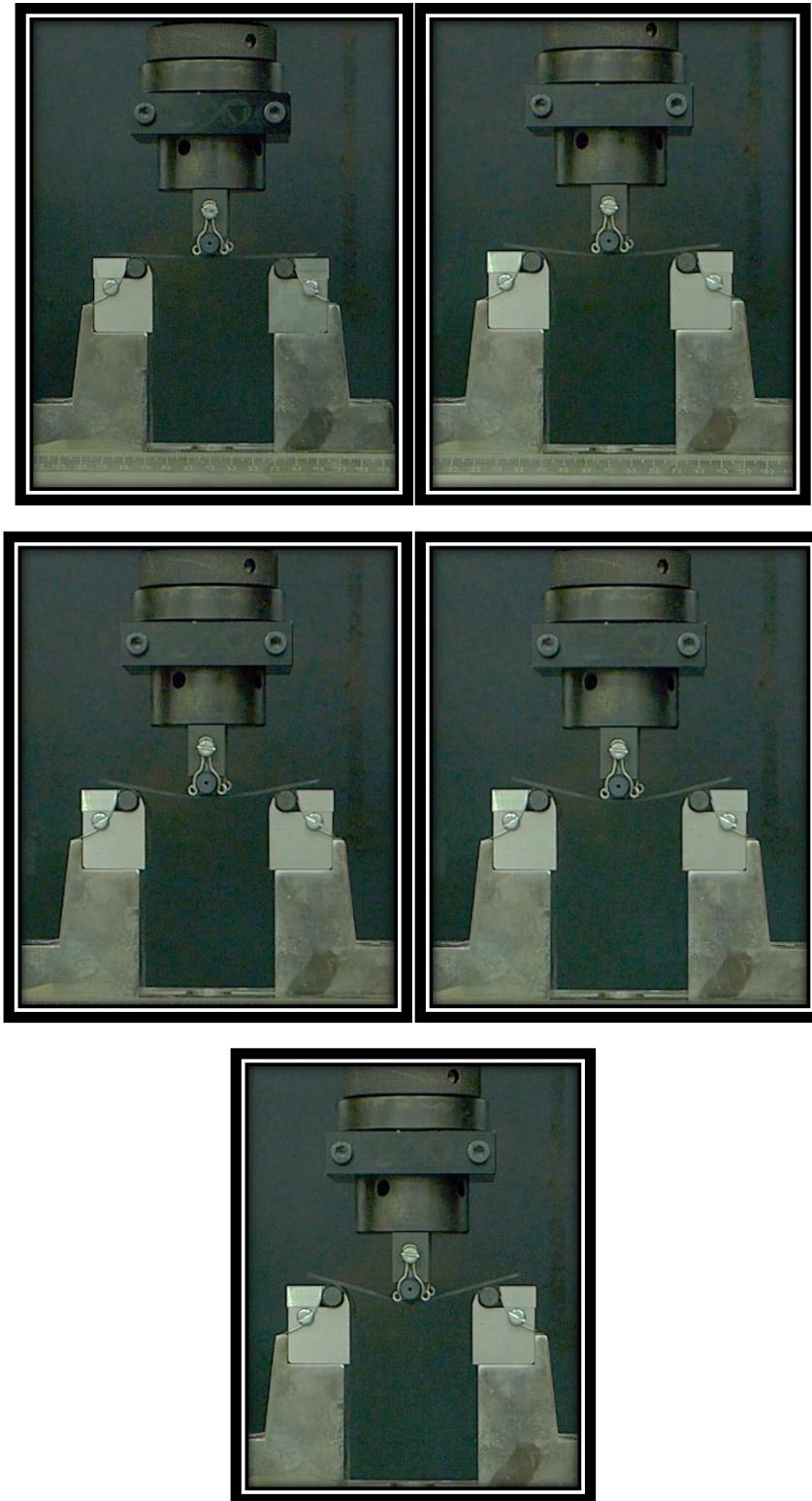
Χωρίς επικάλυψη στρώσεων. Δοκίμιο κατηγορίας A



Θ-9.9: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 2 της κατηγορίας A.

Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου δοκιμίου παρουσιάζονται στο ανάλογο γράφημα με κόκκινο χρώμα (δοκίμιο δύο).

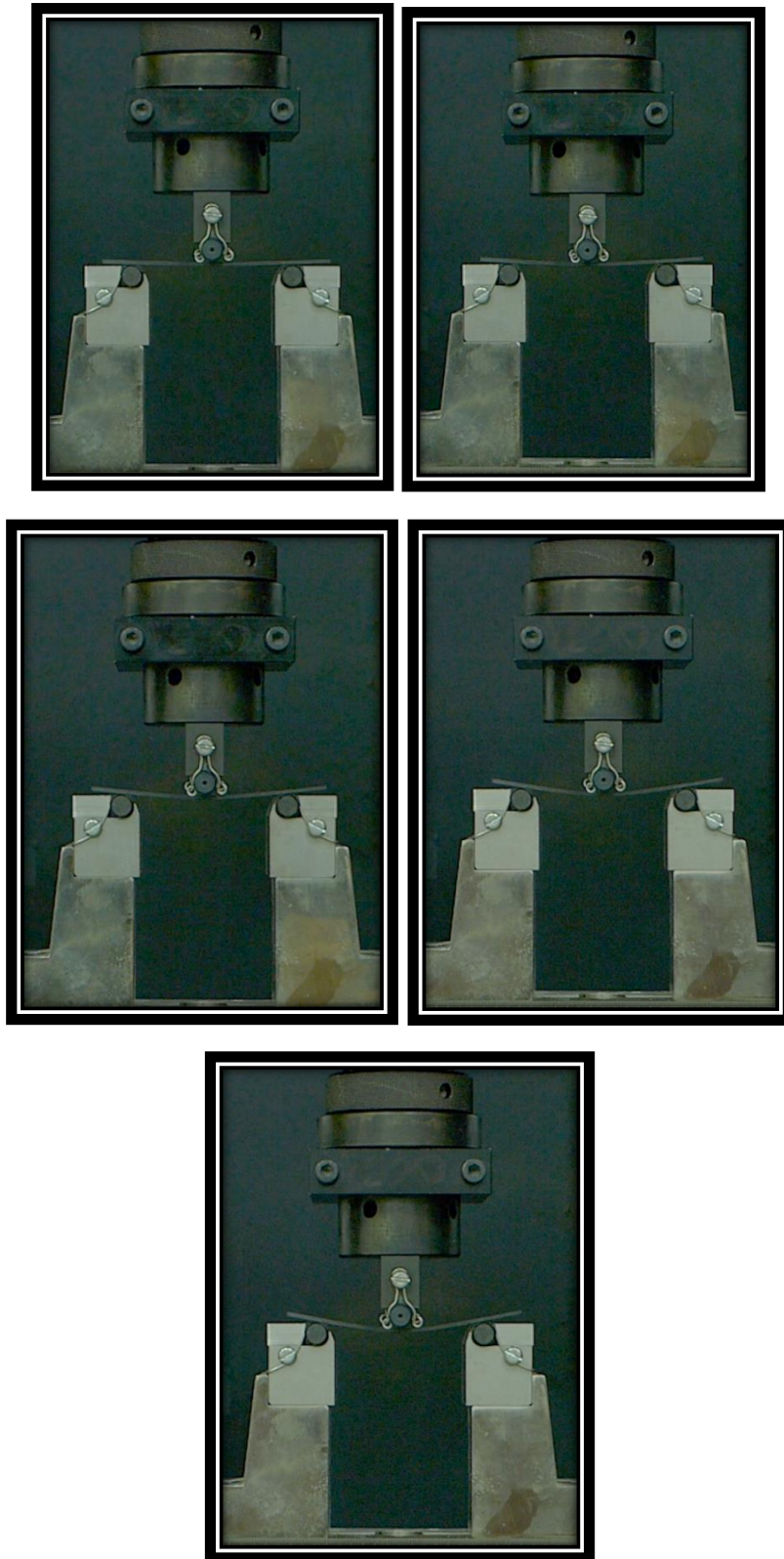
Χωρίς επικάλυψη στρώσεων. Δοκίμιο κατηγορίας Α



Θ-9.10: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 4 της κατηγορίας Α.

Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου δοκιμίου παρουσιάζονται στο ανάλογο γράφημα με κίτρινο χρώμα (δοκίμιο τέσσερα).

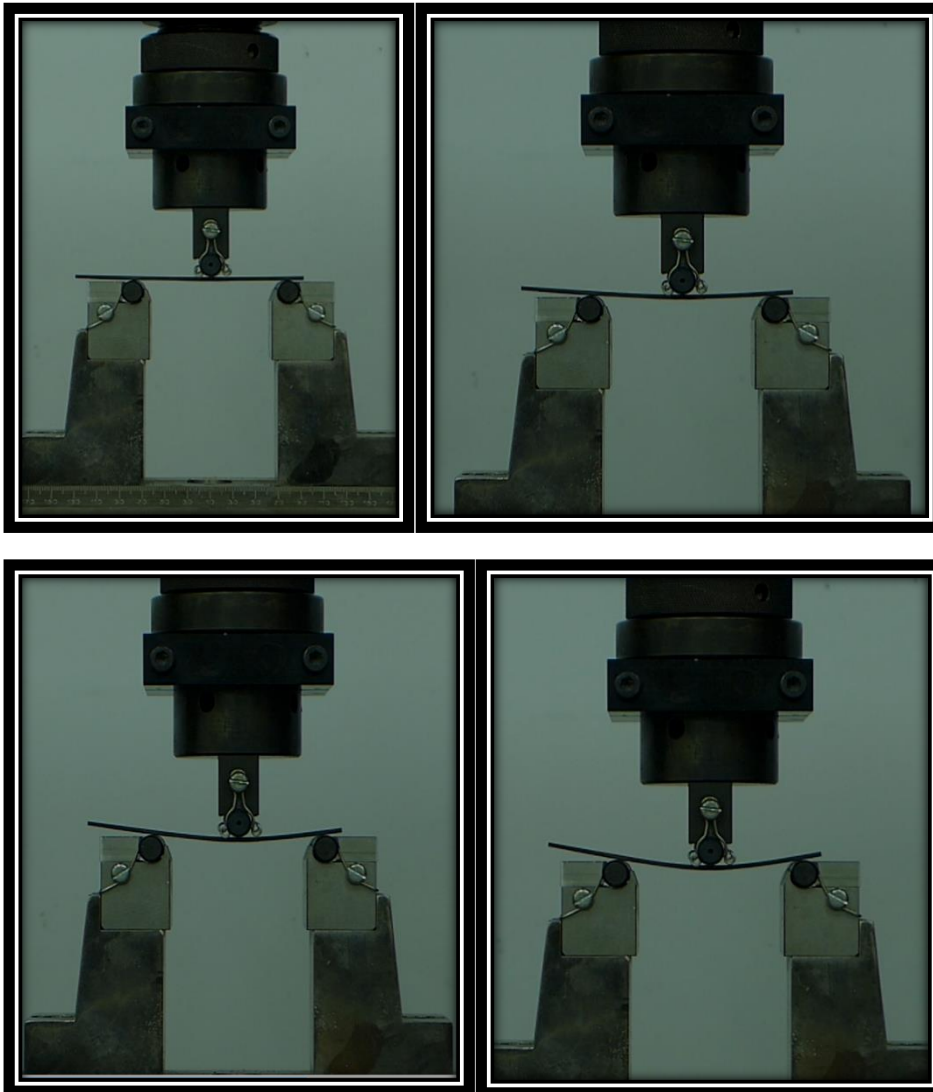
Σειριακός τύπος επικάλυψης στρώσεων. Δοκίμιο κατηγορίας Β1



Θ-9.11: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 4 της κατηγορίας Β1.

Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου δοκιμίου παρουσιάζονται στο ανάλογο γράφημα με κίτρινο χρώμα (δοκίμιο τέσσερα).

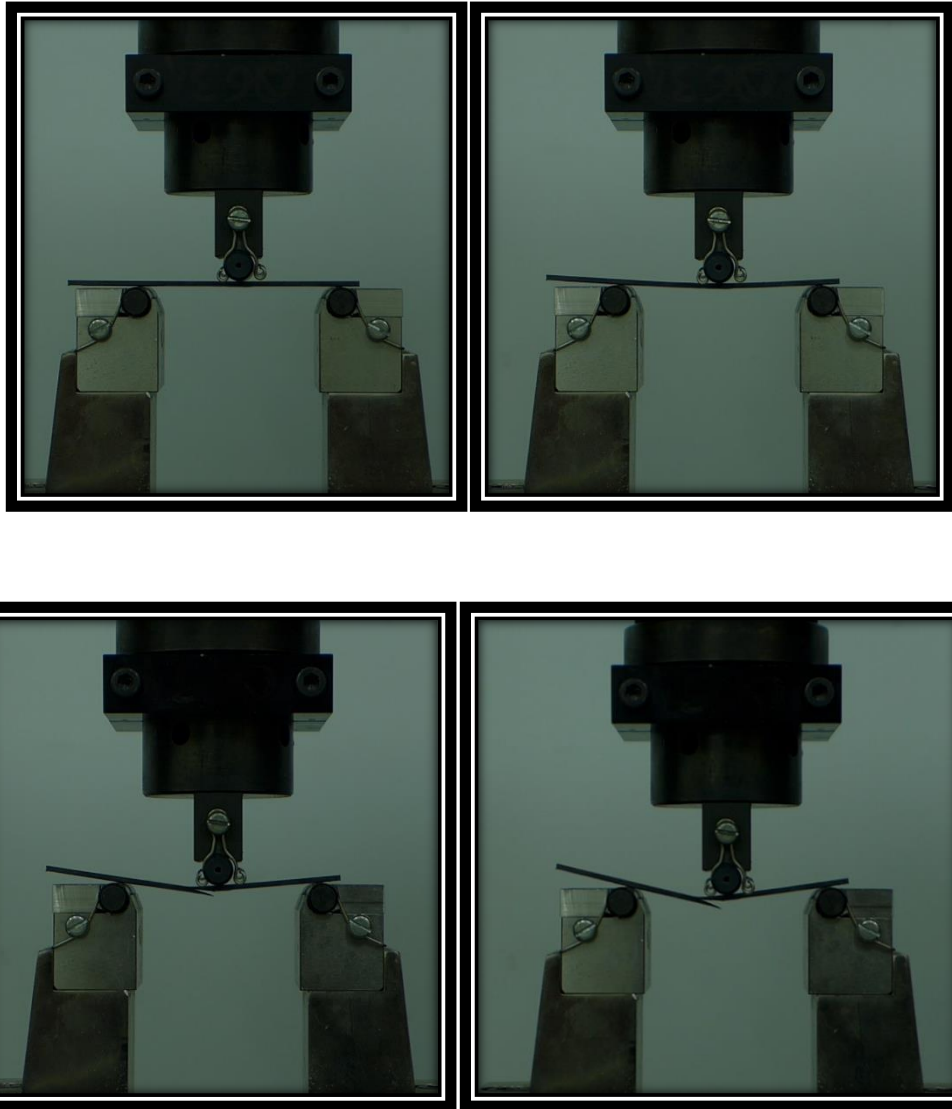
Διαδοχικός τύπος επικάλυψης στρώσεων. Δοκίμιο κατηγορίας D2



Θ-9.12: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 3 της κατηγορίας D2.

Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου δοκιμίου παρουσιάζονται στο ανάλογο γράφημα με γκρι χρώμα (δοκίμιο τρία).

Διαδοχικός τύπος επικάλυψης στρώσεων. Δοκίμιο κατηγορίας E2



Θ-9.13: Μηχανισμός κατάρρευσης δοκιμίου 1 της κατηγορίας E2.

Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου δοκιμίου παρουσιάζονται στο ανάλογο γράφημα με μπλε χρώμα (δοκίμιο ένα).

Ο Πίνακας 9.4 περιέχει τις τιμές που υπολογίστηκαν για το μέτρο ελαστικότητας και την καμπτική αντοχή για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 9.4: Χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμών

Τύπος	Μέσο πάχος συνδέσμου (mm ± σ)	E μέσο (Gra ± σ)	σ _{FM} μέσο (Mpa ± σ)	Διαφορά των 2 τύπων σε σ _{FM} (%)	Διαφορά των 2 τύπων σε E (%)	Ποσοστό E του τύπου μη επικάλυψης στρώσεων	Ποσοστό αντοχής σ _{FM} του τύπου μη επικάλυψης στρώσεων
A	-	58,19 ± 3,57	902,05 ± 98,28	-		-	-
B1	2,10 ± 0,03	46,98 ± 1,87	473,95 ± 85,67	70,5	29,2	80,7	52,5
B2	2,20 ± 0,12	36,36 ± 1,75	277,95 ± 34,07			62,5	30,8
C1	2,15 ± 0,07	44,22 ± 1,09	518,62 ± 45,59	19,7	20,8	76,0	57,5
C2	2,28 ± 0,07	36,59 ± 4,32	433,33 ± 62,17			62,9	48,0
D1	2,19 ± 0,05	47,44 ± 2,43	764,54 ± 73,32	49,7	11,9	81,5	84,8
D2	2,33 ± 0,06	42,40 ± 1,72	510,76 ± 29,48			72,9	56,6
E1	2,14 ± 0,17	51,26 ± 5,34	868,66 ± 77,69	54,6	15,9	88,1	96,3
E2	2,35 ± 0,12	44,23 ± 2,92	561,83 ± 60,64			76,0	62,3

9.4 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν σε γενικές γραμμές αυτό το οποίο ήταν αναμενόμενο. Τα δοκίμια με συνεχόμενες ίνες – χωρίς επικάλυψη στρώσεων είχαν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τα δοκίμια με επικάλυψη στρώσεων. Για το λόγο αυτό η Ομάδα Α των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για την σύγκριση των δύο τύπων επικάλυψης στρώσεων (διαδοχικό και σειριακό) ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ο step lap σύνδεσμος αποδείχτηκε καλύτερος σε όλες τις περιπτώσεις από τον blocked συγκρίνοντας την αντοχή τους σε κάμψη και το μέτρο ελαστικότητας. Η

διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους στην αντοχή σε κάμψη για το ίδιο μήκος συνδέσμου κυμαίνεται από 19,68% έως 70,51% υπέρ του step lap συνδέσμου, ενώ η διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας είναι επίσης από 11,9% έως 29,2%, όπως φαίνεται στο Πίνακα 9.4.

Αυξάνοντας το μήκος του συνδέσμου, παρατηρείται σε κάθε περίπτωση μια σημαντική αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας και στην αντοχή σε κάμψη κάθε δοκιμίου. Στο step lap σύνδεσμο, μια αύξηση του μήκους επικάλυψης κάθε στρώσης από 10 φορές το πάχος κάθε στρώσης σε 15 φορές, οδηγεί σε μια αύξηση 47,4% της αντοχής σε κάμψη του δοκιμίου. Η ίδια αύξηση στο μήκος του blocked συνδέσμου επιφέρει μια αύξηση περίπου 17,9 % στην αντοχή του συνδέσμου όπως φαίνεται στο Πίνακα 9.5.

Πίνακας 9.5: Σύγκριση αντοχής όταν μεταβάλλεται το μήκος του συνδέσμου για τους δύο τύπους επικάλυψης

Τύπος επικάλυψης στρώσεων	Αντοχή σε κάμψη σ_{FM} (Mpa)		
	1 mm σε 10 x πάχος στρώσης	10 x πάχος στρώσης σε 15 x πάχος στρώσης	15 x πάχος στρώσης σε 20 x πάχος στρώσης
1	+9,42	+47,41	+13,62
2	+55,90	+17,87	+9,99

Ενδιαφέρον, επίσης, παρουσιάζει το γεγονός ότι το πάχος στην περιοχή του blocked συνδέσμου ήταν σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο εκείνου του step lap συνδέσμου όπως φαίνεται στο Πίνακα 9.4. Το γεγονός αυτό δείχνει το αυξημένο αριθμό φυσαλίδων αέρα και πορώδους που εγκλωβίζονται στην δομή του συνδέσμου του διαδοχικού τύπου επικάλυψης στρώσεων, το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό λόγο της μειωμένης μηχανικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας του συνδέσμου [9.42].

Ένα ακόμα ενδιαφέρον αποτέλεσμα του πειράματος ήταν ο μηχανισμός κατάρρευσης των δύο τύπων δοκιμίων. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν στην περιοχή του συνδέσμου, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο. Με την αύξηση του μήκους του συνδέσμου και στις δύο περιπτώσεις, τα δοκίμια αστόχησαν σε μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης, ενώ παράλληλα αυξήθηκε η μηχανική τους αντοχή. Ο blocked συνδέσμος παράγει κατασκευές με πιο ασφαλή – προβλέψιμο μηχανισμό κατάρρευσης από τον step lap σύνδεσμο. Σε δεκατέσσερα δοκίμια του blocked συνδέσμου συνέβη μια αρχική ρωγμή στη δομή της κατασκευής, την οποία ακολούθησαν μια δεύτερη ή περισσότερες ρωγμές ή αποκόλληση στρώσεων (delamination) μετά από ένα σημαντικό χρονικό διάστημα και παραμόρφωση, προαναγγέλλοντας ουσιαστικά την τελική κατάρρευση του δοκιμίου. Ειδικότερα,

αυξάνοντας το μήκος του συνδέσμου, όλο και περισσότερα δοκίμια τείνουν να αστοχήσουν με ασφαλή και προβλέψιμο τρόπο. Για ένα μήκος επικάλυψης στρώσεων είκοσι φορές το πάχος κάθε στρώσης, όλα τα δοκίμια αστόχησαν με ασφαλή τρόπο.

Από την άλλη πλευρά, στον step lap σύνδεσμο τα δοκίμια αστόχησαν με απότομο και βίαιο τρόπο. Μόνο μετά από μήκος δέκα φορές το πάχος κάθε στρώσης ένας προβλέψιμος μηχανισμός κατάρρευσης παρατηρήθηκε. Συγκρίνοντας το μηχανισμό κατάρρευσης των δύο τύπων επικάλυψης στρώσεων με την ομάδα των δοκιμών χωρίς επικάλυψη στρώσεων, μπορεί να ειπωθεί ότι αυξάνοντας το μήκος του συνδέσμου οι τρεις τύποι (step lap, διαδοχικός και χωρίς επικάλυψη στρώσεων) τείνουν να παράγουν τα ίδια αποτελέσματα.

Όταν πρέπει να παρθεί η απόφαση σχετικά με τον τύπο του συνδέσμου για την κατασκευή ενός εξαρτήματος, θα πρέπει να ληφθεί, επίσης, υπόψιν η κατασκευαστική προσπάθεια και ο χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή του κάθε συνδέσμου. Από την εμπειρία του συγγραφέα στην κατασκευή μονοκόκ πλασίων ποδηλάτου ενισχυμένων με ίνες άνθρακα για χρήση σε αγωνιστικά ποδήλατα και ποδήλατα υψηλών επιδόσεων, μπορεί να ειπωθεί ότι ο step lap σύνδεσμος είναι πιο δύσκολος να κατασκευαστεί με ακρίβεια και απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο κατασκευής. Αυτό συμβαίνει, κυρίως, διότι τα πατρών κατασκευής πρέπει να διαστασιολογηθούν και να τοποθετηθούν μέσα στο καλούπι με μεγάλη ακρίβεια, πράγμα το οποίο είναι ιδιαίτερα δύσκολο σε σύνθετες γεωμετρικά κατασκευές και καλούπια. Κατά συνέπεια είναι πιθανό σε αυτές τις περιπτώσεις ο blocked σύνδεσμος να είναι πιο αποτελεσματικός στην παραγωγή κατασκευών με αυξημένες μηχανικές ιδιότητες, κυρίως λόγω της αδυναμίας κατασκευής του step lap τύπου επικάλυψης στρώσεων. Σε κάθε περίπτωση, όμως, είναι στο χέρι του μηχανικού να πάρει τις ανάλογες αποφάσεις ανά περίπτωση έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει την κατασκευή του και να πετύχει τους στόχους που έχει θέσει.

9.5 Συμπεράσματα

Δύο τύποι επικάλυψης στρώσεων μελετήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, ο σειριακός και ο διαδοχικός τύπος. Εξετάστηκε η επίδρασή τους στις μηχανικές ιδιότητες δοκιμών πλακών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα με παράμετρο το μήκος του συνδέσμου επικάλυψης στρώσεων.

Τα ακόλουθα συμπεράσματα προκύπτουν από το πείραμα:

- Ο step lap σύνδεσμος αποδείχτηκε να παράγει κατασκευές με υψηλότερη καμπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με τον blocked σύνδεσμο. Κατά συνέπεια, συνιστάται για χρήση σε κατασκευές που υπόκεινται σε υψηλές τάσεις κατά τη λειτουργία τους ή σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη για την κατασκευή εξαρτημάτων με ελάχιστη ενδοτικότητα - παραμόρφωση.
- Ο blocked σύνδεσμος καταρρέει διαδοχικά και συνιστάται για χρήση σε εφαρμογές όπου μπορεί να εκτελεστεί είτε απαιτείται ένας οπτικός έλεγχος της κατασκευής.
- Και στους δύο τύπους συνδέσμου το μήκος επικάλυψης κάθε στρώσης συνιστάται σε 15 ή περισσότερες φορές το πάχος κάθε στρώσης, όπου φυσικά αυτό είναι εφικτό. Αυτό βελτιώνει την αντοχή του συνδέσμου, όπως επίσης παράγει κατασκευές με πιο ασφαλή – προβλέψιμο μηχανισμό κατάρρευσης.

Μελλοντική έρευνα στο κομμάτι αυτό θα επικεντρωθεί στη μελέτη υβριδικών τύπων επικάλυψης στρώσεων σε πείραμα κάμψης τριών σημείων, όπως επίσης και στον έλεγχο των δύο αυτών συνδέσμων που εξετάστηκαν σε κόπωση.

9.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

- [9.1] Chang FK, Scott RA, Springer GS. Strength of mechanically fastened composite joints. *J Compos Mater* 1982;16:470–94.
- [9.2] Harris JA, Adams RD. Strength prediction of bonded single-lap joints by nonlinear finite element methods. *Int J Adhesion Adhesives* 1984;4:65–78.
- [9.3] Kweon JH, Ahn HS, Choi JH. A new method to determine the characteristic lengths of composite joints without testing. *Compos Struct* 2004;66:305–15.
- [9.4] Ban CS, Lee YH, Choi JH, Kweon JH. Strength prediction of adhesive joints using the modified damage zone theory. *Compos Struct* 2008;86:96–100.
- [9.5] Shin KC, Lee JJ, DG Lee. A study on the lap shear strength of a co-cured single lap joint. *Int J Adhesion Adhesives* 2000;14:123–39.
- [9.6] Yoon SH, Hong CS. Modified end notched flexure specimen for mixed mode interlaminar fracture in laminated composites. *Int J Fract* 1990;43:R3–9.
- [9.7] Apalak ZG, Apalak MK. Progressive damage modeling of and adhesively bonded unidirectional composite single-lap joint in tension at the mesoscale level. *J Thermoplast Compos Mater* 2006;19:671–702.
- [9.8] Mazumdar SK, Mallick PK. Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC–SMC composites. *Polym Compos* 1998;19:139–46.
- [9.9] Matthews FL, Tester TT. The influence of stacking sequence on the strength of bonded CFRP single lap joints. *Int J Adhesion Adhesives* 1985; 5:13–8.
- [9.10] Kim KS, Yoo JS, Yi YM, Kim CG. Failure mode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints with different bonding methods. *Compos Struct* 2006; 72:477–85.

- [9.11] Tsai MY, Morton J, Matthews FL. Experimental and numerical studies of a laminated composite single-lap adhesive joint. *J Compos Mater* 1995;29:1245–75.
- [9.12] Song MH, Kweon JH, Kim SK, Kim C, Lee TJ, Choi SM. An experimental study on the failure of carbon/epoxy single lap reveted joints after thermal exposure. *Compos Struct* 2008;86:125–34.
- [9.13] Kairouz KC, Matthews FL. Strength and failure modes of bonded single-lap joints between cross-ply adherends. *Composites* 1993;24:475–84.
- [9.14] Min-Gyu Song, Jin-HweKweon, Jin-Ho Choi, Jai-Hyun Byun, Min-Hwan Song, Sang-Joon Shin, Tae-Joo Lee, Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints, *Composite Structures*, 92, 2010, 2194–2202.
- [9.15] Lee SW, Lee DG, Jeong KS. Static and dynamic torque characteristics of composite co-cured single lap joint. *J Compos Mater* 1997;31:2188–201.
- [9.16] Kradinov V, Barut A, Madenci E, Ambur DR. Bolted double-lap composite joints under mechanical and thermal loading. *Int J Solids Struct* 2001;38:7801–37.
- [9.17] Cao Z, Cardew-Hall M. Interference-fit riveting technique in fiber composite laminates. *Aerosp Sci Technol* 2006;10:327–30.
- [9.18] Kim KS, Yoo JS, An JM, Jang YS. Failure mode and strength of unidirectional composite single-lap bonded joints. I. Experiments. *J Kor Soc Compos Mater* 2004;17:14–21.
- [9.19] Xiao Y, Ishikawa T. Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation). *Compos Sci Technol* 2005;65: 1022–31.
- [9.20] Parker BM, Waghorne RM. Surface pretreatment of carbon fiber-reinforced composites for adhesive bonding. *Composites* 1982;13:280–8.
- [9.21] Zhang C, Hoa SV, Ganesan R. Experimental characterization of interlaminar shear strengths of graphite/epoxy laminated composite. *J Compos Mater* 2002;36:1615–52
- [9.22] Coates, C. W. and Armanios, E.A., "Monotonic and Fatigue Response of Co-cured Composite Lap joints with Modified Interfaces", *Proceedings of American Helicopter Society 56th Annual Forum*. Virginia Beach, VA May 2-4, 2000.
- [9.23] Coates, C. and Armanios, E.A., "Assessment of Nested Overlap and Transverse Interfacial Layer in Co-Cured Composite Single Lap Joints", *Proceedings of the Fifteenth Annual ASC/ASTM D-30 Technical Conference*, Texas A & M University, Texas, Sept 24-27, 2000
- [9.24] Coates. C. and Armanios, E "Testing and Prediction of Co-Cured Composite Single Lap Joints with Modified Interface under Cyclic Loading" *Proceedings of the 16th Annual ASC Technical Conference*. Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg. VA September 9-12-2001
- [9.25] Zeng. Q. and Sun. C. T, "A New Bonded Composite Wavy Lap Joint", *Proceedings of the 41th " AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conference*. April 2-6.2000.

- [9.26] Zeng. Q. and Sun. C. T, "Novel design of a bonded lap joint", Journal of AIAA, vol. 39. pp. 1991- 1996, 2001.
- [9.27] Zeng. Q. and Sun. C. T, "Fatigue performance of a bonded wavy composite lap joint", Proceedings of the 42nd "AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conference, Seattle, Washington, April 16-19. 2001.
- [9.28] Zeng. Q. and Sun. C. T, "Fatigue performance of a bonded wavy composite lap joint". Fatigue Fracture Engineering Material Structures, vol. 27, pp. 413-422, 2004.
- [9.29] Tan, X., & Armanios, E. (2007). "An assessment of fatigue limit predictors of graphite/epoxy co-cured composite joints through quasi-static Acoustic Emission count peaks." In American Society for Composites - 22nd Technical Conference of the American Society for Composites 2007 - Composites: Enabling a New Era in Civil Aviation (Vol. 1, pp. 81-96)
- [9.30] Salih Akpınar The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers Composites Part B: Engineering Volume 67, December 2014, Pages 170-178
- [9.31] Graham, S. and Crane, R., "Stress Analysis of Asymmetric Co-Cured Stepped-Lap Joints," Journal of ASTM International, Vol. 2, No. 8, 2005, pp. 1-13,
- [9.32] Cao, Caihua and Dancila, D. Stefan, "Damage and failure analysis of co-cured fiber-reinforced composite joints with unidirectional lay-up, Proceedings of the 44th" AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Norfolk, VA April 7-10 2003.
- [9.33] Cao, Caihua and Dancila, D. Stefan, "Differentiation of damage and failure mechanisms of cocurcd fiber reinforced composite joints using acoustic emission, Proceedings of the 45th" AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Palm Springs, CA April 19-22, 2004.
- [9.34] Tan, X. and Armanios. E. "Comparison of Co-cured Composite Joint Strength under Fatigue Loading", Proceedings of 21st Annual Technical Conference of the American Society for Composites, Dearborn, MI, September 17-20, 2006
- [9.35] J. Ahamed, M.W. Joosten, C.H. Wang, Ply-interleaving technique for joining hybrid carbon/glass fibre composite materials, Compos. Part A Appl. Sci. Manufact. 2016;84:134-146.
- [9.36] J. Ahamed, M. Joosten, P. Callus, Michael R. Wisnom, Chun H. Wang, Ply-overlap hybrid technique for joining dissimilar composite materials, Materials & design 2016;100:157-167.
- [9.37] P.P. Camanho, A. Fink, A. Obst, S.Pimenta, Hybrid titanium–CFRP laminates for high-performance bolted joints, Compos. A: Appl. Sci. Manuf.40(12) (2009) 1826–1837.
- [9.38] A. Fink, P.P. Camanho, J.M.Andrés, E.Pfeiffer, A. Obst, Hybrid CFRP/titanium bolted joints: performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor, Compos. Sci. Technol.70(2) (2010)305–317.
- [9.39] B. Kolesnikov, L. Herbeck, A. Fink, CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints, Compos. Struct.83(4) (2008) 368–380.

- [9.40] ISO 527-5. Determination of tensile properties of plastics -Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites.
- [9.41] ISO 14125. Fibre -reinforced plastic composites - Determination of flexural properties.
- [9.42] A. G. Kitselis, N. A. Traiforos, D. E. Manolakos. The effect of resonance on the void content in CFRP tubes. Composites Part B: Engineering, 106, 2016, 164-171.

Κεφάλαιο 10 Δημιουργία τελικού πρωτοτύπου και αξιολόγηση

10.1 Δημιουργία τελικού πρωτοτύπου

Έχοντας ήδη έτοιμο το καλούπι και έχοντας επιλέξει την κατάλληλη διαστρωμάτωση από τις προηγούμενες δοκιμές, οι αλλαγές που εφαρμόζονται στο τελικό αυτό πρωτότυπο βασίζονται στα τρία πειράματα που αναλύονται στα κεφάλαια 7, 8 και 9.

Πιο συγκεκριμένα, το πλαίσιο που παράγεται με τη χρήση autoclave είναι άκρως άκαμπτο και στιβαρό, με αποτέλεσμα κάθε κραδασμός που υφίσταται το πλαίσιο κατά την οδήγηση να μεταφέρεται στον αναβάτη δημιουργώντας έτσι έντονη αίσθηση κόπωσης. Η στιβαρότητα αυτή του πλαισίου από autoclave το καθιστά επίσης ιδιαίτερα ψαθυρό και επιρρεπές σε καταστροφικές αστοχίες με την παραμικρή εκτός προδιαγραφών φόρτιση, όπως η πρόσκρουση πέτρας πάνω στον σκελετό. Από τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 9 εξάγεται ότι, για να έχει ο σκελετός την απαραίτητη ενδοτικότητα και ικανότητα απορρόφησης των κραδασμών, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεγάλης διάρκειας κύκλος πολυμερισμού με χαμηλή πίεση και θερμοκρασία.

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου παραγωγής πλαισίου που αντικατέστησε το autoclave είναι η δυνατότητα εφαρμογής μόνο υποπίεσης στο καλούπι. Η υποπίεση αυτή δεν είναι ικανή να οδηγήσει όλον τον παγιδευμένο αέρα εκτός της διαστρωμάτωσης όταν χρησιμοποιείται κύκλος πολυμερισμού αντίστοιχος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή με autoclave. Από το πείραμα που αναλύεται στο κεφάλαιο 10 συμπεραίνεται πως όταν χρησιμοποιείται κύκλος πολυμερισμού μεγάλης χρονικής διάρκειας σε συνδυασμό με χαμηλή πίεση και την επιβολή δονήσεων το παραγόμενο πορώδες είναι αντίστοιχο με αυτό που παράγεται όταν χρησιμοποιείται πιο σύντομος κύκλος πολυμερισμού με αυξημένη πίεση.

Τέλος, ένα ακόμα στοιχείο που μελετήθηκε ήταν ο τρόπος επικάλυψης των στρώσεων της διαστρωμάτωσης και τα χαρακτηριστικά του. Τόσο στο κεφάλαιο 7 όσο και στα κεφάλαια 8 και 9 εμφανίζονται δύο διαφορετικοί τρόποι, ο διαδοχικός και ο σειριακός.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων στα προαναφερθέντα κεφάλαια παρατηρείται ότι:

- Από τη μία, ο σειριακός τύπος επικάλυψης παράγει εξαρτήματα με μειωμένο πορώδες και αυξημένες μηχανικές ιδιότητες, όπως υψηλότερη καμπτική

αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, σε σχέση με τον διαδοχικό, ωστόσο καταρρέουν και πιο απότομα.

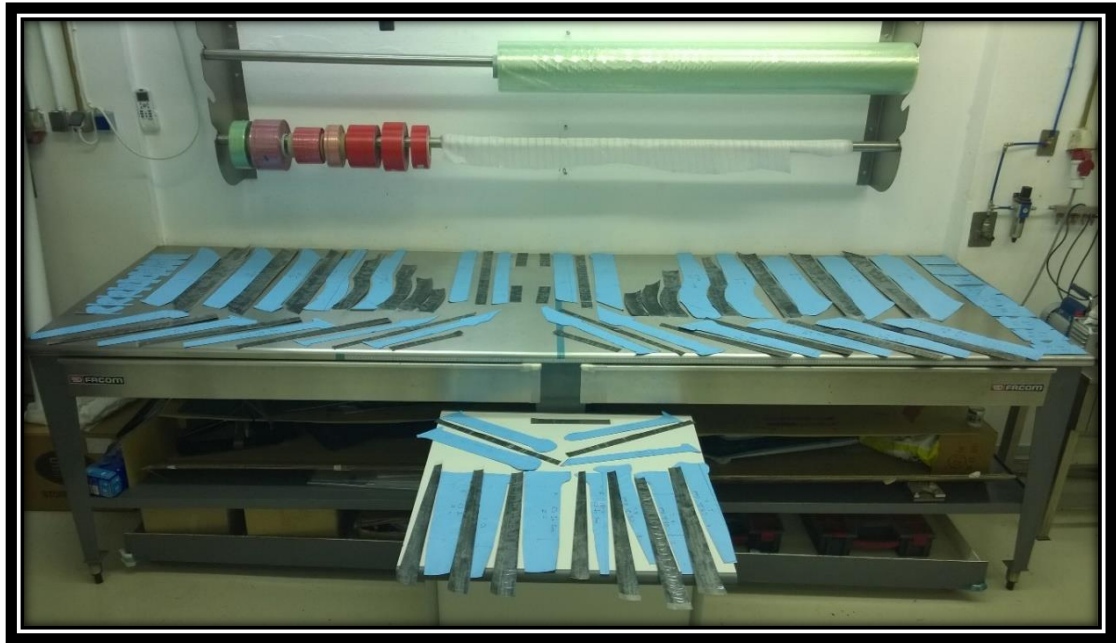
- Από την άλλη, ο διαδοχικός τύπος επικάλυψης μπορεί να παγιδεύει λίγο παραπάνω αέρα μέσα στη διαστρωμάτωση, αλλά είναι πολύ πιο εύκολο να παραχθεί, γεγονός που διευκολύνει τις πιο σύνθετες γεωμετρικά κατασκευές. Ακόμα, καταρρέει πολύ πιο σταδιακά σε σχέση με το σειριακό τύπο επικάλυψης, με αποτέλεσμα με έναν απλό οπτικό έλεγχο της κατασκευής να είναι ορατή η αστοχία πολύ πριν την καταστροφή του.

Συνοψίζοντας λοιπόν, το τελικό πρωτότυπο παράγεται με τη χρήση φούρνου και αντλίας κενού έτσι ώστε να αντικατασταθεί το autoclave. Ο κύκλος πολυμερισμού που επιλέγεται παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.1. Επιπλέον για λόγους κατασκευής και ασφαλείας επιλέγεται ο διαδοχικός τύπος overlap σε όλα τα σημεία που υπάρχει επικάλυψη στρώσεων. Κατά τη διάρκεια του κύκλου πολυμερισμού της ρητίνης χρησιμοποιήθηκε και πνευματικός δονητής για την επιβολή συντονισμού και την απομάκρυνση των παγιδευμένων φυσαλίδων αέρα.

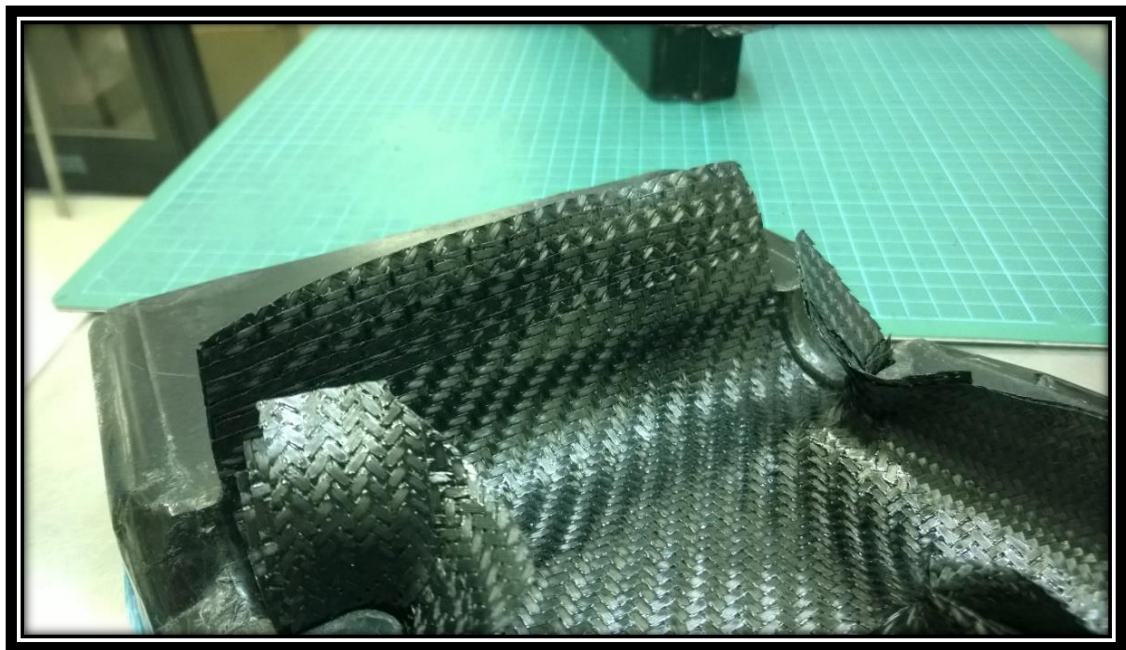
Πίνακας 10.1: Κύκλος πολυμερισμού τελικού πρωτοτύπου

Στάδιο	Θερμοκρασία	Χρόνος παραμονής
1	25	0.05
2	75	0.3
3	67	1
4	67	9
5	35	10
6	125	15
7	122	17
8	40	18

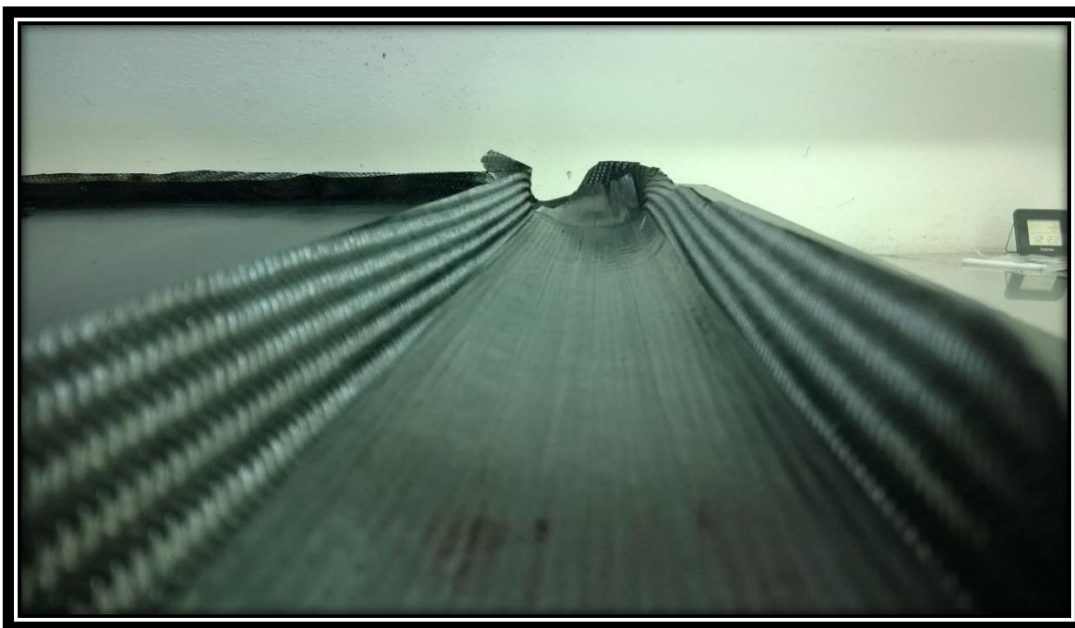
Εκ πρώτης όψεως, το πλαίσιο που παράχθηκε με αυτόν τον τρόπο έχει ορατά βελτιωμένη επιφάνεια σε σχέση με το προηγούμενο που είχε παραχθεί πάλι με συνδυασμό φούρνου και αντλίας κενού. Η εξωτερική επιφάνεια είναι συγκρίσιμη με αυτό που παράχθηκε με τη χρήση autoclave. Με σκοπό την εκτίμηση της ενδοστρωματικής κατάστασης του τελικού αυτού πρωτοτύπου έγιναν τομές σε διάφορα σημεία του πλαισίου. Παρατηρείται ότι η εσωτερική μορφή του προσομοιάζει αυτή του πρωτοτύπου από autoclave με ελάχιστες έως καθόλου φυσαλίδες ή ατέλειες στις τομές που έγιναν για έλεγχο. Η διαδικασία παραγωγής παρουσιάζεται παρακάτω στις εικόνες Θ-10.1 έως Θ-10.12



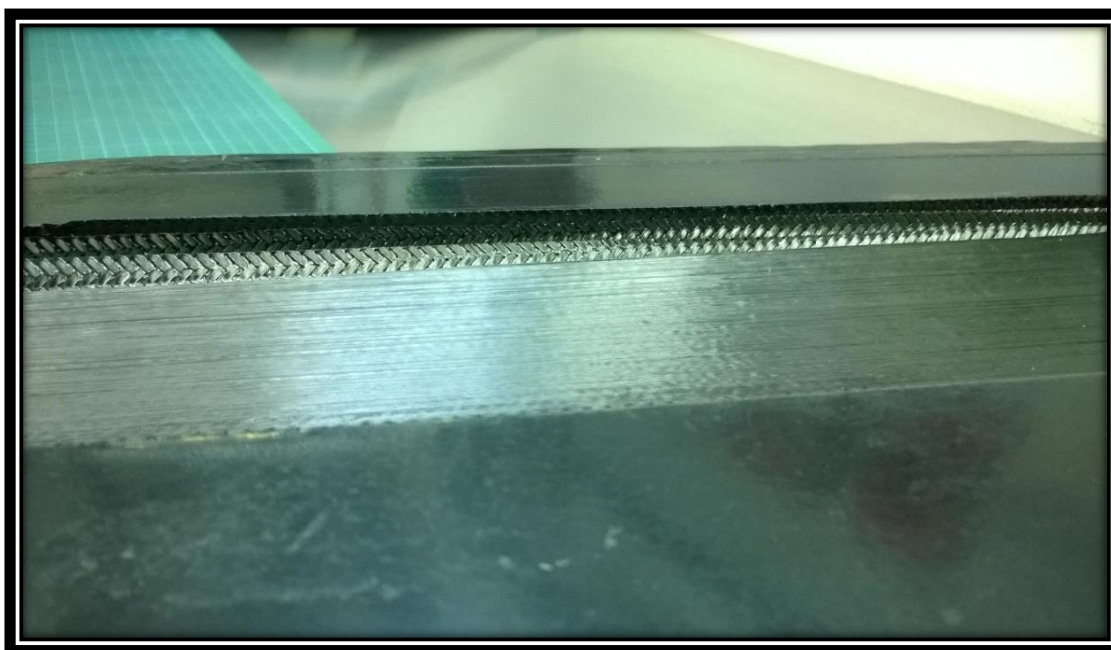
Θ-10.1 Τα πατρόν όπως έχουν προκύψει από τη μελέτη έτοιμα για διαστρωμάτωση.



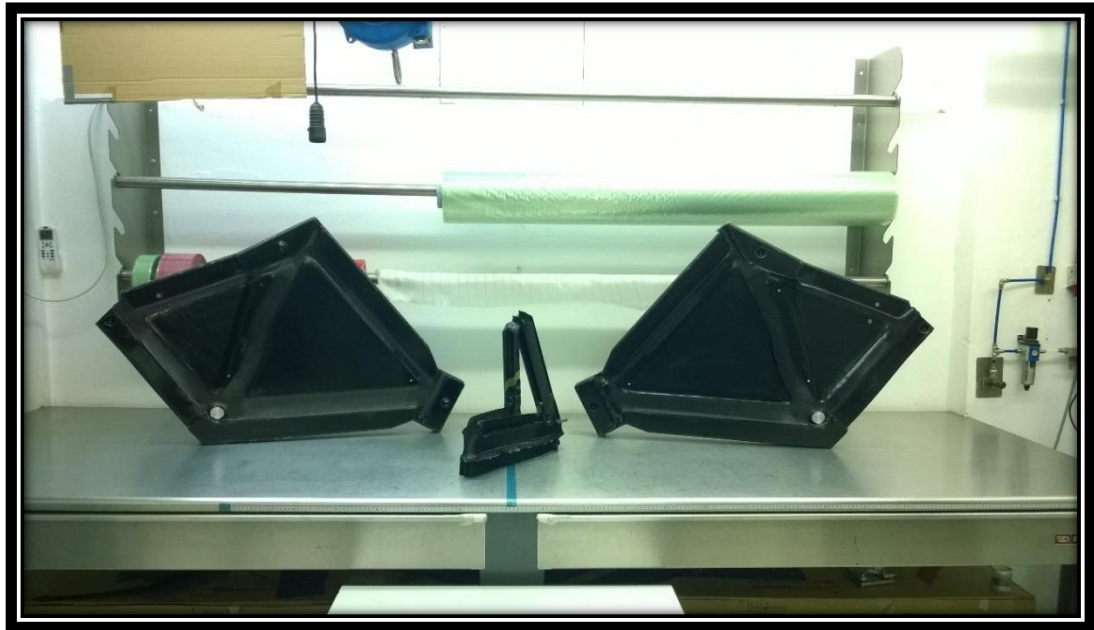
Θ-10.2 Μέρος της διαστρωμάτωσης στο τμήμα του κούτελου από την «over» μεριά του καλουπιού.



Θ-10.3 Μέρος της διαστρωμάτωσης στο τμήμα του οριζόντιου σωλήνα από την «over» μεριά του καλουπιού.



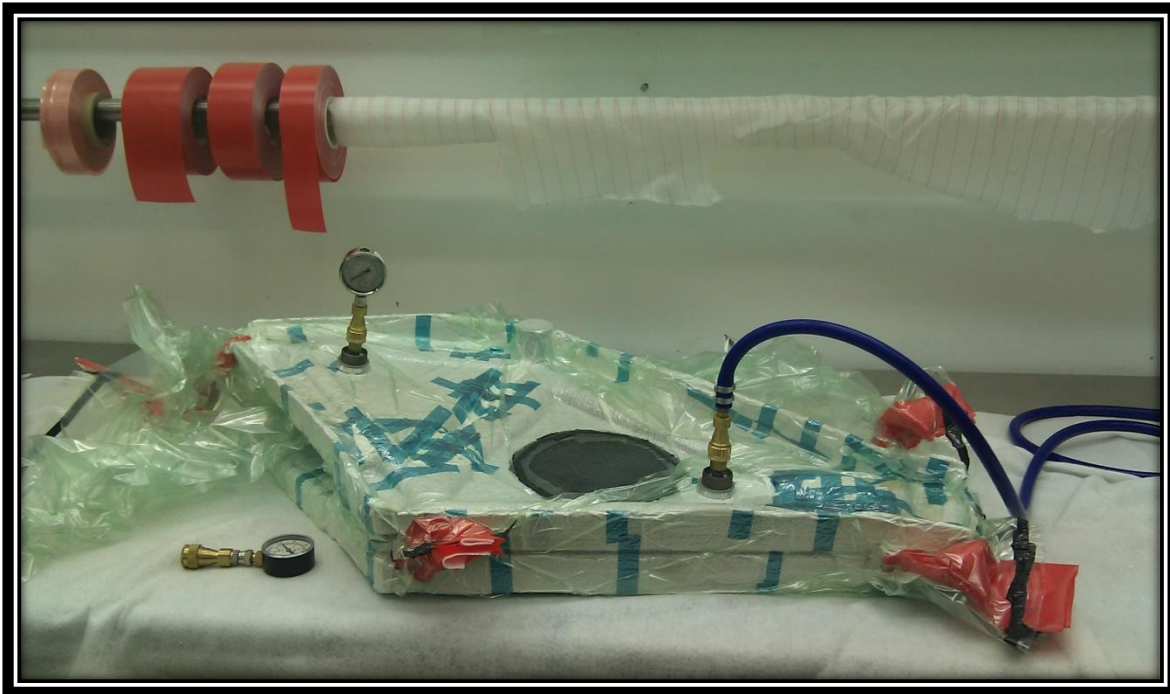
Θ-10.4 Μέρος της διαστρωμάτωσης στο τμήμα του διαγώνιου σωλήνα από την «exact» μεριά του καλουπιού.



Θ-10.5 Όλα τα τμήματα του καλουπιού στρωμένα έτοιμα για σακούλιασμα.



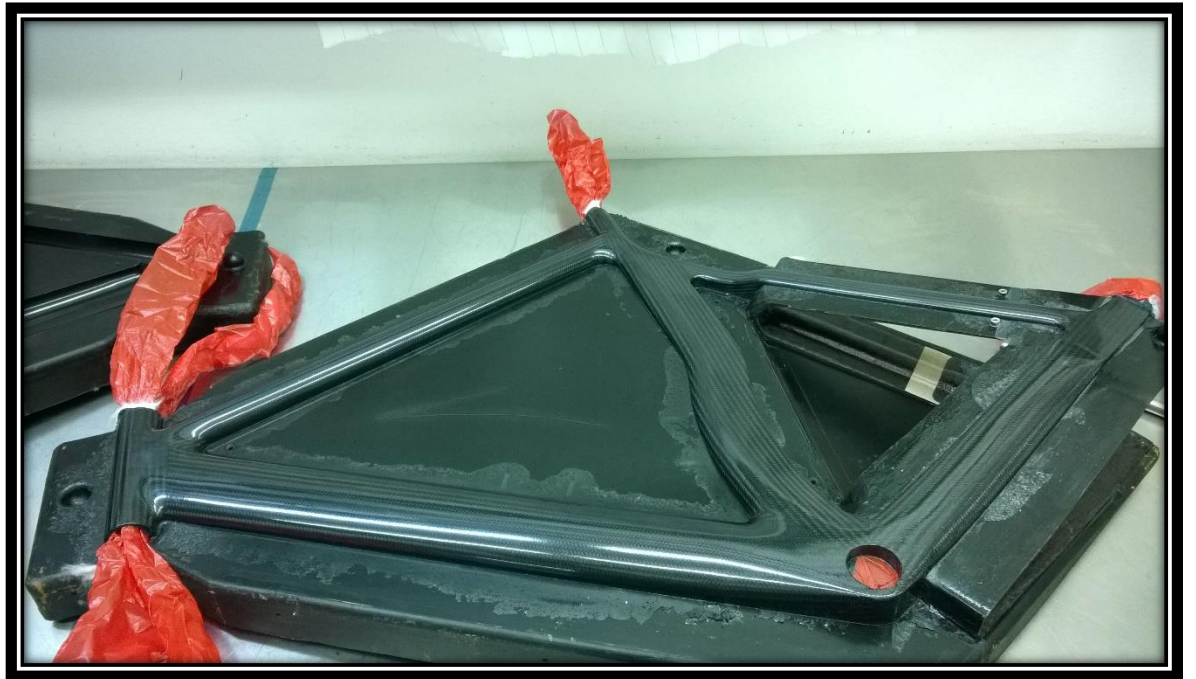
Θ-10.6 Καλούπωμα και σακούλιασμα Όλα τα τμήματα του καλουπιού στρωμένα έτοιμα για σακούλιασμα.



Θ-10.7 Το καλούπι έτοιμο για δημιουργία κενού.



Θ-10.8 Το καλούπι στο φούρνο έτοιμο για ψήσιμο με τις τεχντροπίες που μελετήθηκαν.



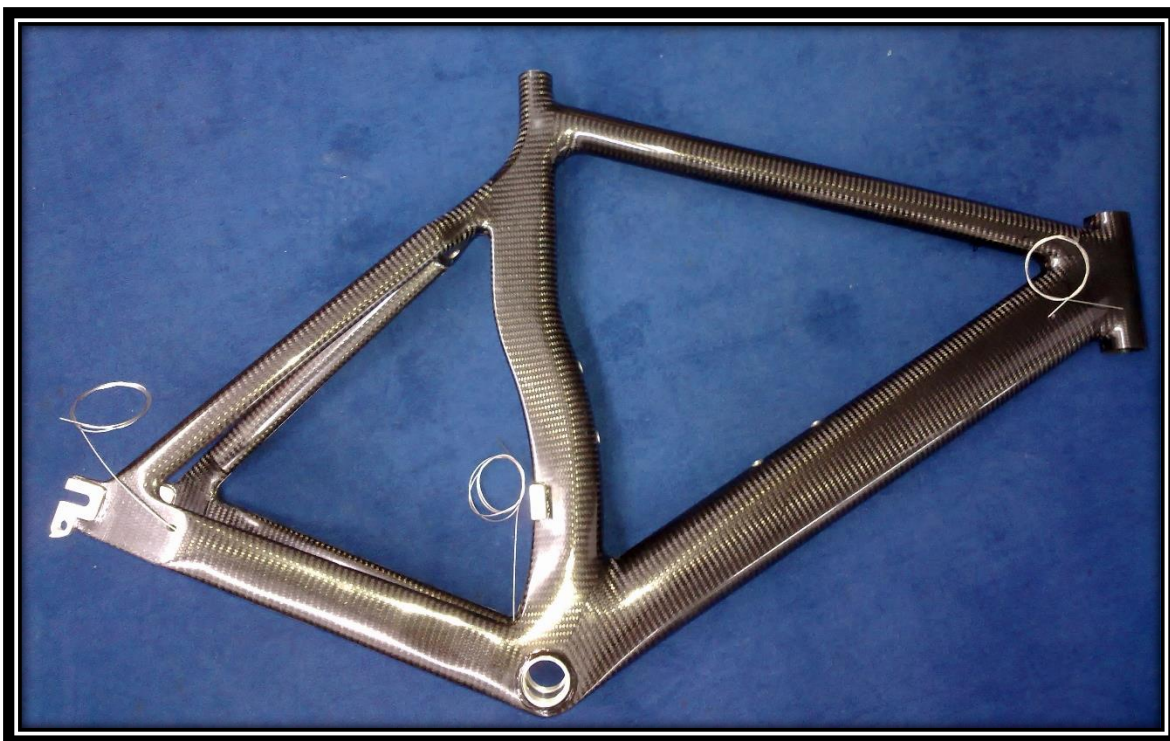
Θ-10.9 Ο σκελετός έτοιμος μετά το φούρνισμα. Διακρίνεται με γυμνό οφθαλμό η εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας.



Θ-10.10 Ο σκελετός έτοιμος για το καλιμπράρισμα.



Θ-10.11 Ο σκελετός καλιμπράρεται.



Θ-10.12 Ο σκελετός έτοιμος για βαφή (προαιρετικά) και συναρμολόγηση.

10.2 Δοκιμές από αθλητές

Με τη νέα αυτή μέθοδο συνδυασμού φούρνου, αντλίας κενού, πνευματικού δονητή και των μεθόδων που αναπτύχθηκαν, παράχθηκε ένας περιορισμένος αριθμός σκελετών που δόθηκε σε επαγγελματίες ποδηλάτες ούτως ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους.

Καθώς οι αθλητές αυτοί είχαν κάνει και αντίστοιχες δοκιμές στο πλαίσιο από autoclave αλλά και το αρχικό πλαίσιο που κατασκευάστηκε στον κλίβανο ήταν οι πλέον κατάλληλοι για να κάνουν μια εμπειριστατωμένη σύγκριση μεταξύ των δύο αλλά και μεταξύ του πλαισίου GRAM και άλλων σκελετών που προτιμώνται συνήθως για αγωνιστική χρήση.

Αυτή τη φορά τα αποτελέσματα ήταν ακόμα καλύτερα σε οδηγική συμπεριφορά. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του σκελετού που παρατήρησαν οι αθλητές είναι ότι προσφέρει ιδιαίτερη άνεση κατά την οδήγηση στον αναβάτη, ενώ παρουσιάζει και εξαιρετική οδηγική συμπεριφορά. Συνήθως όταν ένα πλαίσιο είναι ιδιαίτερα δύσκαμπτο και στιβαρό οι κραδασμοί μεταφέρονται στον αναβάτη και ακόμα και μια ολιγόλεπτη βόλτα μπορεί να προκαλέσει πόνο σε μέση και αυχένα.. Επιπλέον, οι κραδασμοί μπορεί να προκαλέσουν αστάθειες στο τιμόνι γεγονός που είναι ιδιαίτερα εμφανές στις στροφές. Η αυξημένη ικανότητα απορρόφησης κραδασμών του πλαισίου GRAM προσφέρουν πολύ άνετη και ξεκούραστη οδήγηση με απόλυτο έλεγχο ακόμα και σε κακής ποιότητας οδόστρωμα.



Θ - 10.13 Ο Παγκόσμιος πρωταθλητής Χρήστος Γαρέφης , ο κορυφαίος αθλητής στην κατηγορία του παγκοσμίως και όχι μόνο δοκιμάζει το σκελετό σε ακραίες αγωνιστικές συνθήκες.



Θ - 10.14 Ο κορυφαίος Έλληνας προπονητής Βασίλης Κρομμύδας με παγκόσμιο ρεκόρ στη Χαβάη όπου διεξάγεται ο πιο δύσκολος αγώνας στον κόσμο επιβεβαιώνει και αυτός τα αποτελέσματα μας δοκιμάζοντας το σκελετό και αυτός και οι κορυφαίοι αθλητές του.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του σκελετού που παρατήρησαν οι αθλητές είναι ότι προσφέρει ιδιαίτερη άνεση κατά την οδήγηση στον αναβάτη, ενώ παρουσιάζει και εξαιρετική οδηγική συμπεριφορά. Συνήθως όταν ένα πλαίσιο είναι ιδιαίτερη άκαμπτο και στιβαρό οι κραδασμοί μεταφέρονται στον αναβάτη και ακόμα και μια ολιγόλεπτη βόλτα μπορεί να προκαλέσει πόνο σε μέση και αυχένα.. Επιπλέον, οι κραδασμοί μπορεί να προκαλέσουν αστάθειες στο τιμόνι γεγονός που είναι ιδιαίτερα εμφανές στις στροφές. Η αυξημένη ικανότητα απορρόφησης κραδασμών του πλαισίου GRAM προσφέρουν πολύ άνετη και ξεκούραστη οδήγηση με απόλυτο έλεγχο ακόμα και σε κακής ποιότητας οδόστρωμα.

Παρά την ενδοτικότητα του σκελετού, οι αθλητές παρατήρησαν ότι η μετάδοση ισχύος κατά την οδήγηση και οι απώλειες κατά το σπριντ διατηρήθηκαν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, αντίστοιχα σε αυτά του σκελετού που παράχθηκε με autoclave. Συνήθως όταν ένας σκελετός είναι ενδοτικός είναι και πιο «μαλακός» με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται πολύ πιο εύκολα. Χάρη στη διαστρωμάτωση του πλαισίου GRAM και την κατάλληλη τοποθέτηση μονοδιευθυντικών ινών κατά μήκος των σωλήνων down tube και chain stays, ο σκελετός διατηρεί τη δυσκαμψία του κοντά στη μεσαία τριβή, το κούτελο και τον πίσω άξονα, με αποτέλεσμα μικρές απώλειες κατά το πεταλάρισμα αλλά και υψηλή μετάδοση ισχύος με παράλληλη απορρόφηση κραδασμών.

Ωστόσο η πιο σημαντική διαπίστωση είναι ότι στο τέλος των δοκιμών κανένας σκελετός δεν είχε υποστεί βλάβη ή αστοχία. Και υπάρχουν και δοκιμές που κράτησαν χρόνια. Δοκιμές έγιναν και σε πιο δύσκολες συνθήκες, σε ανώμαλο οδόστρωμα γεμάτο

λακκούβες και σαμαράκια με αυξημένη ταχύτητα. Επιπλέον, οι αθλητές έκαναν δοκιμές μέχρι και σε αγώνες, όπου η επαφή με άλλους ποδηλάτες αλλά και οι πτώσεις είναι συνηθισμένες. Τέτοιου τύπου καταστάσεις προκαλούν φορτίσεις εκτός των προδιαγραφών που προβλέπει το ISO και μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικές αστοχίες στον σκελετό του ποδηλάτου. Το γεγονός ότι το πλαίσιο GRAM βγήκε αλώβητο από τις δοκιμές επιβεβαιώνει ότι ο τρόπος αυτός κατασκευής παράγει πλαίσια ικανά να απορροφήσουν καλύτερα τα κρουστικά φορτία από πτώσεις, λακκούβες και σαμαράκια χωρίς την εμφάνιση βλάβης.

Κεφάλαιο 11 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν, μας οδήγησαν σε ξεκάθαρα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα των μεθόδων και των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή τους και προτάσεις εφαρμογών τους σε διάφορους τομείς.

Αποτελέσματα μεθόδου σχεδιασμού

Η μέθοδος σχεδιασμού και ανάλυσης η οποία αναπτύχθηκε είναι η ακόλουθη: Αφού σκεφτούμε την κατασκευή που θέλουμε να κάνουμε, σχεδιάζουμε και μελετάμε ανεξάρτητα τμήματά της σε στρεπτική και καμπτική δυσκαμψία καθώς και σε αεροδυναμική συμπεριφορά αν απαιτείται και μετά τα συνθέτουμε και κάνουμε ελάχιστες έως και καθόλου δοκιμές στο σύνολο. Ακολουθεί η μελέτη της διαστρωμάτωσης σε ένα τελικό σχέδιο όπου ρυθμίζουμε την αντοχή και τη συμπεριφορά της κατασκευής μας μέσω αυτής. Με αυτόν τον τρόπο γλυτώνουμε την κοστοβόρα διαδικασία σχεδιασμού ολόκληρων μοντέλων και τις χρονοβόρες αλλαγές των ενώσεων τους που θα απαιτούνταν στην περίπτωση που σχεδιάζαμε και μελετούσαμε σε κάθε σενάριο ολόκληρο μοντέλο. Επιπλέον αυτή η μέθοδος μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε και βάση δεδομένων για μελλοντική χρήση και εύκολη εξέλιξη νέων υποπαραλλαγών της κατασκευής.

Στο σκελετό του ποδηλάτου στην περίπτωσή μας μελετήσαμε διάφορα πιθανά σχήματα σε κάθε σωλήνα τόσο σε αεροδυναμική όσο και σε δυσκαμψία και επιλέξαμε για κάθε σωλήνα ένα σχήμα. Μετά τα ενώσαμε και δημιουργήσαμε το τελικό μοντέλο το οποίο και μελετήσαμε ως συνολικό μοντέλο για διαστρωμάτωση. Η διαδικασία αυτή όχι μόνο μας κέρδισε πολύ χρόνο στο κομμάτι του σχεδιασμού αλλά μας έδωσε και τη δυνατότητα να κάνουμε πολύ εύκολα υποπαραλλαγές πχ διαφορετικά μεγέθη. Στα πλεονεκτήματα περιλαμβάνεται η δυνατότητα εύκολης δημιουργίας νέων μοντέλων με διαφορετικά χαρακτηριστικά αφού έχουμε μια βάση δεδομένων έτοιμη με πληροφορίες για αεροδυναμική και δυσκαμψία.

Αποτελέσματα μεθόδου κατασκευής

Η μέθοδος κατασκευής η οποία αναπτύχθηκε είναι η ακόλουθη: Κάνουμε τη διαστρωμάτωση που έχουμε πάρει από τη μελέτη μας για το οποίο εξάρτημα θέλουμε να κατασκευάσουμε επιλέγοντας εξ αρχής τον τύπο *oven* που θα ακολουθήσουμε. Μετά για το ψήσιμο αντί για *autoclave* με υψηλή πίεση και θερμοκρασία χρησιμοποιούμε απλό κλίβανο ή και θερμαινόμενες κουβέρτες με απλό *vacuum* από την ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια του ψησίματος και όσο η μήτρα η οποία έχει χρησιμοποιηθεί βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση εφαρμόζουμε δονήσεις πχ με έναν πνευματικό δονητή στο καλούπι κοντά στο σημείο

συντονισμού του. Κάνουμε αργό κύκλο ψησίματος επιλέγοντας τη χαμηλότερη θερμοκρασία που μας επιτρέπει η μήτρα ώστε να αυξηθεί ο χρόνος κατά τον οποίο το ιξώδες της είναι χαμηλό. Αυτό διώχνει τις φυσαλίδες μέσα από τις στρώσεις του σύνθετου υλικού. Αν απαιτείται κάνουμε και post cure για να ανεβάσουμε το Tg ή για να αυξήσουμε την αντοχή σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα είναι ένα εξάρτημα με πορώδες, αντίστοιχο αυτού που θα είχαμε, αν είχαμε κάνει τη διαδικασία σε autoclave. Το τελικό κομμάτι όμως είναι λιγότερο εύθραυστο και έχει σημαντικά καλύτερη αντοχή σε χτυπήματα, ενώ παρουσιάζει αντίστοιχη ή μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Στο σκελετό του ποδηλάτου στην περίπτωση μας το αποτέλεσμα σε σχέση με το σκελετό που κατασκευάστηκε σε autoclave ήταν η σημαντικά αυξημένη απορροφητικότητα κραδασμών και η μη αστοχία σε αρκετές περιπτώσεις όπου ο σκελετός από το autoclave αστόχησε π.χ. από πέτρες που πέταξαν τα λάστιχα και από πτώσεις. Επιπλέον η μη χρήση autoclave μειώνει σημαντικά το κόστος επένδυσης άρα και το κόστος του τελικού προϊόντος.

Άλλοι τομείς εφαρμογής της μεθόδου

Οι τομείς που μπορούν να αξιοποιήσουν αυτή την τεχνολογία είναι πάρα πολλοί και ενδεικτικά θα αναφέρουμε μερικούς από αυτούς.

- Η Βιομηχανία Αθλητικού Εξοπλισμού πάσης φύσεως: Ρακέτες, παπούτσια, μπαστούνια γκολφ και πολλά άλλα θα γίνουν πιο προσιτά και πιο ανθεκτικά για μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού. Η αυξημένη διάρκεια ζωής τους σημαίνει μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα και η επιπλέον ελαστικότητά τους μείωση τραυματισμών για τους χρήστες τους.
- Η Αυτοκινητοβιομηχανία: Η χρήση της μεθόδου θα οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης σύνθετων υλικών στα συμβατικά αυτοκίνητα θα σημαίνει αντικατάσταση μεταλλικών τμημάτων από άλλα κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά, πχ carbon, με αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας σε περίπτωση σύγκρουσης αυξάνοντας την ασφάλεια. Ακόμα η χρήση ανθρακονημάτων σε αυτά τα σημεία σημαίνει μείωση του συνολικού βάρους του οχήματος και τελικά μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.
- Η Ιατρική: Λόγω της μείωσης του κόστους κατασκευής τους θα έχουμε αύξηση της χρήσης ανθρακονημάτων σε αναπηρικά αμαξίδια, σε πατερίτσες, σε προσθετικά μέλη, σε κηδεμόνες κτλ. αφού θα είναι πιο οικονομικά και διαθέσιμα σε ευρύτερο κοινό στο οποίο θα διευκολύνει περισσότερο τη ζωή του .
- Η Ναυτιλία: Η εφαρμογή σύνθετων υλικών σε περισσότερα και μεγαλύτερα σκάφη θα προσφέρει καλύτερη συμπεριφορά σε πρόσπτωση κυμάτων και μεγαλύτερη διάρκεια

ζωής. Πιθανή και η μείωση κατανάλωσης καυσίμων από την ελαστικότερη συμπεριφορά της καρίνας.

- Η Αεροπορική Βιομηχανία: Με τη χρήση της μεθόδου μπορεί να επιταχυνθεί η επέκταση της χρήσης ανθρακονημάτων σε μη δομικά μέρη πχ καθίσματα και μετά όταν θα βγουν κατάλληλες πιστοποιήσεις μπορεί να εφαρμοστεί και σε δομικά τμήματα των αεροσκαφών με μικρότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με το υπάρχον.
- Η Οικοδομή: Σε κτήρια ήδη δοκιμάζονται σύνθετα υλικά και η χρήση τους μπορεί να επεκταθεί για μείωση του πορώδους και αύξηση της αντοχής τους πχ σε σεισμούς .
- Βιοcomposites: Η μέθοδος φαίνεται να μπορεί να εφαρμοστεί και να ταιριάζει πολύ με βιολογικές ρητίνες φυτικής ή ζωικής προέλευσης και οικολογικές πχ φυτικές ίνες. Τα υλικά αυτά είναι πολύ ευαίσθητα στη θερμοκρασία άρα αναγκαστικά πρέπει να ψήνονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η μη χρήση autoclave προσθέτει στον οικολογικό χαρακτήρα τους.
- Οι Επισκευές Εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά. Ο τομέας είναι πραγματικά τεράστιος και πολύ χρήσιμος αφού δεν καταλήγουν στα σκουπίδια σπασμένες κατασκευές από σύνθετα υλικά που δεν είναι τόσο εύκολο να ανακυκλωθούν. Η επισκευή δεν είναι εύκολο ούτως ή αλλιώς να γίνει σε autoclave οπότε με κλίβανο ή θερμικές κουβέρτες μπορούν να επισκευαστούν τεχνητά μέλη, εξαρτήματα από αθλητικό εξοπλισμό, εξαρτήματα από αυτοκίνητα και πολλές άλλες κατασκευές. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η επαναχρησιμοποίηση του όποιου εξαρτήματος για πολύ καιρό ακόμα. Στο συγκεκριμένο τομέα η εφαρμογή έχει γίνει ήδη σε πάνω από πεντακόσιες περιπτώσεις από το συγγραφέα με καμία αστοχία μέχρι στιγμής!

Επίλογος

Στη συγκεκριμένη διατριβή αναπτύχθηκε μια εναλλακτική μέθοδος σχεδιασμού και μια νέα μέθοδος επεξεργασίας σύνθετων υλικών η οποία αν εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να κάνει τα σύνθετα υλικά πιο προσβάσιμα με αποτέλεσμα να εισαχθούν σε πολλούς τομείς της ζωής μας βελτιώνοντάς την. Θέλω να πιστεύω ότι η επιστημονική κοινότητα και η βιομηχανία θα την εξελίξει ακόμα περισσότερο προς όφελος όλων των ανθρώπων.

Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες

Ως συνέχεια της έρευνας που έγινε θα πρότεινα τα ακόλουθα:

Καταρχήν θα ήταν ιδανικό να ερευνηθούν και να δημιουργηθούν νέες μήτρες οι οποίες θα είναι πιο κατάλληλες για ψήσιμο σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε συνδυασμό με χαμηλή πίεση. Θα έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό το χαμηλό ιξώδες μόλις ρευστοποιηθούν κατά το ψήσιμο ώστε να μπορούν με την εφαρμογή δονήσεων να απομακρύνονται εύκολα οι φυσαλίδες. Επίσης θα πρέπει να παραμένουν σε αυτό το χαμηλό ιξώδες αρκετή ώρα ώστε να προλαβαίνουν να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες. Τέλος θα πρέπει μόλις ολοκληρωθεί το ψήσιμο να έχουν θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης περίπου 30 βαθμούς Κελσίου πάνω από την επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας.

Επίσης στο κομμάτι των λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων προτείνεται να δημιουργηθούν νέοι βελτιστοποιητές και ερευνητές σχεδιασμού οι οποίοι θα μπορούν εύκολα να συνδυάζουν και να συγκρίνουν σχήματα σε δεδομένα χωρία χωρίς να χρησιμοποιούν τοπολογική βελτιστοποίηση που θα οδηγούσε σε σχήματα κατάλληλα για 3D printing. Ιδανικά σε σχήματα σαν του σκελετού του ποδηλάτου θα μπορούσαν οι ενώσεις να λειτουργούν αρχικά σαν «μαύρο κουτί» έχοντας ένα βασικό σχήμα πχ μια σφαίρα και να γίνονται οι δοκιμές στους σωλήνες χωρίς αυτές. Αυτό θα επιτάχυνε ακόμα περισσότερο τη διαδικασία σχεδιασμού αφού οι μηχανικοί δε θα χρειάζεται να στήνουν να λύνουν και να συγκρίνουν όλα αυτά τα δεδομένα χειροκίνητα.

Επιπλέον δοκιμές θα μπορούσαν να γίνουν όχι μόνο με προεμποτισμένα υφάσματα αλλά και με Wet layup και RTM. Αυτές οι μέθοδοι σε συνδυασμό με τις τεχνικές που προτείνονται στην παρούσα εργασία θα μπορούσαν να βελτιώσουν την ποιότητα των κατασκευών που τις χρησιμοποιούν με αποτέλεσμα να τις καταστήσουν εφαρμόσιμες σε τομείς όπου η χρήση προεμποτισμένων υφασμάτων είναι μέχρι τώρα μονόδρομος.

Επιπροσθέτως θα ήταν καλή ιδέα να γίνουν δοκιμές με συνθήκες μεταβαλλόμενης πίεσης όπου θα γίνεται έντονη αυξομείωση της πίεσης κατά το ψήσιμο, με σκοπό, σε συνδυασμό με τις δονήσεις και ότι έχει προαναφερθεί να έχουμε ακόμα καλύτερο αποτέλεσμα στο πορώδες και την αξιοπιστία των τελικών εξαρτημάτων.

Ακόμα θα μπορούσαν να γίνουν δοκιμές με κατάλληλα όργανα μέσα στο προς κατασκευή εξάρτημα, όπου δε θα ολοκληρώνεται το ψήσιμο της μήτρας, αλλά θα φτάνει σε ένα ποσοστό της τάξης του 90%. Με αυτό τον τρόπο θεωρητικά θα αυξάνεται η ελαστικότητα της μήτρας και θα μπορέσουν να μειωθούν σημαντικά οι αστοχίες.

Αυτές είναι μερικές ιδέες για περαιτέρω έρευνα που μπορούν να δοκιμαστούν είτε μεμονωμένες είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους, οι οποίες εκτιμώ ότι θα βοηθούσαν ακόμα περισσότερο στην αξιοποίηση των σύνθετων υλικών στην καθημερινότητα.

Βιβλιογραφία

- [1.1] Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, Δημήτρης Ι. Παντελής, (17)
- [1.2] Manufacturing Processes for Advanced Composites, F.C. Campbell, 2004
- [1.3] Johnson, Todd. "History of Composites." ThoughtCo, Aug. 25, 2020, [thoughtco.com/history-of-composites-820404](https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404)
- [1.4] Structural analysis of polymeric composite materials, Mark E. Tuttle, 2004
- [1.5] An Introduction to Advanced Composites and Prepreg Technology, Advanced Composites Group
- [2.1] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous & M. B. Ioannidis, Analysis of Failure Mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fiberglass Composite Tubes, Thin-Walled Structures 24 (1996), 335-352.
- [2.2] Fatigue in composites, Science and technology of the fatigue response of fiber-reinforced plastics, Edited by Bryan Harris, 2003
- [2.3] 3D Fibre Reinforced Polymer Composites L. Tong , A.P. Mouritz and M.K. Bannister, Elsevier 2002
- [3.1] Richard Ballantine, Richard Grant, Ultimate Bicycle Book, 1998
- [4.1] Shimano Bike Fitting <https://www.bikefitting.com/en>
- [4.2] Retul Bike Fitting <https://www.retul.com/>
- [4.3] Bioracer bike fitting <https://bioracermotion.com/>
- [4.4] Guru bike fitting <http://www.gurucycling.com/the-experience/>
- [4.5] Purely custom <https://purelycustomfit.com/>
- [4.6] Cycling 3DMA <https://www.stt-systems.com/motion-analysis/3d-optical-motion-capture/cycling-3dma/>
- [4.7] Vertex fit Systems <http://vertexfitsystems.com/#whitepaper>
- [4.8] Steve Hogg's Cyclefit <https://www.stevhoggbikefitting.com/cyclefit/>
- [4.9] Selle Italia idmatch bike fitting <https://www.selleitalia.com/blog/idmatch-a-scientific-approach-for-wellness-and-performance/>

- [4.10] Clarification Guide of the UCI Technical Regulation—05.10.2021 version. 2021. Available online: <https://www.uci.org/equipment/bh2JJzw1eB0n876rX2iB1> (accessed on 12 January 2021).
- [4.11] A.G. Kitselis, C.S. Nikolakea, D.E. Manolakos, The design process of an optimized road racing bicycle frame, *Machines* 2022, 10, 149.
- [4.12] Lessard, Nemes, Lizotte (Utilization of FEA in the design of composite bicycle frames, *COMPOSITES* Volume 26 Number 1 1995
- [4.13] Peterson, Londry (Finite Element Structural Analysis, Bike Tech, *Bicycling Magazine's Newsletter for the Technical Enthusiast*, SUMMER 1986 VOLUME 5, NUMBER 2
- [4.14] <https://www.sheldonbrown.com/rinard/fea.htm>
- [4.15] Pinarello Dogma whitepaper
- [4.16] European Wind Atlas. Available online: <https://www.wasp.dk/wind-atlas/european-wind-atlas> (accessed on 12 January 2022).
- [5.1] ISO 4210-6, Cycles-Safety Requirements for bicycles Part 6, ISO 2014. Available online: <https://www.iso.org/standard/78081.html> (accessed on 12 January 2022).
- [7.1] A. Treviso, B. Van Genechten, D. Mundo, M. Tournour, Damping in composite materials: Properties and models, *Composites Part B*, 78, (2015) ,144-15
- [7.2] R.D. Adams, M.R. Maheri, Damping in advanced polymer–matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 355, (2003), 126–130
- [7.3] Edson Cocchieri Botelho, Rogério Almeida Silva, Luiz Cláudio Pardini, Mirabel Cerqueira Rezende, A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/epoxy/aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures, *Materials Research*, Vol. 9, No. 3, 247-256, 2006
- [7.4] Joachim Vanwalleghem, Study of damping and vibration behaviour of flax-carbon composite bicycle racing frames, *Faculteit Ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent, Academiejaar 2009-2010*
- [7.5] Katherine Hay, *Dynamic Properties of Hybrid Composite Hollow Cylinders: Application for Bicycle Handlebars*, Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, December, 2014
- [7.6] R. Chandra, S.P. Singh, K. Gupta, Damping studies in Fiber-reinforced composites - a review, *Composite Structures* 46, (1999), 41-51

- [7.7] Ioana C. Finegan, Ronald F. Gibson, Recent research on enhancement of damping in polymer composites, *Composite Structures* 44, (1999), 89-98
- [7.8] Michelle Leali Costa, Edson Cocchieri Botelho, Jane Maria Faulstich de Paiva, Mirabel Cerqueira Rezende, Characterization of Cure of Carbon/Epoxy Prepreg Used in Aerospace Field, *Materials Research*, Vol. 8, No. 3, 317-322, 2005
- [7.9] C. Gernaat, S. Alavi-Soltani, M. Guzman, A. Rodriguez, B. Minaie, Correlation Between Viscoelastic and Mechanical Properties for an Out-of-Autoclave Polymer Composite, Department of Mechanical Engineering, Wichita State University, Wichita, KS 67260
- [7.10] Yeong K. Kim, Isaac M. Daniel, Cure Cycle Effect on Composite Structures Manufactured by Resin Transfer Molding, *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol. 36, No. 14/2002
- [7.11] Ahmed Khattab, Cure Cycle Effect on High-Temperature Polymer Composite Structures Molded by VARTM, *Journal of Composites*, Volume 2013, Article ID 162657
- [7.12] Tien Minh Vo, Cure Temperature Variation and Hygrothermal Effects on an Out-Of-Autoclave Polymer Composite, Bachelor of Science, Department of Mechanical Engineering, Wichita State University, 2009
- [7.13] Dai Ping, Wang Yanbing, Huang Zhixiong, Effect of Thermal Crosslink Conditions on Dynamic Mechanical Behaviors of Flexible Epoxy, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* Dec. 2008
- [7.14] Ryan J. Thorpe, Experimental Characterization of the Viscoelastic Behavior of a Curing Epoxy Matrix Composite from Pre-Gelation to Full Cure, University of British Columbia (Vancouver), April 2013
- [7.15] Khalil Ur Rehman Vora, Mechanical Properties Evolution During Cure for Out-Of-Autoclave Carbon-Epoxy Prepregs, Bachelor of Engineering, NED University of Engineering and Technology, 2006
- [7.16] S. Alavi-Soltani, S. Sabzevari, H. Koushyar and B. Minaie, Thermal, rheological, and mechanical properties of a polymer composite cured at different isothermal cure temperatures, *Journal of Composite Materials* 0(0), 2011
- [7.17] Arash Montazeri, Alireza Khavandi, Jafar Javadpour, Abbas Tcharkhtchi, Viscoelastic properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using two different curing cycles, *Materials and Design* 31, 2010, 3383-3388
- [7.18] Vasileios M. Drakonakis, James C. Seferis, Charalambos C. Doumanidis, Curing Pressure Influence of Out-of-Autoclave Processing on Structural Composites for

Commercial Aviation, Advances in Materials Science and Engineering Volume 2013, Article ID 356824

[7.19] F.Y.C. Boey, S.W. Lye, Effects of Vacuum and Pressure in an Autoclave Curing Process for a Thermosetting Fibre-Reinforced Composite, *Journal of Materials Processing Technology*, 23 (1990), 121-131

[7.20] John Edward Neira, José Daniel Diniz, The Effect of Processing Conditions on the Viscoelastic Properties of Polymer Matrix Composites, 19th International Congress of Mechanical Engineering, November 5-9, 2007, Brasília, DF

[7.21] J. Zhang, B.L. Fox, Characterization and Analysis of Delamination Fracture and Nanocreeep Properties in Carbon Epoxy Composites Manufactured by Different Processes, *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, No. 14, 2006

[7.22] Sung Yi, Harry H. Hilton, M. Fouad Ahmad, Cure Cycle Simulations of Composites with Temperature and Cure Dependent Anisotropic Viscoelastic Properties and Stochastic Delaminations, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 5:81-101,1998

[7.23] Jyotishkumar Parameswaran Pillai, Jürgen Pionteck, Rudiger Haßler, Christophe Sinturel, Viju Susan Mathew, Sabu Thomas, Effect of Cure Conditions on the Generated Morphology and Viscoelastic Properties of a Poly(acrylonitrile–butadiene–styrene) Modified Epoxy–Amine System, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51, 2586–2595

[7.24] R.Olivier, J.P. Cottu, B. Ferret, Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates, *Composites* 26, (1995),509-515

[7.25] Ling Liu, Bo-Ming Zhang, Dian-Fu Wang, Zhan-Jun Wu, Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates, *Composite Structures* 73 (2006) 303–309

[7.26] Hoda Koushyar, Seyed Alavi-Soltani, Bob Minaie, Melanie Violette, Effects of variation in autoclave pressure, temperature, and vacuum-application time on porosity and mechanical properties of a carbon fiber/epoxy composite, *Journal of Composite Materials* 46(16), 1985–2004

[7.27] J. Zhang, B. Fox, Manufacturing Process on the Mode I Interlaminar Fracture Toughness and Nanocreeep Properties of CFRP, Victorian Centre for Advanced Materials Manufacturing School of Engineering and Technology, Deakin University Geelong, VIC 3217, Australia

[7.28] Christian Brauner, Tim B. Block, Holger Puroi, Axel S. Herrmann, Microlevel manufacturing process simulation of carbon fiber/epoxy composites to analyze the

effect of chemical and thermal induced residual stresses, *Journal of Composite Materials* 0(0), 1–21, 2012

[7.29] S. Hernández, F. Sket, C. González, J. Llorca, Optimization of curing cycle in carbon fiber-reinforced laminates: Void distribution and mechanical properties, *Composites Science and Technology* 85 (2013), 73–82

[7.30] O. Dimiriev, S. Mischenko, Optimization of Curing Cycles for Thick-wall Products of the Polymeric Composite Materials, *Advances in Composites Materials - Ecodesign and Analysis*

[7.31] J.B. Johnson, C.N. Owston, The effect of cure cycle on the mechanical properties of carbon-fibre/epoxide resin, *COMPOSITES*, MAY 1973

[7.32] M. Akay, Aspects of Dynamic Mechanical Analysis in Polymeric Composites, *Composites Science and Technology* 47 (1993) 419-423

[7.33] H. Hanselka, U. Hoffmann, Damping Characteristics of Fibre Reinforced Polymers, *Technische Mechanik*, Band 10, Heft 2, 1999, 91-101

[7.34] W. Stark, M. Jaunich, J. McHugh, Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of epoxy carbon-fibre prepregs partially cured in a discontinued autoclave analogue process, *Polymer Testing* 41, 2015, 140-148

[7.35] Onur Coban, Mustafa Ozgur Bora, Tamer Sinmazcelik, Volkan Gunay, Effect of Fiber Orientation on Viscoelastic Properties of Polymer Matrix Composites Subjected to Thermal Cycles, *POLYMER COMPOSITES*, 2010

[7.36] A. De Fenza, E. Monaco, F. Amoroso, L. Lecce, Experimental approach in studying temperature effects on composite material structures realized with viscoelastic damping treatments, *Journal of Vibration and Control*, 2016, Vol. 22(2) 358–370

[7.37] B. Benchekchou, M. Coni, H. V. C. Howarth, R. G. White, Some aspects of vibration damping improvement in composite materials, *Composites Part B* 29B (1998) 809–817

[7.38] Armando Perez-Pena, Andres A. Garcia-Granada, Joaquin Menacho, Jose J. Molins, Guillermo Reyes, A methodology for damping measurement of engineering materials: application to a structure under bending and torsion loading, *Journal of Vibration and Control*, 1–11, 2014

[7.39] Riccardo Vescovini, Chiara Bisagni, A procedure for the evaluation of damping effects in composite laminated structures, *Progress in Aerospace Sciences* 78, (2015), 19–29

- [7.40] Jean-Marie Berthelot, Mustapha Assarar, Youssef Sefrani, Abderrahim El Mahi, Damping analysis of composite materials and structures, *Composite Structures* 85, (2008), 189–204
- [7.41] Jean-Marie Berthelot, Damping analysis of laminated beams and plates using the Ritz method, *Composite Structures* 74, (2006), 186–201
- [7.42] E.C. Botelho, A.N. Campos, E. de Barros, L.C. Pardini, M.C. Rezende, Damping behavior of continuous fiber/metal composite materials by the free vibration method, *Composites: Part B* 37, (2006), 255–263
- [7.43] Ahmed Maher, Fawkia Ramadan, Mohamed Ferra, Modeling of vibration damping in composite structures, *Composite Structures* 46, (1999), 163-170
- [7.44] E. C. Botelho, M.L. Costa, L.C. Pardini, M.C. Rezende, Processing and hygrothermal effects on viscoelastic behavior of glass fiber/epoxy composites, *Journal of Materials Science* 40, (2005), 3615 – 3623
- [7.45] Jinshui Yang, Jian Xiong, Li Ma, Guoqi Zhang, Xintao Wang, Linzhi Wu, Study on vibration damping of composite sandwich cylindrical shell with pyramidal truss-like cores, *Composite Structures* 117, (2014), 362–372
- [7.46] Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials E 756-04, ASTM International
- [7.47] R. Rikards, A. Chate, Vibration and Damping Analysis of Laminated Composite and Sandwich Shells, *Mechanics of Composite Materials and Structures*, 4209-232, 1997
- [7.48] M.R. Maheri, R.D. Adams, Vibration Properties of Structural FRP Composites, *JSME International Journal Series A*, Vol. 42, No.3, 1999
- [7.49] T300 Data Sheet, TORAYCA
- [7.50] A. Kitselis, N.A. Traiforos, D.E. Manolakos, The effect of resonance on the void content in CFRP tubes, *Composites Part B*, 106, (2016), 164-171
- [7.51] <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/301/lectures/node76.html>, November 18, 2016
- [8.1] S.S. Tavares, V. Michaud, J.A.E. Manson, Through thickness air permeability of prepregs during cure, *Compos. Part A* 40 (2009) 1587–1596.
- [8.2] K. Jackson, M. Crabtree, Autoclave quality composites tooling for composite from vacuum bag only processing. In: 47th International SAMPE symposium; 2002, 800–807.

- [8.3] J.L. Kardos, M.P. Dudukovic, R. Dave, Void growth and resin transport during processing of thermosetting-matrix composites, *Adv Polym Sci* 80 (1986) 102–123.
- [8.4] L.K. Grunenfelder, S.R. Nutt, Void formation in composite prepregs - Effect of dissolved moisture, *Compos Sci Technol* 70 (2010) 2304–2309.
- [8.5] F.Y.C. Boey, S.W. Lye, Void reduction in autoclave processing of thermoset composites - Part 1: High pressure effects on void reduction, *Composites* 23 (4) (1992) 261-265.
- [8.6] A.E. Scott, I. Sinclair, S.M. Spearing, M.N. Mavrogordato, W. Hepples, Influence of voids on damage mechanisms in carbon/epoxy composites determined via high resolution computed tomography, *Compos Sci Technol* 90 (2014) 147-153
- [8.7] J. Muric-Nesic, P. Compston, Z.H. Stachurski, On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fiber reinforced polymer composites, *Compos. Part A* 42 (3) (2011) 320-327
- [8.8] P. Olivier, J.P. Cottu, B. Ferret, Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates, *Composites* 26 (1995) 509-515
- [8.9] S.R. Ghiorse, Effect of void content on the mechanical properties of carbon/epoxy laminates. *SAMPE Quart* 24 (1992) 54-59
- [8.10] H. Zhu, B. Wu, D. Li, D. Zhang, Y. Chen, Influence of voids on the tensile performance of carbon/epoxy fabric laminates, *J Mater Sci Technol* 27 (2011) 69–73.
- [8.11] A. Chambers, J. Earl, C. Squires, M. Suhot, The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications, *Int J Fatigue* 28 (2006) 1389-1398
- [8.12] N.C.W Judd, W.W. Wright, Voids and their effects on the mechanical properties of composites – an appraisal. *SAMPE J* 10 (1978) 10-14
- [8.13] L. Liu, B. Zhang, Z. Wu, D. Wang, Effects of cure pressure induced voids on the mechanical strength of carbon/epoxy laminates, *J Mater Sci Technol* 21 (1) (2005) 87–91
- [8.14] H. Huang, R. Talreja, Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites, *Compos Sci Technol* 65 (2005) 1964-1981
- [8.15] J. Tang, W.I. Lee, G.S. Springer, Effects of cure pressure on resin flow, voids, and mechanical properties, *J Compos Mater* 21 (1987) 421-440

- [8.16] M.L. Costa, S.F.M. Almeida, M.C. Rezende, The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates, *Compos Sci Technol* 61 (2001) 2101–2108
- [8.17] L. Liu, B.M. Zhang, D.F. Wang, Z.J. Wu, Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Compos Struct* 73 (3) (2006) 303-309
- [8.18] K. Kocatepe, Effect of low frequency vibration on porosity of LM25 and LM6 alloys, *Mater Des* 28(6) (2007) 1767–1775
- [8.19] C. Nightingale, R. Day, Flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fibre/epoxy composites cured thermally and with microwave radiation, *Compos Part A* 33 (2002) 1021-1030
- [8.20] L.W. Davies, R.J. Day, D. Bond, A. Nesbitt, J. Ellis, E. Gardon, Effect of cure cycle heat transfer rates on the physical and mechanical properties of an epoxy matrix composite, *Compos Sci Technol* 67 (2007) 1892–1899
- [8.21] S. Hernandez, F. Sket, J.M. Molina-Aldareguva, C. Gonzalez, J. Llorca, Effect of curing cycle on void distribution and interlaminar shear strength in polymer–matrix composites, *Compos Sci Technol* 71 (2011) 1331-1341
- [8.22] S.L. Agius, K.J.C. Magniez, B.L. Fox, Cure behaviour and void development within rapidly cured out-of-autoclave composites, *Compos Part B* 47 (2013) 230-237
- [8.23] W.R. Stabler, G.B. Tatterson, R.L. Sadler, A.H. El-Shiekh, Void minimization in the manufacturing of carbon fiber composites by RTM, *SAMPE Q* 23 (2) (1992) 38–42
- [8.24] J. Muric-Nesic, P. Compston, N. Noble, Z.H. Stachurski, Effect of low frequency vibrations on void content in composite materials, *Compos Part A* 40 (4) (2009) 548–551
- [8.25] J. Muric-Nesic, P. Compston, Z.H. Stachurski, On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fibre reinforced polymer composites, *Compos Part A* 42 (2011) 320-327
- [8.26] S.R. Ghiorse, R.M. Jurta, Effects of low frequency vibration processing on carbon/epoxy laminates, *Composites* 22 (1) (1991) 3–8
- [8.27] ASTM D2734-09: Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics
- [8.28] EN ISO 527-5:2014: Plastics - Determination of tensile properties of plastics - Part 5: Test condition for unidirectional fiber reinforced plastic composites.

- [8.29] S. Hernández , F. Sket , C. González, J. Llorca, Optimization of curing cycle in carbon fiber-reinforced laminates: Void distribution and mechanical properties, *Compos Sci Technol* 85 (2013) 73-82
- [8.30] ASTM D695-02a: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics¹
- [9.1] Chang FK, Scott RA, Springer GS. Strength of mechanically fastened composite joints. *J Compos Mater* 1982;16:470–94.
- [9.2] Harris JA, Adams RD. Strength prediction of bonded single-lap joints by nonlinear finite element methods. *Int J Adhesion Adhesives* 1984;4:65–78.
- [9.3] Kweon JH, Ahn HS, Choi JH. A new method to determine the characteristic lengths of composite joints without testing. *Compos Struct* 2004;66:305–15.
- [9.4] Ban CS, Lee YH, Choi JH, Kweon JH. Strength prediction of adhesive joints using the modified damage zone theory. *Compos Struct* 2008;86:96–100.
- [9.5] Shin KC, Lee JJ, DG Lee. A study on the lap shear strength of a co-cured single lap joint. *Int J Adhesion Adhesives* 2000;14:123–39.
- [9.6] Yoon SH, Hong CS. Modified end notched flexure specimen for mixed mode interlaminar fracture in laminated composites. *Int J Fract* 1990;43:R3–9.
- [9.7] Apalak ZG, Apalak MK. Progressive damage modeling of and adhesively bonded unidirectional composite single-lap joint in tension at the mesoscale level. *J Thermoplast Compos Mater* 2006;19:671–702.
- [9.8] Mazumdar SK, Mallick PK. Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC–SMC composites. *Polym Compos* 1998;19:139–46.
- [9.9] Matthews FL, Tester TT. The influence of stacking sequence on the strength of bonded CFRP single lap joints. *Int J Adhesion Adhesives* 1985; 5:13–8.
- [9.10] Kim KS, Yoo JS, Yi YM, Kim CG. Failure mode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints with different bonding methods. *Compos Struct* 2006; 72:477–85.
- [9.11] Tsai MY, Morton J, Matthews FL. Experimental and numerical studies of a laminated composite single-lap adhesive joint. *J Compos Mater* 1995;29:1245–75.
- [9.12] Song MH, Kweon JH, Kim SK, Kim C, Lee TJ, Choi SM. An experimental study on the failure of carbon/epoxy single lap reveted joints after thermal exposure. *Compos Struct* 2008;86:125–34.
- [9.13] Kairouz KC, Matthews FL. Strength and failure modes of bonded single-lap joints between cross-ply adherends. *Composites* 1993;24:475–84.
- [9.14] Min-Gyu Song, Jin-HweKweon, Jin-Ho Choi, Jai-Hyun Byun, Min-Hwan Song, Sang-Joon Shin, Tae-Joo Lee, Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints, *Composite Structures*, 92, 2010, 2194–2202.
- [9.15] Lee SW, Lee DG, Jeong KS. Static and dynamic torque characteristics of composite co-cured single lap joint. *J Compos Mater* 1997;31:2188–201.

- [9.16] Kradinov V, Barut A, Madenci E, Ambur DR. Bolted double-lap composite joints under mechanical and thermal loading. *Int J Solids Struct* 2001;38:7801–37.
- [9.17] Cao Z, Cardew-Hall M. Interference-fit riveting technique in fiber composite laminates. *Aerosp Sci Technol* 2006;10:327–30.
- [9.18] Kim KS, Yoo JS, An JM, Jang YS. Failure mode and strength of unidirectional composite single-lap bonded joints. I. Experiments. *J Kor Soc Compos Mater* 2004;17:14–21.
- [9.19] Xiao Y, Ishikawa T. Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation). *Compos Sci Technol* 2005;65:1022–31.
- [9.20] Parker BM, Waghorne RM. Surface pretreatment of carbon fiber-reinforced composites for adhesive bonding. *Composites* 1982;13:280–8.
- [9.21] Zhang C, Hoa SV, Ganesan R. Experimental characterization of interlaminar shear strengths of graphite/epoxy laminated composite. *J Compos Mater* 2002;36:1615–52
- [9.22] Coates, C. W. and Armanios, E.A., "Monotonic and Fatigue Response of Co-cured Composite Lap joints with Modified Interfaces", Proceedings of American Helicopter Society 56th Annual Forum. Virginia Beach, VA May 2-4, 2000.
- [9.23] Coates, C. and Armanios, E.A., "Assessment of Nested Overlap and Transverse Interfacial Layer in Co-Cured Composite Single Lap Joints", Proceedings of the Fifteenth Annual ASC/ASTM D-30 Technical Conference, Texas A & M University, Texas, Sept 24-27, 2000
- [9.24] Coates. C. and Armanios, E "Testing and Prediction of Co-Cured Composite Single Lap Joints with Modified Interface under Cyclic Loading" Proceedings of the 16th Annual ASC Technical Conference. Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg. VA September 9-12-2001
- [9.25] Zeng. Q. and Sun. C. T, "A New Bonded Composite Wavy Lap Joint", Proceedings of the 41th " AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conference. April 2-6.2000.
- [9.26] Zeng. Q. and Sun. C. T, "Novel design of a bonded lap joint", *Journal of AIAA*, vol. 39. pp. 1991- 1996, 2001.
- [9.27] Zeng. Q. and Sun. C. T, "Fatigue performance of a bonded wavy composite lap joint", Proceedings of the 42nd "AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conference, Seattle, Washington, April 16-19. 2001.
- [9.28] Zeng. Q. and Sun. C. T, "Fatigue performance of a bonded wavy composite lap joint". *Fatigue Fracture Engineering Material Structures*, vol. 27, pp. 413-422, 2004.
- [9.29] Tan, X., & Armanios, E. (2007). "An assessment of fatigue limit predictors of graphite/epoxy co-cured composite joints through quasi-static Acoustic Emission count peaks." In American Society for Composites - 22nd Technical Conference of the American Society for Composites 2007 - Composites: Enabling a New Era in Civil Aviation (Vol. 1, pp. 81-96)



- [9.30] Salih Akpinar The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers Composites Part B: Engineering Volume 67, December 2014, Pages 170-178
- [9.31] Graham, S. and Crane, R., "Stress Analysis of Asymmetric Co-Cured Stepped-Lap Joints," Journal of ASTM International, Vol. 2, No. 8, 2005, pp. 1-13,
- [9.32] Cao, Caihua and Dancila, D. Stefan, "Damage and failure analysis of co-cured fiber-reinforced composite joints with unidirectional lay-up, Proceedings of the 44th" AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Norfolk, VA April 7-10 2003.
- [9.33] Cao, Caihua and Dancila, D. Stefan, "Differentiation of damage and failure mechanisms of cocurcd fiber reinforced composite joints using acoustic emission, Proceedings of the 45th" AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Palm Springs, CA April 19-22, 2004.
- [9.34] Tan, X. and Armanios. E. "Comparison of Co-cured Composite Joint Strength under Fatigue Loading", Proceedings of 21st Annual Technical Conference of the American Society for Composites, Dearborn, MI, September 17-20, 2006
- [9.35] J. Ahamed, M.W. Joosten, C.H. Wang, Ply-interleaving technique for joining hybrid carbon/glass fibre composite materials, Compos. Part A Appl. Sci. Manufact. 2016;84:134-146.
- [9.36] J. Ahamed, M. Joosten, P. Callus, Michael R. Wisnom, Chun H. Wang, Ply-overlap hybrid technique for joining dissimilar composite materials, Materials & design 2016;100:157-167.
- [9.37] P.P. Camanho, A. Fink, A. Obst, S.Pimenta, Hybrid titanium–CFRP laminates for high-performance bolted joints, Compos. A: Appl. Sci. Manuf.40(12) (2009) 1826–1837.
- [9.38] A. Fink, P.P. Camanho, J.M.Andrés, E.Pfeiffer, A. Obst, Hybrid CFRP/titanium bolted joints: performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor, Compos. Sci. Technol.70(2) (2010)305–317.
- [9.39] B. Kolesnikov, L. Herbeck, A. Fink, CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints, Compos. Struct.83(4) (2008) 368–380.
- [9.40] ISO 527-5. Determination of tensile properties of plastics -Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites.
- [9.41] ISO 14125. Fibre -reinforced plastic composites - Determination of flexural properties.
- [9.42] A. G. Kitselis, N. A. Traiforos, D. E. Manolakos. The effect of resonance on the void content in CFRP tubes. Composites Part B: Engineering, 106, 2016, 164-171.

Δημοσιεύσεις

A.G. Kitselis, N. A. Traiforos, D. E. Manolakos. The effect of resonance on the void content in CFRP tubes. Composites Part B: Engineering, 106, 2016, 164-171.

A.G. Kitselis, C.S. Nikolakea, D.E. Manolakos, The design process of an optimized road racing bicycle frame, Machines 2022, 10, 149.

The Design Process of an Optimized Road Racing Bicycle Frame

Alexandros G. Kitselis ^{1,2,*} , Chrysavgi S. Nikolakea ² and Dimitrios E. Manolakos ¹ 

¹ Manufacturing Technology Division, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, 15780 Athens, Greece; manolako@central.ntua.gr

² Gram Carbon, 10442 Athens, Greece; xrysa.nikolakea@gmail.com

* Correspondence: grammarios@gmail.com; Tel.: +30-210-5136690

Abstract: This paper recommends an alternative designing process for a superior road racing bicycle frame manufactured from composite materials that is much faster than typically used design processes. The main design goal is for the rider to be faster under the same riding conditions and with the same effort made. This performance gain is the result of a combined structural and aerodynamic optimization process used during the design process along with the selection of the materials. As the needs of the rider are the focus of this design proposal, the optimization can be carried out only after they are understood. The main difference in this approach compared to the typically used methodology is that, instead of analyzing the frame as a whole from the beginning of the design process and the CFD and CAE iterations, we examine each candidate part of the frame separately. After evaluating the parts' performances, we select those that performed better to create a single frame. This final frame design is used to choose the appropriate layout that would meet the performance needs of the riders and the necessary safety regulations. The benefit of this approach is that the design time is reduced, allowing the product to reach the market faster. Furthermore, it is more convenient and easier to make any modifications required by marketing or regulations.

Keywords: bicycle frame design; spaceframe; carbon fiber composites; computer-aided design; finite element analysis; computational fluid dynamics; laminate optimization; quasi-isotropic layout



Citation: Kitselis, A.G.; Nikolakea, C.S.; Manolakos, D.E. The Design Process of an Optimized Road Racing Bicycle Frame. *Machines* **2022**, *10*, 149. <https://doi.org/10.3390/machines10020149>

Academic Editor: Xiaosheng Gao

Received: 9 November 2021

Accepted: 4 February 2022

Published: 18 February 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

After their introduction and mass production, composite materials such as polymer matrix composites have been increasingly used in mass transit applications [1] and consumer products. This was because they possessed superior properties, such as strength, fatigue life, stiffness, low weight [2], and sometimes, aesthetics. New recycling methods help with the further expanding use of these materials [3]. Pre-Impregnated Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) sheets, in particular, are a revolutionary material for composites manufacturing. They are lighter, more durable in harsh conditions, and allow more aerodynamic shapes to be manufactured. Non-CFRP frames are comprised of many separate tubes, which are then united by using different methods, such as soldering (if they are metal frames). This creates a “bumpy” surface at the tubes' joints, which in turn may create turbulence in the flow when riding. CFRP frames may also have separate tubes, but their joints are not visible over the paint. The smooth surface allows the air to flow around it without causing turbulence. Furthermore, CFRP can be used to create a plethora of shapes that would not be easily manufactured with traditional materials, eliminating any manufacturing restrictions that non-CFRP frames face. In addition, the correct use of their orthotropic properties by the engineer can create products that are stiff in one direction and more compliant in another, leading to great design freedom. This makes them an ideal material for bicycle frame manufacturing by offering the advantages of high strength and stiffness to weight ratios, long fatigue life, low density, corrosion resistance, wear-resistance, and environmental stability [4] along with low weight. For example, a

carbon/epoxy bicycle frameset may weigh less than 1 kg, and this is much less than the 5 kg weight of a same steel frame [4].

Advanced knowledge of modern CAD modeling programs, such as SolidWorks, CATIA, Creo, Siemens NX, etc., is necessary to make the design and evaluation of the initial frame easier and its modifications more flexible until a final shape is attained [5]. The creation of CAD models instead of physical prototypes during the design process is faster, costs less (both because of time saved and material waste), and allows the engineers to test much more virtual solutions compared to actual prototypes. The above factors make the creation of CAD models a much more efficient method to design products [6,7].

For an evaluation of the aerodynamic performance of the resulting bicycle frame from each iteration step during the design process, CFD is used to easily set up and solve the complex equations that describe the airflow around the bicycle [8,9]. Depending on available computing power, many different scenarios can run simultaneously, resulting in a very fast bicycle frame in less time compared to physical prototypes and wind-tunnel or real-life testing. A frame that is manufactured by taking into consideration aerodynamic principles is faster under the same conditions than a non-aerodynamic frame because it requires less effort (and therefore, energy output) by the rider [10]. These CFD tools are the same for the ones used in the analysis of various other applications, such as aircrafts [11,12], wind turbine blades [13], and underwater vehicles [14].

The design of a state-of-the-art bicycle frame also requires a precise understanding of the applied loading conditions along with a deep knowledge of the stress development and failure analysis of composite materials [15]. Based on theoretical or numerical calculations, the strength and stiffness of the bicycle structures can be predicted and modified to be made optimal before the manufacturing of the prototype takes place. Finite element analysis (FEA) is used to calculate stress/strain fields and fatigue life of the structures [16]. It is a computational tool that is widely used in the automotive industry and manufacturing of composite leaf and coil springs [15,16], suspension lower arms [17], in hovercrafts [18], bus manufacturing [2], wheelchair wheels for athletes [19], aircrafts [20], and wind turbine blades [21]. In bicycle manufacturing, application examples include the design of a composite crank [22] and frames [7,23–27].

The efficient selection of materials and layup for the frame requires the evaluation of its performance under different loading scenarios and material choices. This evaluation includes a variety of composite materials, a wide range of ply angles, and a different number of plies in each part of the frame [28].

This paper presents the whole process of such a project by making an introduction to all the steps needed to design and test the mechanical and aerodynamic properties of a composite road racing bicycle frame by using computational tools with user-friendly environments (with the aid of pre-processors, solvers, and post-processors). The results are visualized for faster and better reviewing.

What makes our designing process different is the manner of the approach. In such a design scenario, the designer would typically start with a given geometry for the frame (typically from bike fitting statistics) and then make a full 3D model of it. The shapes of the tubes are initially chosen for aesthetical reasons and in a way in which all the necessary components can be assembled on the frame. In the CAD environment, the components are fitted on the frame. Then, a typical-sized rider for the given bicycle frame size is fitted on the assembly of the frame and the various components. Next, CFD and FEA simulations are executed to improve the shape of the tubes. This can be performed either manually by using a parametric optimization tool or with the use of a topological optimization tool. Due to the complexity of the bicycle tube connections and their interaction with the other components and the rider, a lot of effort is needed to redesign or modify the existing parts. In addition, it is very demanding on computer time, and especially on pre- and post-processing during computational fluid dynamics analysis and finite element analysis.

Instead of using this strategy, our approach was to start by using a spaceframe model from a bike fitting analysis, which was gradually modified to be able to accommodate the

necessary parts, such as the wheels. Following this, a fast FEA analysis was conducted using beam element spaceframe models to determine which part of the frame received loads in the different loading scenarios. The next step was to design various cross-sections for each tube that seemed to be able to receive the loads that each part of the frame bore. Then, these shapes were tested in CFD for aerodynamic performance as well as in bending and torsional loads for structural evaluation. The selection of the most suitable shape for each tube was made by comparing the advantages of each cross-section model and the load requirements of each part of the frame. The 3D design that derived from the combination of the selected spaceframe model and cross-sections for each tube was used to find the appropriate laminate layup that would satisfy the security regulations set by the ISO standards and would have the required lateral stiffness for performance and vertical compliance for comfort.

This approach is less time-consuming because the simulation of separate single tubes is much faster compared to designing and simulating a full model in each design iteration. Compared to full-frame analysis in each iteration, we expect that the result in CFD may be a little different, but the actual percentage of drag for the frame alone compared to the full bicycle rider combo is too small for this to matter. Any possible structural issue, for example, a stress raiser point, can be fully covered by changing the layup or changing the composite material. The above means that this method can bring the product to the market faster and with less cost for the designer and/or manufacturer, thus making it more competitive on the market.

2. Materials and Methods

2.1. Design Decisions and Strategy

In order to develop a product that appeals to a targeted end-user group and possesses sufficient mechanical properties, visual appearance, and other useful features, an effective process plan must be created in the engineering design.

This process plan starts with market needs (what do we need to do and why do we need to do it?), followed by a conceptual design (the ideas, possible solutions, materials, layups, etc.), a preliminary design (sketches, a shortlist of possible solutions), and a detailed design (working drawings, more accurate data, refined cost estimates, finite element analysis, coupon tests). The process ends with the development of a prototype and, finally, the production of the design, as shown in Figure 1 [29].

The basic idea was to go through a variety of structural composite designs, perform appropriate calculations, including FEA, to determine their performance, incorporate the results into a database, work with the data to screen out infeasible solutions or those not meeting the design constraints, and, finally, identify a shortlist of solutions that best meet the design goals [29].

The design brief sets the framework for the design and provides the “need” that the product must satisfy. This is where the planning process comes to life, converting the latter ideas into action. A useful flow chart is shown in Figure 2, describing the whole process and making the visualization easier for the reader [29].

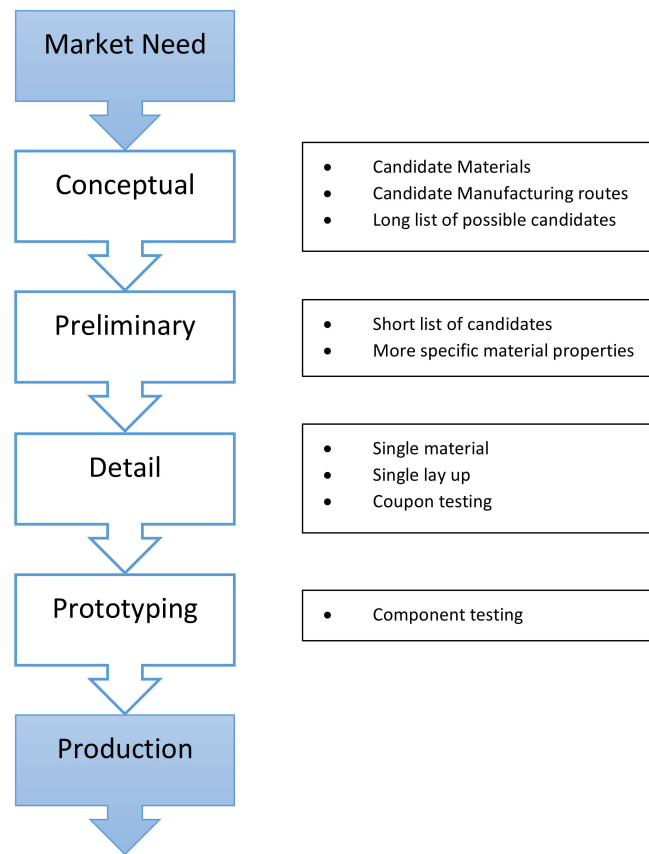


Figure 1. Designing process flow chart adapted from [29].

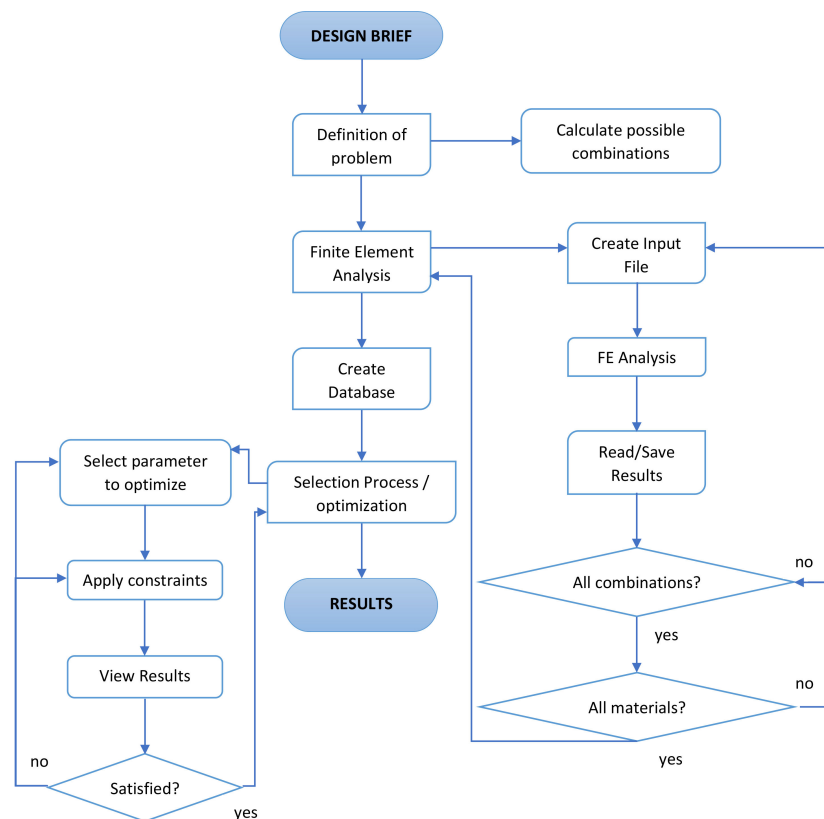


Figure 2. Design and FEA process flowchart adapted from [29].

2.2. CAD Processing and Spaceframe Sequence

Our initial goal was to depict the frame dimensions that came from statistical bike fitting measurements and rider reviews of previous designs so that we could have a starting point for the first frame size design. The other sizes would come up later, after the completion of the prototype, and create a database for future reference and further evolution. This initial design would be changed to meet manufacturing needs and standards compliance. A basic sketch of the frame's tubes and their names are shown in Figure 3 [30]. The design sequence is shown in Figure 4, and the design change steps are described below.

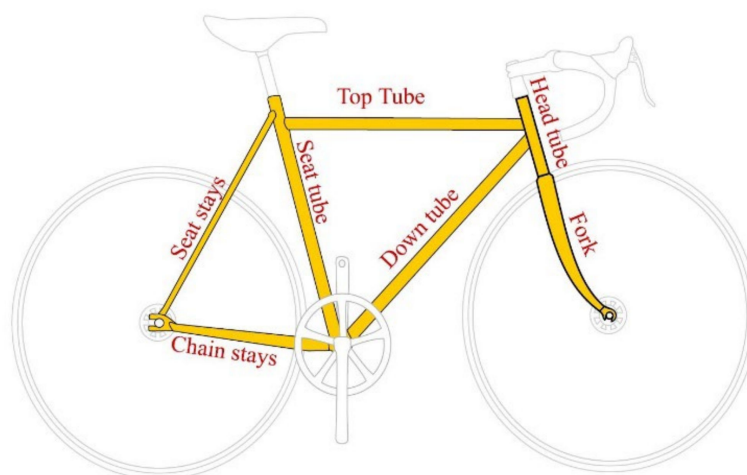


Figure 3. Basic tube diagram of a typical frame [30]. No changes were made to the original illustration (Keithonearth, CC BY 3.0).

Firstly, we wanted the resulting frame to comply with the standards set by the UCI. From the regulations set by the UCI, the following must be true:

- The frame must be of a traditional pattern, i.e., built around the main triangle, which consists of the top tube, head tube, down tube, and seat tube.
- It shall be constructed out of straight or tapered tubular elements (which may be round, oval, flattened, teardrop-shaped, or otherwise in cross-section) such that the form of each element encloses a straight line.
- The elements of the frame shall be laid out in such a way that the joining points shall follow the following pattern: the top tube connects the top of the head tube to the top of the seat tube; the seat tube (from which the seat post shall extend) shall connect to the bottom bracket shell (which houses the bearings for the crankset); the down tube shall connect the bottom bracket shell to the bottom of the head tube.
- The rear triangles shall be formed by the chain stays, the seat stays, and the seat tube, with the seat stays anchored to the seat tube at points falling within the limits laid down for the slope of the top tube.
- The maximum height of the elements shall be 8 cm and the minimum thickness 1 cm.
- The minimum thickness of the elements of the front fork shall be 1 cm; these may be straight or curved.
- The top tube may slope, provided that this element fits within a horizontal template defined by a maximum height of 16 cm and a minimum thickness of 2.5 cm [31].

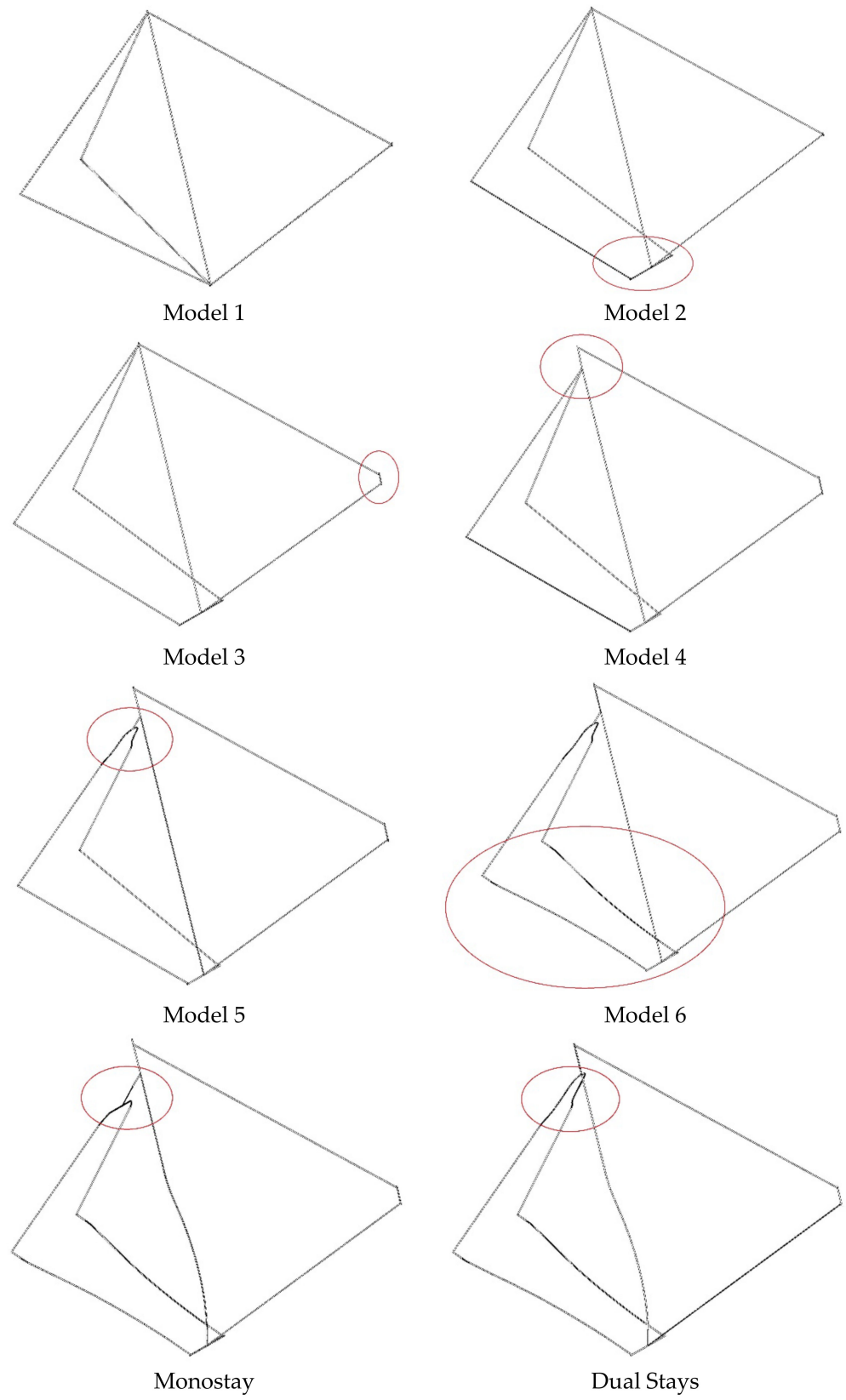


Figure 4. Cont.

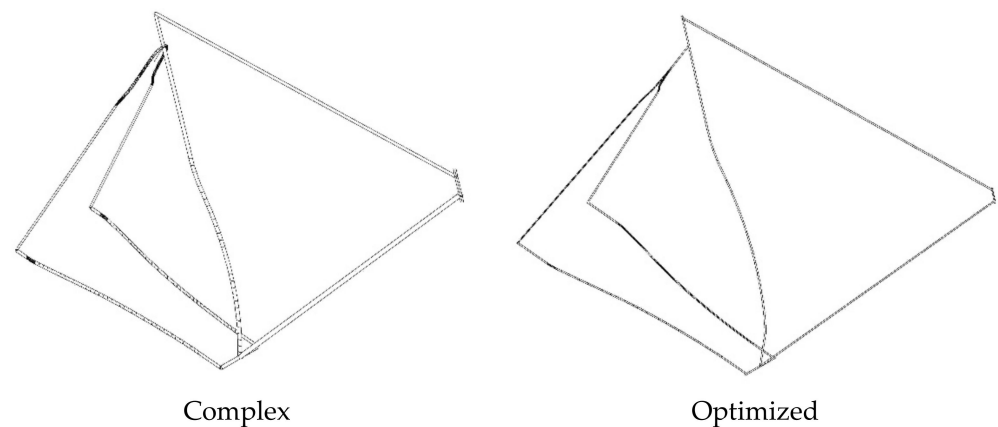


Figure 4. Sequence of simple spaceframe design.

As shown in Model 1, we started with a basic bicycle frame that lacked shape and included only the basic tubing (i.e., top tube, down tube, seat tube, chain stays, and seat stays). Then, the bottom bracket was added to accommodate the crankset in Model_2. The headtube was added to house the steerer tube of the fork in Model_3. The seat stays were lowered to lower the center of gravity in Model_4 and then shaped to accommodate the wheel in Model_5. The chain stays were shaped to create clearance for the wheel and the crankset in Model_6. These first six models were each an evolution of the previous spaceframe model by adding the necessary geometries and accounting for the various parts of the bicycle. The next four models, mono-stay, dual-stay, complex, and optimized, were variations of Model_6 with small differences between each other. They all presented a curvature on the middle and bottom part of the seat tube to create the necessary space for the rear wheel to fit. In the mono-stay model, the two seat stays were united into a single tube before coming into contact with the seat tube. In the dual-stay model, the two seat stays tubes were directly connected to the seat tube. The complex model had the same set-up for the seat stays as the dual-stay model, but the bottom bracket was lowered. The optimized model further shortened the bottom bracket and the head tube lengths, while uniting the seat stays before meeting the seat tube in a mono-stay set-up. The different spaceframe models we developed and examined are shown in Figure 4. In each picture of the various models, the red line encircles the main difference compared to the previous model. As far as the complex and optimized models are concerned, the variations were many and relatively small, therefore no highlights are shown on them.

2.3. Spaceframe Modeling, Testing, and Loading Scenarios

During the changes described in Section 2.2, the spaceframe was tested to determine which loads affected each part of the frame. These loads were used as a guide when adding shape to the spaceframe to acquire optimized mechanical strength and controllable deformation phenomena. The first six models were not actually viable solutions as their shape cannot accommodate all the necessary equipment needed in a bicycle. Even though Model_6 looked like a viable solution, the short chain stays do not allow the rear wheel to fit on the frame. Only the last four models, mono-stay, dual-stays, complex, and optimized, were the real possible solutions; however, we extended the analysis to the first six models to see how the evolution of our design affected the stresses and displacements that occur on the spaceframe models.

The spaceframe was modeled using beam elements to obtain results quickly. By doing this, we get an idea of the needs of each part before applying a shape to it. We can also view a qualitative comparison between the various spaceframe models as far as maximum displacement and stresses are concerned.

There are several methods for testing a bicycle frame, suggested by approved testing methods from ISO 4210-6 standards [32] or by the literature [15,32]. The FEA tests

conducted on the frame were: a horizontal forces scenario as shown in Figure 5a (with a dynamic loading force of 600 N at a frequency of 25 Hz applied on each end of the head tube); a static start-up in a hill climb scenario as shown in Figure 5b (with an overweight rider in mind, and axial loading forces of 143.6 N inwards and 1090 N downwards on each side of the bottom bracket shell); a riding scenario as shown in Figure 5c (with stable chain and seat stays and axial loading forces of 20 kgf at each side pedal connected to the bottom bracket, 70 kgf at the end of the seat tube, and two 20 kgf forces on each end of a handlebar connected to the head tube); and in the end, two frame out-of-plane loading scenarios (one with stable seat, bottom bracket, chain stays, and seat stays and axial loading forces of 600 N at the head tube, as shown in Figure 5d, and one with stable seat, chain stays, seat stays, and head tube and axial loading forces of 600 N at the bottom bracket, as shown in Figure 5e). It should be noted that each spaceframe design model scenario presented previously was tested separately for the first three loading scenarios, these being the horizontal forces, the static start-up, and the riding scenarios. Only the last four models (mono-stay, dual-stays, complex, and optimized) were tested on all five loading scenarios because they were the only viable choices. In Figure 5, the first three loading scenarios applied to the Model_6 spaceframe and the two out-of-plane loading scenarios applied to the optimized geometry spaceframe are presented. Fixed constraints and loads are represented with green and red colors, respectively.

2.4. Static Loads Analysis on the Frame Tubes

After testing the various spaceframe models in the five scenarios described above, we needed to determine the shape of each tube of the frame. To accomplish this, we designed different cross-sections for each tube. These cross-sections were initially tested using a torsional and a bending load. These static tests were used to determine the maximum stress and displacement for each cross-section and then perform a qualitative comparison among them. As we simply wanted to see the effect of the tube shape on the distribution of stresses and whether it could create an area of high stress, we decided to use the same material and layup recipe for the simulations; this was T300 Woven, and the laminate recipe was $[(45F/0F)_2]_T [\pm 45/0-90]_2$.

The cross-sections that were designed for each tube of the frame are listed below and shown in Figures 6–10.

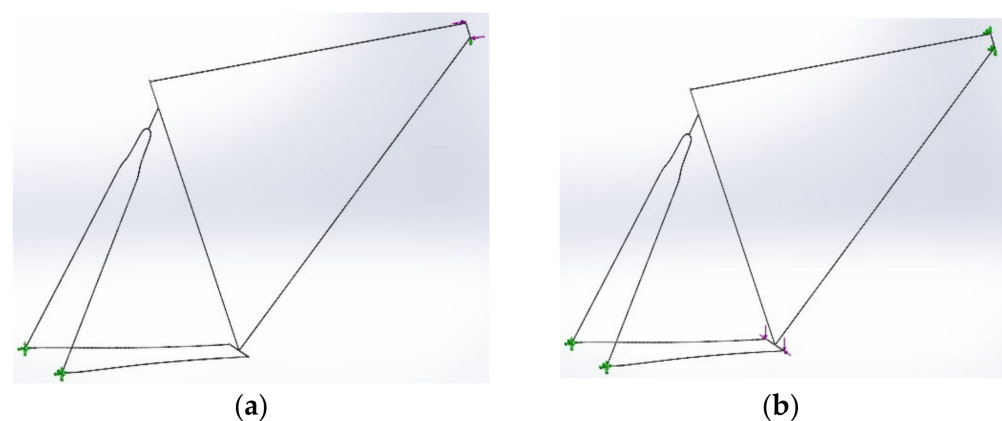


Figure 5. Cont.

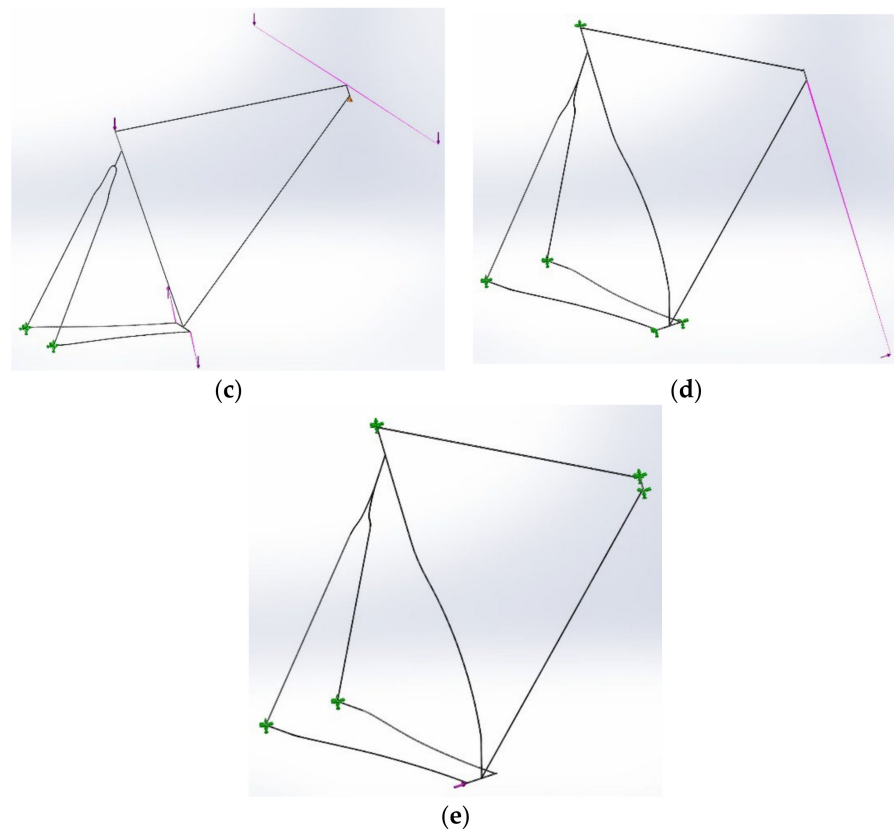


Figure 5. Tested loading scenarios: (a) horizontal forces scenario with fixed constraints on the rear ends of the stays, simple support on the bottom end of the head tube, and forces on either end of the head tube; (b) static start-up scenario with fixed constraints on the rear ends of the stays and either end of the head tube, and loads on either end of the bottom bracket shell; (c) riding scenario with fixed constraints on the ends of stays, simple support on the bottom end of the head tube, and forces on the top of the seat tube, either end of the handlebar and the crankset; (d) out-of-plane load to head tube scenario with fixed constraints on the ends of the stays, top of seat tube, and bottom bracket shell; (e) out-of-plane load to bottom bracket shell scenario with fixed constraints on the ends of the stays and head tube.

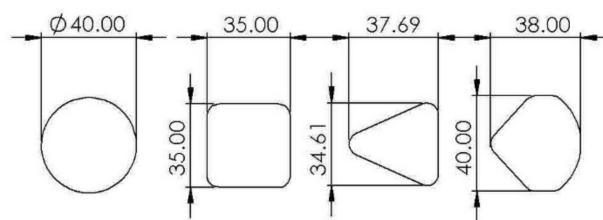


Figure 6. Top tube cross-sections from left to right: circular 40 mm, rectangular 35 × 35 mm, triangular, and complex.

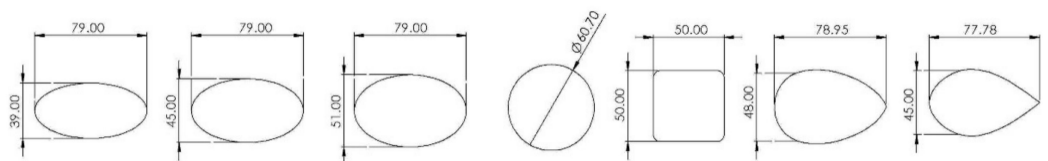


Figure 7. Down tube cross-sections from left to right: oval 39 × 79, oval 45 × 79, oval 51 × 79, circular 60.7 mm, rectangular 50 × 50, complex 1, and complex 2.

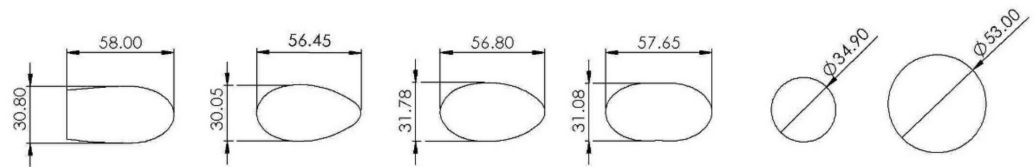


Figure 8. Seat tube cross-sections from left to right: complex 1, complex 2, complex 3, complex 4, and circular 34.9 mm and 53 mm.

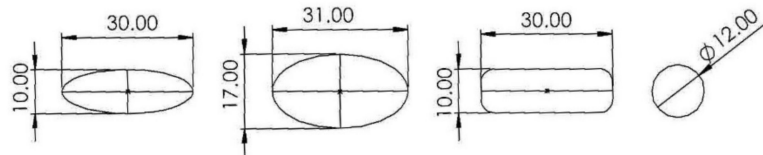


Figure 9. Seat stay cross-sections from left to right: oval 10 × 30, oval 17 × 30, rectangular 10 × 30, and circular 12 mm.

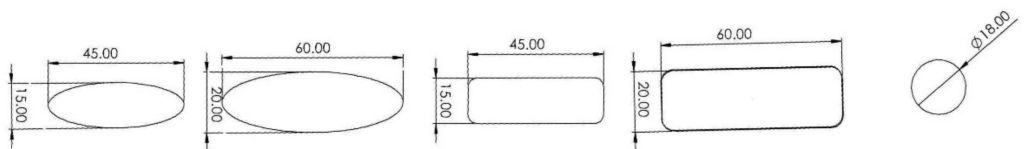


Figure 10. Chain stay cross-sections from left to right: oval 15 × 45, oval 20 × 60, rectangular 15 × 45, rectangular 20 × 60, and circular 18 mm.

The cross-sections designed for the top tube, shown in Figure 6, were:

- A circular cross-section, with 40 mm diameter.
- A square cross-section, 35 mm × 35 mm.
- A triangular cross-section with 37.69 mm height and 34.61 mm width.
- A complex geometry cross-section with 38 mm height and 40 mm width.

The cross-sections designed for the down tube, shown in Figure 7, were:

- Three oval-shaped cross-sections with 79 mm height and width 39, 45, and 51 mm, respectively.
- A circular cross-section with 60.7 mm diameter.
- A square cross-section, 50 mm × 50 mm.
- Two complex geometry cross-sections with 79 mm height and 45 and 48 mm width, respectively.

The cross-sections designed for the seat tube, shown in Figure 8, were:

- Four complex geometry cross-sections with the same height (60 mm) and various widths, as shown in Figure 8.
- Two circular cross-sections with 34.9 mm and 53 mm diameter, respectively.

The cross-sections designed for the seat stays, shown in Figure 9, were:

- Two oval-shaped cross-sections, 10 × 30 mm and 17 × 31 mm, respectively.
- A rectangular cross-section, 10 × 30 mm.
- A circular cross-section with 12 mm diameter.

The cross-sections designed for the chain stays, shown in Figure 10, were:

- Two oval-shaped cross-sections, 15 × 45 mm and 20 × 60 mm, respectively.
- Two rectangular cross-sections, 15 × 45 mm and 20 × 60 mm, respectively.
- A circular cross-section with 18 mm diameter.

In order to run the simulations, all the cross-sections were positioned vertically. A fixed constraint was applied to the bottom end of the tube and the loads (a bending load of 250 N and a torsional load of 50 Nm) were applied to the top end of the tube.

2.5. CFD (Computational Fluid Dynamics) Analysis of the Frame's Tubes

In order to aerodynamically test the cross-sections that we designed for each tube, first, we needed to determine which velocities and yaw angles we needed to use for the simulations.

If the air is still while the rider is driving, the rider still perceives the air as moving with a velocity equal to his. This means that if the rider is driving with wind, the overall velocity of air V_{in} that the rider perceives is the summary of both the velocity of the wind V_w and the velocity of the rider V_r . The angle between the rider's direction and the wind velocity V_{in} is called the yaw angle (α_y). This is also depicted in Figure 11.



Figure 11. Total wind velocity as perceived by the rider.

The next step was to select the wind velocity V_w that a cyclist may drive through. Using a wind atlas [33] similar to the one shown in Figure 12 as a guide, we can estimate that the most common wind velocity is between 3 m/s and 8 m/s, which is the equivalent of 3 and 4 Beaufort. We decided to use 5 m/s or 18 km/h wind velocity in our simulations because it is in the middle of the range.

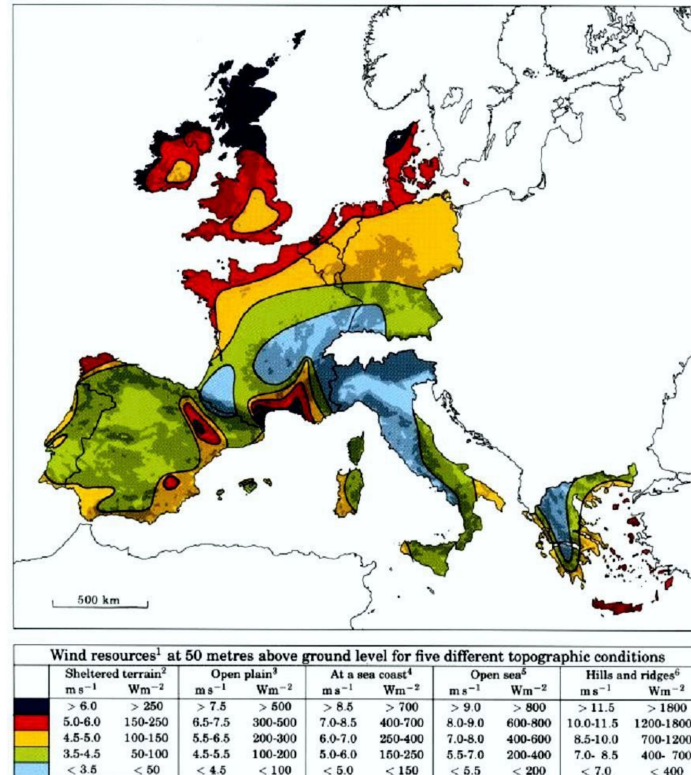


Figure 12. Wind atlas of Europe [33] 1989 DTU Wind Energy, formerly Risø National Laboratory.

The velocity of the rider is chosen to represent a typical velocity he might achieve in a race. Under still wind conditions, a cyclist may develop a speed of 45 km/h; therefore, this

would be one of our design points in the CFD analysis. In the case of a resisting wind of 18 km/h, like the one we chose earlier, we considered a rider velocity of 32 km/h.

The yaw angle of the total perceived wind is the next variable we needed to specify to fully describe our CFD analysis. From Figure 13, it is obvious that the most common yaw angles are between -12 and 12 degrees. We decided to use three different yaw angles in our simulations, 2° , 7° , and 12° .

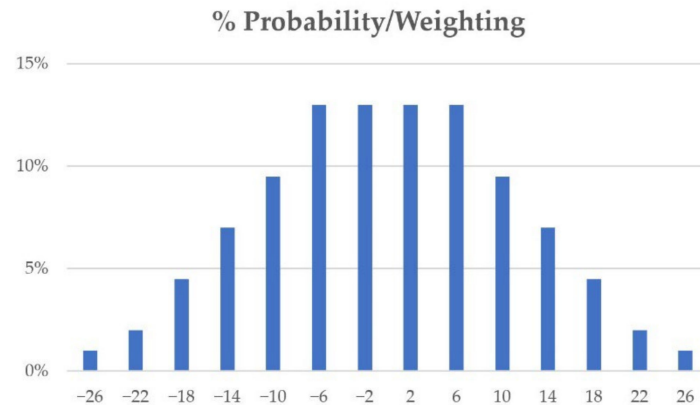


Figure 13. Probability/weighting of each yaw angle.

Table 1 lists the four design points we used for the CFD analysis as well as the values of the different variables. We also listed the weight for the drag and the side force, this being the same for each design point. This is because we wanted to account for both of these forces and not solely for the drag in our analysis, as the side force impacts the overall stability of the bicycle and rider and also the sense of security of the cyclist.

Table 1. The four design points and their weights.

	V_r (km/h)	V_w (km/h)	Yaw Angle (Deg)	Weight (%)	Drag (%)	Side Force (%)
Design point 1	45	0	0	10	85	15
Design point 2	32	18	12	20	85	15
Design point 3	32	18	7	35	85	15
Design point 4	32	18	2	35	85	15

We know from Figure 12 and the wind atlas that a zero-wind velocity is not commonly encountered, therefore we only gave this a 10% weight in the overall analysis. The rest of the design points were given weights according to their probability, as shown in Figure 13. For yaw angles 2° and 7° , the probability is almost the same, whereas, for 12° , the probability is more than half of that for 2° and 7° . That is why design point 2 was given a 20% weight and both design points 3 and 4 were each given a 35% weight.

Each of the cross-sections for the tubes was given the appropriate length and direction, as indicated from a bike fitting analysis. For each cross-section, we created a file with four design points where the computational area, the mesh, and the orientation of the model were the same but the velocities in the \times direction (driving direction of the cyclist) and the Y direction (vertical to the driving direction) changed according to the conditions specified in Table 1.

The computational domain was checked to ensure that it encompassed the entire tube; however, as the orientation of the various tube models varies, so does the size of the domain. The mesh we used was a structured Cartesian mesh that had a basic mesh size of $5 \times 5 \times 5$ mm with a level four refinement level, which means that the mesh size near the surface of the tube is $0.625 \times 0.625 \times 0.625$ mm.

The final step involved the start of the simulation and monitoring the process until its finalization. Figure 14 shows the flow lines around chosen cross-sections of the seat tube in design point 1 CFD analysis.

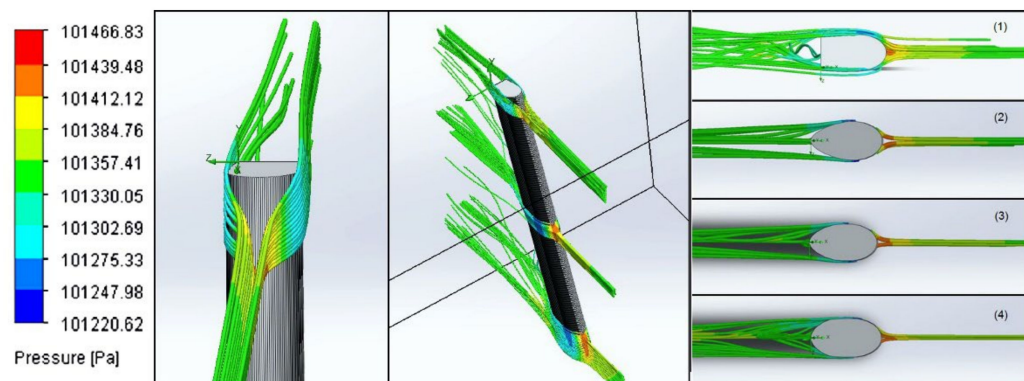


Figure 14. Flow and pressure area lines on seat tube cross-sections in design point 1. From left to right: the two left pictures show the flow lines around the complex 1 cross-section from different views. The next three pictures show the flow lines around the complex 4, complex 3, and complex 1 cross-sections as viewed from above. The different colors represent the variation of pressure caused when the air flows around the models (red indicates high pressure, blue is low, and green is atmospheric pressure).

2.6. Final CAD Model

Using the results of these initial simulations, we were able to create the final CAD model of the bicycle frame. The optimized spaceframe model has the best overall behavior when subjected to the aforementioned spaceframe loading scenarios, which is explained in the results section. Taking into consideration the results for each tube cross-section, the final frame is depicted in Figure 15.



Figure 15. Final frame model.

The joint areas where two or more tubes meet were created by initially joining the tubes and then creating smooth transitions between them. To avoid stress raising areas, flow separation, and detachment of the boundary layer from the surface, the joints were selected to have large curvature and G2 continuity with the surrounding surfaces.

2.7. Final CAD Model Loading Scenarios

A new set of experimental simulations was created to represent the safety requirements for bicycles set by ISO 4210 [34]. Those experimental simulations, which are depicted in Figure 16, consisted of five different scenarios:

- Drop mass;
- Falling frame;
- Horizontal forces;
- Vertical force through the seat post;
- Pedaling forces.

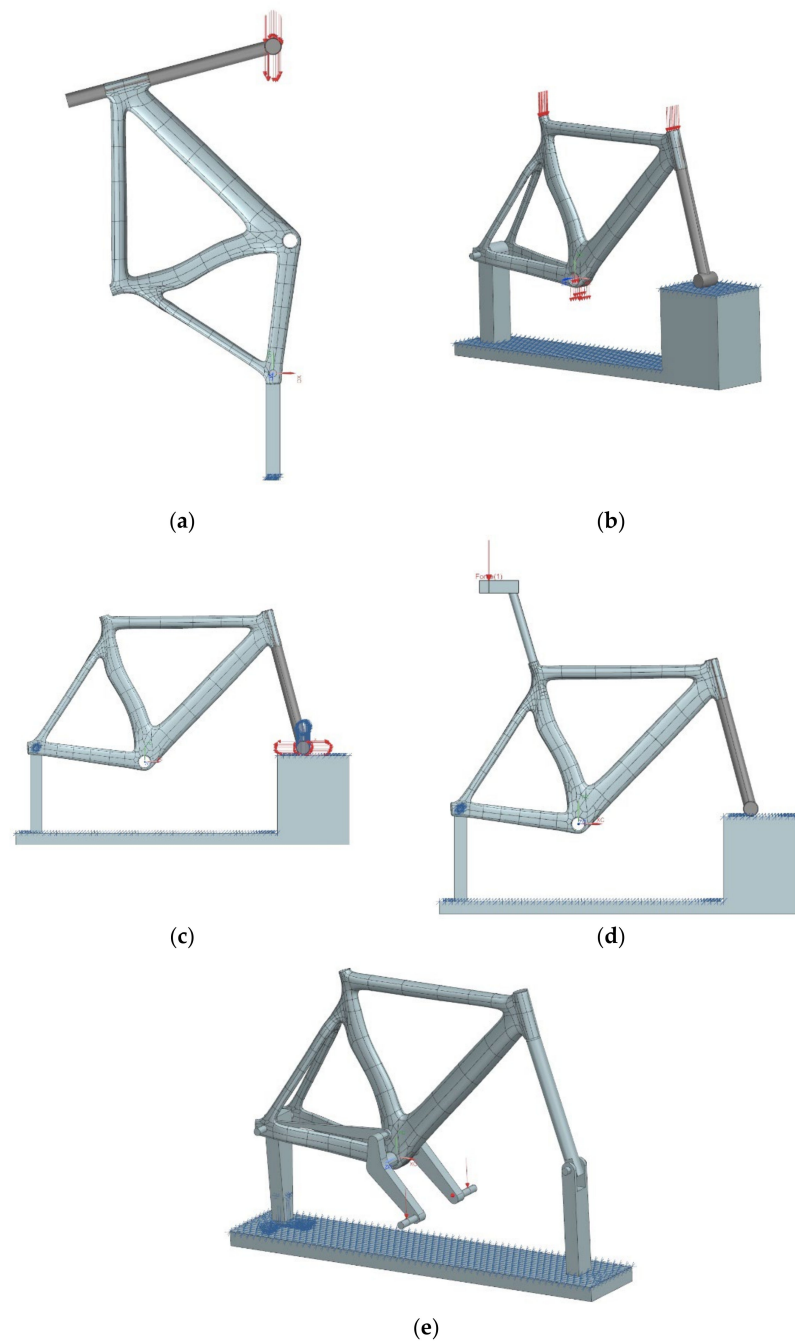


Figure 16. (a) FE method preview of drop mass test, (b) FE test method preview of the falling frame, (c) FE test method preview of horizontal forces, (d) FE test method preview of vertical force through the seat tube, (e) FE test method preview of pedaling forces.

The red arrows represent the direction of the loads applied in each scenario.

The drop mass test, depicted in Figure 16a, is an impact test wherein a dummy fork is assembled on the vertically supported frame and a 22.5 kg mass is dropped 212 mm above the end of the fork. The mass is released and allowed to bounce on the end of the fork until it comes to rest on it. The wheelbase is measured before and after the impact. We used a non-linear dynamic simulation with an implicit solver, where the falling mass was placed directly above the end of the fork just before the contact point. The load is the velocity that the mass acquires because of the drop.

The falling frame test, as shown in Figure 16b, is also an impact test. The frame with the assembled fork is constrained and able to rotate around the axle of the rear wheel. Three masses are placed on the frame: a 30 kg mass on the seat post, a 10 kg mass on top of the steering head, and a 50 kg mass on the bottom bracket. The wheelbase is measured with the three masses and the end of the fork resting on the floor. The lower end of the fork is then raised 200 mm above the floor, and the assembly is allowed to fall freely to impact the floor; the wheelbase is remeasured when the assembly comes to a rest. In this case, we again used a nonlinear dynamic simulation with an implicit solver, where the assembled frame fork was placed just before the lower part of the fork comes into contact with the floor. The loads are the angular velocity due to the rotation of the assembly under the gravitational acceleration and the static forces due to the masses fastened on the frame.

Figure 16c features the horizontal forces test, which is a fatigue test wherein a horizontal force of 600 N in a forward and a rearward direction is applied at the lower part of the fork for 100,000 cycles, with a maximum frequency of 10 Hz. In this case, the load applied is a nonlinear dynamic force and the simulation takes into account the large displacements that occur.

The test of the vertical force through the seat post is another fatigue test and is presented in Figure 16d. A dynamic vertical force of 1200 N is applied on the dummy seat post 70 mm behind the intersection of the ax of the seat post and the flat part for 50,000 cycles, with a maximum frequency of 10 Hz. In this case, the load applied is a nonlinear dynamic force and the simulation takes into account the large displacements that occur.

The pedaling forces test, shown in Figure 16e, is also a fatigue test wherein dynamic forces of 1100 N are applied on each side of a dummy crankset, whose geometry is specified by the ISO. Both of the cranks are 175 mm long and are inclined forwards and downwards at an angle of 45° to the horizontal. The crank is secured by a rod that connects the top of the dummy crankset to the rear axle replacing the chain. Each pedal spindle is subjected to a repeated downward force at a position 150 mm from the centerline of the frame in a vertical, transverse plane and inclined at 7.5° to the fore/aft plane of the frame. The forces are applied to the pedals for 100,000 test cycles. In this case, the load applied is a nonlinear dynamic force consisting of two components, one downward and one inward, to account for the 7.5° angle; the simulation takes into account the large displacements that occur.

For the simulations, the fork and all the peripheral parts were modeled as solid parts made of steel with a 3D CTETRA (10) mesh. Their element size varied according to their dimensions, curvature, and overall geometry. The frame was modeled as a sheet part where each tube had a different 2D mesh to account for the various layup recipes and orientations of each section of the frame. The 2D mesh in every case was a CTRIA3 mesh with a 1.5 mm element size, which was able to accurately represent all the small features of the frame without increasing the computational time disproportionately. To simulate the overlap of the layup at the junctions between the tubes, a different 2D mesh was created in each case where the layup recipe contained the plies of both the recipes of the respective tubes taking into account their different orientation.

2.8. Material Layup and Stacking Orientation

After the work described above and 3D modeling the frame, to create a competitive bicycle frame we had to choose the final fabrication materials and specify the layup stacking

sequence to achieve an optimal combination of weight and strength. Besides, we had to make a necessary compromise between these factors and the fact that the structure had to pass the requirements of approved testing methods, as described above.

The materials tested in this process were the TORAYCA M46J Woven, M46J UD, T300 Woven, and T700 UD in sheet form and pre-impregnated with resin [35–37]. The first two stacking scenarios shown in Tables 2 and 3 were quasi-isotropic types with a material layup recipe of [(0F/45F)₂]_T and M46J Woven and T300 Woven, respectively, as testing materials applied to the whole frame. The reason was to create a comparison between displacement and compression and tensile stresses so that the material layup could be upgradable at each tube of the frame and we would then have an indication of which material to use.

Table 2. Quasi-isotropic layup using M46J Woven fabric.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45
Top tube	M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45
Down tube	M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45
Seat tube	M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45
Seat stay (left)	M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45
Seat stay (right)	M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45
Chain stay (left)	M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45
Chain stay (right)	M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45

Table 3. Quasi-isotropic layup using T300 Woven fabric.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45, T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45
Top tube	T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45, T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45
Down tube	T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45, T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45
Seat tube	T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45, T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45
Seat stay (left)	T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45, T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45
Seat stay (right)	T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45, T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45
Chain stay (left)	T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45, T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45
Chain stay (right)	T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45, T300 Woven 0/90, T300 Woven ±45

These quasi-type stacking scenarios were the benchmark to check further stacking scenarios, under the same conditions as the FE analysis, to better understand how material selection, sequence, and orientation affect the final results. Each tube of the frame has its own orientation, therefore the angle of each layer is relevant to the element orientation of each tube.

The two quasi-isotropic scenarios were used as a basis for the development of the stacking scenarios. Depending on the distribution of the strain energy in the optimized geometry spaceframe model, extra plies were gradually added on the tubes that bore most of the stresses. Next, the load that each ply bore as well as its direction were evaluated. For instance, if a woven ply bore stressed only in direction 11, it was replaced by a unidirectional ply in the direction that was loaded to remove any unnecessary mass. In some stacking scenarios, each woven ply was replaced by two unidirectional ones to check for any differentiation between the use of the woven and their equivalent unidirectional materials. The difference between the effects of the two sets of materials, T300 Woven with T700 UD and M46J Woven with M46J UD, on the overall behavior of the frame was also tested. The next step was to check the displacements for the various loading cases, which we wanted to minimize. In the case of the pedaling test, an attempt was made to ensure that the displacements caused by applying the forces on either side of the bottom bracket were similar; this is why the layup recipe on the chain stays was differentiated.

Table 4 shows stacking scenario 1. The material used in this scenario was the T300 Woven fabric. This time, there was a differentiation in the layup recipe of the various tubes

of the frame, creating two groups: the first group consisting of the headtube, downtube, seat tube, and chain stay right with a $[(45F/0F)_3]_T$ layup recipe, and the second group consisting of the top tube, seat stay left and right, and chain stay left with $[(45F/0F)_2]_T$.

Table 4. Stacking scenario 1.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45
Top tube	T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45
Down tube	T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45
Seat tube	T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45
Seat stay (left)	T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45
Seat stay (right)	T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45
Chain stay (left)	T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45
Chain stay (right)	T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45

T300 Woven was also used in stacking scenario 2, as shown in Table 5. We now had three different groups; the first with a $[(45F/0F)_4]_T$ layup recipe on the headtube and chain stay right, the second with a $[(45F/0F)_3]_T$ recipe on the downtube and chain stay left, and, finally, the third group with $[(45F/0F)_2]_T$ on the top tube, seat tube, and both seat stays.

Table 5. Stacking scenario 2.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Top tube	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Down tube	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Seat tube	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Seat stay (left)	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Seat stay (right)	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Chain stay (left)	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Chain stay (right)	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90

In stacking scenario 3 (Table 6), we introduced a unidirectional material; thus, apart from the T300 Woven fabric, we also had the T700 UD. Apart from for the top tube and both the seat stays that used the same layup recipe $[45F/0/45F/0F]_T$, each of the other tubes had a different sequence. The head tube followed the $[(45F/0F)_4]_T$ layup recipe and the seat tube followed $[45F/0/0F/0_2]_T$. The downtube used the $[(45F/0)_3]_T$, the left chain stay used the $[(45F/0)_2/45F/0F]_T$, and the right chain stay used the $[(45F/0)_2/45F/0F/45F/0]_T$.

Stacking scenario 4 in Table 7 had the same headtube, downtube, and seat tube recipes as stacking scenario 3. The top tube and both seat stays had a $[45F/0/45F]_T$ recipe, the left chain stay a $[(45F/0)_3]_T$ recipe, and the right chain stay a $[(45F/0)_4]_T$ recipe. The materials used were the T300 Woven and the T700 UD.

Table 6. Stacking scenario 3.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Top tube	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Down tube	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0
Seat tube	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T700 UD 0
Seat stay (left)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Seat stay (right)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Chain stay (left)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Chain stay (right)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0

Table 7. Stacking scenario 4.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90, T300 Woven ± 45 , T300 Woven 0/90
Top tube	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45
Down tube	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0
Seat tube	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven 0/90, T700 UD 0, T700 UD 0
Seat stay (left)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45
Seat stay (right)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45
Chain stay (left)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0
Chain stay (right)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45 , T700 UD 0

In stacking scenario 5 of Table 8, the only material used was the M46J UD. The headtube followed a $[(\pm 45/0/90)_3]_T$ recipe, the top tube and both seat stays a $[\pm 45/0]_T$ recipe, the downtube a $[(\pm 45/0)_3]_T$ recipe, the seat tube a $[\pm 45/0/90/0_3]_T$ recipe, the left chain stay a $[(\pm 45/0)_2]_T$ recipe, and lastly, the right chain stay a $[(\pm 45/0)_3]_T$ recipe.

Table 8. Stacking scenario 5.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 90, M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 90, M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 90
Top tube	M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0
Down tube	M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0
Seat tube	M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 90, M46J UD 0, M46J UD 0, M46J UD 0
Seat stay (left)	M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0
Seat stay (right)	M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0
Chain stay (left)	M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0
Chain stay (right)	M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0, M46J UD 45, M46J UD -45, M46J UD 0

Stacking scenario 6, shown in Table 9, had many similarities to stacking scenario 4. The main difference was that the materials used in this case were M46J Woven and M46J UD on the headtube, downtube, seat tube, and both the chain stays and T300 Woven and T700 UD on the top tube and both of the seat stays. However, most of the recipes on the tubes remained the same except for the headtube, which had a $[(45F/0F)_3]_T$ layout.

Table 9. Stacking scenario 6.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90, M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90, M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90
Top tube	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45
Down tube	M46J Woven ± 45 , M4J UD 0, M46J Woven ± 45 , M4J UD 0, M46J Woven ± 45 , M4J UD 0
Seat tube	M46J Woven ± 45 , M4J UD 0, M46J Woven 0/90, M4J UD 0, M4J UD 0
Seat stay (left)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45
Seat stay (right)	T300 Woven ± 45 , T700 UD 0, T300 Woven ± 45
Chain stay (left)	M46J Woven ± 45 , M4J UD 0, M46J Woven ± 45 , M4J UD 0, M46J Woven ± 45 , M4J UD 0
Chain stay (right)	M46J Woven ± 45 , M4J UD 0, M46J Woven ± 45 , M4J UD 0, M46J Woven ± 45 , M4J UD 0, M46J Woven ± 45 , M4J UD 0

Stacking scenario 7, in Table 10, was also very similar to stacking scenario 4. The only difference here was that instead of the T300 Woven, we used the M46J Woven, and instead of the T700 UD, we used the M46J UD.

Table 10. Stacking scenario 7.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90, M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90, M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90, M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90
Top tube	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45
Down tube	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0
Seat tube	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven 0/90, M46J UD 0, M46J UD 0
Seat stay (left)	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45
Seat stay (right)	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45
Chain stay (left)	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0
Chain stay (right)	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0

Table 11 shows stacking scenario 8, which also used the M46J Woven and M46J UD materials and had many similarities to stacking scenario 7. The layup recipes for the down tube, seat tube, and both the chain stays remained the same, whereas the headtube had $[(45F/0F)_3]_T$ layup and the top tube and both seat stays had $[45F/0F]_T$.

Table 11. Stacking scenario 8.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90, M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90, M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90
Top tube	M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90
Down tube	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0
Seat tube	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven 0/90, M46J UD 0, M46J UD 0
Seat stay (left)	M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90
Seat stay (right)	M46J Woven ± 45 , M46J Woven 0/90
Chain stay (left)	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0
Chain stay (right)	M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0, M46J Woven ± 45 , M46J UD 0

In stacking scenario 9 of Table 12, there was a significant increase in the material in each tube. Specifically, the headtube had the [(45F/0F)₆]_T layup recipe, the top tube and both seat stays had [(45F/0)₃]_T, the downtube and left chain stay had [(45F/0)₄]_T, the right chain stay had [(45F/0)₅]_T, and the seat tube had [45F/0/0F/0₂/45F/0/0F/0]_T.

Table 12. Stacking scenario 9.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90, M46J Woven ±45, M46J Woven 0/90
Top tube	M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0
Down tube	M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0
Seat tube	M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven 0/90, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven 0/90, M46J UD 0
Seat stay (left)	M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0
Seat stay (right)	M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0
Chain stay (left)	M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0
Chain stay (right)	M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0, M46J Woven ±45, M46J UD 0

Finally, stacking scenario 10, presented in Table 13, was basically the same as stacking scenario 5, but instead of the M46J UD, the material used was the T700 UD. The headtube followed a [(±45/0/90)₃]_T recipe, the top tube and both seat stays a [±45/0]_T, the downtube a [(±45/0)₃]_T, the seat tube a [±45/0/90/0₃]_T, the left chain stay a [(±45/0)₂]_T, and lastly, the right chain stay a [(±45/0)₃]_T recipe.

Table 13. Stacking scenario 10.

Frame Tube	Stacking Recipe
Head tube	T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 90, T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 90, T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 90
Top tube	T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0
Down tube	T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0
Seat tube	T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 90, T700 UD 0, T700 UD 0, T700 UD 0
Seat stay (left)	T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0
Seat stay (right)	T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0
Chain stay (left)	T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0
Chain stay (right)	T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0, T700 UD 45, T700 UD −45, T700 UD 0

3. Results and Discussion

3.1. Spaceframe Models' Results and Selection

The simulation results of all the tests that were executed during the design process of the bicycle road frame are presented in this section of the paper. They include tables, charts, and comments. The material used for these simulations was an isotropic test material and the failure criterion used was the Von Mises. As these simulations do not use composite materials, the Von Mises failure criterion was adequate for this part of the study. Furthermore, the resulting stresses and displacements are of low importance because they are only used for a qualitative comparison between the different spaceframe models.

In the beginning, all the spaceframe geometries were tested in three loading scenarios and the final four models in five loading scenarios. The results of displacements, stresses, and strain energy distribution are shown in Figures 17–25.

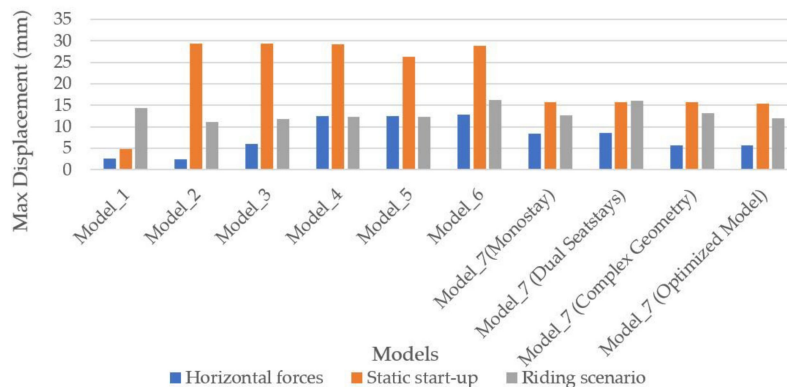


Figure 17. Maximum displacement per model in horizontal impact, in static start-up, and in riding scenarios.

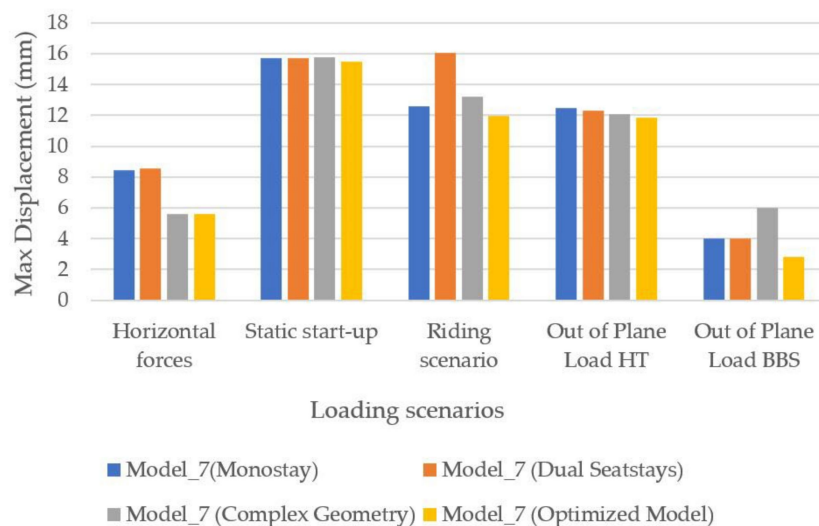


Figure 18. Maximum displacement per model in horizontal impact, static startup, riding, out-of-plane load in the headtube, and out-of-plane load in the bottom bracket shell scenarios.

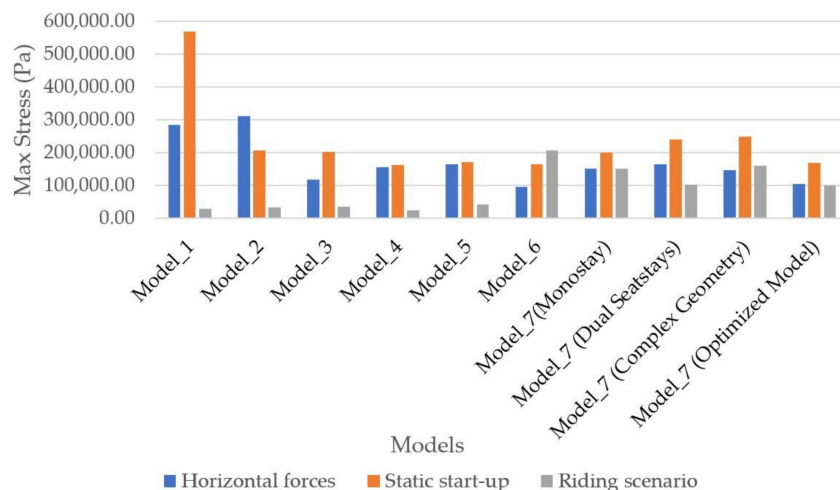


Figure 19. Maximum stress of horizontal impact, static start-up, and riding scenarios per model.

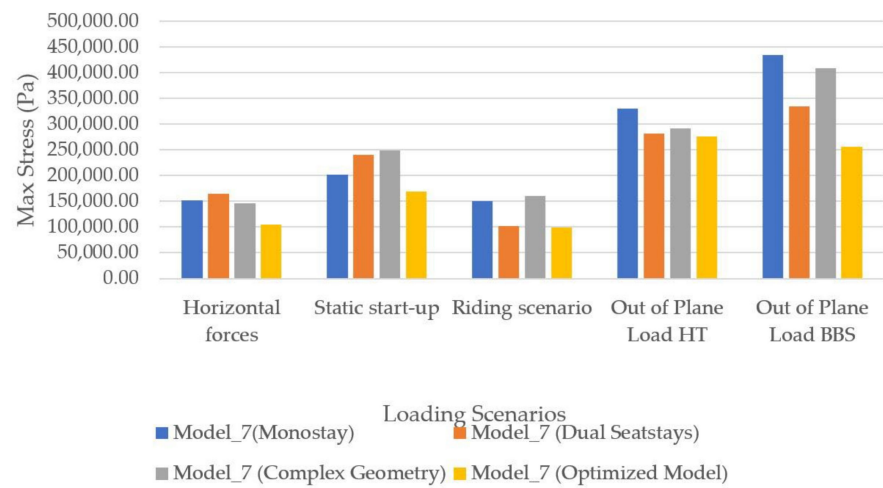


Figure 20. Maximum stress per model in horizontal forces, static start-up, riding, out-of-plane load in the headtube, and out-of-plane load in the bottom bracket shell scenarios.

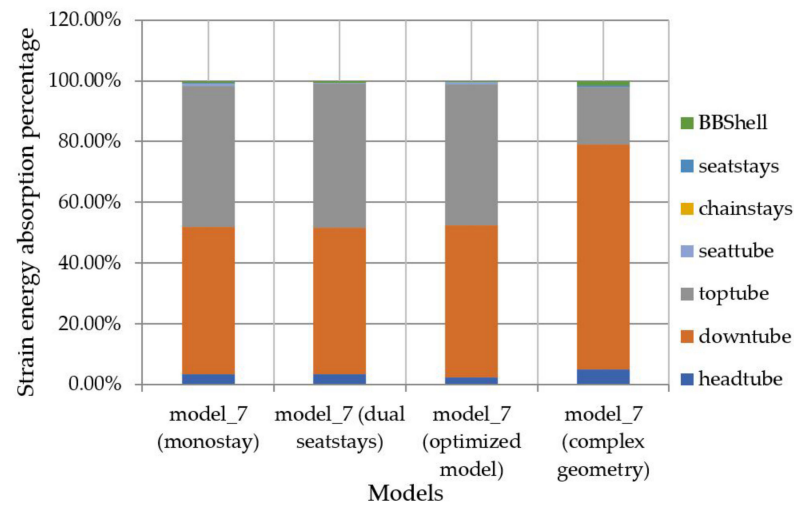


Figure 21. Absorption of strain energy and its distribution in out-of-plane loads on head tube scenario.

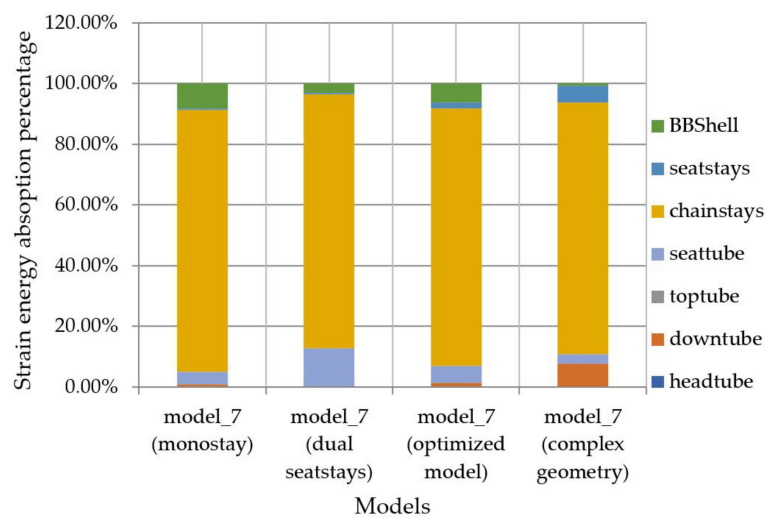


Figure 22. Absorption of strain energy and its distribution in out-of-plane loads on bottom bracket shell scenario.

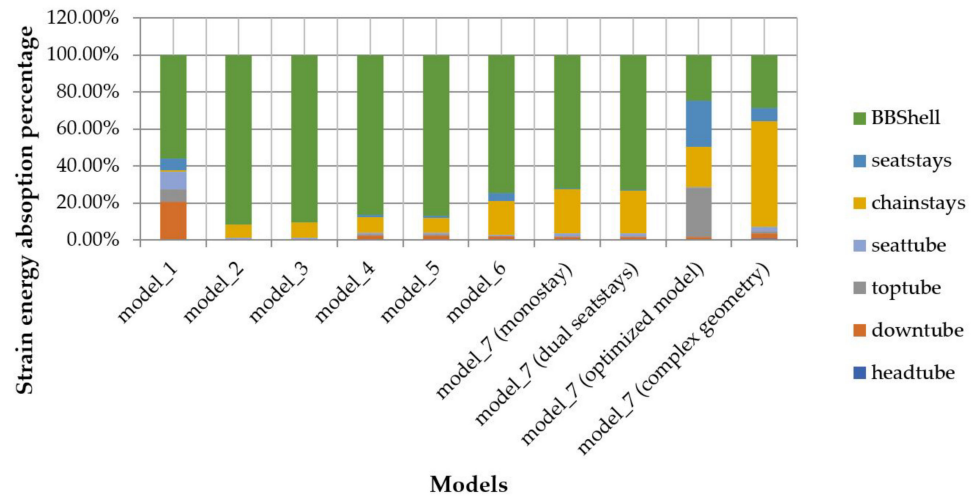


Figure 23. Absorption of strain energy and its distribution in a static start-up scenario.

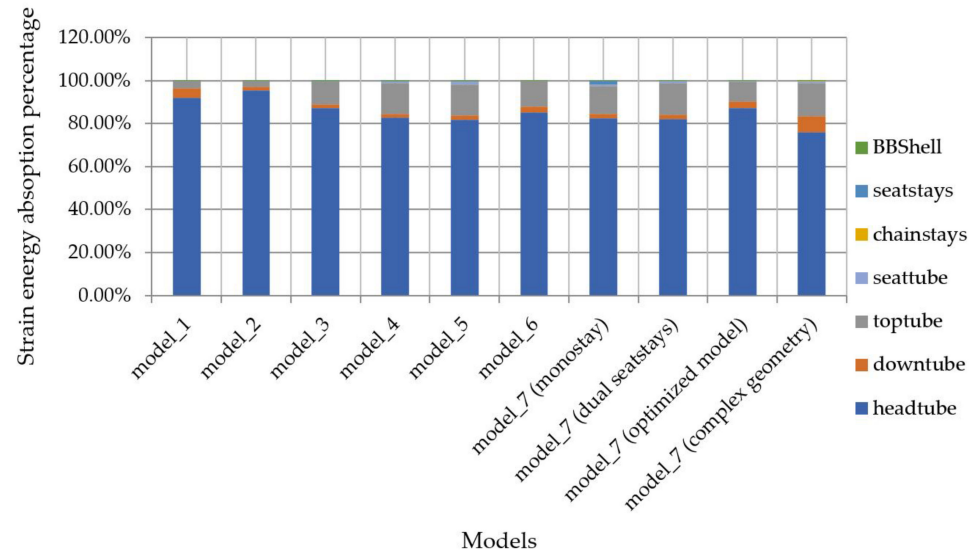


Figure 24. Absorption of strain energy and its distribution in a horizontal forces scenario.

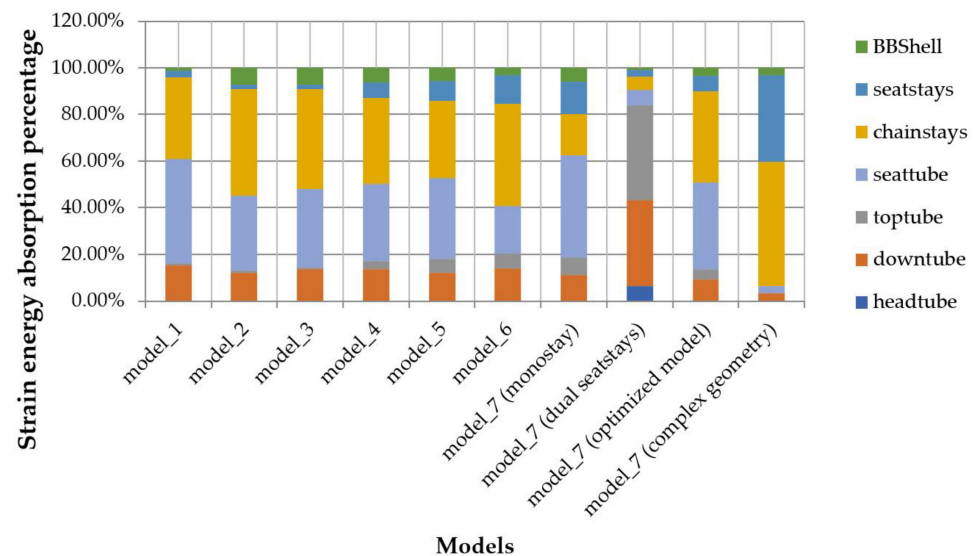


Figure 25. Absorption of strain energy and its distribution in the riding scenario.

As the 2D bike fitting sketch result, from which we start, becomes an actual 3D spaceframe road bicycle frame, it is obvious that the maximum displacements change a lot in the beginning as the frame takes shape, and less in the final models, in which changes do not have such a big impact (Figure 17).

The last four models (mono-stay, dual-stays, complex, and optimized) were also tested on the out-of-plane load in the headtube and the out-of-plane load in the bottom bracket shell tests. The results of all the loading cases tested on the last four models are presented on Figure 18. As the design evolves, small but measurable gains are noticed. The redesigned optimized model had the least displacement in all tests. Less displacement in the frame means that the wheels do not lose their alignment during heavy pedaling sessions, which translates into less watts needed from the rider under the same speed and riding conditions.

Another important factor is the max stress that comes as a result of the loading. With less stress, less material is needed in the actual frame, which makes it lighter. The evolution of the stresses as they change from the beginning to the final model is presented in Figure 19.

Following the same procedure as with the maximum displacement figures, Figure 20 presents the results of the maximum stresses for the last four spaceframe models in all the loading cases, including the scenarios with the out-of-plane loads to the head tube and bottom bracket shell. The optimized model did not only have the least displacements, as noted before, but was also better in all the loading scenarios.

The end of this phase of the design process involved the examination of the energy that each part of the frame receives during the various loading cases. These results would be used during the selection of a suitable cross-section for each part of the frame.

In the out-of-plane load to the head tube case, it is obvious that most of the load is absorbed by the downtube and top tube, which, when combined, are actually part of the head tube. This means that the ends of the top and down tubes that connect to the head tube need to be reinforced to account for such loads, such as when sprinting out of the saddle. The strain energy distribution in the out-of-plane load to the head tube case is presented in Figure 21.

In Figure 22, the results of the out-of-plane loading of the bottom bracket shell indicate that most of the load is carried by the chain stays. This means that the chain stays have to be stiff enough so as to not deform during hard pedaling.

The static start-up scenario simulates the start of a ride from zero speed where the rider pushes at the pedals and most of the load is carried through the bottom bracket shell and the chain stays, as shown in Figure 23. Again, this means that these parts have to be reinforced.

In the horizontal forces, as shown in Figure 24, the headtube received most of the load, with the top tube and downtube receiving less. Similar to the out-of-plane headtube loading scenario, the area between the headtube, downtube, and top tube must be reinforced.

Finally, in Figure 25, a realistic riding scenario depicts the load distribution during normal riding. The optimized model had a good distribution of strain energy among the different tubes. It is interesting to see that the optimized and the complex geometries have a much different distribution, although the actual loads are not so different. Specifically, the strain energy percentage that is absorbed in the seat stays of the complex geometry seems to be absorbed by the seat tube of the optimized geometry. This is due to the mono-stay formation of the seat stays in the optimized spaceframe model, which lets the seat tube carry most of the load. This depicts the importance of the design process.

After reviewing the results of displacements, stresses, and strain energy distributions for all the spaceframe models, it is obvious that the optimized geometry model offers the lowest displacements paired with the lowest stresses and the evenest distribution of strain energy compared to all the other models. This geometry was used as the basis for the creation of the final CAD model of the frame.

3.2. Tubes' Cross-Sections Results and Selection

After deciding on the basic geometry of our bicycle frame, the next step was to determine the shape of each tube of the frame. To this end, we examined both the results of the static loads tests, one bending and one torsional, as well as the results of our CFD analysis. The selection of the final tube cross-section depended on the overall stresses and displacements developed in the static tests, the surface area of each model, which basically determines the weight of the tube, and the weighted results of the aerodynamic tests.

The surface area and results of the tests of the two static loads for each model are presented in Table 14. The results of the CFD analysis for each tube of the frame are presented using the graphs of Figures 26–30. Finally, in Table 15, we present an evaluation of each tube cross-section to support the selection for the different frame parts.

Table 14. Static analysis of all tubes under bending and torsional loads.

Frame Parts	Cross-Section Designs	Surface Area (mm ²)	Bending Load Test		Torsional Load Test	
			Max Stress (MPa)	Max Displacement (mm)	Max Stress (MPa)	Max Displacement (mm)
Top tube	Cylindrical 40	71,628.31	108.70	8.56	22.40	0.22
	Rectangular 35 × 35	73,979.39	91.20	8.68	11.20	0.11
	Triangular	66,192.26	157.00	11.30	132.30	3.73
	Complex	68,512.70	144.70	11.03	39.73	0.94
Down tube	Oval 39 × 79	111,183.63	42.14	1.76	57.92	1.35
	Oval 45 × 79	115,669.59	39.01	1.64	42.86	1.02
	Oval 51 × 79	120,205.33	36.41	1.53	32.29	0.76
	Cylindrical 60.70	107,742.49	46.36	2.50	9.63	0.09
	Rectangular 50 × 50	108,150.00	47.84	3.46	34.77	0.25
	Complex1	118,822.31	41.20	1.68	39.15	0.73
	Complex2	110,288.51	51.54	2.00	76.30	1.15
Seat tube	Complex1	82,015.47	65.74	3.51	71.62	1.10
	Complex2	69,475.08	85.03	4.66	101.50	1.25
	Complex3	70,781.40	80.69	4.44	79.85	1.30
	Complex4	73,113.23	147.80	4.04	63.38	1.83
	Cylindrical 53	83,252.21	61.11	3.72	12.63	0.19
	Cylindrical 34.9	54,820.79	141.10	12.84	29.12	0.28
	Seat stays	Oval 10 × 30	21,385.25	356.20	36.68	303.50
Oval 17 × 31		24,644.18	261.80	26.84	142.90	1.29
Rectangular 10 × 30		23,951.86	262.60	27.58	344.70	3.25
Cylindrical 12		12,063.72	1293.00	31.08	250.60	2.96
Chain stays	Oval 15 × 45	39,594.67	150.90	10.90	196.80	2.38
	Oval 20 × 60	52,588.59	87.81	4.64	165.20	2.54
	Rectangular 15 × 45	45,365.57	108.80	7.82	226.70	2.46
	Rectangular 20 × 60	60,487.43	61.34	3.37	177.20	2.61
	Cylindrical 18	22,336.72	540.60	92.79	109.70	1.11

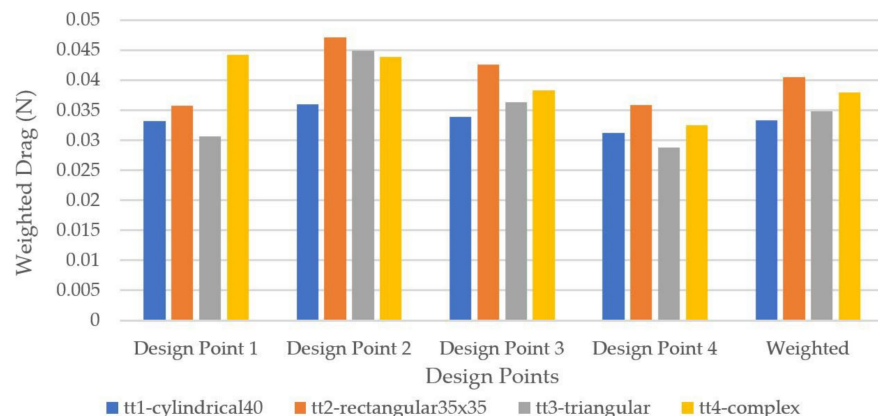


Figure 26. Weighted drag on top tube cross-sections.

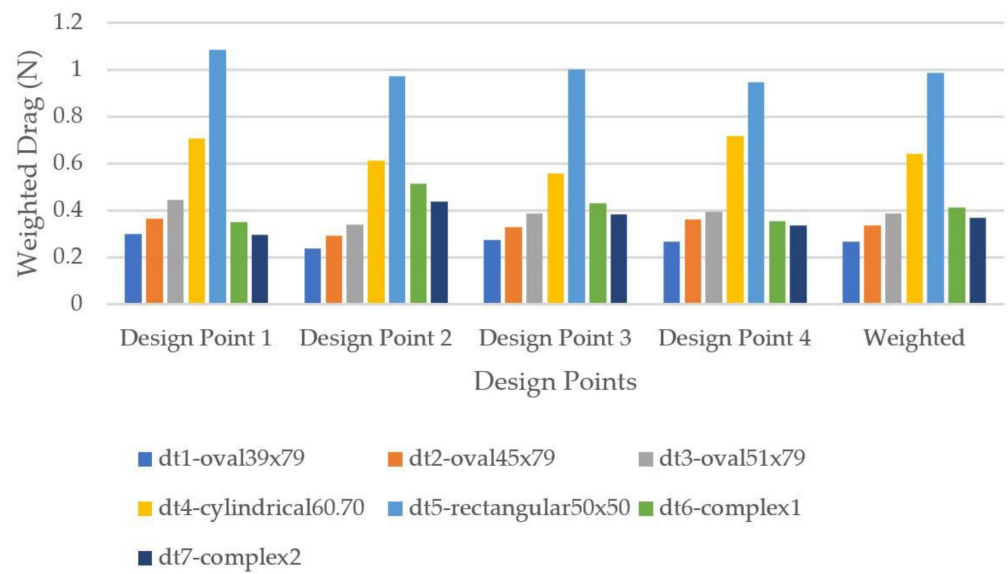


Figure 27. Weighted drag force on down tube cross-sections.

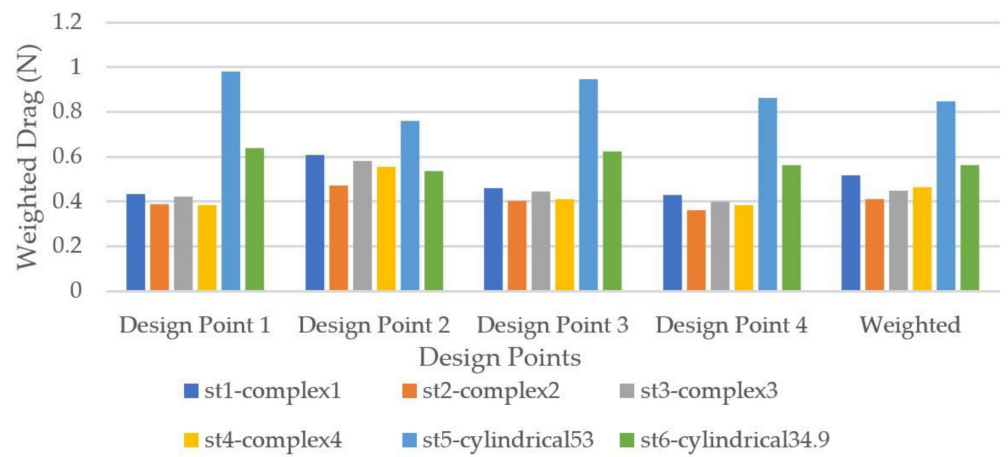


Figure 28. Weighted drag force on seat tube cross-sections.

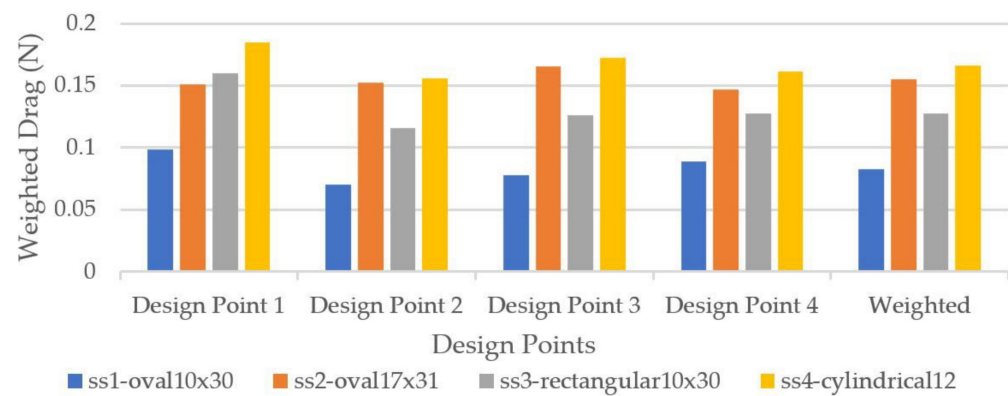


Figure 29. Weighted drag force on seat stay cross-sections.

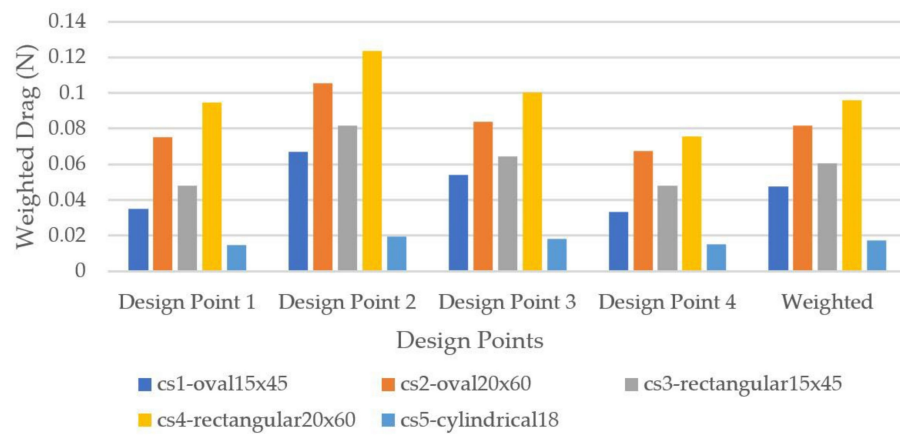


Figure 30. Weighted drag force on chain stay cross-sections.

Table 15. Evaluation of each cross-section.

Frame Parts	Cross-Section Designs	Displacement	Mass	Weighted Drag	Production/Cost-Effectiveness
Top tube	cylindrical40	✓	✓	✓	✓
	rectangular35 × 35	✓	✗	✗	✓
	triangular	✗	✓	✓	✗
	complex	✗	✓	✗	✗
Down tube	oval39 × 79	✓	✓	✓✓	✓
	oval45 × 79	✓	✓	✓	✓
	oval51 × 79	✓✓	✗	✓	✓
	cylindrical60.70	✗	✓	✗	✓
	rectangular50 × 50	✗	✓	✗	✓
	complex1	✓	✓	✓	✗
complex2	✓	✗✗	✓	✗	
Seat tube	complex1	✓	✗	✓	✗
	complex2	✓	✓	✓	✗
	complex3	✓	✓	✓	✗
	complex4	✓	✓	✓	✗
	cylindrical53	✓	✗	✗	✓
	cylindrical34.9	✗✗	✓	✓	✓
Seat stays	oval10 × 30	✗	✓	✓✓	✓
	oval17 × 31	✓	✗	✗	✓
	rectangular10 × 30	✓✓	✗	✓	✗
	cylindrical12	✗✗✗	✓✓	✗	✓
Chain stays	oval15 × 45	✗	✓	✓✓	✓
	oval20 × 60	✓	✓	✓	✓
	rectangular15 × 45	✗	✓	✓	✓
	rectangular20 × 60	✓✓	✗✗	✗✗	✓
	cylindrical18	✗✗✗	✓✓	✓✓	✓

From the static loads’ tests results, we can select the tubes that combine the least mass, which is related to the surface area, the least developed stresses, and displacements. We mostly used the bending load test results because the loads that appear on the various tests that we tested the different spaceframe models on caused bending on the tubes of the frame.

As far as the top tube models are concerned, the cylindrical and the rectangular models have the best stresses and displacements, even though they are heavier than the triangular and complex models. From the down tube models, the oval 51 × 79 model seems to have the best structural behavior while being the heaviest of the cross-sections. The cylindrical and the rectangular models are the lightest and have the best results in

torsion but not in bending loads. From the tests on the seat tube models, the cylindrical and the complex 1 models seem to have the best structural characteristics while also having the biggest surface area and, subsequently, the biggest mass. For the seat stays, the models that show the lowest stresses and displacements are firstly the oval 17×31 followed by the rectangular 10×30 , which are also the two heaviest cross-sections. Finally, the oval 20×60 and the rectangular 20×60 cross-sections are the structurally best choices for the chain stays.

The results of the CFD analysis for each tube of the frame are presented using the graphs of Figures 26–30. For each design point, the resulting value of each model was $0.85 \times (\text{Drag}) + 0.15 \times (\text{Side Force})$. The weighted drag results utilized the resulting values of each design point following this formula: $0.1 \times (\text{design_point1}) + 0.2 \times (\text{design_point2}) + 0.35 \times (\text{design_point3}) + 0.35 \times (\text{design_point4})$.

From the results of the aerodynamic tests on the top tube cross-sections shown in Figure 26, the two models that show the best behavior are the cylindrical and the triangular models. While the triangular model may have a lower value in design point 1 and design point 4, the overall weighted drag of the cylindrical cross-section is lower.

The aerodynamic results for the tests on the down tube cross-sections are presented in Figure 27. The oval 39×79 cross-section has the best aerodynamic behavior of the down tube models, as stems from the CFD analysis. The models that follow closely behind are the other two oval cross-sections and the two complex ones. This remains the same over the four design points.

In the seat tube CFD analysis, whose results are shown in Figure 28, the model that shows the worst behavior is the cylindrical 53 cross-section; the rest seem to have small differences across the four design points, and so any of them is a viable option.

From the results of the aerodynamic tests on the seat stays cross-sections, which are shown in Figure 29, the one that appears to have the lowest overall weighted drag is the oval 10×30 , followed by the rectangular 10×30 .

Lastly, from the results of the aerodynamic tests on the chain stay cross-sections presented in Figure 30, the cylindrical 18 model has the least weighted drag for the chain stay models, followed by the oval 15×45 .

Table 15 shows an evaluation of each cross-section of the various tubes of the frame based on the results of the structural and aerodynamic tests and their comparison.

The symbols of Table 15 have the following meanings:

- ✓ indicates a good behavior–result
- ✓✓ indicates a very good behavior–result
- ✗ indicates a bad behavior–result
- ✗✗ indicates a very bad behavior–result
- ✗✗✗ indicates an unacceptable result.

After evaluating the results of all the tests, both aerodynamic and structural, we were able to select the most suitable cross-section for each part of the frame. For the top tube, the obvious solution is the cylindrical 40 mm as it performs well in all the tests. For the down tube, which is one of the frame parts with the biggest amount of airflow, we decided to combine the three oval-shaped cross-sections in order to benefit from the great aerodynamic behavior and low mass of the oval 39×79 while also keeping the low displacements, and therefore increased stiffness, of oval 51×79 . The seat tube is a very important element of the frame because of its angle and position. From the structural tests, two cross-sections, complex 1 and the cylindrical 53, showed promise. However, in the CFD analysis, the cylindrical 53 showed the highest drag in all the cases, therefore it had to be discarded as a possible solution. This means that complex 1 was the model we decided upon, despite its higher mass. The seat stay geometry was selected to be the oval $30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ because it showed the least drag in all the design points of the CFD analysis. The high displacements of this model are actually welcome because this part of the frame has to absorb the vibration while riding. As for the chain stays, a very good solution was the combination of the oval and the rectangular cross-sections to achieve reduced aerodynamic drag force by designing

the oval 20 mm × 60 mm as the outside diameter of the chain stay. Necessary stiffness was achieved by designing the inside diameter as a rectangular model with a 20 mm × 60 mm cross-section.

3.3. Stacking Scenarios' Results and Selection

Having created the final CAD model of the frame, the next step was the selection of the most suitable layup and stacking order. We had to take into consideration the various parameters that the final frame must meet:

- The frame must be able to withstand the various loadings that occur during a ride, as indicated by the ISO standards, which means the stresses that develop in each test are allowable.
- The weight must be kept low, which means the stacking recipe must have a reduced number of plies.
- The deformations on the head tube, down tube, bottom bracket, lower part of the seat tube, and chain stays must be small so as to achieve minimized power loss while riding.
- The deformations on the top tube and seat stays are encouraged to be bigger to allow the absorption of the vibrations caused during the ride, which contributes to the rider's comfort.

In order to evaluate the stress results of each layup recipe, Table 16 shows the allowable stresses, both tensile and compressive, for each material in all the directions. Note that the woven materials had the same allowable stresses in directions 11 and 22 because they have the same fibers in both of those directions. For the unidirectional materials, it is apparent that the allowable stresses in direction 22 were significantly lower than those of direction 11 as they only had fibers aligned along direction 11.

Table 16. Allowable tensile and compressive stresses for each material.

Allowable Stresses	T300 Woven	T700 UD	M46J Woven	M46J UD
Tensile (ST1)	573	1700	1600	1900
Tensile (ST2)	573	40	1600	40
Compressive (SC1)	631	1000	600	850
Compressive (SC2)	631	40	600	40
Max Shear Stress (SS12)	74	85.7	65	72

The results of the various stacking scenarios for each loading case were produced using the maximum stress failure criterion. Tables 17–28 present the results of the different stacking scenarios across the five loading cases of ISO and Table 29 shows the weights of each stacking recipe.

Table 17. Stress and displacement results of M46J Woven quasi-isotropic scenario.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	1	head tube	Min 11	−354	1.516
	1	head tube	Max 11	229	
	1	head tube	Min 22	−351	
	1	head tube	Max 22	229	
	1	head tube	Min 12	−26.49	
	1	down tube	Max 12	20.88	
Falling frame	1	head tube	Min 11	−73	0.556
	1	head tube	Max 11	89	
	1	head tube	Min 22	−82	
	1	head tube	Max 22	80	
	1	head tube	Min 12	−6.61	
	1	head tube	Max 12	6.4	

Table 17. Cont.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Horizontal forces	1	head tube	Min 11	−60	0.289
	1	head tube	Max 11	60	
	1	head tube	Min 22	−59	
	1	head tube	Max 22	59	
	1	head tube	Min 12	−4.421	
	1	head tube	Max 12	4.421	
Vertical forces	4	seat tube	Min 11	−121	0.523
	3	seat tube	Max 11	128	
	1	seat tube	Min 22	−113	
	4	seat tube	Max 22	199	
	4	seat tube	Min 12	−11.37	
	1	seat tube	Max 12	12.53	
Pedaling forces	1	seat tube	Min 11	−254	2.193
	4	seat tube	Max 11	207	
	1	seat tube	Min 22	−258	
	4	seat tube	Max 22	205	
	4	seat tube	Min 12	−23.02	
	1	seat tube	Max 12	16.44	

Table 18. Stress and displacement results of T300 Woven quasi-isotropic scenario.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	1	head tube	Min 11	−290	1.485
	1	head tube	Max 11	171	
	1	head tube	Min 22	−276	
	1	head tube	Max 22	170	
	1	head tube	Min 12	−26.53	
	1	top tube	Max 12	20.57	
Falling frame	1	head tube	Min 11	−55	0.545
	1	head tube	Max 11	72	
	1	head tube	Min 22	−61	
	1	head tube	Max 22	63	
	1	head tube	Min 12	−5.96	
	1	head tube	Max 12	6.57	
Horizontal forces	1	head tube	Min 11	−49	0.288
	1	head tube	Max 11	49	
	1	head tube	Min 22	−47	
	1	head tube	Max 22	47	
	1	head tube	Min 12	−4.484	
	1	head tube	Max 12	4.484	
Vertical forces	4	seat tube	Min 11	−99	0.498
	3	seat tube	Max 11	98	
	1	seat tube	Min 22	−88	
	4	seat tube	Max 22	148	
	1	seat stays	Min 12	−11.48	
	1	seat tube	Max 12	12.11	
Pedaling forces	1	seat tube	Min 11	−162	2.149
	3	seat tube	Max 11	172	
	1	seat tube	Min 22	−171	
	3	seat tube	Max 22	165	
	4	seat tube	Min 12	−26.53	
	4	seat tube	Max 12	27.18	

Table 19. Stress and displacement results of stacking scenario 1.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	1	head tube	Min 11	−199	1.111
	1	top tube	Max 11	148	
	2	head tube	Min 22	−194	
	1	top tube	Max 22	155	
	1	head tube	Min 12	−17.93	
	1	top tube	Max 12	16.07	
Falling frame	4	top tube	Min 11	−38	0.448
	1	head tube	Max 11	50	
	2	head tube	Min 22	−34	
	2	head tube	Max 22	48	
	1	top tube	Min 12	−3.518	
	1	head tube	Max 12	4.513	
Horizontal forces	1	head tube	Min 11	−39	0.249
	1	head tube	Max 11	39	
	2	head tube	Min 22	−38	
	2	head tube	Max 22	38	
	1	head tube	Min 12	3.567	
	1	head tube	Max 12	3.567	
Vertical forces	4	seat stays	Min 11	−92	0.368
	2	seat tube	Max 11	67	
	5	seat tube	Min 22	−58	
	5	seat tube	Max 22	69	
	4	seat stays	Min 12	−7.61	
	1	seat stays	Max 12	8.51	
Pedaling forces	2	left chain stay	Min 11	−116	1.689
	5	seat tube	Max 11	120	
	1	seat tube	Min 22	−113	
	5	seat tube	Max 22	114	
	6	seat tube	Min 12	−16.85	
	6	seat tube	Max 12	17.34	

Table 20. Stress and displacement results of stacking scenario 2.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	6	down tube	Min 11	−184	1.104
	1	top tube	Max 11	139	
	2	head tube	Min 22	−156	
	1	top tube	Max 22	148	
	1	down tube	Min 12	−15.63	
	1	top tube	Max 12	15.39	
Falling frame	4	top tube	Min 11	−33	0.44
	6	down tube	Max 11	44	
	1	top tube	Min 22	−30	
	2	head tube	Max 22	38	
	1	top tube	Min 12	−3.475	
	1	down tube	Max 12	3.515	
Horizontal forces	6	down tube	Min 11	−37	0.244
	6	down tube	Max 11	37	
	2	head tube	Min 22	−31	
	2	head tube	Max 22	31	
	1	top tube	Min 12	−2.84	
	1	top tube	Max 12	2.84	

Table 20. Cont.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Vertical forces	4	seat tube	Min 11	−96	0.438
	3	seat tube	Max 11	96	
	1	seat tube	Min 22	−86	
	4	seat tube	Max 22	145	
	1	seat stays	Min 12	−11	
	1	seat tube	Max 12	11.96	
Pedaling forces	1	seat tube	Min 11	−149	1.577
	3	seat tube	Max 11	161	
	1	seat tube	Min 22	−153	
	3	seat tube	Max 22	155	
	4	seat tube	Min 12	−25.32	
	1	seat tube	Max 12	23.71	

Table 21. Stress and displacement results of stacking scenario 3.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	6	down tube	Min 11	−287	1.073
	2	down tube	Max 11	290	
	1	head tube	Min 22	−164	
	1	top tube	Max 22	179	
	1	down tube	Min 12	−19.48	
	1	top tube	Max 12	16.84	
Falling frame	2	seat tube	Min 11	−57	0.471
	4	down tube	Max 11	68	
	3	seat tube	Min 22	−37	
	2	head tube	Max 22	37	
	3	seat tube	Min 12	−4.794	
	5	seat tube	Max 12	6.376	
Horizontal forces	6	down tube	Min 11	−56	0.251
	6	down tube	Max 11	56	
	1	head tube	Min 22	−33	
	1	head tube	Max 22	33	
	1	down tube	Min 12	−3.651	
	1	down tube	Max 12	3.651	
Vertical forces	2	seat stays	Min 11	−154	0.577
	5	seat tube	Max 11	159	
	1	seat tube	Min 22	−96	
	3	seat tube	Max 22	137	
	5	seat tube	Min 12	−16.94	
	1	seat tube	Max 12	17.26	
Pedaling forces	2	seat tube	Min 11	−250	1.712
	2	seat tube	Max 11	258	
	1	seat tube	Min 22	−199	
	3	seat tube	Max 22	231	
	5	seat tube	Min 12	−34.78	
	5	seat tube	Max 12	36.31	

Table 22. Stress and displacement results of stacking scenario 4.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	6	down tube	Min 11	−310	1.299
	2	down tube	Max 11	337	
	1	head tube	Min 22	−177	
	1	top tube	Max 22	232	
	1	down tube	Min 12	−25.08	
	3	top tube	Max 12	23.41	
Falling frame	2	top tube	Min 11	−82	0.481
	6	down tube	Max 11	75	
	1	top tube	Min 22	−48	
	2	head tube	Max 22	41	
	3	seat stays	Min 12	−5.722	
	5	seat tube	Max 12	7.634	
Horizontal forces	2	down tube	Min 11	−60	0.274
	2	down tube	Max 11	60	
	1	top tube	Min 22	−35	
	1	top tube	Max 22	35	
	3	top tube	Min 12	−4.396	
	3	top tube	Max 12	4.396	
Vertical forces	2	top tube	Min 11	−227	0.686
	5	seat tube	Max 11	179	
	1	seat tube	Min 22	−101	
	3	seat tube	Max 22	147	
	5	seat tube	Min 12	−18.37	
	1	seat tube	Max 12	19.47	
Pedaling forces	2	seat tube	Min 11	−251	1.75
	2	seat tube	Max 11	251	
	1	seat tube	Min 22	−198	
	3	seat tube	Max 22	231	
	5	seat tube	Min 12	−34.6	
	5	seat tube	Max 12	36.28	

Table 23. Stress and displacement results of stacking scenario 5.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	1	head tube	Min 11	−370	1.167
	1	top tube	Max 11	486	
	1	top tube	Min 22	−19	
	3	top tube	Max 22	30	
	1	down tube	Min 12	−28.2	
	1	top tube	Max 12	25.79	
Falling frame	4	seat tube	Min 11	−125	0.432
	1	head tube	Max 11	91	
	7	seat tube	Min 22	−10	
	3	top tube	Max 22	7	
	2	seat stays	Min 12	−6.335	
	1	seat stays	Max 12	6.21	
Horizontal forces	1	top tube	Min 11	−87	0.244
	1	top tube	Max 11	87	
	3	top tube	Min 22	−57	
	3	top tube	Max 22	57	
	1	top tube	Min 12	−5.187	
	1	top tube	Max 12	5.187	

Table 23. Cont.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Vertical forces	3	top tube	Min 11	−320	0.545
	4	seat tube	Max 11	292	
	3	seat stays	Min 22	−236	
	7	seat tube	Max 22	179	
	2	seat stays	Min 12	−14.2	
	3	seat stays	Max 12	15.39	
Pedaling forces	2	seat tube	Min 11	−556	1.652
	1	seat tube	Max 11	429	
	6	chain stay left	Min 22	−33	
	7	seat tube	Max 22	43	
	7	seat tube	Min 12	−27.79	
	7	seat tube	Max 12	29.1	

Table 24. Stress and displacement results of stacking scenario 6.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	6	down tube	Min 11	−383	1.135
	2	down tube	Max 11	445	
	1	head tube	Min 22	−224	
	1	top tube	Max 22	237	
	1	down tube	Min 12	−26.35	
	3	top tube	Max 12	20.83	
Falling frame	2	down tube	Min 11	−99	0.449
	6	down tube	Max 11	93	
	1	top tube	Min 22	−50	
	1	head tube	Max 22	51	
	3	seat tube	Min 12	−5.303	
	5	seat tube	Max 12	5.882	
Horizontal forces	6	down tube	Min 11	−75	0.26
	6	down tube	Max 11	75	
	1	head tube	Min 22	−69	
	1	head tube	Max 22	69	
	1	head tube	Min 12	−5.909	
	1	head tube	Max 12	5.909	
Vertical forces	2	seat stays	Min 11	−211	0.429
	6	seat tube	Max 11	151	
	1	seat tube	Min 22	−71	
	5	seat tube	Max 22	128	
	3	seat stays	Min 12	−11.37	
	1	seat stays	Max 12	13.8	
Pedaling forces	5	seat tube	Min 11	−305	1.539
	5	seat tube	Max 11	350	
	1	seat tube	Min 22	−250	
	3	seat tube	Max 22	240	
	5	seat tube	Min 12	−26.26	
	5	seat tube	Max 12	26.66	

Table 25. Stress and displacement results of stacking scenario 7.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	6	down tube	Min 11	−339	1.023
	2	down tube	Max 11	348	
	1	head tube	Min 22	−177	
	1	top tube	Max 22	212	
	1	down tube	Min 12	−20.68	
	3	top tube	Max 12	19.05	
Falling frame	2	top tube	Min 11	−88	0.436
	6	down tube	Max 11	81	
	3	seat tube	Min 22	−46	
	1	head tube	Max 22	40	
	3	seat stays	Min 12	−5.152	
	5	seat tube	Max 12	5.798	
Horizontal forces	6	down tube	Min 11	−70	0.236
	6	down tube	Max 11	70	
	1	top tube	Min 22	−37	
	1	top tube	Max 22	37	
	3	top tube	Min 12	−3.812	
	3	top tube	Max 12	3.812	
Vertical forces	2	seat stays	Min 11	−236	0.587
	5	seat tube	Max 11	197	
	1	seat tube	Min 22	−104	
	3	seat tube	Max 22	153	
	5	seat tube	Min 12	−13.83	
	1	seat tube	Max 12	16.46	
Pedaling forces	5	seat tube	Min 11	−306	1.537
	5	seat tube	Max 11	357	
	1	seat tube	Min 22	−250	
	3	seat tube	Max 22	240	
	5	seat tube	Min 12	−26.3	
	5	seat tube	Max 12	26.61	

Table 26. Stress and displacement results of stacking scenario 8.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	6	down tube	Min 11	−385	0.723
	2	down tube	Max 11	456	
	1	head tube	Min 22	−226	
	1	top tube	Max 22	240	
	1	down tube	Min 12	−27.64	
	1	top tube	Max 12	16.31	
Falling frame	2	down tube	Min 11	−102	0.321
	6	down tube	Max 11	94	
	3	seat tube	Min 22	−57	
	1	head tube	Max 22	51	
	3	seat tube	Min 12	−5.905	
	5	seat tube	Max 12	6.312	
Horizontal forces	6	down tube	Min 11	−77	0.257
	6	down tube	Max 11	77	
	1	head tube	Min 22	−45	
	1	head tube	Max 22	45	
	1	down tube	Min 12	−4.613	
	1	down tube	Max 12	4.613	

Table 26. Cont.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Vertical forces	2	seat tube	Min 11	−234	0.748
	5	seat tube	Max 11	241	
	1	seat tube	Min 22	−123	
	3	seat tube	Max 22	192	
	5	seat tube	Min 12	−17.45	
	1	seat tube	Max 12	19.95	
Pedaling forces	5	seat tube	Min 11	−304	1.536
	5	seat tube	Max 11	348	
	1	seat tube	Min 22	−250	
	3	seat tube	Max 22	240	
	5	seat tube	Min 12	−26.22	
	5	seat tube	Max 12	26.65	

Table 27. Stress and displacement results of stacking scenario 9.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	8	down tube	Min 11	−229	0.556
	2	down tube	Max 11	180	
	7	down tube	Min 22	−106	
	1	top tube	Max 22	106	
	1	down tube	Min 12	−10.53	
	5	top tube	Max 12	11.93	
Falling frame	2	down tube	Min 11	−42	0.384
	8	down tube	Max 11	55	
	8	seat tube	Min 22	−24	
	7	down tube	Max 22	26	
	5	down tube	Min 12	−2.634	
	1	down tube	Max 12	2.396	
Horizontal forces	8	down tube	Min 11	−55	0.176
	8	down tube	Max 11	55	
	7	down tube	Min 22	−26	
	7	down tube	Max 22	26	
	5	top tube	Min 12	−2.733	
	5	top tube	Max 12	2.733	
Vertical forces	2	seat tube	Min 11	−234	0.797
	5	seat tube	Max 11	241	
	1	seat tube	Min 22	−123	
	3	seat tube	Max 22	191	
	5	seat tube	Min 12	−17.42	
	1	seat tube	Max 12	19.97	
Pedaling forces	2	seat tube	Min 11	−212	1.097
	9	seat tube	Max 11	274	
	1	seat tube	Min 22	−174	
	8	seat tube	Max 22	153	
	1	seat tube	Min 12	−15.02	
	8	seat tube	Max 12	12.13	

Table 28. Stress and displacement results of stacking scenario 10.

Test	Layer	Tube	Stress	MPa	Displacement (mm)
Drop mass	1	head tube	Min 11	−362	1.501
	1	top tube	Max 11	470	
	1	head tube	Min 22	−29	
	1	top tube	Max 22	43	
	1	down tube	Min 12	−33.34	
	1	top tube	Max 12	33.28	
Falling frame	1	top tube	Min 11	−108	0.445
	1	head tube	Max 11	89	
	7	seat tube	Min 22	−15	
	3	top tube	Max 22	9	
	1	top tube	Min 12	−3.568	
	3	seat tube	Max 12	3.257	
Horizontal forces	1	top tube	Min 11	−75	0.289
	1	top tube	Max 11	75	
	3	top tube	Min 22	−7	
	3	top tube	Max 22	7	
	1	top tube	Min 12	−6.215	
	1	top tube	Max 12	6.215	
Vertical forces	3	seat stays	Min 11	−307	0.648
	4	seat tube	Max 11	277	
	3	seat stays	Min 22	−27	
	7	seat tube	Max 22	39	
	7	seat tube	Min 12	−20.86	
	7	seat tube	Max 12	19.08	
Pedaling forces	2	seat tube	Min 11	−442	1.92
	2	seat tube	Max 11	408	
	6	chain stay left	Min 22	−46	
	7	seat tube	Max 22	50	
	7	seat tube	Min 12	−50.4	
	7	seat tube	Max 12	55.65	

Table 29. Weight of each stacking recipe.

Stacking Recipe	Weight (gr)
M46J Woven quasi-isotropic	615
T300 Woven quasi-isotropic	615
Stacking scenario 1	805
Stacking scenario 2	910
Stacking scenario 3	835
Stacking scenario 4	810
Stacking scenario 5	1145
Stacking scenario 6	810
Stacking scenario 7	810
Stacking scenario 8	780
Stacking scenario 9	1180
Stacking scenario 10	1145

The resulting stresses and displacements of the M46J Woven quasi-isotropic scenario for all the loading scenarios are shown in Table 17. No stress exceeded the allowable stresses of Table 16.

In Table 18, the stresses and displacements listed are the results of the T300 Woven quasi-isotropic scenario for the five loading cases. Again, all the stresses were below the allowable levels of Table 16. The displacements had small variations from the M46J Woven quasi-isotropic scenario results.

The results of stacking scenario 1 for each loading test are presented in Table 19. Once again, all the stresses were within the allowable values for each material and significantly lower compared to the two previous stacking scenarios. The displacements also improved, especially in the drop mass, falling frame, vertical forces, and pedaling tests.

The results of stacking scenario 2 are presented in Table 20. There were some small variations from the previous scenario and all the stresses were allowable.

In the results of stacking scenario 3, presented in Table 21, there was a slight increase in the resulting stresses without any of them exceeding the allowable stresses of Table 16.

After evaluating the results of stacking scenario 4, presented in Table 22, the stresses appeared to be elevated compared to the results of stacking scenario 3 while still remaining within the allowable limits. There was also a slight elevation on the displacements, especially in the drop mass, vertical forces, and pedaling scenarios.

In the results of stacking scenario 5, shown in Table 23, there was a slight decrease in all the displacements, with a simultaneous increase in the stresses. While the resulting stresses were still in the allowable limits, the minimum stress of 11 in the pedaling forces test was approaching the limit of 600 MPa.

The results of stacking scenario 6, shown in Table 24, were similar to those of stacking scenario 5 in most of the loading cases. The most apparent differentiation is in the vertical forces and pedaling tests, where the displacements were lower and the high stresses were diminished in most cases. The exception was located in the Min 22 and Max 22 stresses in the pedaling forces test where there was an increase; however, these values were well within the allowable range.

In stacking scenario 7, whose results are presented in Table 25, there was a further decrease in the displacements and stresses of the drop mass, falling frame, and horizontal forces tests and an increase in the displacement and stresses of the vertical forces test. The results for the pedaling test were similar between stacking scenarios 6 and 7.

After reviewing the results of stacking scenario 8, shown in Table 26, and comparing them to those of stacking scenario 7, the displacements in drop mass and falling frame tests were lower and the stresses were slightly elevated. The horizontal forces and pedaling forces tests had very similar results in both scenarios. The vertical forces test showed a slight increase in the displacement and stresses. All the stresses were below the allowable limits.

In stacking scenario 9, whose results are displayed in Table 27, there was a further decrease in the displacements and the stresses in the drop mass, horizontal forces, and pedaling forces tests. The vertical forces test showed similar stresses, with a slight increase in the displacement, while the falling frame results presented a decrease in the stresses and a minor increase in the displacement. All the stresses were allowable.

The results of stacking scenario 10, shown in Table 28, when compared to those of stacking scenario 9, showed a significant increase in most of the stresses and displacements in all the loading cases. Nevertheless, the stresses did not approach the limits set by the materials presented in Table 16.

The final comparison between the various stacking scenarios was regarding the weight of the frame that each lay-up recipe would result in. Table 29 presents the weights of the various resulting frames.

The lightest stacking recipes were the two quasi-isotropic recipes with M46J Woven and T300 Woven. However, the displacements they exhibited were not as low as those of other tested recipes. The second-lightest scenario was the 8th stacking recipe. The stresses that occurred in the five loading cases are all kept in the mid-to-low range. In addition, the displacements were some of the lowest across all the test recipes. The only scenario that displayed lower displacements in some of the tests (drop mass and pedaling tests) was the 9th stacking recipe, but this comes at the cost of additional mass (almost 50% more mass). There were other recipes that had relative low weight, such as stacking scenarios 1, 4, 6, and 7, but the displacements they developed were inferior to those of stacking scenario 8.

When further investigating the results of stacking scenario 8, we can see that the developing stresses in the various loading cases were nowhere near the limit set for the

materials used. When we tried to remove some of the plies that did not contribute much to the overall structure, meaning that the load they bore was kept at low levels, the displacements that occurred were significantly higher. Therefore, we decided that this was the best solution for our frame.

4. Conclusions

In this paper, the main project was to indicate the design method of manufacturing a competitive road bicycle frame with a combination of lightness, strength, and aerodynamic efficiency using carbon/epoxy composite sheets. This superior blend of materials transmits its mechanical attributes to the bicycle by applying it with a proper sequence and direction on each part of the frame to pass approved tests of static and dynamic loading scenarios.

Firstly, through the use of spaceframe models, the basic geometry of the frame was determined to be the optimized geometry because this produced reduced displacements and stresses compared to the other models and the absorption of the strain energy was well distributed across the different tubes of the frame.

The next step was to determine the shape of each tube of the bicycle. To this end, both structural (bending and torsional) and aerodynamic tests were simulated for various cross-sections for each part of the frame. After evaluating the results, the cross-sections that were chosen were: the circular cross-section with 40 mm diameter for the top tube, a combination of two oval cross-sections (39×79 and 51×79) for the down tube, complex 1 for the seat tube, the oval $30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ cross-section for the seat stays, and a combination of the oval and rectangular $20 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ cross-sections for the chain stays.

Having selected the appropriate geometry and the cross-sections for each tube, the final model of the frame was created. With the use of the five tests set by the ISO standards, various stacking scenarios were tested to determine the layup recipe that best combined low weight, high stiffness along the down tube, bottom bracket, and chain stays, and absorption of vibrations while riding. The laminate recipe that was chosen was stacking scenario 8, which presented the second lowest mass and some of the lowest displacements among the other layup recipes.

The joints of the tubes on the frame were created as smooth surfaces connecting the surrounding tubes and were not a primary subject of this study. Spending more time on the evaluation of their shape would be counterintuitive to the development of this new time-saving design process when considering the small gains the change in those areas would offer to the overall performance of the frame. In the future, the shape of the joints could be the parameter of a new aerodynamic and structural study.

Author Contributions: Conceptualization, A.G.K.; data curation, A.G.K. and C.S.N.; formal analysis, A.G.K.; funding acquisition, A.G.K.; investigation, A.G.K. and C.S.N.; methodology, A.G.K. and D.E.M.; project administration, A.G.K. and D.E.M.; resources, A.G.K. and D.E.M.; software, A.G.K.; supervision, A.G.K. and D.E.M.; validation, A.G.K., D.E.M. and C.S.N.; visualization, A.G.K. and C.S.N.; writing—original draft, A.G.K.; writing—review and editing, C.S.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The raw/processed data required to reproduce these findings cannot be shared at this time due to technical or time limitations.

Acknowledgments: In this section, we need to acknowledge the help provided during this research by two NTUA students, Alexandros Chronis and Evangelos Goulas, who helped process the data as well as write and proofread the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Sajjan, S.; Selvaraj, D.P. A review on polymer matrix composite materials and their applications. *Mater. Today Proc.* **2021**, *47*, 5493–5498. [CrossRef]
2. Ning, H.; Vaidya, U.; Janowski, G.M.; Husman, G. Design, manufacture, and analysis of a thermoplastic composite frame structure for mass transit. *Compos. Struct.* **2007**, *80*, 105–116. [CrossRef]
3. May, D.; Goergen, C.; Friedrich, K. Multifunctionality of polymer composites based on recycled carbon fibers: A review. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* **2021**, *4*, 70–81. [CrossRef]
4. Daniel, I.M.; Ishai, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*; Oxford University Press: New York, NY, USA, 2006.
5. Fuerle, F.; Siens, J. Decomposed surrogate-based optimization of carbon-fiber bicycle frames using Optimum Latin Hypercubes for constrained design spaces. *Comput. Struct.* **2013**, *119*, 48–59. [CrossRef]
6. Covill, D.; Allard, P.; Drouet, J.-M.; Emerson, N. An Assessment of Bicycle Frame Behaviour under Various Load Conditions Using Numerical Simulations. *Procedia Eng.* **2016**, *147*, 665–670. [CrossRef]
7. Khutal, K.; Kathiresan, G.; Ashok, K.; Simhachalam, B.; Jebaseelan, D.D. Design Validation Methodology for Bicycle Frames Using Finite Element Analysis. *Mater. Today Proc.* **2020**, *22*, 1861–1869. [CrossRef]
8. Fintelman, D.M.; Hemida, H.; Sterling, M.; Li, F.-X. CFD simulations of the flow around a cyclist subjected to crosswinds. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **2015**, *144*, 31–41. [CrossRef]
9. Malizia, F.; Blocken, B. Bicycle aerodynamics: History, state-of-the-art and future perspectives. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **2020**, *200*, 104–134. [CrossRef]
10. Malizia, F.; Blocken, B. Cyclist aerodynamics through time: Better, faster, stronger. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **2021**, *214*, 104673. [CrossRef]
11. Della Vecchia, P.; Nicolosi, F. Aerodynamic guidelines in the design and optimization of new regional turboprop aircraft. *Aerosp. Sci. Technol.* **2014**, *38*, 88–104. [CrossRef]
12. Panagiotou, P.; Kaparos, P.; Yakinthos, K. Winglet design and optimization for a MALE UAV using CFD. *Aerosp. Sci. Technol.* **2014**, *39*, 190–205. [CrossRef]
13. Idahosa, U.; Golubev, V.V.; Balabanov, V.O. An Automated Optimal Design of a Fan Blade Using an Integrated CFD/MDO Computer Environment. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* **2008**, *2*, 141–154. [CrossRef]
14. Joung, T.-H.; Sammut, K.; He, F.; Lee, S.-K. Shape optimization of an autonomous underwater vehicle with a ducted propeller using computational fluid dynamics analysis. *Int. J. Nav. Archit. Ocean. Eng.* **2012**, *4*, 44–56. [CrossRef]
15. Shokrieh, M.M.; Rezaei, D. Analysis and optimization of a composite leaf spring. *Compos. Struct.* **2003**, *60*, 317–325. [CrossRef]
16. Choi, B.-L.; Choi, B.-H. Numerical method for optimizing design variables of carbon-fiber-reinforced epoxy composite coil springs. *Compos. Part B* **2015**, *82*, 42–49. [CrossRef]
17. Kim, D.-H.; Choi, D.-H.; Kim, H.-S. Design optimization of a carbon fiber reinforced composite automotive lower arm. *Compos. Part B* **2014**, *58*, 400–407. [CrossRef]
18. Amiruddin, A.K.; Sapuan, S.M.; Jaafar, A.A. Analysis of glass fiber reinforced epoxy composite hovercraft hull base. *Mater. Des.* **2008**, *29*, 1453–1458. [CrossRef]
19. Kalyanasundaram, S.; Lowe, A.; Watters, A.J. Finite element analysis and optimization of composite wheelchair wheels. *Compos. Struct.* **2006**, *75*, 393–399. [CrossRef]
20. Hansen, L.U.; Horst, P. Multilevel optimization in aircraft structural design evaluation. *Compos. Struct.* **2008**, *86*, 104–118. [CrossRef]
21. Song, F.; Ni, Y.; Tan, Z. Optimization Design, Modeling and Dynamic Analysis for Composite Wind Turbine Blade. *Procedia Eng.* **2011**, *16*, 369–375. [CrossRef]
22. Chang, R.R.; Wu, W.J.; Jia, S.Y.; Tan, H.M. Design and Manufacturing of a Laminated Composite Bicycle Crank. *Procedia Eng.* **2013**, *67*, 497–505. [CrossRef]
23. Lin, C.-C.; Huang, S.-J.; Liu, C.-C. Structural analysis and optimization of bicycle frame designs. *Adv. Mech. Eng.* **2017**, *9*, 1687814017739513. [CrossRef]
24. Sani, M.S.M.; Nazri, N.A.; Zahari, S.N.; Abdullah, N.A.Z.; Priyandoko, G. Dynamic Study of Bicycle Frame Structure. *Mater. Sci. Eng.* **2016**, *160*, 012009. [CrossRef]
25. Chung, C.-P.; Lee, C.-F. Parameters Decision on the Product Characteristics of a Bike Frame. *Procedia—Soc. Behav. Sci.* **2012**, *40*, 107–115. [CrossRef]
26. Covill, D.; Begg, S.; Elton, E.; Milne, M.; Morris, R.; Katz, T. Parametric finite element analysis of bicycle frame geometries. *Procedia Eng.* **2014**, *72*, 441–446. [CrossRef]
27. Devaiah, B.B.; Purohit, R.; Rana, R.S.; Parashar, V. Stress Analysis of a Bicycle Frame. *Mater. Today Proc.* **2018**, *5*, 18920–18926. [CrossRef]
28. Liu, T.J.-C.; Wu, H.-C. Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon epoxy laminate. *Mater. Des.* **2010**, *31*, 1971–1980. [CrossRef]
29. Aceves, C.M.; Skordos, A.A.; Sutcliffe, M.P.F. Design selection methodology for composite structures. *Mater. Des.* **2008**, *29*, 418–426. [CrossRef]
30. Keithonearth, CC BY 3.0. Available online: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4914154> (accessed on 12 January 2022).

31. Clarification Guide of the UCI Technical Regulation—05.10.2021 version. 2021. Available online: <https://www.uci.org/equipment/bh2JJzw1eB0n876rX2iB1> (accessed on 12 January 2021).
32. Peterson, L.A.; Londry, K.J. Finite-element structural analysis: A new tool for bicycle frame design. *Bike Tech* **1986**, *5*, 2.
33. European Wind Atlas. Available online: <https://www.wasp.dk/wind-atlas/european-wind-atlas> (accessed on 12 January 2022).
34. ISO 4210-6, Cycles-Safety Requirements for bicycles Part 6, ISO 2014. Available online: <https://www.iso.org/standard/78081.html> (accessed on 12 January 2022).
35. M46J Data Sheet, TORAYCA. Available online: <https://www.torayca.com/wp-content/uploads/M46J-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf> (accessed on 12 January 2022).
36. T300 Data Sheet, TORAYCA. Available online: <https://www.torayca.com/wp-content/uploads/T300-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf> (accessed on 12 January 2022).
37. T700S Data Sheet, TORAYCA. Available online: <https://www.torayca.com/wp-content/uploads/T700S-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf> (accessed on 12 January 2022).



The effect of resonance on the void content in CFRP tubes



A. Kitselis^{a, b, *}, N.A. Traiforos^b, D.E. Manolakos^b

^a Gram Carbon, 4, Tilefanous St., 10442, Athens, Greece

^b School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, 9, Iroon Polytechniou Avenue, 15780, Athens, Greece

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 November 2015

Received in revised form

30 July 2016

Accepted 6 September 2016

Available online 9 September 2016

Keywords:

Void content

Defects

Resonance

Composite materials

Carbon fibers

Epoxy resin

Image processing

Compressive strength

ABSTRACT

The presence of voids is a common microstructural defect in the manufacturing process of CFRP structures. Eliminating such defects is expected to improve the mechanical properties of the structure and increase its quality.

This work reports experimental research on the effect of resonance applied to the curing system of CFRP tube production, mainly aiming at the reduction of the void content. Four test series were carried out in order to determine the effect of different curing cycles on the void content of the specimens. The CFRP tubes were hand made using prepreg carbon. A high resolution image processing technique was used to determine types and quantity of defects. All specimens were subjected to compression to determine their compressive strength and modulus of elasticity. The experimental results showed a reduction in void content when resonance was applied to the curing system of CFRP tube production, leading to an increase of the compressive strength of the specimens tested.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Voids found within the matrix resin of CFRP structures are the result of either entrapped air during the manufacturing process or volatiles emitted from the resin during the cure stage due to the dissolved moisture in the resin [1–3].

At the manufacturing process of CFRP structures in the raw prepreg material there is always an initial population of air bubbles due to deficient fiber impregnation, whilst other bubbles arise on the lamina surface during the preparation of the laminate kit, leading to an initial void population subjected to the curing cycle [4].

At the end product, a high void content indicates that the resin has not thoroughly embedded the fibers during the cure cycle. This results in a weaker interface strength due to inadequate adhesion, causing a reduction of the composite strengths and moduli, as well as fiber damage due to mutual abrasion of fibers and stress concentration that will trigger delamination, cracks and growth of the damage mechanisms of the structure [5,6]. Moreover, voids facilitate moisture absorption, which leads to the degradation of the fiber–matrix interface [7].

Many studies have successfully addressed the effect of voids on the mechanical properties of CFRP structures [8–16]. It is, therefore, important to keep the void content below a certain limit, typically less than 1% for aerospace structures and around 5% for other applications [17,18].

A well-known technique for void reduction is the use of an autoclave in the curing stage. Although it is an effective technique, there is a great industrial interest for an out of autoclave curing process, for cost reduction reasons [19–22]. In the latter case, to reduce the increased void population, some researchers suggest the use of vibrations induced to the curing cycle [23–25]. It has been also suggested [26] that the use of low frequency vibrations can reduce the void population by 50%.

2. Experimental

2.1. Scope

The scope of this paper is to examine the use of resonance applied to the curing system of CFRP tubes production, aiming to the reduction of the void content.

For this reason, twenty four tubular specimens of an outer diameter of 31.5 mm were manufactured using four different curing processes as presented in Table 1. The selection of these curing

* Corresponding author. Gram Carbon, 4, Tilefanous St., 10442, Athens, Greece.
E-mail address: grammarios@gmail.com (A. Kitselis).

Table 1
Curing processes.

Curing process	Curing time (h)	Pressure difference to atmospheric (bar)	Resonance
1	4.5	7	Off
2	4.5	1	Off
3	30	1	On
4	4.5	1	On

Table 2
Stacking sequence of the specimens.

Specimen type 1	Specimen type 2	Specimen type 3
UD90T700	T300W 090	T300W 45
UD0 T700	UD0 T700	T300W 090
UD90 T700	T300W 45	T300W 45
UD0 T700	UD90 T700	T300W 090
UD90 T700	T300W 090	T300W 45
UD0 T700	UD0 T700	T300W 090
UD90 T700	T300W 45	T300W 45
UD0 T700	UD90 T700	T300W 090

cycles was made in order to better compare and examine their effect on the void content of the corresponding specimens, as well as to comply with the standard manufacturing practices used both by the NTUA's Manufacturing Technology division and Gram Carbon.

2.2. Test materials

All the laminate kits were manufactured by hand lay-up using prepreg carbon fibers. The fibers used were T300 woven and T700 unidirectional, supplied both by Torayca. The T700 prepreg sheet contained 36% resin in weight, while the T300 sheet 43% resin in weight. The initial void content in the prepreg material was less than 1% [27]. The thickness of T300 woven sheet was measured 0.35 mm and 0.17 mm for the T700 unidirectional sheet. The resin type contained in the prepreg was VTC401 supplied by SHD Composites. The prepreg sheet used to manufacture the specimens had

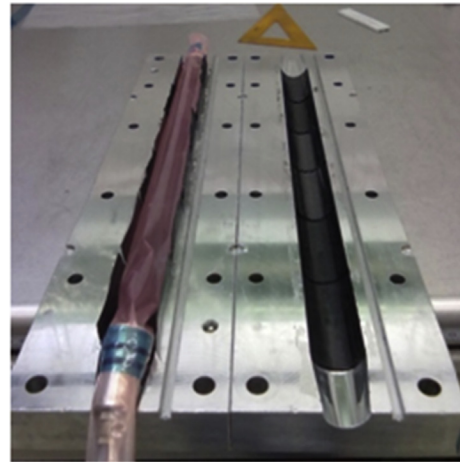


Fig. 2. Hand lay-up on the mold, the vacuum bag and the pneumatic connectors.

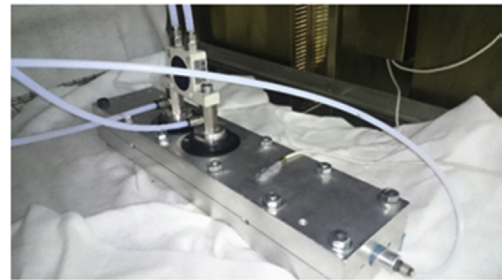


Fig. 3. The pneumatic vibrator with the high pressure lines feeding the vibrator and keeping constant pressure inside the mold.

a shelf-life approximately ten days at room temperature (20 °C). The Young's modulus of the VTC401 epoxy matrix is 7.56 GPa, while the tensile strength of this epoxy was predicted 29.6 MPa by a tension test according to ISO 527-5 standard [28].

2.3. Equipment and procedure

The experimental equipment included an Instron 4482 test machine, of 10 tons capacity, a custom made oven designed by Gram Carbon, a vacuum pump fitted with high pressure lines, a compressor, an aluminum mold used for manufacturing the cylindrical tubes, a pneumatic vibrator and a set of thermocouples used for data acquisition.

Table 3
Curing steps.

Step	Temp (°C)	Time (h)
Long cure		
1	25	0,05
2	75	0,30
3	67	1
4	67	18
5	35	20
6	125	25
7	122	27
8	40	30
Short cure		
1	30	0,1
2	110	0,35
3	110	1
4	105	4,5

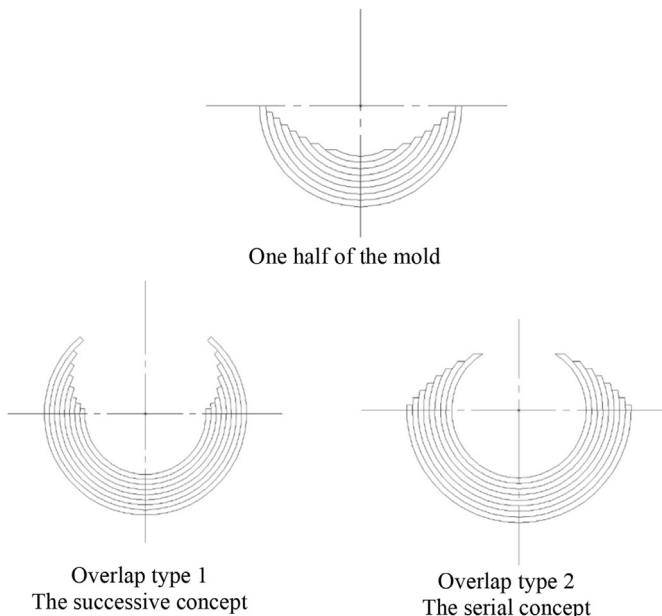
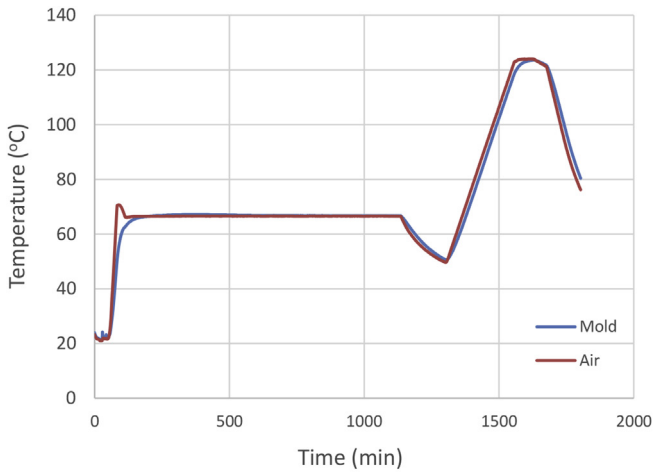
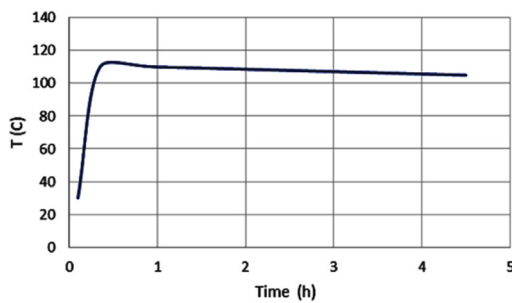


Fig. 1. Ply overlap concepts.



(a)



(b)

Fig. 4. Curing cycle for: (a) long cure; (b) short cure.

For each curing process six specimens were manufactured by three different stacking sequences as shown in Table 2. For each stacking sequence, two different specimens were manufactured, one by the *serial ply overlap* concept and one by the *successive ply overlap* concept, see details in Fig. 1. The overlap distance between successive plies was fifteen times the thickness of the ply for both overlap design concepts.

To utilize each overlap concept, the plies, which had a rectangular shape, were first cut by hand from the prepreg sheet to the right dimensions with the use of a ruler and a pair of scissors. Then according to each stacking sequence the manufacturing of the laminates kit was made also with the use of a ruler to measure the position of each ply in the lay-up process. The atmospheric conditions at the manufacturing stage of the laminates were

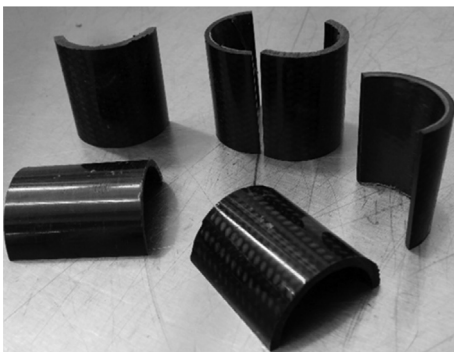


Fig. 5. Axially cut specimens.

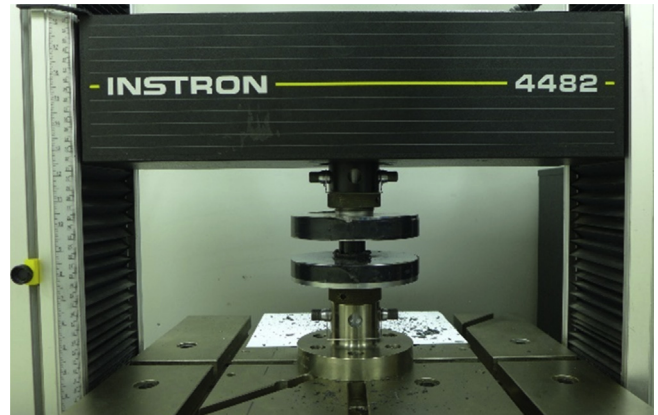


Fig. 6. The compression test rig.

temperature of 21° C and humidity levels at 52% RH.

Then the laminate kit was placed inside the mold to form the tubes. The mold consisted from two pieces, each one for creating half of the tube. After placing the laminate kit in the mold a vacuum bag was put inside the mold to create the desired pressure distribution and the mold was closed. In order to create the pressure inside the mold a connector was fitted at the end of the vacuum bag and at the end of the mold. Inside the mold air was pressurized by a compressor through high pressure lines Fig. 2.

With the mold closed and air was pressed inside it the plies from one half of the mold overlapped the plies from the other half by a specific overlap design concept as described in Fig. 1. Then the mold was transferred in the oven and the high pressure lines passed through the oven to the compressor to keep a constant pressure inside the mold.

A pneumatic vibrator was fitted at the top of the mold inside the oven in order to implement the vibrations during the curing stage as shown in Fig. 3. The resonance of the mold was achieved by measuring, the amplitude of motion of a set of aluminum balls placed on the mold's surface before the start of the curing cycle. After the resonance was achieved, the setting of the vibrator was fixed at its position, the balls were removed and the curing cycle started. The resonance kept applied during the whole curing cycle.



Fig. 7. Upper and lower views of the specimens tested.

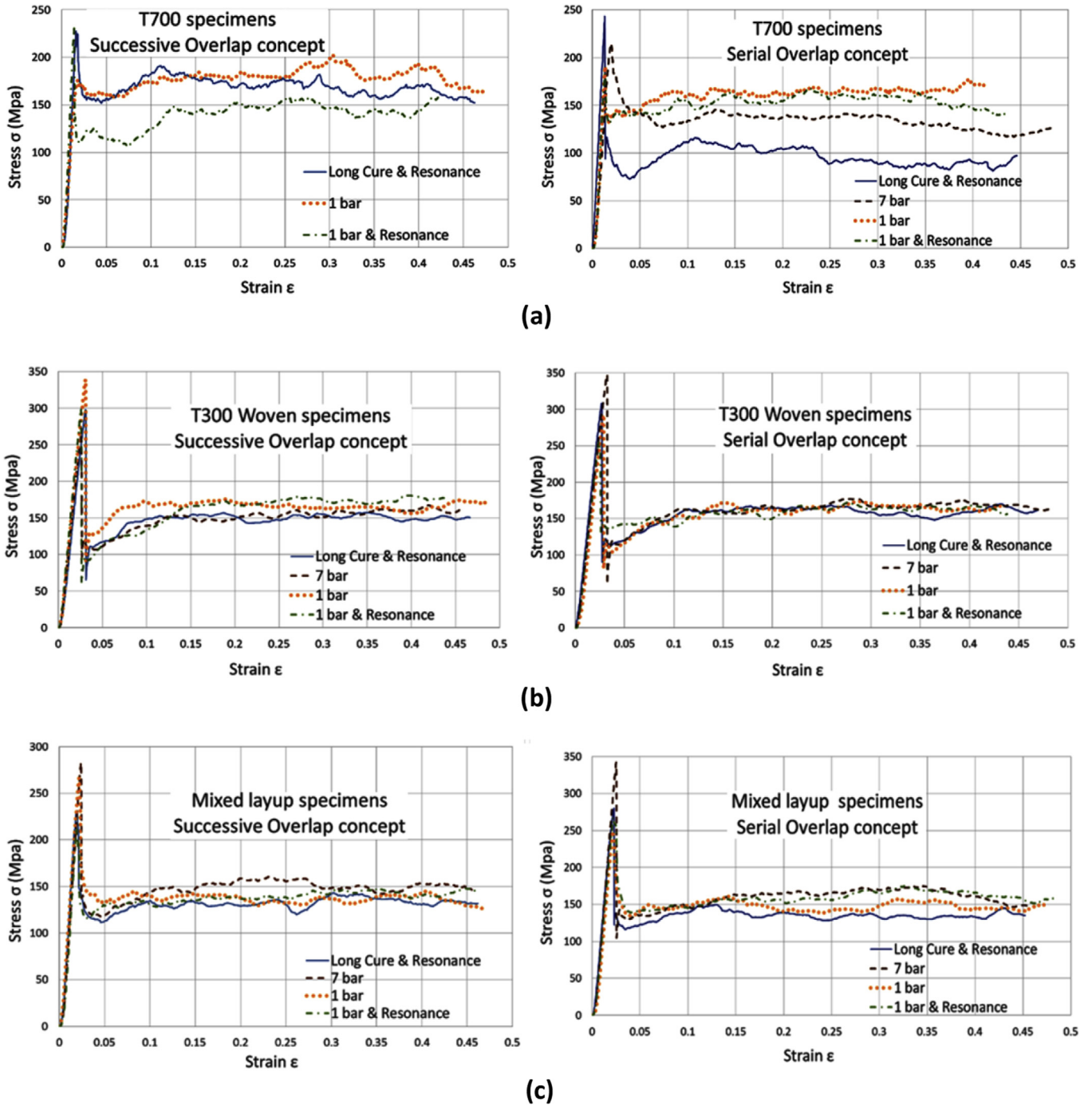


Fig. 8. Experimental stress-strain curves for: (a) T700 specimens; (b) T300 woven specimens; (c) Mixed lay-up specimens.

The curing process was performed in eight steps for the long curing process and in five steps for the short one [29]. The curing steps are presented in detail in Table 3. The actual curing cycles obtained from the thermocouple in the oven are shown in Fig. 4.

After curing, the specimens were machined to their final dimensions and their surfaces were polished. The initial cylindrical tubes with a length of around 70 mm were cut in two halves. One half was axially compressed, while the other half was axially cut to measure the number and types of defects, see Fig. 5.

The exact dimensions and weight of all specimens were measured using a digital Vernier caliper and a high accuracy scale.

Each test series was labeled with a specific coding name. Index 1 indicates the successive concept of ply overlap, while index 2 refers to the serial one.

All specimens were subjected to axial compression, see Figs. 6 and 7. The speed of the moving plate was kept constant at 5 mm/min, whilst a total height reduction of 15 mm was applied in all specimens tested. Specimens which experienced an unexpected failure mode were discarded and not considered to the experiment analysis.

The load-shortening curves obtained from the compression testing were transformed to stress-strain (σ - ϵ) curves, applying the

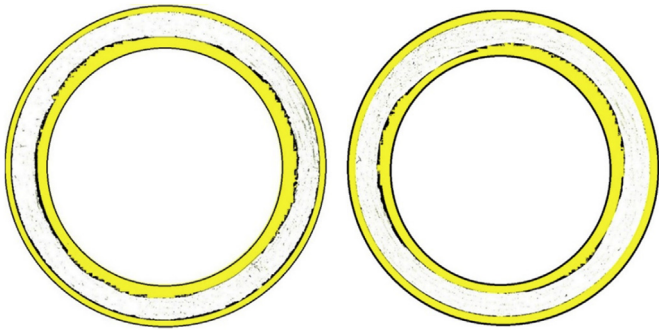


Fig. 9. Material Structure of the specimen. Curing process 1, Specimen type 3, Ply overlap concept 1.

formulation (see Fig. 8)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ and } \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$$

where: F is the applied compressive load, A_0 is the nominal cross-section area of the tubular component, Δh the tube shortening and h_0 the initial height of the specimen tested [30].

The modulus of elasticity, E , was predicted in the elastic region by the relation $E = d\sigma/d\varepsilon$.

To examine the number of voids of the cross-section area of the specimens a high resolution scanning technique was applied. The specimens were placed in the scanner and scanned at 4800 dpi. For each specimen three cross-section areas were examined for void content, the two ends of the tube which was then subjected to axial compression and the axial cut-off area of the other half, as described above.

The images obtained were then imported to Matlab and processed using the software's image processing filters. The shades were removed, the edges were sharpened, the colors were enhanced and the black and white images of each specimen were created as presented in Figs. 9–11 by identifying the presence of voids through its perimeter and change of brightness and color of the image. The white color in Fig. 9 represents the material of the structure, while the distribution of voids at the same cross-section area is shown in Fig. 10. The axial cross section area is shown in Fig. 11. Finally, the void area percentage for each image was determined by dividing the number or pixels which represent the voids by those of the whole structure.

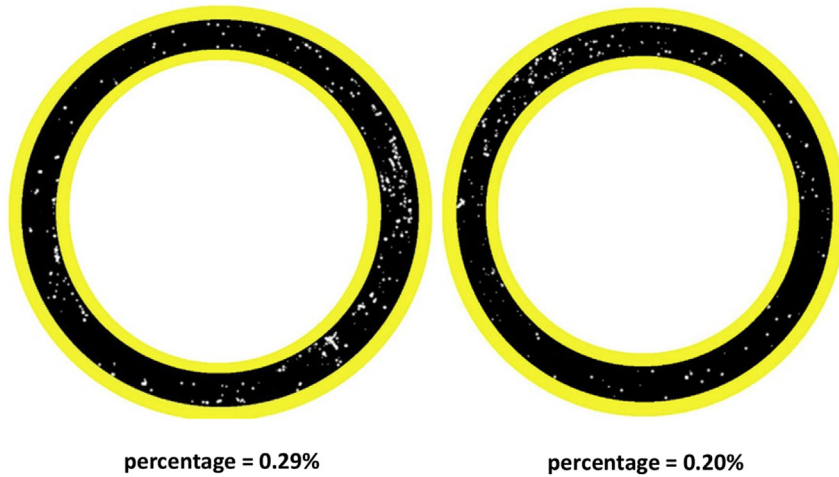


Fig. 10. Voids distribution (% area) of the previous specimen.

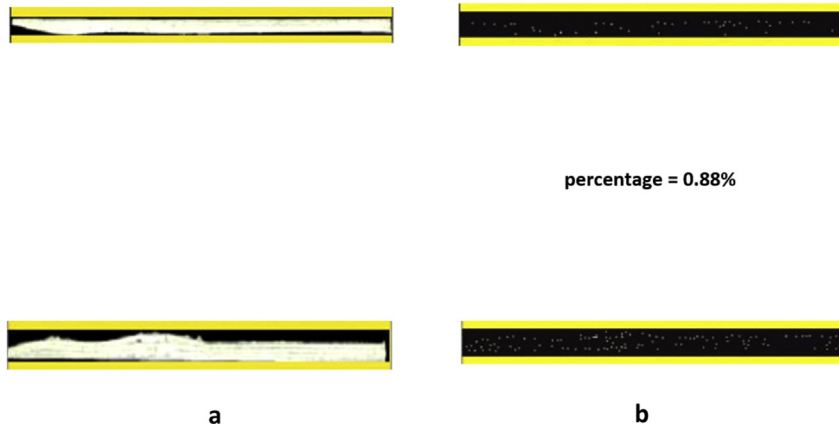


Fig. 11. Axial cross-section. Curing process 3, Specimen type 1, Ply overlap concept 1. a) Material structure, b) voids distribution.

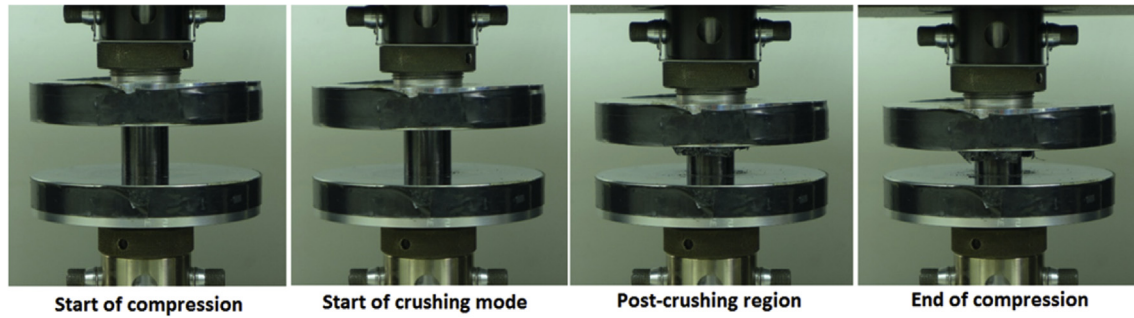


Fig. 12. Compression phases.

3. Results

The experimental results are presented in the form of the set of graphs shown in Fig. 8. The specimens were categorized by their stacking sequence and a direct comparison between different curing cycles can be extracted from these plots concerning the mechanical properties of the specimens.

The different stages of the collapse behavior of the tube structure can be seen in Fig. 12. It shows four characteristic images taken while compressing a specimen with a serial overlap design concept (overlap type 2) manufactured under atmospheric pressure with resonance applied to the curing process for 4.5 h (type 4 curing cycle) which was made only out of the T700 material (stacking sequence type 1). The mechanical properties of this specimen can be seen at the second plot with the dashed - dot line.

The first image is while the specimen is at its linear-elastic section of deformation. The second picture is taken just after the maximum compressive strength of the tube was reached. After this point the structure can only sustain post-crushing deformation and the compressive load that it can withstand falls dramatically after the first crack has occurred which reveals the end of the elastic region. The third image is from the midpoint of post-crushing deformation and the last image is after the end of the compression.

Fig. 9 shows the black and white images for the specimen

manufactured under 7 bar pressure without resonance (type 1 curing cycle) by the T300 woven material (stacking sequence type 3) and the successive overlap design concept (overlap type 1). The mechanical properties of this specimen can be seen in the third plot with the dashed line.

Finally, Table 4 includes the calculated values for void content, modulus of elasticity and compressive strength for each specimen.

4. Discussion

The test results indicated what in main terms was expected. The specimens which contained a higher void percentage had reduced mechanical properties compared to those which contained fewer voids at the same curing process.

Examination of the failure mechanism of the tubular specimens as shown in Fig. 12 reveals that all specimens experienced the mushrooming type collapse behavior as expected. After the first linear portion of the stress-strain curve, where the modulus of the elasticity, E, of the specimen was determined, the specimens entered the crushing and post-crushing region of deformation under a relatively stable compressive load.

When comparing the different curing processes as far as their ability to produce structures with increased mechanical properties (compressive strength and modulus of elasticity) is concerned

Table 4
Voids percentage & mechanical properties.

Curing process	Specimen type – overlap type	Thickness on overlap joint (mm)	Average voids area percentage at cylinder faces (%)	Half cylinder voids area percentage (%)	Compressive strength (MPa)	E (GPa)
1	1–1	1.6	1.5569 ± 0.9247	0.13336	–	–
	1–2	1.5	2.3477 ± 0.3334	0.31527	215,147	14,357
	2–1	2.2	0.6768 ± 0.1952	0.12297	282,797	14,213
	2–2	1.9	0.2727 ± 0.0159	0.11506	342,170	16,074
	3–1	2.9	0.2508 ± 0.1767	0.55788	265,566	12,048
	3–2	2.4	0.6190 ± 0.0443	0.47098	347,700	12,145
2	1–1	1.3	0.7062 ± 0.2927	0.11858	203,049	13,446
	1–2	1.3	1.0805 ± 0.0055	0.25504	190,959	19,810
	2–1	2.1	0.4031 ± 0.0232	0.09650	266,492	14,497
	2–2	2.0	0.5552 ± 0.0986	0.08450	249,654	14,436
	3–1	2.2	0.3432 ± 0.2311	0.58460	339,403	12,752
	3–2	2.6	0.4310 ± 0.0661	0.49103	292,738	11,436
3	1–1	1.3	0.4029 ± 0.2067	0.88033	227,449	19,255
	1–2	1.5	0.2595 ± 0.1115	0.44523	243,180	19,480
	2–1	1.9	0.1743 ± 0.0607	0.16355	230,560	15,877
	2–2	2.3	0.1267 ± 0.0055	0.29381	279,993	14,976
	3–1	2.9	0.2448 ± 0.0450	0.20308	297,980	10,574
	3–2	2.4	0.0895 ± 0.0164	0.15660	308,320	12,845
4	1–1	1.5	0.0667 ± 0.0308	0.44845	231,565	21,740
	1–2	1.3	0.1301 ± 0.0646	0.35498	183,374	20,991
	2–1	2.1	0.3049 ± 0.0793	0.13199	214,064	12,227
	2–2	1.9	0.7155 ± 0.2289	0.26144	268,562	14,252
	3–1	2.6	0.2641 ± 0.0970	0.18679	299,728	13,309
	3–2	2.6	0.3123 ± 0.0843	0.18622	256,276	12,799

Table 5
The contribution of the various curing processes and overlap concepts.

Curing process	Specimen type 1	Specimen type 2	Specimen type 3
Which overlap concept gives the highest compressive strength?			
1	–	2	2
2	1	1	1
3	2	2	2
4	1	2	1
Which overlap concept gives the highest E (Gpa)?			
1	–	2	2
2	2	1	1
3	2	1	2
4	1	2	1
Which overlap concept experiences the highest average destructive load?			
1	–	2	2
2	1	2	1
3	1	2	2
4	2	2	2
Which overlap concept concludes the minimum voids area percentage at the cross section?			
1	1	2	1
2	1	1	1
3	2	2	2
4	1	1	1
Which overlap concept concludes the minimum voids area percentage at the axial cross section?			
1	1	2	2
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	1	2
Overlap concept	Specimen type 1	Specimen type 2	Specimen type 3
Which curing cycle concludes the minimum voids area percentage at the cross section?			
1	4	3	3
2	4	3	3

(Table 5), the 7-bar process as well as the long cure with vibrations induced to the curing process performed better when manufacturing specimens with mixed materials (type 2 & 3) layup sequence, which is the case for most of the real life structures. That can be explained by the fact that in both curing cycles the air trapped in the laminate kit or inside the resin has successfully escaped the structure at the curing process. At the 7-bar process that is due to the increased pressure inside the mold, which simulates the effect of an autoclave, and at the long curing process with vibrations, the air trapped has enough time to escape the structure, assisted by the resonance of the mold after the T_g temperature has been reached inside the mold.

Another fact, which indicates the effect of resonance applied to the curing process, is that, for the 1-bar long curing process with vibrations as well as for the 1 bar short curing process with vibrations, the minimum void area percentage at the cylinder cross section area was investigated.

Comparing the two ply overlap concepts as far as their compressive strength is concerned, the type 2-serial ply overlap concept found to perform better than the type 1-successive ply overlap concept for the long curing process with vibration induced to the curing cycle, see results in Table 5. It is also evident that the serial ply overlap concept produces structures with the highest average destructive load in most of the cases. The type 1-successive ply overlap concept seems to produce better results at the short time 1 bar curing processes, where there is not enough time for the air to escape from the type 2-serial ply overlap concept under these conditions.

The percentage of voids in the cross section area of the specimens manufactured using the serial ply overlap concept is minimum when the long curing process with vibrations is used. The serial overlap concept also produces the minimum voids

percentage at the axial cross section area in most of the cases.

It is worth noting that the thickness of the specimens in the area of the joint of the successive overlap concept (type 1) was – in most of the cases – greater than the thickness of the serial overlap concept (type 2) according to Table 5. This fact indicates the increased amount of voids and pores trapped in the area of the successive overlap joint, which is an additional reason for their reduced mechanical strength and moduli.

An interesting outcome of the experiment which can be concluded from above is that the use of the long curing process while achieving resonance of the mold through a vibrator, as well as the use of the serial overlap type can produce structures with optimal characteristic considering the decreased void population and the increased mechanical properties of the mixed material layup specimens.

When deciding about the ply's overlap design for a structure, one should also take into account the manufacturing effort and time required to implement each of these concepts. From the authors experience in manufacturing carbon fiber monocoque frames for use in high performance competitive cycling, it can be said that the serial concept of ply overlap (type 2) is more difficult to manufacture and requires a substantially greater amount of time. That is because the patrons have to be carefully dimensioned and situated relatively to each other and inside the structure which proves to be increasingly difficult in complex geometrical structures and molds. As a result there is the possibility in these complex structures that the successive overlap concept (type 1) is more effective for producing structures with increased mechanical properties mainly due to the inability of the serial overlap concept to be successfully manufactured. But it is in the designers hand to make the appropriate decisions which best meet his targets and optimize these counteracting factors.

5. Conclusion

The effect of resonance applied to the curing process of CFRP tubes production was studied in this paper. The specimens were manufactured by using four different curing cycles and by two different ply overlap concepts, the serial and the successive one. The effect that these parameters have on the mechanical properties of CFRP tubes was examined as well as the percentage of voids at two different cross section areas of the specimens was studied.

The following conclusions can be extracted from the experiment.

- The use of the long curing process while achieving resonance of the mold containing the tube to be manufactured seems to produce tubes with better mechanical properties due to minimum void content, when this is combined with the use of the serial overlap concept.
- These conclusions are also valid for the 7-bar curing process without resonance.

Therefore, these two curing cycles are recommended for use in high stressed structures where there is also a need for minimum deformation and void content.

- The serial concept proved to produce structures with better mechanical properties than the successive concept.
- The successive concept is easier to manufacture and is the proposed solution in complex geometrical forms.
- The use of resonance in the curing cycle of CFRP tubes production can produce structures with reduced void content but the use of long time curing cycles is needed in order to provide enough time for the air to escape the laminate kit.

Future work will examine the use of different curing cycles in manufacturing CFRP tubes, as well as test the behavior of the tubes in fatigue.

References

- [1] Tavares SS, Michaud V, Manson JAE. Through thickness air permeability of prepregs during cure. *Compos Part A* 2009;40:1587–96.
- [2] Jackson K, Crabtree M. Autoclave quality composites tooling for composite from vacuum bag only processing. In: 47th International SAMPE symposium; 2002. p. 800–7.
- [3] Kardos JL, Dudukovic MP, Dave R. Void growth and resin transport during processing of thermosetting-matrix composites. *Adv Polym Sci* 1986;80:102–23.
- [4] Grunenfelder LK, Nutt SR. Void formation in composite prepregs - effect of dissolved moisture. *Compos Sci Technol* 2010;70:2304–9.
- [5] Boey FYC, Lye SW. Void reduction in autoclave processing of thermoset composites - part 1: high pressure effects on void reduction. *Composites* 1992;23(4):261–5.
- [6] Scott AE, Sinclair I, Spearing SM, Mavrogordato MN, Hepples W. Influence of voids on damage mechanisms in carbon/epoxy composites determined via high resolution computed tomography. *Compos Sci Technol* 2014;90:147–53.
- [7] Muric-Nesic J, Compston P, Stachurski ZH. On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fiber reinforced polymer composites. *Compos Part A* 2011;42(3):320–7.
- [8] Olivier P, Cottu JP, Ferret B. Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates. *Composites* 1995;26:509–15.
- [9] Ghiorse SR. Effect of void content on the mechanical properties of carbon/epoxy laminates. *SAMPE Q* 1992;24:54–9.
- [10] Zhu H, Wu B, Li D, Zhang D, Chen Y. Influence of voids on the tensile performance of carbon/epoxy fabric laminates. *J Mater Sci Technol* 2011;27:69–73.
- [11] Chambers A, Earl J, Squires C, Suhot M. The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications. *Int J Fatigue* 2006;28:1389–98.
- [12] Judd NCW, Wright WW. Voids and their effects on the mechanical properties of composites – an appraisal. *SAMPE J* 1978;10:10–4.
- [13] Liu L, Zhang B, Wu Z, Wang D. Effects of cure pressure induced voids on the mechanical strength of carbon/epoxy laminates. *J Mater Sci Technol* 2005;21(1):87–91.
- [14] Huang H, Talreja R. Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites. *Compos Sci Technol* 2005;65:1964–81.
- [15] Tang J, Lee WI, Springer GS. Effects of cure pressure on resin flow, voids, and mechanical properties. *J Compos Mater* 1987;21:421–40.
- [16] Costa ML, Almeida SFM, Rezende MC. The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates. *Compos Sci Technol* 2001;61:2101–8.
- [17] Liu L, Zhang BM, Wang DF, Wu ZJ. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. *Compos Struct* 2006;73(3):303–9.
- [18] Kocatepe K. Effect of low frequency vibration on porosity of LM25 and LM6 alloys. *Mater Des* 2007;28(6):1767–75.
- [19] Nightingale C, Day R. Flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fibre/epoxy composites cured thermally and with microwave radiation. *Compos Part A* 2002;33:1021–30.
- [20] Davies LW, Day RJ, Bond D, Nesbitt A, Ellis J, Gardon E. Effect of cure cycle heat transfer rates on the physical and mechanical properties of an epoxy matrix composite. *Compos Sci Technol* 2007;67:1892–9.
- [21] Hernandez S, Sket F, Molina-Aldareguva JM, Gonzalez C, Llorca J. Effect of curing cycle on void distribution and interlaminar shear strength in polymer-matrix composites. *Compos Sci Technol* 2011;71:1331–41.
- [22] Agius SL, Magniez KJC, Fox BL. Cure behaviour and void development within rapidly cured out-of-autoclave composites. *Compos Part B* 2013;47:230–7.
- [23] Stabler WR, Tatterson GB, Sadler RL, El-Shiekh AH. Void minimization in the manufacturing of carbon fiber composites by RTM. *SAMPE Q* 1992;23(2):38–42.
- [24] Muric-Nesic J, Compston P, Noble N, Stachurski ZH. Effect of low frequency vibrations on void content in composite materials. *Compos Part A* 2009;40(4):548–51.
- [25] Muric-Nesic J, Compston P, Stachurski ZH. On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fibre reinforced polymer composites. *Compos Part A* 2011;42:320–7.
- [26] Ghiorse SR, Jurta RM. Effects of low frequency vibration processing on carbon/epoxy laminates. *Composites* 1991;22(1):3–8.
- [27] ASTM D2734–09: Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics.
- [28] EN ISO 527–5:2014: Plastics - Determination of tensile properties of plastics - Part 5: Test condition for unidirectional fiber reinforced plastic composites.
- [29] Hernández S, Sket F, González C, Llorca J. Optimization of curing cycle in carbon fiber-reinforced laminates: void distribution and mechanical properties. *Compos Sci Technol* 2013;85:73–82.
- [30] ASTM D695–02a: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics¹.

Παράρτημα
Ιδιότητες υλικών

Library Material : M40J Woven Fabric 0,22mm

Category

Library Reference M40J Woven 2022.xml

Alternate Name : Not Defined

Mass Density (RHO) : 1.55g/cm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 86400MPa

Young's Modulus (E2) : 86400MPa

Young's Modulus (E3) : 7770MPa

Compression Young's Modulus (YC1) : 75000MPa

Compression Young's Modulus (YC2) : 75000MPa

Compression Young's Modulus (YC3) : 8100MPa

: Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) : 0.035Unitless

Shear Modulus (G) : 4250MPa

Type of Nonlinearity (TYPE) : Elastoplastic: stress-total strain
(MATS1/PLASTIC)

Yield Function Criterion (YF) : von Mises

Hardening Rule (HR) : Isotropic

Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain

Tangent Modulus (ETAN) : 0MPa

Strain Rate Dependency : Symonds and Cowper

Failure flag : (0) Failure is not considered

Thinning strain at failure (EPSTHIN): 0Unitless

Major In-plane strain at failure (EPSMAJ): 0Unitless

Percentage of integration points/layers (NUMINT): 0Unitless
Effective Plastic Strain for eroding elements (FS): 1e+20Unitless
Formulation for rate effects (VP) : (0) Scale Yield Effects
Plastic hardening modulus (EH) : 0MPa
Effective plastic strain in weld material at failure (EFAIL): 0Unitless
Mechanical Power to Heat Ratio : 0Unitless

===== Strength

Ultimate Tensile Strength : 698MPa
Ultimate Tensile Strength 2 : 698MPa
All : 1
Strength Limits : 0
Strain Ratio : 0
Stress Ratio : 0
Tsai-Wu : 0
Rice and Tracey : 0
Maximum Total Strain : 0
Maximum Stress : 0
Hashin : 0
Hoffman : 0
Tsai-Hill : 0
Puck : 0
LaRC04 : 0
Max Stress Tension (ST) : 698MPa
Tension (ST2) : 698MPa
Tension (ST3) : 26MPa
Max Stress Compression (SC) : 521MPa
Compression (SC2) : 521MPa
Max Stress Shear (SS) : 88.7MPa

Unidirectional Laminate Behavior (LOPT): Computed In-situ Strength (LOPT 1)

Fracture Angle Due to Pure Compressive Loading (ALFT): 53°

Rice Parameter (RICE) : 0.283Unitless

Shape Parameters (K01S) : 0.15Unitless

Shape Parameters (K01S) : 0.27Unitless

Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

===== Durability

Stress-Life Data : Coefficients

Strain-Life Data : Coefficients

Percent Reduction in Area : 0Unitless

===== Thermal

Thermal Expansion Coefficient Type : Secant

===== Creep

: None

===== Viscoelasticity

Model : None

===== Viscoplasticity

Viscoplastic Type : None

===== Damage

: None

===== Miscellaneous

: 3 Values

0

0

0

Studio Material : Not Defined

Crosshatch Pattern : Not Defined

Library Material : M46J Woven Fabric 0,22mm

Category

Library Reference M46J Woven 2022.xml

Alternate Name : Not Defined

Mass Density (RHO) : 1.48g/cm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 94250MPa

Young's Modulus (E2) : 94250MPa

Young's Modulus (E3) : 7770MPa

Compression Young's Modulus (YC1) : 76100MPa

Compression Young's Modulus (YC2) : 76100MPa

Compression Young's Modulus (YC3) : 8100MPa

: Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) : 0.01Unitless

Shear Modulus (G) : 3380MPa

Type of Nonlinearity (TYPE) : Elastoplastic: stress-total strain
(MATS1/PLASTIC)

Yield Function Criterion (YF) : von Mises

Hardening Rule (HR) : Isotropic

Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain

Tangent Modulus (ETAN) : 0MPa

Strain Rate Dependency : Symonds and Cowper

Failure flag : (0) Failure is not considered

Thinning strain at failure (EPSTHIN): 0Unitless

Major In-plane strain at failure (EPSMAJ): 0Unitless

Percentage of integration points/layers (NUMINT): 0Unitless

Effective Plastic Strain for eroding elements (FS): 1e+20Unitless

Formulation for rate effects (VP) : (0) Scale Yield Effects

Plastic hardening modulus (EH) : 0MPa

Effective plastic strain in weld material at failure (EFAIL): 0Unitless

Mechanical Power to Heat Ratio : 0Unitless

===== Strength

Ultimate Tensile Strength : 706.5MPa

Ultimate Tensile Strength 2 : 706.5MPa

All : 1

Strength Limits : 0

Strain Ratio : 0

Stress Ratio : 0

Tsai-Wu : 0

Rice and Tracey : 0

Maximum Total Strain : 0

Maximum Stress : 0

Hashin : 0

Hoffman : 0

Tsai-Hill : 0

Puck : 0

LaRC04 : 0

Max Stress Tension (ST) : 706.5MPa

Tension (ST2) : 706.5MPa

Tension (ST3) : 26MPa

Max Stress Compression (SC) : 427.5MPa

Compression (SC2) : 427.5MPa

Max Stress Shear (SS) : 89.6MPa

Unidirectional Laminate Behavior (LOPT): Computed In-situ Strength (LOPT 1)

Fracture Angle Due to Pure Compressive Loading (ALFT): 53°

Rice Parameter (RICE) : 0.283Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.15Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.27Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

===== Durability

Stress-Life Data : Coefficients
Strain-Life Data : Coefficients
Percent Reduction in Area : 0Unitless

===== Thermal

Thermal Expansion Coefficient Type : Secant

===== Creep

: None

===== Viscoelasticity

Model : None

===== Viscoplasticity

Viscoplastic Type : None

===== Damage

: None

===== Miscellaneous

: 3 Values

0

0

0

Studio Material : Not Defined

Crosshatch Pattern : Not Defined

Library Material : HR40 UD 0.17mm

Category

Library Reference HR40 UD 2022.xml

Alternate Name : Not Defined

Mass Density (RHO) : 1.5g/cm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 238250MPa

Young's Modulus (E2) : 7770MPa

Young's Modulus (E3) : 7770MPa

Compression Young's Modulus (YC1) : 207650MPa

Compression Young's Modulus (YC2) : 8100MPa

Compression Young's Modulus (YC3) : 8100MPa

: Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) : 0.3Unitless

Shear Modulus (G) : 5040MPa

Type of Nonlinearity (TYPE) : Elastoplastic: stress-total strain
(MATS1/PLASTIC)

Yield Function Criterion (YF) : von Mises

Hardening Rule (HR) : Isotropic

Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain

Tangent Modulus (ETAN) : 0MPa

Strain Rate Dependency : Symonds and Cowper

Failure flag : (0) Failure is not considered

Thinning strain at failure (EPSTHIN): 0Unitless

Major In-plane strain at failure (EPSMAJ): 0Unitless

Percentage of integration points/layers (NUMINT): 0Unitless

Effective Plastic Strain for eroding elements (FS): 1e+20Unitless

Formulation for rate effects (VP) : (0) Scale Yield Effects

Plastic hardening modulus (EH) : 0MPa

Effective plastic strain in weld material at failure (EFAIL): 0Unitless

Mechanical Power to Heat Ratio : 0Unitless

===== Strength

Ultimate Tensile Strength : 2216.01MPa

Ultimate Tensile Strength 2 : 25.69MPa

All : 1

Strength Limits : 0

Strain Ratio : 0

Stress Ratio : 0

Tsai-Wu : 0

Rice and Tracey : 0

Maximum Total Strain : 0

Maximum Stress : 0

Hashin : 0

Hoffman : 0

Tsai-Hill : 0

Puck : 0

LaRC04 : 0

Max Stress Tension (ST) : 2216.01MPa

Tension (ST2) : 25.69MPa

Tension (ST3) : 26MPa

Max Stress Compression (SC) : 1310.12MPa

Compression (SC2) : 232.77MPa

Max Stress Shear (SS) : 80.19MPa

Unidirectional Laminate Behavior (LOPT): Computed In-situ Strength (LOPT 1)

Fracture Angle Due to Pure Compressive Loading (ALFT): 53°

Rice Parameter (RICE) : 0.283Unitless

Shape Parameters (K01S) : 0.15Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.27Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

===== Durability

Stress-Life Data : Coefficients
Strain-Life Data : Coefficients
Percent Reduction in Area : 0Unitless

===== Thermal

Thermal Expansion Coefficient Type : Secant

===== Creep

: None

===== Viscoelasticity

Model : None

===== Viscoplasticity

Viscoplastic Type : None

===== Damage

: None

===== Miscellaneous

: 3 Values

0

0

0

Studio Material : Not Defined

Crosshatch Pattern : Not Defined

Library Material : M46J UD 0,17mm

Category

Library Reference M46J UD 2022.xml

Alternate Name : Not Defined

Mass Density (RHO) : 1.52g/cm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 259900MPa

Young's Modulus (E2) : 6600MPa

Young's Modulus (E3) : 6600MPa

Compression Young's Modulus (YC1) : 210700MPa

Compression Young's Modulus (YC2) : 8400MPa

Compression Young's Modulus (YC3) : 8400MPa

: Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) : 0.28Unitless

Shear Modulus (G) : 4010MPa

Type of Nonlinearity (TYPE) : Elastoplastic: stress-total strain
(MATS1/PLASTIC)

Yield Function Criterion (YF) : von Mises

Hardening Rule (HR) : Isotropic

Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain

Tangent Modulus (ETAN) : 0MPa

Strain Rate Dependency : Symonds and Cowper

Failure flag : (0) Failure is not considered

Thinning strain at failure (EPSTHIN): 0Unitless

Major In-plane strain at failure (EPSMAJ): 0Unitless

Percentage of integration points/layers (NUMINT): 0Unitless

Effective Plastic Strain for eroding elements (FS): 1e+20Unitless

Formulation for rate effects (VP) : (0) Scale Yield Effects

Plastic hardening modulus (EH) : 0MPa

Effective plastic strain in weld material at failure (EFAIL): 0Unitless

Mechanical Power to Heat Ratio : 0Unitless

===== Strength

Ultimate Tensile Strength : 2243MPa

Ultimate Tensile Strength 2 : 26MPa

All : 1

Strength Limits : 0

Strain Ratio : 0

Stress Ratio : 0

Tsai-Wu : 0

Rice and Tracey : 0

Maximum Total Strain : 0

Maximum Stress : 0

Hashin : 0

Hoffman : 0

Tsai-Hill : 0

Puck : 0

LaRC04 : 0

Max Stress Tension (ST) : 2243MPa

Tension (ST2) : 26MPa

Tension (ST3) : 26MPa

Max Stress Compression (SC) : 1075MPa

Compression (SC2) : 191MPa

Max Stress Shear (SS) : 81MPa

Unidirectional Laminate Behavior (LOPT): Computed In-situ Strength (LOPT 1)

Fracture Angle Due to Pure Compressive Loading (ALFT): 53°

Rice Parameter (RICE) : 0.283Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.15Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.27Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

===== Durability

Stress-Life Data : Coefficients
Strain-Life Data : Coefficients
Percent Reduction in Area : 0Unitless

===== Thermal

Thermal Expansion Coefficient Type : Secant

===== Creep

: None

===== Viscoelasticity

Model : None

===== Viscoplasticity

Viscoplastic Type : None

===== Damage

: None

===== Miscellaneous

: 3 Values

0

0

0

Studio Material : Not Defined

Crosshatch Pattern : Not Defined

Library Material : T300 Woven Fabric 0,22mm

Category

Library Reference T300 Woven 2022.xml

Alternate Name : Not Defined

Mass Density (RHO) : 1.76g/cm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 52350MPa

Young's Modulus (E2) : 52350MPa

Young's Modulus (E3) : 7770MPa

Compression Young's Modulus (YC1) : 52350MPa

Compression Young's Modulus (YC2) : 52350MPa

Compression Young's Modulus (YC3) : 8100MPa

: Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) : 0.04Unitless

Shear Modulus (G) : 3230MPa

Type of Nonlinearity (TYPE) : Elastoplastic: stress-total strain
(MATS1/PLASTIC)

Yield Function Criterion (YF) : von Mises

Hardening Rule (HR) : Isotropic

Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain

Tangent Modulus (ETAN) : 0MPa

Strain Rate Dependency : Symonds and Cowper

Failure flag : (0) Failure is not considered

Thinning strain at failure (EPSTHIN): 0Unitless

Major In-plane strain at failure (EPSMAJ): 0Unitless

Percentage of integration points/layers (NUMINT): 0Unitless

Effective Plastic Strain for eroding elements (FS): 1e+20Unitless

Formulation for rate effects (VP) : (0) Scale Yield Effects

Plastic hardening modulus (EH) : 0MPa

Effective plastic strain in weld material at failure (EFAIL): 0Unitless

Mechanical Power to Heat Ratio : 0Unitless

===== Strength

Ultimate Tensile Strength : 642.5MPa

Ultimate Tensile Strength 2 : 642.5MPa

All : 1

Strength Limits : 0

Strain Ratio : 0

Stress Ratio : 0

Tsai-Wu : 0

Rice and Tracey : 0

Maximum Total Strain : 0

Maximum Stress : 0

Hashin : 0

Hoffman : 0

Tsai-Hill : 0

Puck : 0

LaRC04 : 0

Max Stress Tension (ST) : 642.5MPa

Tension (ST2) : 642.5MPa

Tension (ST3) : 26MPa

Max Stress Compression (SC) : 595.5MPa

Compression (SC2) : 595.5MPa

Max Stress Shear (SS) : 113.7MPa

Unidirectional Laminate Behavior (LOPT): Computed In-situ Strength (LOPT 1)

Fracture Angle Due to Pure Compressive Loading (ALFT): 53°

Rice Parameter (RICE) : 0.283Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.15Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.27Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

===== Durability

Stress-Life Data : Coefficients
Strain-Life Data : Coefficients
Percent Reduction in Area : 0Unitless

===== Thermal

Thermal Expansion Coefficient Type : Secant

===== Creep

: None

===== Viscoelasticity

Model : None

===== Viscoplasticity

Viscoplastic Type : None

===== Damage

: None

===== Miscellaneous

: 3 Values

0

0

0

Studio Material : Not Defined

Crosshatch Pattern : Not Defined

Library Material : T700 UD 0,17mm

Category

Library Reference T700 UD 2022.xml

Alternate Name : Not Defined

Mass Density (RHO) : 1.39g/cm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 116600MPa

Young's Modulus (E2) : 7770MPa

Young's Modulus (E3) : 7770MPa

Compression Young's Modulus (YC1) : 104300MPa

Compression Young's Modulus (YC2) : 8100MPa

Compression Young's Modulus (YC3) : 8100MPa

: Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) : 0.3Unitless

Shear Modulus (G) : 3600MPa

Type of Nonlinearity (TYPE) : Elastoplastic: stress-total strain
(MATS1/PLASTIC)

Yield Function Criterion (YF) : von Mises

Hardening Rule (HR) : Isotropic

Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain

Tangent Modulus (ETAN) : 0MPa

Strain Rate Dependency : Symonds and Cowper

Failure flag : (0) Failure is not considered

Thinning strain at failure (EPSTHIN): 0Unitless

Major In-plane strain at failure (EPSMAJ): 0Unitless

Percentage of integration points/layers (NUMINT): 0Unitless

Effective Plastic Strain for eroding elements (FS): 1e+20Unitless

Formulation for rate effects (VP) : (0) Scale Yield Effects

Plastic hardening modulus (EH) : 0MPa

Effective plastic strain in weld material at failure (EFAIL): 0Unitless

Mechanical Power to Heat Ratio : 0Unitless

===== Strength

Ultimate Tensile Strength : 2354MPa

Ultimate Tensile Strength 2 : 34.3MPa

All : 1

Strength Limits : 0

Strain Ratio : 0

Stress Ratio : 0

Tsai-Wu : 0

Rice and Tracey : 0

Maximum Total Strain : 0

Maximum Stress : 0

Hashin : 0

Hoffman : 0

Tsai-Hill : 0

Puck : 0

LaRC04 : 0

Max Stress Tension (ST) : 2354MPa

Tension (ST2) : 34.3MPa

Tension (ST3) : 26MPa

Max Stress Compression (SC) : 1102MPa

Compression (SC2) : 184MPa

Max Stress Shear (SS) : 104.5MPa

Unidirectional Laminate Behavior (LOPT): Computed In-situ Strength (LOPT 1)

Fracture Angle Due to Pure Compressive Loading (ALFT): 53°

Rice Parameter (RICE) : 0.283Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.15Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.27Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

===== Durability

Stress-Life Data : Coefficients
Strain-Life Data : Coefficients
Percent Reduction in Area : 0Unitless

===== Thermal

Thermal Expansion Coefficient Type : Secant

===== Creep

: None

===== Viscoelasticity

Model : None

===== Viscoplasticity

Viscoplastic Type : None

===== Damage

: None

===== Miscellaneous

: 3 Values

0

0

0

Studio Material : Not Defined

Crosshatch Pattern : Not Defined

Library Material : T800 UD 0,11mm

Category

Library Reference T800 UD 2022.xml

Alternate Name : Not Defined

Mass Density (RHO) : 1.4g/cm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 132200MPa

Young's Modulus (E2) : 6950MPa

Young's Modulus (E3) : 6950MPa

Compression Young's Modulus (YC1) : 131000MPa

Compression Young's Modulus (YC2) : 7650MPa

Compression Young's Modulus (YC3) : 7650MPa

: Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) : 0.31Unitless

Shear Modulus (G) : 3420MPa

Type of Nonlinearity (TYPE) : Elastoplastic: stress-total strain
(MATS1/PLASTIC)

Yield Function Criterion (YF) : von Mises

Hardening Rule (HR) : Isotropic

Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain

Tangent Modulus (ETAN) : 0MPa

Strain Rate Dependency : Symonds and Cowper

Failure flag : (0) Failure is not considered

Thinning strain at failure (EPSTHIN): 0Unitless

Major In-plane strain at failure (EPSMAJ): 0Unitless

Percentage of integration points/layers (NUMINT): 0Unitless

Effective Plastic Strain for eroding elements (FS): 1e+20Unitless

Formulation for rate effects (VP) : (0) Scale Yield Effects

Plastic hardening modulus (EH) : 0MPa

Effective plastic strain in weld material at failure (EFAIL): 0Unitless

Mechanical Power to Heat Ratio : 0Unitless

===== Strength

Ultimate Tensile Strength : 2305MPa

Ultimate Tensile Strength 2 : 35.9MPa

All : 1

Strength Limits : 0

Strain Ratio : 0

Stress Ratio : 0

Tsai-Wu : 0

Rice and Tracey : 0

Maximum Total Strain : 0

Maximum Stress : 0

Hashin : 0

Hoffman : 0

Tsai-Hill : 0

Puck : 0

LaRC04 : 0

Max Stress Tension (ST) : 2305MPa

Tension (ST2) : 35.9MPa

Tension (ST3) : 26MPa

Max Stress Compression (SC) : 1184MPa

Compression (SC2) : 137MPa

Max Stress Shear (SS) : 89.7MPa

Unidirectional Laminate Behavior (LOPT): Computed In-situ Strength (LOPT 1)

Fracture Angle Due to Pure Compressive Loading (ALFT): 53°

Rice Parameter (RICE) : 0.283Unitless

Shape Parameters (K01S) : 0.15Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.27Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

===== Durability

Stress-Life Data : Coefficients
Strain-Life Data : Coefficients
Percent Reduction in Area : 0Unitless

===== Thermal

Thermal Expansion Coefficient Type : Secant

===== Creep

: None

===== Viscoelasticity

Model : None

===== Viscoplasticity

Viscoplastic Type : None

===== Damage

: None

===== Miscellaneous

: 3 Values

0

0

0

Studio Material : Not Defined

Crosshatch Pattern : Not Defined

Library Material : Textreme M30SC Woven 0,22mm

Category

Library Reference Texreme M30SC Woven 2022.xml

Alternate Name : Not Defined

Mass Density (RHO) : 1.465g/cm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 60500MPa

Young's Modulus (E2) : 60500MPa

Young's Modulus (E3) : 7770MPa

Compression Young's Modulus (YC1) : 53500MPa

Compression Young's Modulus (YC2) : 53500MPa

Compression Young's Modulus (YC3) : 8100MPa

: Major Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (NU) : 0.03Unitless

Shear Modulus (G) : 3000MPa

Type of Nonlinearity (TYPE) : Elastoplastic: stress-total strain
(MATS1/PLASTIC)

Yield Function Criterion (YF) : von Mises

Hardening Rule (HR) : Isotropic

Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain

Tangent Modulus (ETAN) : 0MPa

Strain Rate Dependency : Symonds and Cowper

Failure flag : (0) Failure is not considered

Thinning strain at failure (EPSTHIN): 0Unitless

Major In-plane strain at failure (EPSMAJ): 0Unitless

Percentage of integration points/layers (NUMINT): 0Unitless

Effective Plastic Strain for eroding elements (FS): 1e+20Unitless

Formulation for rate effects (VP) : (0) Scale Yield Effects

Plastic hardening modulus (EH) : 0MPa

Effective plastic strain in weld material at failure (EFAIL): 0Unitless

Mechanical Power to Heat Ratio : 0Unitless

===== Strength

Ultimate Tensile Strength : 850MPa

Ultimate Tensile Strength 2 : 850MPa

All : 1

Strength Limits : 0

Strain Ratio : 0

Stress Ratio : 0

Tsai-Wu : 0

Rice and Tracey : 0

Maximum Total Strain : 0

Maximum Stress : 0

Hashin : 0

Hoffman : 0

Tsai-Hill : 0

Puck : 0

LaRC04 : 0

Max Stress Tension (ST) : 850MPa

Tension (ST2) : 850MPa

Tension (ST3) : 26MPa

Max Stress Compression (SC) : 365MPa

Compression (SC2) : 365MPa

Max Stress Shear (SS) : 100MPa

Unidirectional Laminate Behavior (LOPT): Computed In-situ Strength (LOPT 1)

Fracture Angle Due to Pure Compressive Loading (ALFT): 53°

Rice Parameter (RICE) : 0.283Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.15Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.27Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless
Shape Parameters (K01S) : 0.3Unitless

===== Durability

Stress-Life Data : Coefficients
Strain-Life Data : Coefficients
Percent Reduction in Area : 0Unitless

===== Thermal

Thermal Expansion Coefficient Type : Secant

===== Creep

: None

===== Viscoelasticity

Model : None

===== Viscoplasticity

Viscoplastic Type : None

===== Damage

: None

===== Miscellaneous

: 3 Values

0

0

0

Studio Material : Not Defined

Crosshatch Pattern : Not Defined

VTC401

Epoxy Component Prepreg

Introduction

VTC401 is an epoxy resin system designed to give an initial cure at low temperatures or snap cure at high temperatures with enhanced toughness, honeycomb bondability and higher service temperature, giving greater flexibility in component manufacture. It can be supplied on a variety of fabrics in UD format to meet your cost and manufacturing requirements.

Typical applications: *General purpose – Visual*

Available variants – *VTC401B, black pigmented*

– *VTC401LV, high tack*

Key Features & Benefits

- Cure temperature from **65°C to 140°C**
- Service temperature up to **120°C**
- Low CTE and shrinkage
- Work life at 20°C: **21 days**
- Storage life at -18°C: **12 months**
- Very low VOC content – no added solvents during manufacture
- **Snap cure** available for hot press moulding – consult SHD for details

Storage & Out Life

This material should be kept frozen at -18°C. It must be kept sealed in a polythene bag which must not be opened until fully thawed to room temperature. If the material is not fully used, then the material must be resealed in the polythene bag to prevent moisture absorption.

Cure Cycles & performances

CURE CYCLE OPTIONS:

Temperature		Duration	Tg
65°C	(minimum)	16 hours	75°C
80°C		4 hours	90°C
100°C		1 hour	110°C
120°C		45 minutes	130°C
140°C	(maximum)	15 minutes	130°C

- Curing Schedule is meant to be a guide only and is subject to local conditions.
- To avoid exotherm particular care must be taken with thick laminates. Ramp rates must not exceed **3.0°C** per minute during **initial cure**.
Ramp rates must not exceed **0.3°C** per minute during **post cure** (free standing).

- Typical Tg:

DMA – Dry Tg <i>ASTM D7028</i>	120°C for 1hr	Tg E' Onset	130 °C	<i>Modified</i>
		Tg Peak Tan δ	139 °C	<i>(Single Cantilever)</i>

Tests performed on **VTC401-G280T-42%RW-1250** laminates

Cured Material Properties

Tests performed on **VTC401-C245T-HS-3K-42%RW** laminates (245gsm 2x2 twill, T300 3k carbon fabric)

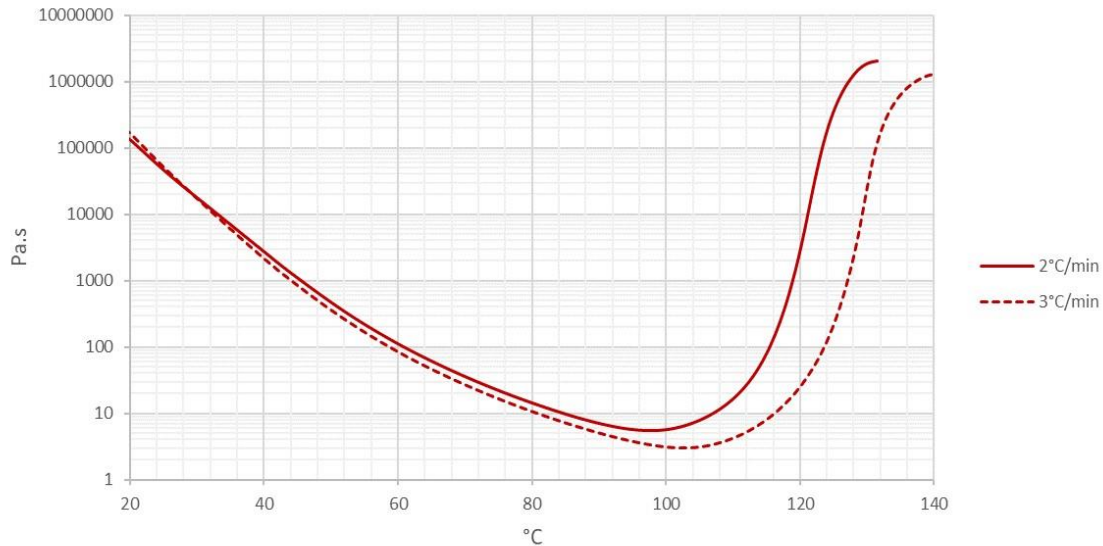
Test	Results	Standard
Vf	Fibre volume fraction 48.84 %	<i>BS EN ISO 14127 Method B</i>
CPT	Cured ply thickness 0.285 mm	<i>BS EN ISO 14127 Method B</i>

Tensile 0°	Tensile strength	634	MPa	<i>BS EN ISO 527-4</i>
	Tensile modulus	55.7	GPa	
Tensile 90°	Tensile strength	638	MPa	
	Tensile modulus	55.1	GPa	
Compressive 0°	Compressive strength	684	MPa	<i>prEN 2850 Type B</i>
Compressive 90°	Compressive strength	598	MPa	
Flexural 0°	Flexural strength	873	MPa	<i>BS EN ISO 14125</i>
	Flexural modulus	51.2	GPa	
Flexural 90°	Flexural strength	854	MPa	
	Flexural modulus	49.4	GPa	
In-Plane Shear ±45°	In-Plane shear strength (ultimate)	121.6	MPa	<i>BS EN ISO 14129</i>
Interlaminar Shear 0°	Interlaminar shear strength	71.3	MPa	<i>BS EN ISO 14130</i>
	Interlaminar shear strength	72.2	MPa	
Interlaminar Shear 90°				
DMA – Dry Tg	Tg E' Onset	123	°C	<i>Modified ASTM D7028</i>
	Initial cure	Tg Peak Tan δ	134	
				<i>(Single Cantilever)</i>

Mechanical testing carried out at 21±2°C. Initial cure: 10mins at 80°C followed by 45mins at 120°C, autoclave 6bar. All figures in this report are actual test results and have not been normalised. Testing was either completed by SHD Composites laboratories, or independently by UKAS approved organisations. Complete test reports can be supplied independently upon request.

Viscosity Profile

Testing carried out using a rotational rheometer.



Health and Safety

This material contains epoxy resin which can cause allergic reactions with skin contact and must avoid repeated and prolonged skin contact.

Please refer to the product Safety Data Sheet before using this material. The following precautions must be taken when using epoxy resin prepregs:

- Overalls must be worn.
- Impervious gloves must be worn.
- Curing schedule is meant to be as a guide only and is subject to local conditions.
- To avoid exotherm, particular care must be taken with thick laminates.
- Ramp rates must not exceed 3.0°C/min during initial cure and 0.3°C/min during post cure.

Disclaimer: Technical advice, instruction, data or recommendation, whether verbal or in writing, is given in good faith. The SHD company providing any such advice gives no warranty or guarantee, whether express or implied, in relation to such advice.

Customers must carry out their own tests and assessments as necessary in order to determine the quality and suitability of the product for their particular application and circumstances. Such testing should be performed under conditions identical to those to which the final component/product may be subjected. Values listed in any SHD document are for typical properties of the product or substance in question and are not intended to be used in establishing either statistical specifications nor engineering basis values. They do not constitute either minimum or maximum values for the product or substance in question.



SAFETY DATA SHEET

This safety data sheet was created pursuant to the requirements of:
UK REACH Regulations (EU 2020/878 as amended)

Supersedes Date 12/07/2022
Number 1

Revision date 31/10/2023 **Revision**

SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking

1.1. Product identifier

Product Code(s) VTC401
Product Name VTC401 EPOXY PREPREG

Synonyms VTC401LV
Pure substance/mixture Mixture

1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Recommended use Consumer use
Uses advised against No specific uses advised against are identified.

1.3. Details of the supplier of the safety data sheet

Supplier

SHD Composite Ltd The Reservation Sleaford NG34 7BY

For further information, please contact

E-mail address technical@shdcomposites.com

1.4. Emergency telephone number

Emergency Telephone +44 1529 307629 MONDAY TO FRIDAY 7:30AM TO 5PM

SECTION 2: Hazards identification

2.1. Classification of the substance or mixture

Skin corrosion/irritation	Category 2 - (H315)
Serious eye damage/eye irritation	Category 2 - (H319)

Skin sensitisation	Category 1 - (H317)
Chronic aquatic toxicity	Category 3 - (H412)

2.2. Label elements



Signal word

Warning

Hazard statements

H315 - Causes skin irritation

H317 - May cause an allergic skin reaction

H319 - Causes serious eye irritation

H412 - Harmful to aquatic life with long lasting effects

Precautionary statements

P264 - Wash face, hands and any exposed skin thoroughly after handling

P280 - Wear protective gloves and eye/face protection

P333 + P313 - If skin irritation or rash occurs: Get medical advice/attention

P337 + P313 - If eye irritation persists: Get medical advice/attention

P501 - Dispose of contents/container in accordance with local, regional, national, and international regulations as applicable P302 + P352 - IF ON SKIN: Wash with plenty of soap and water

P305 + P351 + P338 - IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing

2.3. Other hazards

No information available.

SECTION 3: Composition/information on ingredients

3.1 Substances

Chemical name	Weight-%	EC No (EU Index No)	UK REACH registration number	Classification according to GB CLP (SI 2020/1567 as amended)	Specific concentration limit (SCL)	M-Factor	M-Factor (long-term)
bis-[4-(2,3-epoxiproxi)phenyl]propane 1675-54-3	21.2052	216-823-5	-	Skin Irrit. 2 (H315) Eye Irrit. 2 (H319) Skin Sens. 1 (H317)	Eye Irrit. 2 :: C>=5% Skin Irrit. 2 :: C>=5%	-	-
reaction product: bisphenol-A-(epichlorhydrin) 25068-38-6	1.724	500-033-5	-	Skin Irrit. 2 (H315) Eye Irrit. 2 (H319) Skin Sens. 1 (H317) Aquatic Chronic 2 (H411)	Eye Irrit. 2 :: C>=5% Skin Irrit. 2 :: C>=5%	-	-

Full text of H- and EUH-phrases: see section 16

This product does not contain candidate substances of very high concern at a concentration $\geq 0.1\%$ (UK REACH Article 59)

SECTION 4: First aid measures

4.1. Description of first aid measures

General advice Get medical attention immediately if symptoms occur.
Show this safety data sheet to the doctor in attendance.

Inhalation Remove to fresh air. If symptoms persist, call a doctor.

Eye contact Rinse thoroughly with plenty of water for at least 15 minutes, lifting lower and upper eyelids.

Consult a doctor.

Skin contact Remove material from skin immediately. Wash off immediately with soap and plenty of

water. Get medical attention if irritation develops and persists.

Ingestion Rinse mouth thoroughly with water. Get medical attention immediately if symptoms occur.

Do not induce vomiting without medical advice.

Self-protection of the first aider Wear personal protective clothing (see section 8).

4.2. Most important symptoms and effects, both acute and delayed

Symptoms May cause allergic skin reaction. Prolonged contact may cause redness and irritation. May cause redness and tearing of the eyes.

Effects of Exposure No information available.

4.3. Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

Note to doctors Treat symptomatically. May cause sensitisation by skin contact.

SECTION 5: Firefighting measures

5.1. Extinguishing media

Suitable Extinguishing Media Carbon dioxide (CO₂). Dry chemical. Water spray, fog or alcohol-resistant foam.

Large Fire CAUTION: Use of water spray when fighting fire may be inefficient.

Unsuitable extinguishing media Do not scatter spilled material with high pressure water streams.

5.2. Special hazards arising from the substance or mixture

Specific hazards arising from the chemical No information available.

Hazardous combustion products May burn violently. Decomposition may be self-accelerating and produce large amounts of gases.

5.3. Advice for firefighters

Special protective equipment and precautions for firefighters Firefighters should wear self-contained breathing apparatus and full firefighting turnout gear. Use personal protection equipment.

SECTION 6: Accidental release measures

6.1. Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Personal precautions Do not touch damaged containers or spilled material unless wearing appropriate protective clothing. Avoid contact with skin and eyes.

For emergency responders Use personal protection recommended in Section 8.

6.2. Environmental precautions

Environmental precautions Should not be released into the environment. Prevent product from entering drains. Prevent entry into waterways, sewers, basements or confined areas. Do not allow to enter into soil/subsoil.

6.3. Methods and material for containment and cleaning up

Methods for containment Prevent further leakage or spillage if safe to do so.

Methods for cleaning up Take up mechanically, placing in appropriate containers for disposal. Clean contaminated surface thoroughly. Prevent product and washings from entering drains, sewers or surface water due to high toxicity to aquatic organisms. Prevent product from entering drains.

Prevention of secondary hazards Clean contaminated objects and areas thoroughly observing environmental regulations.

6.4. Reference to other sections

Reference to other sections See section 8 for more information. See section 13 for more information.

SECTION 7: Handling and storage

7.1. Precautions for safe handling

Advice on safe handling Use personal protection equipment. Keep away from heat, hot surfaces, sparks, open flames and other ignition sources. No smoking. Keep container in a well-ventilated place. Avoid contact with skin, eyes or clothing.

General hygiene considerations Wash hands and face before breaks and immediately after handling the product. Remove and wash contaminated clothing and gloves, including the inside, before re-use. When using do not eat, drink or smoke.

7.2. Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Storage Conditions Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place. Keep/store only in original container. Protect from physical damage.

7.3. Specific end use(s)

Specific use(s)

See section 1 for more information.

Risk Management Methods (RMM) The information required is contained in this Material Safety Data Sheet.

SECTION 8: Exposure controls/personal protection

8.1. Control parameters

Exposure Limits This product, as supplied, does not contain any hazardous materials with occupational exposure limits established by the region specific regulatory bodies.

Biological occupational exposure limits This product, as supplied, does not contain any hazardous materials with biological limits established by the region specific regulatory bodies.

Derived No Effect Level (DNEL) - Workers No information available

Chemical name	Oral	Dermal	Inhalation
bis-[4-(2,3-epoxipropoxy)phenyl]propane 1675-54-3		0.75 /kg bw/day 6]	4.93 mg/m ³ [4] [6]

Derived No Effect Level (DNEL) - General Public

No information available.

Chemical name	Oral	Dermal	Inhalation
bis-[4-(2,3-epoxipropoxy)phenyl]propane 1675-54-3	0.5 mg/kg bw/day [4] [6]		0.87 mg/m ³ [4] [6]

Predicted No Effect Concentration (PNEC) No information available.

Chemical name	Freshwater	Freshwater (intermittent release)	Marine water	Marine water (intermittent release)	Air
bis-[4-(2,3-epoxipropoxy)phenyl]propane 1675-54-3	0.006 mg/L	0.018 mg/L	0.0006 mg/L	0.0018 mg/L	
Chemical name	Freshwater sediment	Marine sediment	Sewage treatment	Soil	Food chain
bis-[4-(2,3-epoxipropoxy)phenyl]propane 1675-54-3	0.341 mg/kg sediment dw	0.0341 mg/kg sediment dw	10 mg/L	0.0647 mg/kg soil dw	11 mg/kg food

8.2. Exposure controls

Engineering controls	Ensure adequate ventilation, especially in confined areas. Ensure that eyewash stations and safety showers are close to the workstation location.
<u>Personal protective equipment</u>	
Eye/face protection	Wear safety glasses with side shields (or goggles).
Hand protection	Appropriate hand protection should be selected and used according to the chemical nature, hazards and use of this product and safety requirements of the local jurisdiction. Nitrile rubber. Impervious gloves.
Skin and body protection	If there is a risk of contact: Wear suitable protective clothing.
Respiratory protection	No protective equipment is needed under normal use conditions. If exposure limits are exceeded or irritation is experienced, ventilation and evacuation may be required. When workers are facing concentrations above the exposure limit they must use appropriate certified respirators. Appropriate respiratory protection should be selected and used according to the chemical nature, hazards and use of this product and safety requirements of the local jurisdiction.
Thermal hazards	None under normal processing.
General hygiene considerations	Wash hands and face before breaks and immediately after handling the product. Remove and wash contaminated clothing and gloves, including the inside, before re-use. When using do not eat, drink or smoke.
Environmental exposure controls	Local authorities should be advised if significant spillages cannot be contained. Do not allow into any sewer, on the ground or into any body of water. Prevent product from entering drains. Avoid creating dust.

SECTION 9: Physical and chemical properties

9.1. Information on basic physical and chemical properties

Physical state	Solid	
Appearance	Fibrous solid	Colour amber black
or Odour	Almost odourless.	
Odour threshold	No information available	
<u>Property</u>	<u>Values</u>	<u>Remarks</u> •
Melting point / freezing point	No data available	<u>Method</u>
Initial boiling point and boiling range	No data available	None known

Flammability	No data available	None known
Flammability Limit in Air		None known
Upper flammability or explosive limits	No data available	None known
Lower flammability or explosive limits	No data available	
Flash point	No data available	None known
Autoignition temperature	No data available	None known
Decomposition temperature	No data available	None known
pH (as aqueous solution)	No data available	None known
Kinematic viscosity	No data available	None known
Dynamic viscosity	No data available	None known
Water solubility	No data available	None known
Solubility(ies)	No data available	None known
Partition coefficient	No data available	None known
Vapour pressure	No data available	None known
Relative density	~ 1210 kg/m ³	None known
Bulk density	No data available	None known
Liquid Density	No data available	
Relative vapour density		None known
Particle characteristics	No information available	
Particle Size	No information available	
Particle Size Distribution		
Explosive properties	No information available	
Oxidising properties	No information available	

9.2. Other information

SECTION 10: Stability and reactivity

10.1. Reactivity

Reactivity No information available.
Stable under normal conditions.

Stability

Explosion data

Sensitivity to

mechanical impact

None. **Sensitivity to**

static discharge

None.

10.3. Possibility of hazardous reactions

Possibility of hazardous reactions None under normal processing.

10.4. Conditions to avoid

Conditions to avoid None known based on information supplied.

10.5. Incompatible materials

Incompatible materials None known based on information supplied.

10.6. Hazardous decomposition products

Hazardous decomposition products None known based on information supplied.

SECTION 11: Toxicological information

11.1. Information on toxicological effects

Information on likely routes of exposure

Product Information

Inhalation	No known hazard by inhalation.
Eye contact	Contact with eyes may cause irritation.
Skin contact	May cause sensitisation by skin contact. May cause skin irritation and/or dermatitis.
Ingestion	Ingestion may cause irritation to mucous membranes.

Symptoms related to the physical, chemical and toxicological characteristics

Symptoms No information available.

Acute toxicity

Numerical measures of toxicity

No information available

Chemical name	Oral LD50	Dermal LD50	Inhalation LC50
bis-[4-(2,3-epoxipropoxy)phenyl]propane	= 11300 µL/kg (Rat)	= 20000 mg/kg (Rabbit)	-
reaction product: bisphenol-A-(epichlorhydrin)	= 11400 mg/kg (Rat)	-	-

Delayed and immediate effects as well as chronic effects from short and long-term exposure

Skin corrosion/irritation	No information available.
Serious eye damage/eye irritation	No information available.
Respiratory or skin sensitisation	No information available.
Germ cell mutagenicity	No information available.

Carcinogenicity No information available.

Reproductive toxicity No information available.

STOT - single exposure None known.

STOT - repeated exposure None known.

Aspiration hazard Classification not applicable.

Other adverse effects No information available.

SECTION 12: Ecological information

12.1. Toxicity Harmful to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

12.2. Persistence and degradability

Persistence and degradability No information available.

12.3. Bioaccumulative potential

Bioaccumulation There is no data for this product.

Chemical name	Partition coefficient
bis-[4-(2,3-epoxipropoxy)phenyl]propane	2.33

12.4. Mobility in soil

Mobility in soil No information available.

12.5. Results of PBT and vPvB assessment

PBT and vPvB assessment The product does not contain any substance(s) classified as PBT or vPvB above the threshold of declaration.

Chemical name	PBT and vPvB assessment
bis-[4-(2,3-epoxipropoxy)phenyl]propane	The substance is not PBT / vPvB
reaction product: bisphenol-A-(epichlorhydrin)	The substance is not PBT / vPvB

12.
6.
Oth
er
adv
ers
e
effe
cts
No
info
rma
tion
avai
lible
.

SECTION 13: Disposal considerations

<u>13.1. Waste treatment methods</u>	Recover or recycle if possible. This material and its container must be disposed of as hazardous waste. Should not be released into the environment. Dispose of waste in accordance with environmental legislation. Dispose of in accordance with local regulations. Waste should not be disposed of by releasing to water source, drains, sewers, or the ground.
Waste from residues/unused products	
Contaminated packaging	Dispose of contents/containers in accordance with local regulations. Do not reuse empty containers. Empty containers pose a potential fire and explosion hazard. Do not cut, puncture or weld containers. Empty remaining contents.

SECTION 14: Transport information

IATA

- 14.1 UN number or ID number** Not regulated
- 14.2 UN proper shipping name** Not regulated
- 14.3 Transport hazard class(es)** Not regulated
- 14.4 Packing group** Not regulated
- 14.5 Environmental hazards** Not applicable
- 14.6 Special precautions for user**

Special Provisions None

IMDG

- 14.1 UN number or ID number** Not regulated
- 14.2 UN proper shipping name** Not regulated

14.3 Transport hazard class(es)	Not regulated
14.4 Packing group	Not regulated
14.5 Environmental hazards	Not applicable
14.6 Special precautions for user	
Special Provisions	None
14.7 Maritime transport in bulk according to IMO instruments	No information available

RID

14.1 UN number or ID number	Not regulated
14.2 UN proper shipping name	Not regulated
14.3 Transport hazard class(es)	Not regulated
14.4 Packing group	Not regulated
14.5 Environmental hazards	Not applicable
14.6 Special precautions for user	
Special Provisions	None

ADR

14.1 UN number or ID number	Not regulated
14.2 UN proper shipping name	Not regulated
14.3 Transport hazard class(es)	Not regulated
14.4 Packing group	Not regulated
14.5 Environmental hazards	Not applicable
14.6 Special precautions for user	
Special Provisions	None

SECTION 15: Regulatory information

15.1. Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

Authorisations and/or restrictions on use:

This product does not contain substances subject to authorisation (UK REACH - Annex XIV).

This product does not contain substances subject to restriction (UK REACH - Annex XVII).

Persistent Organic Pollutants Not applicable

Export Notification requirements

Not applicable

Named dangerous substances per COMAH (SI 2015/483 as amended) Not applicable

The Ozone-Depleting Substances Regulations 2015

Not applicable

The Biocidal Products Regulations 2001 (as amended) Not applicable

The Water Environment (Water Framework Directive) (England and Wales) Regulations 2017 (as amended) Not applicable

Poisons Act 1972 (Explosive Precursors) Regulations (as amended) Not applicable

International Inventories

TSCA	Contact supplier for inventory compliance status
DSL/NDSL	Contact supplier for inventory compliance status
EINECS/ELINCS	Contact supplier for inventory compliance status
ENCS	Contact supplier for inventory compliance status
IECSC	Contact supplier for inventory compliance status
KECL	Contact supplier for inventory compliance status
PICCS	Contact supplier for inventory compliance status
AIIC	Contact supplier for inventory compliance status
NZIoC	Contact supplier for inventory compliance status

Legend:

TSCA - United States Toxic Substances Control Act Section 8(b) Inventory

DSL/NDSL - Canadian Domestic Substances List/Non-Domestic Substances List

EINECS/ELINCS - European Inventory of Existing Chemical Substances/European List of Notified Chemical Substances **ENCS** - Japan Existing and New Chemical Substances

IECSC - China Inventory of Existing Chemical Substances

KECL - Korean Existing and Evaluated Chemical Substances

PICCS - Philippines Inventory of Chemicals and Chemical Substances

AIIC - Australian Inventory of Industrial Chemicals

NZIoC - New Zealand Inventory of Chemicals

15.2. Chemical safety assessment

Chemical Safety Report No information available

SECTION 16: Other information

Key or legend to abbreviations and acronyms used in the safety data sheet

Legend SVHC:
Substances of Very High
Concern for Authorisation:

Legend Section 8: Exposure controls/personal protection

TWA TWA (time-weighted average) STEL STEL (Short Term Exposure
Limit)

Ceiling Maximum limit value * Skin designation +
Sensitisers

Key literature references and sources for data used to compile the SDS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)

U.S. Environmental Protection Agency ChemView Database

European Food Safety Authority (EFSA)

European Chemicals Agency (ECHA) Committee for Risk Assessment (ECHA_RAC)

European Chemicals Agency (ECHA) (ECHA_API)

EPA (Environmental Protection Agency)

Acute Exposure Guideline Level(s) (AEGl(s))

U.S. Environmental Protection Agency Federal Insecticide,
Fungicide, and Rodenticide Act U.S. Environmental
Protection Agency High Production Volume Chemicals

Food Research Journal

Hazardous Substance Database

International Uniform Chemical Information Database (IUCLID)

National Institute of Technology and Evaluation (NITE)

Australian National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (NICNAS)

NIOSH (National Institute for
Occupational Safety and Health)
National Library of Medicine's ChemID
Plus (NLM CIP)

National Library of Medicine's PubMed database (NLM PUBMED)
National Toxicology Program (NTP)

New Zealand's Chemical Classification and Information Database (CCID)

Organisation for Economic Co-operation and Development Environment, Health, and Safety
Publications

Organisation for Economic Co-operation and Development High
Production Volume Chemicals Programme Organisation for Economic
Co-operation and Development Screening Information Data Set
World Health Organization

Supersedes Date 12/07/2022

Revision date 31/10/2023

**This material safety data sheet complies with the requirements of UK REACH
Regulations (SI 2019/758 as amended) Take note of Directive 98/24/EC on the
protection of the health and safety of workers from the risks related to
chemical agents at work**

Disclaimer

**The information provided in this Safety Data Sheet is correct to the best of our
knowledge, information and belief at the date of its publication. The
information given is designed only as a guidance for safe handling, use,
processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be
considered a warranty or quality specification. The information relates only to
the specific material designated and may not be valid for such material used
in combination with any other materials or in any process, unless specified in
the text.**

End of Safety Data Sheet

Πλήρης παρουσίαση δοκιμών διαστρωματώσεων

Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Drop Test

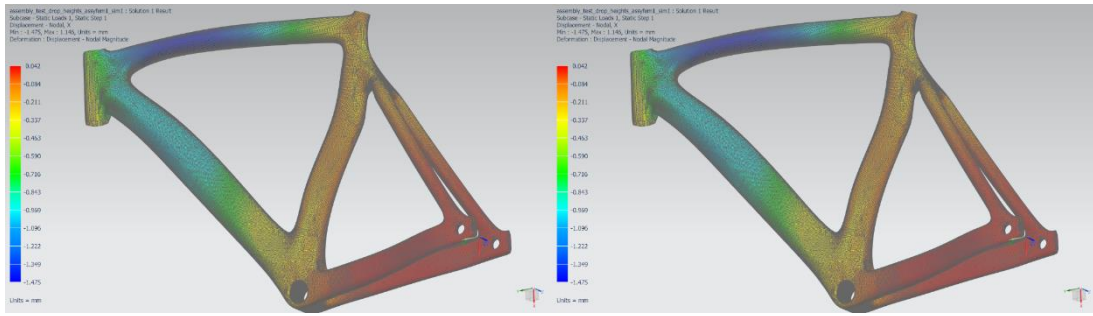
Κατά την πειραματική διαδικασία του Drop Test, όσον αφορά στις παραμορφώσεις του σκελετού λόγω τάσεων, παρατηρήθηκε εφελκυσμός, κυρίως στα πίσω ψαλίδια στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον εμπρός σωλήνα και στα πίσω ψαλίδια στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στο κάτω κέντρο του σκελετού στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 0.5 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στον επάνω και κάτω σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον κάτω και στον εμπρός σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον εμπρός και τον κάτω σωλήνα, καθώς και στο κέντρο του σκελετού, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 1.5 χιλιοστό.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που εμφανίστηκαν σε σημεία και στρώσεις υλικού του σκελετού στο συγκεκριμένο πείραμα για τα σενάρια Quasi (M46J Woven, T300 Woven) και 1-10, κατά τους άξονες X και Y. Οι άξονες αυτοί να σημειωθεί πως έχουν οριστεί με βάση το επίπεδο του κάθε σωλήνα ξεχωριστά (X άξονας/οριζόντια διεύθυνση σωλήνα, Y άξονας/κάθετη διεύθυνση σωλήνα). Στις παρακάτω απεικονίσεις ενδέχεται κάποια από τα κομμάτια του σκελετού να έχουν ένα σκοτεινό γκρι χρώμα, πράγμα το οποίο οφείλεται στην απεικόνιση του υπολογιστικού προγράμματος όταν δεν υπάρχουν πλέον στρώσεις στα συγκεκριμένα κομμάτια σκελετού (π.χ. κανονική απεικόνιση 6^{ης} στρώσης εμπρός σωλήνα, ενώ οι στρώσεις του επάνω σωλήνα περιορίζονται στις 4).

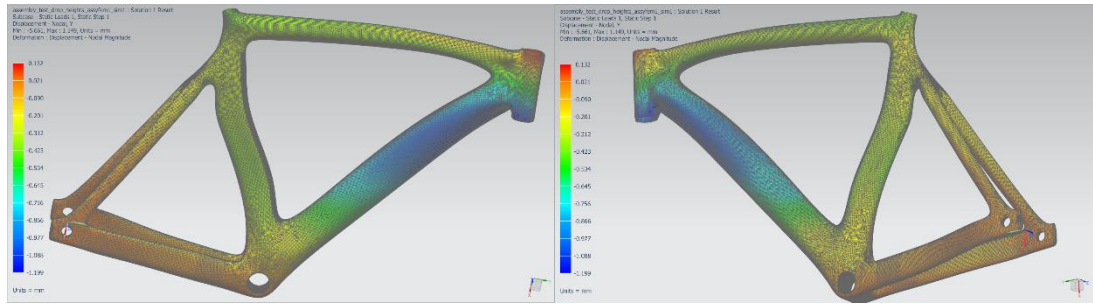
Στο σενάριο M46J Woven, παρατηρούνται μέγιστες θλιπτικές τάσεις της τάξεως των 354 και 352 MPa στην 1^η στρώση του εμπρός σωλήνα κατά τη διεύθυνση του άξονα X και Y, 296 MPa στον άξονα Y στην 2^η στρώση και 332 και 297 στους άξονες X και Y της στρώσης 4. Αυτές οι τιμές ξεπερνούν ή είναι αρκετά κοντά στο όριο αντοχής τάσεων των 350 MPa. Εφόσον υπάρχει υπέρβαση του ορίου αντοχής τάσεων, θα πρέπει να προστεθούν στρώσεις στο σημείο αλλιώς θα επέλθει θραύση του υλικού. Οι εφελκυστικές τάσεις δε ξεπερνούν πουθενά τα 229 MPa. Εκτός του εμπρός σωλήνα, όλος ο υπόλοιπος σκελετός μπορεί να μειωθεί σε στρώσεις.

- M46J Woven

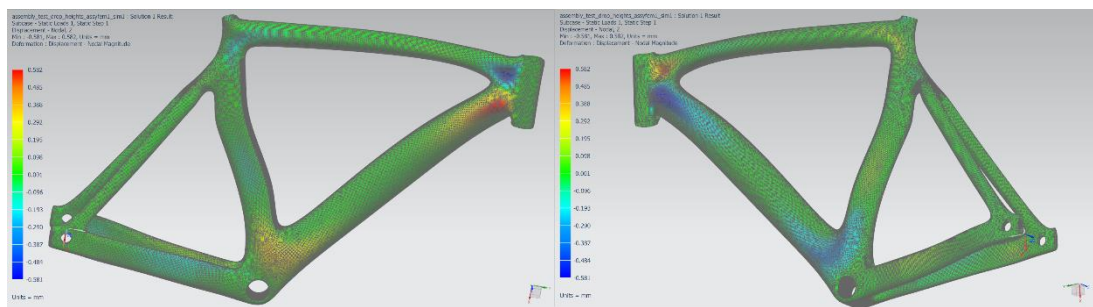
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-3,54E+05	-8,38E+04	0,00E+00	-2,03E+04	-3,22E+03	1,94E+02
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	2,29E+05	6,72E+04	0,00E+00	1,45E+04	6,75E+02	-7,76E+02
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-7,59E+04	-3,51E+05	0,00E+00	-1,99E+04	-1,48E+03	1,14E+03
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	6,65E+04	2,29E+05	0,00E+00	1,46E+04	-6,13E+02	-6,33E+02
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,08E+04	5,24E+04	0,00E+00	1,07E+04	-3,52E+03	4,01E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,08E+04	5,24E+04	0,00E+00	1,07E+04	-3,52E+03	4,01E+03
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-1,68E+05	-2,96E+05	0,00E+00	-2,65E+04	1,71E+03	-1,88E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	6,70E+03	5,33E+03	0,00E+00	2,09E+04	-5,22E+01	-8,59E+02
Min Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	-2,69E+04	-9,10E+04	0,00E+00	6,77E+03	-8,61E+04	3,02E+04
Max Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	-2,96E+03	-1,93E+05	0,00E+00	-9,28E+03	4,11E+04	2,91E+04
Min Stress 31	2	down_tube	Interlaminar	3,52E+04	-7,47E+04	0,00E+00	2,92E+03	-2,47E+03	-2,91E+04
Max Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	-1,74E+04	-9,83E+04	0,00E+00	6,92E+03	5,56E+02	3,32E+04



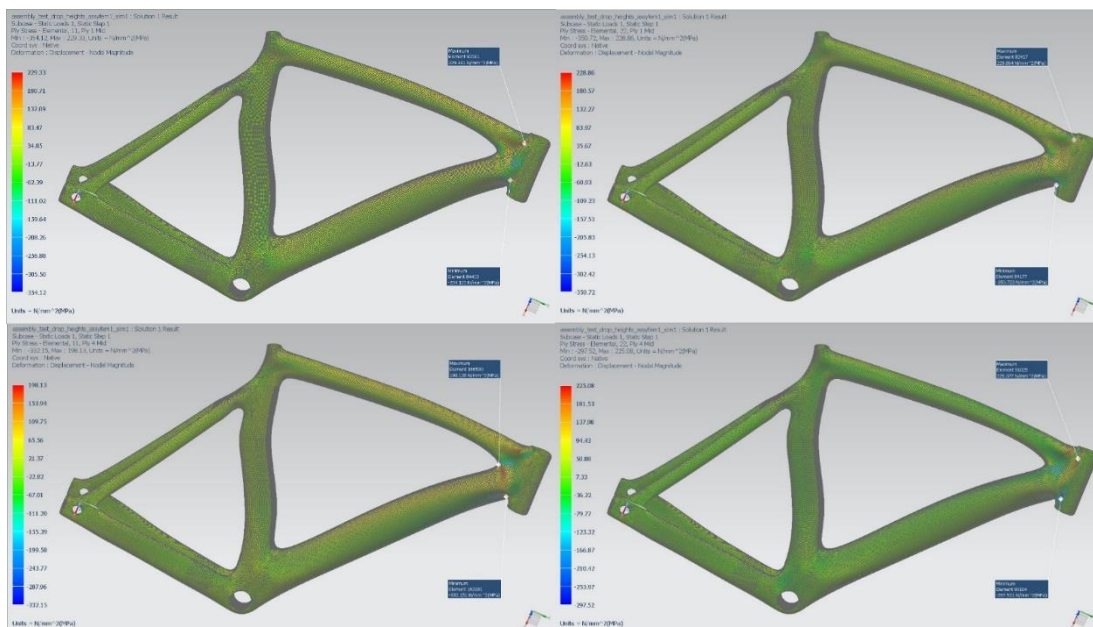
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

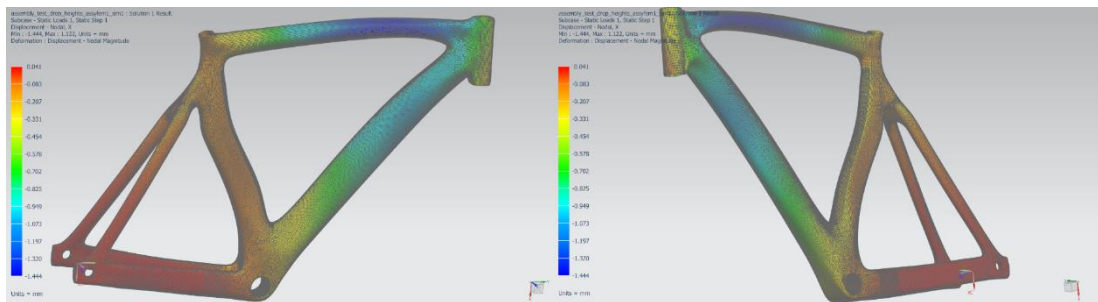


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

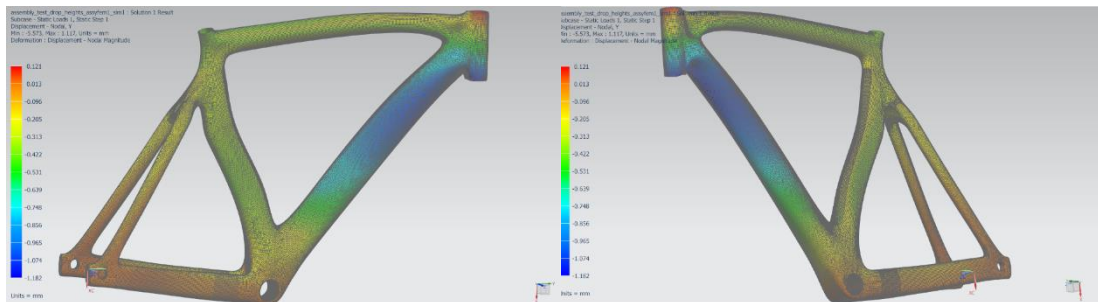
Στο σενάριο T300 Woven παρατηρούνται μέγιστες θλιπτικές τάσεις της τάξεως των 290 και 276 MPa στον εμπρός σωλήνα στους άξονες X και Y στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες στρώσεις να δέχονται τέτοιου είδους τάσεις προς όλους τους άξονες μικρότερες των 269 MPa. Οι εφελκυστικές δυνάμεις σε όλες τις στρώσεις, προς όλους τους άξονες, δε ξεπερνά τα 170 MPa. Αν και δε κρίνεται απαραίτητη η πρόσθεση στρώσεων στην περιοχή του εμπρός σωλήνα, στον υπόλοιπο σκελετό μπορούν να αφαιρεθούν στρώσεις, ή να αντικατασταθούν μερικές με ελαφρύτερες μικρότερης αντοχής.

- T300 Woven

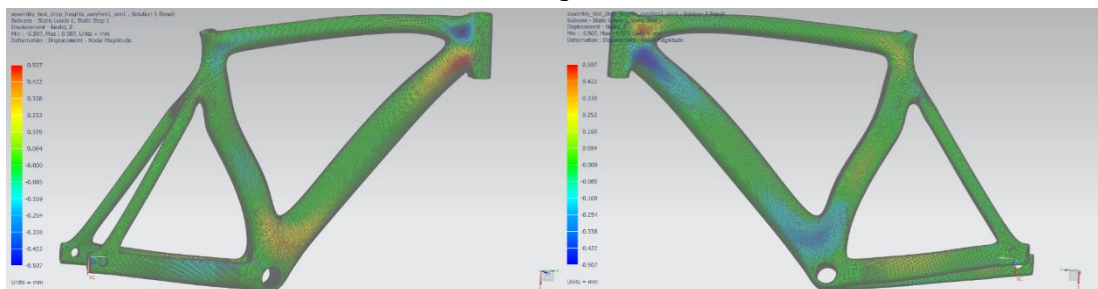
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-2,90E+05	-6,96E+04	0,00E+00	-1,90E+04	3,64E+03	-1,89E+03
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	1,71E+05	6,90E+04	0,00E+00	1,14E+04	7,84E+02	-1,20E+03
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-5,97E+04	-2,76E+05	0,00E+00	-1,82E+04	-2,38E+03	-1,03E+03
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	6,78E+04	1,70E+05	0,00E+00	1,14E+04	-6,59E+02	-1,14E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,82E+04	5,01E+04	0,00E+00	1,03E+04	-4,14E+03	4,64E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,82E+04	5,01E+04	0,00E+00	1,03E+04	-4,14E+03	4,64E+03
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-2,20E+05	-1,41E+05	0,00E+00	-2,65E+04	3,83E+03	-7,74E+02
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-5,28E+04	-1,30E+05	0,00E+00	2,06E+04	1,17E+03	2,11E+03
Min Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	-8,46E+03	-2,02E+05	0,00E+00	6,77E+03	-1,72E+04	3,16E+03
Max Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	-1,37E+04	-1,75E+05	0,00E+00	-1,01E+04	1,98E+04	5,82E+03
Min Stress 31	2	down_tube	Interlaminar	2,43E+04	-8,57E+04	0,00E+00	1,55E+03	-5,39E+02	-1,10E+04
Max Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	-4,82E+04	-1,62E+05	0,00E+00	-1,06E+04	1,34E+04	1,38E+04



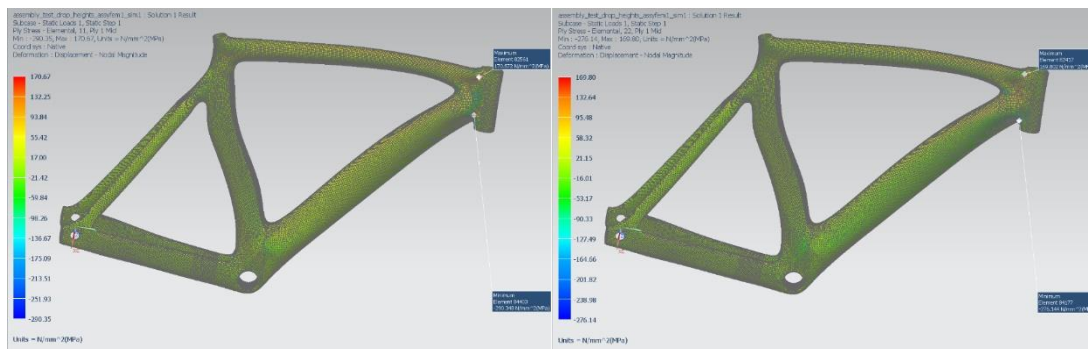
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

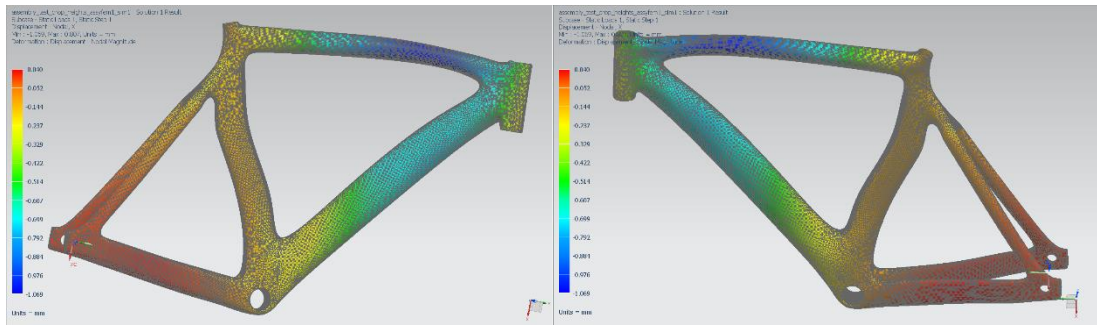


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

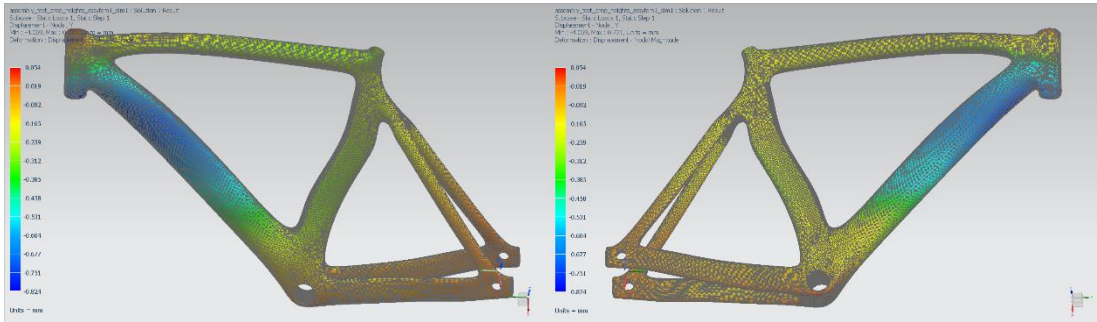
Στο 1^ο σενάριο, παρατηρούνται μέγιστα εφελκυστικών τάσεων στην ένωση επάνω και εμπρός σωλήνα στην 1^η στρώση, που όμως δε ξεπερνούν τα 148 MPa στον X άξονα και τα 154 MPa στον Y άξονα. Επίσης, παρατηρούνται μέγιστα θλιπτικών τάσεων στην ένωση κάτω και εμπρός σωλήνα, που δε ξεπερνούν τα 198 και 194 MPa στον X και Y άξονα (1^η στρώση και 2^η). Εφόσον το υλικό κατασκευής είναι το T300 Woven, με 600/600/35 MPa (X/Y/Z axis), τα μέγιστα των τιμών βρίσκονται πολύ χαμηλά σε σχέση με τα όρια αντοχής τάσεων, πράγμα που σημαίνει ότι ολόκληρος ο σκελετός μπορεί να μειωθεί σε στρώσεις, ή να γίνει αντικατάσταση μερικών με ελαφρύτερες μικρότερης αντοχής.

- 1st Scenario

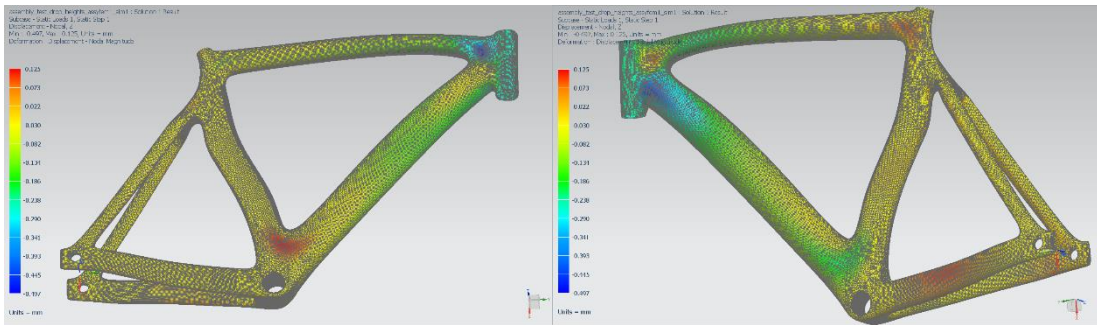
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-1,99E+05	-4,08E+04	0,00E+00	-1,06E+04	2,02E+03	-8,41E+02	7,97E+04
Max Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	1,48E+05	8,74E+03	0,00E+00	9,93E+03	-5,75E+02	6,93E+02	7,03E+04
Min Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	-4,21E+03	-1,94E+05	0,00E+00	-3,47E+03	5,12E+03	-1,42E+03	9,50E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	4,75E+03	1,55E+05	0,00E+00	9,06E+03	1,09E+02	9,95E+02	7,55E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	5,42E+03	3,55E+04	0,00E+00	4,86E+03	-1,81E+03	2,08E+03	1,58E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	5,42E+03	3,55E+04	0,00E+00	4,86E+03	-1,81E+03	2,08E+03	1,58E+04
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-1,00E+05	-1,52E+05	0,00E+00	-1,79E+04	-4,26E+02	-7,00E+02	3,13E+04
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-4,61E+04	-9,21E+04	0,00E+00	1,61E+04	9,46E+02	1,87E+03	2,80E+04
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-4,55E+04	-1,05E+05	0,00E+00	-9,71E+03	-1,53E+04	3,70E+03	3,11E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-1,13E+05	-2,95E+04	0,00E+00	-8,24E+03	1,58E+04	6,08E+03	4,25E+04
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-3,87E+04	-2,76E+04	0,00E+00	-5,36E+03	-5,05E+02	-7,06E+03	7,72E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-1,14E+05	-3,11E+04	0,00E+00	-5,91E+03	1,14E+04	9,44E+03	4,18E+04
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_right	Interlaminar	-1,14E+02	-1,13E+02	0,00E+00	-1,42E+00	5,13E+01	3,60E+02	1,47E+00
Max Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-3,14E+03	-1,94E+05	0,00E+00	2,27E+03	-8,50E+02	-1,40E+03	9,53E+04



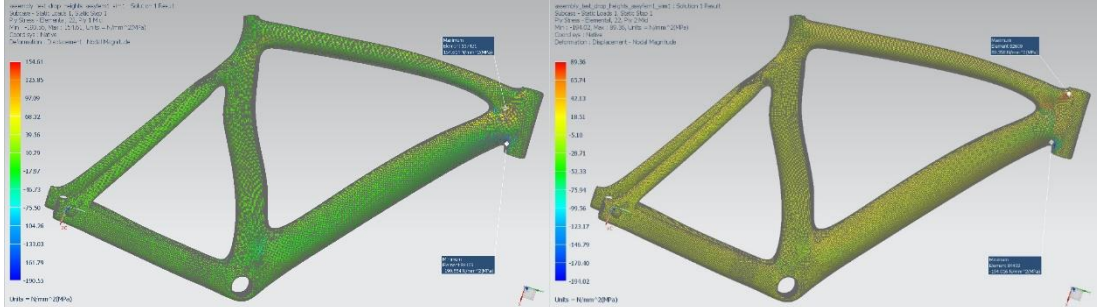
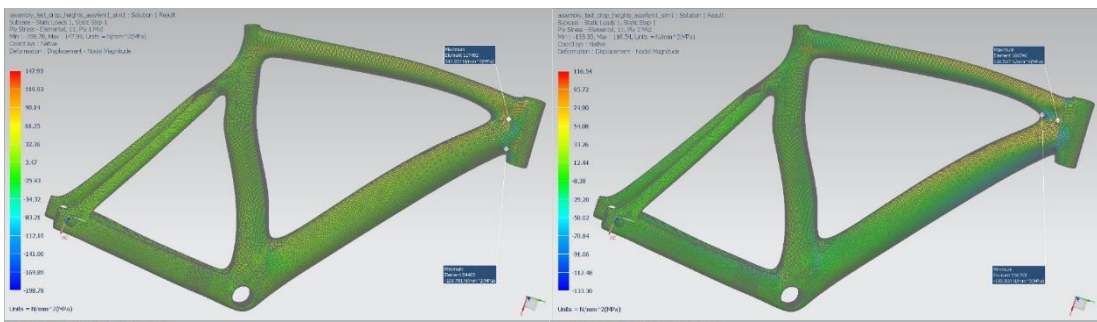
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

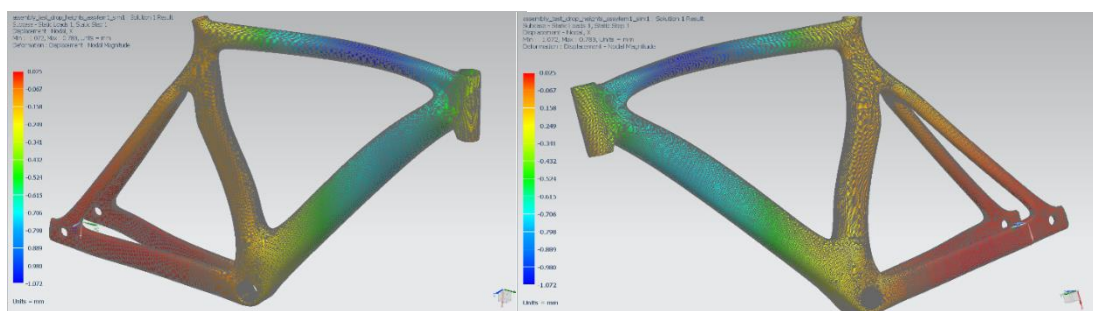


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

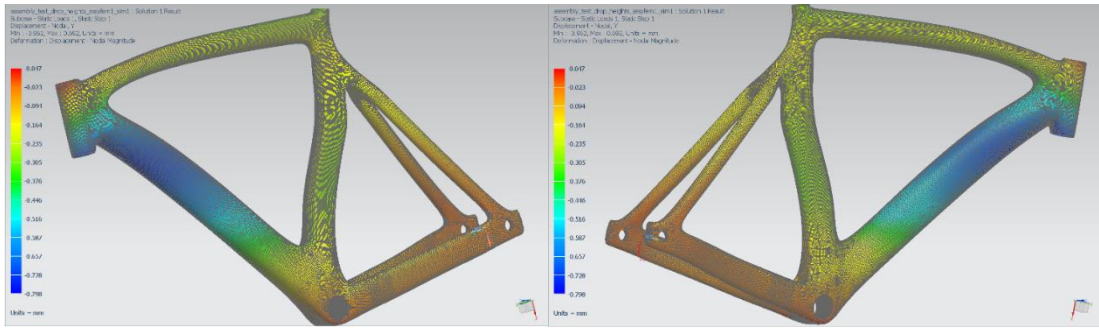
Στο 2^ο σενάριο, παρατηρούνται μέγιστα εφελκυστικών τάσεων στην ένωση άνω, κάτω και εμπρός σωλήνα στην 1^η στρώση που δε ξεπερνούν τα 168 και 146 MPa στον X και Y άξονα. Επίσης, παρατηρούνται μέγιστα θλιπτικών τάσεων στην ένωση άνω, κάτω και εμπρός σωλήνα, που φτάνουν στον X άξονα τα 184 MPa στην 6^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μην ξεπερνούν τα 154 MPa, και στον Y άξονα τα 156 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 155 MPa. Σε σύγκριση με το υλικό κατασκευής T300 Woven, οι τάσεις αυτές βρίσκονται μακριά από τα όρια αντοχής τάσεων του υλικού, πράγμα το οποίο σημαίνει είτε αφαίρεση στρώσεων είτε αντικατάσταση με ελαφρύτερες μικρότερης αντοχής σε όλο τον σκελετό.

- 2nd Scenario

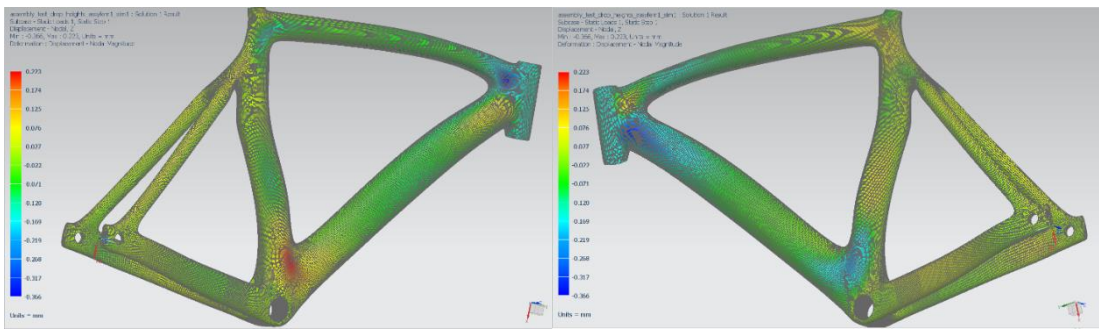
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-1,84E+05	-4,69E+04	0,00E+00	3,73E+03	0,00E+00	0,00E+00	6,88E+04
Max Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	1,39E+05	3,32E+03	0,00E+00	9,84E+03	-3,56E+02	1,47E+03	6,83E+04
Min Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	-8,11E+03	-1,56E+05	0,00E+00	-4,03E+03	2,95E+03	-1,68E+03	7,42E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-1,54E+02	1,48E+05	0,00E+00	8,64E+03	-2,36E+01	1,89E+03	7,43E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,70E+03	2,88E+04	0,00E+00	3,28E+03	-1,09E+03	1,33E+03	1,30E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,70E+03	2,88E+04	0,00E+00	3,28E+03	-1,09E+03	1,33E+03	1,30E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	7,88E+04	3,37E+04	0,00E+00	-1,56E+04	-9,16E+02	7,80E+02	2,74E+04
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-4,13E+04	-8,55E+04	0,00E+00	1,54E+04	9,85E+02	1,65E+03	2,70E+04
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	1,78E+04	-7,14E+04	0,00E+00	8,17E+02	-1,29E+04	2,58E+02	4,46E+04
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-1,48E+04	-9,26E+04	0,00E+00	-5,40E+03	1,33E+04	4,69E+03	3,92E+04
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-4,22E+04	-3,05E+04	0,00E+00	-5,73E+03	-3,45E+02	-8,16E+03	8,16E+03
Max Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	-2,62E+04	-8,14E+04	0,00E+00	-5,31E+03	8,81E+03	8,91E+03	2,81E+04
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	1,19E+01	1,08E+01	0,00E+00	-8,15E-01	7,39E+00	-2,95E+00	9,77E-01
Max Maximum Shear Stress	2	top_tube	Interlaminar	-1,26E+05	4,71E+04	0,00E+00	1,78E+03	1,59E+03	2,67E+03	8,66E+04



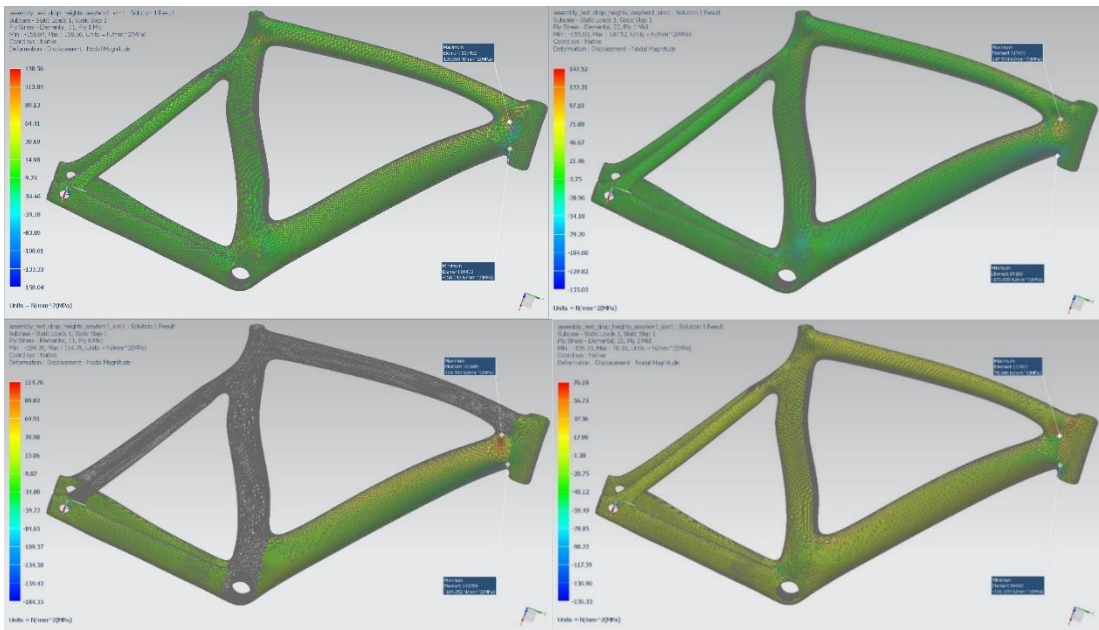
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

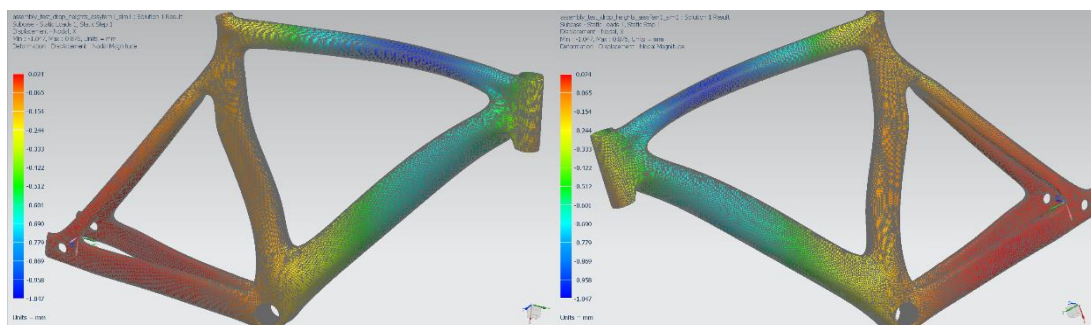


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

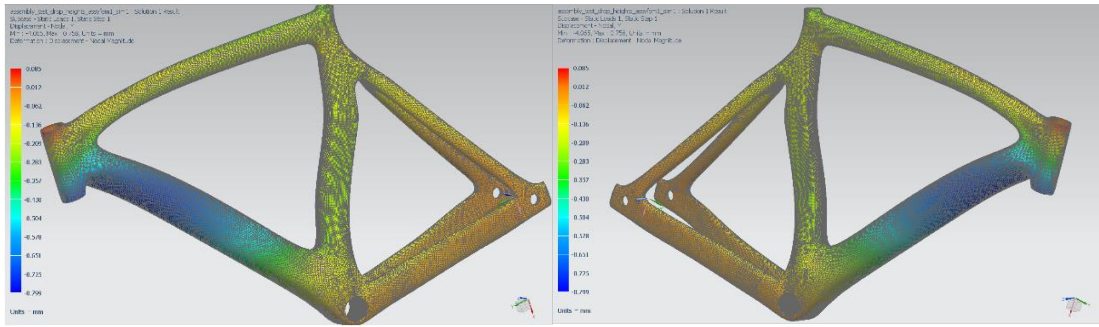
Στο 3^ο σενάριο, παρατηρούνται μέγιστα εφελκυστικών τάσεων στην ένωση άνω, κάτω και εμπρός σωλήνα που φτάνουν τα 250 MPa στην 2^η στρώση στον X άξονα, με τις υπόλοιπες να μην ξεπερνούν τα 210 MPa. Στον Y άξονα παρατηρείται μέγιστο 178 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 109 MPa. Επίσης, παρατηρούνται μέγιστα θλιπτικών τάσεων στο ίδιο σημείο που φτάνουν τα 284 MPa στην 6^η στρώση, με τις υπόλοιπες στον X άξονα να μη ξεπερνούν τα 264 MPa, και στον Y άξονα να φτάνουν τα 164 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 154 MPa. Σε σύγκριση με το υλικό κατασκευής στην περιοχή, δηλαδή το T300 Woven/T700 UD (600/600/35-1500/50/30 MPa), στον X άξονα δεν υπάρχει θέμα λόγω τάσεων κάτω του ορίου αντοχής τάσεων των υλικών, στον Y άξονα όμως το όριο των 50 MPa για το T700 UD που βρίσκεται στη δεύτερη στρώση των προβληματικών περιοχών που αναφέρθηκαν είναι πολύ χαμηλό. Ως λύση θα μπορούσε να προταθεί η αντικατάσταση των UD υλικών σε αυτή την περιοχή με Woven υλικά, ή κατάργηση του υλικού στο σημείο. Ο υπόλοιπος σκελετός μπορεί να χάσει στρώσεις ή να γίνει αντικατάσταση από ελαφρύτερες μικρότερης αντοχής.

• 3rd Scenario

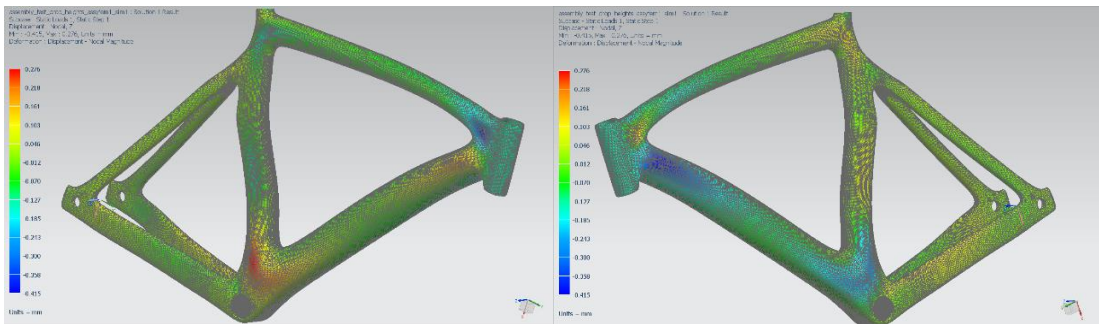
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-2,87E+05	-1,42E+04	0,00E+00	-5,22E+02	-4,12E-13	1,31E-13	1,36E+05
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	2,50E+05	-7,84E+03	0,00E+00	6,45E+03	-2,33E+03	2,15E+03	1,29E+05
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-4,17E+04	-1,64E+05	0,00E+00	-1,10E+04	-1,30E+03	-7,02E+02	6,22E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-4,28E+03	1,79E+05	0,00E+00	1,54E+04	2,66E+02	2,95E+03	9,28E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,95E+03	2,98E+04	0,00E+00	3,45E+03	-1,11E+03	1,37E+03	1,34E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,95E+03	2,98E+04	0,00E+00	3,45E+03	-1,11E+03	1,37E+03	1,34E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	8,19E+04	-6,16E+03	0,00E+00	-1,95E+04	-2,17E+03	9,81E+02	4,81E+04
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	1,69E+05	3,48E+03	0,00E+00	1,68E+04	-2,57E+02	2,17E+03	8,45E+04
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-1,04E+04	-9,66E+04	0,00E+00	4,47E+03	-1,19E+04	1,94E+03	4,33E+04
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-1,15E+04	-9,01E+04	0,00E+00	-6,05E+03	1,40E+04	3,34E+03	3,97E+04
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-5,38E+04	-9,02E+04	0,00E+00	-1,21E+04	-2,44E+02	-9,59E+03	2,19E+04
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-8,69E+03	-7,29E+04	0,00E+00	9,33E+03	1,92E+03	1,09E+04	3,34E+04
Min Maximum Shear Stress	3	seatstay_right	Interlaminar	-7,20E+01	-7,30E+01	0,00E+00	-9,34E-02	2,39E+01	7,07E+00	5,25E-01
Max Maximum Shear Stress	6	down_tube	Interlaminar	-2,87E+05	-1,42E+04	0,00E+00	-5,22E+02	-4,12E-13	1,31E-13	1,36E+05



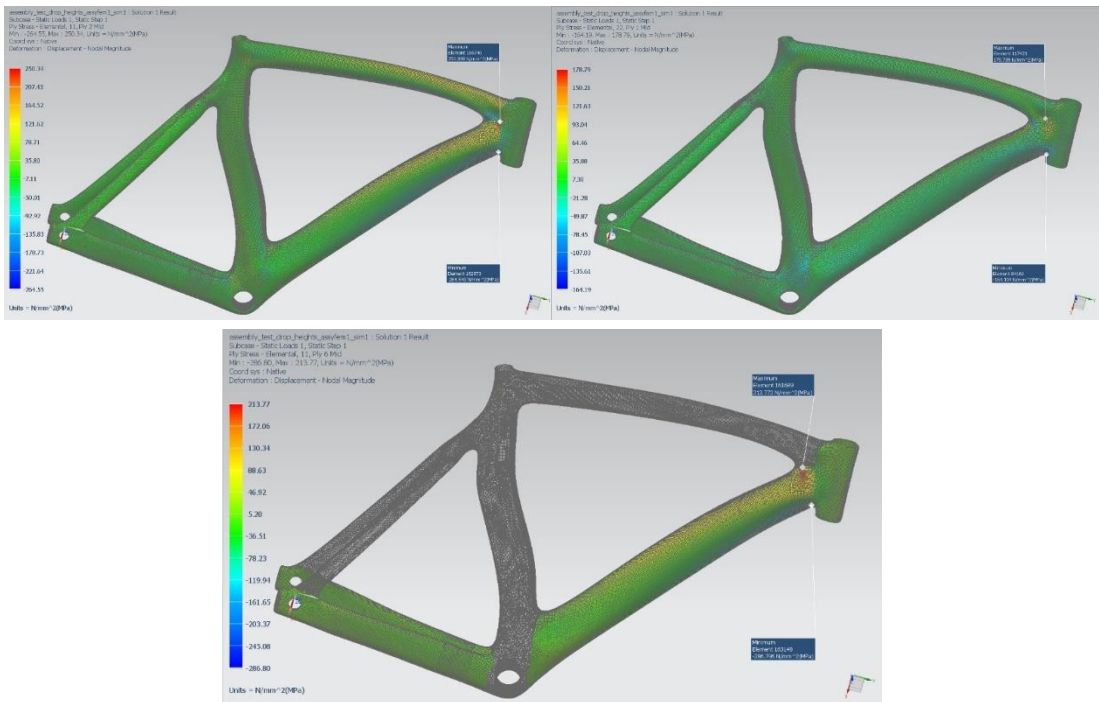
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

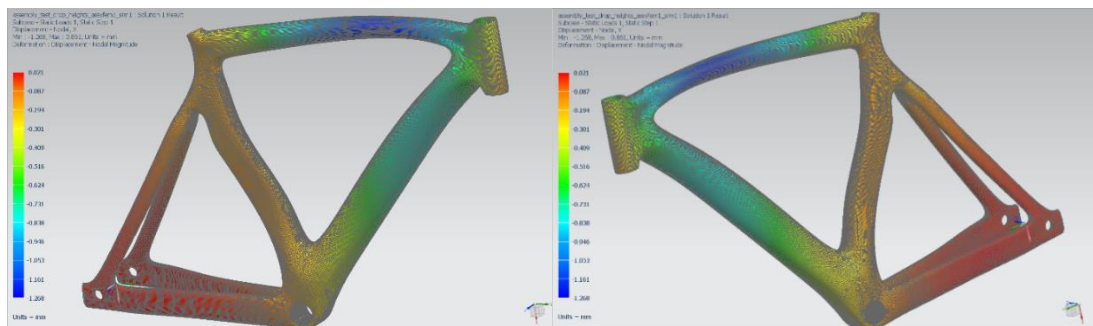


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

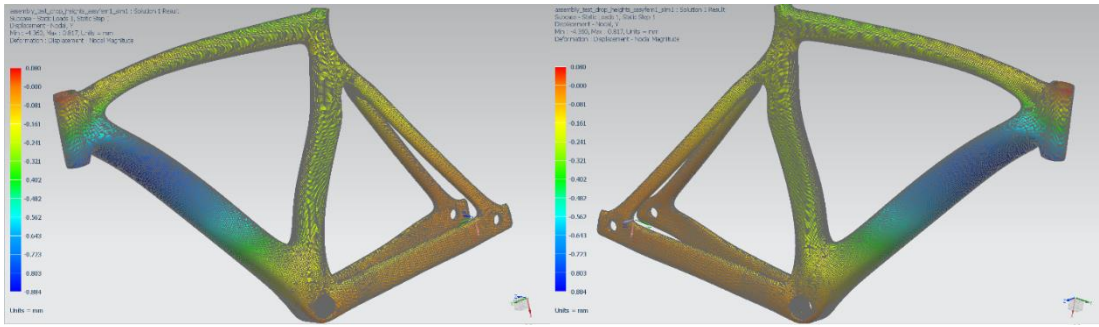
Στο 4^ο σενάριο, παρατηρούνται μέγιστα εφελκυστικών τάσεων στην ένωση άνω, κάτω και εμπρός σωλήνα στην 2^η στρώση που φτάνουν τα 336 MPa κατά τον άξονα X, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 236 MPa. Κατά τον Y άξονα, στο ίδιο σημείο στην 1^η στρώση υπάρχει μέγιστη τιμή 232 MPa, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 116 MPa. Επίσης παρατηρούνται μέγιστα θλιπτικών τάσεων στην ίδια περιοχή, όπου κατά τον Y άξονα φτάνουν τα 177 MPa με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνάνε τα 170 MPa, και κατά τον X άξονα φτάνουν τα 309 στην 6^η στρώση και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνάνε τα 290 MPa. Με βάση τα υλικά κατασκευής (T300 Woven/T700 UD) τα όρια αντοχής τάσεων στον Y άξονα είναι πολύ κοντά ή ακόμα και ξεπερασμένα σε σχέση με τις τιμές τάσεων που προκύπτουν, οπότε η πρόσθεση στρώσεων ή η αντικατάσταση με ισχυρότερες ή πλεκτές αντί για μονής διεύθυνσης κρίνεται απαραίτητη στα προβληματικά σημεία. Στον υπόλοιπο σκελετό δεν είναι απαραίτητη κάποια αλλαγή, λόγω τιμών τάσεων κατά τον Y άξονα που υπερκαλύπτονται ή πλησιάζουν το όριο αντοχής των T700 ινών.

- 4th Scenario

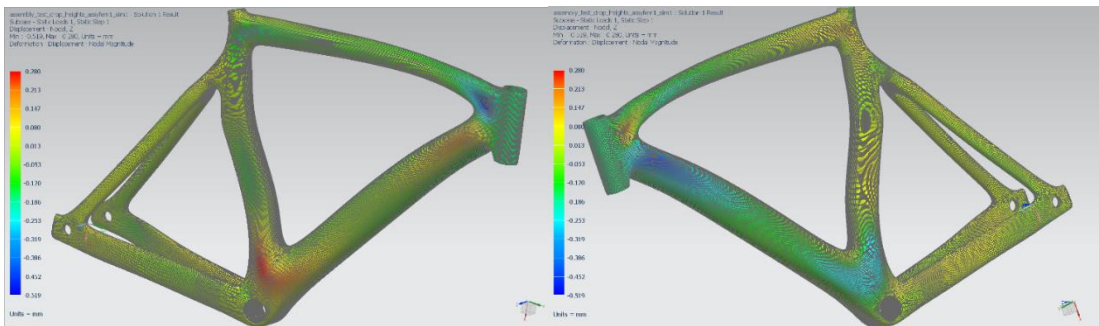
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-3,10E+05	-1,53E+04	0,00E+00	-4,63E+02	-4,55E-13	1,35E-13	1,47E+05
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	3,37E+05	-7,56E+03	0,00E+00	6,80E+03	-3,34E+03	4,25E+03	1,72E+05
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-4,53E+04	-1,77E+05	0,00E+00	-1,19E+04	-1,42E+03	-7,39E+02	6,70E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	3,52E+03	2,32E+05	0,00E+00	1,93E+04	-1,90E+03	7,91E+03	1,16E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,39E+03	2,39E+04	0,00E+00	3,12E+03	-9,40E+02	1,04E+03	1,30E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,39E+03	2,39E+04	0,00E+00	3,12E+03	-9,40E+02	1,04E+03	1,30E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	1,08E+05	1,25E+04	0,00E+00	-2,51E+04	-3,11E+03	1,94E+03	5,40E+04
Max Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	5,15E+04	1,09E+04	0,00E+00	2,34E+04	0,00E+00	-8,96E-15	3,10E+04
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	2,29E+04	-7,69E+04	0,00E+00	1,58E+03	-1,29E+04	1,04E+03	4,99E+04
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-1,27E+04	-9,74E+04	0,00E+00	-6,52E+03	1,50E+04	3,69E+03	4,29E+04
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-5,85E+04	-9,77E+04	0,00E+00	-1,32E+04	-2,62E+02	-1,04E+04	2,36E+04
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-1,04E+04	-7,90E+04	0,00E+00	9,96E+03	2,02E+03	1,17E+04	3,57E+04
Min Maximum Shear Stress	2	seatstay_right	Interlaminar	-1,56E+00	6,28E-01	0,00E+00	-7,32E-02	-7,02E+00	-2,60E+00	1,10E+00
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	3,37E+05	-7,56E+03	0,00E+00	6,80E+03	-3,34E+03	4,25E+03	1,72E+05



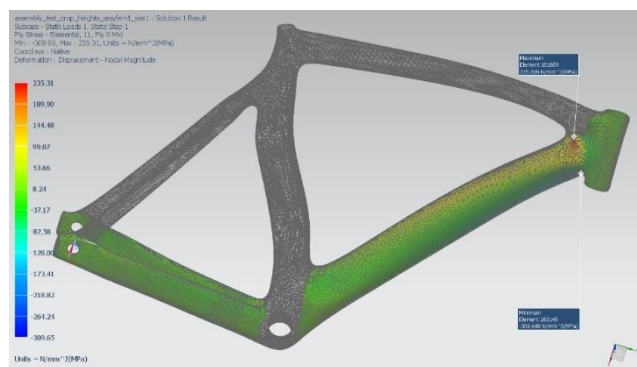
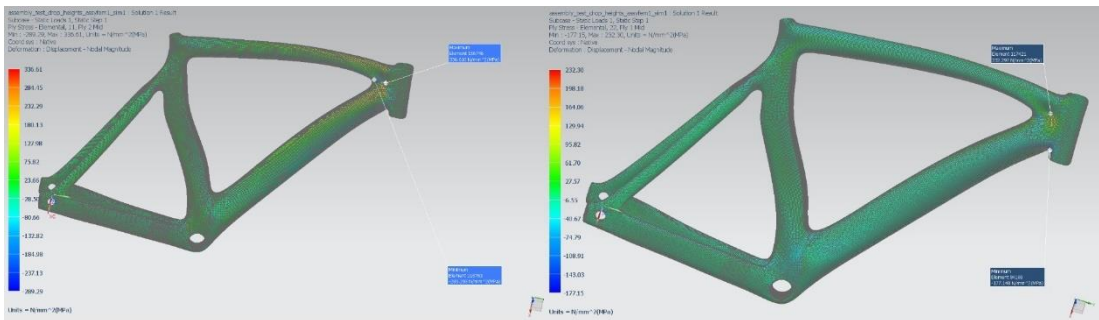
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

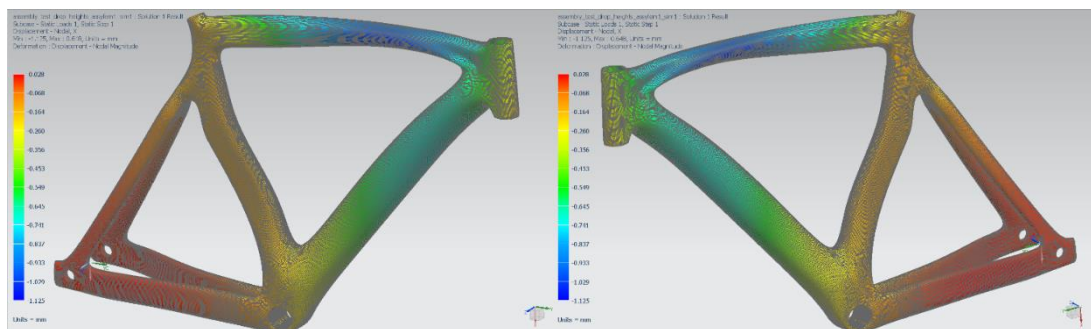


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

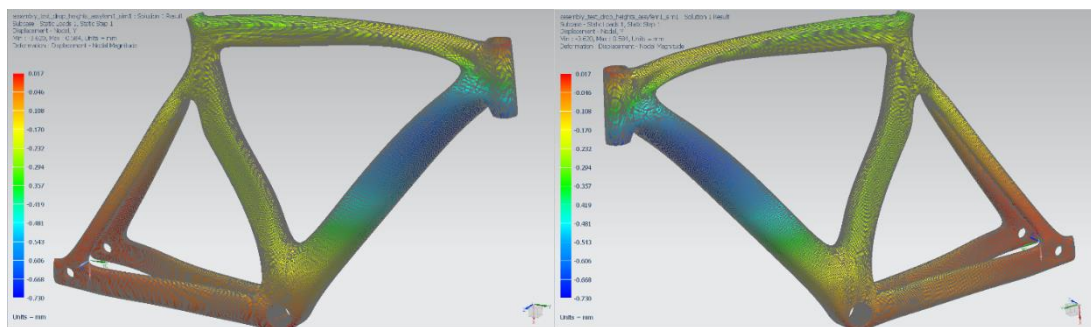
Στο 5^ο σενάριο, παρατηρούνται μέγιστα εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στην ένωση του κάτω και εμπρός σωλήνα, προς τους άξονες X κυρίως. Επειδή όμως υπάρχουν στρώσεις υλικού M46J UD με διεύθυνση εφαρμογής προς εκείνους τους άξονες, οι τιμές τάσεων είναι πολύ μικρότερες των ορίων τιμών αντοχής τάσεων του υλικού στον άξονα διεύθυνσης της ίνας (1000 MPa). Έτσι, αν και η πρόσθεση στρώσεων υλικού κρίνεται περιττή, στην περίπτωση αφαίρεσης οι τιμές τάσεων μπορεί να αυξηθούν κατακόρυφα, υπερβαίνοντας σε μεγάλο βαθμό το ήδη μικρό όριο αντοχής αυτού του υλικού σε κάθετες διευθύνσεις προς τη φορά της ίνας (40/30 MPa), με αποτέλεσμα την θραύση του υλικού στην προβληματική περιοχή.

- 5th Scenario

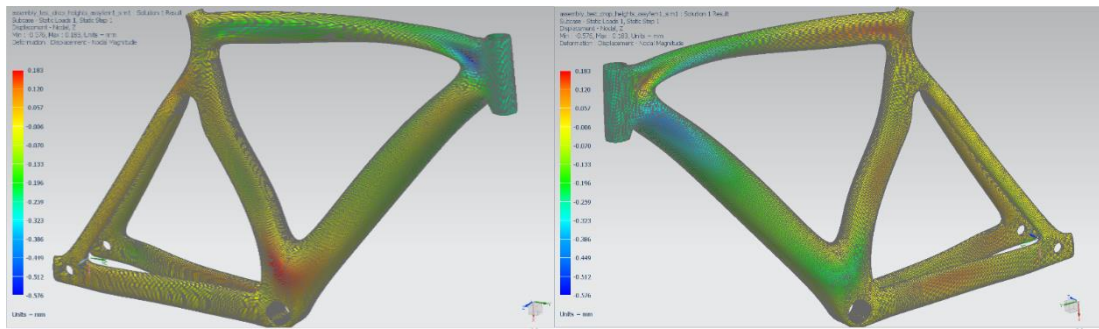
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-3,70E+05	-6,38E+03	0,00E+00	-6,77E+03	-5,46E+03	-5,24E+02	1,82E+05
Max Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	4,86E+05	6,51E+03	0,00E+00	2,07E+04	-6,51E+03	-3,99E+03	2,40E+05
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-1,42E+05	-1,90E+04	0,00E+00	2,47E+04	-2,14E+03	7,80E+03	6,63E+04
Max Stress 22	3	top_tube	Interlaminar	-1,37E+05	3,04E+04	0,00E+00	2,87E+03	3,29E-12	7,74E-14	8,35E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-3,80E+04	3,02E+03	0,00E+00	3,32E+03	-3,67E+02	4,69E+02	2,08E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-3,80E+04	3,02E+03	0,00E+00	3,32E+03	-3,67E+02	4,69E+02	2,08E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	5,86E+04	3,08E+03	0,00E+00	-2,82E+04	-4,98E+03	3,05E+03	3,96E+04
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-1,18E+05	-1,62E+04	0,00E+00	2,58E+04	5,67E+03	8,26E+03	5,70E+04
Min Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-2,53E+04	-3,49E+03	0,00E+00	3,10E+03	-1,19E+05	2,93E+04	1,13E+04
Max Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-4,15E+04	-5,38E+03	0,00E+00	-5,10E+03	5,19E+04	-3,29E+04	1,88E+04
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	2,84E+04	-6,13E+03	0,00E+00	1,42E+03	5,19E+04	-3,54E+04	1,73E+04
Max Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-3,80E+04	-9,12E+03	0,00E+00	5,44E+03	3,95E+04	5,24E+04	1,54E+04
Min Maximum Shear Stress	3	seatstay_left	Interlaminar	-3,35E+02	-3,35E+02	0,00E+00	1,39E+00	1,39E-14	1,60E-15	1,39E+00
Max Maximum Shear Stress	1	top_tube	Interlaminar	4,86E+05	6,51E+03	0,00E+00	2,07E+04	-6,51E+03	-3,99E+03	2,40E+05



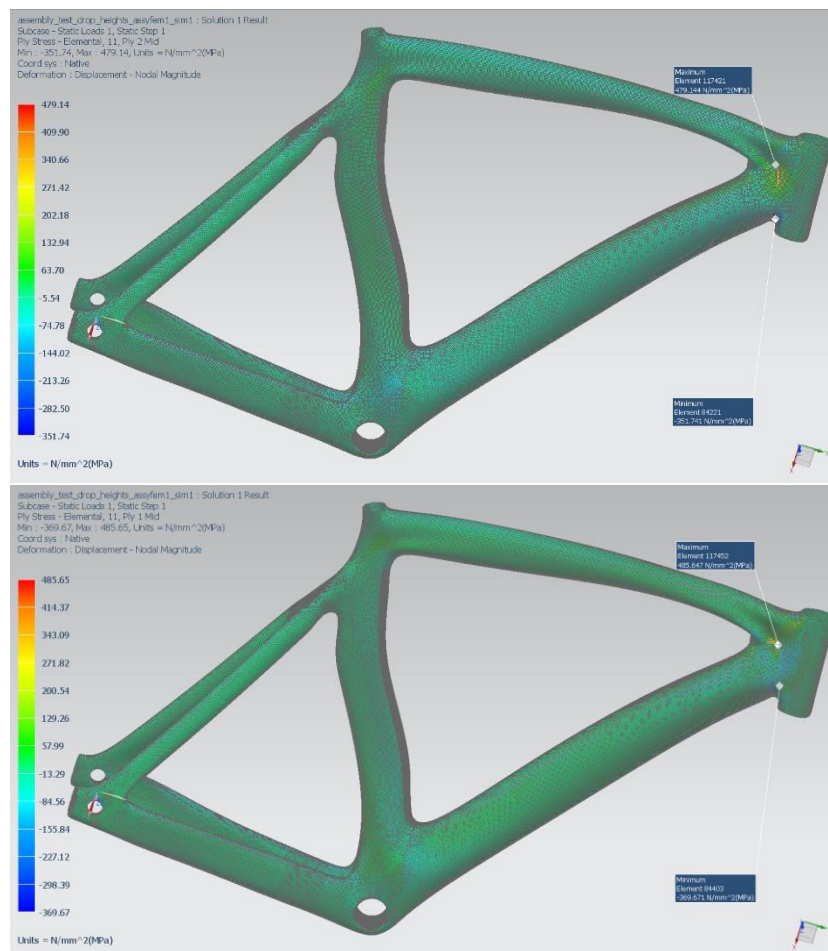
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

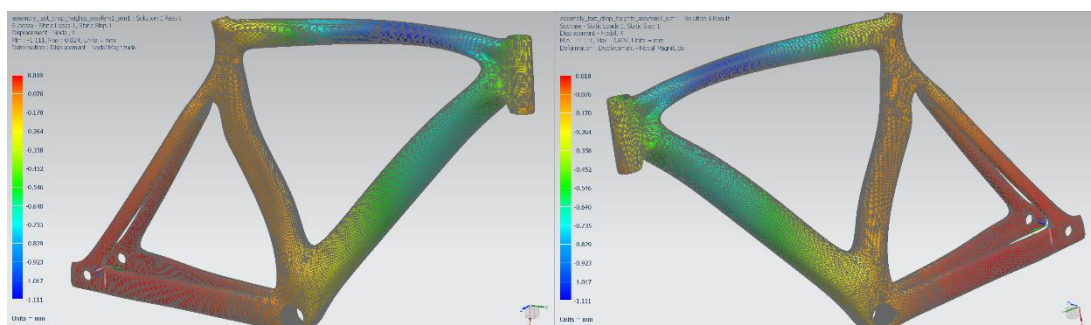


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

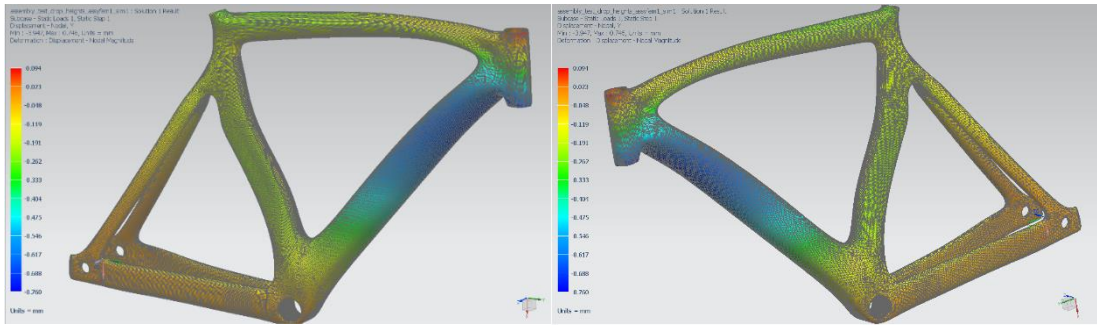
Στο 6^ο σενάριο, παρατηρείται μέγιστο εφελκυστικής τάσης στη ένωση άνω και εμπρός σωλήνα κατά τον άξονα X στη 2^η στρώση (M46J Woven/T700 UD) που φτάνει την τιμή των 445 MPa, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 266 MPa. Στον Y άξονα, στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστο 237 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 113 MPa. Επίσης παρατηρούνται μέγιστα θλιπτικών τάσεων στην ένωση κάτω και εμπρός σωλήνα, με τιμές κατά τον X άξονα στην 1^η στρώση που φτάνουν τα 382 MPa, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 280 MPa. Κατά τον Y άξονα φτάνουν το μέγιστο των 19 MPa στην 8^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 16.5 MPa. Η μόνη περίπτωση που θα μπορούσε να επέλθει θραύση υλικού είναι στην περίπτωση του εμπρός σωλήνα κατά τον X άξονα και όπου η τιμή τάσεων ξεπερνά το όριο αντοχής των ινών του υλικού M46J, αν και γίνεται ένωση στο σημείο με ίνες T700 UD του άνω σωλήνα με όριο αντοχής τα 1500 MPa, και M46J UD στον κάτω σωλήνα με όριο αντοχής τα 1000 MPa. Στον υπόλοιπο σκελετό θα μπορούσε να γίνει αφαίρεση στρώσεων ή αντικατάσταση με ελαφρύτερες μικρότερης αντοχής.

- 6th Scenario

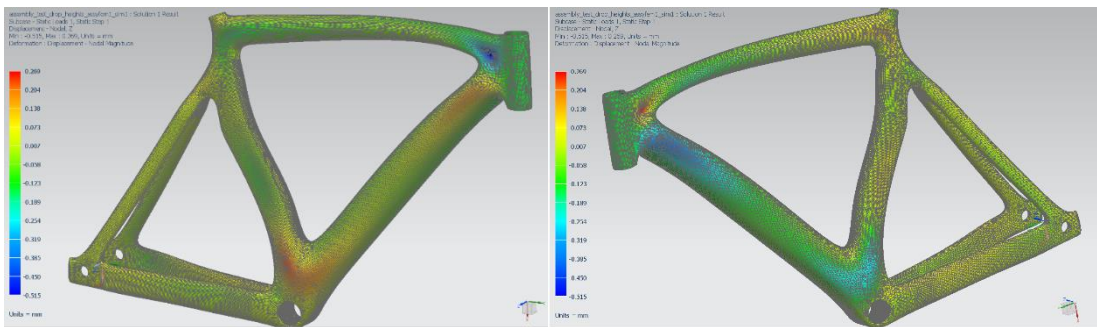
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-3,83E+05	-1,13E+04	0,00E+00	-1,62E+03	3,12E-14	0,00E+00	1,86E+05
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	4,45E+05	-6,03E+03	0,00E+00	5,09E+03	1,09E+04	8,55E+03	2,26E+05
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-2,69E+04	-2,24E+05	0,00E+00	-9,66E+03	1,17E+01	1,97E+03	9,91E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	1,53E+04	2,37E+05	0,00E+00	1,85E+04	-2,52E+03	-1,18E+03	1,12E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,70E+04	3,60E+04	0,00E+00	4,81E+03	-7,54E+02	1,14E+03	2,69E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,70E+04	3,60E+04	0,00E+00	4,81E+03	-7,54E+02	1,14E+03	2,69E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	1,18E+05	3,75E+04	0,00E+00	-2,63E+04	1,03E+04	3,72E+03	4,79E+04
Max Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	4,69E+04	2,06E+04	0,00E+00	2,08E+04	0,00E+00	8,21E-15	2,46E+04
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	3,72E+03	-6,55E+04	0,00E+00	-1,62E+03	-1,35E+05	4,89E+04	3,46E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-8,14E+04	2,13E+04	0,00E+00	-1,50E+03	5,20E+04	-3,40E+04	5,14E+04
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	2,01E+03	-6,18E+04	0,00E+00	-1,69E+03	1,10E+03	-4,28E+04	3,19E+04
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	4,68E+03	-6,96E+04	0,00E+00	-2,02E+03	1,59E+03	4,92E+04	3,72E+04
Min Maximum Shear Stress	4	chainstay_right	Interlaminar	-3,78E+00	-5,04E+00	0,00E+00	-7,99E-01	4,25E+02	-7,86E+01	1,02E+00
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	4,45E+05	-6,03E+03	0,00E+00	5,09E+03	1,09E+04	8,55E+03	2,26E+05



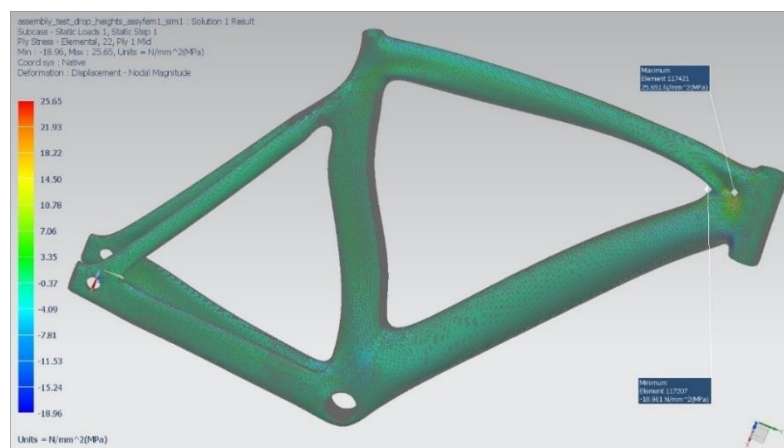
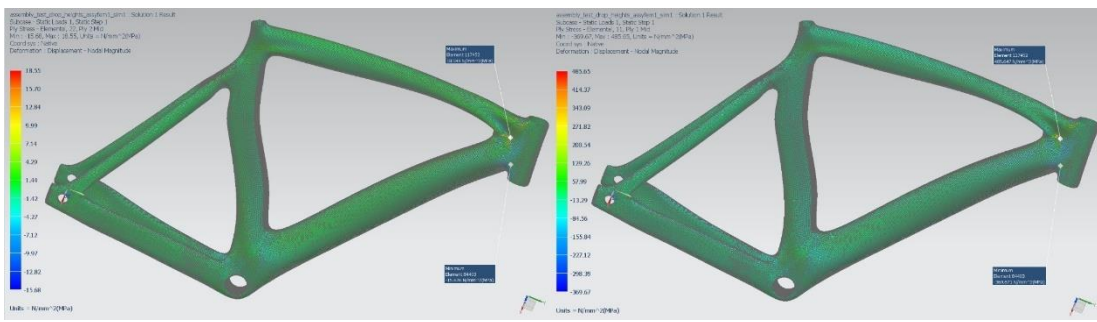
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

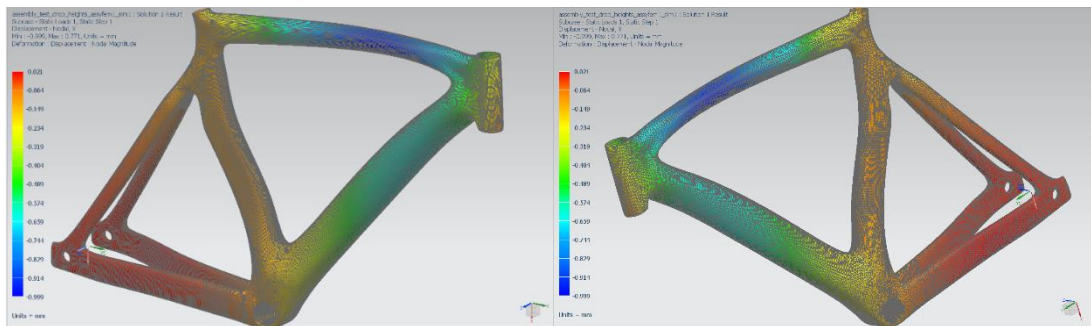


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

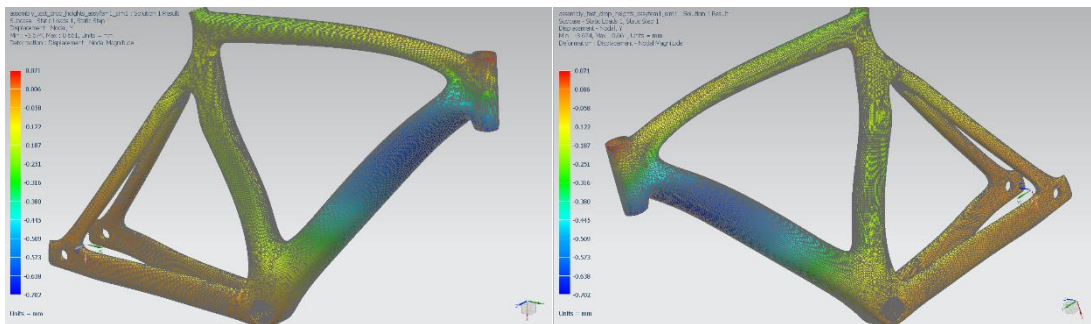
Στο 7^ο σενάριο, παρατηρούνται τα ίδια φαινόμενα με το 6^ο σενάριο στις ίδιες περιοχές αντίστοιχα, αν και οι μονοδιευθυντικές ίνες του άνω σωλήνα είναι M46J UD αντί για T700 UD (όριο 1000 αντί 1500 MPa στον άξονα διεύθυνσης της ίνας), και πάλι όμως χωρίς υπερβάνουσες τιμές τάσεων σε σύγκριση με αυτά τα όρια αντοχής. Οπότε ισχύουν τα ίδια πράγματα όσον αφορά τη βελτιστοποίηση με το 6^ο σενάριο.

- 7th Scenario

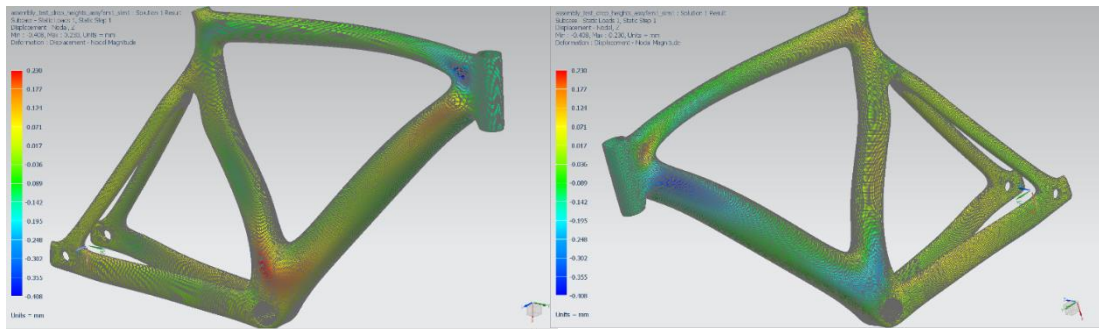
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-3,39E+05	-9,15E+03	0,00E+00	-3,33E+03	8,20E-15	0,00E+00	1,65E+05
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	3,48E+05	-5,21E+03	0,00E+00	5,72E+03	5,65E+03	7,98E+03	1,77E+05
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	7,59E+02	-1,77E+05	0,00E+00	-5,95E+03	-4,58E+03	3,34E+03	8,93E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-6,79E+02	2,12E+05	0,00E+00	1,53E+04	-9,71E+03	-5,06E+03	1,07E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,71E+04	3,40E+04	0,00E+00	3,76E+03	-3,90E+02	8,95E+02	2,58E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,71E+04	3,40E+04	0,00E+00	3,76E+03	-3,90E+02	8,95E+02	2,58E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	8,95E+03	5,10E+04	0,00E+00	-2,07E+04	-2,37E+03	2,98E+03	2,95E+04
Max Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	4,71E+04	2,68E+04	0,00E+00	1,90E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,16E+04
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-1,48E+04	-2,95E+04	0,00E+00	3,18E+03	-1,25E+05	4,07E+04	7,99E+03
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	4,78E+03	-9,86E+04	0,00E+00	-7,45E+02	5,42E+04	3,62E+04	5,17E+04
Min Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	-1,42E+04	-2,83E+04	0,00E+00	2,94E+03	4,21E+03	-3,57E+04	7,64E+03
Max Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	-7,95E+03	-9,74E+04	0,00E+00	5,45E+03	-1,86E+04	4,97E+04	4,51E+04
Min Maximum Shear Stress	4	chainstay_right	Interlaminar	-2,21E+00	-2,16E+00	0,00E+00	-6,91E-01	4,91E+02	-8,33E+01	6,91E-01
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	3,48E+05	-5,21E+03	0,00E+00	5,72E+03	5,65E+03	7,98E+03	1,77E+05



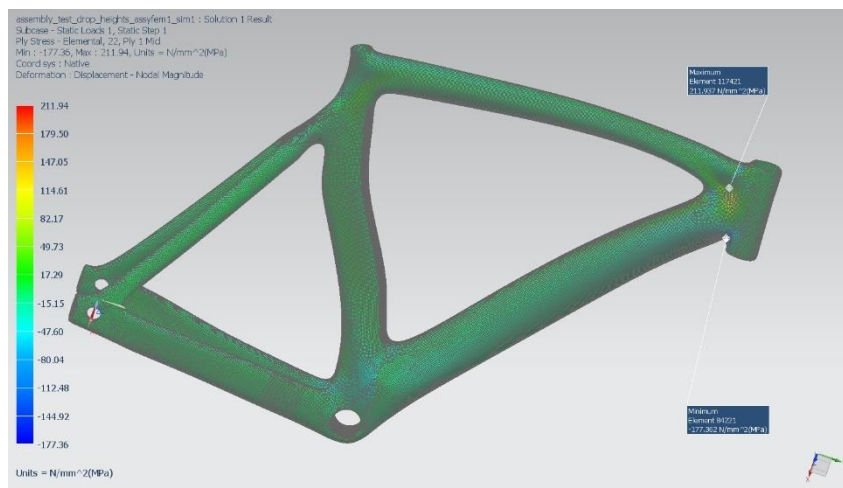
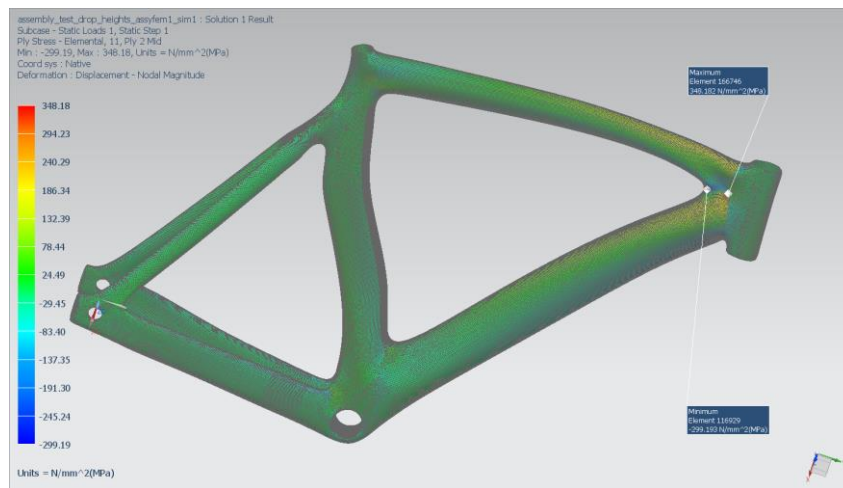
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

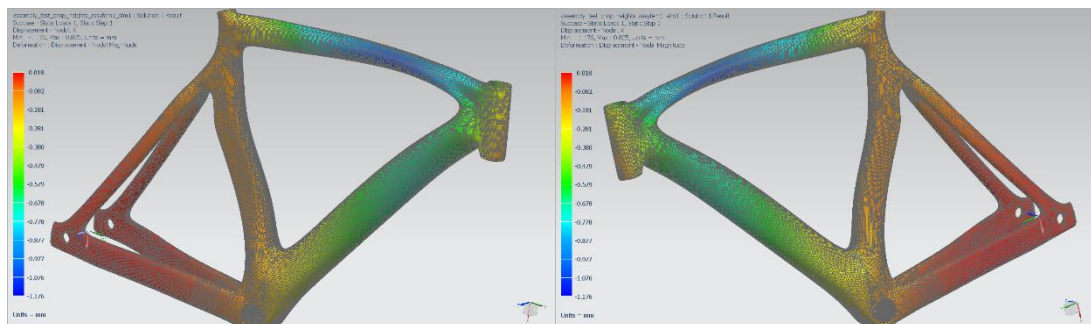


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

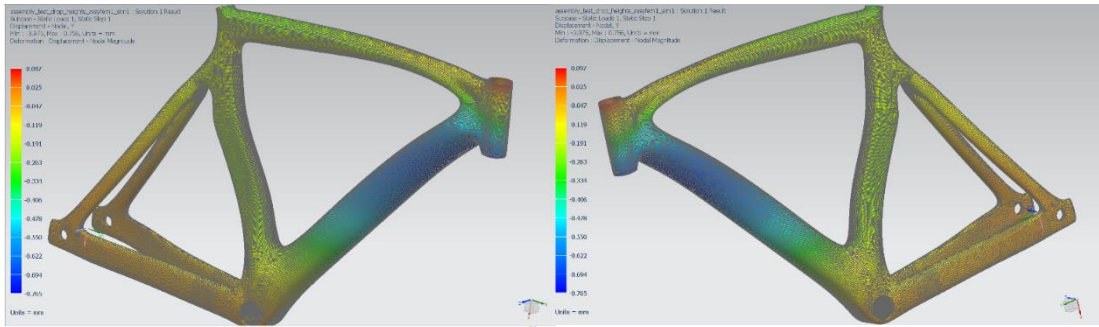
Στο 8^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην ένωση μεταξύ άνω και κάτω σωλήνα, στη 2^η στρώση που φτάνουν το μέγιστο των 455 MPa, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 272 MPa. Στο ίδιο σημείο παρατηρούνται κατά τον Y άξονα στην 1^η στρώση μέγιστα 239 MPa, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 134 MPa. Επίσης παρατηρούνται θλιπτικές τάσεις κατά τον X άξονα στην ένωση κάτω και εμπρός σωλήνα, στην 6^η στρώση μέγιστης τιμής 385 MPa με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 281 MPa. Στο ίδιο σημείο παρατηρούνται τάσεις κατά τον Y άξονα στην 1^η στρώση με μέγιστη τιμή τα 225 MPa, και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 213 MPa. Τα μέγιστα τιμών τάσεων που παρατηρούνται στις παραπάνω στρώσεις στα προαναφερθέντα σημεία δε ξεπερνούν τα όρια αντοχής τάσεων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Άρα, στα προβληματικά σημεία δε συνίσταται η προσθαφαίρεση στρώσεων λόγω καλής συμπεριφοράς και λίγων στρώσεων. Στον υπόλοιπο σκελετό θα μπορούσε να γίνει αφαίρεση στρώσεων ή αντικατάσταση με ελαφρύτερες μικρότερης αντοχής σε σημεία με μικρή φόρτιση.

- 8th Scenario

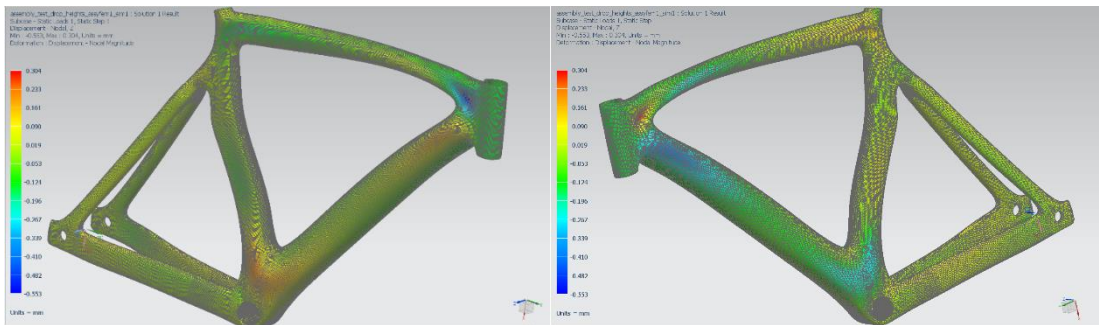
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-3,85E+05	-1,13E+04	0,00E+00	-1,62E+03	3,19E-14	0,00E+00	1,87E+05
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	4,56E+05	-6,03E+03	0,00E+00	4,90E+03	1,04E+04	9,20E+03	2,31E+05
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-2,73E+04	-2,26E+05	0,00E+00	-9,71E+03	8,61E+00	1,99E+03	9,96E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-7,42E+03	2,40E+05	0,00E+00	1,50E+04	-9,76E+03	-4,85E+03	1,24E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,85E+04	3,81E+04	0,00E+00	4,75E+03	-7,15E+02	1,13E+03	2,87E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,85E+04	3,81E+04	0,00E+00	4,75E+03	-7,15E+02	1,13E+03	2,87E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	1,17E+05	3,61E+04	0,00E+00	-2,76E+04	9,94E+03	4,01E+03	4,91E+04
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	2,36E+05	2,96E+03	0,00E+00	1,63E+04	3,98E+03	-2,29E+03	1,18E+05
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	3,95E+03	-6,57E+04	0,00E+00	-1,62E+03	-1,36E+05	4,96E+04	3,49E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-8,21E+04	2,14E+04	0,00E+00	-1,50E+03	5,23E+04	-3,42E+04	5,18E+04
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	2,23E+03	-6,20E+04	0,00E+00	-1,69E+03	9,98E+02	-4,32E+04	3,21E+04
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	3,95E+03	-6,57E+04	0,00E+00	-1,62E+03	-1,36E+05	4,96E+04	3,49E+04
Min Maximum Shear Stress	2	chainstay_right	Interlaminar	1,97E+02	1,96E+02	0,00E+00	3,78E-01	-1,14E+01	4,23E+00	6,65E-01
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	4,56E+05	-6,03E+03	0,00E+00	4,90E+03	1,04E+04	9,20E+03	2,31E+05



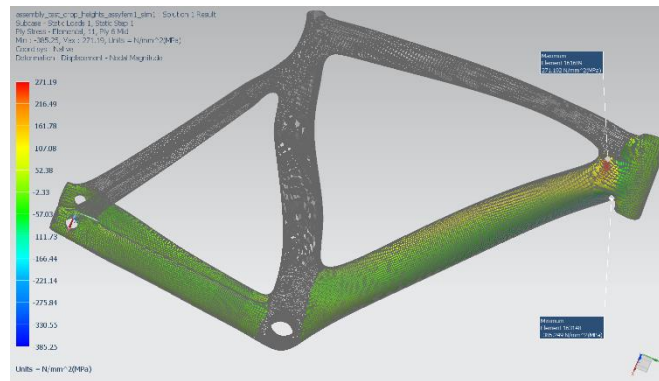
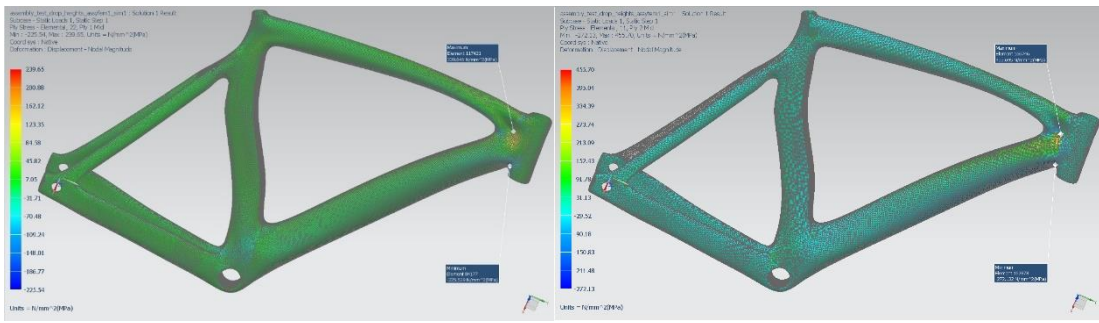
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

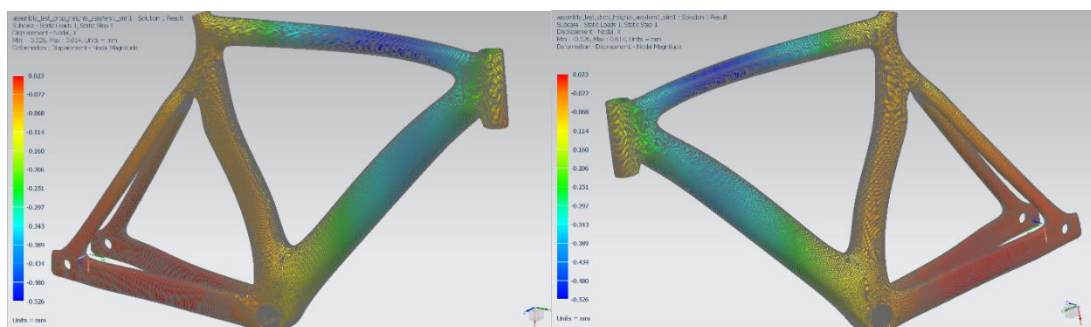


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

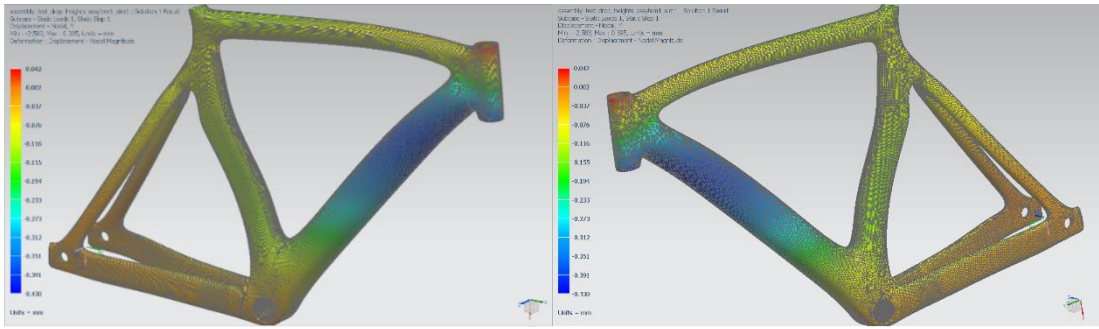
Στο 9^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 179 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 171 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 106 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 81 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 228 MPa στην ένωση κάτω και εμπρός σωλήνα στην 8^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 182 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 106 MPa στην 7^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 103 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ χαμηλότερες από τα όρια αντοχής της κάθε στρώσης. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο μείωσης των συνολικών στρώσεων σε ολόκληρο το σκελετό.

- 9th Scenario

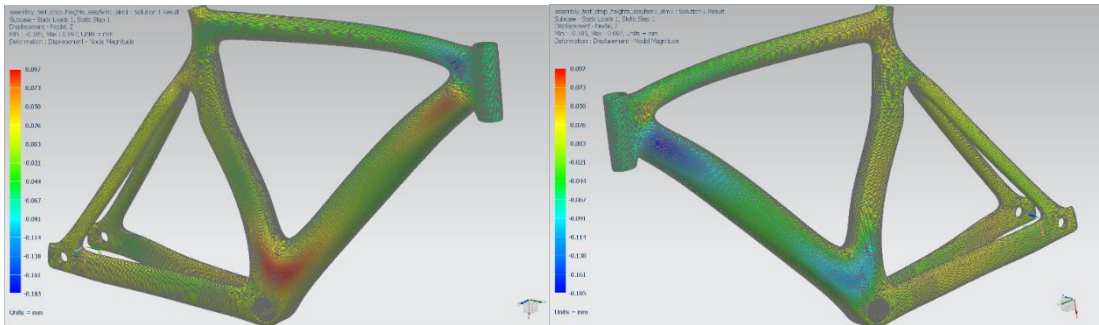
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	
Min Stress 11	8	down_tube	Interlaminar	-2,29E+05	-7,39E+03	0,00E+00	-3,41E+03	-2,89E-14	3,23E-13	1,11E+05
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	1,80E+05	-3,55E+03	0,00E+00	-1,99E+03	2,00E+02	-5,13E+02	9,16E+04
Min Stress 22	7	down_tube	Interlaminar	-3,81E+04	-1,06E+05	0,00E+00	1,59E+03	1,32E+02	-2,44E+03	3,40E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-9,36E+03	1,06E+05	0,00E+00	8,15E+03	-2,91E+03	-1,91E+03	5,84E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-7,69E+03	2,81E+04	0,00E+00	2,21E+03	-5,50E+01	5,49E+02	1,80E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-7,69E+03	2,81E+04	0,00E+00	2,21E+03	-5,50E+01	5,49E+02	1,80E+04
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-1,08E+04	3,08E+04	0,00E+00	-1,05E+04	-2,56E+01	1,37E+03	2,33E+04
Max Stress 12	5	top_tube	Interlaminar	6,39E+04	3,00E+04	0,00E+00	1,19E+04	4,52E+02	4,31E+02	2,07E+04
Min Stress 23	6	head_tube	Interlaminar	-1,14E+04	-1,53E+04	0,00E+00	1,78E+03	-7,15E+04	2,92E+04	2,64E+03
Max Stress 23	6	head_tube	Interlaminar	-3,72E+03	-4,00E+04	0,00E+00	6,02E+02	5,44E+04	1,69E+04	1,81E+04
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-3,55E+03	6,70E+03	0,00E+00	7,09E+02	2,58E+04	-5,59E+04	5,17E+03
Max Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-9,73E+03	-5,58E+04	0,00E+00	2,95E+03	-1,33E+04	4,96E+04	2,32E+04
Min Maximum Shear Stress	2	seat_tube	Interlaminar	8,37E+01	8,48E+01	0,00E+00	-2,05E-01	1,75E+01	-2,17E+02	5,58E-01
Max Maximum Shear Stress	8	down_tube	Interlaminar	-2,28E+05	-6,25E+03	0,00E+00	1,85E+03	-4,97E-13	5,61E-13	1,11E+05



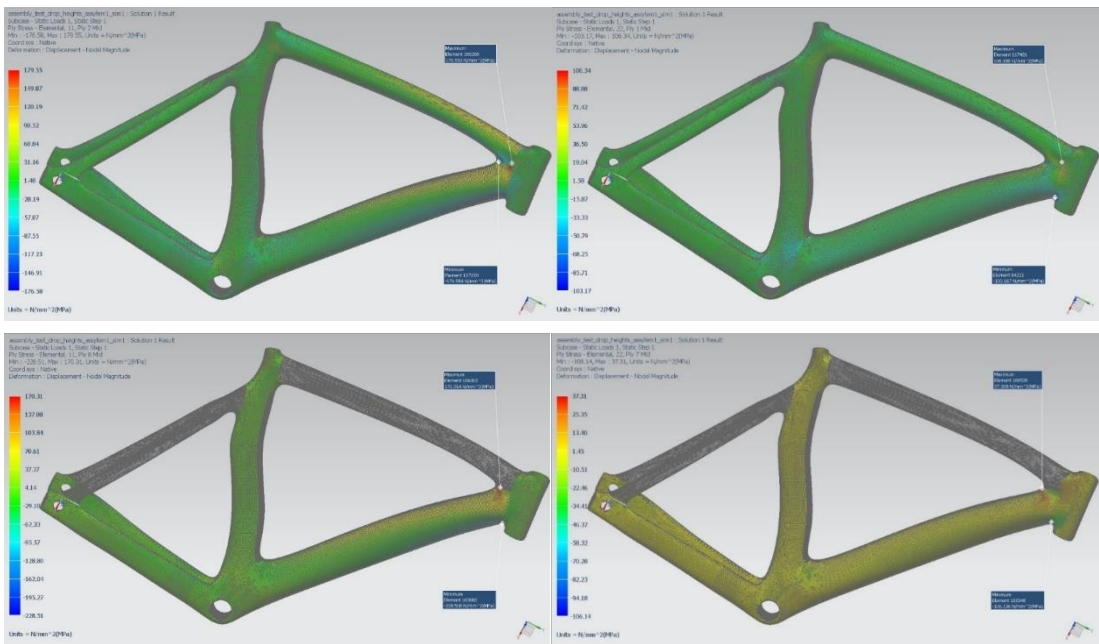
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

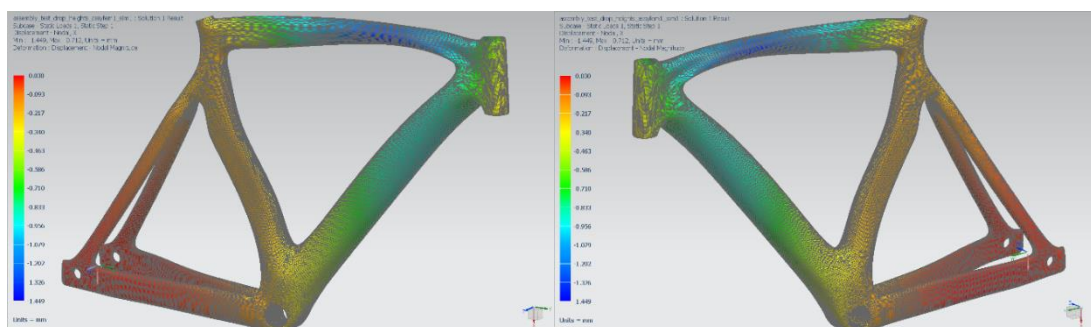


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

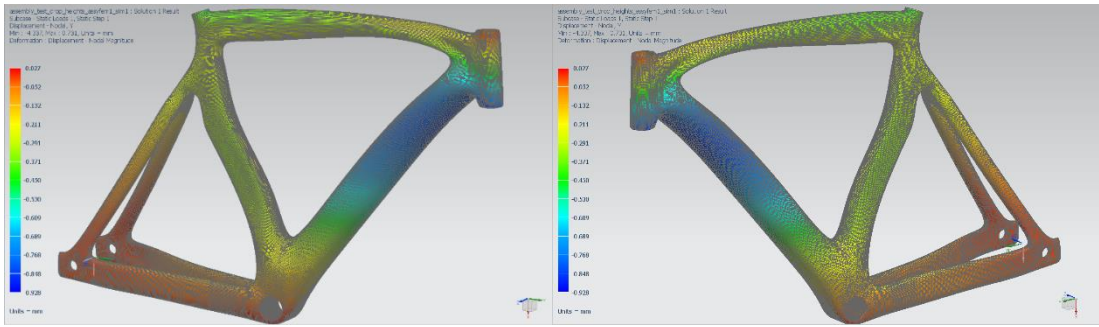
Στο 10^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω, κάτω και εμπρός σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 469 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 447 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 43 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 40 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 362 MPa στην ένωση κάτω και εμπρός σωλήνα στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 339 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 29 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 26 MPa. Οι τιμές αυτές σε σχέση με τα όρια αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης είναι πάρα πολύ μικρές, μιας και υπάρχει ένα μεγάλο εύρος γωνιών εφαρμογής αυτού του μονοδιευθυντικού υλικού. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει πολύ μεγάλο περιθώριο για αντικατάσταση των στρώσεων με άλλες ελαφρύτερες με μικρότερο όριο αντοχής, ή ακόμα και μείωση σε στρώσεις τουλάχιστον σε όλον τον υπόλοιπο σκελετό, εκτός των προβληματικών περιοχών.

- 10th Scenario

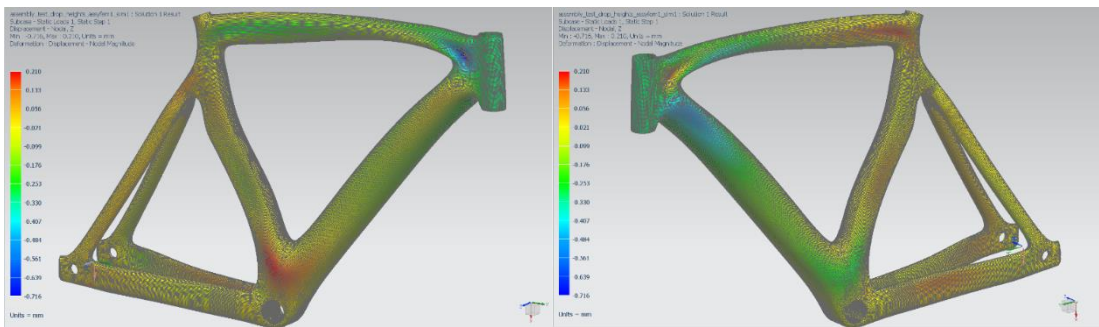
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-3,62E+05	-1,22E+04	0,00E+00	-9,70E+03	8,27E+02	-5,07E+02	1,75E+05
Max Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	4,70E+05	9,63E+03	0,00E+00	2,63E+04	5,98E+03	6,89E+03	2,32E+05
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-8,17E+04	-2,94E+04	0,00E+00	-1,35E+04	-1,38E+03	-2,94E+02	2,94E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-2,67E+04	4,34E+04	0,00E+00	2,37E+04	-4,32E+03	9,99E+03	4,23E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,46E+03	3,74E+03	0,00E+00	2,85E+03	-6,31E+02	6,13E+02	5,84E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,46E+03	3,74E+03	0,00E+00	2,85E+03	-6,31E+02	6,13E+02	5,84E+03
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	4,35E+04	1,98E+04	0,00E+00	-3,33E+04	2,69E+03	2,30E+03	3,54E+04
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-5,36E+04	-3,32E+03	0,00E+00	3,33E+04	8,48E+01	1,20E+03	4,17E+04
Min Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-8,66E+03	-1,52E+04	0,00E+00	2,98E+03	-1,42E+04	2,66E+03	4,43E+03
Max Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-2,64E+04	-1,54E+04	0,00E+00	-4,43E+03	1,59E+04	5,53E+03	7,05E+03
Min Stress 31	5	down_tube	Interlaminar	-4,68E+04	1,87E+03	0,00E+00	4,09E+03	3,42E+03	-9,99E+03	2,47E+04
Max Stress 31	2	top_tube	Interlaminar	4,47E+05	3,35E+03	0,00E+00	-1,83E+04	-2,07E+03	1,29E+04	2,22E+05
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_left	Interlaminar	-7,25E+00	-7,70E+00	0,00E+00	1,37E+00	-4,26E+01	-2,08E+01	1,38E+00
Max Maximum Shear Stress	1	top_tube	Interlaminar	4,70E+05	9,63E+03	0,00E+00	2,63E+04	5,98E+03	6,89E+03	2,32E+05



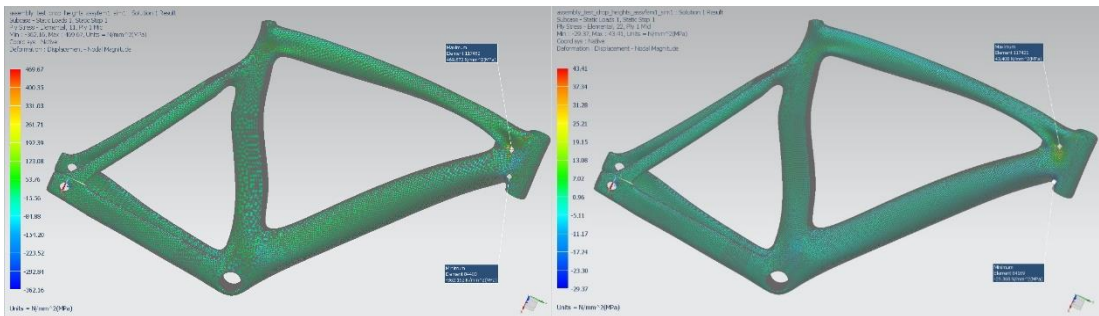
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Falling Frame Test

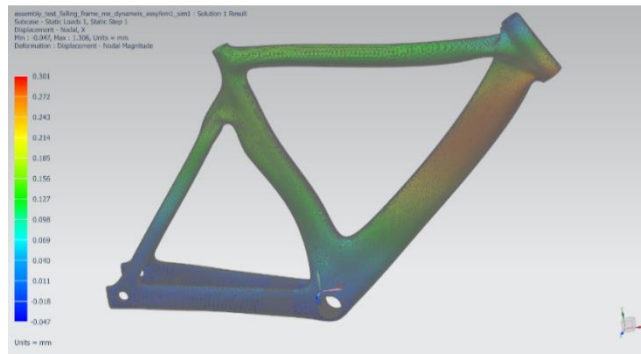
Κατά την πειραματική διαδικασία του Falling Frame, όσον αφορά στις παραμορφώσεις του σκελετού λόγω τάσεων, παρατηρήθηκε εφελκυσμός, κυρίως στον κάτω σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στα πίσω ψαλίδια στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στο δεξί κάτω ψαλίδι, στην ένωση των ψαλιδιών με το σωλήνα σέλλας και στο κάτω κέντρο του σκελετού στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 0.32 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στα πίσω ψαλίδια και στη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον κάτω και τον άνω σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον εμπρός και τον κάτω σωλήνα κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 0.5 χιλιοστό.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που εμφανίστηκαν σε σημεία και στρώσεις υλικού του σκελετού στο συγκεκριμένο πείραμα για τα σενάρια Quasi (M46J Woven, T300 Woven) και 1-10, κατά τους άξονες X και Y. Οι άξονες αυτοί να σημειωθεί πως έχουν οριστεί με βάση το επίπεδο του κάθε σωλήνα ξεχωριστά (X άξονας/οριζόντια διεύθυνση σωλήνα, Y άξονας/κάθετη διεύθυνση σωλήνα). Στις παρακάτω απεικονίσεις ενδέχεται κάποια από τα κομμάτια του σκελετού να έχουν ένα σκοτεινό γκρι χρώμα, πράγμα το οποίο οφείλεται στην απεικόνιση του υπολογιστικού προγράμματος όταν δεν υπάρχουν πλέον στρώσεις στα συγκεκριμένα κομμάτια σκελετού (π.χ. κανονική απεικόνιση 6^{ης} στρώσης εμπρός σωλήνα, ενώ οι στρώσεις του επάνω σωλήνα περιορίζονται στις 4).

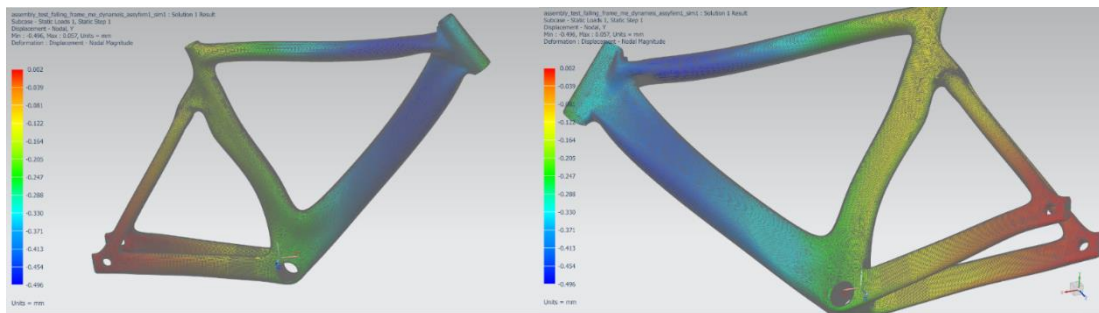
Στο M46J Woven σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 88 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 83 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 79 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 74 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 73 MPa στην ένωση άνω και εμπρός σωλήνα στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 63 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 82 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 73 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- M46J Woven

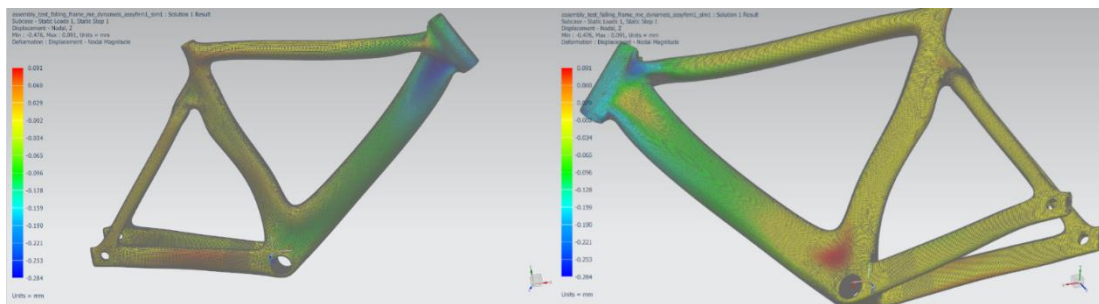
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-7,32E+04	-2,58E+04	0,00E+00	-5,14E+03	-6,47E+02	6,12E+01
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	8,87E+04	1,95E+04	0,00E+00	5,10E+03	8,45E+02	-7,38E+01
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-2,14E+04	-8,21E+04	0,00E+00	-4,81E+03	2,43E+02	1,70E+02
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	1,71E+04	7,99E+04	0,00E+00	4,55E+03	3,54E+02	-2,43E+02
Min Stress 33	1	Laminate2	Interlaminar	6,53E+02	1,78E+02	0,00E+00	5,10E+02	9,04E+00	4,51E+00
Max Stress 33	1	Laminate2	Interlaminar	6,53E+02	1,78E+02	0,00E+00	5,10E+02	9,04E+00	4,51E+00
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-3,59E+04	-7,42E+04	0,00E+00	-6,61E+03	-3,60E+02	-1,80E+03
Max Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	6,77E+04	4,04E+04	0,00E+00	6,40E+03	-1,09E+03	-5,87E+02
Min Stress 23	2	Laminate2	Interlaminar	-8,74E+03	1,42E+04	0,00E+00	-5,37E+02	-1,08E+04	4,36E+03
Max Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	6,81E+03	2,14E+04	0,00E+00	-1,60E+03	2,26E+04	-7,65E+03
Min Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	3,86E+03	2,27E+04	0,00E+00	-1,67E+03	-3,43E+02	-8,81E+03
Max Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	-1,53E+04	2,32E+04	0,00E+00	2,55E+02	7,69E+03	1,38E+04



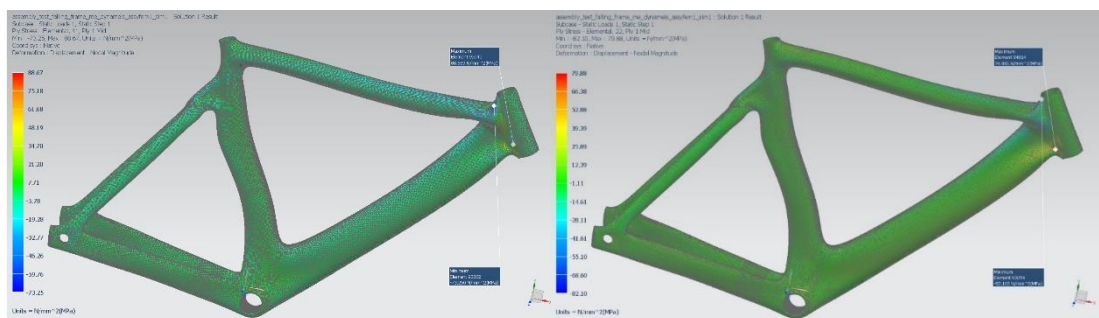
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

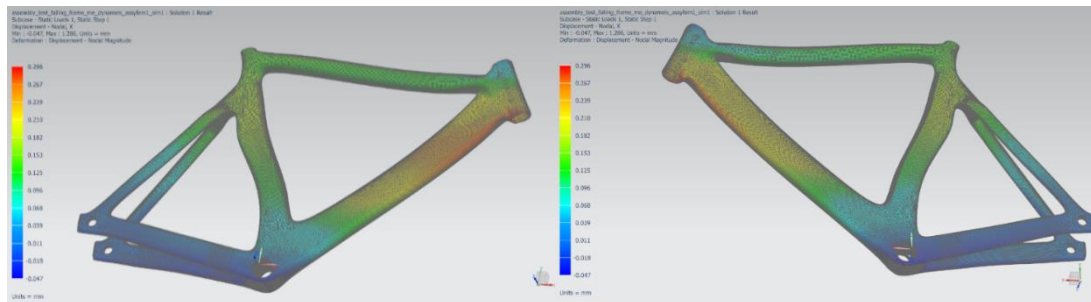


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

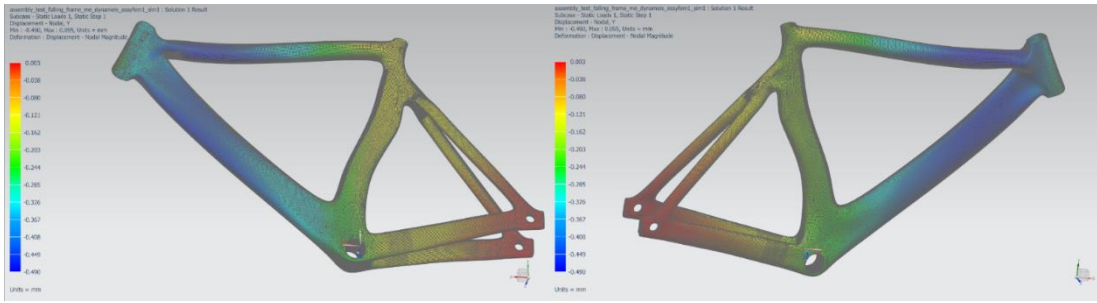
Στο T300 Woven σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 72 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 66 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 62 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 59 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 54 MPa στην ένωση άνω και εμπρός σωλήνα στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 51 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 63 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 55 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- T300 Woven

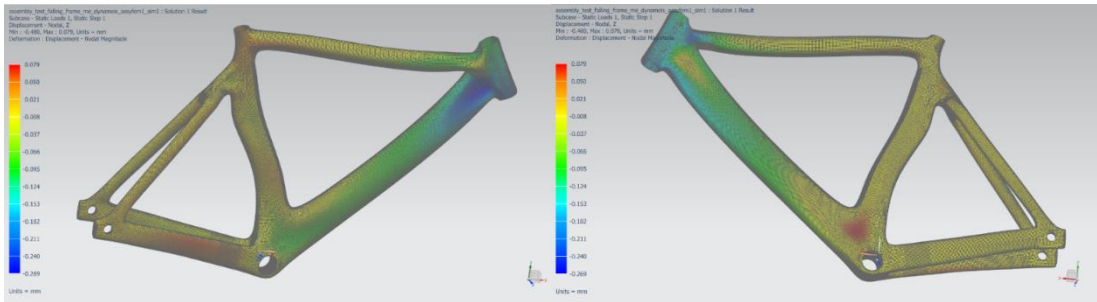
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-5,48E+04	-2,16E+04	0,00E+00	-3,40E+03	-2,54E+02	3,86E+02
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	7,26E+04	1,61E+04	0,00E+00	4,78E+03	-8,93E+02	4,59E+02
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-2,23E+04	-6,14E+04	0,00E+00	-3,76E+03	2,50E+02	3,64E+02
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	1,34E+04	6,28E+04	0,00E+00	4,17E+03	5,54E+02	2,51E+02
Min Stress 33	1	seatstay_right	Interlaminar	4,54E+02	2,05E+02	0,00E+00	4,74E+02	9,38E+00	8,17E+00
Max Stress 33	1	seatstay_right	Interlaminar	4,54E+02	2,05E+02	0,00E+00	4,74E+02	9,38E+00	8,17E+00
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-3,31E+04	-5,69E+04	0,00E+00	-5,96E+03	1,08E+02	-3,25E+02
Max Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	5,40E+04	3,34E+04	0,00E+00	6,57E+03	-9,15E+02	1,62E+02
Min Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	7,65E+02	1,87E+03	0,00E+00	-3,13E+02	-6,49E+03	-1,94E+03
Max Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	7,61E+03	-2,28E+04	0,00E+00	-2,78E+02	4,68E+03	8,63E+02
Min Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	1,15E+04	4,00E+04	0,00E+00	2,86E+03	-3,35E+03	-3,50E+03
Max Stress 31	2	down_tube	Interlaminar	-5,70E+03	1,89E+04	0,00E+00	-5,35E+02	5,60E+01	2,62E+03



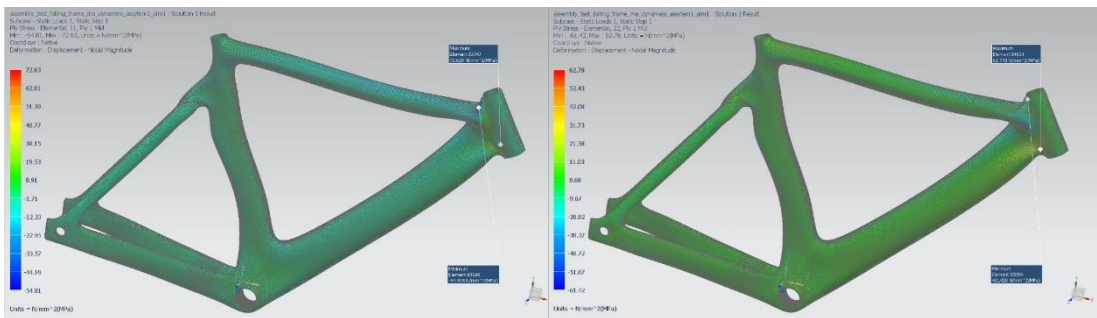
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

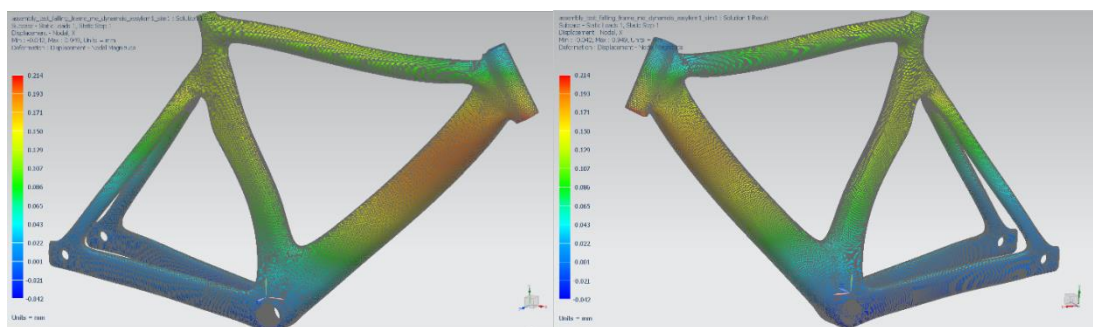


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

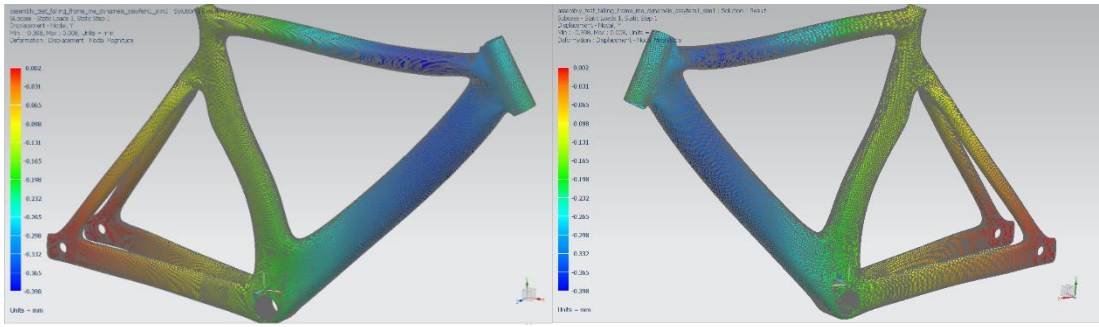
Στο 1^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 50 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 47 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 47 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 43 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 38 MPa στην ένωση άνω και εμπρός σωλήνα στην 4^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 33 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 34.5 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 34 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 1st Scenario

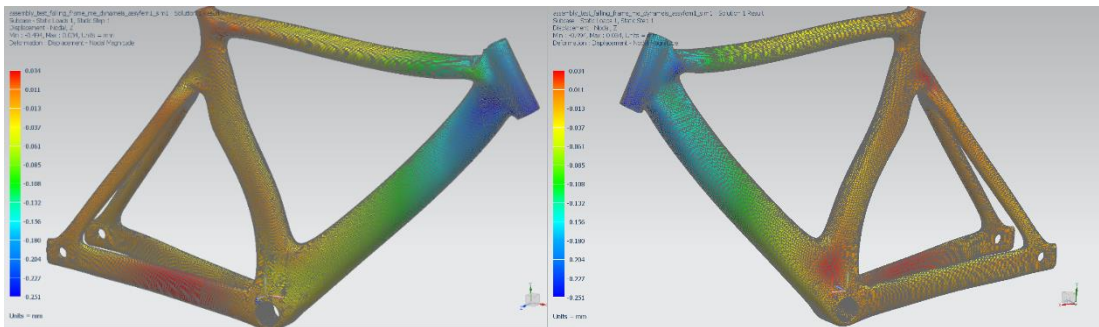
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	top_tube	Interlaminar	-3,83E+04	-1,33E+04	0,00E+00	-1,74E+03	-2,62E-14	7,59E-14	1,26E+04
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	5,02E+04	9,33E+03	0,00E+00	2,71E+03	-4,97E+02	2,06E+02	2,06E+04
Min Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	-3,31E+03	-3,44E+04	0,00E+00	6,16E+02	-8,72E+01	-1,53E+02	1,56E+04
Max Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	-8,94E+01	4,78E+04	0,00E+00	9,68E+02	-1,23E+03	3,10E+02	2,40E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,53E+03	-1,40E+04	0,00E+00	-1,80E+03	6,93E+02	-8,56E+02	5,99E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,53E+03	-1,40E+04	0,00E+00	-1,80E+03	6,93E+02	-8,56E+02	5,99E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	2,23E+04	9,04E+03	0,00E+00	-3,52E+03	1,88E+02	-3,65E+02	7,49E+03
Max Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	3,98E+04	2,13E+04	0,00E+00	4,51E+03	-6,15E+02	1,56E+02	1,03E+04
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-1,11E+03	1,58E+03	0,00E+00	-3,41E+01	-5,43E+03	-1,48E+03	1,34E+03
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	1,03E+04	2,39E+04	0,00E+00	2,23E+03	3,49E+03	-8,17E+02	7,13E+03
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	2,90E+04	6,19E+03	0,00E+00	1,48E+03	-2,86E+03	-2,38E+03	1,15E+04
Max Stress 31	2	top_tube	Interlaminar	-1,91E+04	6,18E+03	0,00E+00	-1,24E+02	-6,49E+01	1,76E+03	1,26E+04
Min Maximum Shear Stress	5	head_tube	Interlaminar	-6,28E+01	-6,27E+01	0,00E+00	-7,15E-02	1,23E+00	-4,07E-01	7,28E-02
Max Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-8,94E+01	4,78E+04	0,00E+00	9,68E+02	-1,23E+03	3,10E+02	2,40E+04



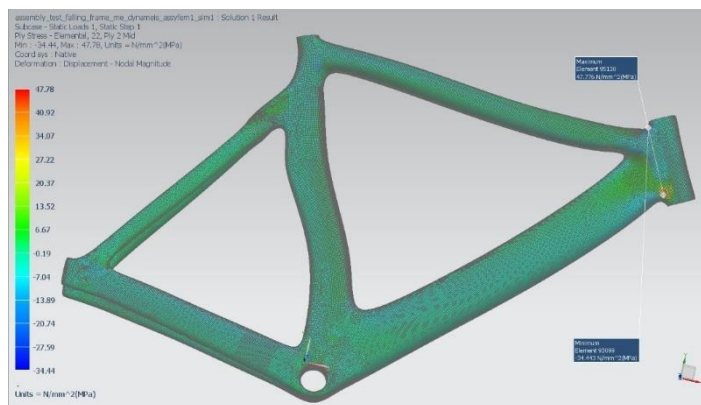
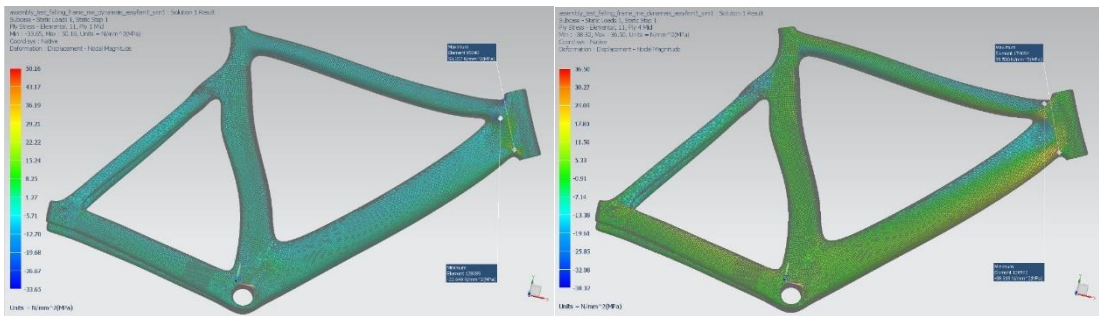
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

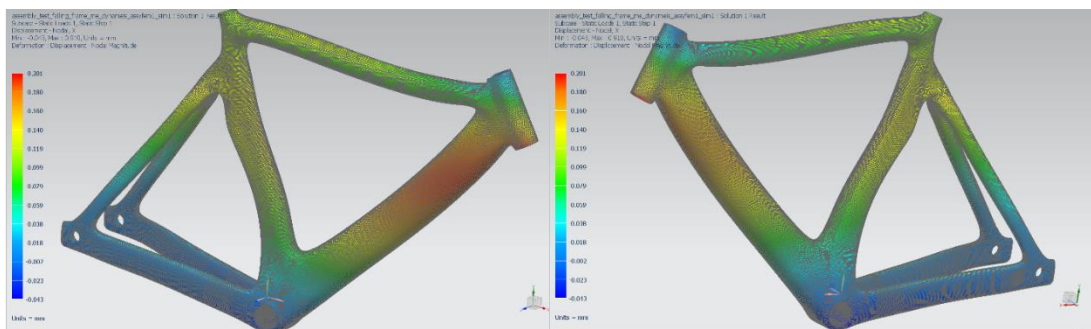


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

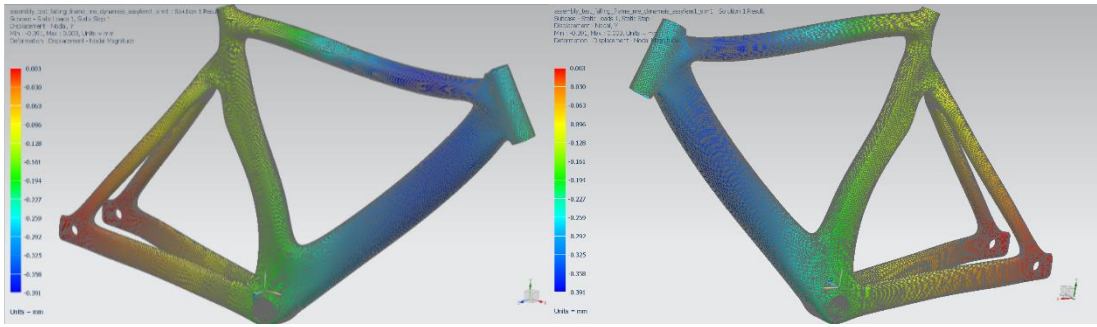
Στο 2^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 44 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 38 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 37 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 35 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 32 MPa στην ένωση άνω και εμπρός σωλήνα στην 4^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 31 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 29.6 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 26.5 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 2nd Scenario

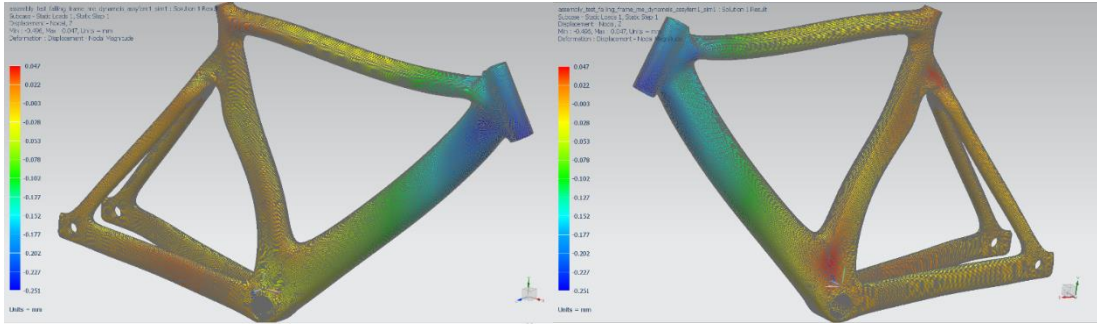
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	top_tube	Interlaminar	-3,30E+04	-9,19E+03	0,00E+00	-1,66E+03	1,53E-15	-9,91E-15	1,20E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	4,42E+04	1,00E+04	0,00E+00	-1,00E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,71E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-3,26E+02	-2,96E+04	0,00E+00	-1,57E+03	-3,46E+01	-3,79E+02	1,47E+04
Max Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	1,13E+03	3,77E+04	0,00E+00	1,05E+03	-6,82E+02	3,78E+02	1,83E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,97E+03	-1,17E+04	0,00E+00	-1,23E+03	4,23E+02	-5,59E+02	5,00E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,97E+03	-1,17E+04	0,00E+00	-1,23E+03	4,23E+02	-5,59E+02	5,00E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	2,07E+04	7,94E+03	0,00E+00	-3,47E+03	2,01E+02	-3,25E+02	7,25E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-1,82E+04	-7,02E+03	0,00E+00	3,51E+03	2,05E+02	-1,23E+02	6,60E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	2,35E+02	-4,47E+02	0,00E+00	-1,64E+02	-4,44E+03	-1,17E+03	3,78E+02
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-3,98E+03	1,59E+04	0,00E+00	-1,85E+02	2,86E+03	-8,40E+01	9,92E+03
Min Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	5,86E+03	1,96E+04	0,00E+00	1,44E+03	-2,16E+03	-2,17E+03	7,02E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	8,61E+03	7,68E+03	0,00E+00	1,30E+03	1,46E+01	1,90E+03	1,38E+03
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_left	Interlaminar	-1,26E+02	-1,25E+02	0,00E+00	4,45E-01	8,24E+00	-9,21E+00	5,74E-01
Max Maximum Shear Stress	2	top_tube	Interlaminar	2,94E+04	-1,06E+04	0,00E+00	1,68E+02	8,51E+02	-1,45E+02	2,00E+04



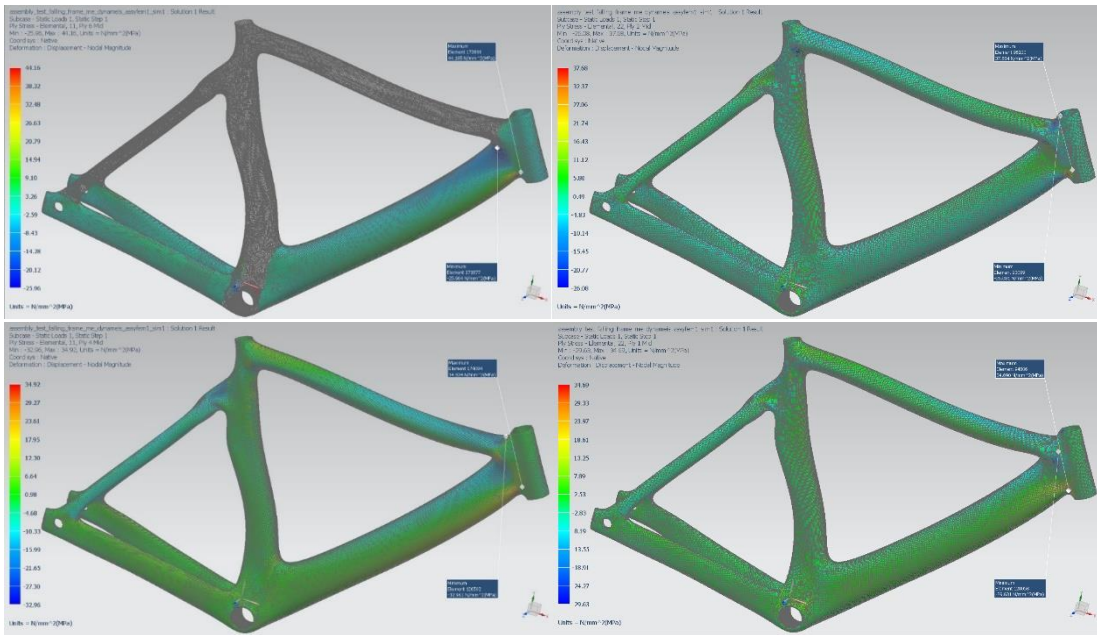
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

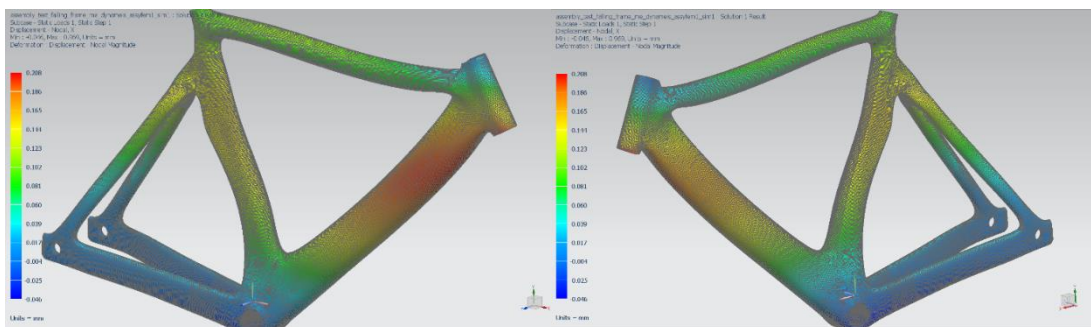


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

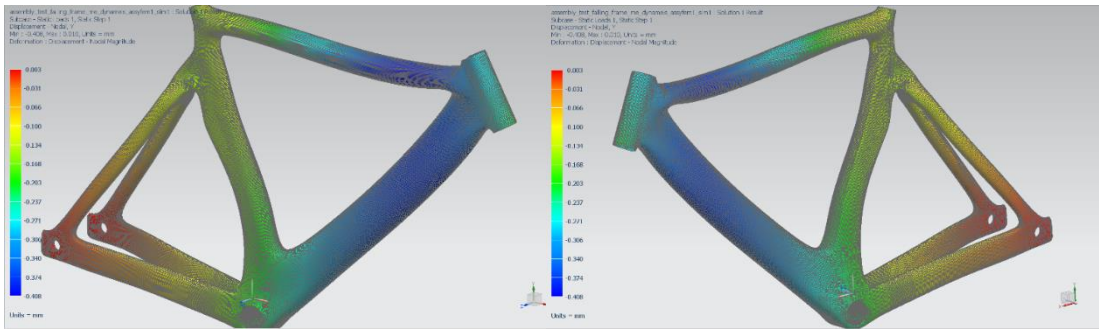
Στο 3^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 68 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 66 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 37 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 35 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 56 MPa στην ένωση παλουκόσελου και άνω σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 49 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 37 MPa στην 3^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 35 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 3rd Scenario

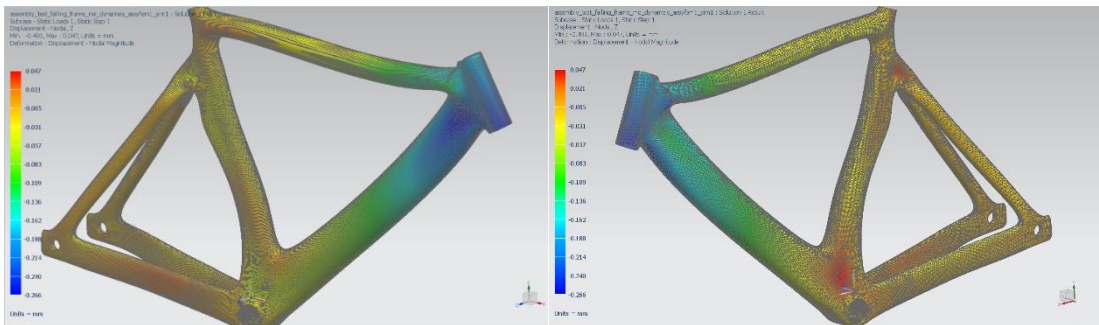
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-5,68E+04	1,01E+03	0,00E+00	-8,44E+02	-9,80E+01	-1,52E+02	2,89E+04
Max Stress 11	4	down_tube	Interlaminar	6,83E+04	5,56E+02	0,00E+00	-4,05E+02	5,90E+02	-1,19E+03	3,39E+04
Min Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	1,65E+04	-3,70E+04	0,00E+00	1,28E+03	-7,18E+02	1,05E+03	2,68E+04
Max Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	1,10E+03	3,74E+04	0,00E+00	1,17E+03	-4,91E+02	4,71E+02	1,82E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,22E+03	-1,26E+04	0,00E+00	-1,29E+03	4,42E+02	-5,94E+02	5,35E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,22E+03	-1,26E+04	0,00E+00	-1,29E+03	4,42E+02	-5,94E+02	5,35E+03
Min Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	-2,83E+04	-3,24E+04	0,00E+00	-4,79E+03	-2,43E+02	8,71E+01	5,22E+03
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-3,48E+04	-1,35E+03	0,00E+00	6,38E+03	-4,70E-13	0,00E+00	1,79E+04
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	3,83E+02	-8,17E+02	0,00E+00	-1,82E+02	-4,90E+03	-1,31E+03	6,27E+02
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-5,13E+03	1,60E+04	0,00E+00	-2,91E+02	2,63E+03	-3,13E+02	1,06E+04
Min Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	5,58E+03	1,86E+04	0,00E+00	1,60E+03	-1,69E+03	-2,43E+03	6,73E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	1,42E+04	1,31E+04	0,00E+00	2,33E+03	7,27E+00	2,52E+03	2,39E+03
Min Maximum Shear Stress	2	chainstay_left	Interlaminar	-4,87E+01	-4,81E+01	0,00E+00	-5,46E-02	1,69E+01	1,28E+00	2,85E-01
Max Maximum Shear Stress	4	down_tube	Interlaminar	6,83E+04	5,56E+02	0,00E+00	-4,05E+02	5,90E+02	-1,19E+03	3,39E+04



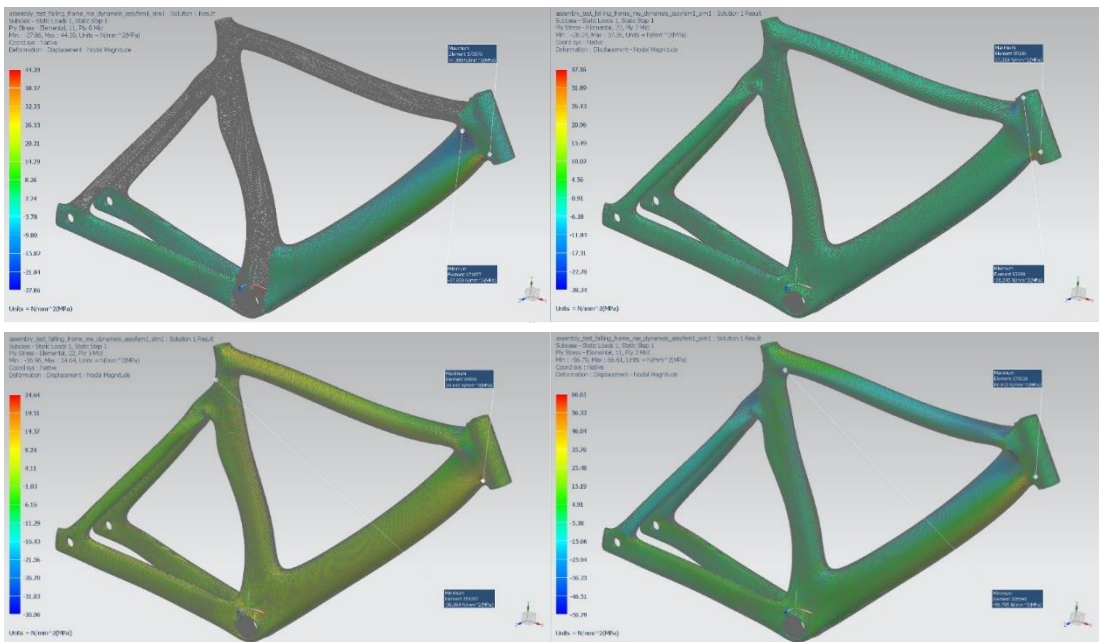
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

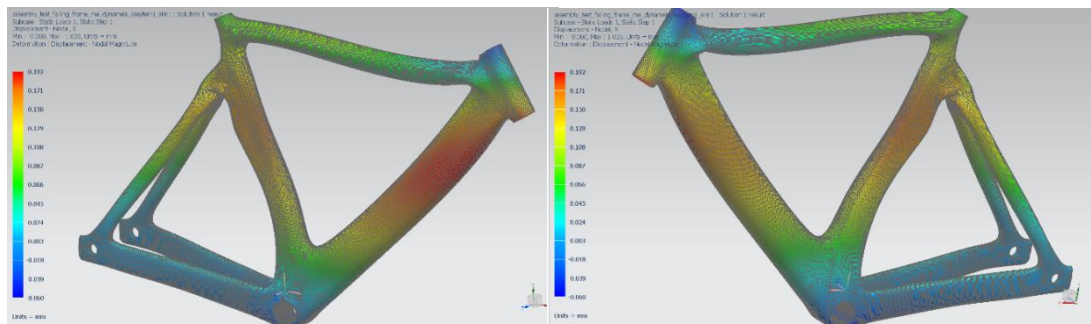


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

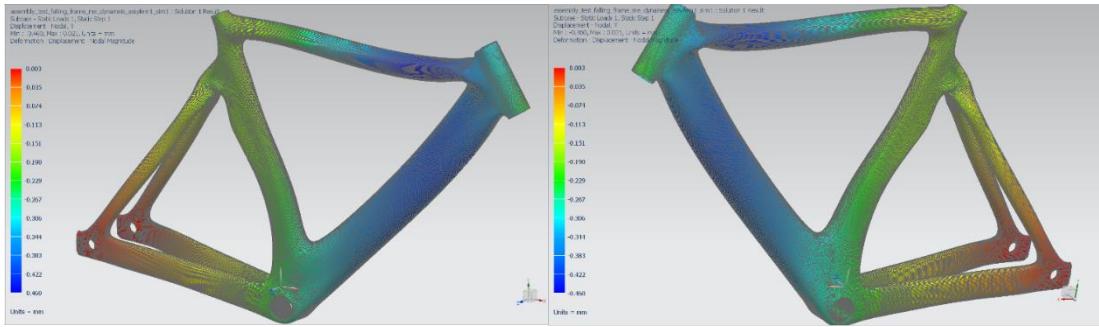
Στο 4^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 74 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 63 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 40.6 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 40 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 81.7 MPa στην ένωση παλουκόσελου και άνω σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 56.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω και εμπρός σωλήνα σημείο 48 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 45 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 4th Scenario

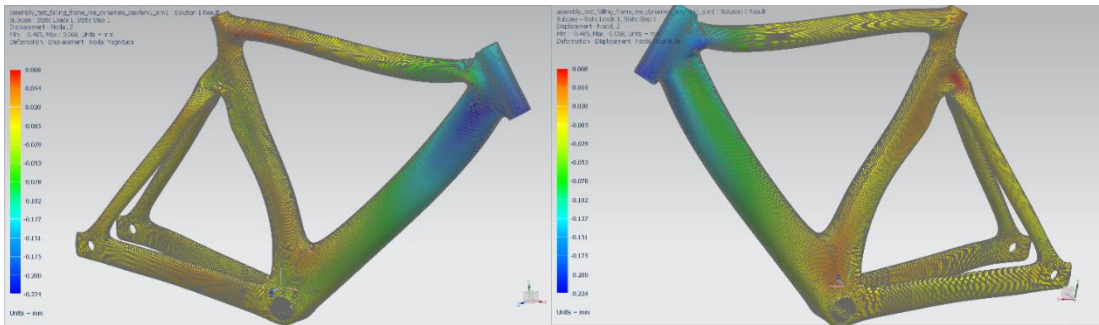
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seatstay_right	Interlaminar	-8,17E+04	1,49E+03	0,00E+00	1,45E+02	2,40E+02	-6,64E+02	4,16E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	7,48E+04	3,37E+03	0,00E+00	-1,27E+02	-1,15E-13	-4,25E-14	3,57E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-8,26E+02	-4,80E+04	0,00E+00	-3,68E+03	2,31E+02	-1,62E+03	2,39E+04
Max Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	1,15E+03	4,06E+04	0,00E+00	1,26E+03	-5,64E+02	5,17E+02	1,98E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-5,72E+02	-1,10E+04	0,00E+00	-1,13E+03	3,92E+02	-4,86E+02	5,32E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-5,72E+02	-1,10E+04	0,00E+00	-1,13E+03	3,92E+02	-4,86E+02	5,32E+03
Min Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	-3,43E+04	-3,81E+04	0,00E+00	-5,72E+03	-2,87E+02	4,53E+01	6,03E+03
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-4,14E+04	-1,71E+03	0,00E+00	7,63E+03	-5,66E-13	0,00E+00	2,13E+04
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-3,86E+02	1,41E+03	0,00E+00	-1,40E+02	-3,96E+03	-1,03E+03	9,07E+02
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	2,36E+03	2,37E+04	0,00E+00	-1,12E+03	2,91E+03	-4,73E+02	1,07E+04
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	1,19E+03	1,87E+04	0,00E+00	-2,55E+03	-4,92E+02	-2,87E+03	9,13E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	1,61E+04	1,48E+04	0,00E+00	3,14E+03	1,19E+01	2,41E+03	3,21E+03
Min Maximum Shear Stress	4	head_tube	Interlaminar	-1,71E+02	-1,70E+02	0,00E+00	3,92E-01	2,29E+00	1,04E+00	6,00E-01
Max Maximum Shear Stress	2	seatstay_right	Interlaminar	-8,17E+04	1,49E+03	0,00E+00	1,45E+02	2,40E+02	-6,64E+02	4,16E+04



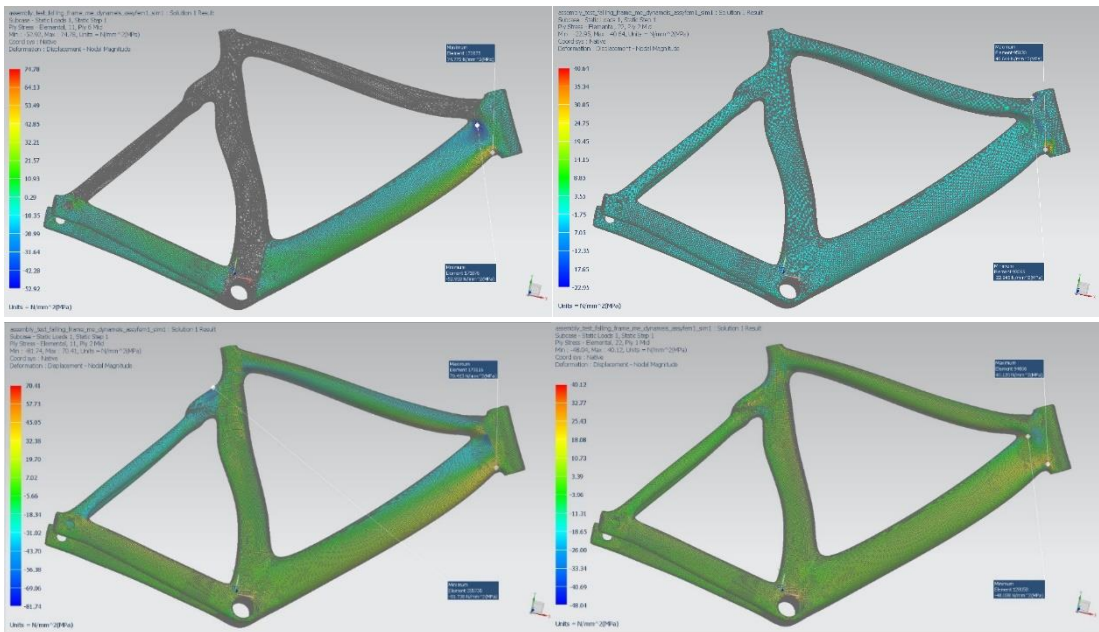
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

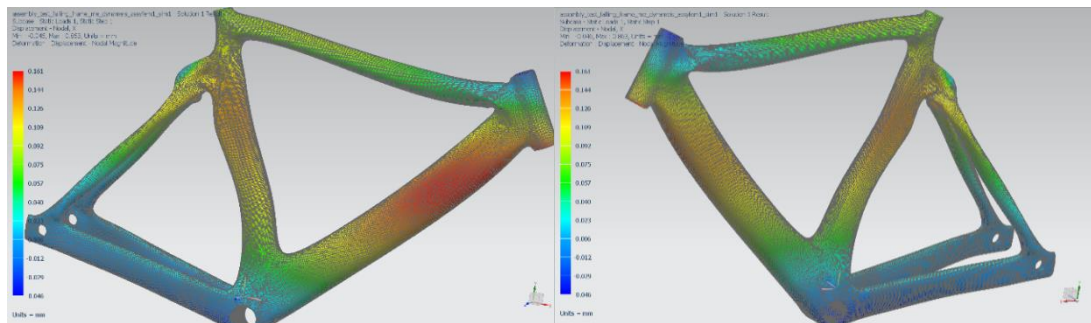


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

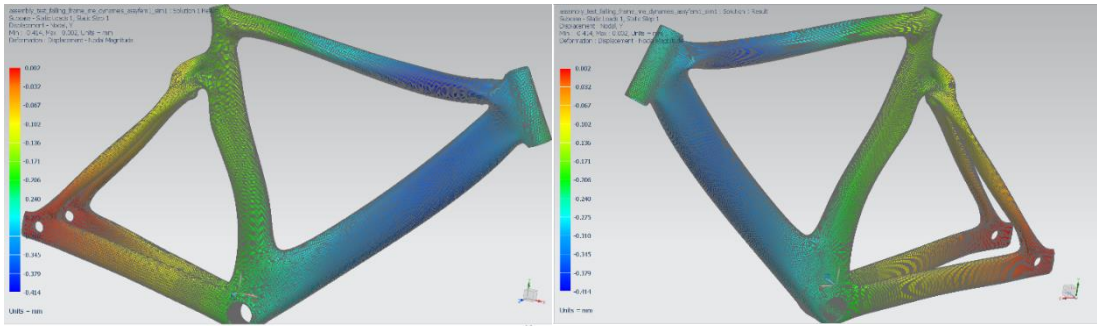
Στο 5^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 91 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 84.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 7.4 MPa στην 3^η στρώση στην ένωση άνω ψαλιδιών με το παλουκόσελο, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 4.6 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 124.6 MPa στην ένωση παλουκόσελου και άνω ψαλιδιών στην 4^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 121 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 10.2 MPa στην 7^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 8.5 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 5th Scenario

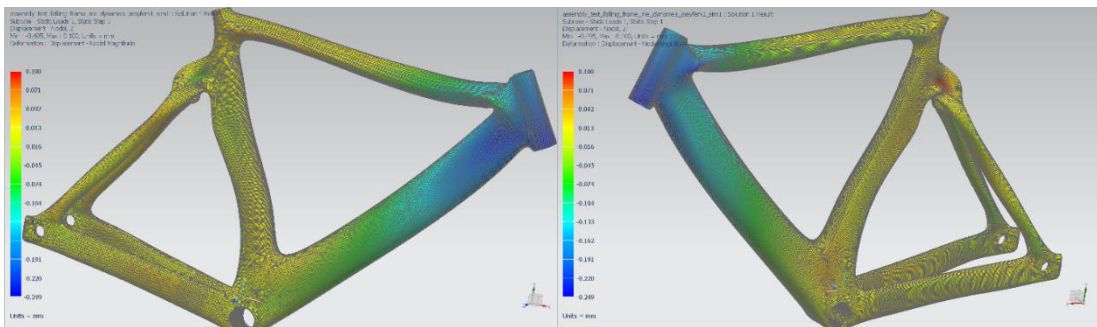
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	-1,25E+05	-1,86E+03	0,00E+00	1,31E+02	4,07E+01	-2,72E+02	6,14E+04
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	9,13E+04	1,49E+03	0,00E+00	1,70E+03	1,40E+03	1,00E+02	4,50E+04
Min Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	3,46E+03	-1,03E+04	0,00E+00	2,35E+03	1,33E-13	-3,48E-13	7,25E+03
Max Stress 22	3	seatstay_right	Interlaminar	-3,60E+04	7,39E+03	0,00E+00	4,40E+03	-8,89E-14	-9,83E-14	2,21E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,26E+04	-1,40E+03	0,00E+00	-1,21E+03	1,62E+02	-2,38E+02	7,08E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,26E+04	-1,40E+03	0,00E+00	-1,21E+03	1,62E+02	-2,38E+02	7,08E+03
Min Stress 12	2	seatstay_right	Interlaminar	-3,35E+04	4,57E+02	0,00E+00	-6,33E+03	6,62E+01	-1,35E+01	1,81E+04
Max Stress 12	1	seatstay_right	Interlaminar	-1,82E+04	-1,18E+03	0,00E+00	6,21E+03	-3,30E+01	-2,15E+02	1,05E+04
Min Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	6,62E+03	1,25E+03	0,00E+00	1,15E+03	-1,28E+04	8,08E+03	2,92E+03
Max Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	5,10E+03	8,05E+02	0,00E+00	-7,46E+02	3,16E+04	-6,55E+03	2,27E+03
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	6,78E+03	2,19E+03	0,00E+00	-1,40E+03	-9,96E+03	-1,30E+04	2,69E+03
Max Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	4,96E+03	6,91E+01	0,00E+00	9,69E+02	1,13E+02	1,16E+04	2,63E+03
Min Maximum Shear Stress	4	head_tube	Interlaminar	-1,52E+01	-1,49E+01	0,00E+00	3,36E-01	-2,59E+00	-3,02E+00	3,67E-01
Max Maximum Shear Stress	4	seat_tube	Interlaminar	-1,25E+05	-1,86E+03	0,00E+00	1,31E+02	4,07E+01	-2,72E+02	6,14E+04



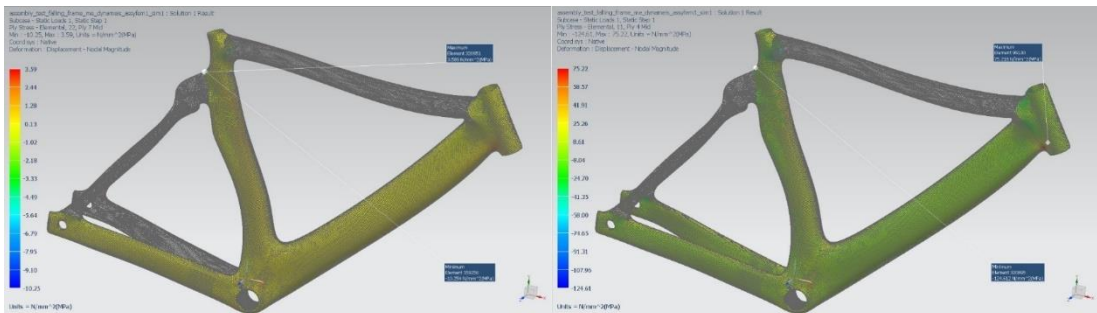
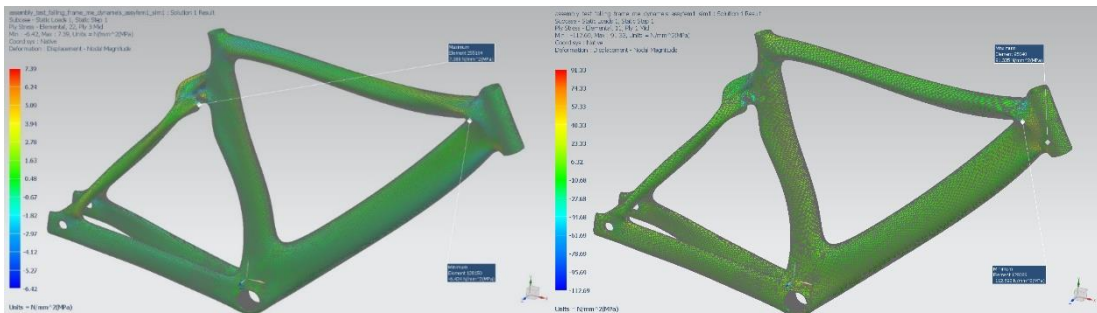
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

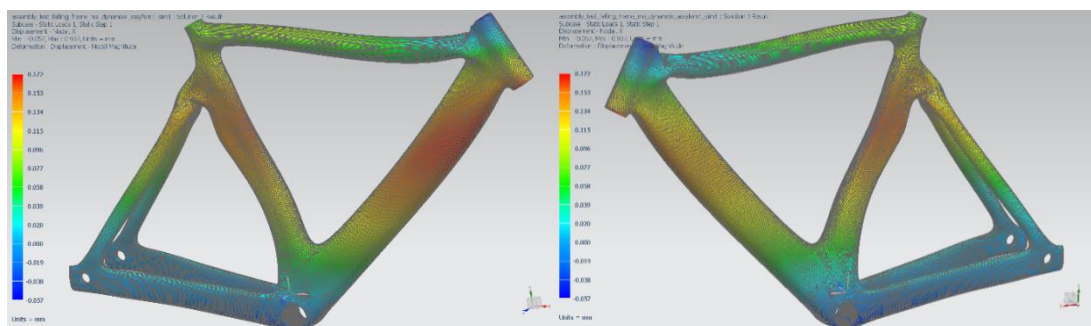


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

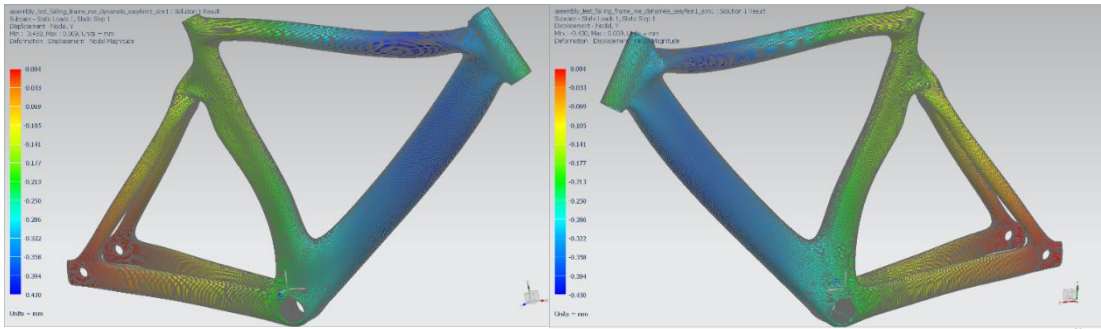
Στο 6^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 93 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 70 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 50.9 MPa στην 2^η στρώση στο ίδιο σημείο, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 50 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 99 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 69 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 49 MPa στην 1^η στρώση στο ίδιο σημείο, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 48 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 6th Scenario

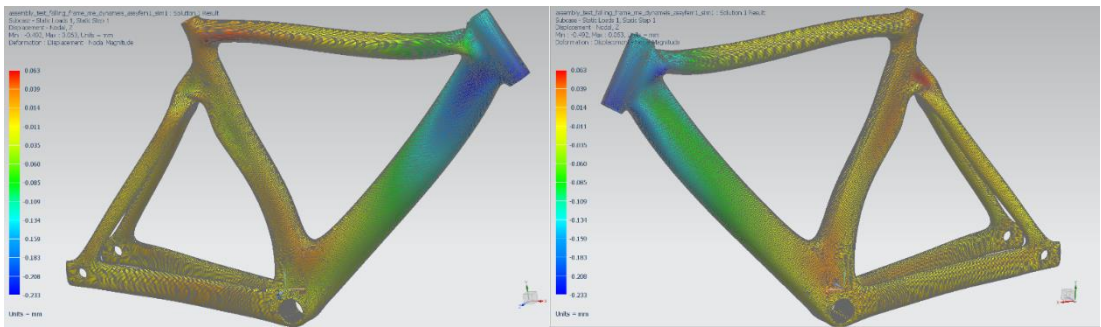
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-9,89E+04	1,26E+03	0,00E+00	-1,17E+03	-2,41E+03	-1,63E+03	5,01E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	9,31E+04	2,48E+03	0,00E+00	-4,27E+02	1,25E-14	0,00E+00	4,53E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-3,01E+03	-4,97E+04	0,00E+00	-3,47E+03	4,86E+02	2,85E+02	2,36E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	5,75E+03	5,09E+04	0,00E+00	2,23E+03	5,74E+00	-4,29E+02	2,27E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,39E+03	-1,62E+04	0,00E+00	-1,73E+03	3,45E+02	-5,70E+02	1,04E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,39E+03	-1,62E+04	0,00E+00	-1,73E+03	3,45E+02	-5,70E+02	1,04E+04
Min Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	-3,99E+04	-4,34E+04	0,00E+00	-5,30E+03	-5,31E+01	-7,52E+01	5,59E+03
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-5,22E+04	-6,18E+02	0,00E+00	5,88E+03	-2,93E-13	0,00E+00	2,64E+04
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	1,74E+04	-5,26E+03	0,00E+00	4,73E+02	-1,27E+04	8,27E+03	1,13E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-1,09E+03	1,51E+04	0,00E+00	3,89E+02	3,49E+04	-1,13E+04	8,11E+03
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-1,47E+03	1,63E+04	0,00E+00	4,93E+02	-3,79E+02	-1,27E+04	8,91E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-7,49E+02	1,43E+04	0,00E+00	4,29E+02	-8,42E+01	1,00E+04	7,54E+03
Min Maximum Shear Stress	8	chainstay_right	Interlaminar	-2,79E+01	-2,80E+01	0,00E+00	3,04E-01	3,26E-15	7,07E-17	3,13E-01
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	-9,89E+04	1,26E+03	0,00E+00	-1,17E+03	-2,41E+03	-1,63E+03	5,01E+04



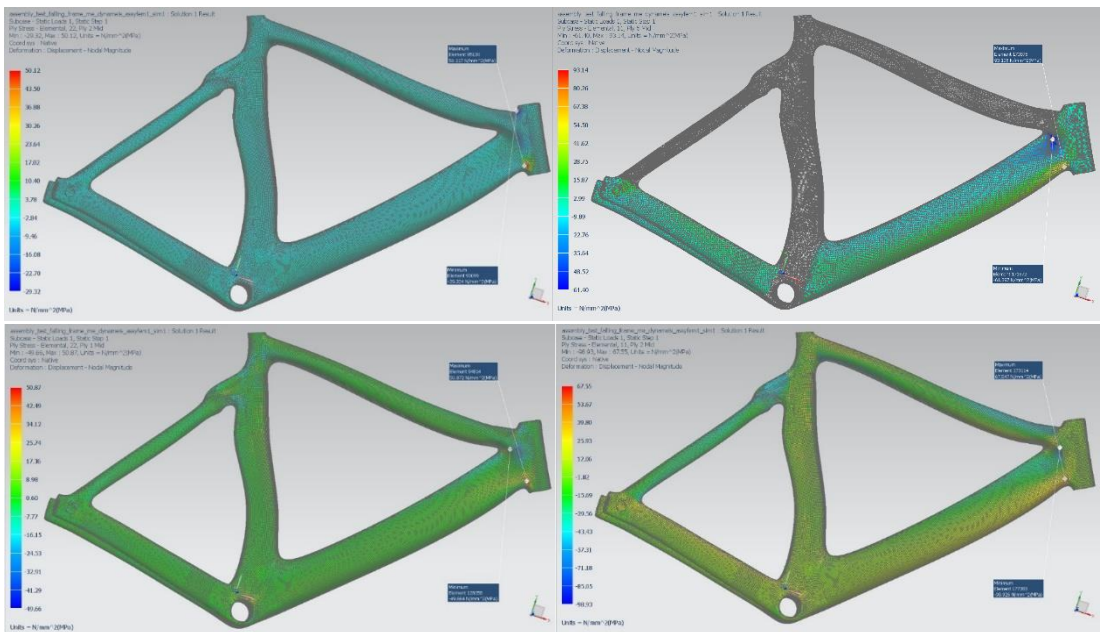
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

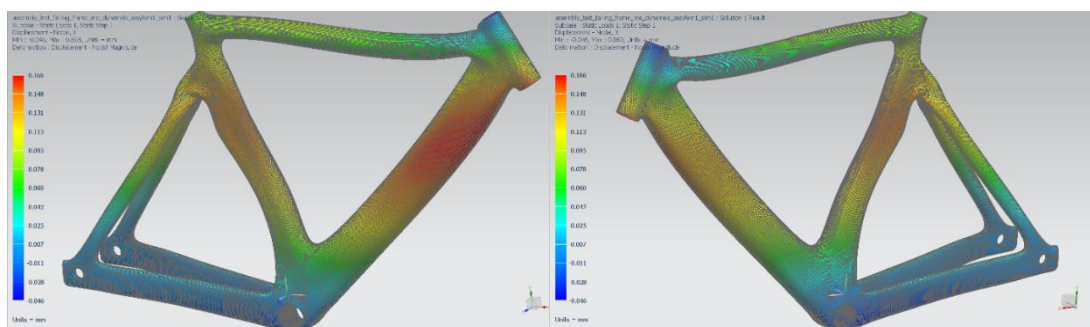


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

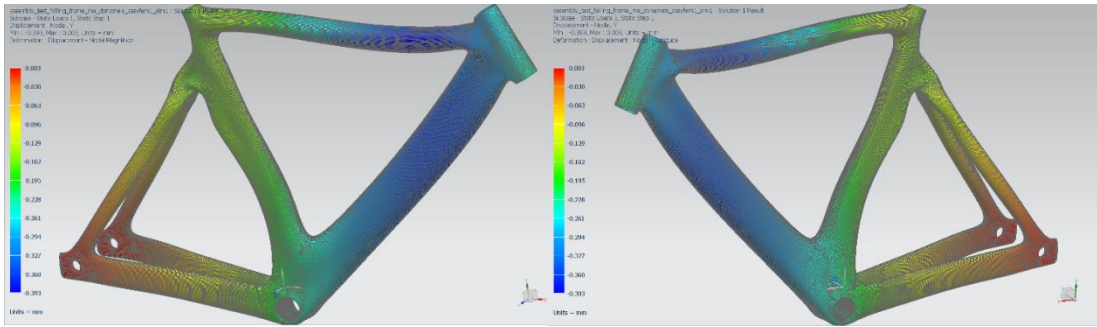
Στο 7^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 81 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 73 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 39 MPa στην 5^η στρώση στην ένωση άνω ψαλιδιών με τον σωλήνα σέλλας, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 38 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 88 MPa στην ένωση του σωλήνα σέλλας και άνω ψαλιδιών στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 69 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 46.4 MPa στην 3^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 44 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

•7th Scenario

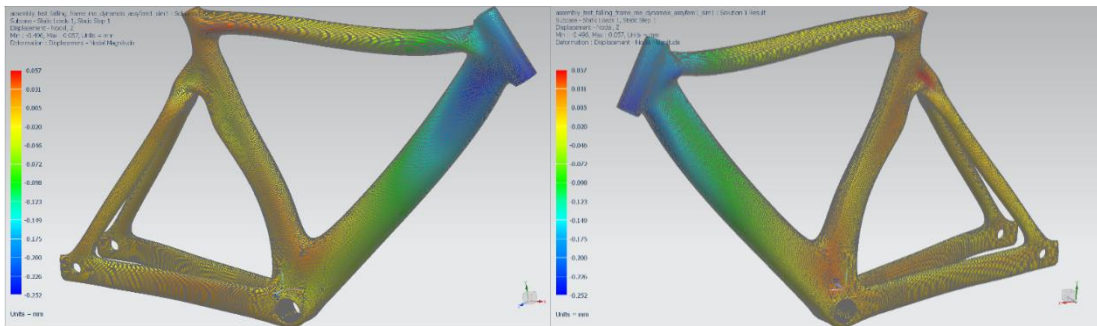
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seatstay_right	Interlaminar	-8,82E+04	1,11E+03	0,00E+00	9,15E+01	1,14E+02	-1,02E+03	4,47E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	8,11E+04	1,69E+03	0,00E+00	-2,95E+02	6,35E-15	0,00E+00	3,97E+04
Min Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-1,31E+04	-4,64E+04	0,00E+00	-4,30E+03	-4,21E+01	-5,07E+02	1,72E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-2,62E+02	3,98E+04	0,00E+00	1,36E+03	1,04E+03	-7,24E+02	2,01E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,55E+03	-1,44E+04	0,00E+00	-1,31E+03	1,72E+02	-4,02E+02	9,57E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,55E+03	-1,44E+04	0,00E+00	-1,31E+03	1,72E+02	-4,02E+02	9,57E+03
Min Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	-3,86E+04	-4,23E+04	0,00E+00	-5,15E+03	-5,03E+01	-5,39E+01	5,46E+03
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-5,09E+04	-5,40E+02	0,00E+00	5,80E+03	-2,82E-13	0,00E+00	2,58E+04
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-2,32E+03	2,32E+04	0,00E+00	2,48E+02	-1,32E+04	-8,97E+03	1,27E+04
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	3,04E+03	6,68E+03	0,00E+00	-7,30E+02	3,26E+04	-8,33E+03	1,96E+03
Min Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	2,96E+03	7,56E+03	0,00E+00	-7,82E+02	-1,20E+03	-1,17E+04	2,43E+03
Max Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	-6,89E+03	1,64E+04	0,00E+00	5,75E+02	-5,06E+03	8,51E+03	1,17E+04
Min Maximum Shear Stress	6	chainstay_left	Interlaminar	-1,18E+02	-1,17E+02	0,00E+00	4,20E-01	1,87E-16	0,00E+00	4,22E-01
Max Maximum Shear Stress	2	seatstay_right	Interlaminar	-8,82E+04	1,11E+03	0,00E+00	9,15E+01	1,14E+02	-1,02E+03	4,47E+04



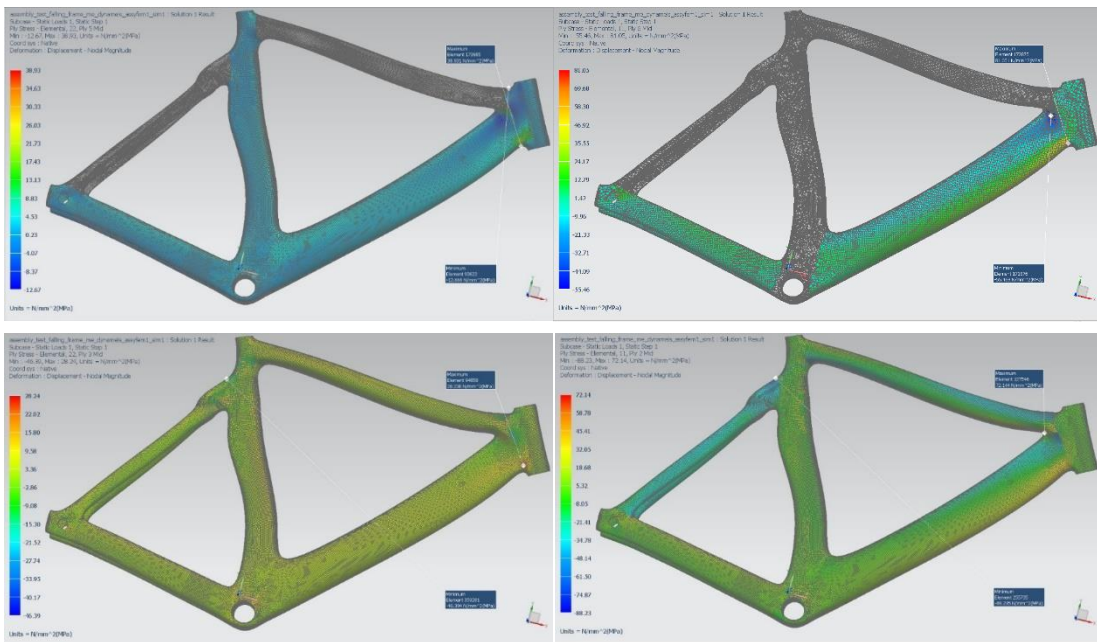
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

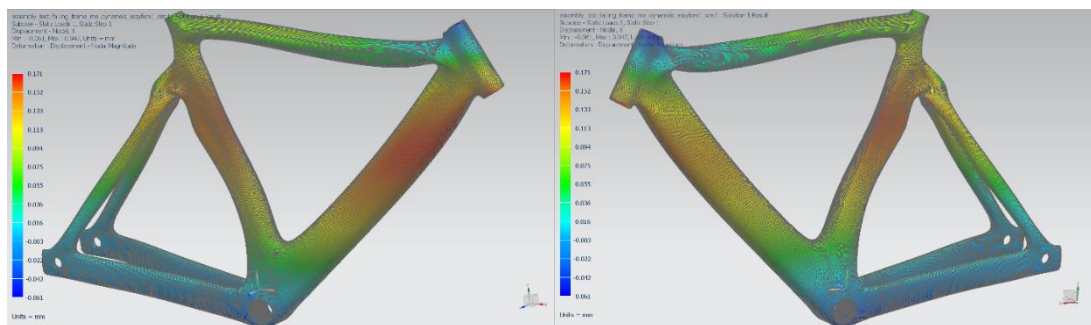


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

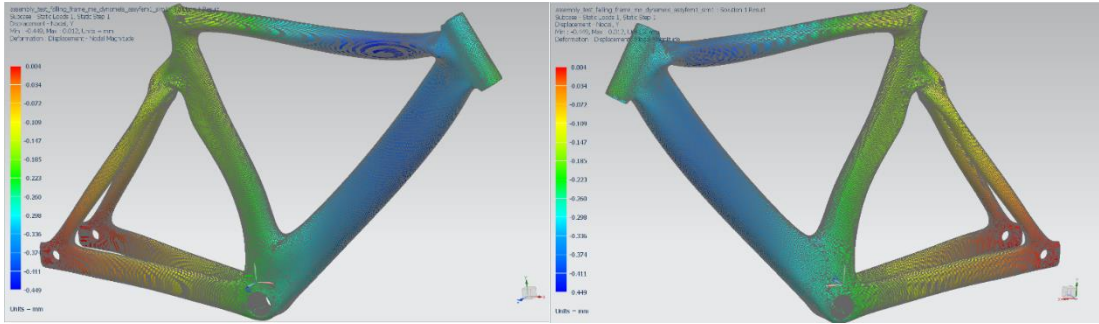
Στο 8^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 93.8 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 70 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 51.4 MPa στην 1^η στρώση στο ίδιο σημείο, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 50.5 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 102 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 69 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 57 MPa στην 3^η στρώση στην ένωση άνω ψαλιδιών με το σωλήνα σέλλας, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 51 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

• 8th Scenario

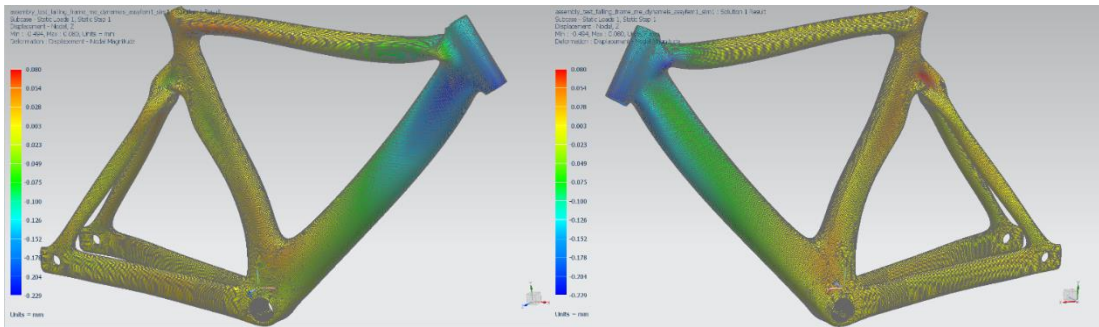
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-1,02E+05	1,28E+03	0,00E+00	-1,10E+03	-2,26E+03	-1,70E+03	5,18E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	9,38E+04	2,50E+03	0,00E+00	-4,25E+02	1,28E-14	0,00E+00	4,57E+04
Min Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-1,81E+04	-5,72E+04	0,00E+00	-4,95E+03	-3,04E+02	-2,59E+02	2,02E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	5,81E+03	5,14E+04	0,00E+00	2,25E+03	6,47E+00	-4,35E+02	2,29E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	5,11E+03	-1,71E+04	0,00E+00	-1,70E+03	3,25E+02	-5,68E+02	1,13E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	5,11E+03	-1,71E+04	0,00E+00	-1,70E+03	3,25E+02	-5,68E+02	1,13E+04
Min Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	-4,43E+04	-4,79E+04	0,00E+00	-5,90E+03	-5,18E+01	-1,22E+02	6,17E+03
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-5,76E+04	-8,22E+02	0,00E+00	6,31E+03	-3,36E-13	0,00E+00	2,91E+04
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	1,76E+04	-5,28E+03	0,00E+00	4,68E+02	-1,27E+04	8,33E+03	1,14E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-1,23E+03	1,52E+04	0,00E+00	3,86E+02	3,51E+04	-1,17E+04	8,23E+03
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-1,61E+03	1,64E+04	0,00E+00	4,93E+02	-4,09E+02	-1,28E+04	9,03E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-8,75E+02	1,44E+04	0,00E+00	4,27E+02	-5,92E+01	1,02E+04	7,65E+03
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_left	Interlaminar	1,02E+01	9,67E+00	0,00E+00	-2,72E-01	4,36E-01	-5,59E+00	3,89E-01
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	-1,02E+05	1,28E+03	0,00E+00	-1,10E+03	-2,26E+03	-1,70E+03	5,18E+04



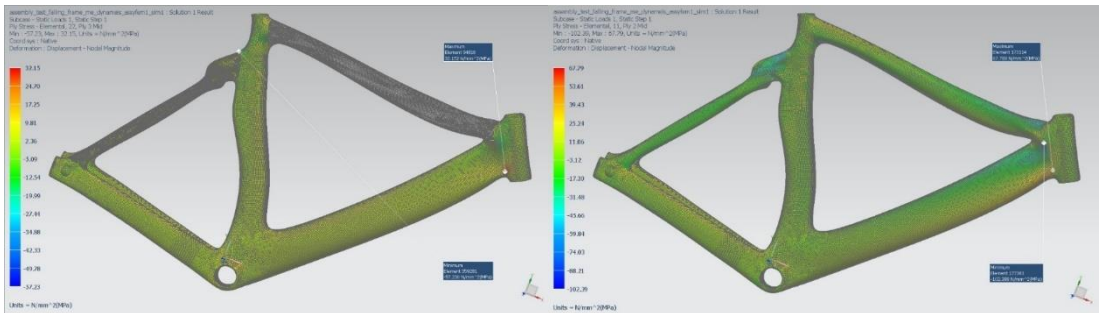
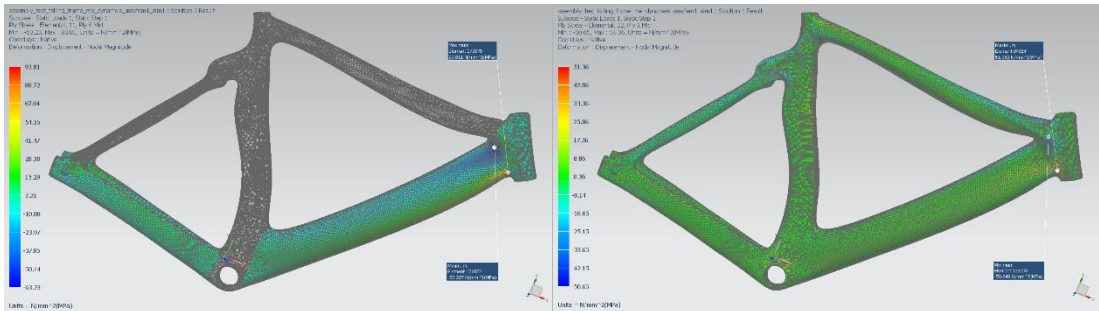
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

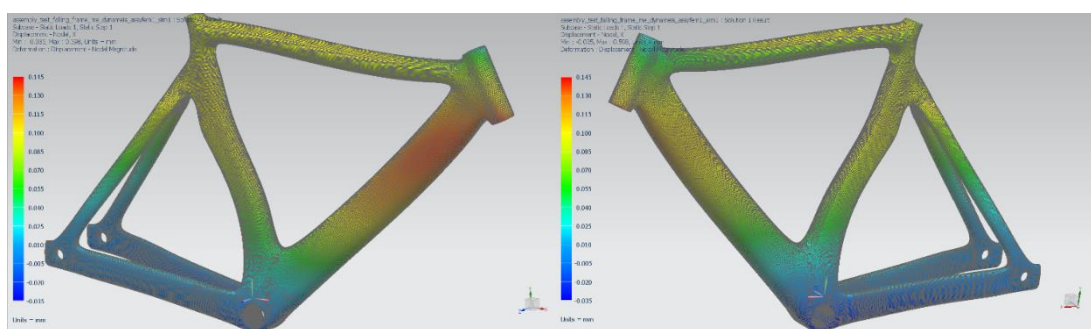


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

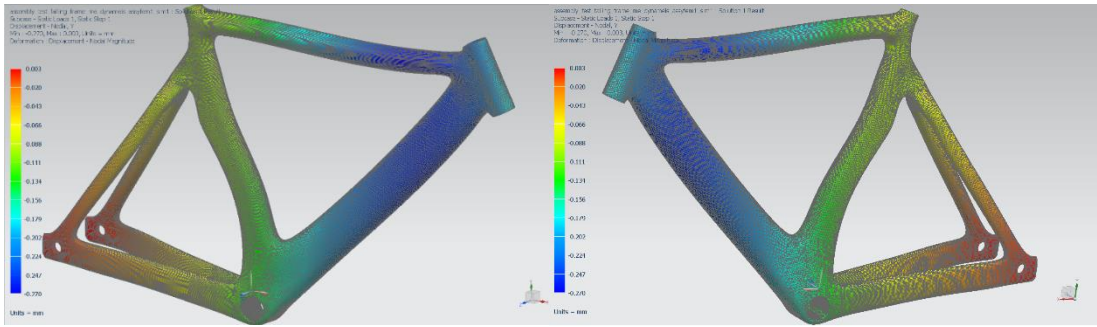
Στο 9^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 8^η στρώση τα 55.2 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 46 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 26 MPa στην 7^η στρώση στο ίδιο σημείο, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 25.5 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 42 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 38 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω ψαλιδιών με τον σωλήνα σέλλας 23.6 MPa στην 8^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 21 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 9th Scenario

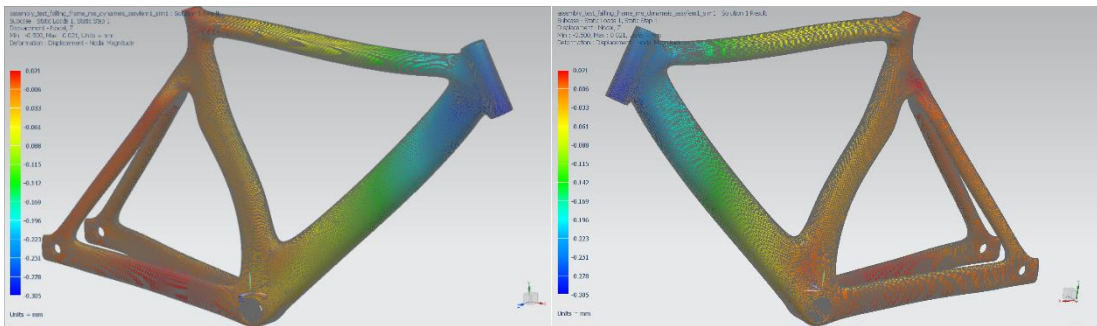
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-4,20E+04	8,91E+02	0,00E+00	-9,84E+02	-3,22E+02	-7,17E+02	2,15E+04
Max Stress 11	8	down_tube	Interlaminar	5,52E+04	1,32E+03	0,00E+00	-5,88E+02	1,39E-13	-1,34E-13	2,70E+04
Min Stress 22	8	seat_tube	Interlaminar	-3,63E+03	-2,37E+04	0,00E+00	-2,28E+03	-1,96E+01	7,88E+01	1,03E+04
Max Stress 22	7	down_tube	Interlaminar	7,48E+03	2,59E+04	0,00E+00	-1,03E+02	-2,35E+01	6,01E+02	9,22E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,38E+03	-1,07E+04	0,00E+00	-8,52E+02	1,41E+01	-2,25E+02	6,57E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,38E+03	-1,07E+04	0,00E+00	-8,52E+02	1,41E+01	-2,25E+02	6,57E+03
Min Stress 12	5	top_tube	Interlaminar	-1,32E+04	-3,93E+03	0,00E+00	-2,63E+03	-1,01E+02	-1,65E+02	5,32E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-6,65E+03	3,24E+03	0,00E+00	2,40E+03	-2,56E+02	-2,11E+02	5,50E+03
Min Stress 23	6	head_tube	Interlaminar	-2,21E+02	9,58E+03	0,00E+00	-3,58E+01	-1,39E+04	-4,61E+03	4,90E+03
Max Stress 23	6	head_tube	Interlaminar	2,30E+03	3,33E+03	0,00E+00	-3,81E+02	1,93E+04	-4,83E+03	6,40E+02
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-1,01E+03	1,74E+03	0,00E+00	2,37E+01	-5,99E+02	-1,29E+04	1,38E+03
Max Stress 31	4	down_tube	Interlaminar	-1,68E+04	1,58E+03	0,00E+00	-2,52E+02	-1,60E+03	1,25E+04	9,22E+03
Min Maximum Shear Stress	11	head_tube	Interlaminar	-1,33E+02	-1,33E+02	0,00E+00	1,38E-01	7,20E+00	2,56E+00	1,49E-01
Max Maximum Shear Stress	8	down_tube	Interlaminar	5,52E+04	1,32E+03	0,00E+00	-5,88E+02	1,39E-13	-1,34E-13	2,70E+04



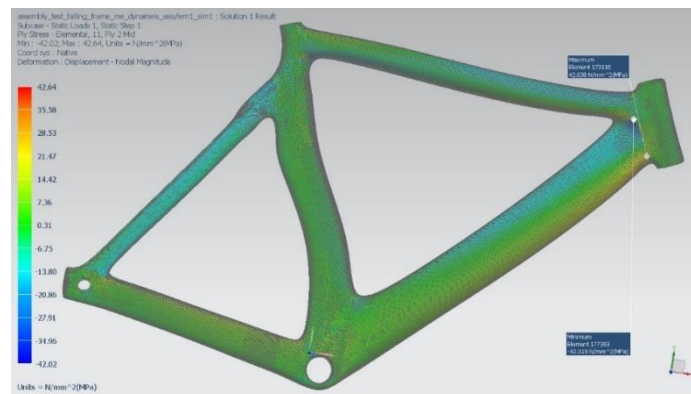
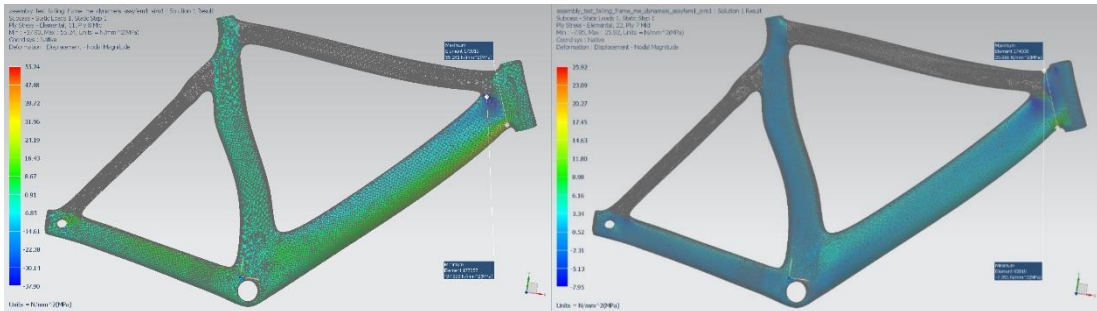
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

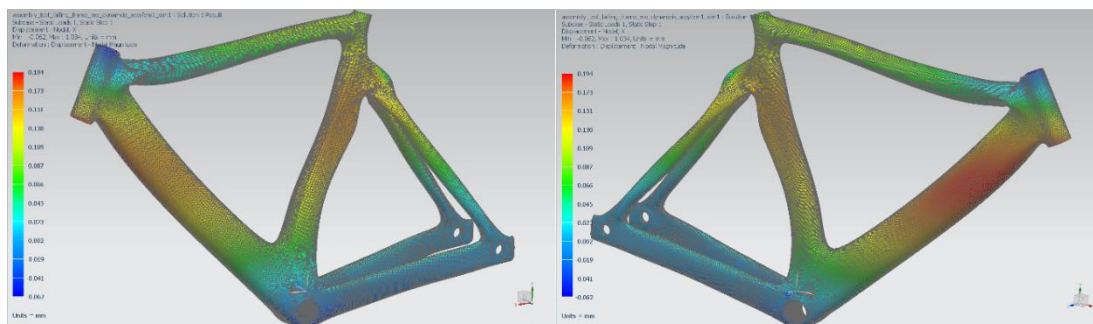


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

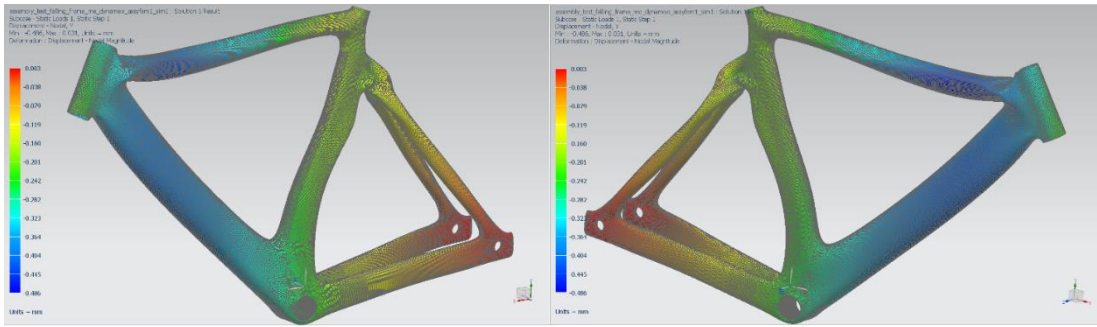
Στο 10^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 89.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 79 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 9.2 MPa στην 3^η στρώση στην ένωση άνω ψαλιδιών με το σωλήνα σέλλας, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 6.8 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 108 MPa στην ένωση σωλήνα σέλλας και άνω ψαλιδιών στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 106.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 15 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 12.5 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 10th Scenario

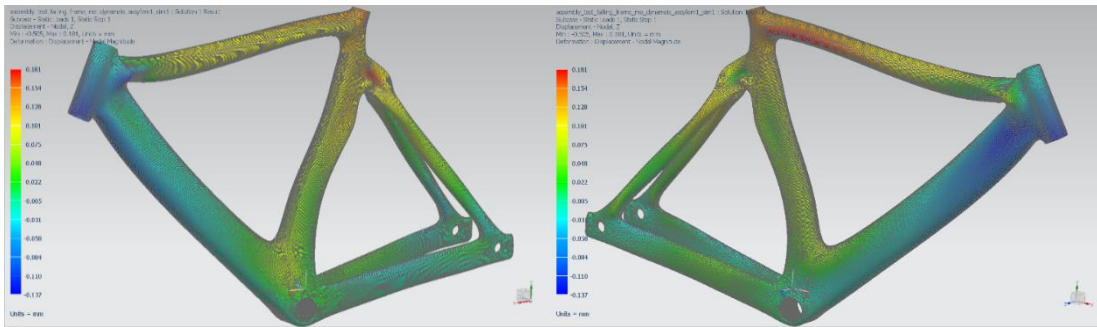
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	-1,08E+05	-2,16E+03	0,00E+00	-5,74E+03	-5,58E+02	-1,11E+03	5,32E+04
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	8,94E+04	2,91E+03	0,00E+00	2,41E+03	-2,05E+02	1,21E+02	4,33E+04
Min Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	3,54E+03	-1,50E+04	0,00E+00	3,57E+03	4,23E-14	-1,40E-14	9,94E+03
Max Stress 22	3	seatstay_right	Interlaminar	-3,70E+04	9,24E+03	0,00E+00	3,14E+03	0,00E+00	0,00E+00	2,34E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,57E+03	-1,80E+03	0,00E+00	-1,08E+03	2,74E+02	-3,04E+02	2,00E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,57E+03	-1,80E+03	0,00E+00	-1,08E+03	2,74E+02	-3,04E+02	2,00E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	1,38E+04	5,04E+02	0,00E+00	-7,76E+03	5,84E+01	-2,77E+02	1,02E+04
Max Stress 12	7	seat_tube	Interlaminar	-3,92E+04	-3,42E+03	0,00E+00	7,87E+03	-9,23E-13	1,15E-13	1,96E+04
Min Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-1,94E+03	3,26E+02	0,00E+00	-7,43E+01	-4,38E+03	-1,14E+03	1,14E+03
Max Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	1,55E+03	3,50E+03	0,00E+00	-7,14E+02	3,26E+03	-5,94E+02	1,21E+03
Min Stress 31	2	seatstay_right	Interlaminar	-4,53E+04	-1,21E+01	0,00E+00	-1,49E+03	-5,05E+02	-3,46E+03	2,27E+04
Max Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-1,32E+04	-1,38E+03	0,00E+00	-2,37E+02	4,00E+02	3,17E+03	5,94E+03
Min Maximum Shear Stress	4	head_tube	Interlaminar	-1,90E+01	-1,91E+01	0,00E+00	-3,79E-02	-1,21E+00	3,06E+00	5,94E-02
Max Maximum Shear Stress	1	top_tube	Interlaminar	-1,08E+05	-2,16E+03	0,00E+00	-5,74E+03	-5,58E+02	-1,11E+03	5,32E+04



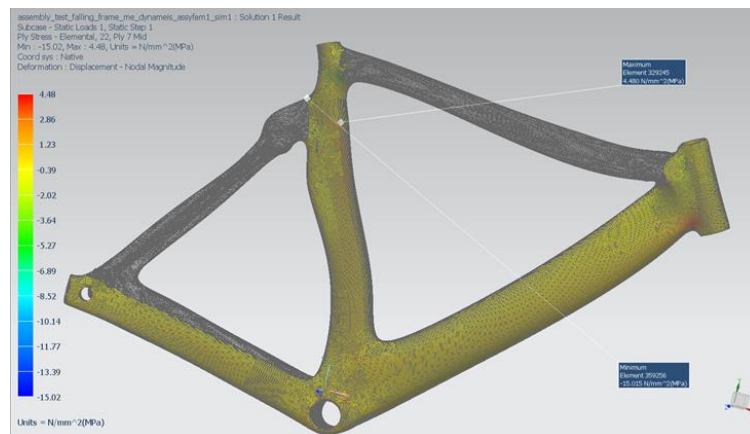
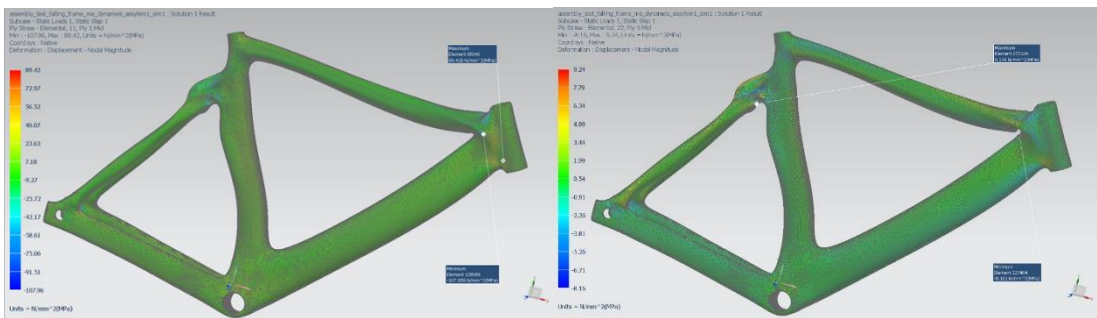
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Horizontal Forces Test

Κατά την πειραματική διαδικασία του Horizontal Forces, όσον αφορά στις παραμορφώσεις του σκελετού λόγω εφαρμογής τάσεων, για την πρώτη περίπτωση παρατηρήθηκε εφελκυσμός κυρίως στον κάτω σωλήνα και τον εμπρός στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στα πίσω ψαλίδια στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στο δεξί κάτω ψαλίδι, στην ένωση των ψαλιδιών με το σωλήνα της σέλλας και στην ένωση κάτω σωλήνα με εμπρός, καθώς και στο κάτω κέντρο του σκελετού στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 0.3 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στα πίσω ψαλίδια και στη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον άνω σωλήνα και στον κάτω στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον κάτω σωλήνα, στη μέση και στο αριστερό κάτω ψαλίδι κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 0.25 χιλιοστά. Για τη δεύτερη περίπτωση παρατηρήθηκε εφελκυσμός κυρίως στον κάτω σωλήνα και τον εμπρός στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στα πίσω ψαλίδια και στο σωλήνα σέλλας στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στο δεξί κάτω ψαλίδι, στην ένωση των ψαλιδιών με το σωλήνα σέλλας και στην ένωση κάτω σωλήνα με εμπρός, καθώς και στο κάτω κέντρο, το δεξί κάτω ψαλίδι και στην ένωση κάτω με εμπρός σωλήνα του σκελετού στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 0.3 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στα πίσω ψαλίδια και στη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον άνω σωλήνα και στον κάτω στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον κάτω σωλήνα, στη μέση και στο αριστερό κάτω ψαλίδι κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 0.3 χιλιοστά.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που εμφανίστηκαν σε σημεία και στρώσεις υλικού του σκελετού στο συγκεκριμένο πείραμα για τα σενάρια Quasi (M46J Woven, T300 Woven) και 1-10, κατά τους άξονες X και Y. Οι άξονες αυτοί να σημειωθεί πως έχουν οριστεί με βάση το επίπεδο του κάθε σωλήνα ξεχωριστά (X άξονας/οριζόντια διεύθυνση σωλήνα, Y άξονας/κάθετη διεύθυνση σωλήνα). Στις παρακάτω απεικονίσεις ενδέχεται κάποια από τα κομμάτια του σκελετού να έχουν ένα σκοτεινό γκρι χρώμα, πράγμα το οποίο οφείλεται στην απεικόνιση του υπολογιστικού προγράμματος όταν δεν υπάρχουν πλέον στρώσεις στα συγκεκριμένα κομμάτια σκελετού (π.χ. κανονική απεικόνιση 6^{ης} στρώσης εμπρός σωλήνα, ενώ οι στρώσεις του επάνω σωλήνα περιορίζονται στις 4).

Στο M46J Woven σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 59.5 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 55.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 58.9 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 51 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 28.4 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 26 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 27.4 MPa στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 26 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 28.4 MPa και τις υπόλοιπες να

μη ξεπερνούν τα 25.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 27.4 MPa στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 25.5 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 59.5 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 55.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 58.9 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 51 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- M46J Woven

Top Summary

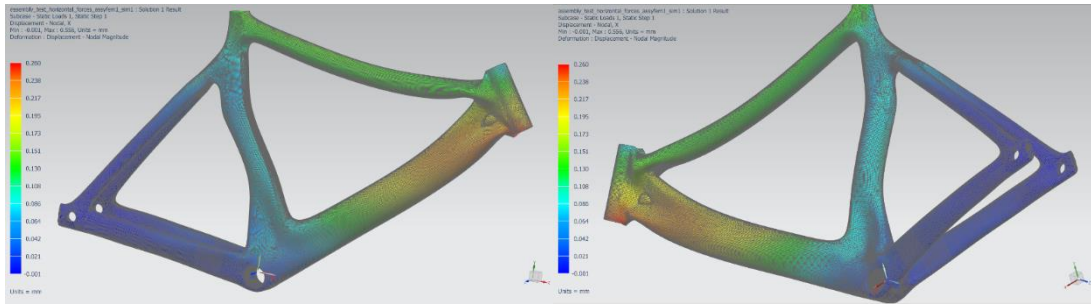
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	1	head_tube	Interlaminar	-5,95E+04	-1,33E+04	0,00E+00	-3,40E+03	-5,93E+02	2,73E+01
Max Stress 11	1	1	head_tube	Interlaminar	5,95E+04	1,33E+04	0,00E+00	3,40E+03	5,93E+02	-2,73E+01
Min Stress 22	2	1	head_tube	Interlaminar	-1,19E+04	-5,89E+04	0,00E+00	-3,34E+03	-2,18E+02	1,81E+02
Max Stress 22	1	1	head_tube	Interlaminar	1,19E+04	5,89E+04	0,00E+00	3,34E+03	2,18E+02	-1,81E+02
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,89E+03	-4,98E+03	0,00E+00	-1,05E+03	3,36E+02	-3,76E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	1,89E+03	4,98E+03	0,00E+00	1,05E+03	3,36E+02	-3,76E+02
Min Stress 12	2	1	head_tube	Interlaminar	-2,68E+04	-4,90E+04	0,00E+00	-4,42E+03	3,08E+02	-2,96E+02
Max Stress 12	1	1	head_tube	Interlaminar	2,68E+04	4,90E+04	0,00E+00	4,42E+03	-3,08E+02	2,96E+02
Min Stress 23	2	2	head_tube	Interlaminar	-4,22E+03	-1,80E+04	0,00E+00	1,18E+03	-1,60E+04	5,68E+03
Max Stress 23	1	2	head_tube	Interlaminar	4,22E+03	1,80E+04	0,00E+00	-1,18E+03	1,60E+04	-5,68E+03
Min Stress 31	1	2	head_tube	Interlaminar	3,10E+03	-2,04E+04	0,00E+00	6,36E+02	7,98E+03	-9,62E+03
Max Stress 31	2	2	head_tube	Interlaminar	-3,10E+03	2,04E+04	0,00E+00	-6,36E+02	-7,98E+03	9,62E+03

Static Loads Case 1

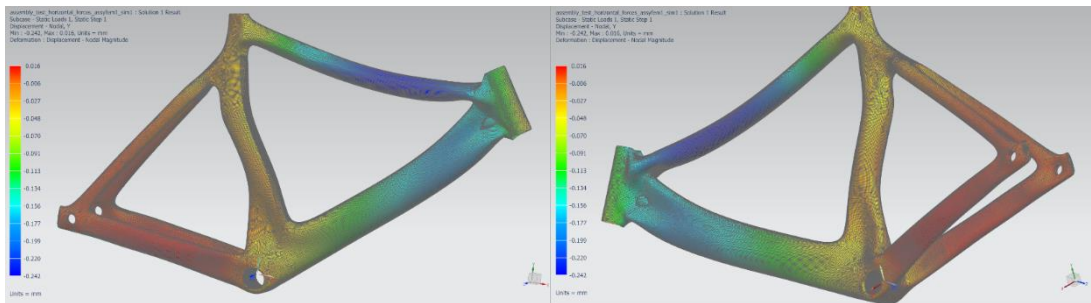
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	down_tube	Interlaminar	-2,84E+04	6,51E+03	0,00E+00	-3,73E+02	0,00E+00	0,00E+00
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	5,95E+04	1,33E+04	0,00E+00	3,40E+03	5,93E+02	-2,73E+01
Min Stress 22	4	top_tube	Interlaminar	1,73E+04	-2,74E+04	0,00E+00	-2,60E+01	0,00E+00	0,00E+00
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	1,19E+04	5,89E+04	0,00E+00	3,34E+03	2,18E+02	-1,81E+02
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,89E+03	-4,98E+03	0,00E+00	-1,05E+03	3,36E+02	-3,76E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,89E+03	4,98E+03	0,00E+00	1,05E+03	3,36E+02	-3,76E+02
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-3,79E+02	-8,39E+02	0,00E+00	-3,51E+03	1,35E+01	1,42E+02
Max Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	2,68E+04	4,90E+04	0,00E+00	4,42E+03	-3,08E+02	2,96E+02
Min Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	4,01E+02	3,20E+04	0,00E+00	1,62E+03	-6,90E+03	-4,91E+03
Max Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	4,22E+03	1,80E+04	0,00E+00	-1,18E+03	1,60E+04	-5,68E+03
Min Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	3,10E+03	-2,04E+04	0,00E+00	6,36E+02	7,98E+03	-9,62E+03
Max Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	3,30E+03	1,80E+04	0,00E+00	-1,07E+03	1,59E+03	4,79E+03

Static Loads Case 2

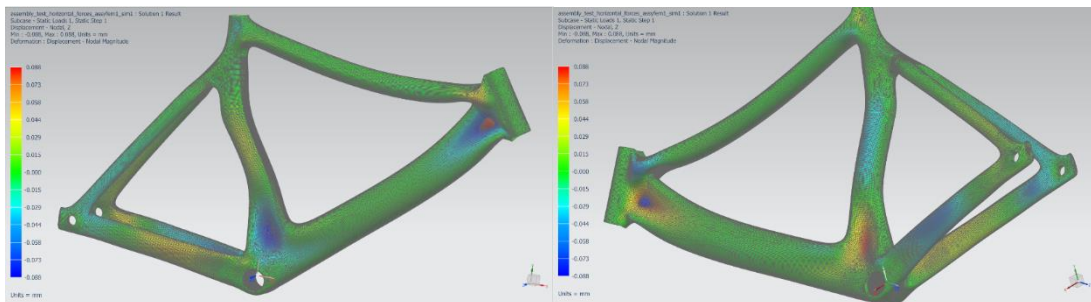
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-5,95E+04	-1,33E+04	0,00E+00	-3,40E+03	-5,93E+02	2,73E+01
Max Stress 11	4	down_tube	Interlaminar	2,84E+04	-6,51E+03	0,00E+00	3,73E+02	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-1,19E+04	-5,89E+04	0,00E+00	-3,34E+03	-2,18E+02	1,81E+02
Max Stress 22	4	top_tube	Interlaminar	-1,73E+04	2,74E+04	0,00E+00	2,60E+01	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,89E+03	4,98E+03	0,00E+00	1,05E+03	-3,36E+02	3,76E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,89E+03	4,98E+03	0,00E+00	1,05E+03	-3,36E+02	3,76E+02
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-2,68E+04	-4,90E+04	0,00E+00	-4,42E+03	3,08E+02	-2,96E+02
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	3,79E+02	8,39E+02	0,00E+00	3,51E+03	-1,35E+01	-1,42E+02
Min Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	-4,22E+03	-1,80E+04	0,00E+00	1,18E+03	-1,60E+04	5,68E+03
Max Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	-4,01E+02	-3,20E+04	0,00E+00	-1,62E+03	6,90E+03	4,91E+03
Min Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	-3,30E+03	-1,80E+04	0,00E+00	1,07E+03	-1,59E+03	-4,79E+03
Max Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	-3,10E+03	2,04E+04	0,00E+00	-6,36E+02	-7,98E+03	9,62E+03



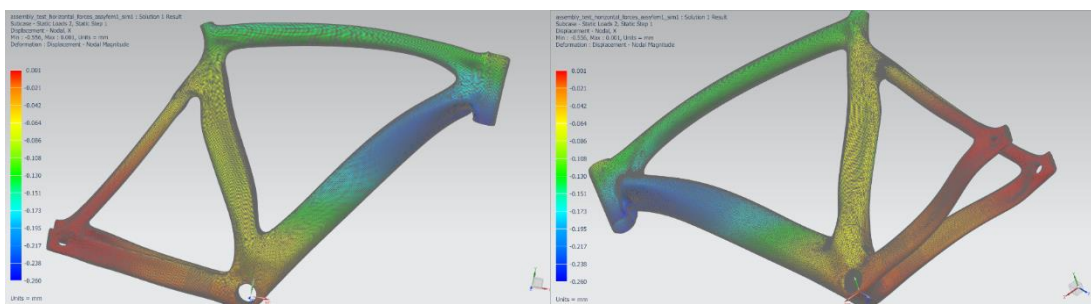
X axis displacement Case 1



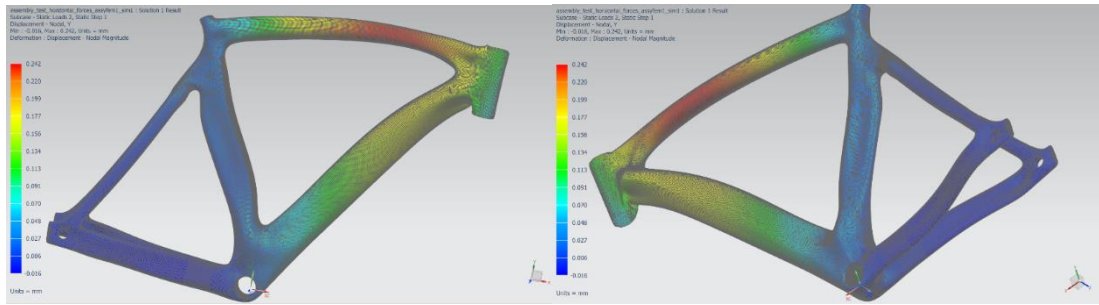
Y axis displacement Case 1



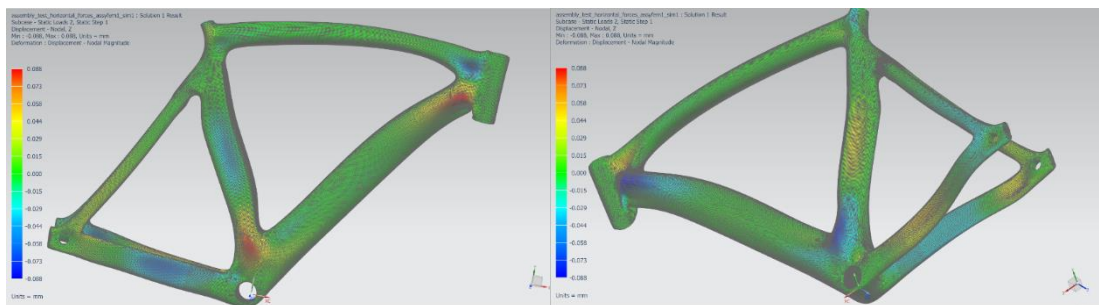
Z axis displacement Case 1



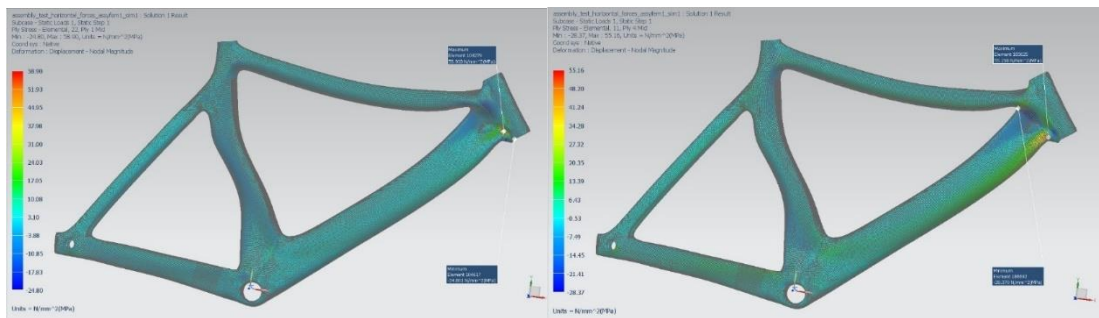
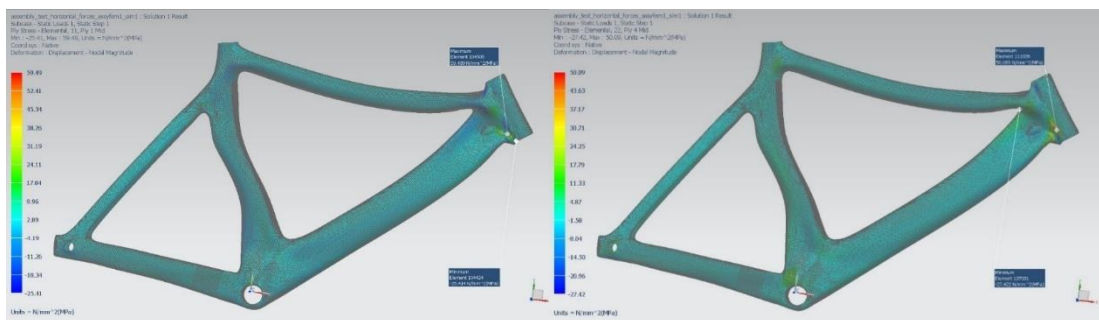
X axis displacement Case 2

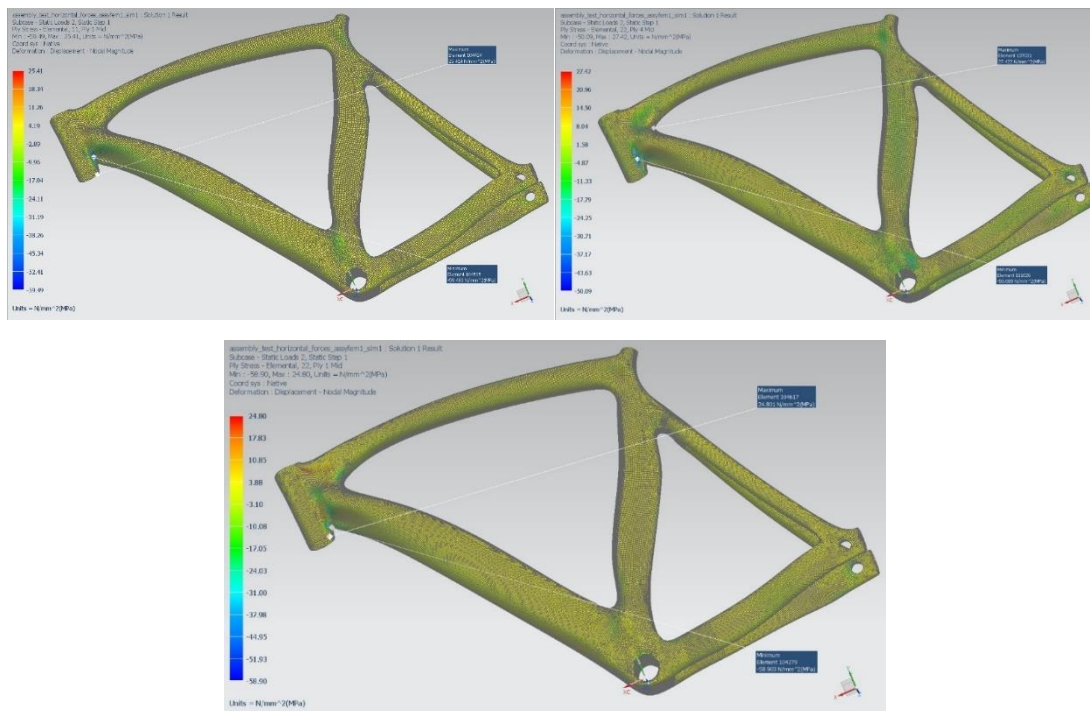


Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2





Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο T300 Woven σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 49.1 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 45 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 46.8 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 40.5 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 20.8 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 4^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 19.1 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 18.8 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 4^η στρώση τα 20.8 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 19.2 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 18.9 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 49.2 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 45 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 46.8 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 39.2 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

• T300 Woven
Top Summary

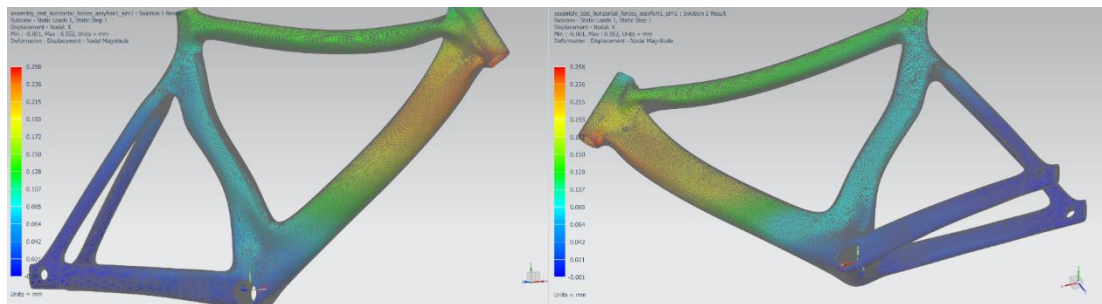
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	1	head_tube	Interlaminar	-4,92E+04	-1,11E+04	0,00E+00	-3,22E+03	5,92E+02	-3,33E+02
Max Stress 11	1	1	head_tube	Interlaminar	4,92E+04	1,11E+04	0,00E+00	3,22E+03	-5,92E+02	3,33E+02
Min Stress 22	2	1	head_tube	Interlaminar	-9,39E+03	-4,68E+04	0,00E+00	-3,10E+03	-3,84E+02	-1,94E+02
Max Stress 22	1	1	head_tube	Interlaminar	9,39E+03	4,68E+04	0,00E+00	3,10E+03	3,84E+02	1,94E+02
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,66E+03	-4,77E+03	0,00E+00	-1,01E+03	4,00E+02	-4,41E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	1,66E+03	4,77E+03	0,00E+00	1,01E+03	-4,00E+02	4,41E+02
Min Stress 12	2	1	head_tube	Interlaminar	-3,67E+04	-2,30E+04	0,00E+00	-4,48E+03	6,17E+02	-1,15E+02
Max Stress 12	1	1	head_tube	Interlaminar	3,67E+04	2,30E+04	0,00E+00	4,48E+03	-6,17E+02	1,15E+02
Min Stress 23	1	2	head_tube	Interlaminar	1,92E+03	2,93E+04	0,00E+00	1,79E+03	-3,29E+03	-9,58E+02
Max Stress 23	2	2	head_tube	Interlaminar	-1,92E+03	-2,93E+04	0,00E+00	-1,79E+03	3,29E+03	9,58E+02
Min Stress 31	1	2	head_tube	Interlaminar	8,09E+03	2,72E+04	0,00E+00	1,93E+03	-2,26E+03	-2,33E+03
Max Stress 31	2	2	head_tube	Interlaminar	-8,09E+03	-2,72E+04	0,00E+00	-1,93E+03	2,26E+03	2,33E+03

Static Loads Case 1:

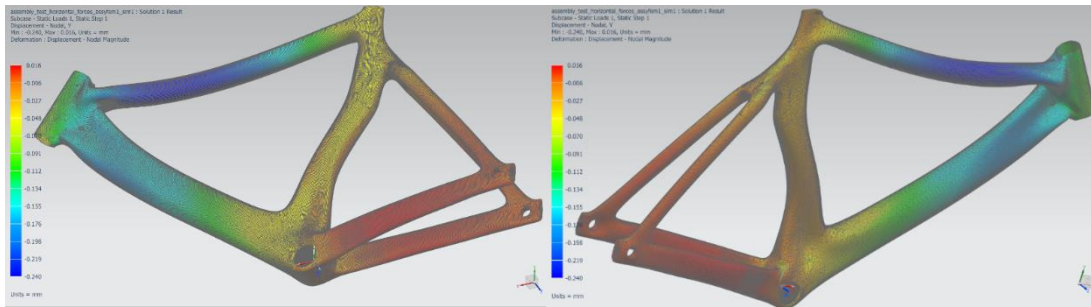
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	down_tube	Interlaminar	-2,08E+04	5,91E+03	0,00E+00	-9,01E+02	-2,12E-14	1,94E-13
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	4,92E+04	1,11E+04	0,00E+00	3,22E+03	-5,92E+02	3,33E+02
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-1,82E+04	-1,91E+04	0,00E+00	-9,31E+02	6,33E+01	3,75E+02
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	9,39E+03	4,68E+04	0,00E+00	3,10E+03	3,84E+02	1,94E+02
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,66E+03	-4,77E+03	0,00E+00	-1,01E+03	4,00E+02	-4,41E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,66E+03	4,77E+03	0,00E+00	1,01E+03	-4,00E+02	4,41E+02
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	5,84E+02	-1,62E+02	0,00E+00	-3,41E+03	-5,06E+01	1,94E+02
Max Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	3,67E+04	2,30E+04	0,00E+00	4,48E+03	-6,17E+02	1,15E+02
Min Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	1,92E+03	2,93E+04	0,00E+00	1,79E+03	-3,29E+03	-9,58E+02
Max Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	-1,92E+03	-2,93E+04	0,00E+00	-1,79E+03	3,29E+03	9,58E+02
Min Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	8,09E+03	2,72E+04	0,00E+00	1,93E+03	-2,26E+03	-2,33E+03
Max Stress 31	2	down_tube	Interlaminar	-4,05E+03	1,37E+04	0,00E+00	-2,49E+02	8,93E+01	1,88E+03

Static Loads Case 2:

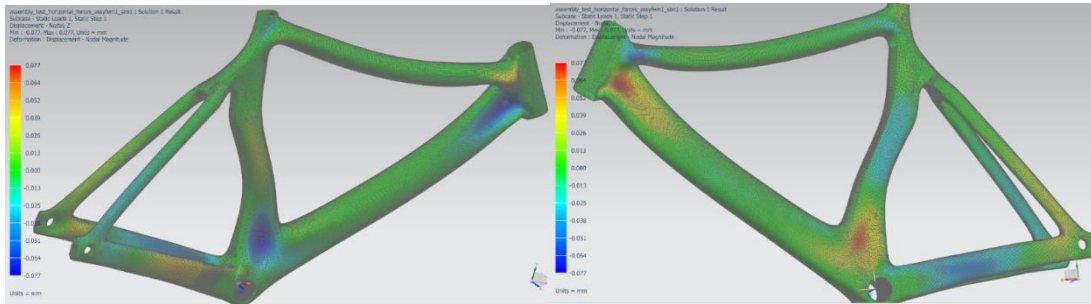
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-4,92E+04	-1,11E+04	0,00E+00	-3,22E+03	5,92E+02	-3,33E+02
Max Stress 11	4	down_tube	Interlaminar	2,08E+04	-5,91E+03	0,00E+00	9,01E+02	2,12E-14	-1,94E-13
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-9,39E+03	-4,68E+04	0,00E+00	-3,10E+03	-3,84E+02	-1,94E+02
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	1,82E+04	1,91E+04	0,00E+00	9,31E+02	-6,33E+01	-3,75E+02
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,66E+03	4,77E+03	0,00E+00	1,01E+03	-4,00E+02	4,41E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,66E+03	-4,77E+03	0,00E+00	-1,01E+03	4,00E+02	-4,41E+02
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-3,67E+04	-2,30E+04	0,00E+00	-4,48E+03	6,17E+02	-1,15E+02
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	5,84E+02	1,62E+02	0,00E+00	3,41E+03	-5,06E+01	-1,94E+02
Min Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	-7,13E+02	-3,37E+04	0,00E+00	1,22E+03	-2,82E+03	5,26E+02
Max Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	7,13E+02	3,37E+04	0,00E+00	-1,22E+03	2,82E+03	-5,26E+02
Min Stress 31	2	down_tube	Interlaminar	4,05E+03	-1,37E+04	0,00E+00	2,49E+02	-8,93E+01	-1,88E+03
Max Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	-8,09E+03	-2,72E+04	0,00E+00	-1,93E+03	2,26E+03	2,33E+03



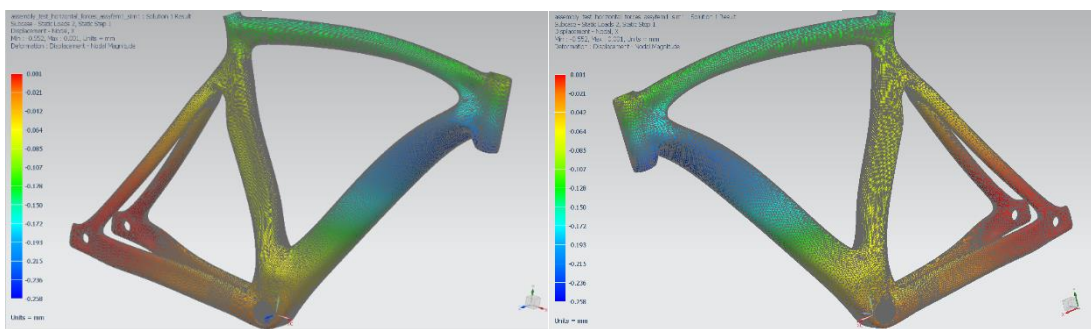
X axis displacement Case 1



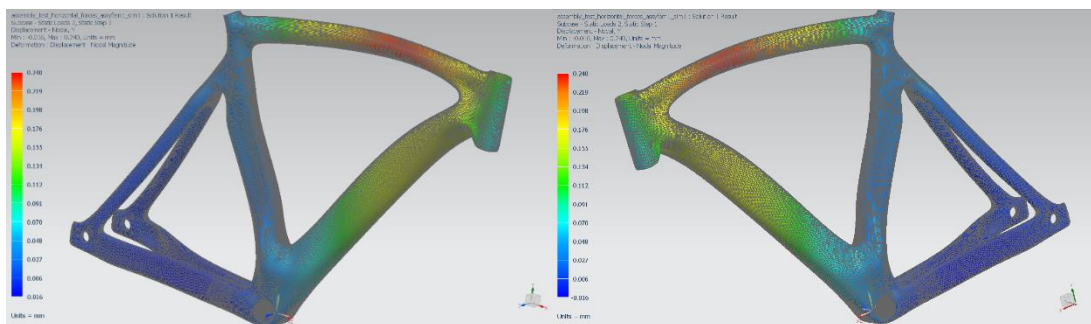
Y axis displacement Case 1



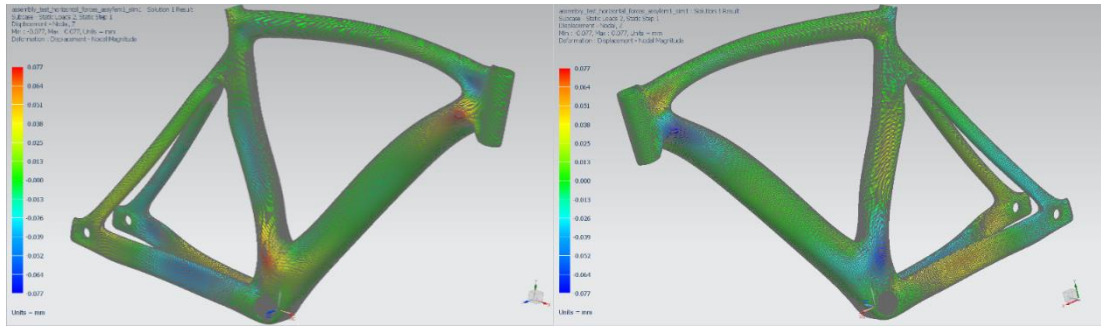
Z axis displacement Case 1



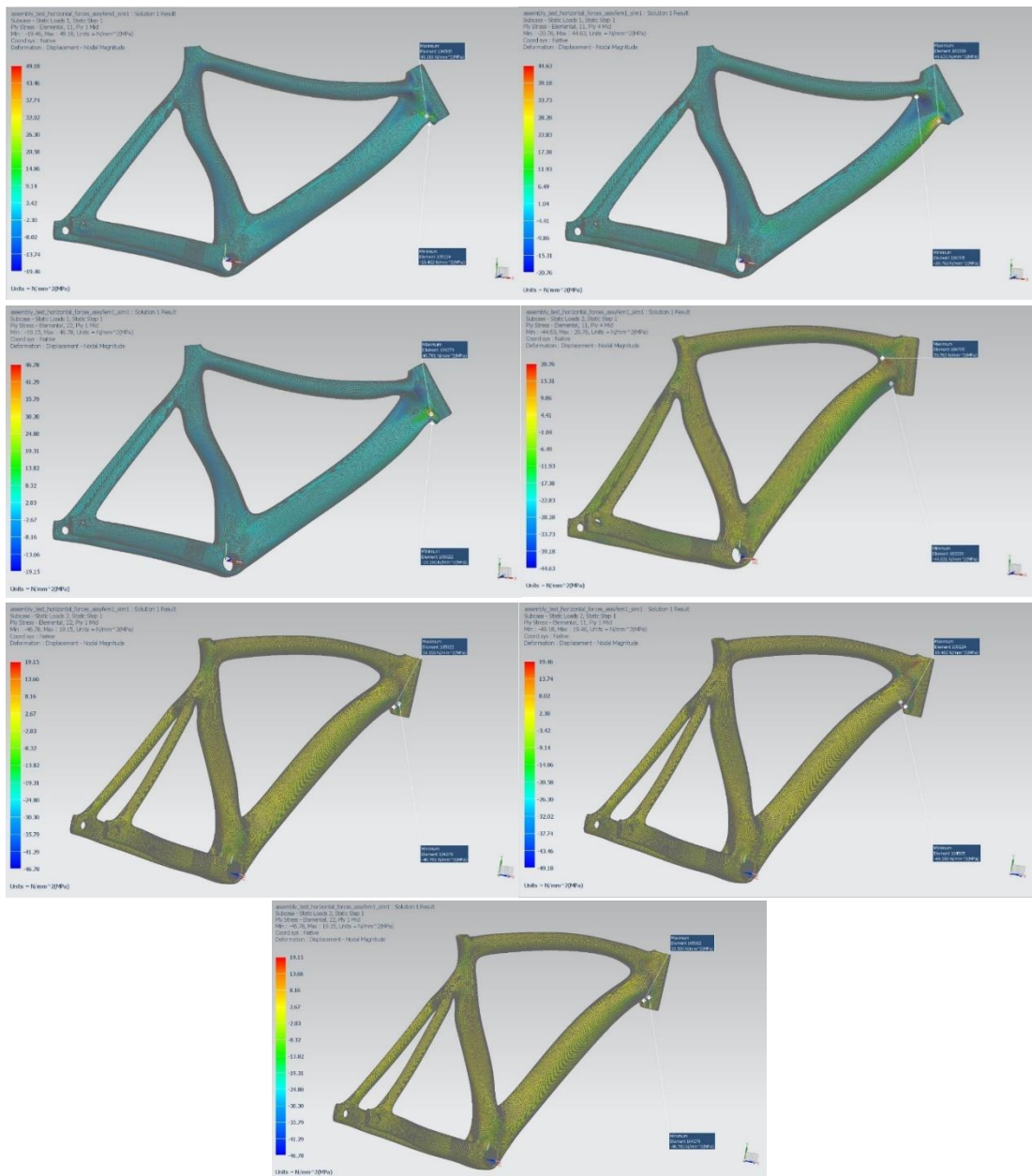
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 1^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 39.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 38 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 38 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 37.8 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 23.2 MPa στην ένωση άνω, κάτω και εμπρός σωλήνα στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 24.4 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 18.3 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 23.2 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 24.4 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 18.3 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 39.4 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 37.8 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 38 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 37.8 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 1st Scenario

Top summary

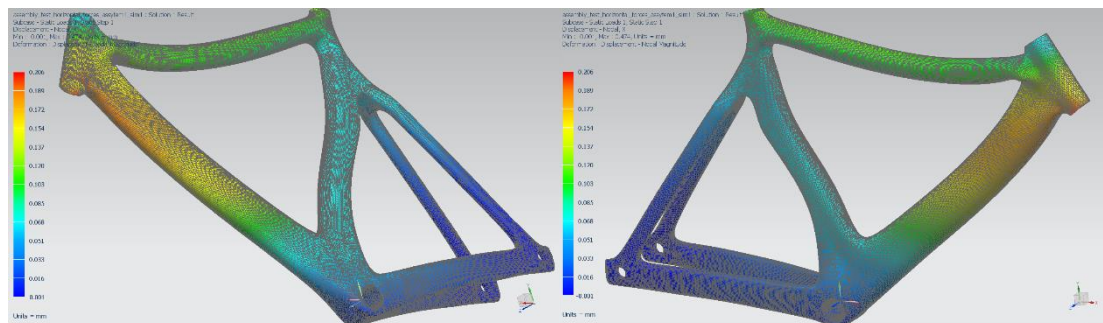
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	1	head_tube	Interlaminar	-3,94E+04	-7,53E+03	0,00E+00	-2,14E+03	3,92E+02	-1,83E+02	1,61E+04
Max Stress 11	1	1	head_tube	Interlaminar	3,94E+04	7,53E+03	0,00E+00	2,14E+03	-3,92E+02	1,83E+02	1,61E+04
Min Stress 22	2	2	head_tube	Interlaminar	-4,53E+01	-3,80E+04	0,00E+00	-7,44E+02	9,70E+02	-2,68E+02	1,90E+04
Max Stress 22	1	2	head_tube	Interlaminar	4,53E+01	3,80E+04	0,00E+00	7,44E+02	-9,70E+02	2,68E+02	1,90E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-4,58E+02	-4,26E+03	0,00E+00	-6,18E+02	2,26E+02	-2,49E+02	2,00E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-4,58E+02	-4,26E+03	0,00E+00	-6,18E+02	2,26E+02	-2,49E+02	2,00E+03
Min Stress 12	2	1	head_tube	Interlaminar	-1,91E+04	-2,97E+04	0,00E+00	-3,57E+03	-7,05E+01	-1,33E+02	6,39E+03
Max Stress 12	1	1	head_tube	Interlaminar	1,91E+04	2,97E+04	0,00E+00	3,57E+03	7,05E+01	1,33E+02	6,39E+03
Min Stress 23	1	3	head_tube	Interlaminar	2,25E+04	4,89E+03	0,00E+00	1,65E+03	-3,08E+03	-1,15E+03	8,94E+03
Max Stress 23	2	3	head_tube	Interlaminar	-2,25E+04	-4,89E+03	0,00E+00	-1,65E+03	3,08E+03	1,15E+03	8,94E+03
Min Stress 31	1	3	head_tube	Interlaminar	2,29E+04	5,23E+03	0,00E+00	1,17E+03	-2,26E+03	-1,83E+03	8,93E+03
Max Stress 31	2	3	head_tube	Interlaminar	-2,29E+04	-5,23E+03	0,00E+00	-1,17E+03	2,26E+03	1,83E+03	8,93E+03
Min Maximum Shear Stress	1	2	head_tube	Interlaminar	-1,41E+01	-1,39E+01	0,00E+00	-2,01E-01	-2,66E-01	3,57E-01	2,19E-01
Max Maximum Shear Stress	1	2	head_tube	Interlaminar	-2,35E+02	3,79E+04	0,00E+00	-5,10E+02	1,41E+02	2,64E+02	1,91E+04

Static Loads Case 1:

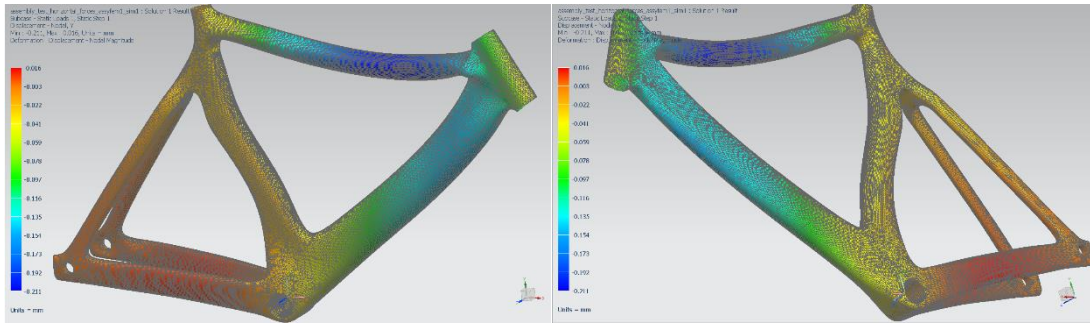
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	-2,32E+04	-6,05E+02	0,00E+00	-1,76E+03	8,14E+01	-1,35E+02	1,14E+04
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	3,94E+04	7,53E+03	0,00E+00	2,14E+03	-3,92E+02	1,83E+02	1,61E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-4,48E+01	-2,44E+04	0,00E+00	-1,60E+03	-6,55E+00	-1,94E+02	1,23E+04
Max Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	4,53E+01	3,80E+04	0,00E+00	7,44E+02	-9,70E+02	2,68E+02	1,90E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,58E+02	-4,26E+03	0,00E+00	-6,18E+02	2,26E+02	-2,49E+02	2,00E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,58E+02	-4,26E+03	0,00E+00	-6,18E+02	2,26E+02	-2,49E+02	2,00E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	7,60E+03	1,57E+04	0,00E+00	-2,93E+03	-1,95E+02	-3,32E+02	5,00E+03
Max Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	1,91E+04	2,97E+04	0,00E+00	3,57E+03	7,05E+01	1,33E+02	6,39E+03
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	2,25E+04	4,89E+03	0,00E+00	1,65E+03	-3,08E+03	-1,15E+03	8,94E+03
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	7,93E+03	2,07E+04	0,00E+00	1,96E+03	2,97E+03	-7,04E+02	6,67E+03
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	2,29E+04	5,23E+03	0,00E+00	1,17E+03	-2,26E+03	-1,83E+03	8,93E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	7,33E+03	5,19E+03	0,00E+00	1,03E+03	9,54E+01	1,41E+03	1,48E+03
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-1,41E+01	-1,39E+01	0,00E+00	-2,01E-01	-2,66E-01	3,57E-01	2,19E-01
Max Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-2,35E+02	3,79E+04	0,00E+00	-5,10E+02	1,41E+02	2,64E+02	1,91E+04

Static Loads Case 2:

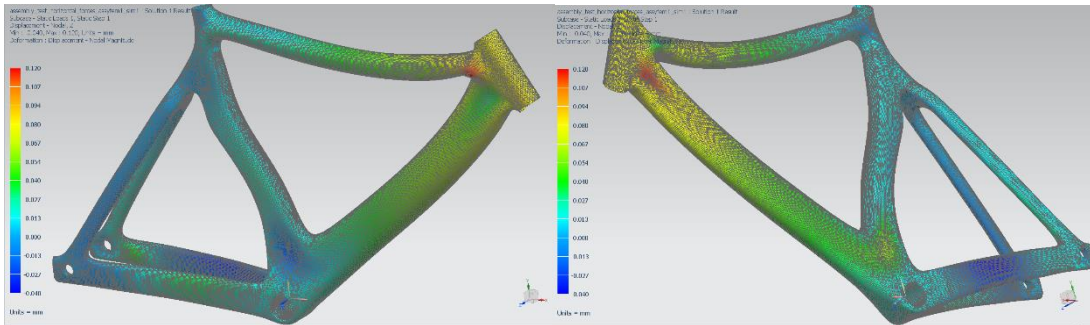
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-3,94E+04	-7,53E+03	0,00E+00	-2,14E+03	3,92E+02	-1,83E+02	1,61E+04
Max Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	2,32E+04	6,05E+02	0,00E+00	1,76E+03	-8,14E+01	1,35E+02	1,14E+04
Min Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	-4,53E+01	-3,80E+04	0,00E+00	-7,44E+02	9,70E+02	-2,68E+02	1,90E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	4,48E+01	2,44E+04	0,00E+00	1,60E+03	6,55E+00	1,94E+02	1,23E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,58E+02	4,26E+03	0,00E+00	6,18E+02	-2,26E+02	2,49E+02	2,00E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,58E+02	4,26E+03	0,00E+00	6,18E+02	-2,26E+02	2,49E+02	2,00E+03
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-1,91E+04	-2,97E+04	0,00E+00	-3,57E+03	-7,05E+01	-1,33E+02	6,39E+03
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-7,60E+03	-1,57E+04	0,00E+00	2,93E+03	1,95E+02	3,32E+02	5,00E+03
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-7,93E+03	-2,07E+04	0,00E+00	-1,96E+03	-2,97E+03	7,04E+02	6,67E+03
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-2,25E+04	-4,89E+03	0,00E+00	-1,65E+03	3,08E+03	1,15E+03	8,94E+03
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-7,33E+03	-5,19E+03	0,00E+00	-1,03E+03	-9,54E+01	-1,41E+03	1,48E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-2,29E+04	-5,23E+03	0,00E+00	-1,17E+03	2,26E+03	1,83E+03	8,93E+03
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	1,41E+01	1,39E+01	0,00E+00	2,01E-01	2,66E-01	-3,57E-01	2,19E-01
Max Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	2,35E+02	-3,79E+04	0,00E+00	5,10E+02	-1,41E+02	-2,64E+02	1,91E+04



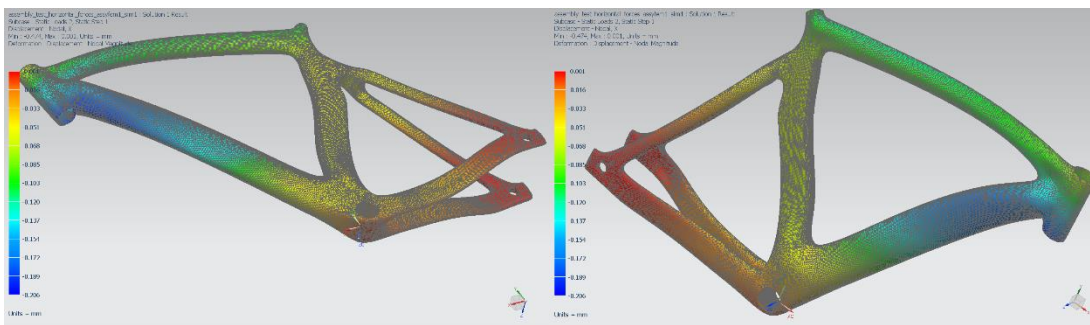
X axis displacement Case 1



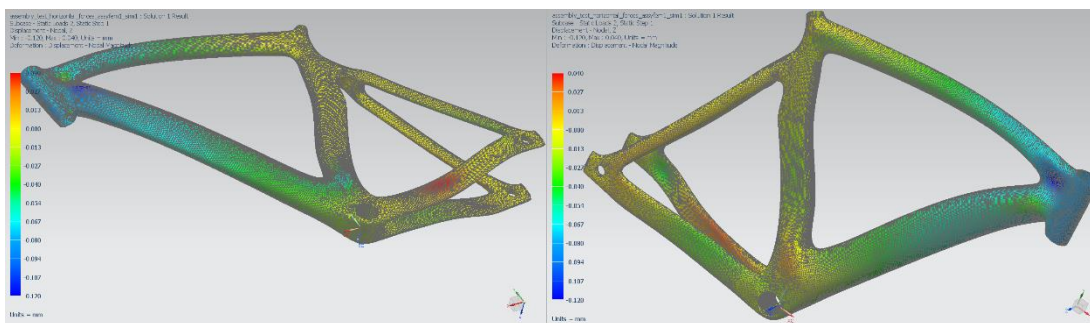
Y axis displacement Case 1



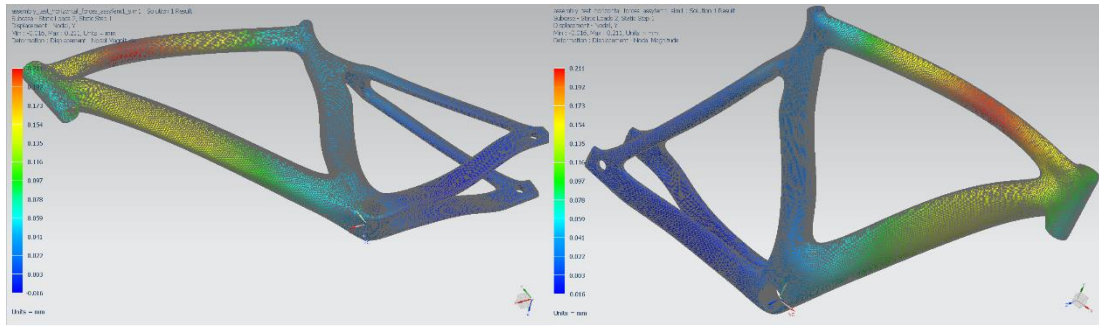
Z axis displacement Case 1



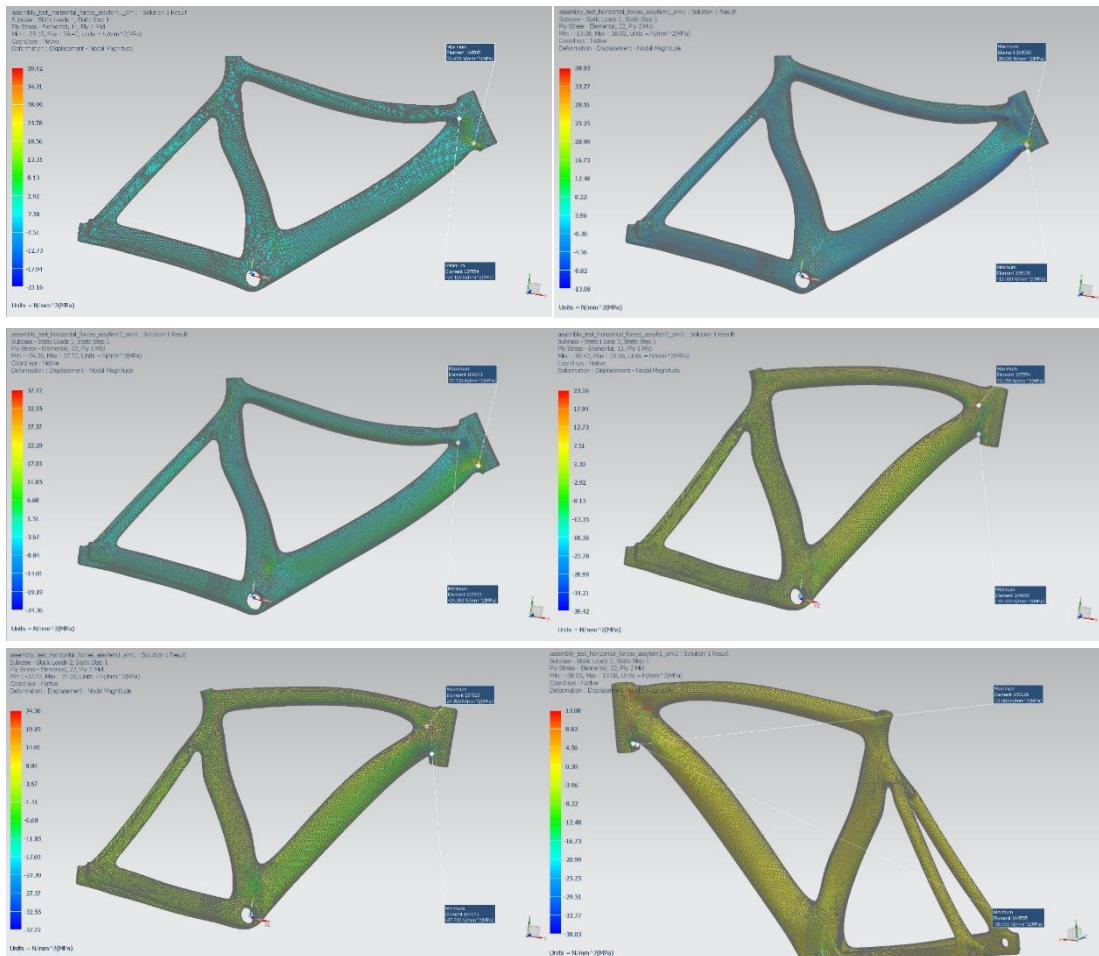
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 2^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 36.5 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 32 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 31.4 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 31.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 22.4 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 24 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 17.8 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 22.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 24 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 17.7 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 36.5 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 6^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 32 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 31.4 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 31.3 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 2nd Scenario

Top Summary

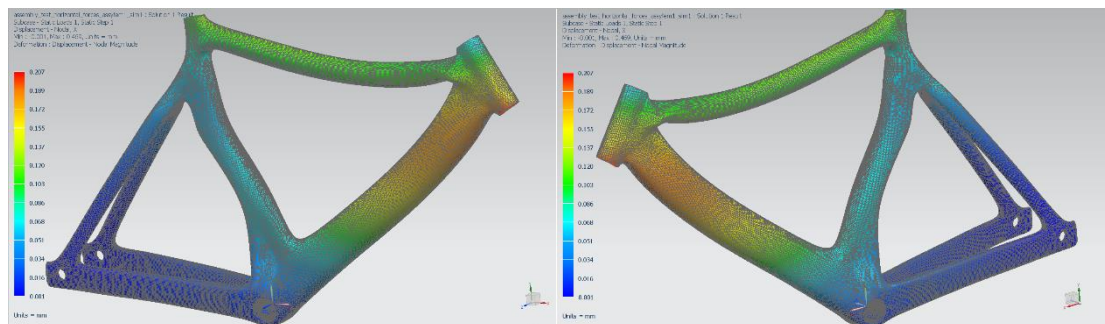
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	6	down_tube	Interlaminar	-3,65E+04	-8,57E+03	0,00E+00	7,91E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+04
Max Stress 11	1	6	down_tube	Interlaminar	3,65E+04	8,57E+03	0,00E+00	-7,91E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+04
Min Stress 22	2	2	head_tube	Interlaminar	-9,95E+02	-3,14E+04	0,00E+00	-8,63E+02	5,68E+02	-3,33E+02	1,52E+04
Max Stress 22	1	2	head_tube	Interlaminar	9,95E+02	3,14E+04	0,00E+00	8,63E+02	-5,68E+02	3,33E+02	1,52E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-2,53E+02	-3,49E+03	0,00E+00	-4,29E+02	1,37E+02	-1,62E+02	1,67E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-2,53E+02	-3,49E+03	0,00E+00	-4,29E+02	1,37E+02	-1,62E+02	1,67E+03
Min Stress 12	1	1	top_tube	Interlaminar	7,00E+03	1,49E+04	0,00E+00	-2,84E+03	-2,01E+02	-3,01E+02	4,88E+03
Max Stress 12	2	1	top_tube	Interlaminar	-7,00E+03	-1,49E+04	0,00E+00	2,84E+03	2,01E+02	3,01E+02	4,88E+03
Min Stress 23	1	4	head_tube	Interlaminar	2,49E+03	1,85E+04	0,00E+00	1,17E+03	-2,64E+03	-8,92E+02	8,07E+03
Max Stress 23	2	4	head_tube	Interlaminar	-2,49E+03	-1,85E+04	0,00E+00	-1,17E+03	2,64E+03	8,92E+02	8,07E+03
Min Stress 31	1	4	head_tube	Interlaminar	4,94E+03	1,63E+04	0,00E+00	1,15E+03	-1,78E+03	-1,74E+03	5,77E+03
Max Stress 31	2	4	head_tube	Interlaminar	-4,94E+03	-1,63E+04	0,00E+00	-1,15E+03	1,78E+03	1,74E+03	5,77E+03
Min Maximum Shear Stress	1	2	head_tube	Interlaminar	-1,43E+01	-1,42E+01	0,00E+00	2,05E-01	3,10E-01	2,77E-01	2,06E-01
Max Maximum Shear Stress	1	2	top_tube	Interlaminar	2,28E+04	-9,17E+03	0,00E+00	-3,27E+02	-3,24E+02	-4,86E+02	1,60E+04

Static Loads Case 1

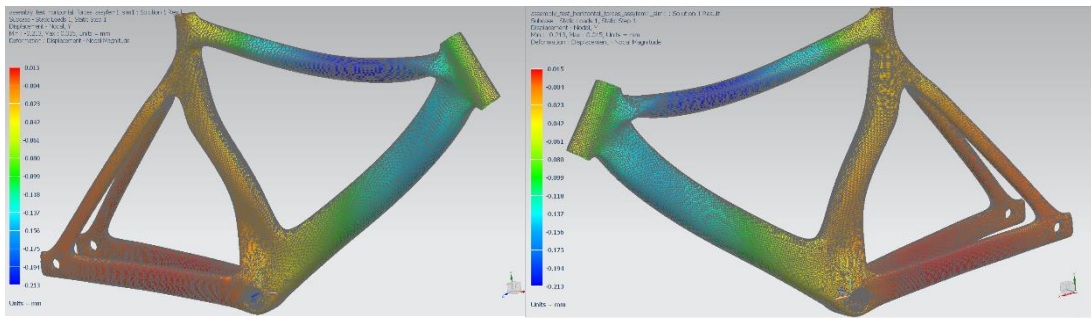
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	-2,24E+04	1,02E+02	0,00E+00	-1,78E+03	5,06E+01	-2,68E+02	1,14E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	3,65E+04	8,57E+03	0,00E+00	-7,91E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	5,90E+02	-2,41E+03	0,00E+00	-1,57E+03	1,10E+01	-3,47E+02	1,24E+04
Max Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	9,95E+02	3,14E+04	0,00E+00	8,63E+02	-5,68E+02	3,33E+02	1,52E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,53E+02	-3,49E+03	0,00E+00	-4,29E+02	1,37E+02	-1,62E+02	1,67E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,53E+02	-3,49E+03	0,00E+00	-4,29E+02	1,37E+02	-1,62E+02	1,67E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	7,00E+03	1,49E+04	0,00E+00	-2,84E+03	-2,01E+02	-3,01E+02	4,88E+03
Max Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	1,17E+04	2,57E+04	0,00E+00	2,73E+03	4,04E+02	8,98E+01	7,52E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	2,49E+03	1,85E+04	0,00E+00	1,17E+03	-2,64E+03	-8,92E+02	8,07E+03
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-4,04E+03	1,41E+04	0,00E+00	-1,84E+02	2,56E+03	-9,68E+01	9,09E+03
Min Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	4,94E+03	1,63E+04	0,00E+00	1,15E+03	-1,78E+03	-1,74E+03	5,77E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	8,23E+03	5,94E+03	0,00E+00	1,13E+03	6,52E+01	1,66E+03	1,61E+03
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-1,43E+01	-1,42E+01	0,00E+00	2,05E-01	3,10E-01	2,77E-01	2,06E-01
Max Maximum Shear Stress	2	top_tube	Interlaminar	2,28E+04	-9,17E+03	0,00E+00	-3,27E+02	-3,24E+02	-4,86E+02	1,60E+04

Static Loads Case 2

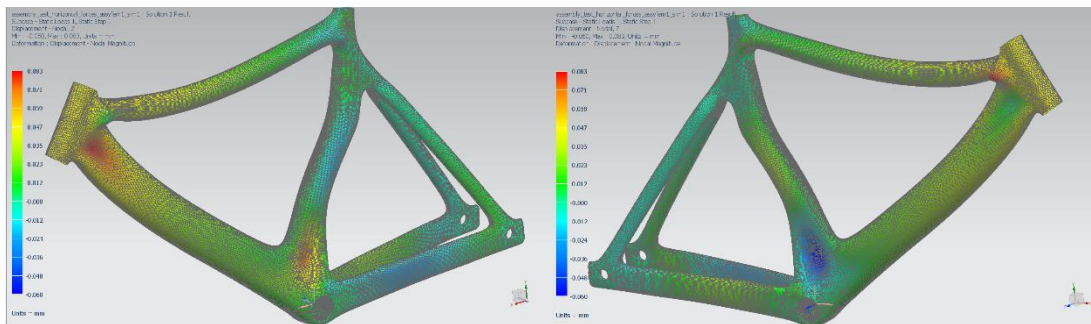
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-3,65E+04	-8,57E+03	0,00E+00	7,91E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+04
Max Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	2,24E+04	-1,02E+02	0,00E+00	1,78E+03	-5,06E+01	2,68E+02	1,14E+04
Min Stress 22	2	head_tube	Interlaminar	-9,95E+02	-3,14E+04	0,00E+00	-8,63E+02	5,68E+02	-3,33E+02	1,52E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-5,90E+02	2,41E+03	0,00E+00	1,57E+03	-1,10E+01	3,47E+02	1,24E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,53E+02	3,49E+03	0,00E+00	4,29E+02	-1,37E+02	1,62E+02	1,67E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,53E+02	3,49E+03	0,00E+00	4,29E+02	-1,37E+02	1,62E+02	1,67E+03
Min Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	-1,17E+04	-2,57E+04	0,00E+00	-2,73E+03	-4,04E+02	-8,98E+01	7,52E+03
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-7,00E+03	-1,49E+04	0,00E+00	2,84E+03	2,01E+02	3,01E+02	4,88E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	4,04E+03	-1,41E+04	0,00E+00	1,84E+02	-2,56E+03	9,68E+01	9,09E+03
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-2,49E+03	-1,85E+04	0,00E+00	-1,17E+03	2,64E+03	8,92E+02	8,07E+03
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-8,23E+03	-5,94E+03	0,00E+00	-1,13E+03	-6,52E+01	-1,66E+03	1,61E+03
Max Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	-4,94E+03	-1,63E+04	0,00E+00	-1,15E+03	1,78E+03	1,74E+03	5,77E+03
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	1,43E+01	1,42E+01	0,00E+00	-2,05E-01	-3,10E-01	-2,77E-01	2,06E-01
Max Maximum Shear Stress	2	top_tube	Interlaminar	-2,28E+04	9,17E+03	0,00E+00	3,27E+02	3,24E+02	4,86E+02	1,60E+04



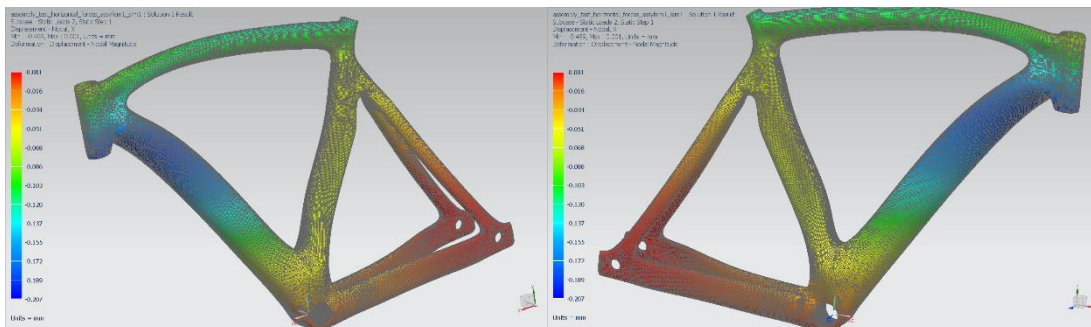
X axis displacement Case 1



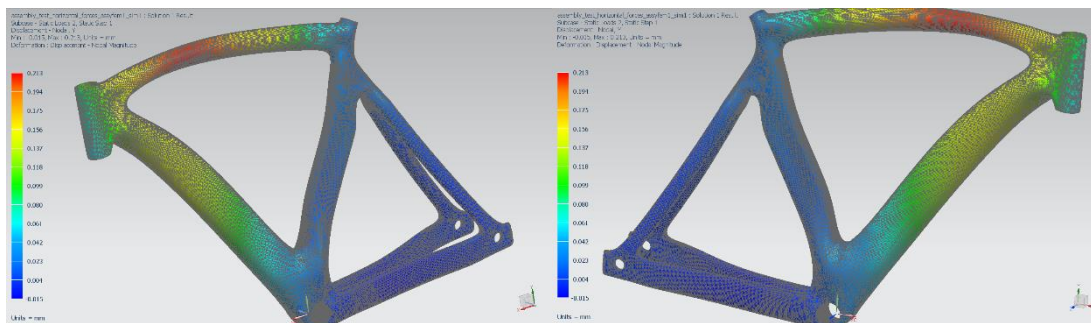
Y axis displacement Case 1



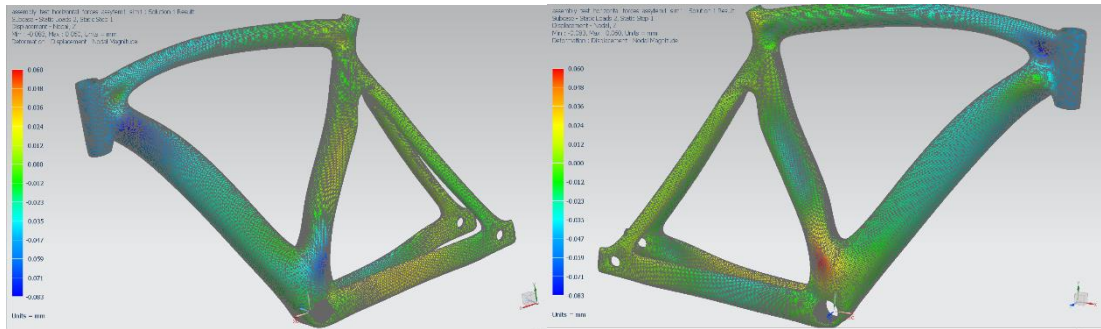
Z axis displacement Case 1



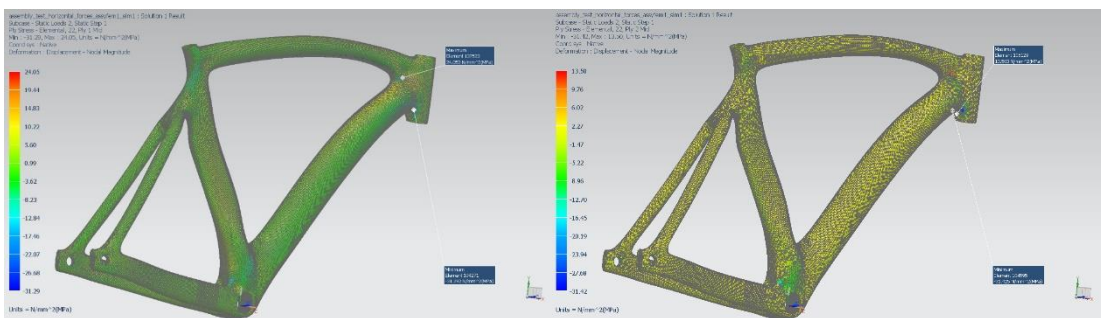
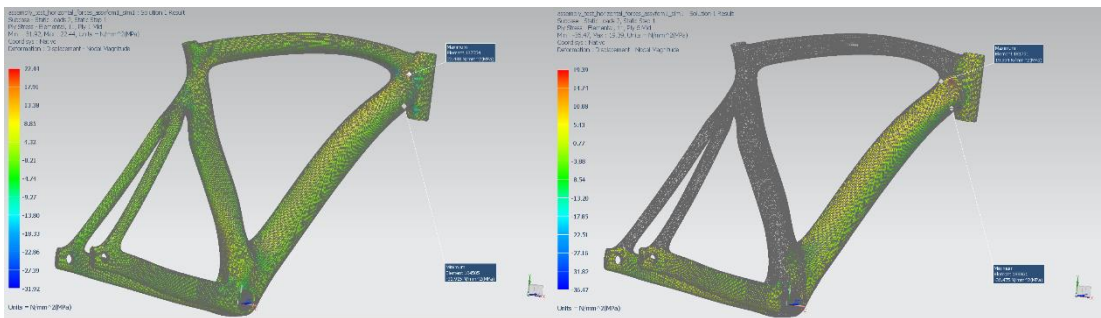
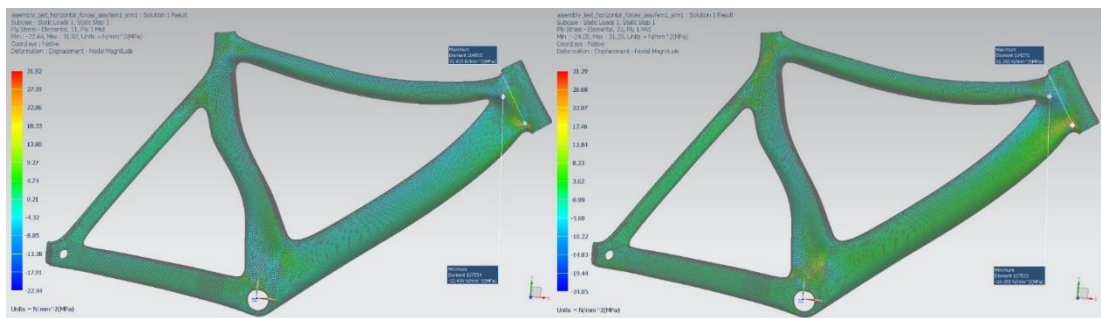
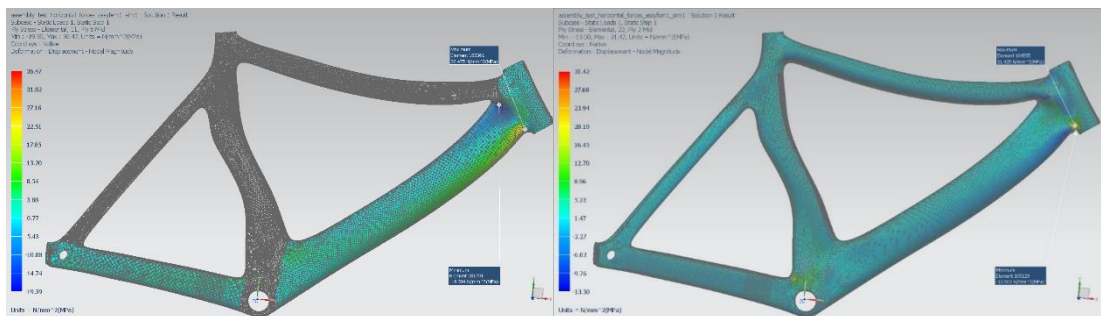
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 3^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 56.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 33.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 32.6 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 31.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 39.9 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 35.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 28.6 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19.8 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 39.9 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 35.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 28.6 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19.9 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 56.4 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 6^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 53.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 32.6 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 31.1 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 3rd Scenario

Top Summary

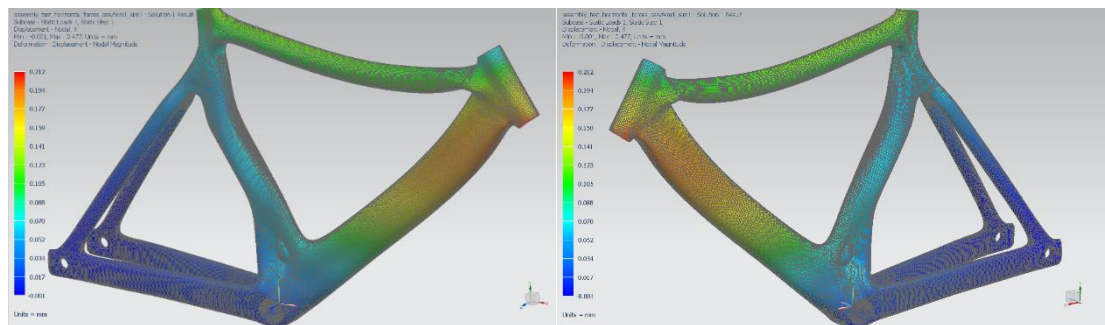
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	6	down_tube	Interlaminar	-5,64E+04	-2,64E+03	0,00E+00	-1,68E+02	-7,75E-14	3,13E-14	2,69E+04
Max Stress 11	1	6	down_tube	Interlaminar	5,64E+04	2,64E+03	0,00E+00	1,68E+02	7,75E-14	-3,13E-14	2,69E+04
Min Stress 22	2	1	head_tube	Interlaminar	-7,80E+03	-3,26E+04	0,00E+00	-2,23E+03	-2,56E+02	-1,48E+02	1,26E+04
Max Stress 22	1	1	head_tube	Interlaminar	7,80E+03	3,26E+04	0,00E+00	2,23E+03	2,56E+02	1,48E+02	1,26E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-3,37E+02	-3,60E+03	0,00E+00	-4,49E+02	1,40E+02	-1,67E+02	1,69E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-3,37E+02	-3,60E+03	0,00E+00	-4,49E+02	1,40E+02	-1,67E+02	1,69E+03
Min Stress 12	2	1	down_tube	Interlaminar	-5,74E+03	-3,84E+03	0,00E+00	-3,65E+03	-2,84E+01	-7,85E+02	3,77E+03
Max Stress 12	1	1	down_tube	Interlaminar	5,74E+03	3,84E+03	0,00E+00	3,65E+03	2,84E+01	7,85E+02	3,77E+03
Min Stress 23	1	4	head_tube	Interlaminar	1,79E+03	1,77E+04	0,00E+00	1,27E+03	-2,74E+03	-6,20E+02	8,06E+03
Max Stress 23	2	4	head_tube	Interlaminar	-1,79E+03	-1,77E+04	0,00E+00	-1,27E+03	2,74E+03	6,20E+02	8,06E+03
Min Stress 31	1	3	down_tube	Interlaminar	1,42E+03	1,45E+04	0,00E+00	-1,88E+03	-3,89E+02	-2,18E+03	6,82E+03
Max Stress 31	2	3	down_tube	Interlaminar	-1,42E+03	-1,45E+04	0,00E+00	1,88E+03	3,89E+02	2,18E+03	6,82E+03
Min Maximum Shear Stress	1	5	chainstay_right	Interlaminar	-2,36E+00	-2,12E+00	0,00E+00	1,66E-02	-1,14E+02	2,54E+01	1,20E-01
Max Maximum Shear Stress	1	6	down_tube	Interlaminar	5,64E+04	2,64E+03	0,00E+00	1,68E+02	7,75E-14	-3,13E-14	2,69E+04

Static Loads Case 1

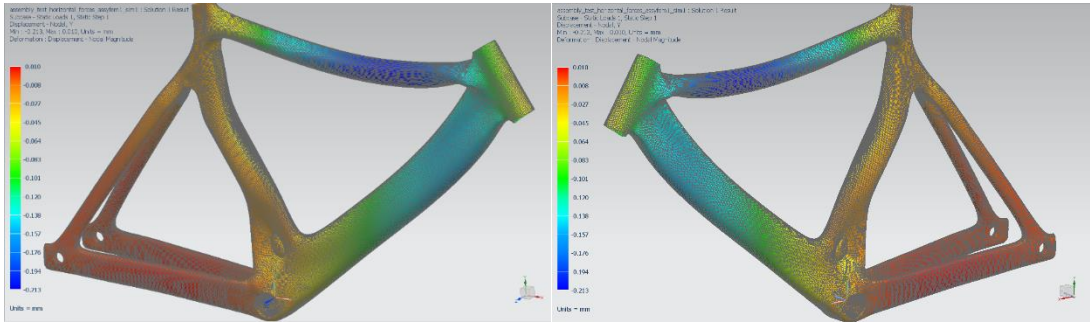
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-3,99E+04	1,51E+03	0,00E+00	-1,20E+03	4,16E+02	-3,55E+02	2,07E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	5,64E+04	2,64E+03	0,00E+00	1,68E+02	7,75E-14	-3,13E-14	2,69E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	1,56E+03	-2,86E+04	0,00E+00	-2,74E+03	-3,98E+01	-5,21E+02	1,53E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	7,80E+03	3,26E+04	0,00E+00	2,23E+03	2,56E+02	1,48E+02	1,26E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-3,37E+02	-3,60E+03	0,00E+00	-4,49E+02	1,40E+02	-1,67E+02	1,69E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-3,37E+02	-3,60E+03	0,00E+00	-4,49E+02	1,40E+02	-1,67E+02	1,69E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	5,22E+03	1,37E+04	0,00E+00	-3,06E+03	-2,13E+02	-2,97E+02	5,24E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	5,74E+03	3,84E+03	0,00E+00	3,65E+03	2,84E+01	7,85E+02	3,77E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	1,79E+03	1,77E+04	0,00E+00	1,27E+03	-2,74E+03	-6,20E+02	8,06E+03
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-4,63E+03	1,39E+04	0,00E+00	-3,11E+02	2,34E+03	-2,24E+02	9,26E+03
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	1,42E+03	1,45E+04	0,00E+00	-1,88E+03	-3,89E+02	-2,18E+03	6,82E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	1,34E+04	1,11E+04	0,00E+00	2,48E+03	3,22E+01	1,91E+03	2,72E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	-2,36E+00	-2,12E+00	0,00E+00	1,66E-02	-1,14E+02	2,54E+01	1,20E-01
Max Maximum Shear Stress	6	down_tube	Interlaminar	5,64E+04	2,64E+03	0,00E+00	1,68E+02	7,75E-14	-3,13E-14	2,69E+04

Static Loads Case 2

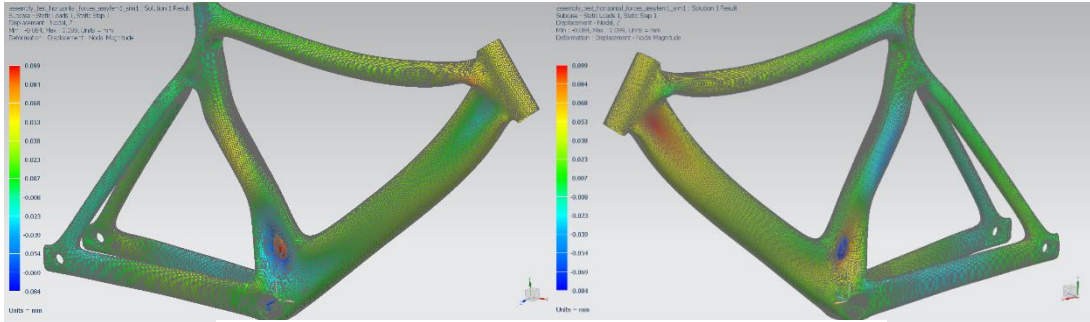
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-5,64E+04	-2,64E+03	0,00E+00	-1,68E+02	-7,75E-14	3,13E-14	2,69E+04
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	3,99E+04	-1,51E+03	0,00E+00	1,20E+03	-4,16E+02	3,55E+02	2,07E+04
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-7,80E+03	-3,26E+04	0,00E+00	-2,23E+03	-2,56E+02	-1,48E+02	1,26E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-1,56E+03	2,86E+04	0,00E+00	2,74E+03	3,98E+01	5,21E+02	1,53E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,37E+02	3,60E+03	0,00E+00	4,49E+02	-1,40E+02	1,67E+02	1,69E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,37E+02	3,60E+03	0,00E+00	4,49E+02	-1,40E+02	1,67E+02	1,69E+03
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-5,74E+03	-3,84E+03	0,00E+00	-3,65E+03	-2,84E+01	-7,85E+02	3,77E+03
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-5,22E+03	-1,37E+04	0,00E+00	3,06E+03	2,13E+02	2,97E+02	5,24E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	4,63E+03	-1,39E+04	0,00E+00	3,11E+02	-2,34E+03	2,24E+02	9,26E+03
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-1,79E+03	-1,77E+04	0,00E+00	-1,27E+03	2,74E+03	6,20E+02	8,06E+03
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-1,34E+04	-1,11E+04	0,00E+00	-2,48E+03	-3,22E+01	-1,91E+03	2,72E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-1,42E+03	-1,45E+04	0,00E+00	1,88E+03	3,89E+02	2,18E+03	6,82E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	2,36E+00	2,12E+00	0,00E+00	-1,66E-02	1,14E+02	-2,54E+01	1,20E-01
Max Maximum Shear Stress	6	down_tube	Interlaminar	-5,64E+04	-2,64E+03	0,00E+00	-1,68E+02	-7,75E-14	3,13E-14	2,69E+04



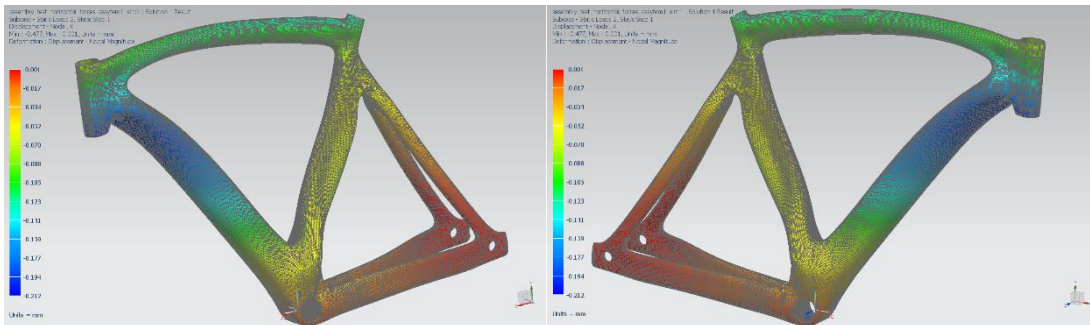
X axis displacement Case 1



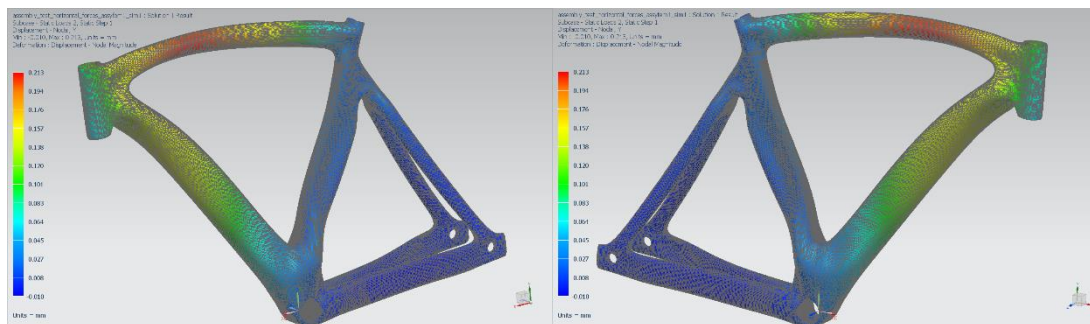
Y axis displacement Case 1



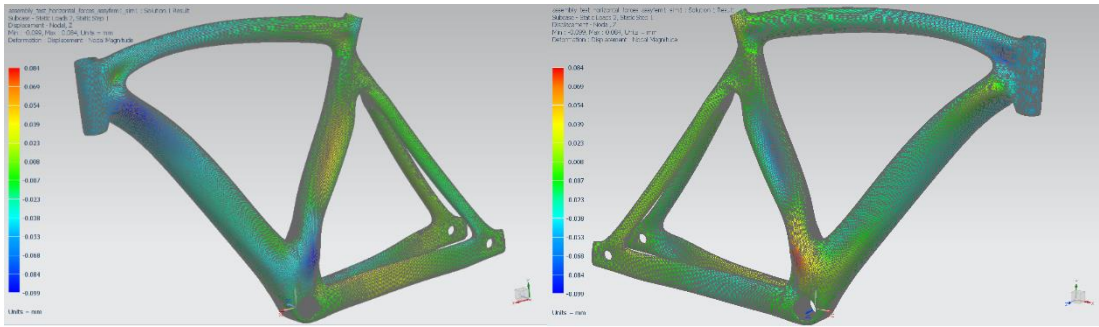
Z axis displacement Case 1



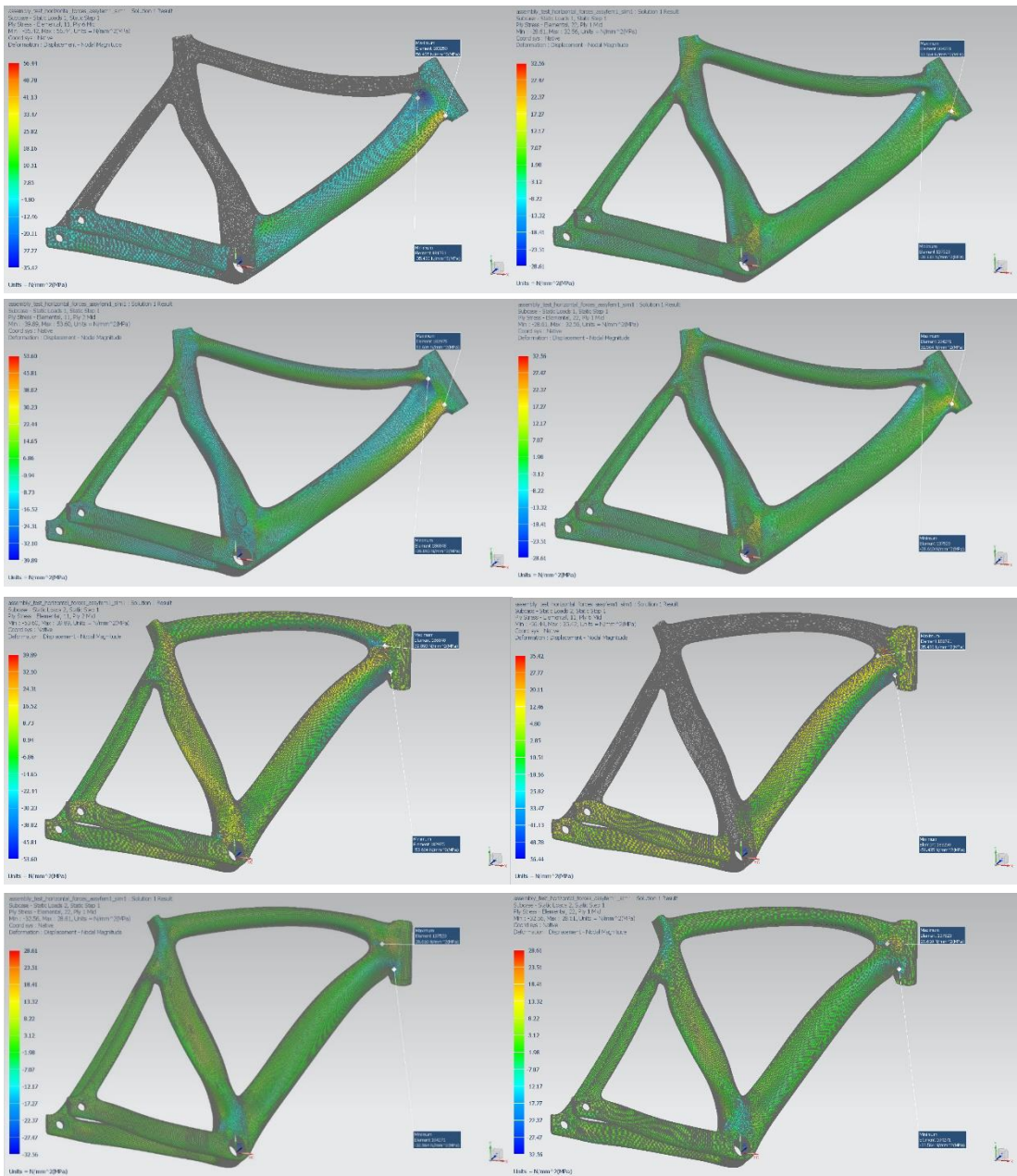
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 4^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 59.8 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 57.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 34.2 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 32.2 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 49 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 37.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 35.2 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 20 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 49 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 34.8 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 35.2 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 19.9 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 59.8 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 57.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 34.2 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 32.3 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 4th Scenario

Top Summary

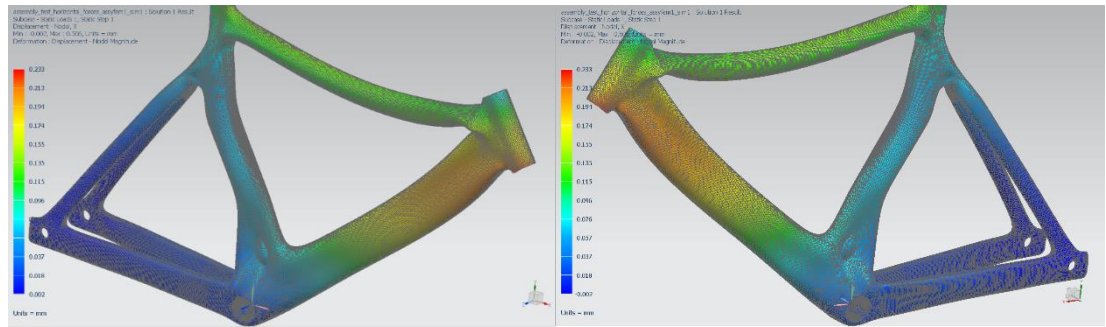
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² 2 (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² 2 (kPa)	mN/mm ² 2 (kPa)
Min Stress 11	2	2	down_tube	Interlaminar	-5,98E+04	-6,66E+02	0,00E+00	-2,31E+02	2,95E+02	1,46E+03	2,96E+04
Max Stress 11	1	2	down_tube	Interlaminar	5,98E+04	6,66E+02	0,00E+00	2,31E+02	-2,95E+02	-1,46E+03	2,96E+04
Min Stress 22	1	1	top_tube	Interlaminar	9,88E+02	-3,52E+04	0,00E+00	-3,38E+03	3,33E+02	-1,33E+03	1,84E+04
Max Stress 22	2	1	top_tube	Interlaminar	-9,88E+02	3,52E+04	0,00E+00	3,38E+03	-3,33E+02	1,33E+03	1,84E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	4,68E+02	-2,40E+03	0,00E+00	-3,85E+02	1,04E+02	-1,07E+02	1,48E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	4,68E+02	-2,40E+03	0,00E+00	-3,85E+02	1,04E+02	-1,07E+02	1,48E+03
Min Stress 12	1	3	top_tube	Interlaminar	-9,60E+03	-2,41E+03	0,00E+00	-4,40E+03	0,00E+00	-5,81E-15	5,68E+03
Max Stress 12	2	3	top_tube	Interlaminar	9,60E+03	2,41E+03	0,00E+00	4,40E+03	0,00E+00	5,81E-15	5,68E+03
Min Stress 23	1	4	head_tube	Interlaminar	1,85E+03	1,79E+04	0,00E+00	1,33E+03	-2,84E+03	-5,51E+02	8,15E+03
Max Stress 23	2	4	head_tube	Interlaminar	-1,85E+03	-1,79E+04	0,00E+00	-1,33E+03	2,84E+03	5,51E+02	8,15E+03
Min Stress 31	1	3	down_tube	Interlaminar	2,03E+03	1,63E+04	0,00E+00	-1,95E+03	-5,03E+02	-2,63E+03	7,39E+03
Max Stress 31	2	3	down_tube	Interlaminar	-2,03E+03	-1,63E+04	0,00E+00	1,95E+03	5,03E+02	2,63E+03	7,39E+03
Min Maximum Shear Stress	1	8	chainstay_right	Interlaminar	-1,84E+01	-1,82E+01	0,00E+00	1,33E-01	5,85E-14	1,07E-14	1,52E-01
Max Maximum Shear Stress	1	2	down_tube	Interlaminar	5,94E+04	-2,95E+00	0,00E+00	-4,05E+02	-1,62E+02	-8,54E+02	2,97E+04

Static Loads Case 1

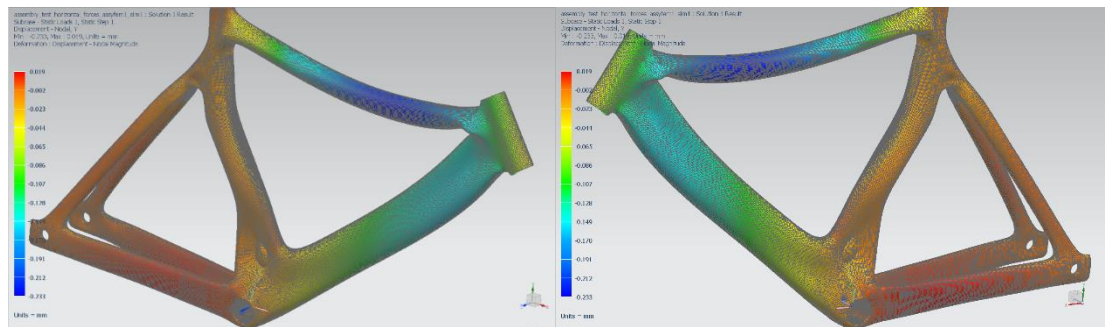
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-4,90E+04	1,49E+03	0,00E+00	-1,40E+03	5,90E+02	-7,33E+02	2,53E+04
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	5,98E+04	6,66E+02	0,00E+00	2,31E+02	-2,95E+02	-1,46E+03	2,96E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	9,88E+02	-3,52E+04	0,00E+00	-3,38E+03	3,33E+02	-1,33E+03	1,84E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	8,10E+03	3,42E+04	0,00E+00	2,33E+03	2,40E+02	1,74E+02	1,33E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,68E+02	-2,40E+03	0,00E+00	-3,85E+02	1,04E+02	-1,07E+02	1,48E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,68E+02	-2,40E+03	0,00E+00	-3,85E+02	1,04E+02	-1,07E+02	1,48E+03
Min Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	-9,60E+03	-2,41E+03	0,00E+00	-4,40E+03	0,00E+00	-5,81E-15	5,68E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	6,94E+03	4,93E+03	0,00E+00	4,32E+03	3,04E+01	9,22E+02	4,44E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	1,85E+03	1,79E+04	0,00E+00	1,33E+03	-2,84E+03	-5,51E+02	8,15E+03
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-5,01E+03	1,46E+04	0,00E+00	-3,63E+02	2,36E+03	-3,01E+02	9,80E+03
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	2,03E+03	1,63E+04	0,00E+00	-1,95E+03	-5,03E+02	-2,63E+03	7,39E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	1,32E+04	2,11E+04	0,00E+00	2,74E+03	7,15E+01	2,16E+03	4,82E+03
Min Maximum Shear Stress	8	chainstay_right	Interlaminar	-1,84E+01	-1,82E+01	0,00E+00	1,33E-01	5,85E-14	1,07E-14	1,52E-01
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	5,94E+04	-2,95E+00	0,00E+00	-4,05E+02	-1,62E+02	-8,54E+02	2,97E+04

Static Loads Case 2

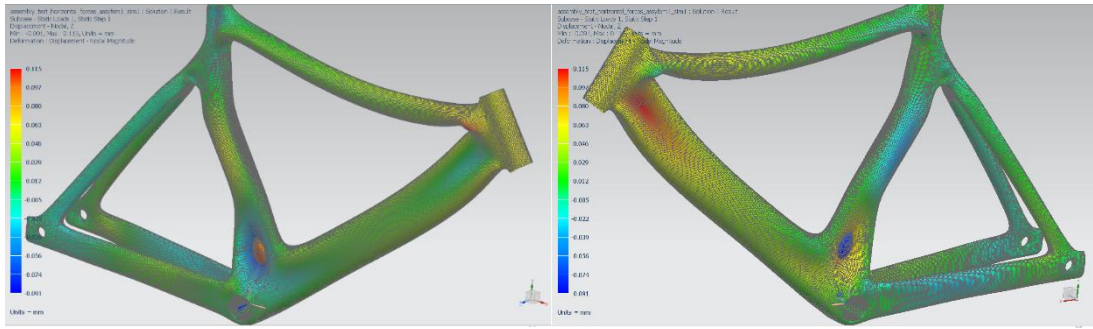
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-5,98E+04	-6,66E+02	0,00E+00	-2,31E+02	2,95E+02	1,46E+03	2,96E+04
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	4,90E+04	-1,49E+03	0,00E+00	1,40E+03	-5,90E+02	7,33E+02	2,53E+04
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-8,10E+03	-3,42E+04	0,00E+00	-2,33E+03	-2,40E+02	-1,74E+02	1,33E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-9,88E+02	3,52E+04	0,00E+00	3,38E+03	-3,33E+02	1,33E+03	1,84E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,68E+02	2,40E+03	0,00E+00	3,85E+02	-1,04E+02	1,07E+02	1,48E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,68E+02	2,40E+03	0,00E+00	3,85E+02	-1,04E+02	1,07E+02	1,48E+03
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-6,94E+03	-4,93E+03	0,00E+00	-4,32E+03	-3,04E+01	-9,22E+02	4,44E+03
Max Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	9,60E+03	2,41E+03	0,00E+00	4,40E+03	0,00E+00	5,81E-15	5,68E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	5,01E+03	-1,46E+04	0,00E+00	3,63E+02	-2,36E+03	3,01E+02	9,80E+03
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-1,85E+03	1,79E+04	0,00E+00	-1,33E+03	2,84E+03	5,51E+02	8,15E+03
Min Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-1,32E+04	-2,11E+04	0,00E+00	-2,74E+03	-7,15E+01	-2,16E+03	4,82E+03
Max Stress 31	3	down_tube	Interlaminar	-2,03E+03	-1,63E+04	0,00E+00	1,95E+03	5,03E+02	2,63E+03	7,39E+03
Min Maximum Shear Stress	8	chainstay_right	Interlaminar	1,84E+01	1,82E+01	0,00E+00	-1,33E-01	-5,85E-14	-1,07E-14	1,52E-01
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	-5,94E+04	2,95E+00	0,00E+00	4,05E+02	1,62E+02	8,54E+02	2,97E+04



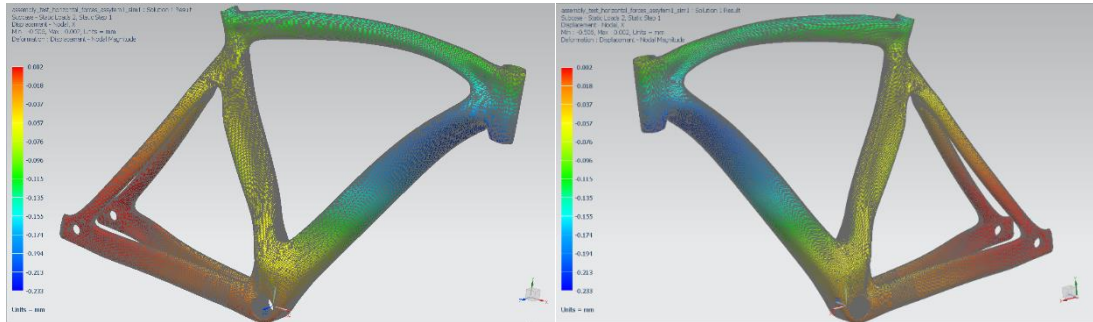
X axis displacement Case 1



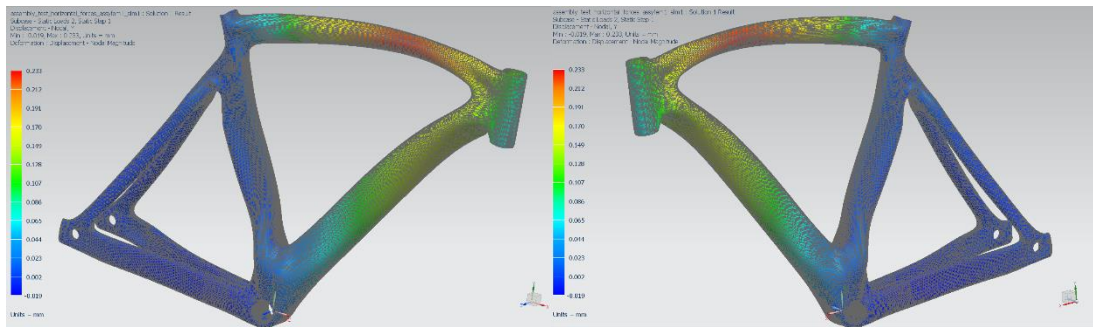
Y axis displacement Case 1



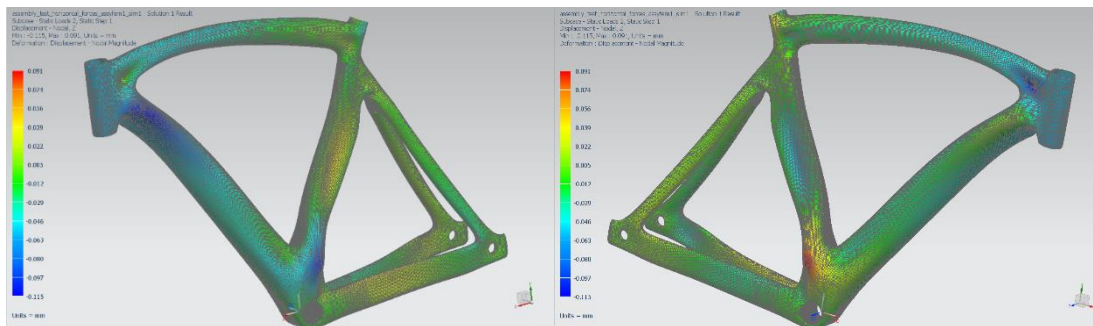
Z axis displacement Case 1



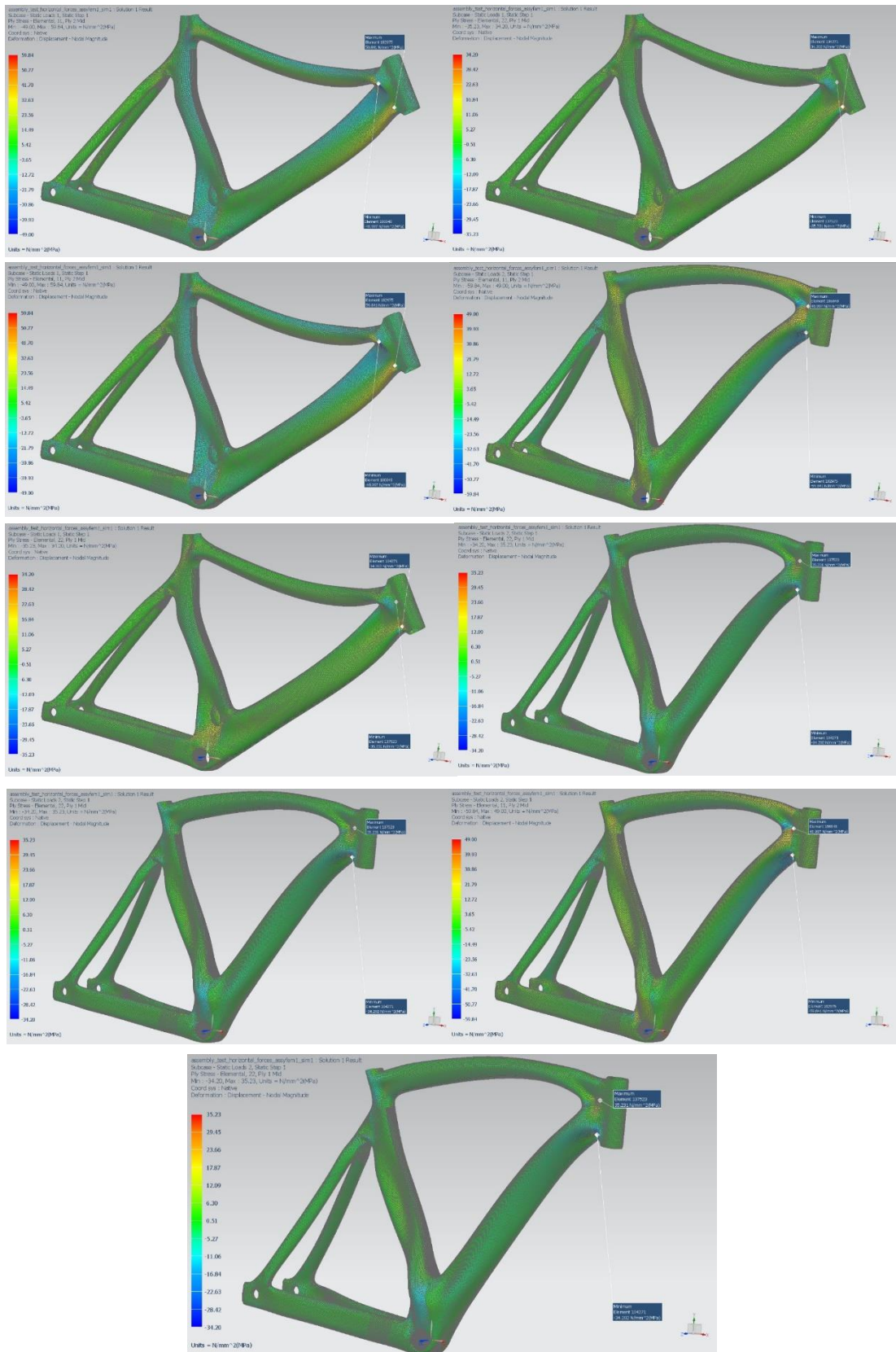
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 5^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 77.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 73.8 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 3.8 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 3.7 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 86.9 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 86.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο άνω δεξί ψαλίδι 5.7 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 4.6 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 86.9 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 86.8 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 5.7 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 4.6 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 77.3 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 73.8 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 3.8 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 3.7 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 5th Scenario

Top Summary

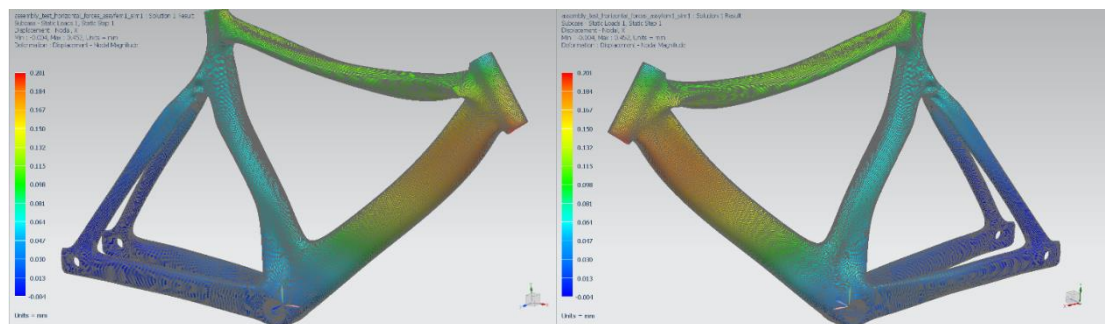
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	1	top_tube	Interlaminar	-8,69E+04	-1,12E+03	0,00E+00	-3,95E+03	1,12E+03	6,62E+02	4,31E+04
Max Stress 11	2	1	top_tube	Interlaminar	8,69E+04	1,12E+03	0,00E+00	3,95E+03	-1,12E+03	-6,62E+02	4,31E+04
Min Stress 22	1	3	top_tube	Interlaminar	2,80E+04	-5,73E+03	0,00E+00	-5,67E+02	-5,82E-13	-3,46E-14	1,69E+04
Max Stress 22	2	3	top_tube	Interlaminar	-2,80E+04	5,73E+03	0,00E+00	5,67E+02	5,82E-13	3,46E-14	1,69E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	6,02E+03	-3,51E+02	0,00E+00	-4,93E+02	4,52E+01	-5,27E+01	3,22E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	6,02E+03	-3,51E+02	0,00E+00	-4,93E+02	4,52E+01	-5,27E+01	3,22E+03
Min Stress 12	2	1	down_tube	Interlaminar	3,73E+03	5,15E+02	0,00E+00	-5,19E+03	-8,98E+02	6,21E+02	5,43E+03
Max Stress 12	1	1	down_tube	Interlaminar	-3,73E+03	-5,15E+02	0,00E+00	5,19E+03	8,98E+02	-6,21E+02	5,43E+03
Min Stress 23	2	7	head_tube	Interlaminar	-3,71E+03	-7,88E+02	0,00E+00	6,87E+02	-2,78E+04	7,74E+03	1,62E+03
Max Stress 23	1	7	head_tube	Interlaminar	3,71E+03	7,88E+02	0,00E+00	-6,87E+02	2,78E+04	-7,74E+03	1,62E+03
Min Stress 31	1	6	head_tube	Interlaminar	6,40E+03	1,90E+03	0,00E+00	-1,16E+03	-8,46E+03	-1,08E+04	2,53E+03
Max Stress 31	2	6	head_tube	Interlaminar	-6,40E+03	-1,90E+03	0,00E+00	1,16E+03	8,46E+03	1,08E+04	2,53E+03
Min Maximum Shear Stress	1	3	chainstay_right	Interlaminar	-8,97E+00	-9,11E+00	0,00E+00	2,52E-02	-1,11E+02	2,22E+01	7,14E-02
Max Maximum Shear Stress	1	2	top_tube	Interlaminar	-8,67E+04	-4,30E+02	0,00E+00	2,90E+03	3,86E+02	1,73E+02	4,33E+04

Static Loads Case 1:

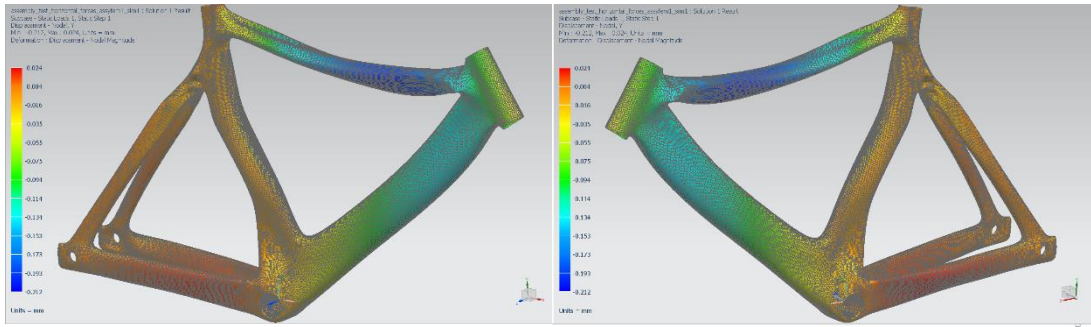
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	-8,69E+04	-1,12E+03	0,00E+00	-3,95E+03	1,12E+03	6,62E+02	4,31E+04
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	7,73E+04	1,28E+03	0,00E+00	1,47E+03	1,20E+03	1,05E+02	3,80E+04
Min Stress 22	3	top_tube	Interlaminar	2,80E+04	-5,73E+03	0,00E+00	-5,67E+02	-5,82E-13	-3,46E-14	1,69E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	7,58E+03	3,77E+03	0,00E+00	2,11E+03	-8,23E+02	-4,31E+02	2,84E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	6,02E+03	-3,51E+02	0,00E+00	-4,93E+02	4,52E+01	-5,27E+01	3,22E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	6,02E+03	-3,51E+02	0,00E+00	-4,93E+02	4,52E+01	-5,27E+01	3,22E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	2,25E+04	3,14E+03	0,00E+00	0,00E+00	-5,14E+03	-1,13E+03	1,10E+04
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-3,73E+03	-5,15E+02	0,00E+00	5,19E+03	8,98E+02	-6,21E+02	5,43E+03
Min Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	8,42E+03	1,10E+03	0,00E+00	1,04E+03	-1,07E+04	6,92E+03	3,81E+03
Max Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	3,71E+03	7,88E+02	0,00E+00	-6,87E+02	2,78E+04	-7,74E+03	1,62E+03
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	6,40E+03	1,90E+03	0,00E+00	-1,16E+03	-8,46E+03	-1,08E+04	2,53E+03
Max Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-5,77E+03	1,25E+03	0,00E+00	-2,84E+02	-1,07E+04	7,46E+03	3,52E+03
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_right	Interlaminar	-8,97E+00	-9,11E+00	0,00E+00	2,52E-02	-1,11E+02	2,22E+01	7,14E-02
Max Maximum Shear Stress	2	top_tube	Interlaminar	-8,67E+04	-4,30E+02	0,00E+00	2,90E+03	3,86E+02	1,73E+02	4,33E+04

Static Loads Case 2:

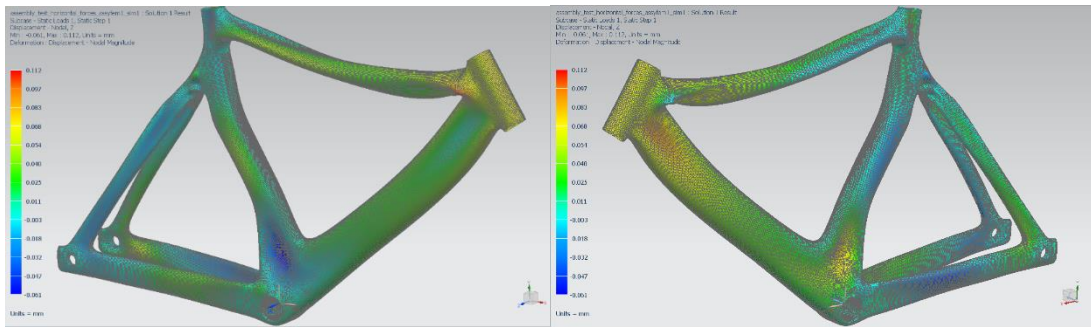
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-7,73E+04	-1,28E+03	0,00E+00	-1,47E+03	-1,20E+03	-1,05E+02	3,80E+04
Max Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	8,69E+04	1,12E+03	0,00E+00	3,95E+03	-1,12E+03	-6,62E+02	4,31E+04
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-7,58E+03	-3,77E+03	0,00E+00	-2,11E+03	8,23E+02	4,31E+02	2,84E+03
Max Stress 22	3	top_tube	Interlaminar	-2,80E+04	5,73E+03	0,00E+00	5,67E+02	5,82E-13	3,46E-14	1,69E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,02E+03	3,51E+02	0,00E+00	4,93E+02	-4,52E+01	5,27E+01	3,22E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,02E+03	3,51E+02	0,00E+00	4,93E+02	-4,52E+01	5,27E+01	3,22E+03
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	3,73E+03	5,15E+02	0,00E+00	-5,19E+03	-8,98E+02	6,21E+02	5,43E+03
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-2,25E+04	-3,14E+03	0,00E+00	5,14E+03	1,13E+03	1,63E+03	1,10E+04
Min Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-3,71E+03	-7,88E+02	0,00E+00	6,87E+02	-2,78E+04	7,74E+03	1,62E+03
Max Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-8,42E+03	-1,10E+03	0,00E+00	-1,04E+03	1,07E+04	-6,92E+03	3,81E+03
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	5,77E+03	-1,25E+03	0,00E+00	2,84E+02	1,07E+04	-7,46E+03	3,52E+03
Max Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-6,40E+03	-1,90E+03	0,00E+00	1,16E+03	8,46E+03	1,08E+04	2,53E+03
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_right	Interlaminar	8,97E+00	9,11E+00	0,00E+00	-2,52E-02	1,11E+02	-2,22E+01	7,14E-02
Max Maximum Shear Stress	2	top_tube	Interlaminar	8,67E+04	4,30E+02	0,00E+00	-2,90E+03	-3,86E+02	-1,73E+02	4,33E+04



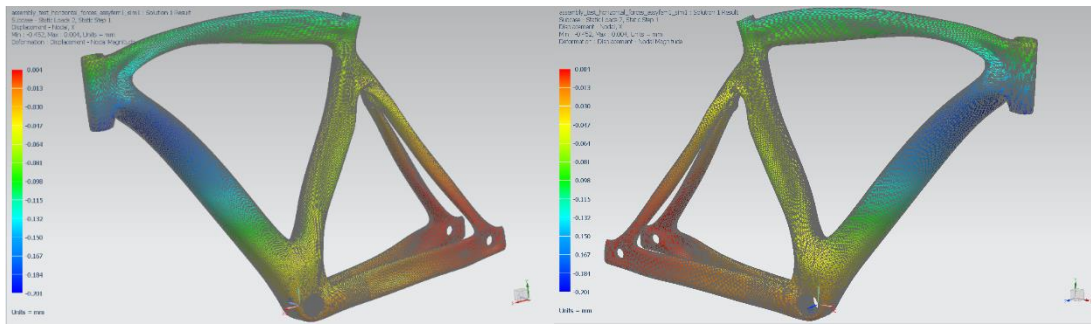
X axis displacement Case 1



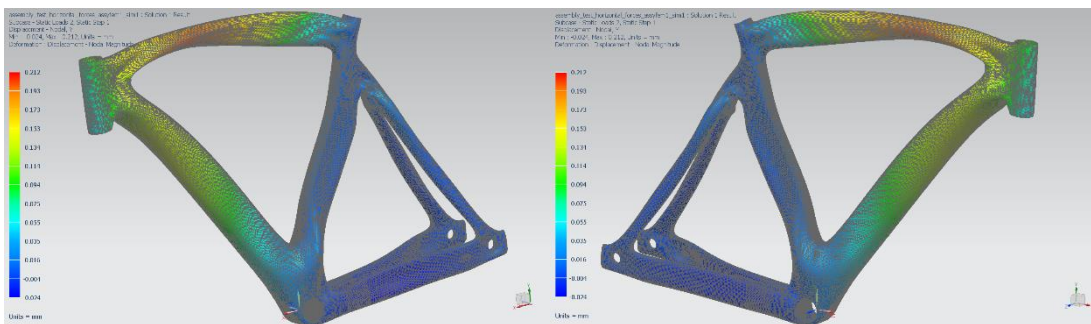
Y axis displacement Case 1



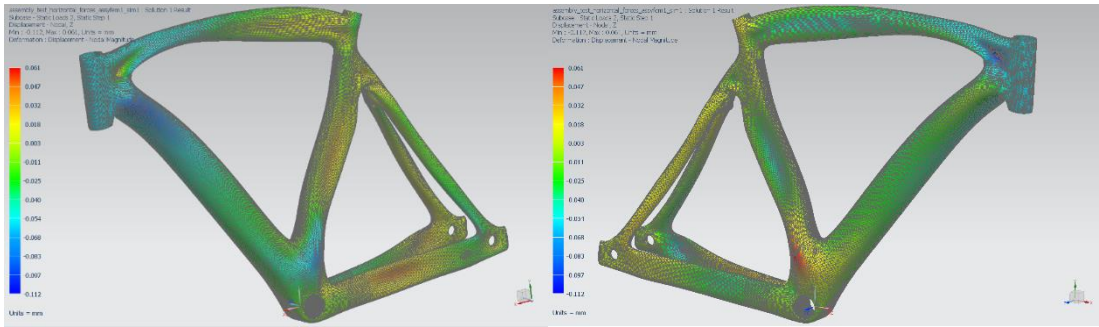
Z axis displacement Case 1



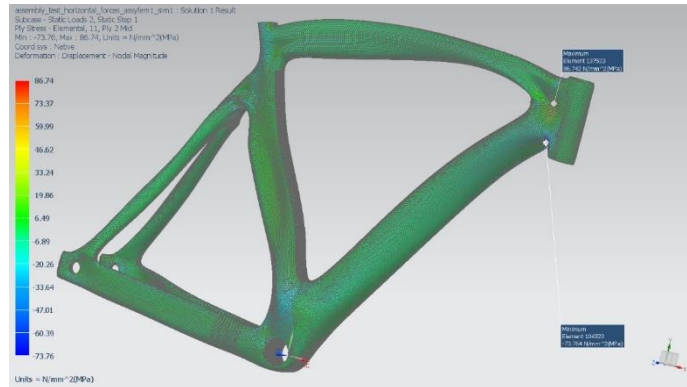
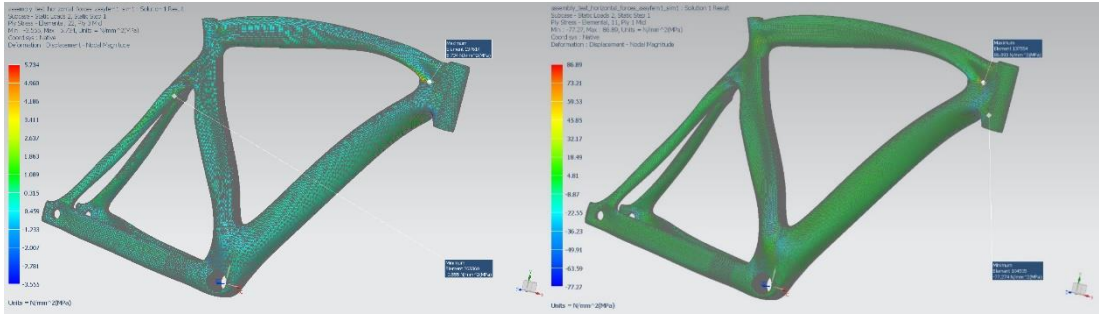
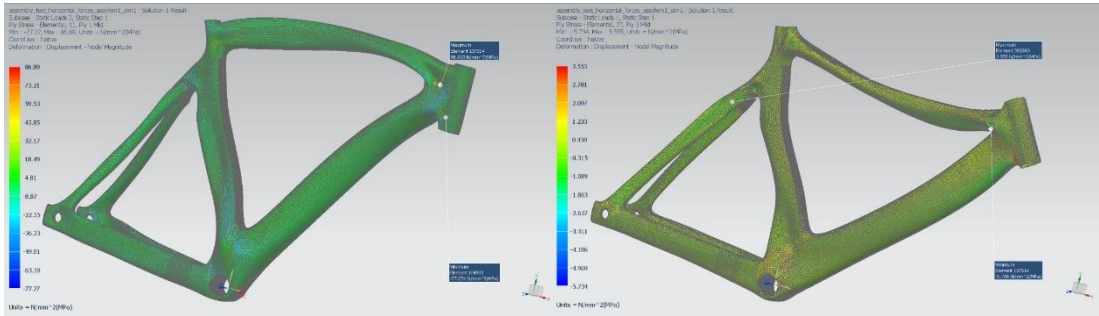
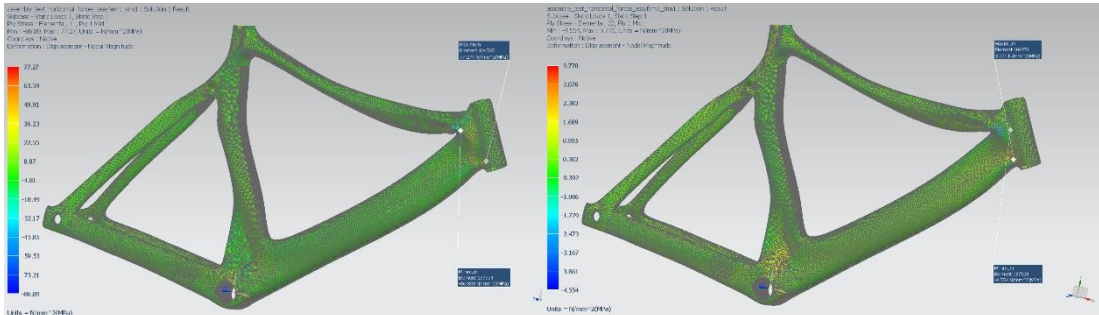
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 6^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 74.9 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 69.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 68.9 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 60.6 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 74 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 46.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα 43.2 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 21 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 74 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 46.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 43.2 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 21 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 74.9 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 6^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 69.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 68.9 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 60.6 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 6th Scenario

Top Summary

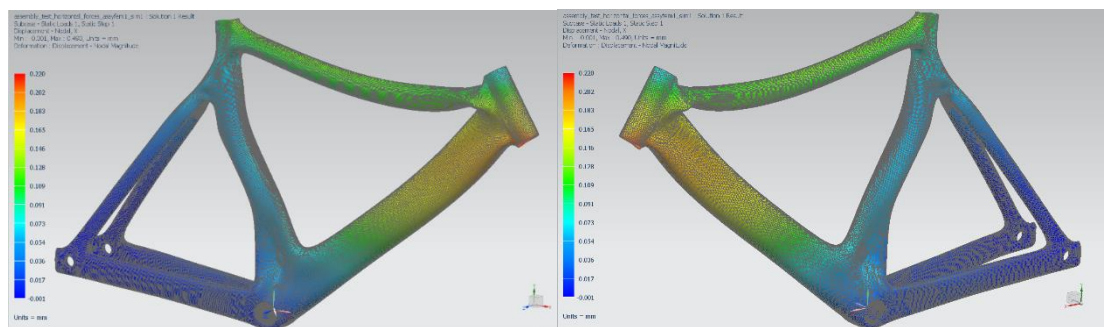
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	6	down_tube	Interlaminar	-7,49E+04	-2,04E+03	0,00E+00	5,48E+02	-9,60E-15	0,00E+00	3,64E+04
Max Stress 11	1	6	down_tube	Interlaminar	7,49E+04	2,04E+03	0,00E+00	-5,48E+02	9,60E-15	0,00E+00	3,64E+04
Min Stress 22	2	1	head_tube	Interlaminar	-2,27E+04	-6,89E+04	0,00E+00	-4,70E+03	1,55E+02	6,46E+02	2,35E+04
Max Stress 22	1	1	head_tube	Interlaminar	2,27E+04	6,89E+04	0,00E+00	4,70E+03	-1,55E+02	-6,46E+02	2,35E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-2,22E+02	-6,94E+03	0,00E+00	-1,08E+03	1,71E+02	-1,73E+02	3,53E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-2,22E+02	-6,94E+03	0,00E+00	-1,08E+03	1,71E+02	-1,73E+02	3,53E+03
Min Stress 12	2	1	head_tube	Interlaminar	-3,30E+04	-5,93E+04	0,00E+00	-5,91E+03	5,76E+02	2,24E+01	1,44E+04
Max Stress 12	1	1	head_tube	Interlaminar	3,30E+04	5,93E+04	0,00E+00	5,91E+03	-5,76E+02	-2,24E+01	1,44E+04
Min Stress 23	2	3	head_tube	Interlaminar	-3,81E+03	-2,32E+04	0,00E+00	-1,45E+03	-2,29E+04	1,52E+03	9,78E+03
Max Stress 23	1	3	head_tube	Interlaminar	3,81E+03	2,32E+04	0,00E+00	1,45E+03	2,29E+04	-1,52E+03	9,78E+03
Min Stress 31	1	3	head_tube	Interlaminar	4,50E+03	2,35E+04	0,00E+00	1,41E+03	3,32E+03	-1,28E+04	9,61E+03
Max Stress 31	2	3	head_tube	Interlaminar	-4,50E+03	-2,35E+04	0,00E+00	-1,41E+03	-3,32E+03	1,28E+04	9,61E+03
Min Maximum Shear Stress	1	5	chainstay_right	Interlaminar	-9,61E-01	-9,73E-01	0,00E+00	-2,79E-02	1,52E+00	3,13E+00	2,85E-02
Max Maximum Shear Stress	1	2	down_tube	Interlaminar	-7,40E+04	1,23E+03	0,00E+00	-1,12E+03	-1,73E+03	-1,27E+03	3,76E+04

Static Loads Case 1

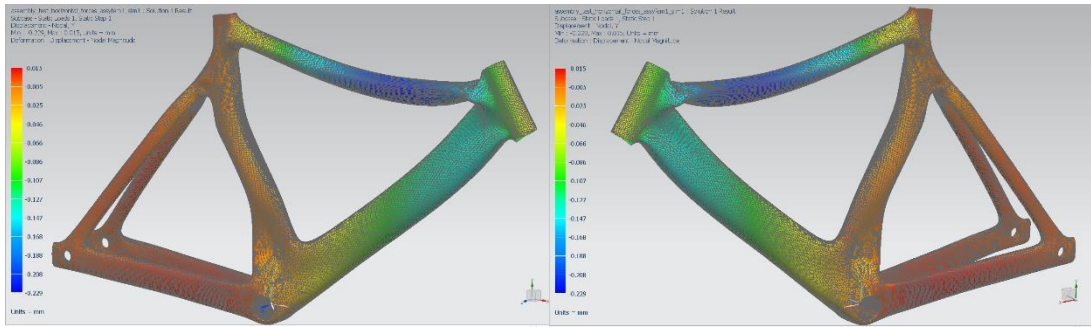
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-7,40E+04	1,23E+03	0,00E+00	-1,12E+03	-1,73E+03	-1,27E+03	3,76E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	7,49E+04	2,04E+03	0,00E+00	-5,48E+02	9,60E-15	0,00E+00	3,64E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-2,07E+03	-4,32E+04	0,00E+00	-3,83E+03	1,07E+02	3,50E+02	2,09E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	2,27E+04	6,89E+04	0,00E+00	4,70E+03	-1,55E+02	-6,46E+02	2,35E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,22E+02	-6,94E+03	0,00E+00	-1,08E+03	1,71E+02	-1,73E+02	3,53E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,22E+02	-6,94E+03	0,00E+00	-1,08E+03	1,71E+02	-1,73E+02	3,53E+03
Min Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	-9,87E+03	-5,10E+03	0,00E+00	-4,28E+03	0,00E+00	2,12E-15	4,90E+03
Max Stress 12	1	head_tube	Interlaminar	3,30E+04	5,93E+04	0,00E+00	5,91E+03	-5,76E+02	-2,24E+01	1,44E+04
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	2,16E+04	1,02E+03	0,00E+00	1,83E+03	-8,36E+03	1,76E+03	1,04E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	3,81E+03	2,32E+04	0,00E+00	1,45E+03	2,29E+04	-1,52E+03	9,78E+03
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	4,50E+03	2,35E+04	0,00E+00	1,41E+03	3,32E+03	-1,28E+04	9,61E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	3,37E+03	2,12E+04	0,00E+00	1,21E+03	1,43E+03	1,08E+04	9,02E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	-9,61E-01	-9,73E-01	0,00E+00	-2,79E-02	1,52E+00	3,13E+00	2,85E-02
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	-7,40E+04	1,23E+03	0,00E+00	-1,12E+03	-1,73E+03	-1,27E+03	3,76E+04

Static Loads Case 2

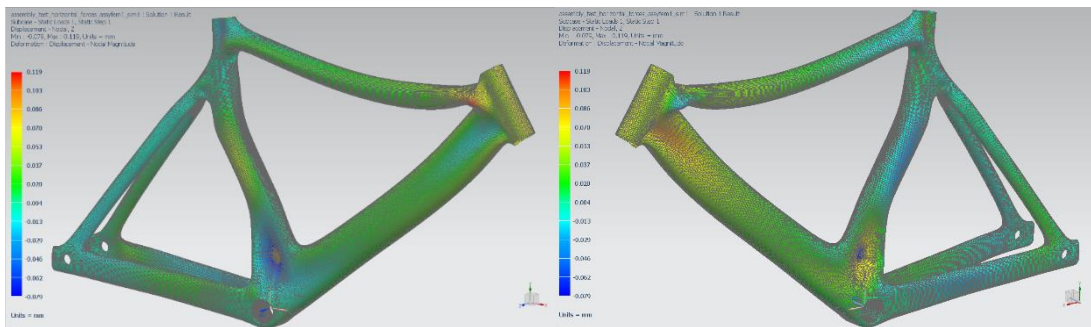
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-7,49E+04	-2,04E+03	0,00E+00	5,48E+02	-9,60E-15	0,00E+00	3,64E+04
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	7,40E+04	-1,23E+03	0,00E+00	1,12E+03	1,73E+03	1,27E+03	3,76E+04
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-2,27E+04	-6,89E+04	0,00E+00	-4,70E+03	1,55E+02	6,46E+02	2,35E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	2,07E+03	4,32E+04	0,00E+00	3,83E+03	-1,07E+02	-3,50E+02	2,09E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,22E+02	6,94E+03	0,00E+00	1,08E+03	-1,71E+02	1,73E+02	3,53E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,22E+02	6,94E+03	0,00E+00	1,08E+03	-1,71E+02	1,73E+02	3,53E+03
Min Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	-9,87E+03	-5,10E+03	0,00E+00	-4,28E+03	0,00E+00	-2,12E-15	4,90E+03
Max Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	9,87E+03	5,10E+03	0,00E+00	4,28E+03	0,00E+00	-2,12E-15	4,90E+03
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-3,81E+03	-2,32E+04	0,00E+00	-1,45E+03	-2,29E+04	1,52E+03	9,78E+03
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-2,16E+04	-1,02E+03	0,00E+00	-1,83E+03	8,36E+03	-1,76E+03	1,04E+04
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-3,37E+03	-2,12E+04	0,00E+00	-1,21E+03	-1,43E+03	-1,08E+04	9,02E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-4,50E+03	-2,35E+04	0,00E+00	-1,41E+03	-3,32E+03	1,28E+04	9,61E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	9,61E-01	9,73E-01	0,00E+00	2,79E-02	-1,52E+00	-3,13E+00	2,85E-02
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	7,40E+04	-1,23E+03	0,00E+00	1,12E+03	1,73E+03	1,27E+03	3,76E+04



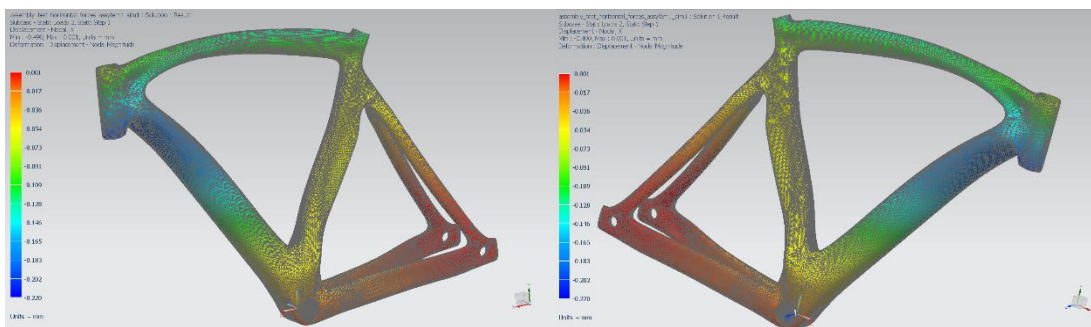
X axis displacement Case 1



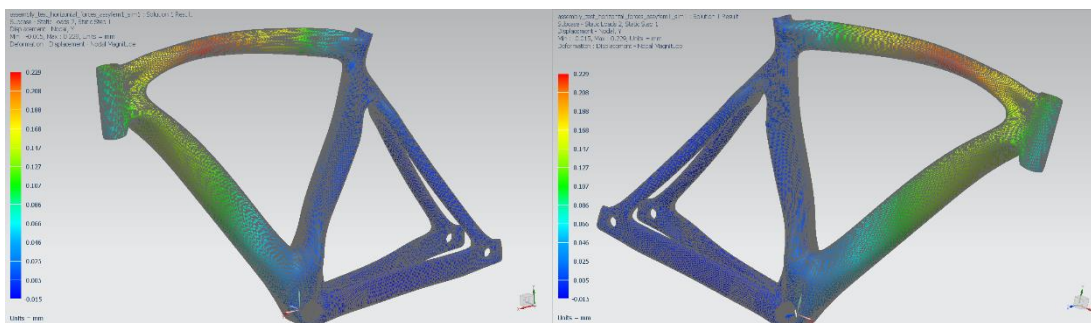
Y axis displacement Case 1



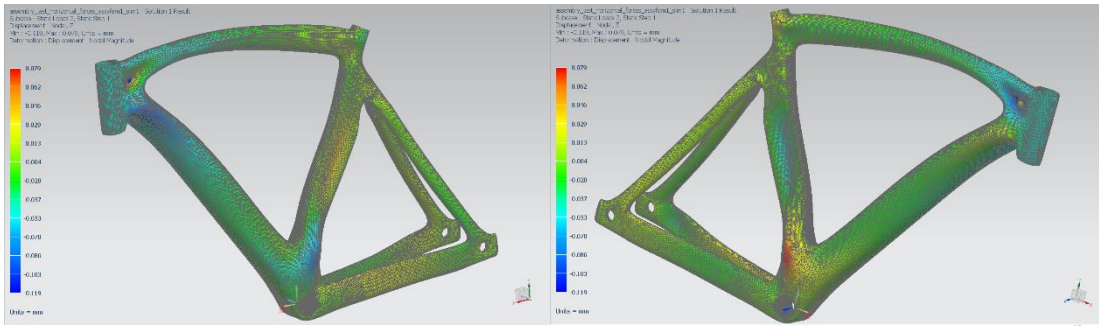
Z axis displacement Case 1



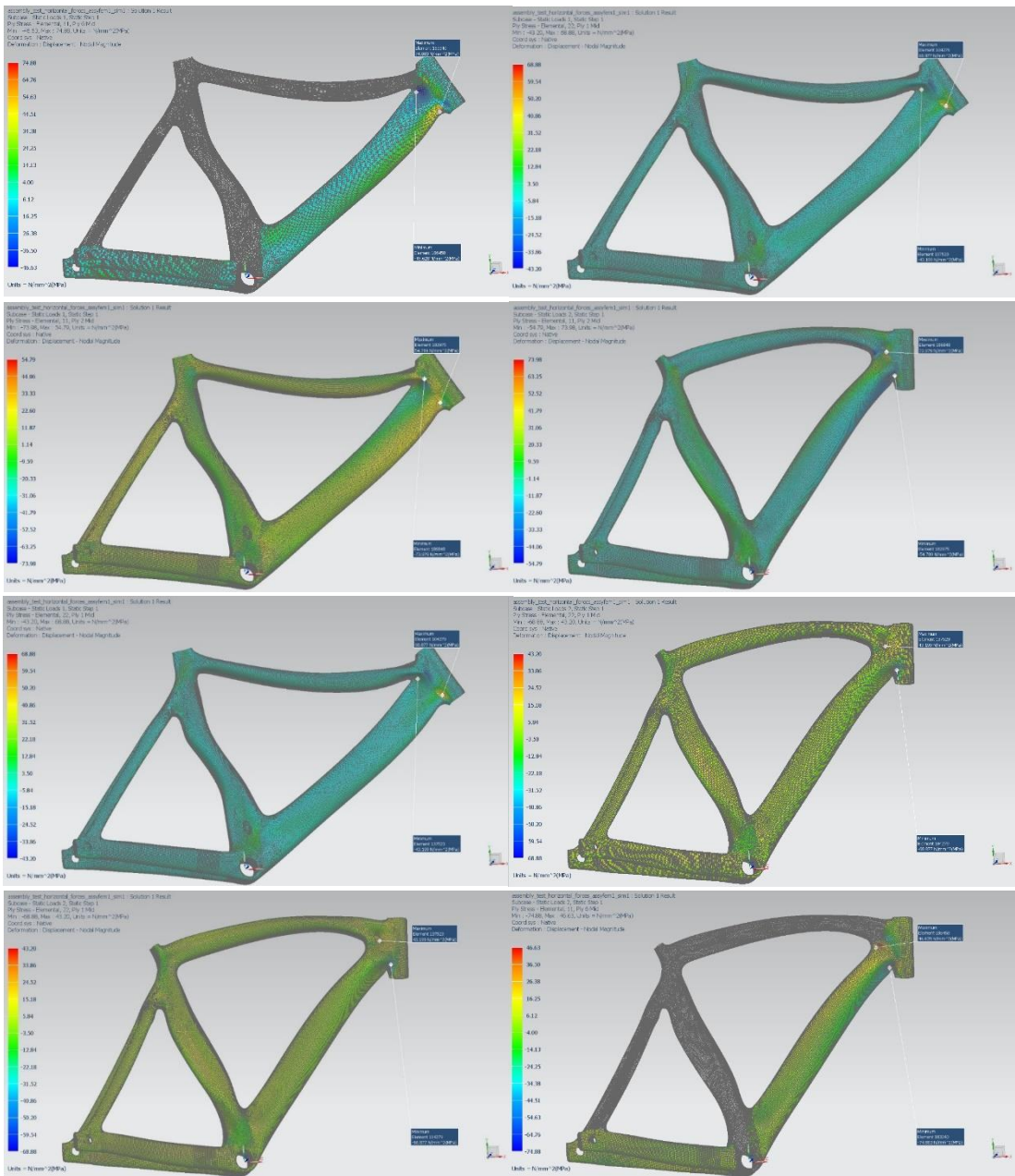
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 7^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον Χ άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 69.9 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 58.7 MPa. Κατά τον Υ άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 36.9 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 34.2 MPa. Επίσης κατά τον Χ άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 59.9 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 44.3 MPa. Κατά τον Υ άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα 37.1 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 23 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον Χ άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 59.9 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 44.3 MPa. Κατά τον Υ άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 37.1 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 21 MPa. Επίσης κατά τον Χ άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 69.9 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 6^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 54.3 MPa. Κατά τον Υ άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 37 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 34.1 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 7th Scenario

Top Summary

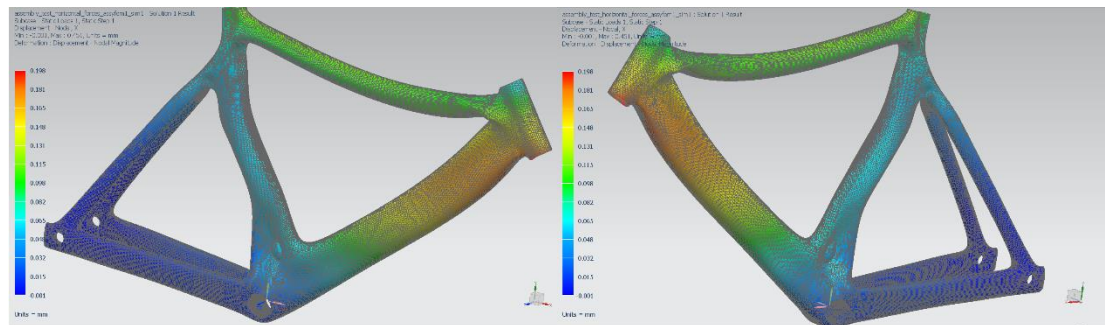
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	6	down_tube	Interlaminar	-6,99E+04	-1,79E+03	0,00E+00	-7,47E+02	1,40E-15	0,00E+00	3,40E+04
Max Stress 11	1	6	down_tube	Interlaminar	6,99E+04	1,79E+03	0,00E+00	7,47E+02	-1,40E-15	0,00E+00	3,40E+04
Min Stress 22	1	1	top_tube	Interlaminar	6,99E+02	-3,71E+04	0,00E+00	-2,92E+03	1,76E+03	8,46E+02	1,91E+04
Max Stress 22	2	1	top_tube	Interlaminar	-6,99E+02	3,71E+04	0,00E+00	2,92E+03	-1,76E+03	-8,46E+02	1,91E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	2,88E+03	-4,30E+03	0,00E+00	-5,54E+02	4,80E+01	-1,12E+02	3,63E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	2,88E+03	-4,30E+03	0,00E+00	-5,54E+02	4,80E+01	-1,12E+02	3,63E+03
Min Stress 12	1	3	top_tube	Interlaminar	-1,16E+04	-4,94E+03	0,00E+00	-3,81E+03	0,00E+00	0,00E+00	5,07E+03
Max Stress 12	2	3	top_tube	Interlaminar	1,16E+04	4,94E+03	0,00E+00	3,81E+03	0,00E+00	0,00E+00	5,07E+03
Min Stress 23	2	4	head_tube	Interlaminar	-2,54E+03	-7,20E+03	0,00E+00	6,75E+02	-2,91E+04	1,02E+04	2,42E+03
Max Stress 23	1	4	head_tube	Interlaminar	2,54E+03	7,20E+03	0,00E+00	-6,75E+02	2,91E+04	-1,02E+04	2,42E+03
Min Stress 31	1	4	head_tube	Interlaminar	1,87E+03	8,66E+03	0,00E+00	-6,58E+02	1,11E+03	-1,04E+04	3,46E+03
Max Stress 31	2	4	head_tube	Interlaminar	-1,87E+03	-8,66E+03	0,00E+00	6,58E+02	-1,11E+03	1,04E+04	3,46E+03
Min Maximum Shear Stress	1	1	chainstay_right	Interlaminar	-3,32E-01	-2,97E-01	0,00E+00	-1,19E-02	3,07E+00	-2,85E+00	2,13E-02
Max Maximum Shear Stress	1	6	down_tube	Interlaminar	6,99E+04	1,79E+03	0,00E+00	7,47E+02	-1,40E-15	0,00E+00	3,40E+04

Static Loads Case 1

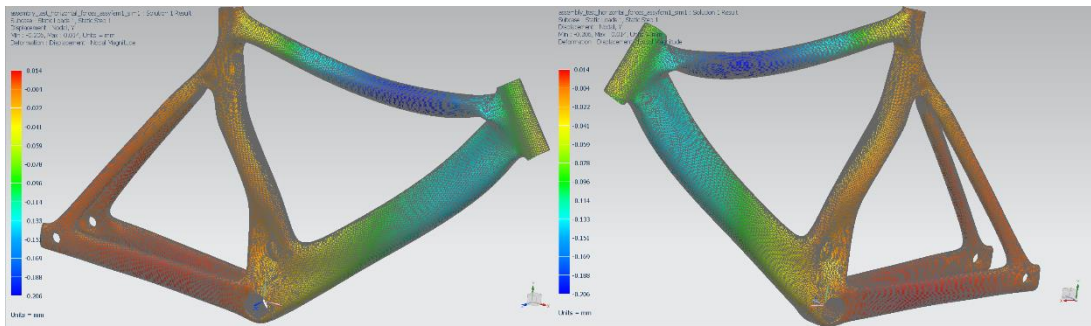
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-5,99E+04	1,04E+03	0,00E+00	-1,16E+03	-9,62E+02	-1,46E+03	3,05E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	6,99E+04	1,79E+03	0,00E+00	7,47E+02	-1,40E-15	0,00E+00	3,40E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	6,99E+02	-3,71E+04	0,00E+00	-2,92E+03	1,76E+03	8,46E+02	1,91E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-6,98E+02	3,69E+04	0,00E+00	1,29E+03	9,72E+02	-6,61E+02	1,89E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,88E+03	-4,30E+03	0,00E+00	-5,54E+02	4,80E+01	-1,12E+02	3,63E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,88E+03	-4,30E+03	0,00E+00	-5,54E+02	4,80E+01	-1,12E+02	3,63E+03
Min Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	-1,16E+04	-4,94E+03	0,00E+00	-3,81E+03	0,00E+00	0,00E+00	5,07E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	1,18E+03	-9,17E+03	0,00E+00	3,71E+03	3,77E+02	-5,64E+02	6,37E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-2,01E+03	2,05E+04	0,00E+00	2,15E+02	-1,12E+04	-7,99E+03	1,12E+04
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	2,54E+03	7,20E+03	0,00E+00	-6,75E+02	2,91E+04	-1,02E+04	2,42E+03
Min Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	1,87E+03	8,66E+03	0,00E+00	-6,58E+02	1,11E+03	-1,04E+04	3,46E+03
Max Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	2,30E+03	7,05E+03	0,00E+00	-6,20E+02	6,38E+02	7,69E+03	2,45E+03
Min Maximum Shear Stress	1	chainstay_right	Interlaminar	-3,32E-01	-2,97E-01	0,00E+00	-1,19E-02	3,07E+00	-2,85E+00	2,13E-02
Max Maximum Shear Stress	6	down_tube	Interlaminar	6,99E+04	1,79E+03	0,00E+00	7,47E+02	-1,40E-15	0,00E+00	3,40E+04

Static Loads Case 2

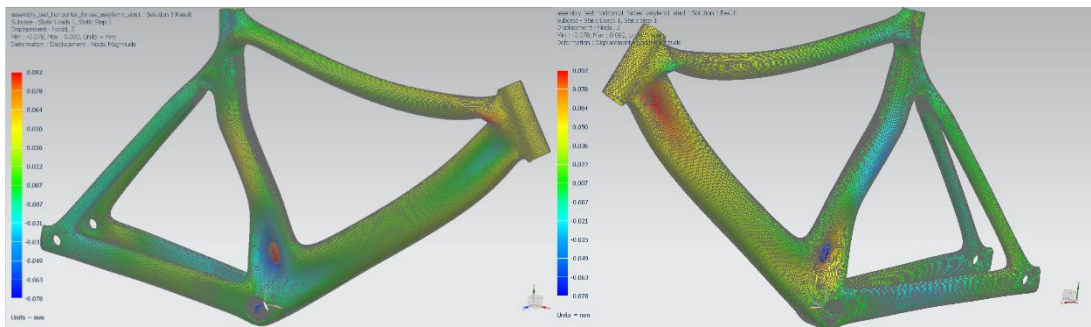
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-6,99E+04	-1,79E+03	0,00E+00	-7,47E+02	1,40E-15	0,00E+00	3,40E+04
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	5,99E+04	-1,04E+03	0,00E+00	1,16E+03	9,62E+02	1,46E+03	3,05E+04
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	6,98E+02	-3,69E+04	0,00E+00	-1,29E+03	-9,72E+02	6,61E+02	1,89E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-6,99E+02	3,71E+04	0,00E+00	2,92E+03	-1,76E+03	-8,46E+02	1,91E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,88E+03	4,30E+03	0,00E+00	5,54E+02	-4,80E+01	1,12E+02	3,63E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,88E+03	4,30E+03	0,00E+00	5,54E+02	-4,80E+01	1,12E+02	3,63E+03
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-1,18E+03	9,17E+03	0,00E+00	-3,71E+03	-3,77E+02	5,64E+02	6,37E+03
Max Stress 12	3	top_tube	Interlaminar	1,16E+04	4,94E+03	0,00E+00	3,81E+03	0,00E+00	0,00E+00	5,07E+03
Min Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	-2,54E+03	-7,20E+03	0,00E+00	6,75E+02	-2,91E+04	1,02E+04	2,42E+03
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	2,01E+03	-2,05E+04	0,00E+00	-2,15E+02	1,12E+04	7,99E+03	1,12E+04
Min Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	-2,30E+03	-7,05E+03	0,00E+00	6,20E+02	-6,38E+02	-7,69E+03	2,45E+03
Max Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	-1,87E+03	-8,66E+03	0,00E+00	6,58E+02	-1,11E+03	1,04E+04	3,46E+03
Min Maximum Shear Stress	1	chainstay_right	Interlaminar	3,32E-01	2,97E-01	0,00E+00	1,19E-02	-3,07E+00	2,85E+00	2,13E-02
Max Maximum Shear Stress	6	down_tube	Interlaminar	-6,99E+04	-1,79E+03	0,00E+00	-7,47E+02	1,40E-15	0,00E+00	3,40E+04



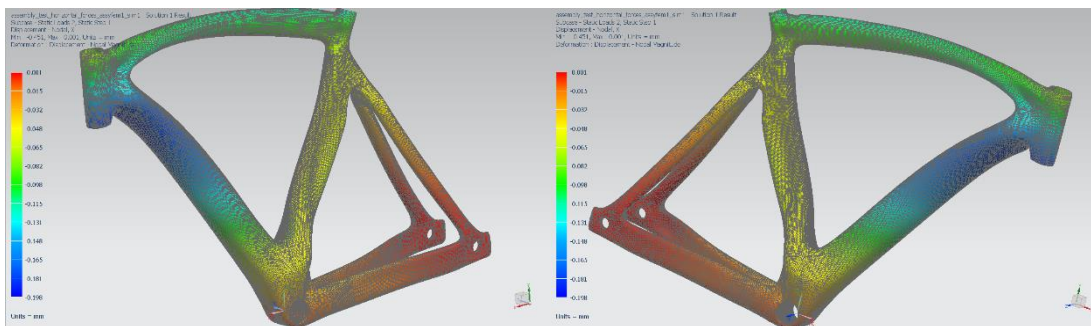
X axis displacement Case 1



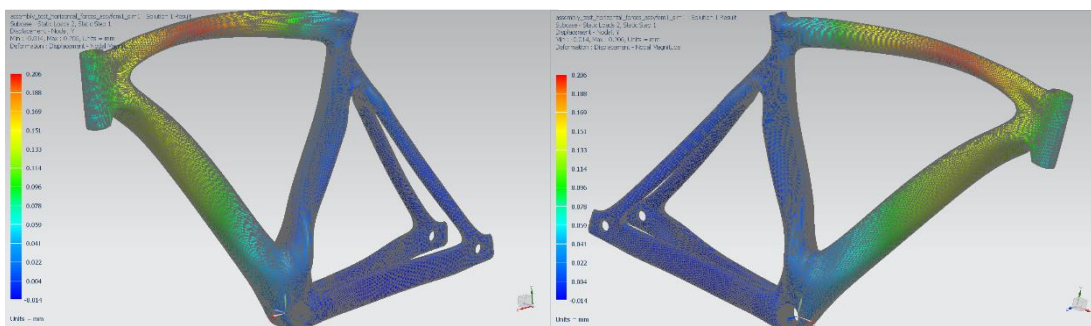
Π-6.6.57: Y axis displacement Case 1



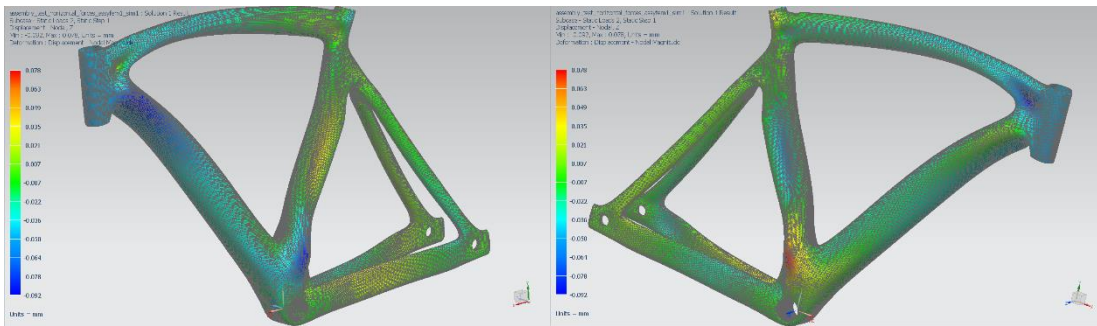
Z axis displacement Case 1



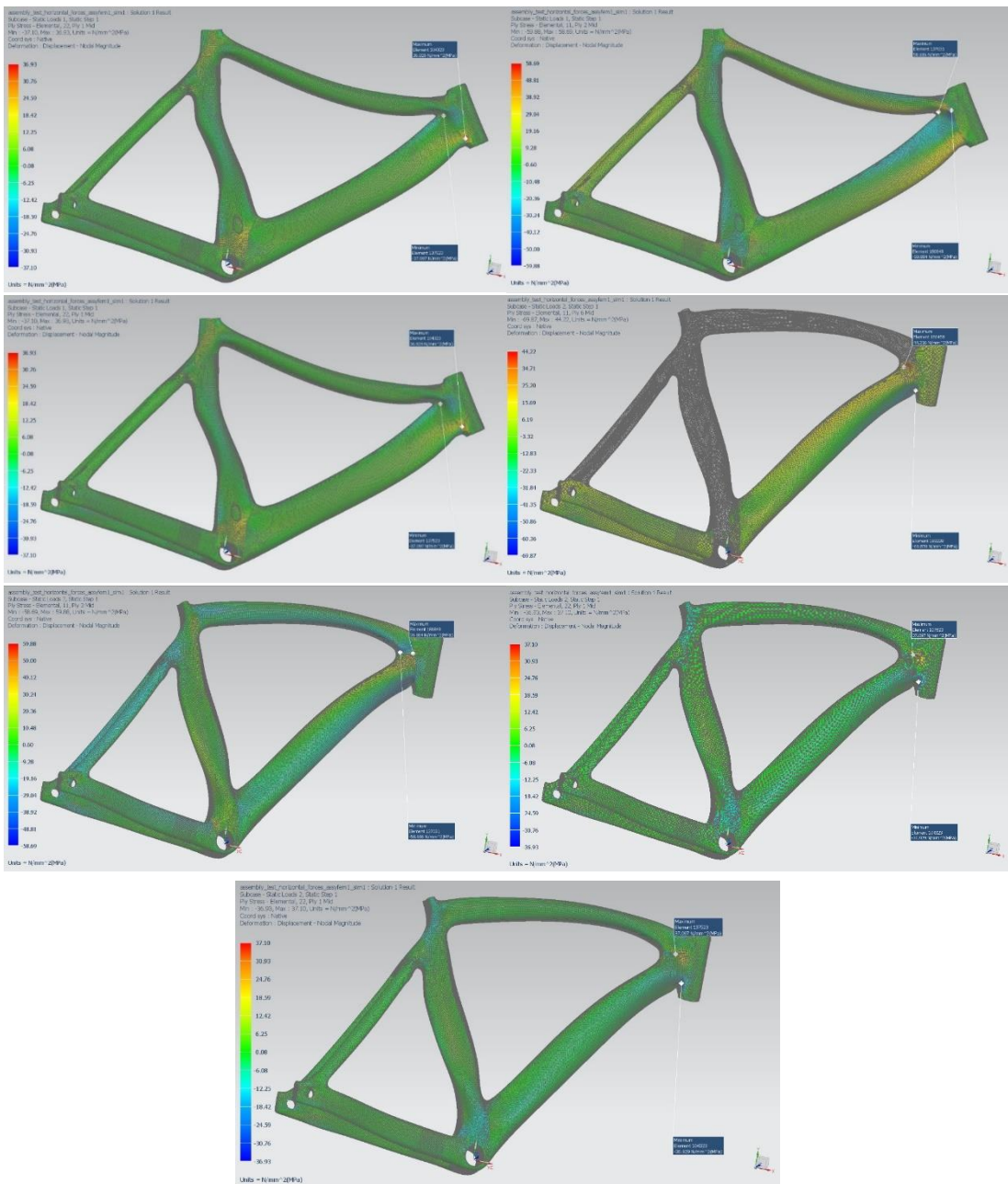
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 8^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 76.6 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 56.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 45.3 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 42.4 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 74.7 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 46.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα 40.1 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 25.2 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 74.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 46.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 40.1 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 25.2 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 76.6 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 6^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 56.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 45.3 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 42.4 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 8th Scenario

Top Summary

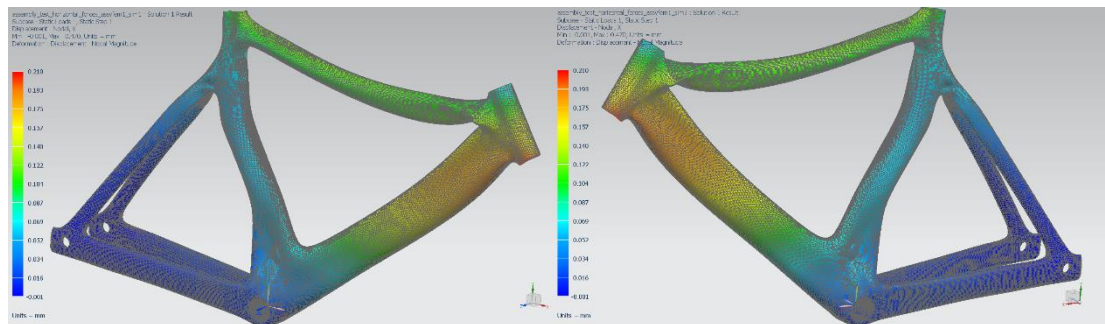
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	6	down_tube	Interlaminar	-7,66E+04	-2,14E+03	0,00E+00	-3,81E+02	5,79E-15	0,00E+00	3,72E+04
Max Stress 11	1	6	down_tube	Interlaminar	7,66E+04	2,14E+03	0,00E+00	3,81E+02	-5,79E-15	0,00E+00	3,72E+04
Min Stress 22	2	1	head_tube	Interlaminar	-1,80E+03	-4,53E+04	0,00E+00	-1,91E+03	-1,28E+03	6,65E+02	2,18E+04
Max Stress 22	1	1	head_tube	Interlaminar	1,80E+03	4,53E+04	0,00E+00	1,91E+03	1,28E+03	-6,65E+02	2,18E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	2,98E+03	-4,21E+03	0,00E+00	-6,50E+02	7,96E+01	-1,16E+02	3,66E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	2,98E+03	-4,21E+03	0,00E+00	-6,50E+02	7,96E+01	-1,16E+02	3,66E+03
Min Stress 12	2	1	down_tube	Interlaminar	2,01E+04	3,08E+03	0,00E+00	-4,61E+03	1,66E+03	7,02E+02	9,68E+03
Max Stress 12	1	1	down_tube	Interlaminar	-2,01E+04	-3,08E+03	0,00E+00	4,61E+03	-1,66E+03	-7,02E+02	9,68E+03
Min Stress 23	2	3	head_tube	Interlaminar	4,39E+02	-1,38E+04	0,00E+00	-4,47E+02	-2,98E+04	1,13E+04	7,14E+03
Max Stress 23	1	3	head_tube	Interlaminar	-4,39E+02	1,38E+04	0,00E+00	4,47E+02	2,98E+04	-1,13E+04	7,14E+03
Min Stress 31	1	3	head_tube	Interlaminar	-4,39E+02	1,38E+04	0,00E+00	4,47E+02	2,98E+04	-1,13E+04	7,14E+03
Max Stress 31	2	3	head_tube	Interlaminar	4,39E+02	-1,38E+04	0,00E+00	-4,47E+02	-2,98E+04	1,13E+04	7,14E+03
Min Maximum Shear Stress	1	5	chainstay_right	Interlaminar	-7,80E-01	-8,15E-01	0,00E+00	-1,20E-02	4,72E+00	2,02E+00	2,14E-02
Max Maximum Shear Stress	1	2	down_tube	Interlaminar	-7,47E+04	1,12E+03	0,00E+00	-9,78E+02	-1,75E+03	-1,61E+03	3,79E+04

Static Loads Case 1

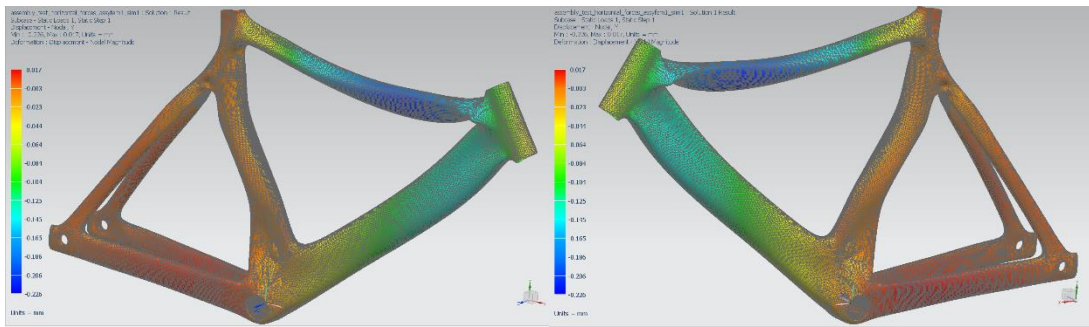
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-7,47E+04	1,12E+03	0,00E+00	-9,78E+02	-1,75E+03	-1,61E+03	3,79E+04
Max Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	7,66E+04	2,14E+03	0,00E+00	3,81E+02	-5,79E-15	0,00E+00	3,72E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	1,86E+03	-4,01E+04	0,00E+00	-2,71E+03	1,78E+03	7,88E+02	2,12E+04
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	1,80E+03	4,53E+04	0,00E+00	1,91E+03	1,28E+03	-6,65E+02	2,18E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,98E+03	-4,21E+03	0,00E+00	-6,50E+02	7,96E+01	-1,16E+02	3,66E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,98E+03	-4,21E+03	0,00E+00	-6,50E+02	7,96E+01	-1,16E+02	3,66E+03
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	4,38E+03	1,35E+04	0,00E+00	-2,95E+03	-1,62E+02	-5,51E+02	5,42E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-2,01E+04	-3,08E+03	0,00E+00	4,61E+03	-1,66E+03	-7,02E+02	9,68E+03
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	1,59E+04	-4,16E+03	0,00E+00	2,79E+02	-1,03E+04	6,87E+03	1,01E+04
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-4,39E+02	1,38E+04	0,00E+00	4,47E+02	2,98E+04	-1,13E+04	7,14E+03
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-4,39E+02	1,38E+04	0,00E+00	4,47E+02	2,98E+04	-1,13E+04	7,14E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	-6,55E+01	1,30E+04	0,00E+00	4,85E+02	1,23E+03	8,82E+03	6,54E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	-7,80E-01	-8,15E-01	0,00E+00	-1,20E-02	4,72E+00	2,02E+00	2,14E-02
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	-7,47E+04	1,12E+03	0,00E+00	-9,78E+02	-1,75E+03	-1,61E+03	3,79E+04

Static Loads Case 2

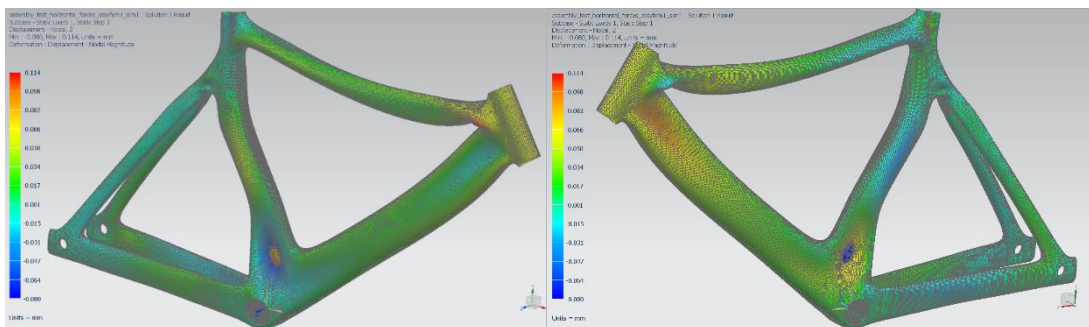
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	6	down_tube	Interlaminar	-7,66E+04	-2,14E+03	0,00E+00	-3,81E+02	5,79E-15	0,00E+00	3,72E+04
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	7,47E+04	-1,12E+03	0,00E+00	9,78E+02	1,75E+03	1,61E+03	3,79E+04
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-1,80E+03	-4,53E+04	0,00E+00	-1,91E+03	-1,28E+03	6,65E+02	2,18E+04
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-1,86E+03	4,01E+04	0,00E+00	2,71E+03	-1,78E+03	-7,88E+02	2,12E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,98E+03	4,21E+03	0,00E+00	6,50E+02	-7,96E+01	1,16E+02	3,66E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,98E+03	4,21E+03	0,00E+00	6,50E+02	-7,96E+01	1,16E+02	3,66E+03
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	2,01E+04	3,08E+03	0,00E+00	-4,61E+03	1,66E+03	7,02E+02	9,68E+03
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-4,38E+03	-1,35E+04	0,00E+00	2,95E+03	1,62E+02	5,51E+02	5,42E+03
Min Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	4,39E+02	-1,38E+04	0,00E+00	-4,47E+02	-2,98E+04	1,13E+04	7,14E+03
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-1,59E+04	4,16E+03	0,00E+00	-2,79E+02	1,03E+04	-6,87E+03	1,01E+04
Min Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	6,55E+01	-1,30E+04	0,00E+00	-4,85E+02	-1,23E+03	-8,82E+03	6,54E+03
Max Stress 31	3	head_tube	Interlaminar	4,39E+02	-1,38E+04	0,00E+00	-4,47E+02	-2,98E+04	1,13E+04	7,14E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	7,80E-01	8,15E-01	0,00E+00	1,20E-02	-4,72E+00	-2,02E+00	2,14E-02
Max Maximum Shear Stress	2	down_tube	Interlaminar	7,47E+04	-1,12E+03	0,00E+00	9,78E+02	1,75E+03	1,61E+03	3,79E+04



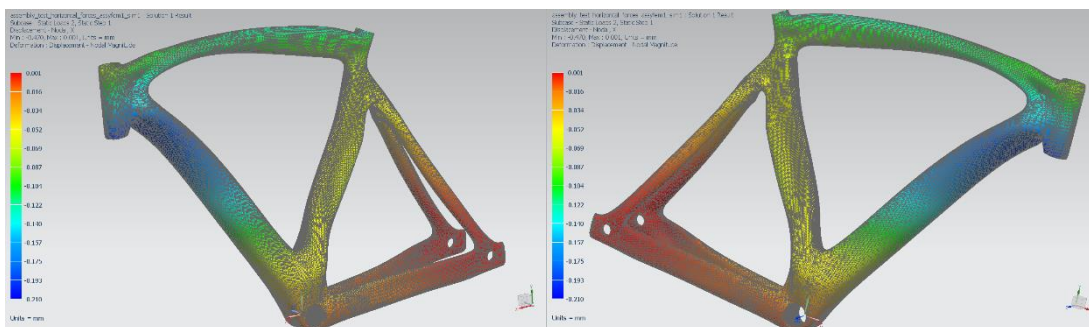
X axis displacement Case 1



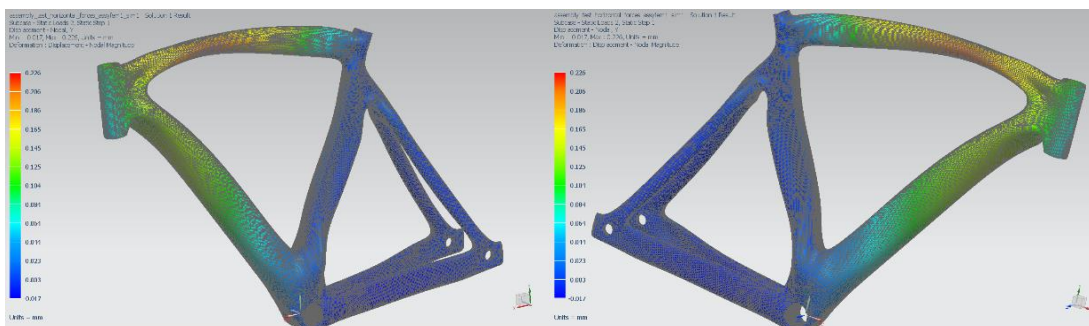
Y axis displacement Case 1



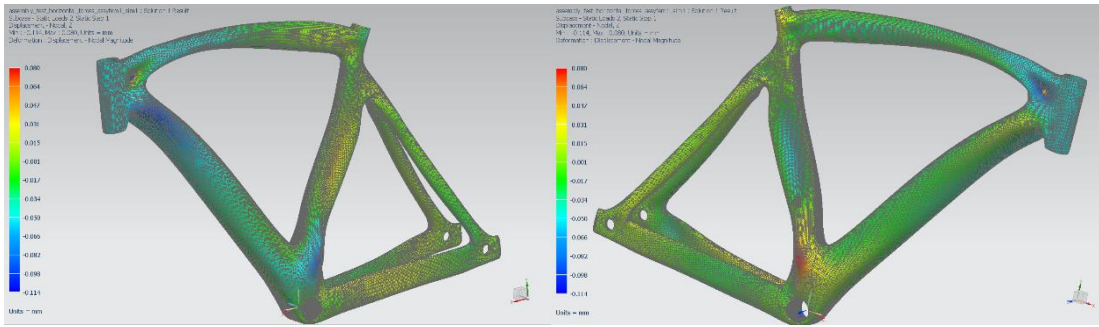
Z axis displacement Case 1



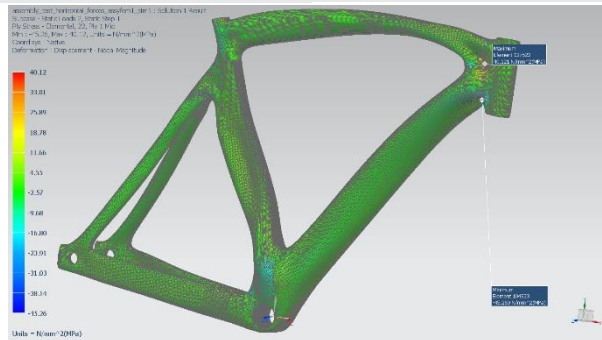
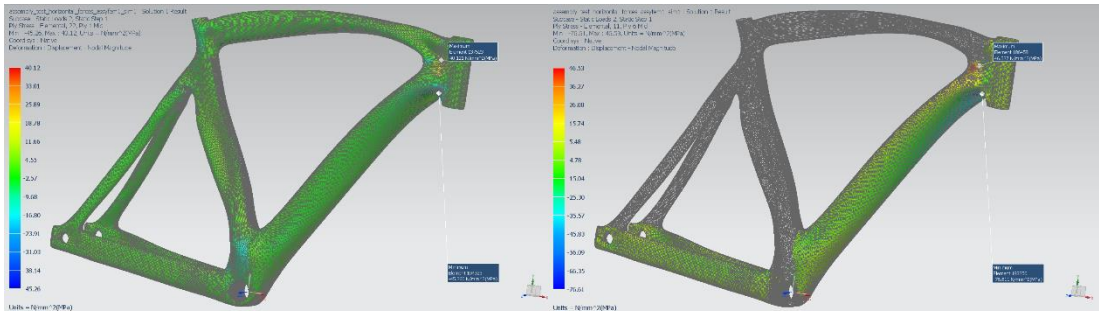
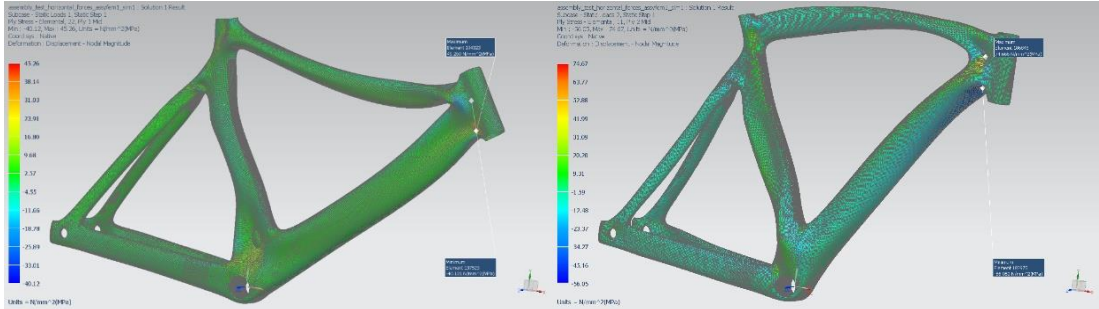
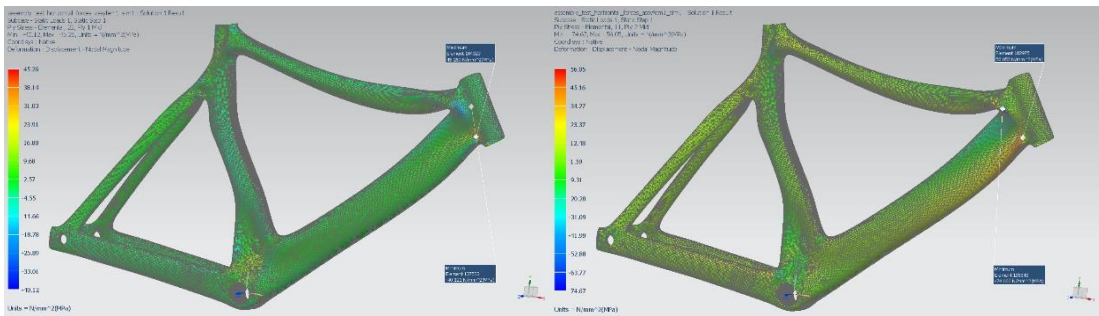
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 9^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 8^η στρώση τα 55 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 44.1 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 25.6 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 25.2 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 38 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 37.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα 22.5 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 17.3 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 38 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 37.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 22.5 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 17.3 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 55 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 8^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 44.1 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 25.6 MPa στην 7^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 25.2 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

• 9th Scenario

Top Summary

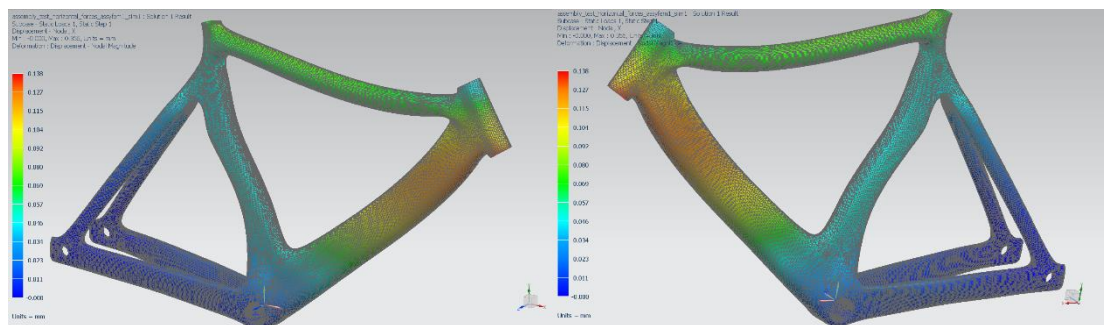
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	8	down_tube	Interlaminar	-5,50E+04	-1,72E+03	0,00E+00	-8,72E+02	-5,69E-15	7,18E-14	2,66E+04
Max Stress 11	1	8	down_tube	Interlaminar	5,50E+04	1,72E+03	0,00E+00	8,72E+02	5,69E-15	-7,18E-14	2,66E+04
Min Stress 22	2	7	down_tube	Interlaminar	-8,72E+03	-2,56E+04	0,00E+00	4,02E+02	3,13E+01	-5,70E+02	8,46E+03
Max Stress 22	1	7	down_tube	Interlaminar	8,72E+03	2,56E+04	0,00E+00	-4,02E+02	-3,13E+01	5,70E+02	8,46E+03
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	1,57E+03	-5,07E+03	0,00E+00	-4,09E+02	1,10E+01	-9,81E+01	3,35E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	1,57E+03	-5,07E+03	0,00E+00	-4,09E+02	1,10E+01	-9,81E+01	3,35E+03
Min Stress 12	1	5	top_tube	Interlaminar	-1,45E+04	-6,61E+03	0,00E+00	-2,73E+03	-1,12E+02	-1,23E+02	4,81E+03
Max Stress 12	2	5	top_tube	Interlaminar	1,45E+04	6,61E+03	0,00E+00	2,73E+03	1,12E+02	1,23E+02	4,81E+03
Min Stress 23	2	6	head_tube	Interlaminar	-2,21E+03	-4,45E+03	0,00E+00	4,38E+02	-2,06E+04	8,99E+03	1,20E+03
Max Stress 23	1	6	head_tube	Interlaminar	2,21E+03	4,45E+03	0,00E+00	-4,38E+02	2,06E+04	-8,99E+03	1,20E+03
Min Stress 31	2	4	down_tube	Interlaminar	1,77E+04	-1,38E+03	0,00E+00	2,28E+02	1,70E+03	-1,23E+04	9,54E+03
Max Stress 31	1	4	down_tube	Interlaminar	-1,77E+04	1,38E+03	0,00E+00	-2,28E+02	-1,70E+03	1,23E+04	9,54E+03
Min Maximum Shear Stress	1	8	chainstay_right	Interlaminar	-1,89E-01	-1,71E-01	0,00E+00	-2,26E-02	-7,91E-17	4,84E-16	2,42E-02
Max Maximum Shear Stress	1	8	down_tube	Interlaminar	5,49E+04	1,43E+03	0,00E+00	-4,95E+02	1,27E-13	-1,34E-13	2,67E+04

Static Loads Case 1

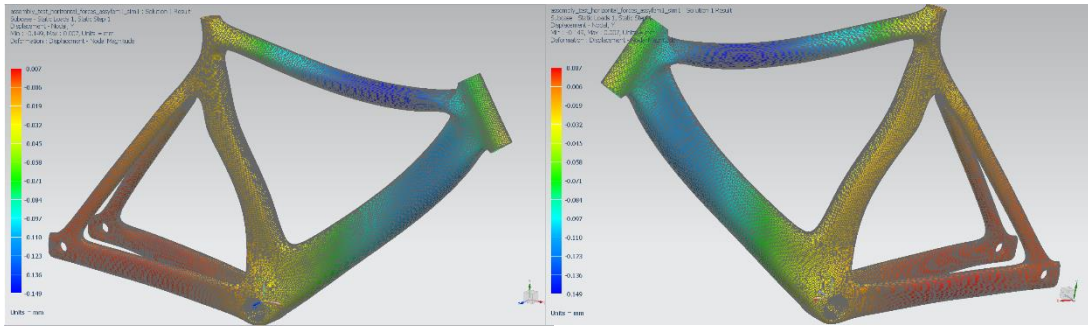
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	-3,80E+04	8,60E+02	0,00E+00	4,88E+02	-4,59E+01	1,11E+02	1,94E+04
Max Stress 11	8	down_tube	Interlaminar	5,50E+04	1,72E+03	0,00E+00	8,72E+02	5,69E-15	-7,18E-14	2,66E+04
Min Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	-4,49E+03	-2,25E+04	0,00E+00	-1,55E+03	1,92E+02	-1,94E+01	9,13E+03
Max Stress 22	7	down_tube	Interlaminar	8,72E+03	2,56E+04	0,00E+00	-4,02E+02	-3,13E+01	5,70E+02	8,46E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,57E+03	-5,07E+03	0,00E+00	-4,09E+02	1,10E+01	-9,81E+01	3,35E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,57E+03	-5,07E+03	0,00E+00	-4,09E+02	1,10E+01	-9,81E+01	3,35E+03
Min Stress 12	5	top_tube	Interlaminar	-1,45E+04	-6,61E+03	0,00E+00	-2,73E+03	-1,12E+02	-1,23E+02	4,81E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	3,83E+03	-6,50E+03	0,00E+00	2,29E+03	-1,63E+02	-3,04E+02	5,65E+03
Min Stress 23	6	head_tube	Interlaminar	3,84E+01	9,72E+03	0,00E+00	-6,87E+01	-1,37E+04	-4,73E+03	4,84E+03
Max Stress 23	6	head_tube	Interlaminar	2,21E+03	4,45E+03	0,00E+00	-4,38E+02	2,06E+04	-8,99E+03	1,20E+03
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	1,87E+03	1,35E+04	0,00E+00	-7,66E+02	3,92E+03	-1,17E+04	5,86E+03
Max Stress 31	4	down_tube	Interlaminar	-1,77E+04	1,38E+03	0,00E+00	-2,28E+02	-1,70E+03	1,23E+04	9,54E+03
Min Maximum Shear Stress	8	chainstay_right	Interlaminar	-1,89E-01	-1,71E-01	0,00E+00	-2,26E-02	-7,91E-17	4,84E-16	2,42E-02
Max Maximum Shear Stress	8	down_tube	Interlaminar	5,49E+04	1,43E+03	0,00E+00	-4,95E+02	1,27E-13	-1,34E-13	2,67E+04

Static Loads Case 2

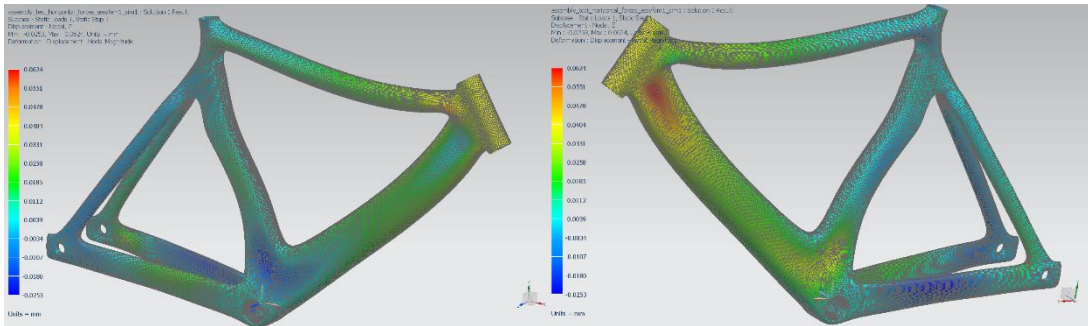
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	8	down_tube	Interlaminar	-5,50E+04	-1,72E+03	0,00E+00	-8,72E+02	-5,69E-15	7,18E-14	2,66E+04
Max Stress 11	2	down_tube	Interlaminar	3,80E+04	-8,60E+02	0,00E+00	-4,88E+02	4,59E+01	-1,11E+02	1,94E+04
Min Stress 22	7	down_tube	Interlaminar	-8,72E+03	-2,56E+04	0,00E+00	4,02E+02	3,13E+01	-5,70E+02	8,46E+03
Max Stress 22	1	top_tube	Interlaminar	4,49E+03	2,25E+04	0,00E+00	1,55E+03	-1,92E+02	1,94E+01	9,13E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,57E+03	5,07E+03	0,00E+00	4,09E+02	-1,10E+01	9,81E+01	3,35E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,57E+03	5,07E+03	0,00E+00	4,09E+02	-1,10E+01	9,81E+01	3,35E+03
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-3,83E+03	6,50E+03	0,00E+00	-2,29E+03	1,63E+01	3,04E+02	5,65E+03
Max Stress 12	5	top_tube	Interlaminar	1,45E+04	6,61E+03	0,00E+00	2,73E+03	1,12E+02	1,23E+02	4,81E+03
Min Stress 23	6	head_tube	Interlaminar	-2,21E+03	-4,45E+03	0,00E+00	4,38E+02	-2,06E+04	8,99E+03	1,20E+03
Max Stress 23	6	head_tube	Interlaminar	-3,84E+01	-9,72E+03	0,00E+00	6,87E+01	1,37E+04	4,73E+03	4,84E+03
Min Stress 31	4	down_tube	Interlaminar	1,77E+04	-1,38E+03	0,00E+00	2,28E+02	1,70E+03	-1,23E+04	9,54E+03
Max Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-1,87E+03	-1,35E+04	0,00E+00	7,66E+02	-3,92E+03	1,17E+04	5,86E+03
Min Maximum Shear Stress	8	chainstay_right	Interlaminar	1,89E-01	1,71E-01	0,00E+00	2,26E-02	7,91E-17	-4,84E-16	2,42E-02
Max Maximum Shear Stress	8	down_tube	Interlaminar	-5,49E+04	-1,43E+03	0,00E+00	4,95E+02	-1,27E-13	1,34E-13	2,67E+04



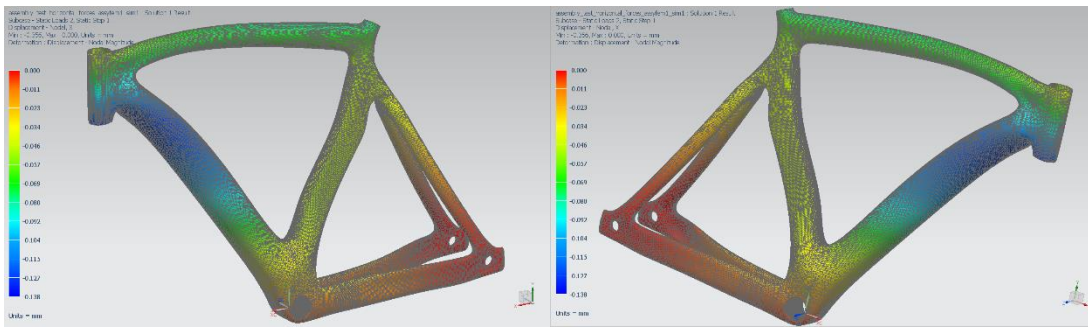
X axis displacement Case 1



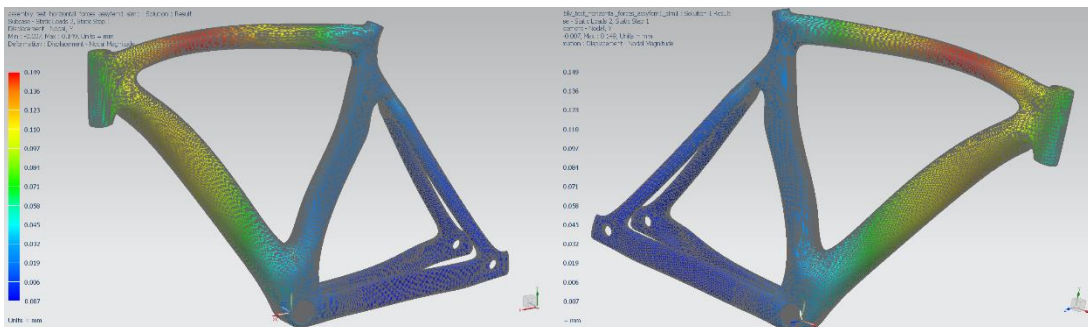
Y axis displacement Case 1



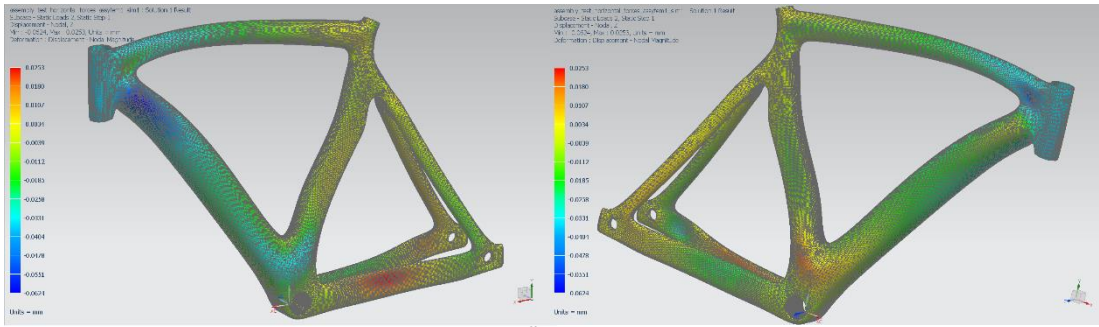
Z axis displacement Case 1



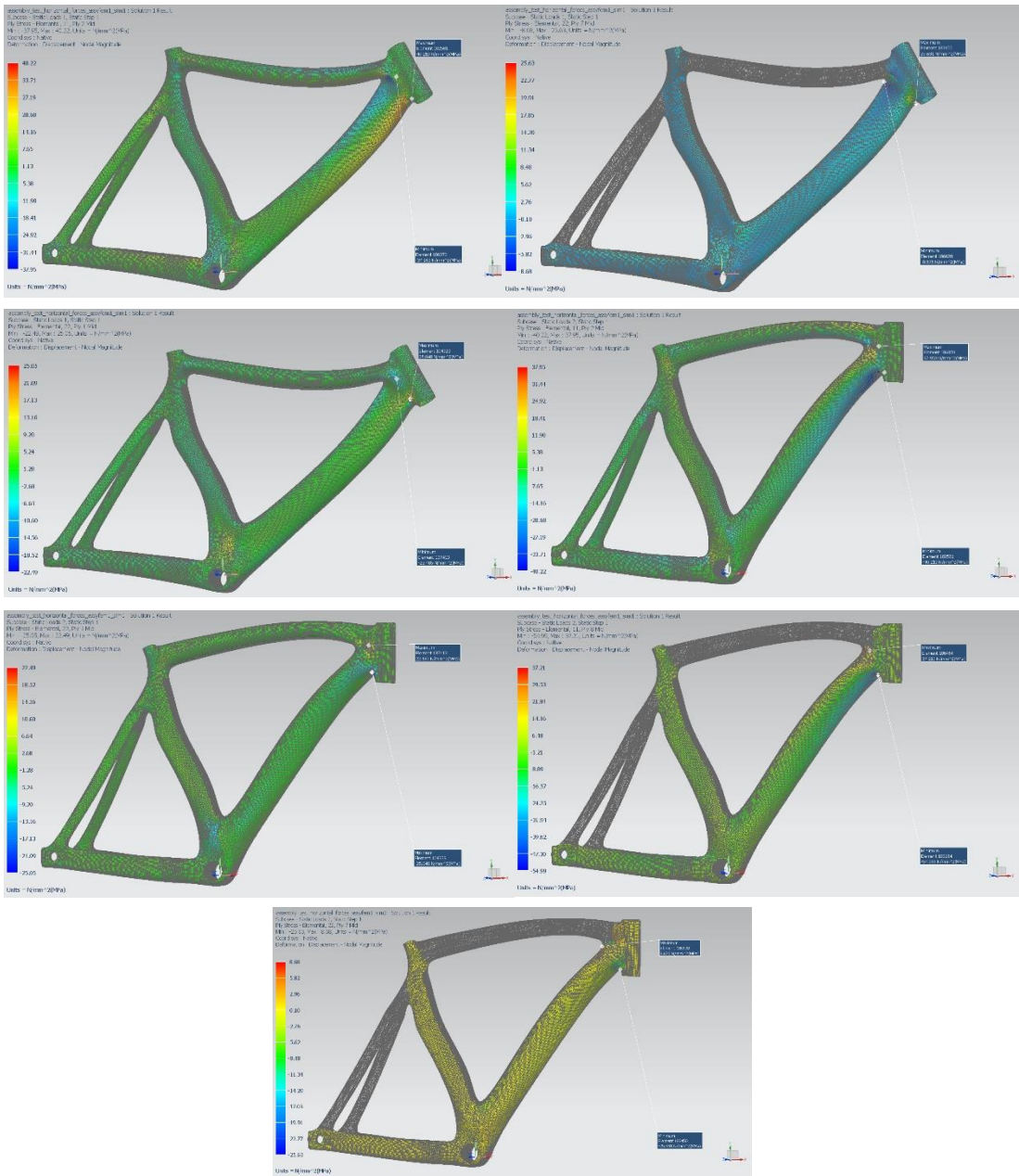
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Π-6.6.75: Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 10^ο σενάριο (δεύτερη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή εμπρός και κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 75 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 72.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 7.1 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 6.9 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 69.5 MPa στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 65 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω και κάτω σωλήνα 5.6 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 5.3 MPa. Στην πρώτη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην επαφή άνω-κάτω σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 69.5 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 65 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 5.6 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 5.3 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 75 MPa στην ένωση εμπρός και κάτω σωλήνα στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 72.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 7.1 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 6.9 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- 10th Scenario

Top Summary

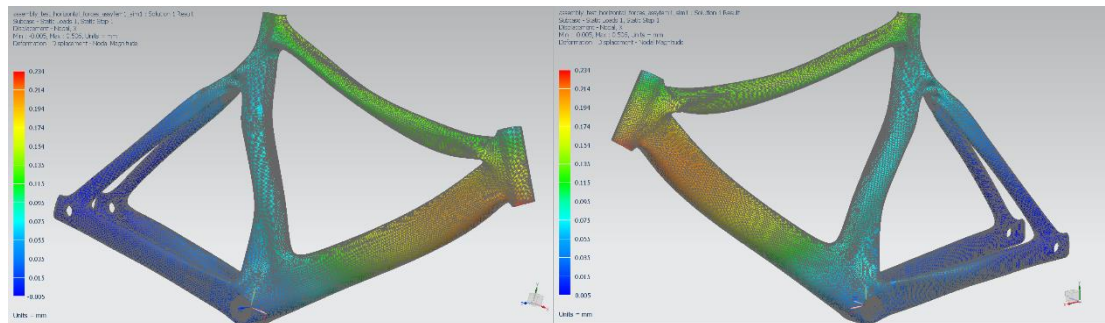
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	1	top_tube	Interlaminar	-7,50E+04	-1,49E+03	0,00E+00	-4,53E+03	-1,16E+03	-1,22E+03	3,70E+04
Max Stress 11	2	1	top_tube	Interlaminar	7,50E+04	1,49E+03	0,00E+00	4,53E+03	1,16E+03	1,22E+03	3,70E+04
Min Stress 22	1	3	top_tube	Interlaminar	-1,62E+03	-7,13E+03	0,00E+00	-3,71E+03	0,00E+00	0,00E+00	4,62E+03
Max Stress 22	2	3	top_tube	Interlaminar	1,62E+03	7,13E+03	0,00E+00	3,71E+03	0,00E+00	0,00E+00	4,62E+03
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	1,15E+03	-3,31E+02	0,00E+00	-3,44E+02	6,50E+01	-5,61E+01	8,16E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	1,15E+03	-3,31E+02	0,00E+00	-3,44E+02	6,50E+01	-5,61E+01	8,16E+02
Min Stress 12	1	1	top_tube	Interlaminar	9,07E+03	6,01E+02	0,00E+00	-6,21E+03	-5,63E+00	-2,19E+02	7,52E+03
Max Stress 12	2	1	top_tube	Interlaminar	-9,07E+03	-6,01E+02	0,00E+00	6,21E+03	5,63E+00	2,19E+02	7,52E+03
Min Stress 23	1	7	head_tube	Interlaminar	3,77E+03	2,90E+03	0,00E+00	9,26E+02	-3,03E+03	-1,01E+03	1,02E+03
Max Stress 23	2	7	head_tube	Interlaminar	-3,77E+03	-2,90E+03	0,00E+00	-9,26E+02	3,03E+03	1,01E+03	1,02E+03
Min Stress 31	2	2	seatstay_left	Interlaminar	4,01E+03	-9,58E+02	0,00E+00	-1,28E+03	-2,85E+02	-2,63E+03	2,80E+03
Max Stress 31	1	2	seatstay_left	Interlaminar	-4,01E+03	9,58E+02	0,00E+00	1,28E+03	2,85E+02	2,63E+03	2,80E+03
Min Maximum Shear Stress	1	5	chainstay_right	Interlaminar	5,42E-01	6,22E-01	0,00E+00	4,76E-02	-1,25E+02	2,50E+02	6,22E-02
Max Maximum Shear Stress	1	1	top_tube	Interlaminar	-7,50E+04	-1,49E+03	0,00E+00	-4,53E+03	-1,16E+03	-1,22E+03	3,70E+04

Static Loads Case 1

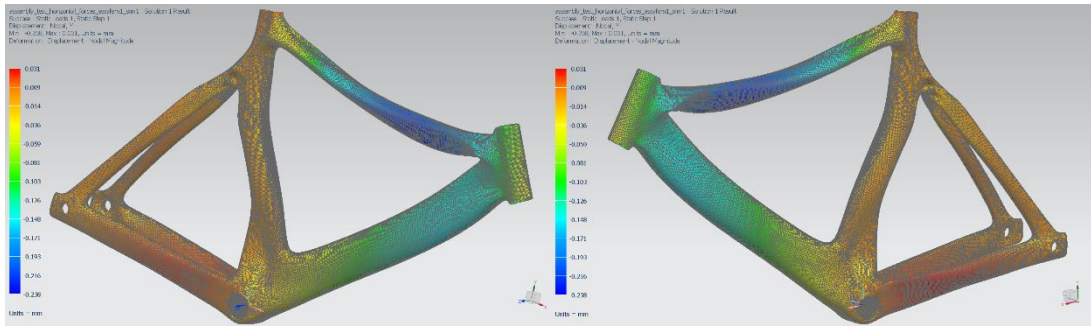
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	-7,50E+04	-1,49E+03	0,00E+00	-4,53E+03	-1,16E+03	-1,22E+03	3,70E+04
Max Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	6,95E+04	2,26E+03	0,00E+00	1,91E+03	-1,59E+02	1,09E+02	3,37E+04
Min Stress 22	3	top_tube	Interlaminar	-1,62E+03	-7,13E+03	0,00E+00	-3,71E+03	0,00E+00	0,00E+00	4,62E+03
Max Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	1,47E+04	5,62E+03	0,00E+00	2,64E+03	2,59E+02	6,30E+01	5,26E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,15E+03	-3,31E+02	0,00E+00	-3,44E+02	6,50E+01	-5,61E+01	8,16E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,15E+03	-3,31E+02	0,00E+00	-3,44E+02	6,50E+01	-5,61E+01	8,16E+02
Min Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	9,07E+03	6,01E+02	0,00E+00	-6,21E+03	-5,63E+00	-2,19E+02	7,52E+03
Max Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	-8,76E+02	-3,11E+03	0,00E+00	5,28E+03	-4,49E+02	-4,22E+02	5,39E+03
Min Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	3,77E+03	2,90E+03	0,00E+00	9,26E+02	-3,03E+03	-1,01E+03	1,02E+03
Max Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-1,06E+02	2,86E+03	0,00E+00	-6,62E+02	2,68E+03	-4,77E+02	1,62E+03
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	5,32E+03	3,06E+03	0,00E+00	-9,75E+02	-2,15E+03	-2,28E+03	1,49E+03
Max Stress 31	2	seatstay_left	Interlaminar	-4,01E+03	9,58E+02	0,00E+00	1,28E+03	2,85E+02	2,63E+03	2,80E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	5,42E-01	6,22E-01	0,00E+00	4,76E-02	-1,25E+02	2,50E+02	6,22E-02
Max Maximum	1	top_tube	Interlaminar	-7,50E+04	-1,49E+03	0,00E+00	-4,53E+03	-1,16E+03	-1,22E+03	3,70E+04

Static Loads Case 2

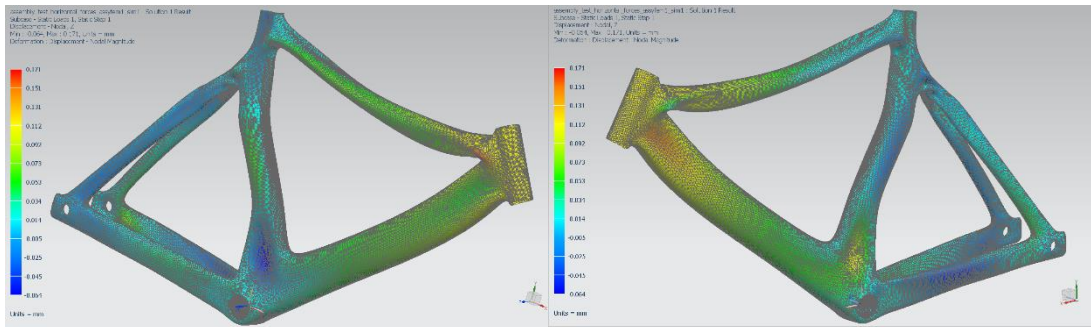
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	head_tube	Interlaminar	-6,95E+04	-2,26E+03	0,00E+00	-1,91E+03	1,59E+02	-1,09E+02	3,37E+04
Max Stress 11	1	top_tube	Interlaminar	7,50E+04	1,49E+03	0,00E+00	4,53E+03	1,16E+03	1,22E+03	3,70E+04
Min Stress 22	1	head_tube	Interlaminar	-1,47E+04	-5,62E+03	0,00E+00	-2,64E+03	-2,59E+02	-6,30E+01	5,26E+03
Max Stress 22	3	top_tube	Interlaminar	1,62E+03	7,13E+03	0,00E+00	3,71E+03	0,00E+00	0,00E+00	4,62E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,15E+03	3,31E+02	0,00E+00	3,44E+02	-6,50E+01	5,61E+01	8,16E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,15E+03	3,31E+02	0,00E+00	3,44E+02	-6,50E+01	5,61E+01	8,16E+02
Min Stress 12	1	down_tube	Interlaminar	8,76E+02	3,11E+03	0,00E+00	-5,28E+03	4,49E+02	4,22E+02	5,39E+03
Max Stress 12	1	top_tube	Interlaminar	-9,07E+03	-6,01E+02	0,00E+00	6,21E+03	5,63E+00	2,19E+02	7,52E+03
Min Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	1,06E+02	-2,86E+03	0,00E+00	6,62E+02	-2,68E+03	4,77E+02	1,62E+03
Max Stress 23	7	head_tube	Interlaminar	-3,77E+03	-2,90E+03	0,00E+00	-9,26E+02	3,03E+03	1,01E+03	1,02E+03
Min Stress 31	2	seatstay_left	Interlaminar	4,01E+03	-9,58E+02	0,00E+00	-1,28E+03	-2,85E+02	-2,63E+03	2,80E+03
Max Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-5,32E+03	-3,06E+03	0,00E+00	9,75E+02	2,15E+03	2,28E+03	1,49E+03
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_right	Interlaminar	-5,42E-01	-6,22E-01	0,00E+00	-4,76E-02	1,25E+02	-2,50E+02	6,22E-02
Max Maximum	1	top_tube	Interlaminar	7,50E+04	1,49E+03	0,00E+00	4,53E+03	1,16E+03	1,22E+03	3,70E+04



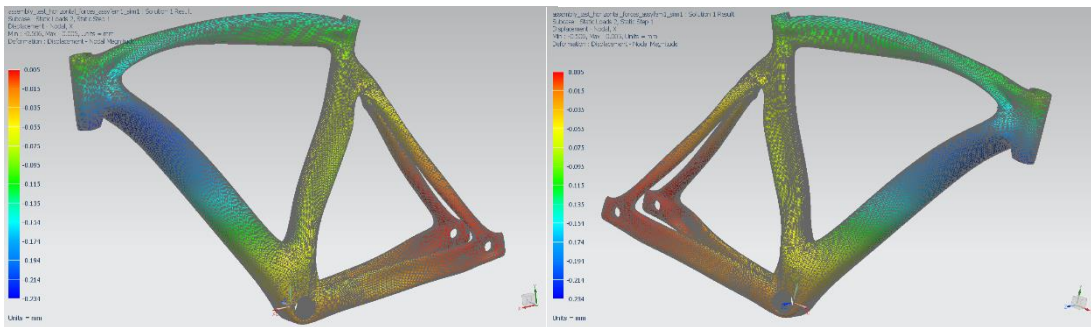
X axis displacement Case 1



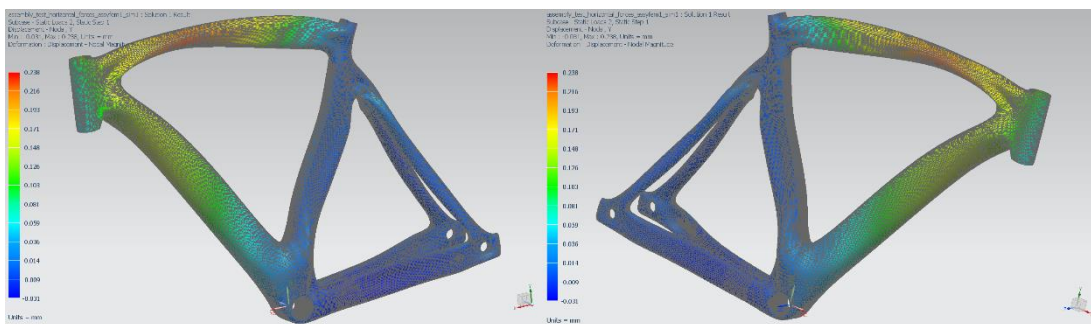
Y axis displacement Case 1



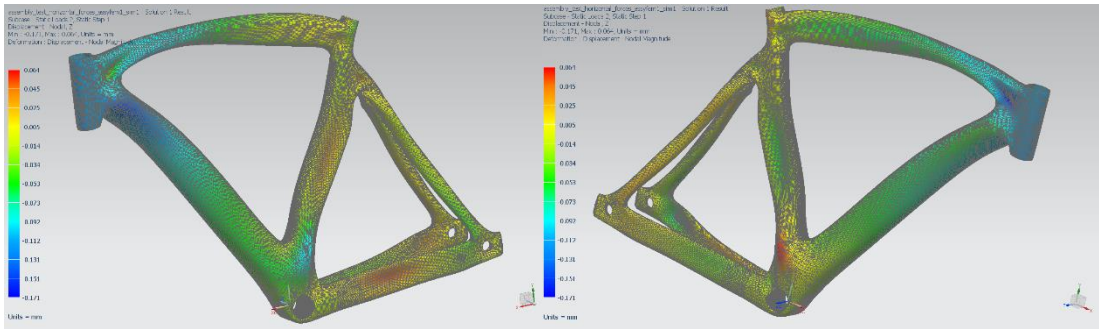
Z axis displacement Case 1



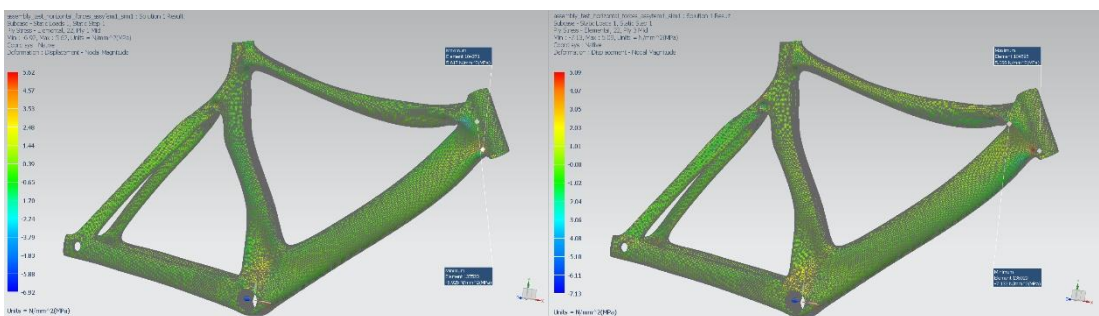
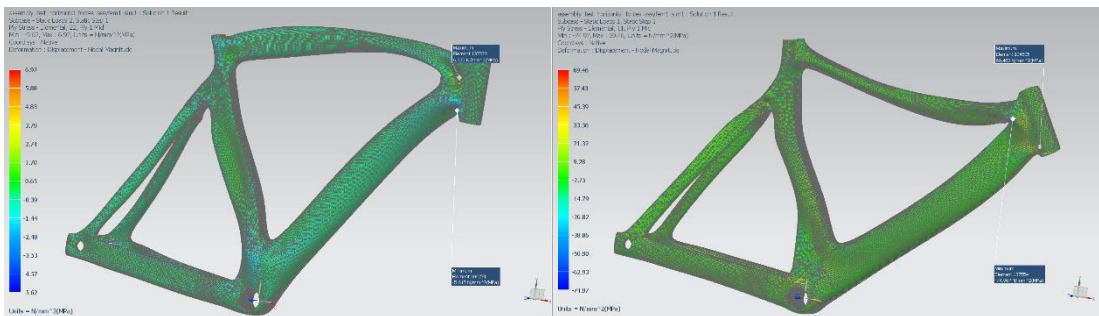
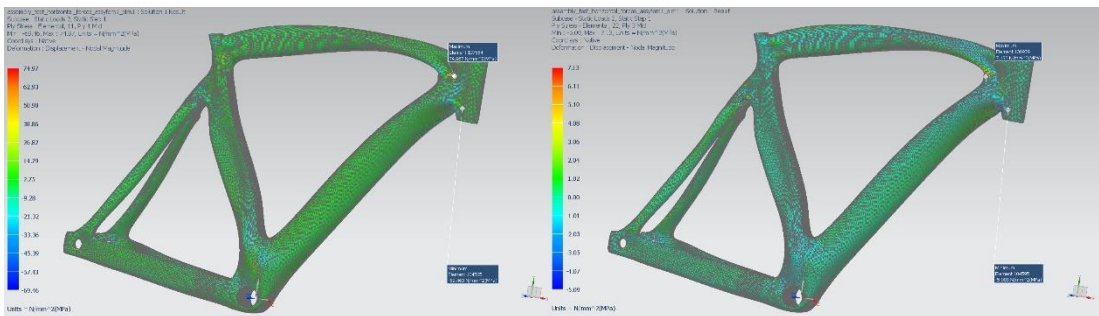
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Vertical Forces Test

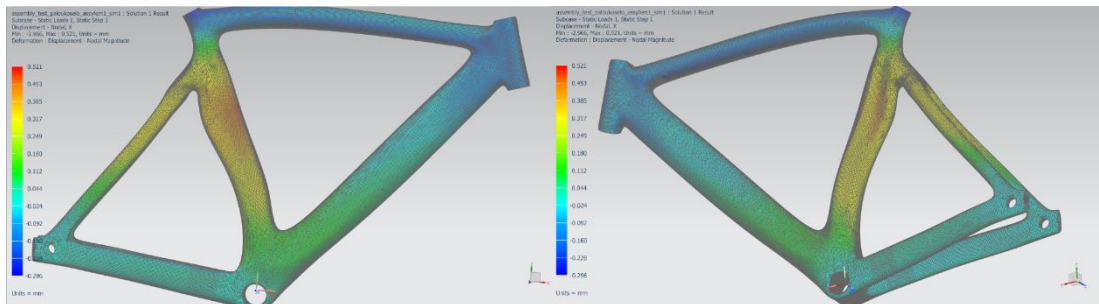
Κατά την πειραματική διαδικασία των δοκιμών vertical forces, όσον αφορά στις παραμορφώσεις του σκελετού λόγω εφαρμογής τάσεων, παρατηρήθηκε εφελκυσμός, κυρίως στον κεντρικό σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στον άνω σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στην ένωση άνω ψαλιδιών με τον κεντρικό σωλήνα, καθώς και στον κεντρικό σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 0.8 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στον επάνω και εμπρός σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στις ενώσεις άνω ψαλιδιών με κεντρικό σωλήνα και κάτω σωλήνα με τον κεντρικό στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στα ίδια σημεία με την περίπτωση του Y άξονα μαζί με το αριστερό ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει τα 0.7 χιλιοστό.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που εμφανίστηκαν σε σημεία και στρώσεις υλικού του σκελετού στο συγκεκριμένο πείραμα για τα σενάρια Quasi (M46J Woven, T300 Woven) και 1-10, κατά τους άξονες X και Y. Οι άξονες αυτοί να σημειωθεί πως έχουν οριστεί με βάση το επίπεδο του κάθε σωλήνα ξεχωριστά (X άξονας/οριζόντια διεύθυνση σωλήνα, Y άξονας/κάθετη διεύθυνση σωλήνα). Στις παρακάτω απεικονίσεις ενδέχεται κάποια από τα κομμάτια του σκελετού να έχουν ένα σκοτεινό γκρι χρώμα, πράγμα το οποίο οφείλεται στην απεικόνιση του υπολογιστικού προγράμματος όταν δεν υπάρχουν πλέον στρώσεις στα συγκεκριμένα κομμάτια σκελετού (π.χ. κανονική απεικόνιση 6^{ης} στρώσης εμπρός σωλήνα, ενώ οι στρώσεις του επάνω σωλήνα περιορίζονται στις 4).

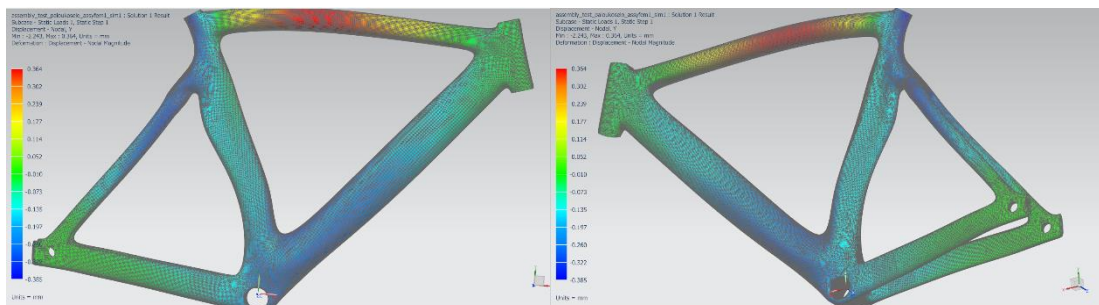
Στο M46J Woven σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 3^η στρώση τα 127.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 113.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 199.2 MPa στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 134.2 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 120.5 MPa στον κεντρικό σωλήνα στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 113 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 113.2 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 101.6 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- M46J Woven

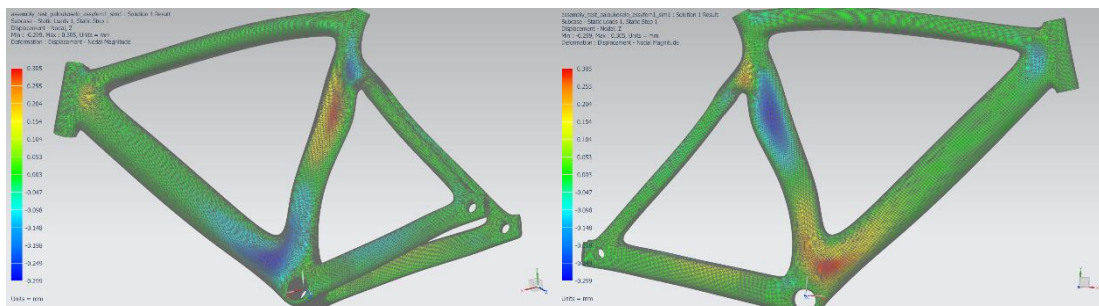
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	-1,21E+05	-9,21E+03	0,00E+00	-4,71E+02	0,00E+00	0,00E+00
Max Stress 11	3	seat_tube	Interlaminar	1,28E+05	-1,59E+03	0,00E+00	4,82E+03	-2,78E+03	-3,63E+03
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-2,33E+04	-1,13E+05	0,00E+00	7,19E+02	1,68E+03	3,94E+03
Max Stress 22	4	seat_tube	Interlaminar	5,43E+04	1,99E+05	0,00E+00	-5,00E+03	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 33	1	seat_tube	Interlaminar	-1,79E+04	-4,87E+04	0,00E+00	7,46E+03	3,71E+02	-1,07E+02
Max Stress 33	1	seat_tube	Interlaminar	-1,79E+04	-4,87E+04	0,00E+00	7,46E+03	3,71E+02	-1,07E+02
Min Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	1,14E+05	1,49E+05	0,00E+00	-1,14E+04	0,00E+00	0,00E+00
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	2,80E+04	4,99E+04	0,00E+00	1,25E+04	-1,13E+03	-9,40E+01
Min Stress 23	2	seatstay_right	Interlaminar	6,15E+04	-5,96E+04	0,00E+00	-1,56E+03	-3,12E+04	3,88E+04
Max Stress 23	2	seatstay_left	Interlaminar	-1,46E+04	1,81E+04	0,00E+00	1,26E+03	1,43E+04	3,47E+03
Min Stress 31	2	seatstay_right	Interlaminar	-3,27E+04	5,41E+03	0,00E+00	1,38E+03	-1,50E+04	-2,15E+04
Max Stress 31	2	seatstay_right	Interlaminar	6,15E+04	-5,96E+04	0,00E+00	-1,56E+03	-3,12E+04	3,88E+04



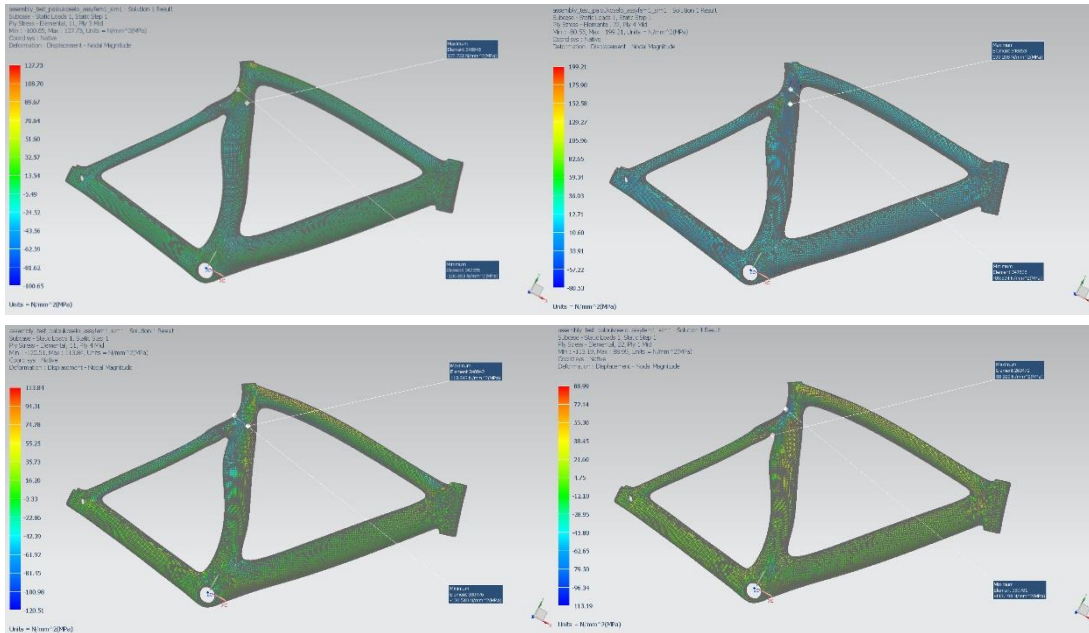
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

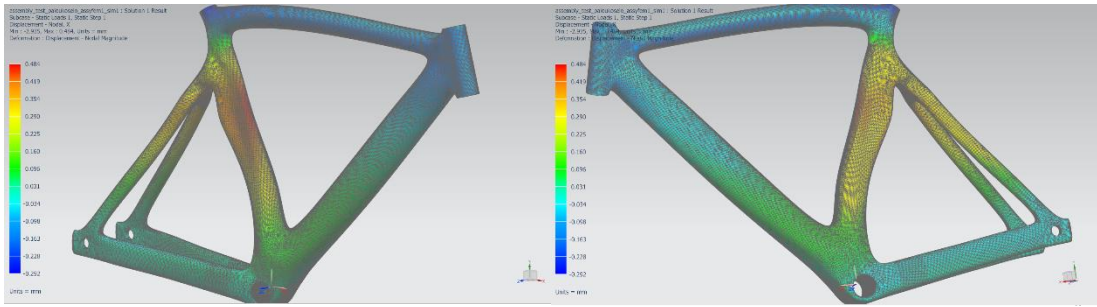


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

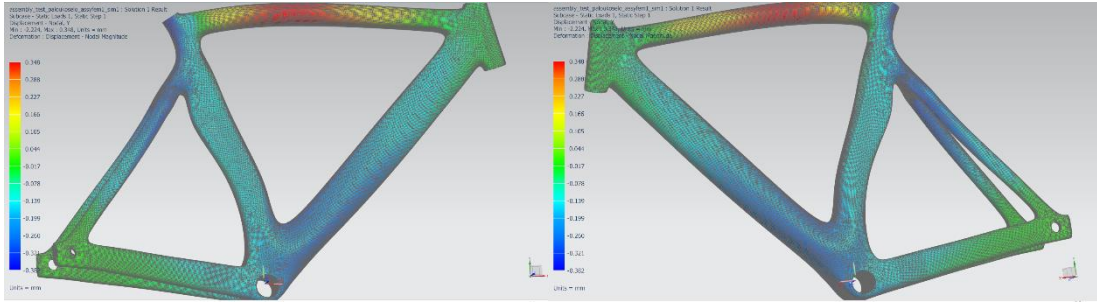
Στο T300 Woven σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 3^η στρώση τα 98.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 87.1 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 147.9 MPa στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 103.4 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 98.8 MPa στην ένωση άνω ψαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 4^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 87.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 87.8 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 86.3 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- T300 Woven

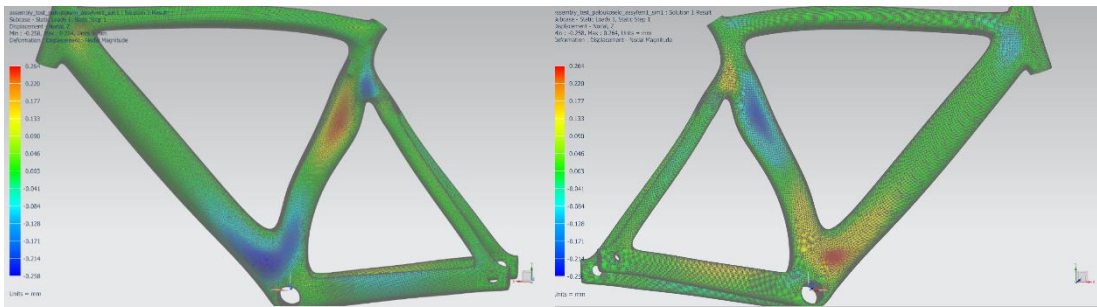
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	-9,87E+04	-1,22E+04	0,00E+00	-8,62E+02	7,60E-14	-1,93E-13
Max Stress 11	3	seat_tube	Interlaminar	9,83E+04	-5,69E+03	0,00E+00	5,07E+03	-1,29E+03	1,67E+02
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-1,95E+04	-8,78E+04	0,00E+00	8,89E+02	3,97E+02	-8,22E+02
Max Stress 22	4	seat_tube	Interlaminar	3,52E+04	1,48E+05	0,00E+00	-3,86E+03	-6,11E-14	2,69E-12
Min Stress 33	1	chainstay_right	Interlaminar	1,16E+03	-9,26E+02	0,00E+00	1,34E+02	3,54E+01	3,46E+01
Max Stress 33	1	chainstay_right	Interlaminar	1,16E+03	-9,26E+02	0,00E+00	1,34E+02	3,54E+01	3,46E+01
Min Stress 12	1	seatstay_left	Interlaminar	1,37E+04	5,77E+03	0,00E+00	-1,15E+04	-2,10E+03	3,84E+03
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	1,88E+04	3,34E+04	0,00E+00	1,21E+04	-2,80E+03	-8,90E+01
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-4,02E+04	7,34E+04	0,00E+00	-7,35E+02	-1,20E+04	-2,35E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-3,69E+04	6,97E+04	0,00E+00	9,21E+02	1,13E+04	-2,28E+03
Min Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	-2,77E+04	6,00E+04	0,00E+00	-2,72E+02	1,69E+02	-7,46E+03
Max Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	-1,77E+04	4,02E+04	0,00E+00	-5,21E+03	-6,83E+02	9,27E+03



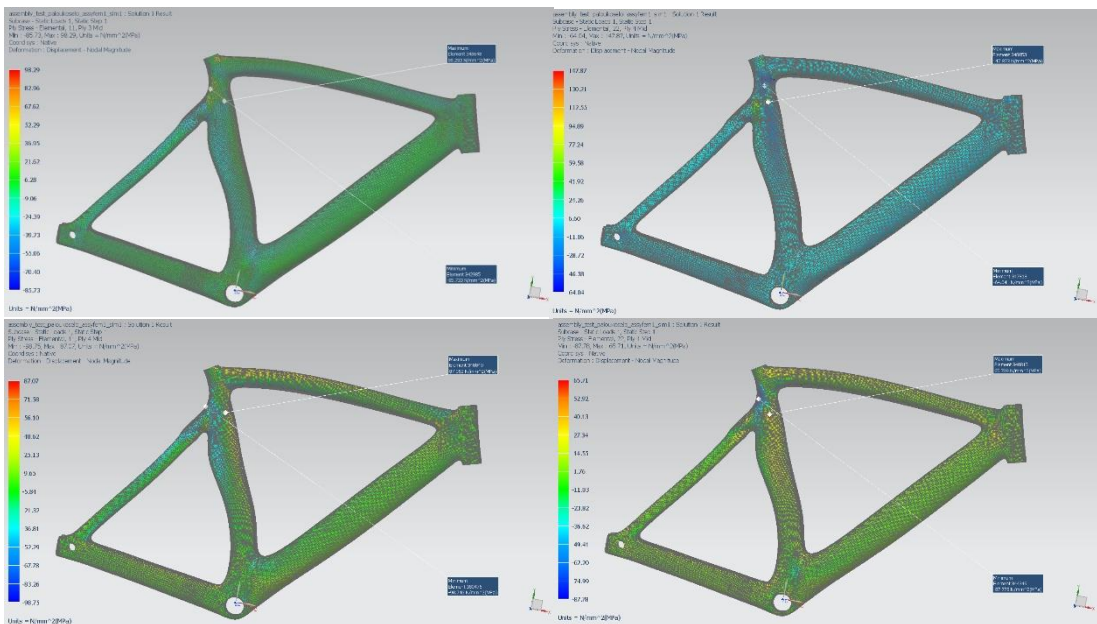
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

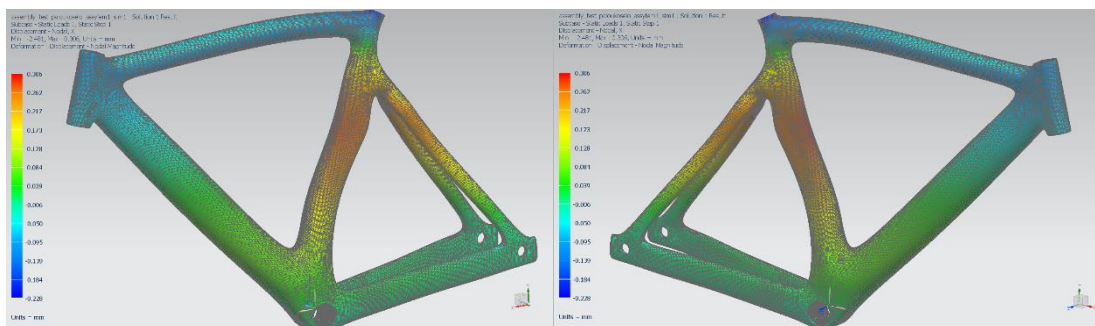


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

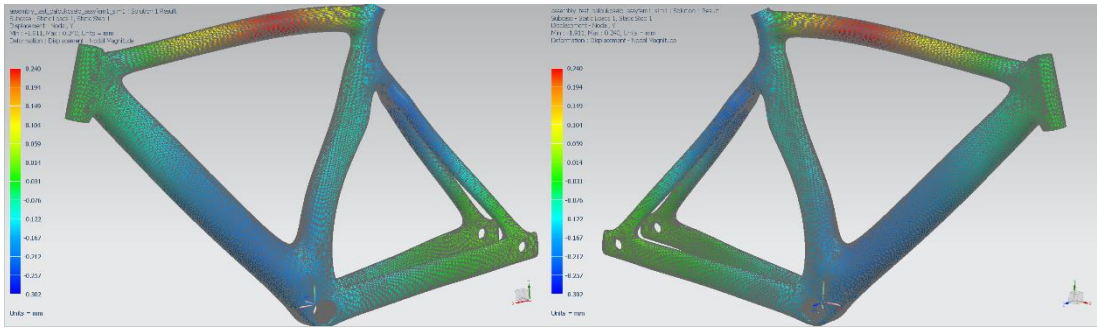
Στο 1^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 67.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 66.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 69 MPa στην 5^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 66.5 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 91.9 MPa στην ένωση άνω ψαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 80.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 58.1 MPa στην 5^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 54.1 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 1st Scenario

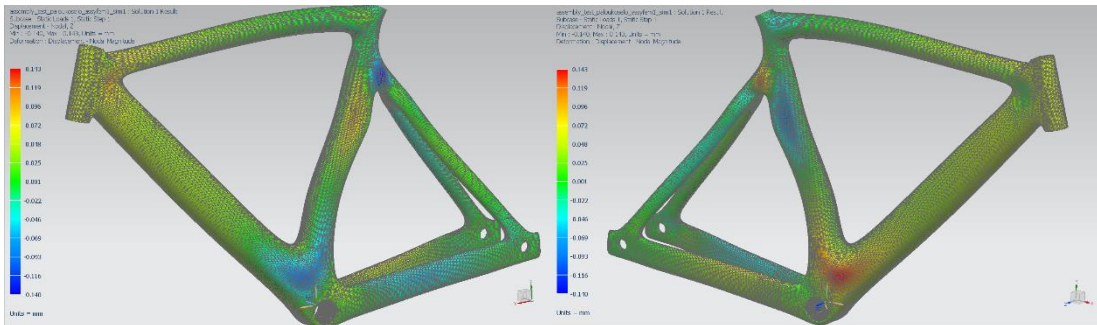
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² 2 (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	seatstay_left	Interlaminar	-9,19E+04	-3,23E+03	0,00E+00	-2,37E+03	-1,45E-14	3,59E-13	4,44E+04
Max Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	6,77E+04	-2,10E+04	0,00E+00	2,76E+02	1,09E+02	-1,12E+03	4,43E+04
Min Stress 22	5	seat_tube	Interlaminar	1,17E+04	-5,81E+04	0,00E+00	3,08E+03	-1,04E+03	4,13E+02	3,50E+04
Max Stress 22	5	seat_tube	Interlaminar	-4,81E+03	6,90E+04	0,00E+00	1,43E+03	3,93E+02	-3,93E+02	3,69E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,85E+03	-8,81E+03	0,00E+00	-5,24E+02	3,38E+02	-5,59E+02	2,05E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,85E+03	-8,81E+03	0,00E+00	-5,24E+02	3,38E+02	-5,59E+02	2,05E+03
Min Stress 12	4	seatstay_right	Interlaminar	1,30E+04	-1,28E+04	0,00E+00	-7,61E+03	-1,65E-13	-1,51E-12	1,50E+04
Max Stress 12	1	seatstay_left	Interlaminar	-3,03E+04	-1,63E+04	0,00E+00	8,51E+03	-1,33E+02	1,34E+02	1,10E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-8,13E+03	2,61E+04	0,00E+00	4,91E+03	-6,65E+03	2,28E+03	1,78E+04
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	2,51E+04	-8,44E+03	0,00E+00	4,67E+03	6,71E+03	2,03E+03	1,74E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,62E+03	1,92E+04	0,00E+00	3,55E+03	6,16E+02	-5,18E+03	9,48E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	3,03E+04	-1,65E+04	0,00E+00	2,21E+03	1,72E+02	6,44E+03	2,35E+04
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_right	Interlaminar	-2,99E+00	-2,78E+00	0,00E+00	3,90E-02	-6,42E+00	-4,46E+00	1,13E-01
Max Maximum Shear Stress	2	seatstay_left	Interlaminar	-7,97E+04	2,15E+04	0,00E+00	-1,61E+03	-2,14E+02	2,17E+02	5,06E+04



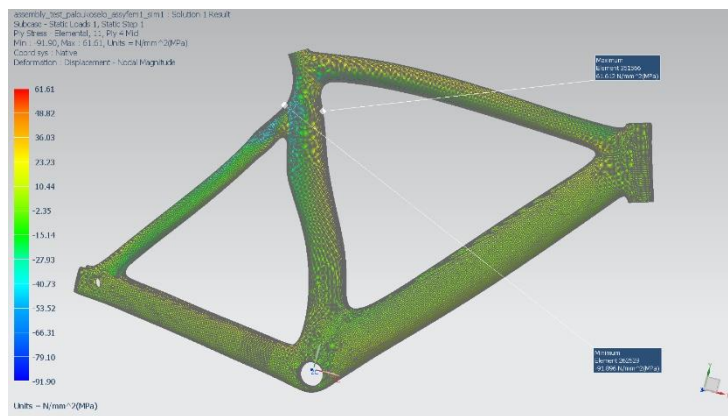
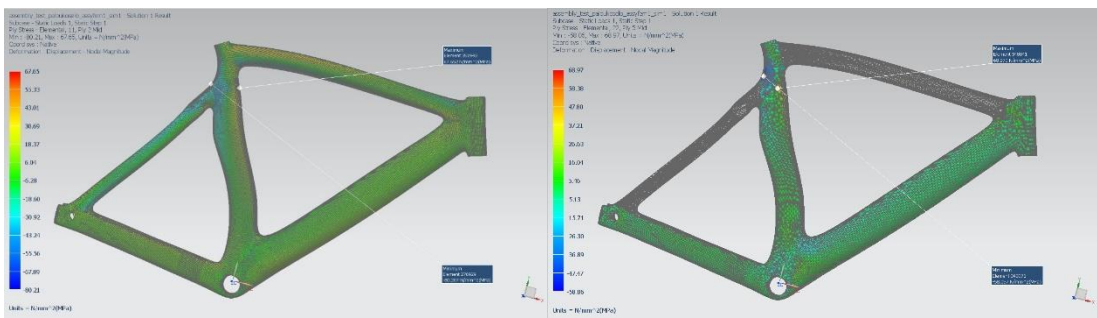
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

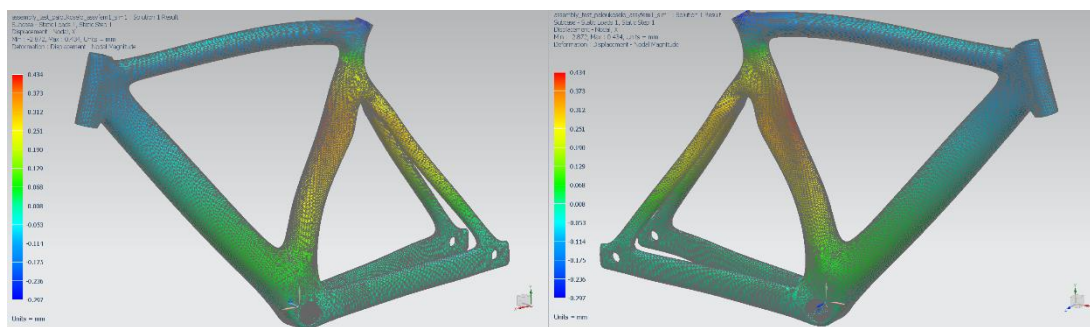


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

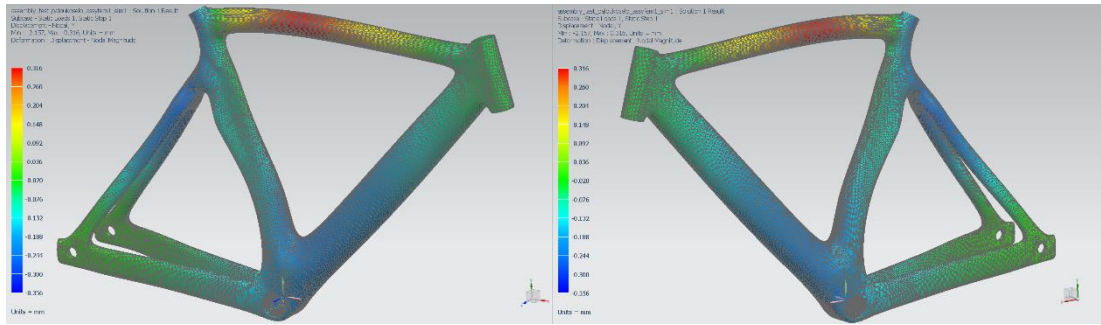
Στο 2^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 3^η στρώση τα 96.2 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 84,6 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 145 MPa στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 101.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 95.9 MPa στην ένωση άνω ψαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 85.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 86 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 84.7 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 2nd Scenario

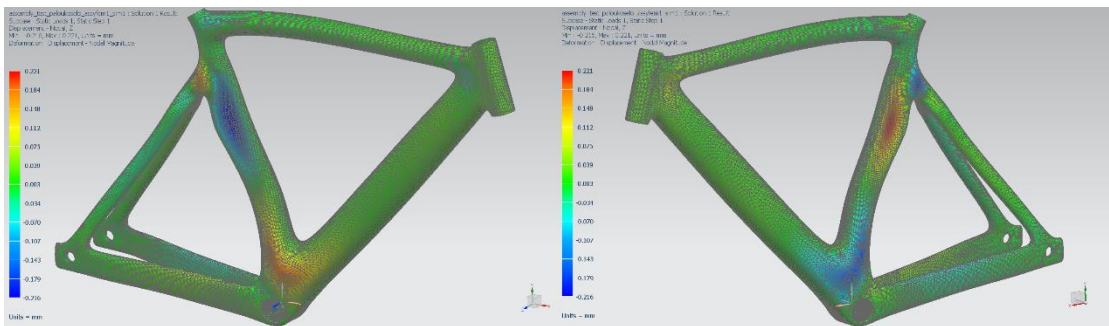
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	-9,59E+04	-1,19E+04	0,00E+00	-8,23E+02	7,51E-14	-1,88E-13	4,20E+04
Max Stress 11	3	seat_tube	Interlaminar	9,62E+04	-6,04E+03	0,00E+00	5,11E+03	-1,21E+03	1,28E+02	5,14E+04
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-1,91E+04	-8,60E+04	0,00E+00	9,51E+02	3,87E+02	-8,07E+02	3,35E+04
Max Stress 22	4	seat_tube	Interlaminar	3,32E+04	1,45E+05	0,00E+00	-3,73E+03	-3,65E-14	2,64E-12	5,60E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,48E+03	-9,10E+03	0,00E+00	-3,37E+02	2,43E+02	-4,14E+02	2,34E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,48E+03	-9,10E+03	0,00E+00	-3,37E+02	2,43E+02	-4,14E+02	2,34E+03
Min Stress 12	1	seatstay_left	Interlaminar	1,29E+04	6,44E+03	0,00E+00	-1,10E+04	-2,02E+03	3,72E+03	1,15E+04
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	1,83E+04	3,24E+04	0,00E+00	1,20E+04	-2,74E+03	-8,95E+01	1,39E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-4,03E+04	7,25E+04	0,00E+00	-6,88E+02	-1,17E+04	-2,28E+03	5,64E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-3,71E+04	6,89E+04	0,00E+00	8,81E+02	1,11E+04	-2,21E+03	5,30E+04
Min Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	-2,81E+04	5,95E+04	0,00E+00	-2,25E+02	1,01E+02	-7,31E+03	4,38E+04
Max Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	-1,85E+04	3,99E+04	0,00E+00	-5,13E+03	-7,06E+02	9,07E+03	2,96E+04
Min Maximum Shear Stress	4	chainstay_right	Interlaminar	3,24E-03	1,98E-01	0,00E+00	1,93E-01	4,79E+00	3,64E+00	2,16E-01
Max Maximum Shear Stress	2	seat_tube	Interlaminar	-3,96E+04	7,76E+04	0,00E+00	-1,17E+03	-4,43E+03	-1,45E+02	5,86E+04



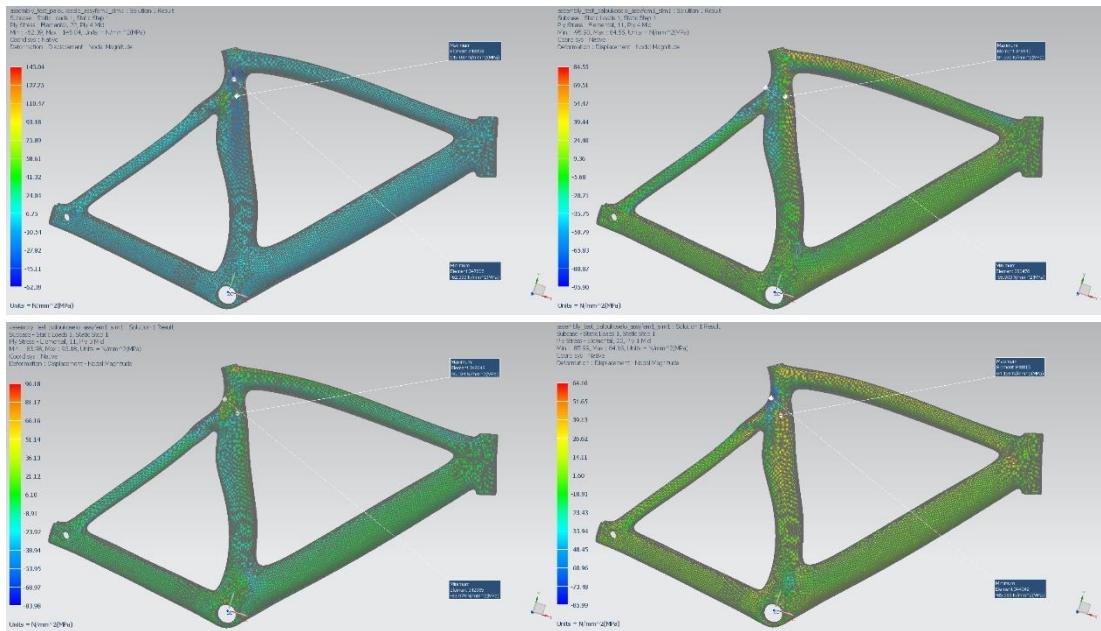
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

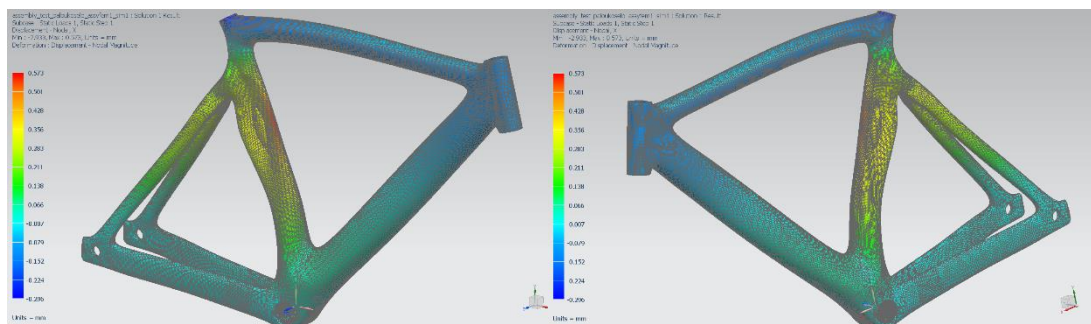


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

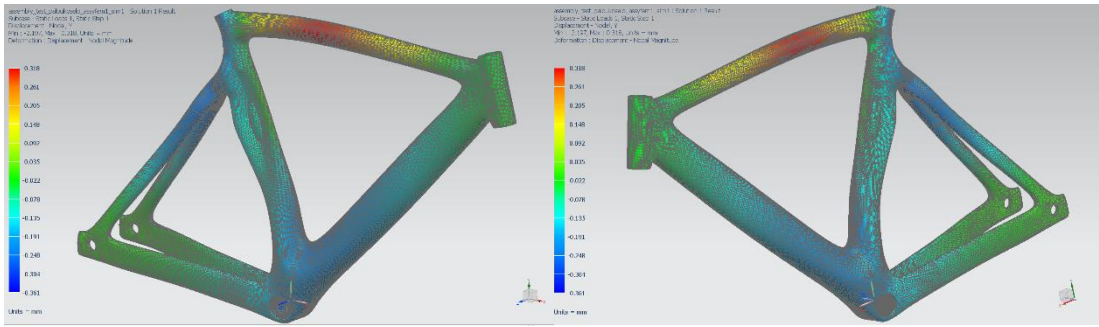
Στο 3^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 159.1 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 128.3 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 136.8 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 89.2 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 154.1 MPa στην ένωση άνω φαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 136.2 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 96.3 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 82.2 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 3rd Scenario

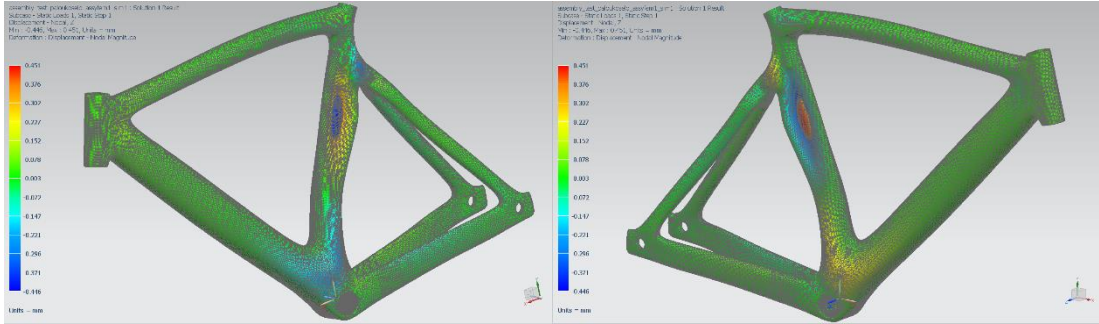
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seatstay_left	Interlaminar	-1,54E+05	4,09E+03	0,00E+00	-1,35E+03	1,15E+02	-5,76E+02	7,91E+04
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	1,59E+05	1,45E+04	0,00E+00	-1,05E+04	2,27E+13	0,00E+00	7,30E+04
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,52E+04	-9,63E+04	0,00E+00	-2,50E+03	5,06E+02	-8,13E+02	3,06E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	4,07E+04	1,37E+05	0,00E+00	1,58E+04	-2,94E+03	2,49E+03	5,06E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,72E+03	-9,05E+03	0,00E+00	-3,27E+02	2,31E+02	-4,04E+02	2,19E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,72E+03	-9,05E+03	0,00E+00	-3,27E+02	2,31E+02	-4,04E+02	2,19E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	1,43E+05	3,00E+04	0,00E+00	-1,69E+04	5,19E+13	0,00E+00	5,89E+04
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	4,06E+04	5,40E+04	0,00E+00	1,73E+04	-5,35E+03	-3,02E+02	1,85E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,20E+05	1,91E+04	0,00E+00	-1,51E+03	-9,98E+03	-3,38E+03	6,95E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,10E+05	1,79E+04	0,00E+00	1,66E+03	9,42E+03	-3,35E+03	6,41E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	8,92E+03	1,62E+04	0,00E+00	-9,93E+02	-3,48E+02	-1,06E+04	3,79E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,89E+04	1,05E+05	0,00E+00	1,01E+04	1,25E+02	1,12E+04	4,43E+04
Min Maximum Shear Stress	2	chainstay_right	Interlaminar	7,93E-01	8,53E-01	0,00E+00	-7,32E-02	2,68E+00	3,86E+00	7,91E-02
Max Maximum Shear Stress	2	seatstay_left	Interlaminar	-1,54E+05	4,09E+03	0,00E+00	-1,35E+03	1,15E+02	-5,76E+02	7,91E+04



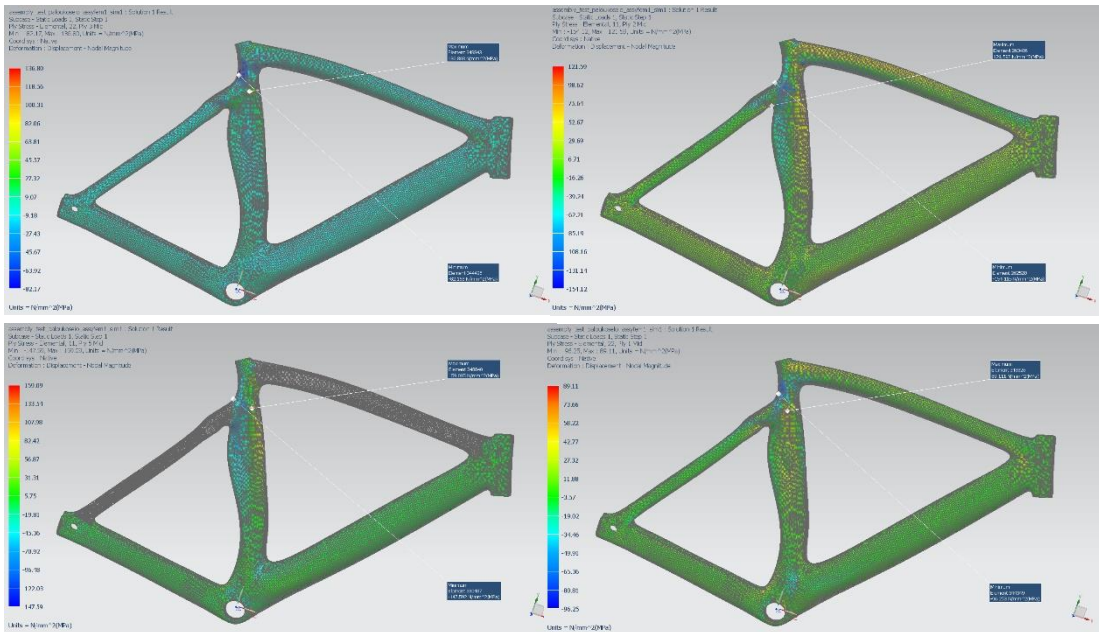
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

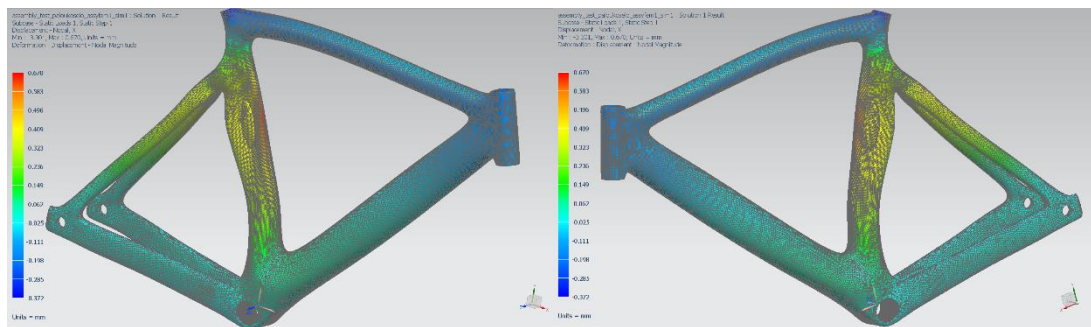


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

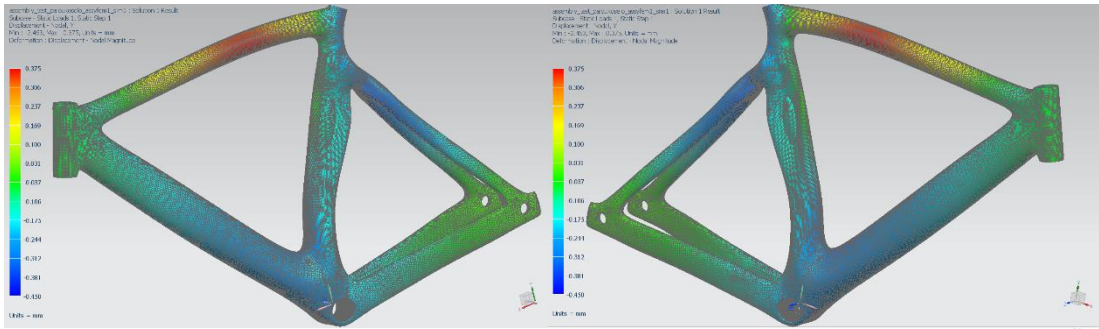
Στο 4^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 179.5 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 140.9 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 147.1 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 96.9 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 227.3 MPa στην ένωση άνω ψαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 154.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 100.8 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 87.8 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 4th Scenario

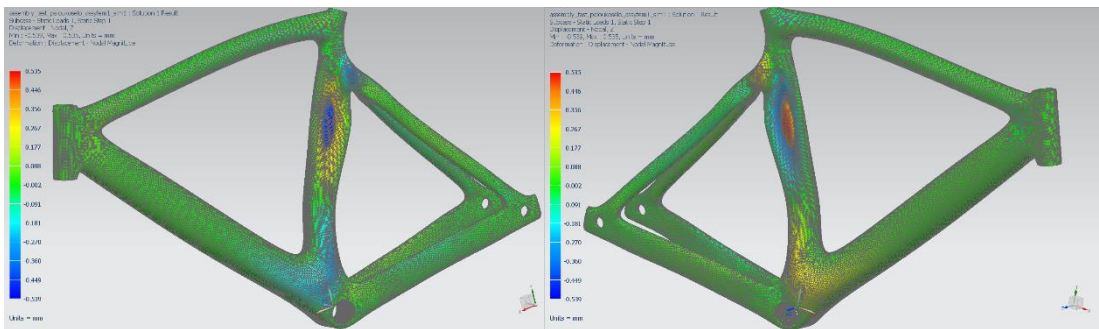
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seatstay_right	Interlaminar	-2,27E+05	5,07E+03	0,00E+00	1,60E+03	3,40E+02	-3,37E+02	1,16E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	1,79E+05	1,63E+04	0,00E+00	-1,15E+04	2,38E-13	0,00E+00	8,24E+04
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,47E+04	-1,01E+05	0,00E+00	-2,07E+03	5,10E+02	-8,60E+02	3,31E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	4,46E+04	1,47E+05	0,00E+00	1,73E+04	-3,45E+03	2,22E+03	5,41E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,03E+03	-8,56E+03	0,00E+00	-1,96E+02	2,16E+02	-3,51E+02	2,28E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-4,03E+03	-8,56E+03	0,00E+00	-1,96E+02	2,16E+02	-3,51E+02	2,28E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	1,57E+05	3,28E+04	0,00E+00	-1,84E+04	4,70E-13	0,00E+00	6,47E+04
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	4,91E+04	5,82E+04	0,00E+00	1,95E+04	-5,70E+03	-3,85E+02	2,00E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,35E+05	2,13E+04	0,00E+00	-1,27E+03	-1,06E+04	-3,77E+03	7,81E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,26E+05	2,03E+04	0,00E+00	1,52E+03	1,03E+04	-3,80E+03	7,31E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	9,40E+04	1,29E+05	0,00E+00	1,82E+04	-6,56E+02	-1,18E+04	2,51E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	2,14E+04	1,14E+05	0,00E+00	1,12E+04	1,48E+01	1,23E+04	4,79E+04
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_left	Interlaminar	1,31E+01	1,28E+01	0,00E+00	8,92E-02	-2,05E+02	-3,85E+01	1,47E-01
Max Maximum Shear Stress	2	seatstay_right	Interlaminar	-2,27E+05	5,07E+03	0,00E+00	1,60E+03	3,40E+02	-3,37E+02	1,16E+05



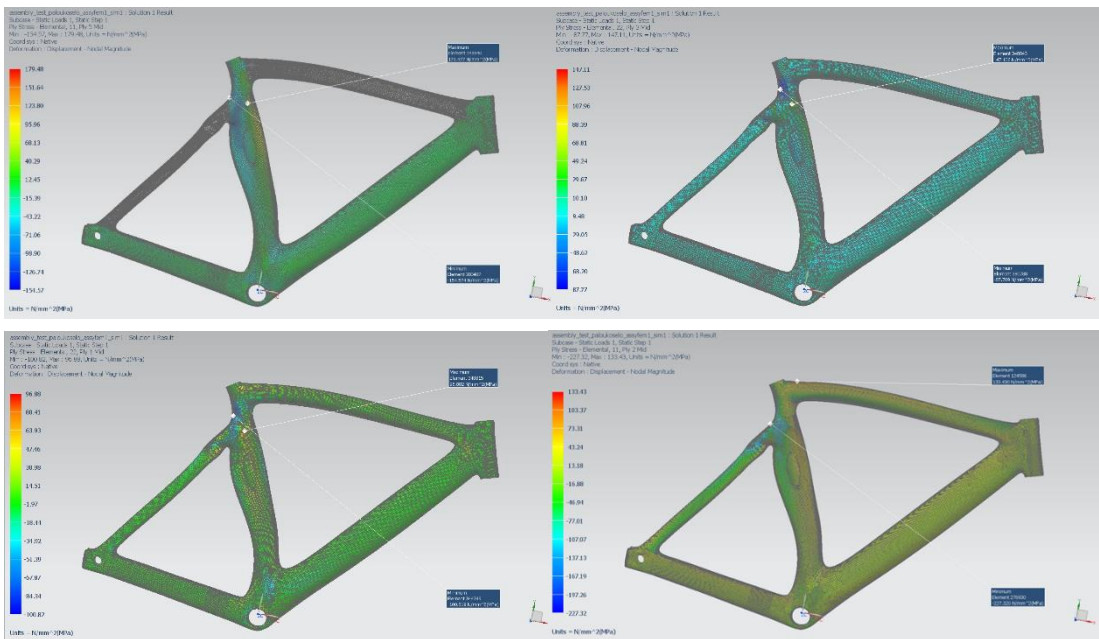
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

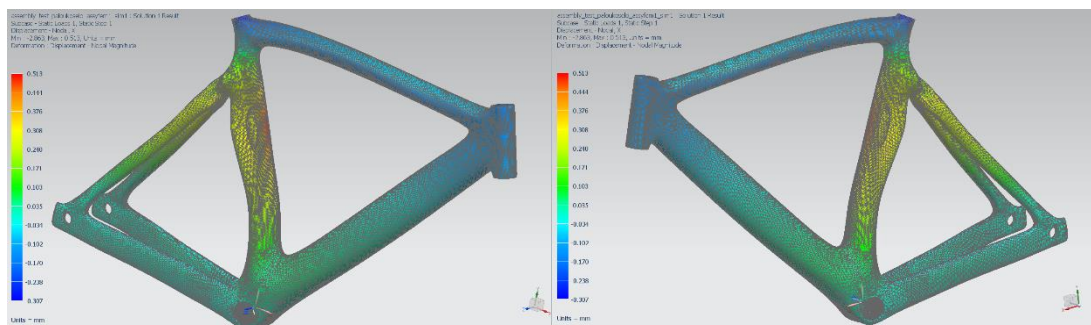


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

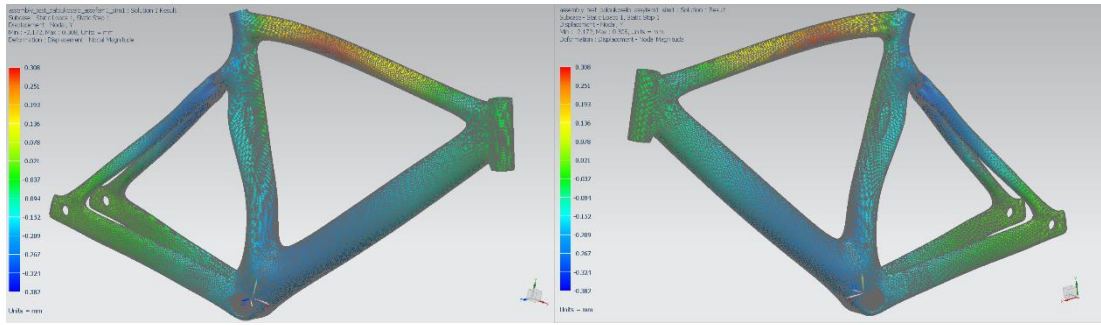
Στο 5^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 4^η στρώση τα 292 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 232.3 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 26.5 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 22 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 320 MPa στην ένωση άνω ψαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 235.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 25.2 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 14.8 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, όχι όμως αφαίρεση διότι εφόσον ο σκελετός αποτελείται αποκλειστικά από μονοδιευθυντικές στρώσεις, δε θα υπάρχει υλικό στην εκάστοτε διεύθυνση τάσεων για τις αντέξει.

- 5th Scenario

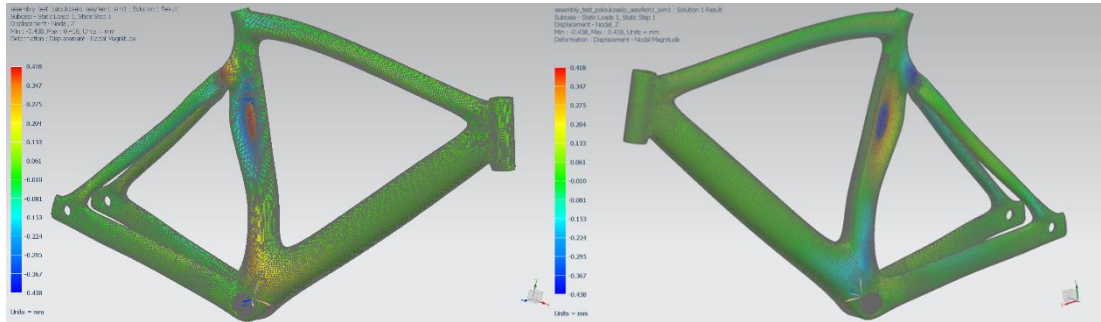
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	3	seatstay_right	Interlaminar	-3,20E+05	-1,95E+03	0,00E+00	2,92E+02	4,48E-15	1,06E-12	1,59E+05
Max Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	2,92E+05	2,16E+03	0,00E+00	1,49E+03	-1,23E+03	-2,54E+04	1,45E+05
Min Stress 22	3	seatstay_left	Interlaminar	-4,77E+03	-2,52E+04	0,00E+00	-5,15E+03	1,49E-12	5,27E-14	1,14E+04
Max Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	1,14E+05	2,65E+04	0,00E+00	-6,27E+03	3,42E-13	-8,46E-12	4,44E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,51E+03	-1,03E+03	0,00E+00	4,11E+00	9,49E+01	-1,34E+02	2,74E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,51E+03	-1,03E+03	0,00E+00	4,11E+00	9,49E+01	-1,34E+02	2,74E+03
Min Stress 12	2	seatstay_right	Interlaminar	-7,63E+04	2,73E+02	0,00E+00	-1,42E+04	6,41E+01	1,41E+02	4,08E+04
Max Stress 12	3	seatstay_left	Interlaminar	2,10E+04	2,02E+04	0,00E+00	1,54E+04	-2,98E-12	-1,99E-12	1,54E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-6,06E+04	-1,60E+03	0,00E+00	2,33E+03	-4,20E+04	1,74E+04	2,96E+04
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	2,91E+04	1,41E+01	0,00E+00	9,65E+02	3,66E+04	4,46E+03	1,46E+04
Min Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	-6,47E+04	1,79E+02	0,00E+00	-4,78E+03	1,18E+03	-2,94E+04	3,28E+04
Max Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	-1,21E+04	-3,80E+03	0,00E+00	7,59E+03	8,84E+02	3,26E+04	8,64E+03
Min Maximum Shear Stress	9	chainstay_right	Interlaminar	1,59E+00	1,54E+00	0,00E+00	-4,48E-02	6,56E-15	0,00E+00	5,22E-02
Max Maximum Shear Stress	3	seatstay_right	Interlaminar	-3,20E+05	-1,95E+03	0,00E+00	2,92E+02	4,48E-15	1,06E-12	1,59E+05



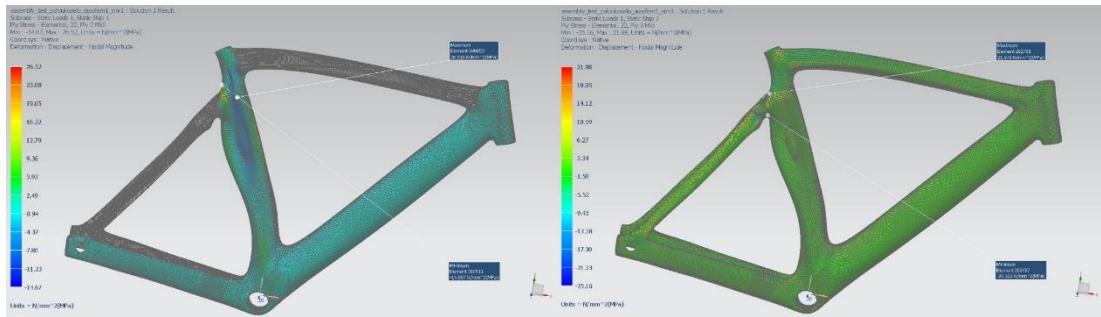
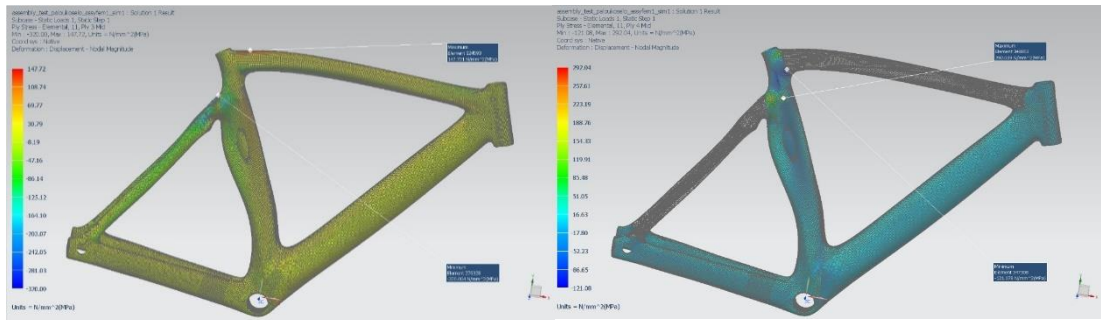
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

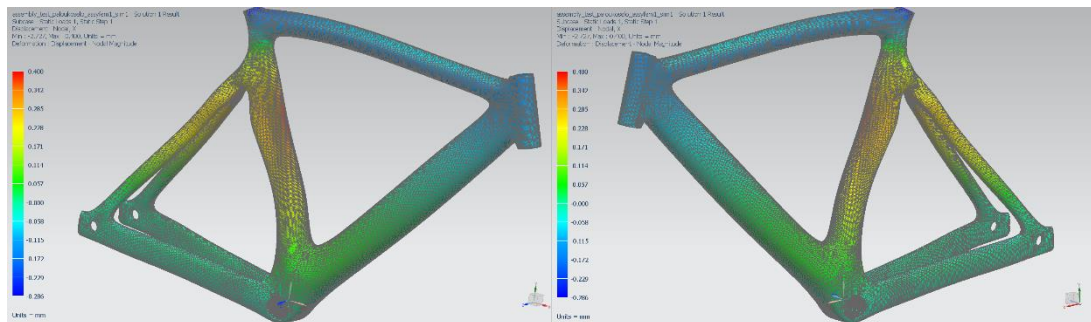


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

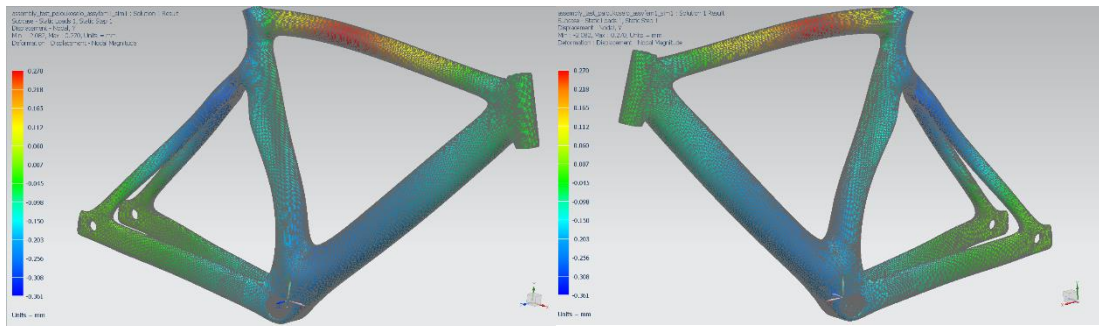
Στο 6^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 150.9 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 147.7 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 127.9 MPa στην 5^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 72.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 211.5 MPa στην ένωση άνω φαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 143.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 71.1 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 69.6 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 6th Scenario

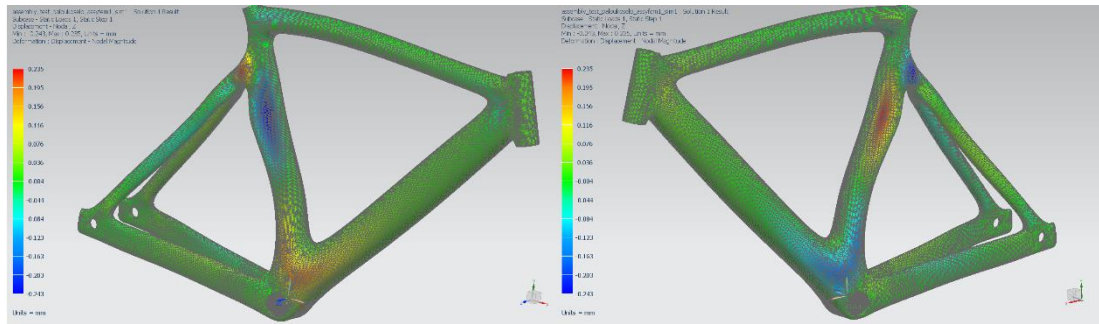
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seatstay_left	Interlaminar	-2,11E+05	5,40E+03	0,00E+00	-1,54E+03	-2,71E+02	5,79E+01	1,08E+05
Max Stress 11	6	seat_tube	Interlaminar	1,51E+05	8,05E+03	0,00E+00	-5,30E+03	1,39E-14	0,00E+00	7,16E+04
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-2,66E+04	-7,11E+04	0,00E+00	-6,11E+02	1,11E+03	1,74E+03	2,23E+04
Max Stress 22	5	seat_tube	Interlaminar	3,46E+04	1,28E+05	0,00E+00	5,80E+03	1,30E+02	-5,27E+03	4,70E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,18E+04	-1,10E+04	0,00E+00	-7,08E+02	3,22E+02	-3,47E+02	8,34E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,18E+04	-1,10E+04	0,00E+00	-7,08E+02	3,22E+02	-3,47E+02	8,34E+02
Min Stress 12	3	seatstay_left	Interlaminar	-4,12E+04	-5,06E+04	0,00E+00	-1,14E+04	0,00E+00	4,71E-13	1,23E+04
Max Stress 12	1	seatstay_left	Interlaminar	-2,46E+04	-1,23E+04	0,00E+00	1,38E+04	-2,36E+02	-4,66E+00	1,51E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-4,13E+03	-3,13E+03	0,00E+00	3,55E+03	-2,14E+04	-5,34E+03	3,59E+03
Max Stress 23	3	head_tube	Interlaminar	-5,78E+03	-5,66E+03	0,00E+00	-6,17E+02	9,98E+03	7,71E+03	6,20E+02
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	3,47E+04	4,46E+04	0,00E+00	8,39E+03	-4,47E+03	-2,23E+04	9,74E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,74E+04	5,33E+04	0,00E+00	8,52E+03	-6,82E+03	2,92E+04	1,99E+04
Min Maximum Shear Stress	5	chainstay_left	Interlaminar	9,17E-01	9,25E-01	0,00E+00	-7,66E-03	-3,16E-01	-7,07E+00	8,48E-03
Max Maximum Shear Stress	2	seatstay_left	Interlaminar	-2,11E+05	5,40E+03	0,00E+00	-1,54E+03	-2,71E+02	5,79E+01	1,08E+05



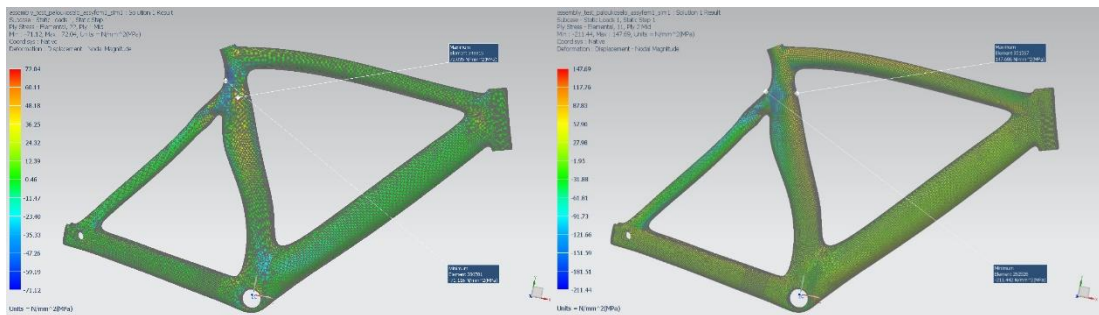
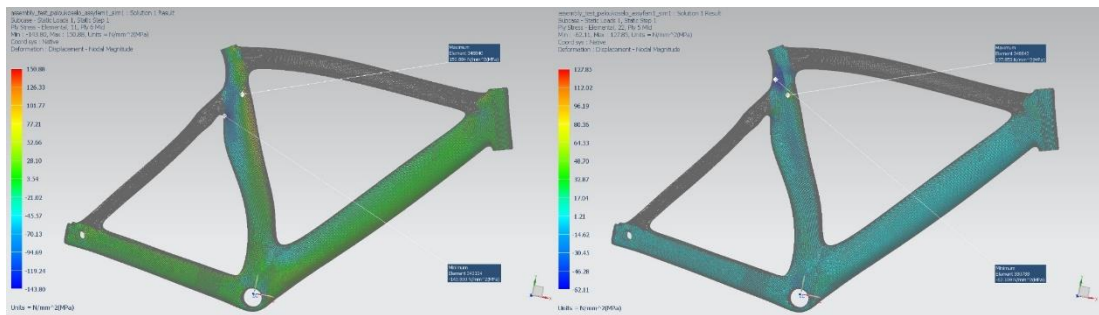
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

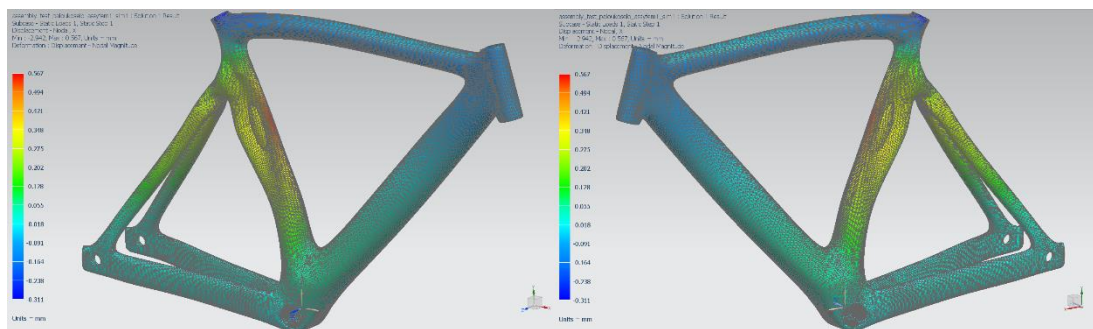


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

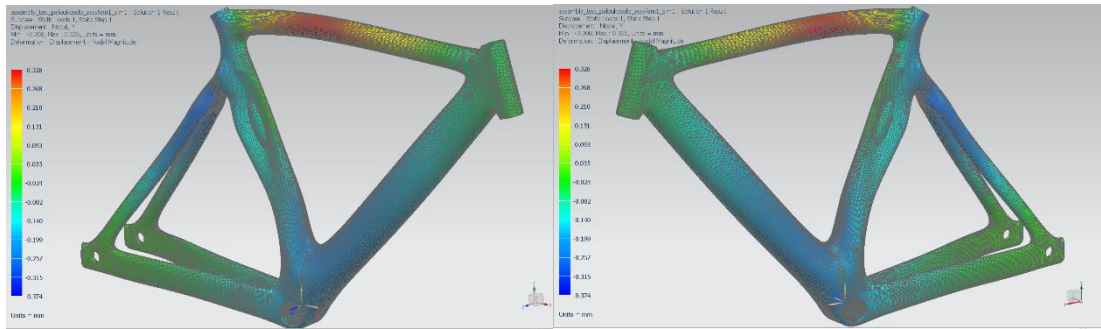
Στο 7^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 197.1 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 147.5 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 152.7 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 103 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 235.8 MPa στην ένωση άνω φαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 162.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 104 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 87.1 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 7th Scenario

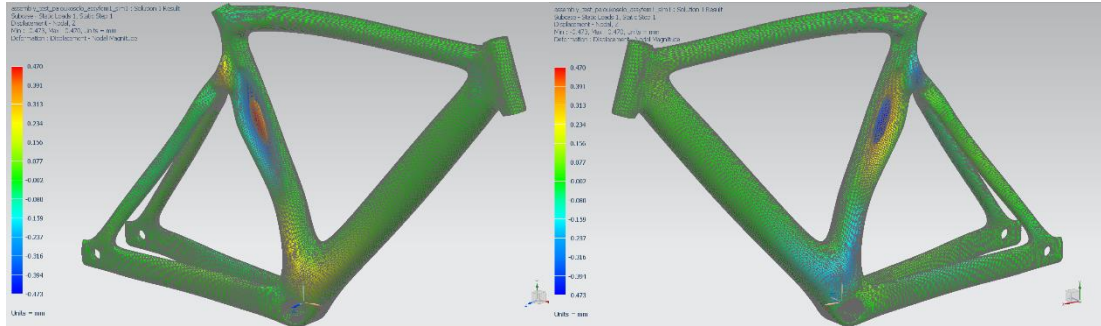
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seatstay_right	Interlaminar	-2,36E+05	4,09E+03	0,00E+00	1,33E+03	1,55E+02	4,66E+01	1,20E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	1,97E+05	1,50E+04	0,00E+00	9,40E+03	0,00E+00	0,00E+00	9,15E+04
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,40E+04	-1,04E+05	0,00E+00	-2,68E+03	3,45E+03	5,63E+03	3,51E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	5,29E+04	1,53E+05	0,00E+00	1,51E+04	-1,76E+03	-1,12E+03	5,21E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,09E+04	-1,07E+04	0,00E+00	-4,02E+02	1,38E+02	-1,83E+02	4,10E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,09E+04	-1,07E+04	0,00E+00	-4,02E+02	1,38E+02	-1,83E+02	4,10E+02
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	1,92E+05	2,49E+04	0,00E+00	-1,38E+04	0,00E+00	0,00E+00	8,47E+04
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	5,08E+04	6,32E+04	0,00E+00	1,65E+04	-4,58E+03	-8,87E+02	1,76E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-5,30E+04	1,18E+03	0,00E+00	9,60E+01	-1,95E+04	-1,34E+03	2,71E+04
Max Stress 23	4	head_tube	Interlaminar	5,86E+03	-1,48E+03	0,00E+00	-7,12E+01	1,34E+04	6,87E+03	3,67E+03
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-2,19E+03	-1,73E+04	0,00E+00	-1,29E+03	1,16E+03	-2,97E+04	7,66E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	3,11E+04	9,31E+04	0,00E+00	1,08E+04	-3,40E+03	3,19E+04	3,28E+04
Min Maximum Shear Stress	4	chainstay_right	Interlaminar	-4,97E-02	-2,71E-02	0,00E+00	4,50E-03	-4,77E+00	1,06E+01	1,22E-02
Max Maximum Shear Stress	2	seatstay_right	Interlaminar	-2,36E+05	4,09E+03	0,00E+00	1,33E+03	1,55E+02	4,66E+01	1,20E+05



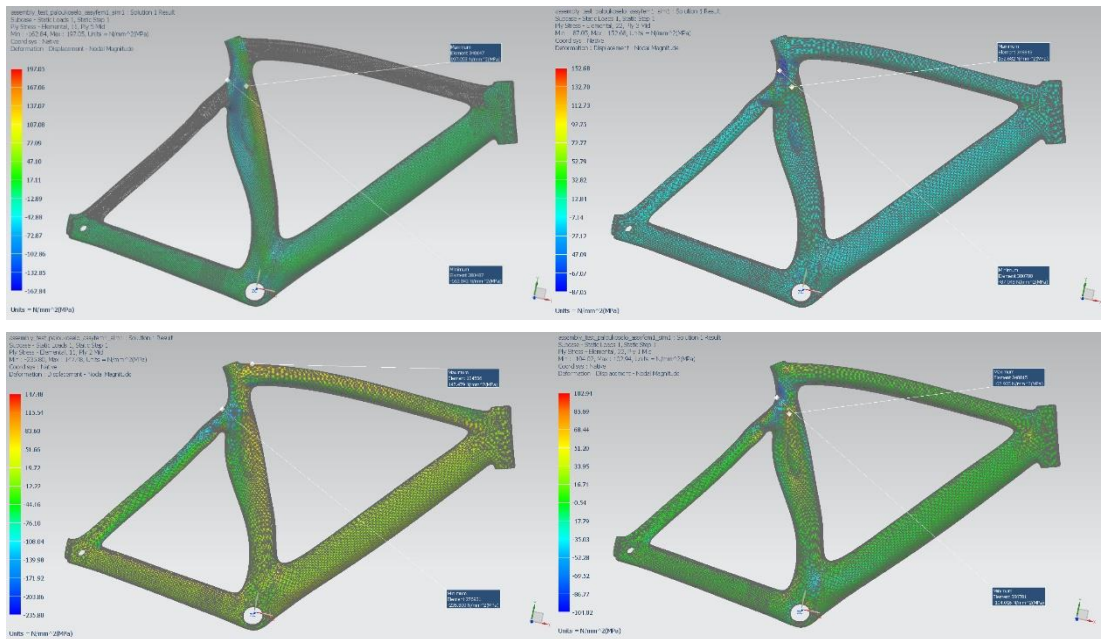
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

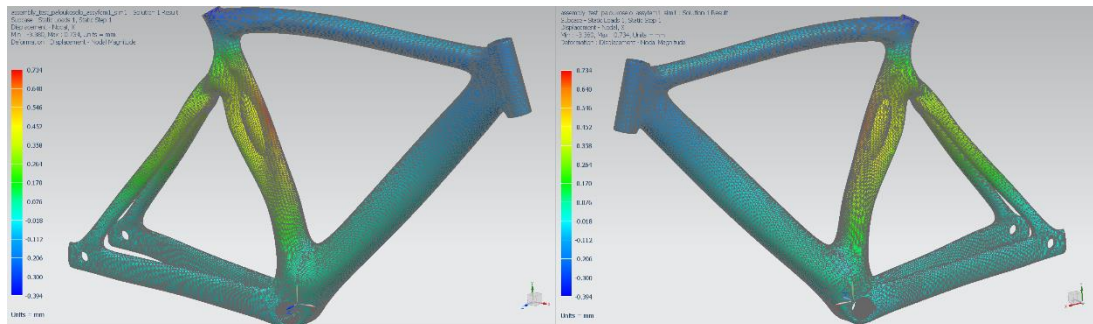


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

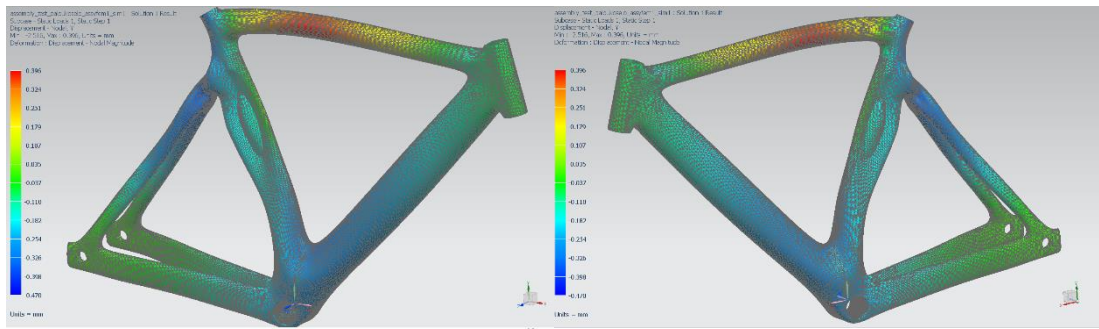
Στο 8^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 240.8 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 184.2 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 233.7 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 182.6 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 233.8 MPa στον κεντρικό σωλήνα στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 182.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στην ένωση άνω ψαλιδιών και κεντρικού σωλήνα 122.5 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 105.9 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 8th Scenario

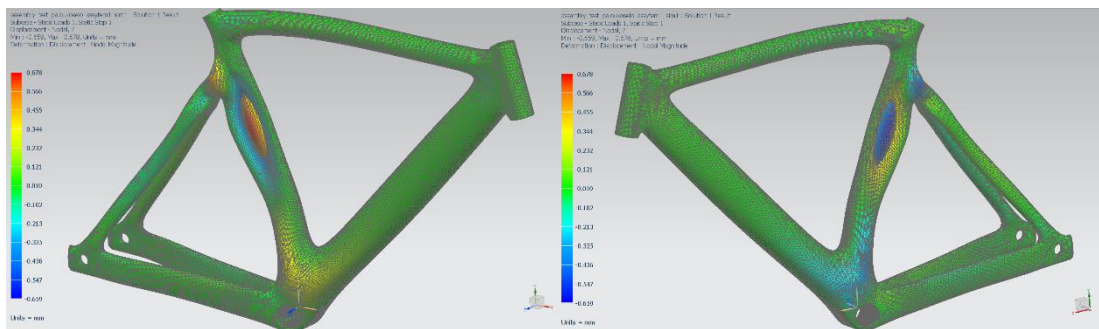
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-2,34E+05	1,06E+04	0,00E+00	-8,60E+03	2,13E+03	-1,29E+04	1,22E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	2,41E+05	2,97E+04	0,00E+00	1,63E+04	1,48E-13	1,87E-12	1,07E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,90E+04	-1,23E+05	0,00E+00	-3,53E+03	3,39E+03	5,67E+03	4,19E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	6,84E+04	1,92E+05	0,00E+00	1,90E+04	-1,84E+03	-2,55E+03	6,45E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,15E+03	-1,19E+04	0,00E+00	-2,23E+02	2,43E+02	-4,11E+02	2,89E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,15E+03	-1,19E+04	0,00E+00	-2,23E+02	2,43E+02	-4,11E+02	2,89E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	2,38E+05	2,98E+04	0,00E+00	-1,74E+04	-1,81E-13	2,04E-12	1,06E+05
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	6,83E+04	7,75E+04	0,00E+00	1,99E+04	-5,13E+03	-9,57E+02	2,05E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-6,65E+04	1,21E+03	0,00E+00	3,82E+01	-2,12E+04	-1,05E+03	3,39E+04
Max Stress 23	1	seatstay_left	Interlaminar	1,31E+04	-3,37E+04	0,00E+00	-6,71E+03	1,95E+04	9,99E+03	2,43E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,41E+03	-1,87E+04	0,00E+00	-1,31E+03	6,73E+02	-3,21E+04	8,73E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	4,23E+04	1,15E+05	0,00E+00	1,34E+04	-4,35E+03	3,44E+04	3,88E+04
Min Maximum Shear Stress	3	chainstay_left	Interlaminar	-3,19E-01	-1,78E-01	0,00E+00	3,72E-02	-2,67E+01	3,60E+00	7,99E-02
Max Maximum Shear Stress	2	seat_tube	Interlaminar	-2,34E+05	1,06E+04	0,00E+00	-8,60E+03	2,13E+03	-1,29E+04	1,22E+05



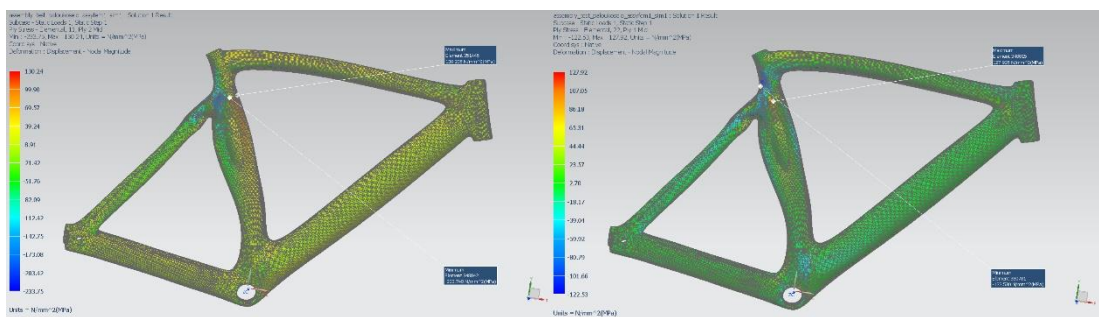
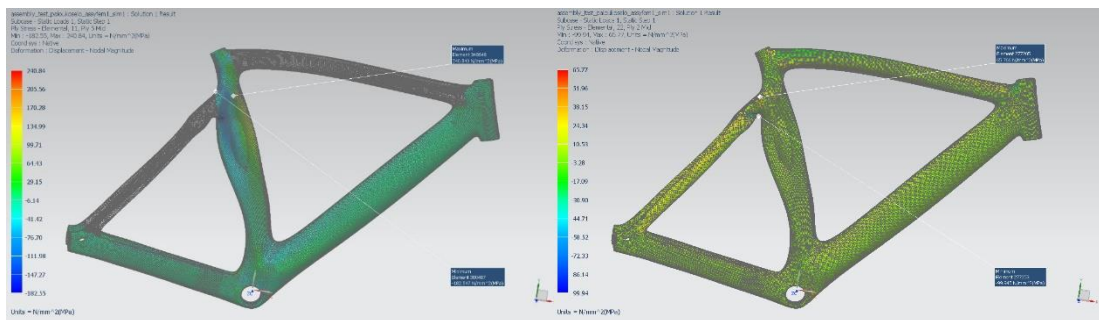
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

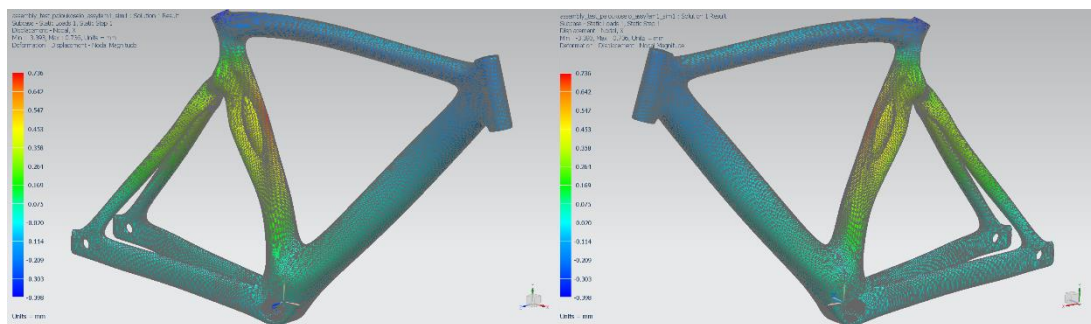


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

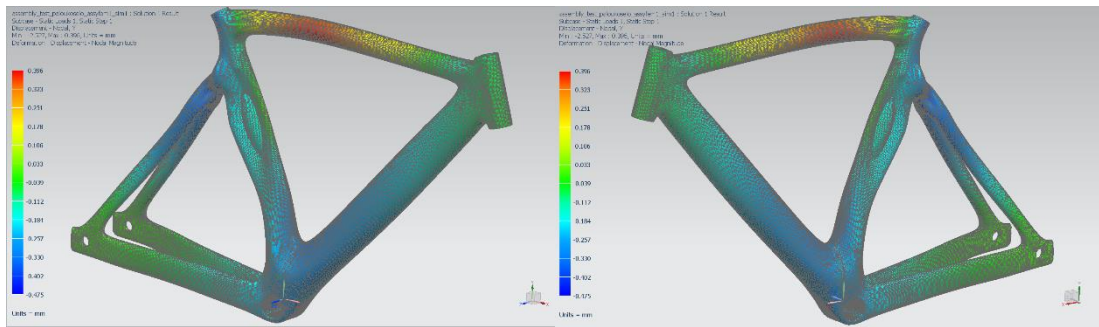
Στο 9^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 240.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 183.7 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 191.2 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 128 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 233.9 MPa στον κεντρικό σωλήνα στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 182.2 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 122.8 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 106.2 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, ή ακόμα και αφαίρεση υλικού.

- 9th Scenario

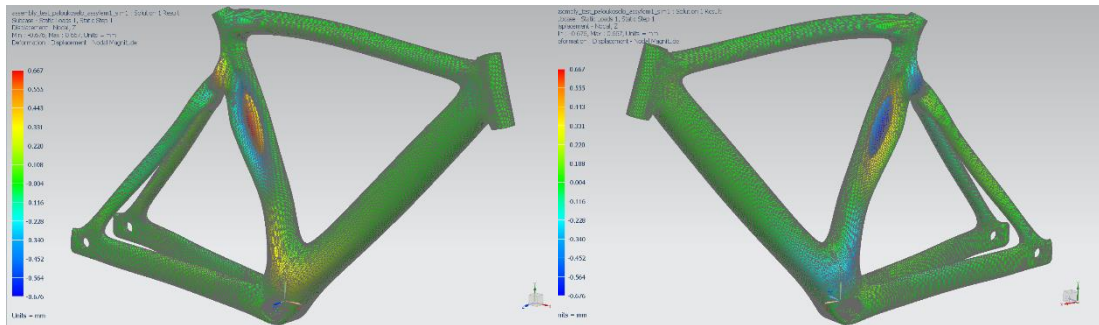
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-2,34E+05	1,06E+04	0,00E+00	-8,61E+03	2,12E+03	-1,29E+04	1,23E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	2,41E+05	2,97E+04	0,00E+00	1,63E+04	-2,96E-13	1,88E-12	1,07E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,90E+04	-1,23E+05	0,00E+00	-3,54E+03	3,38E+03	5,69E+03	4,21E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	6,81E+04	1,91E+05	0,00E+00	1,90E+04	-1,86E+03	-2,59E+03	6,44E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,19E+03	-1,20E+04	0,00E+00	-2,21E+02	2,44E+02	-4,12E+02	2,89E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,19E+03	-1,20E+04	0,00E+00	-2,21E+02	2,44E+02	-4,12E+02	2,89E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	2,38E+05	2,98E+04	0,00E+00	-1,74E+04	3,59E-13	2,05E-12	1,06E+05
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	6,86E+04	7,75E+04	0,00E+00	2,00E+04	-5,11E+03	-9,56E+02	2,05E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-6,70E+04	1,19E+03	0,00E+00	4,85E+01	-2,12E+04	-1,07E+03	3,41E+04
Max Stress 23	1	seatstay_right	Interlaminar	-3,19E+04	-4,15E+03	0,00E+00	-7,22E+03	1,61E+04	8,73E+03	1,57E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,40E+03	-1,87E+04	0,00E+00	-1,31E+03	6,75E+02	-3,22E+04	8,77E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	4,21E+04	1,15E+05	0,00E+00	1,34E+04	-4,34E+03	3,45E+04	3,87E+04
Min Maximum Shear Stress	4	chainstay_right	Interlaminar	-2,89E-02	9,00E-02	0,00E+00	-7,58E-02	-4,27E+00	-2,30E+00	9,63E-02
Max Maximum Shear Stress	2	seat_tube	Interlaminar	-2,34E+05	1,06E+04	0,00E+00	-8,61E+03	2,12E+03	-1,29E+04	1,23E+05



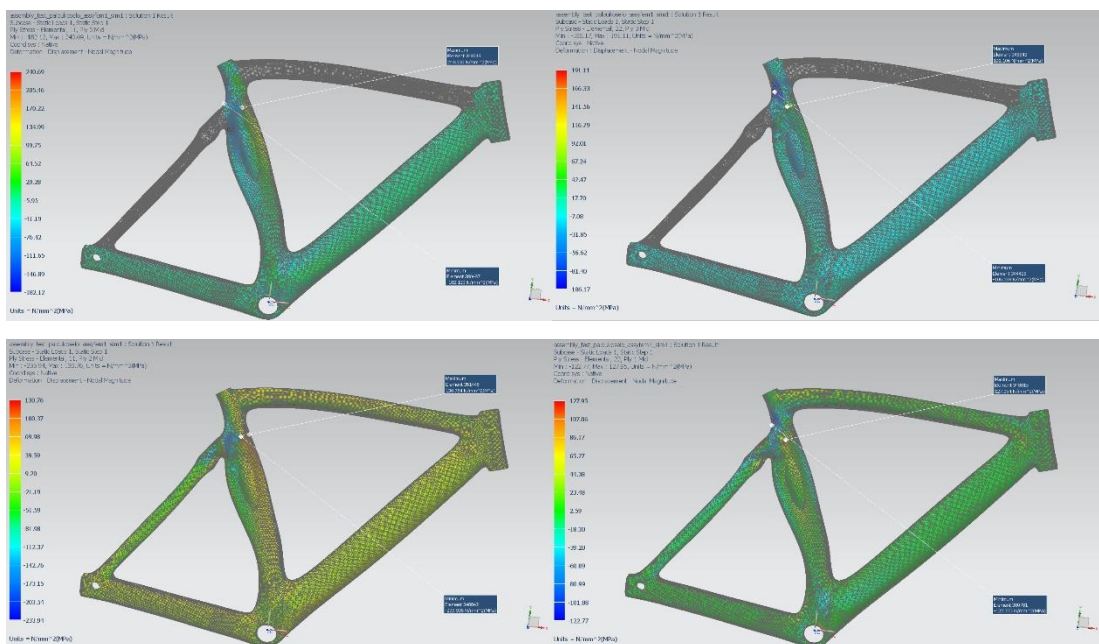
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement

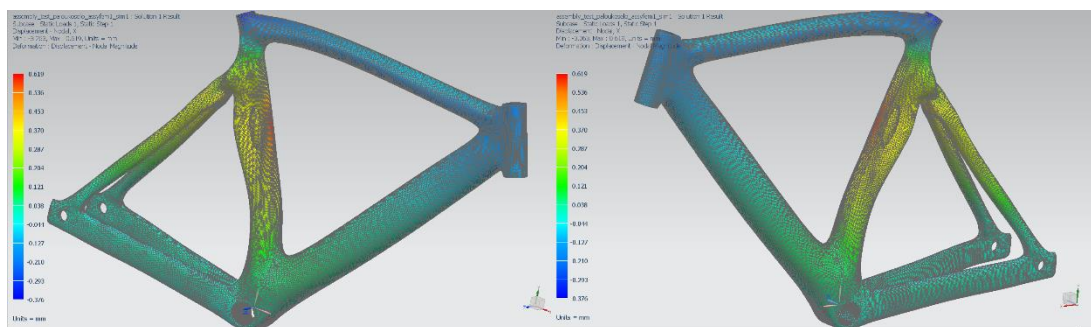


Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

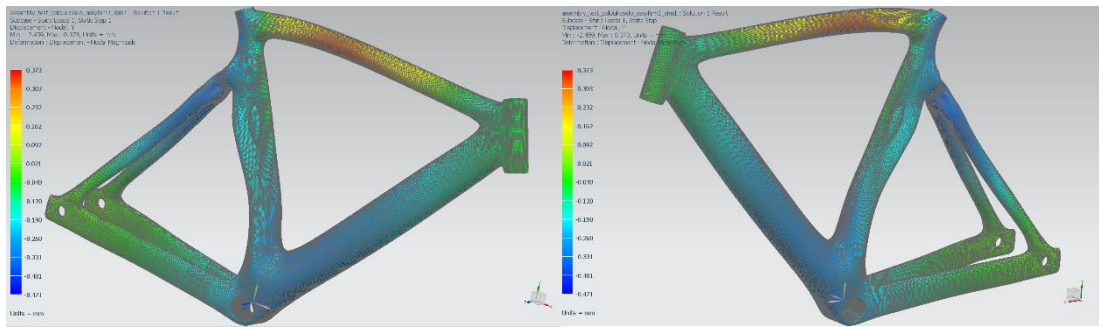
Στο 10^ο σενάριο, παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στον κεντρικό σωλήνα, με μέγιστη τιμή στην 4^η στρώση τα 277.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 212.2 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 39.2 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 32.8 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 306.7 MPa στην ένωση άνω φαλιδιών και κεντρικού σωλήνα στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 222.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 27.4 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 21.7 MPa. Οι τιμές αυτές σε εκείνα τα σημεία είναι πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού διαστρωμάτωσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υλικού κάποιων στρώσεων με άλλο ελαφρύτερο μικρότερης αντοχής, όχι όμως αφαίρεση διότι εφόσον ο σκελετός αποτελείται αποκλειστικά από μονοδιευθυντικές στρώσεις, δε θα υπάρχει υλικό στην εκάστοτε διεύθυνση τάσεων για τις αντέξει.

- 10th Scenario

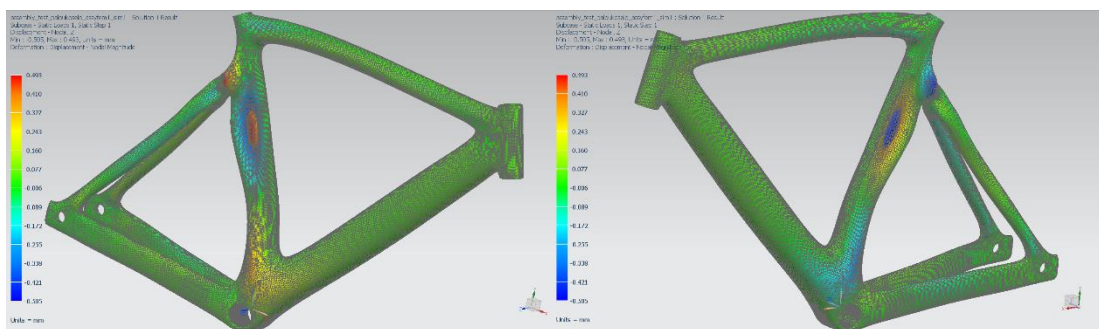
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	3	seatstay_right	Interlaminar	-3,07E+05	-3,41E+03	0,00E+00	1,03E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,52E+05
Max Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	2,77E+05	3,11E+03	0,00E+00	8,47E+02	-2,11E+03	-1,21E+04	1,37E+05
Min Stress 22	3	seatstay_left	Interlaminar	4,04E+04	-2,74E+04	0,00E+00	-5,13E+03	0,00E+00	0,00E+00	3,43E+04
Max Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	7,91E+04	3,92E+04	0,00E+00	-5,19E+03	-1,33E-12	-8,45E-13	2,06E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-5,36E+03	-1,49E+03	0,00E+00	-1,73E+02	1,54E+02	-2,16E+02	1,94E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-5,36E+03	-1,49E+03	0,00E+00	-1,73E+02	1,54E+02	-2,16E+02	1,94E+03
Min Stress 12	7	seat_tube	Interlaminar	1,45E+05	2,60E+04	0,00E+00	-2,09E+04	2,73E-14	-8,25E-14	6,33E+04
Max Stress 12	7	seat_tube	Interlaminar	1,39E+05	2,56E+04	0,00E+00	1,91E+04	2,13E-13	-7,34E-14	6,01E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-9,69E+04	1,38E+04	0,00E+00	-3,62E+02	-1,19E+04	-4,26E+03	5,54E+04
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-8,05E+04	1,37E+04	0,00E+00	1,38E+03	1,05E+04	-2,21E+03	4,71E+04
Min Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	2,77E+05	3,11E+03	0,00E+00	8,47E+02	-2,11E+03	-1,21E+04	1,37E+05
Max Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	1,62E+05	1,73E+03	0,00E+00	7,13E+03	3,41E+02	1,08E+04	8,06E+04
Min Maximum Shear Stress	6	chainstay_left	Interlaminar	-1,94E+01	-1,91E+01	0,00E+00	-1,47E-01	4,90E-14	-5,51E-15	1,98E-01
Max Maximum Shear Stress	3	seatstay_right	Interlaminar	-3,07E+05	-3,41E+03	0,00E+00	1,03E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,52E+05



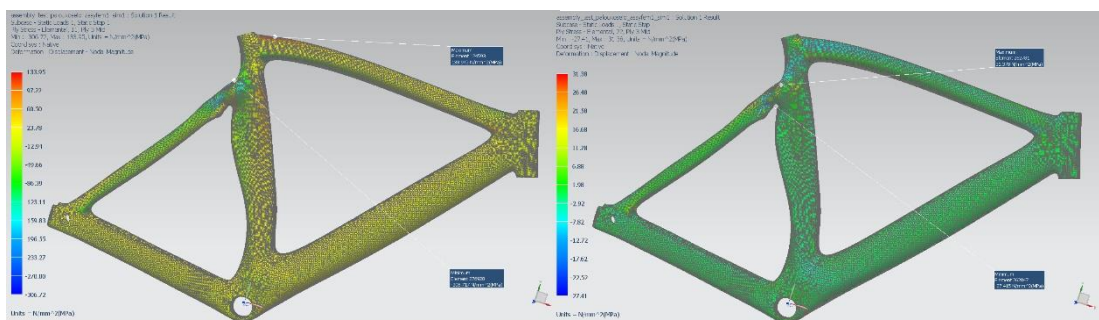
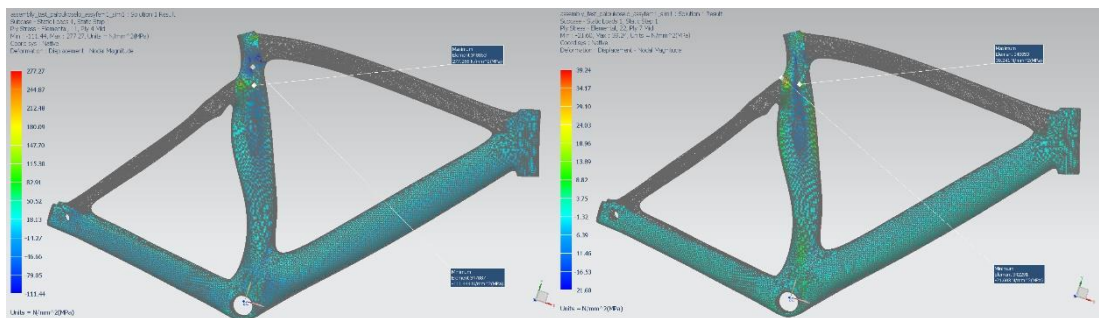
X axis displacement



Y axis displacement



Z axis displacement



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Pedalling Forces Test

Κατά την πειραματική διαδικασία των δοκιμών Pedalling Forces, όσον αφορά στην παραμόρφωση του σκελετού λόγω εφαρμογής τάσεων, για την πρώτη περίπτωση παρατηρήθηκε εφελκυσμός κυρίως στο δεξί άνω ψαλίδι και τον κεντρικό σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στο αριστερό κάτω ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στον άνω σωλήνα μαζί με την ένωση άνω, κάτω και εμπρός σωλήνα στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 1.8 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στο αριστερό κάτω ψαλίδι και στην ένωση του εμπρός σωλήνα με τον άνω και κάτω σωλήνα, όπου στους τελευταίους η θλίψη συνεχίζεται περίπου μέχρι τη μέση τους, στην εφαρμογή κατά τον άξονα X. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στη δεξιά πλευρά της ένωσης μεσαίας τριβής με κεντρικό, κάτω σωλήνα και δεξί κάτω ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και σε ολόκληρη τη μεσαία τριβή κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 2.2 χιλιοστά. Για τη δεύτερη περίπτωση παρατηρήθηκε εφελκυσμός κυρίως στον κεντρικό σωλήνα και το αριστερό πάνω ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στο αριστερό κάτω ψαλίδι και τη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα Z, καμία από αυτές όμως δε ξεπέρασε τα 2 χιλιοστά. Επίσης, παρατηρήθηκε θλίψη στο άνω αριστερό ψαλίδι στην εφαρμογή κατά τον άξονα X, στο κάτω δεξί ψαλίδι και τη μεσαία τριβή στην εφαρμογή κατά τον άξονα Y και στη μεσαία τριβή κατά τον άξονα Z, χωρίς όμως καμία τους να ξεπεράσει το 2 χιλιοστά.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που εμφανίστηκαν σε σημεία και στρώσεις υλικού του σκελετού στο συγκεκριμένο πείραμα για τα σενάρια Quasi (M46J Woven, T300 Woven) και 1-10, κατά τους άξονες X και Y. Οι άξονες αυτοί να σημειωθεί πως έχουν οριστεί με βάση το επίπεδο του κάθε σωλήνα ξεχωριστά (X άξονας/οριζόντια διεύθυνση σωλήνα, Y άξονας/κάθετη διεύθυνση σωλήνα). Στις παρακάτω απεικονίσεις ενδέχεται κάποια από τα κομμάτια του σκελετού να έχουν ένα σκοτεινό γκρι χρώμα, πράγμα το οποίο οφείλεται στην απεικόνιση του υπολογιστικού προγράμματος όταν δεν υπάρχουν πλέον στρώσεις στα συγκεκριμένα κομμάτια σκελετού (π.χ. κανονική απεικόνιση 6th στρώσης εμπρός σωλήνα, ενώ οι στρώσεις του επάνω σωλήνα περιορίζονται στις 4).

Στο M46J Woven σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 4th στρώση τα 179.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 164 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 204.8 MPa στην 4th στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 185.3 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 253.9 MPa στη μεσαία τριβή στην 1th στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 176.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 197.6 MPa στην 1th στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 168 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 4th στρώση τα 207.2 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 192.1 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 177.9 MPa στην 4th στρώση, με τις υπόλοιπες να μη

ξεπερνούν τα 170.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 218.6 MPa στο ίδιο σημείο στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 157.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 257.7 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 162.8 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- M46J Woven

Top Summary

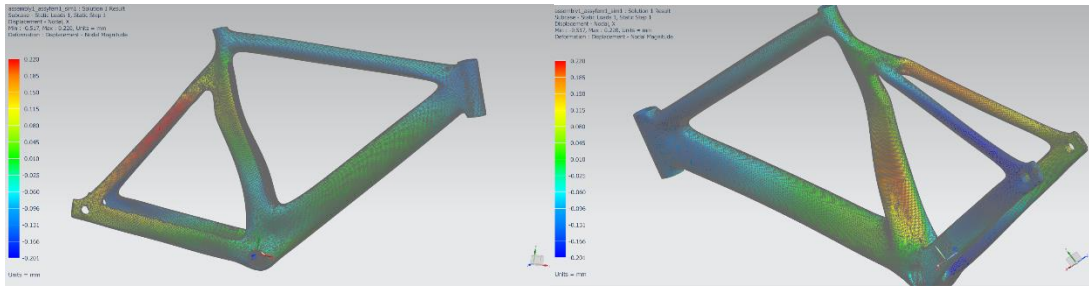
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	1	seat_tube	Interlaminar	-2,54E+05	-4,08E+04	0,00E+00	-1,50E+04	1,37E+04	2,52E+02
Max Stress 11	2	4	seat_tube	Interlaminar	2,07E+05	1,77E+04	0,00E+00	8,59E+03	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	-1,18E+04	-2,58E+05	0,00E+00	-1,41E+04	-2,91E+04	4,23E+03
Max Stress 22	1	4	seat_tube	Interlaminar	2,06E+04	2,05E+05	0,00E+00	-1,20E+04	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,11E+04	-4,26E+03	0,00E+00	5,19E+02	9,96E+00	-2,99E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,11E+04	-4,26E+03	0,00E+00	5,19E+02	9,96E+00	-2,99E+02
Min Stress 12	1	4	seat_tube	Interlaminar	-2,64E+04	3,00E+04	0,00E+00	-2,30E+04	0,00E+00	0,00E+00
Max Stress 12	2	4	seat_tube	Interlaminar	1,83E+04	-7,67E+03	0,00E+00	2,37E+04	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 23	1	2	seat_tube	Interlaminar	-1,26E+04	-4,85E+02	0,00E+00	-5,90E+01	-5,98E+04	-7,66E+03
Max Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-1,47E+04	1,24E+04	0,00E+00	-6,25E+02	5,51E+04	-1,04E+03
Min Stress 31	1	2	seat_tube	Interlaminar	8,08E+03	-8,74E+03	0,00E+00	-1,82E+03	1,01E+04	-4,32E+04
Max Stress 31	2	2	seat_tube	Interlaminar	1,55E+04	-1,67E+04	0,00E+00	5,12E+02	-7,31E+03	4,90E+04

Static Loads Case 1

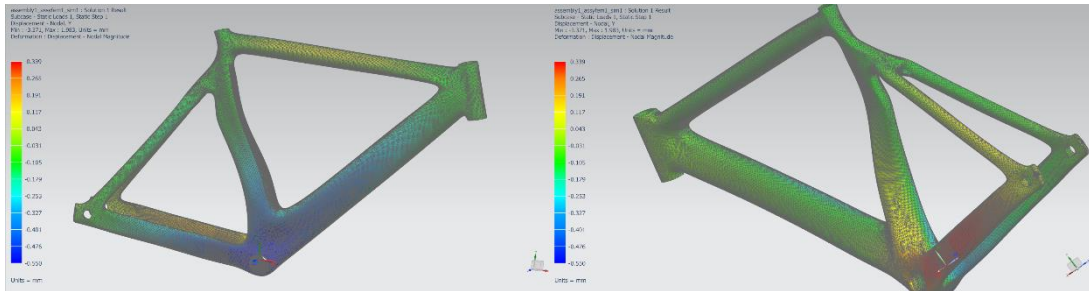
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-2,54E+05	-4,08E+04	0,00E+00	-1,50E+04	1,37E+04	2,52E+02
Max Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	1,80E+05	-4,29E+04	0,00E+00	-6,09E+03	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-5,48E+04	-1,98E+05	0,00E+00	-4,58E+03	5,05E+03	-3,58E+03
Max Stress 22	4	seat_tube	Interlaminar	2,06E+04	2,05E+05	0,00E+00	-1,20E+04	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,11E+04	-4,26E+03	0,00E+00	5,19E+02	9,96E+00	-2,99E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,11E+04	-4,26E+03	0,00E+00	5,19E+02	9,96E+00	-2,99E+02
Min Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	-2,64E+04	3,00E+04	0,00E+00	-2,30E+04	0,00E+00	0,00E+00
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	7,38E+04	5,60E+04	0,00E+00	1,64E+04	-3,14E+03	1,33E+03
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,26E+04	-4,85E+02	0,00E+00	-5,90E+01	-5,98E+04	-7,66E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	7,64E+04	-1,15E+05	0,00E+00	-9,24E+03	5,09E+04	-1,23E+04
Min Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	8,08E+03	-8,74E+03	0,00E+00	-1,82E+03	1,01E+04	-4,32E+04
Max Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	4,22E+04	1,06E+04	0,00E+00	-1,80E+04	2,03E+04	3,46E+04

Static Loads Case 2

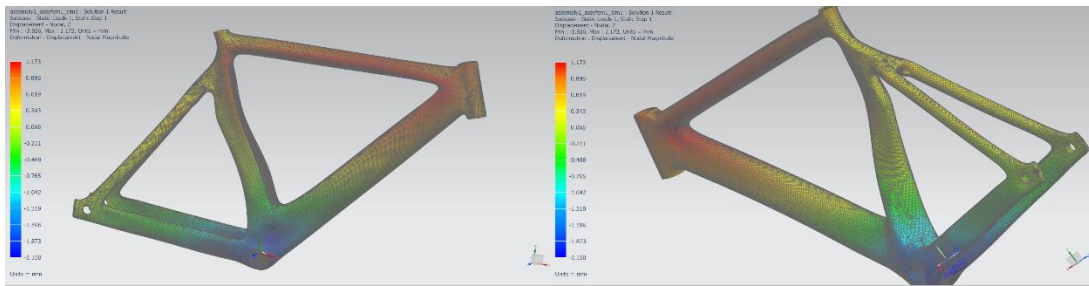
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-2,19E+05	-4,77E+04	0,00E+00	-2,66E+03	-4,23E+03	-4,54E+03
Max Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	2,07E+05	1,77E+04	0,00E+00	8,59E+03	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-1,18E+04	-2,58E+05	0,00E+00	-1,41E+04	-2,91E+04	4,23E+03
Max Stress 22	4	seat_tube	Interlaminar	3,90E+04	1,78E+05	0,00E+00	1,68E+04	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,08E+03	-6,89E+03	0,00E+00	-2,13E+03	7,26E+02	-8,04E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,08E+03	-6,89E+03	0,00E+00	-2,13E+03	7,26E+02	-8,04E+02
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-1,08E+05	-1,69E+05	0,00E+00	-2,14E+04	-3,00E+03	-7,90E+02
Max Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	1,83E+04	-7,67E+03	0,00E+00	2,37E+04	0,00E+00	0,00E+00
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-3,86E+04	5,65E+04	0,00E+00	1,86E+04	-5,48E+04	2,55E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,47E+04	1,24E+04	0,00E+00	-6,25E+02	5,51E+04	-1,04E+03
Min Stress 31	2	head_tube	Interlaminar	7,66E+03	-9,94E+03	0,00E+00	5,14E+02	-9,49E+03	-2,28E+04
Max Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	1,55E+04	-1,67E+04	0,00E+00	5,12E+02	-7,31E+03	4,90E+04



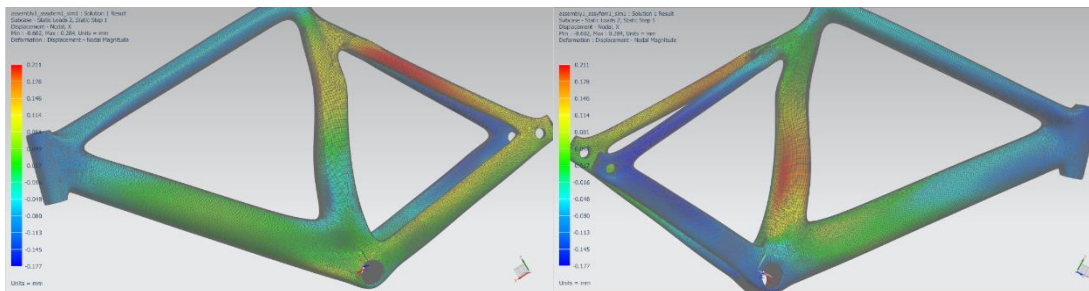
X axis displacement Case 1



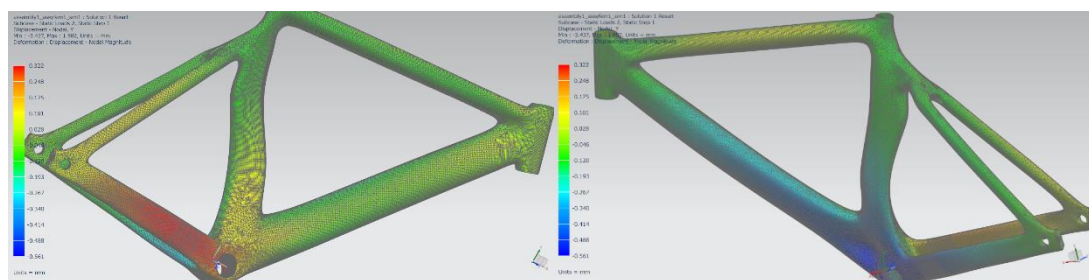
Y axis displacement Case 1



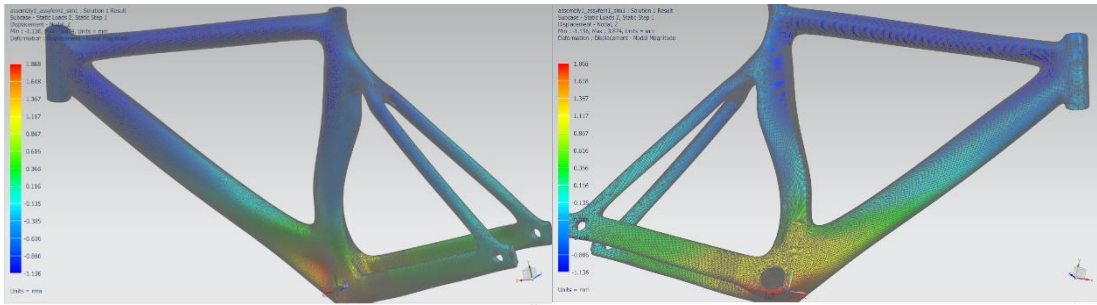
Z axis displacement Case 1



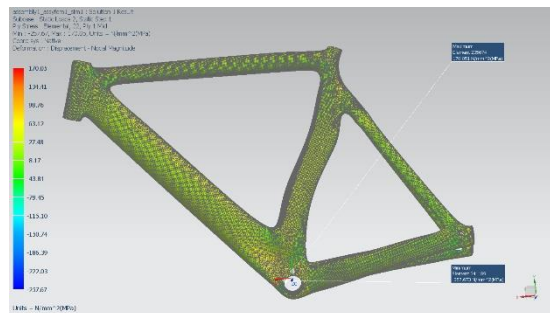
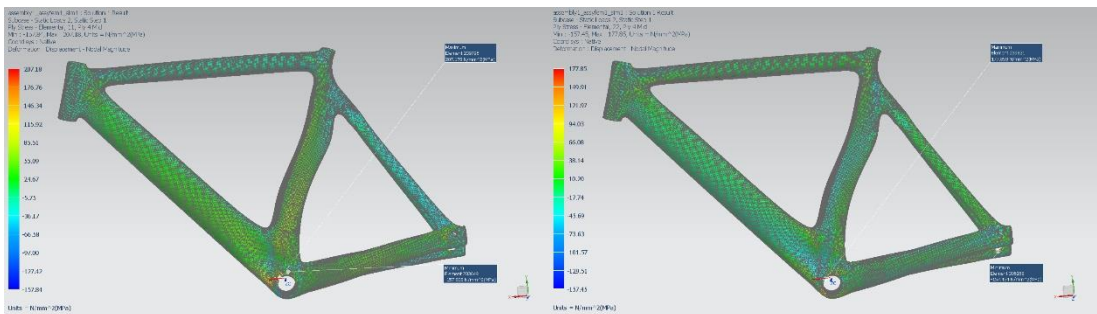
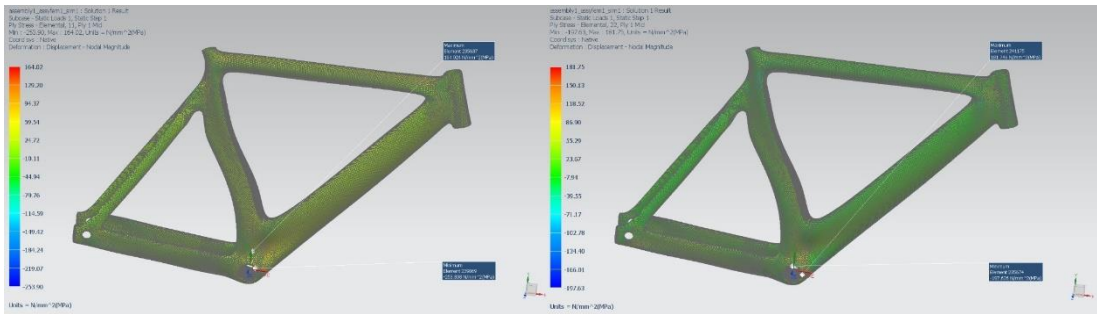
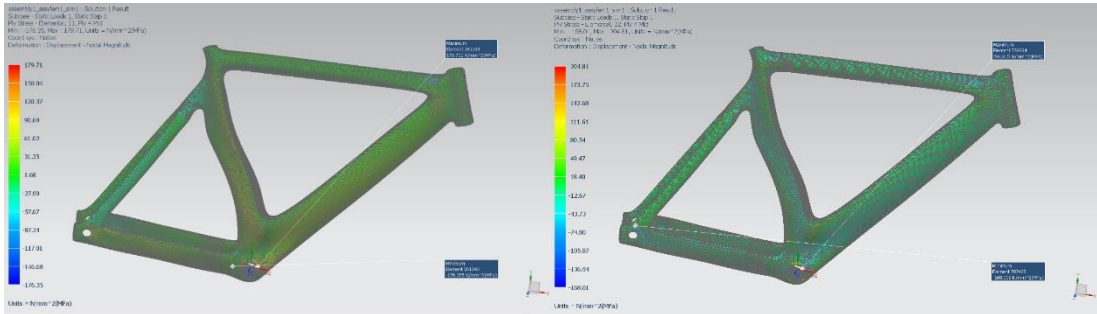
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο T300 Woven σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 4^η στρώση τα 128.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 115 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 165 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 142.4 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 161.6 MPa στη μεσαία τριβή στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 145 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 140.2 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 113.2 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 3^η στρώση τα 172.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 154.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 138.7 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 116.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 154 MPa στο ίδιο σημείο στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 113.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 170.8 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 141.1 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- T300 Woven

Top Summary

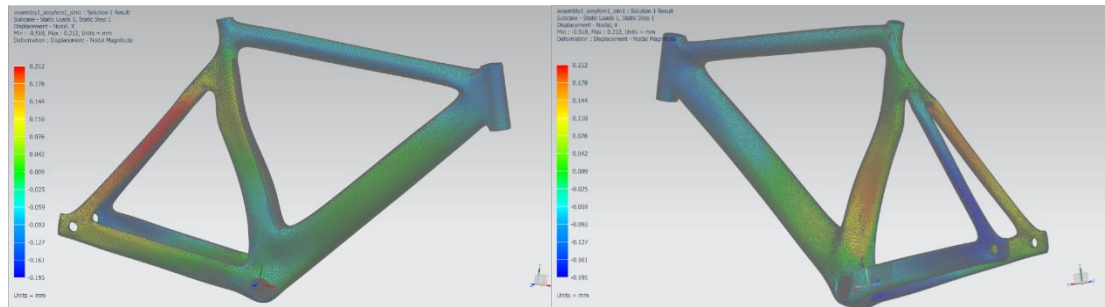
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	1	seat_tube	Interlaminar	-1,62E+05	-1,76E+04	0,00E+00	-1,04E+04	5,30E+03	8,75E+02
Max Stress 11	2	3	seat_tube	Interlaminar	1,28E+05	-1,23E+05	0,00E+00	-9,89E+02	-1,04E+04	2,45E+03
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	-1,67E+03	-1,71E+05	0,00E+00	-9,89E+03	-4,41E+03	8,42E+02
Max Stress 22	1	3	seat_tube	Interlaminar	-1,21E+05	1,65E+05	0,00E+00	9,20E+02	1,12E+04	3,11E+03
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-6,55E+03	-5,70E+03	0,00E+00	1,15E+02	1,55E+01	-3,47E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-6,55E+03	-5,70E+03	0,00E+00	1,15E+02	1,55E+01	-3,47E+02
Min Stress 12	1	4	seat_tube	Interlaminar	4,67E+04	4,88E+02	0,00E+00	-2,65E+04	-3,69E-12	-3,36E-12
Max Stress 12	2	4	seat_tube	Interlaminar	-2,44E+04	7,48E+04	0,00E+00	2,72E+04	3,82E-12	-1,14E-12
Min Stress 23	1	2	seat_tube	Interlaminar	-1,38E+04	-3,17E+03	0,00E+00	-1,11E+02	-1,88E+04	-3,25E+03
Max Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-1,28E+04	1,43E+03	0,00E+00	-2,87E+02	1,95E+04	-1,36E+03
Min Stress 31	1	2	seat_tube	Interlaminar	1,78E+03	-9,11E+03	0,00E+00	-1,42E+03	4,42E+03	-1,42E+04
Max Stress 31	2	2	seat_tube	Interlaminar	6,09E+03	-1,43E+04	0,00E+00	4,47E+02	-1,68E+03	1,71E+04

Static Loads Case 1

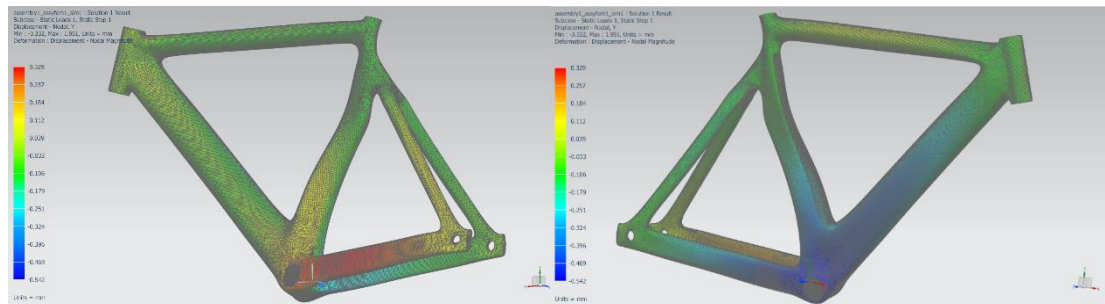
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-1,62E+05	-1,76E+04	0,00E+00	-1,04E+04	5,30E+03	8,75E+02
Max Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	1,28E+05	-1,57E+04	0,00E+00	-5,25E+03	-2,60E-12	2,80E-12
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-2,41E+04	-1,40E+05	0,00E+00	-4,93E+03	2,08E+03	-2,48E+03
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-1,21E+05	1,65E+05	0,00E+00	9,20E+02	1,12E+04	3,11E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,55E+03	-5,70E+03	0,00E+00	1,15E+02	1,55E+01	-3,47E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,55E+03	-5,70E+03	0,00E+00	1,15E+02	1,55E+01	-3,47E+02
Min Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	4,67E+04	4,88E+02	0,00E+00	-2,65E+04	-3,69E-12	-3,36E-12
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	2,37E+04	2,64E+04	0,00E+00	2,35E+04	1,52E+03	-1,88E+02
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,38E+04	-3,17E+03	0,00E+00	-1,11E+02	-1,88E+04	-3,25E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-9,14E+03	-2,37E+04	0,00E+00	-1,90E+04	1,55E+04	4,71E+03
Min Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	1,78E+03	-9,11E+03	0,00E+00	-1,42E+03	4,42E+03	-1,42E+04
Max Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	4,14E+04	6,13E+03	0,00E+00	-1,78E+04	1,02E+04	9,32E+03

Static Loads Case 2

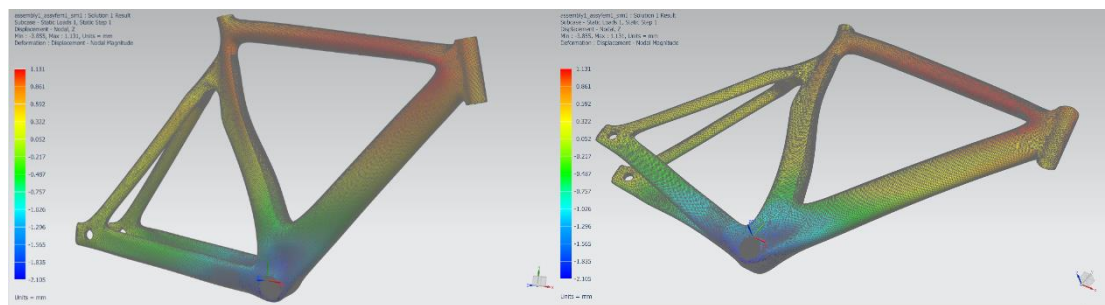
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-1,54E+05	-3,47E+04	0,00E+00	-4,08E+03	-8,22E+02	-1,93E+03
Max Stress 11	3	seat_tube	Interlaminar	1,72E+05	-1,23E+05	0,00E+00	-9,89E+02	-1,04E+04	2,45E+03
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-1,67E+03	-1,71E+05	0,00E+00	-9,89E+03	-4,41E+03	8,42E+02
Max Stress 22	2	seat_tube	Interlaminar	-9,02E+04	1,39E+05	0,00E+00	6,36E+03	-1,14E+03	-1,20E+03
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	5,91E+02	-6,51E+03	0,00E+00	-1,90E+03	8,68E+02	-9,16E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	5,91E+02	-6,51E+03	0,00E+00	-1,90E+03	8,68E+02	-9,16E+02
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-7,95E+04	-7,27E+04	0,00E+00	-2,27E+04	-3,25E+03	-2,23E+03
Max Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	-2,44E+04	7,48E+04	0,00E+00	2,72E+04	3,82E-12	-1,14E-12
Min Stress 23	2	head_tube	Interlaminar	2,56E+04	-5,23E+04	0,00E+00	-1,69E+02	-1,77E+04	-2,35E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,28E+04	1,43E+03	0,00E+00	-2,87E+02	1,95E+04	-1,36E+03
Min Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	-4,07E+04	3,36E+04	0,00E+00	-4,26E+03	-1,83E+03	-9,77E+03
Max Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	6,09E+03	-1,43E+04	0,00E+00	4,47E+02	-1,68E+03	1,71E+04



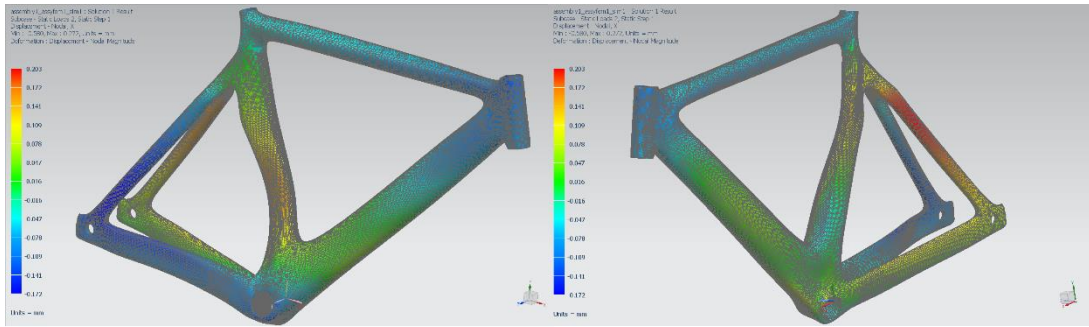
X axis displacement Case 1



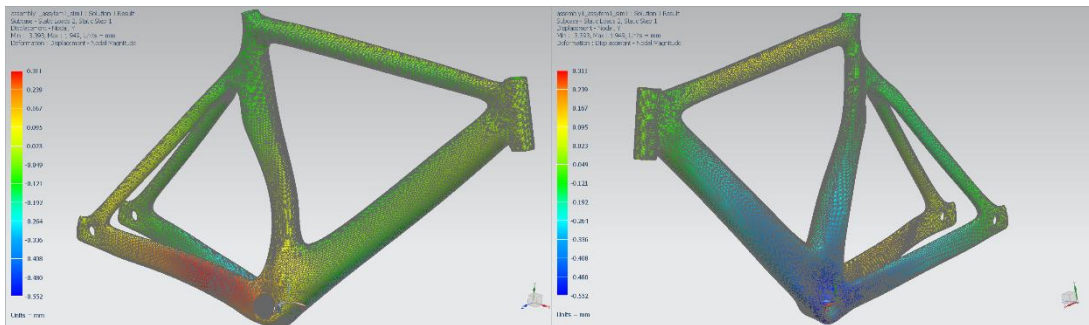
Y axis displacement Case 1



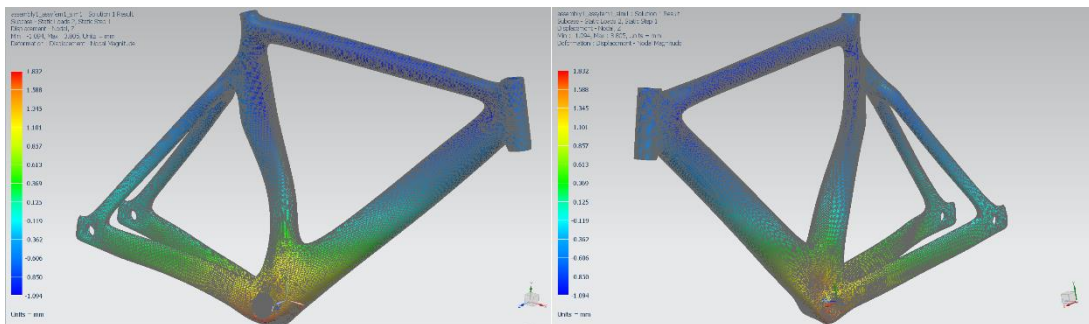
Z axis displacement Case 1



X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2

Στο 1^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 6^η στρώση τα 87.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 84.2 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 114.4 MPa στην 5^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 101 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 116.2 MPa στη μεσαία τριβή στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 114.1 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 99.9 MPa στην 4^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 96.7 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 119.9 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 98.1 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 91.4 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 83.3 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 114 MPa στο ίδιο σημείο στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 78.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 112.5 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 111.9 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 1

Top Summary

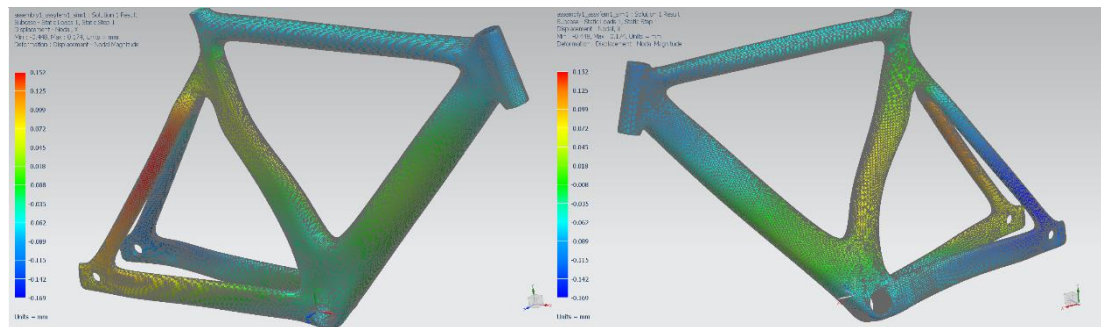
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	2	chainstay_left	Interlaminar	-1,16E+05	1,21E+04	0,00E+00	1,79E+03	5,94E+03	-3,30E+03	6,42E+04
Max Stress 11	2	5	seat_tube	Interlaminar	1,20E+05	-7,01E+04	0,00E+00	8,53E+01	-6,43E+03	1,27E+03	9,50E+04
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	5,52E+03	-1,13E+05	0,00E+00	-5,95E+03	-3,82E+03	3,28E+02	5,93E+04
Max Stress 22	1	5	seat_tube	Interlaminar	-8,29E+04	1,14E+05	0,00E+00	4,44E+03	6,40E+03	1,71E+03	9,87E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-6,52E+03	-6,13E+03	0,00E+00	2,31E+02	1,02E+01	-2,17E+02	2,99E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-6,52E+03	-6,13E+03	0,00E+00	2,31E+02	1,02E+01	-2,17E+02	2,99E+02
Min Stress 12	1	6	seat_tube	Interlaminar	2,49E+04	-2,01E+03	0,00E+00	-1,69E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,16E+04
Max Stress 12	2	6	seat_tube	Interlaminar	-1,15E+03	4,65E+04	0,00E+00	1,73E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,95E+04
Min Stress 23	1	3	seat_tube	Interlaminar	-4,41E+03	-6,26E+03	0,00E+00	1,25E+03	-1,73E+04	-2,09E+03	1,56E+03
Max Stress 23	2	3	seat_tube	Interlaminar	-6,41E+03	-2,24E+03	0,00E+00	1,10E+03	1,79E+04	-6,91E+02	2,36E+03
Min Stress 31	1	3	seat_tube	Interlaminar	-1,16E+04	6,21E+03	0,00E+00	-8,51E+02	3,90E+03	-1,29E+04	8,97E+03
Max Stress 31	2	3	seat_tube	Interlaminar	-1,10E+03	-5,95E+03	0,00E+00	-1,62E+03	-1,66E+03	1,56E+04	2,92E+03
Min Maximum Shear Stress	2	3	head_tube	Interlaminar	-3,14E+01	-3,16E+01	0,00E+00	-8,37E-02	1,33E+01	-2,31E+00	1,13E-01
Max Maximum Shear Stress	2	5	seat_tube	Interlaminar	1,19E+05	-8,74E+04	0,00E+00	2,73E+03	-5,87E+03	1,66E+03	1,03E+05

Static Loads Case 1

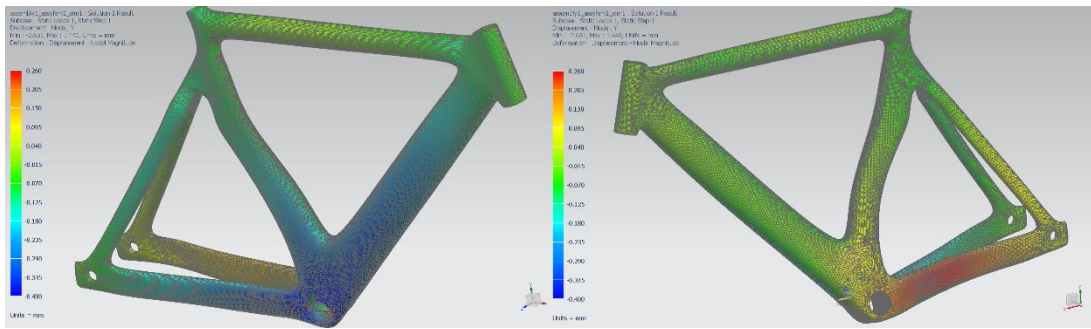
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	chainstay_left	Interlaminar	-1,16E+05	1,21E+04	0,00E+00	1,79E+03	5,94E+03	-3,30E+03	6,42E+04
Max Stress 11	6	chainstay_right	Interlaminar	8,73E+04	-2,18E+03	0,00E+00	1,69E+03	0,00E+00	0,00E+00	4,48E+04
Min Stress 22	4	chainstay_left	Interlaminar	-2,59E+04	-9,99E+04	0,00E+00	-5,90E+03	2,80E-12	-2,31E-13	3,75E+04
Max Stress 22	5	seat_tube	Interlaminar	-8,29E+04	1,14E+05	0,00E+00	4,44E+03	6,40E+03	1,71E+03	9,87E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,52E+03	-6,13E+03	0,00E+00	2,31E+02	1,02E+01	-2,17E+02	2,99E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,52E+03	-6,13E+03	0,00E+00	2,31E+02	1,02E+01	-2,17E+02	2,99E+02
Min Stress 12	6	seat_tube	Interlaminar	2,49E+04	-2,01E+03	0,00E+00	-1,69E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,16E+04
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	1,67E+04	3,05E+04	0,00E+00	1,41E+04	2,40E+02	3,08E+02	1,57E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-4,41E+03	-6,26E+03	0,00E+00	1,25E+03	-1,73E+04	-2,09E+03	1,56E+03
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-8,56E+04	7,50E+04	0,00E+00	-3,01E+02	1,32E+04	3,01E+03	8,03E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,16E+04	6,21E+03	0,00E+00	-8,51E+02	3,90E+03	-1,29E+04	8,97E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,94E+04	2,58E+04	0,00E+00	-3,67E+03	1,34E+03	7,45E+03	2,29E+04
Min Maximum Shear Stress	3	head_tube	Interlaminar	5,37E+00	5,24E+00	0,00E+00	1,12E-01	-4,12E+01	2,96E+00	1,29E-01
Max Maximum Shear Stress	5	seat_tube	Interlaminar	-8,29E+04	1,14E+05	0,00E+00	4,44E+03	6,40E+03	1,71E+03	9,87E+04

Static Loads Case 2

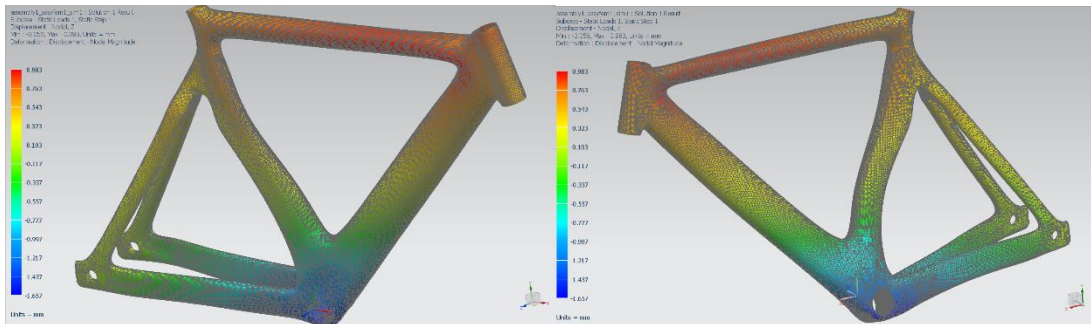
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-1,14E+05	-2,64E+04	0,00E+00	-3,63E+03	-1,56E+03	-1,82E+03	4,40E+04
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	1,20E+05	-7,01E+04	0,00E+00	8,53E+01	-6,43E+03	1,27E+03	9,50E+04
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	5,52E+03	-1,13E+05	0,00E+00	-5,95E+03	-3,82E+03	3,28E+02	5,93E+04
Max Stress 22	2	seat_tube	Interlaminar	-5,66E+04	9,14E+04	0,00E+00	3,60E+03	2,25E+01	-1,17E+03	7,41E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,03E+03	-5,68E+03	0,00E+00	-1,18E+03	4,66E+02	-4,95E+02	4,51E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,03E+03	-5,68E+03	0,00E+00	-1,18E+03	4,66E+02	-4,95E+02	4,51E+03
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-4,14E+04	-4,87E+04	0,00E+00	-1,42E+04	-3,09E+03	-1,78E+03	1,46E+04
Max Stress 12	6	seat_tube	Interlaminar	-1,15E+03	4,65E+04	0,00E+00	1,73E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,95E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-1,36E+04	6,74E+03	0,00E+00	4,68E+02	-1,32E+04	6,45E+03	1,02E+04
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-6,41E+03	-2,24E+03	0,00E+00	1,10E+03	1,79E+04	-6,91E+02	2,36E+03
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,90E+04	2,19E+04	0,00E+00	2,04E+03	-1,63E+03	-8,77E+03	2,06E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,10E+03	-5,95E+03	0,00E+00	-1,62E+03	-1,66E+03	1,56E+04	2,92E+03
Min Maximum Shear Stress	3	head_tube	Interlaminar	-3,14E+01	-3,16E+01	0,00E+00	-8,37E-02	1,33E+01	-2,31E+00	1,13E-01
Max Maximum Shear Stress	5	seat_tube	Interlaminar	1,19E+05	-8,74E+04	0,00E+00	2,73E+03	-5,87E+03	1,66E+03	1,03E+05



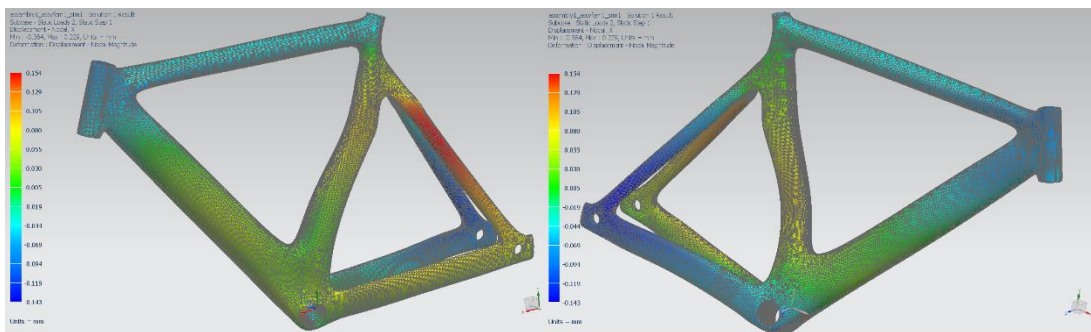
X axis displacement Case 1



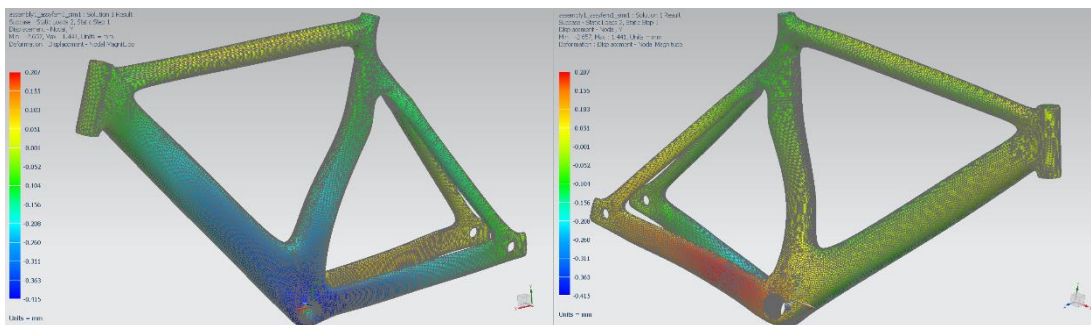
Y axis displacement Case 1



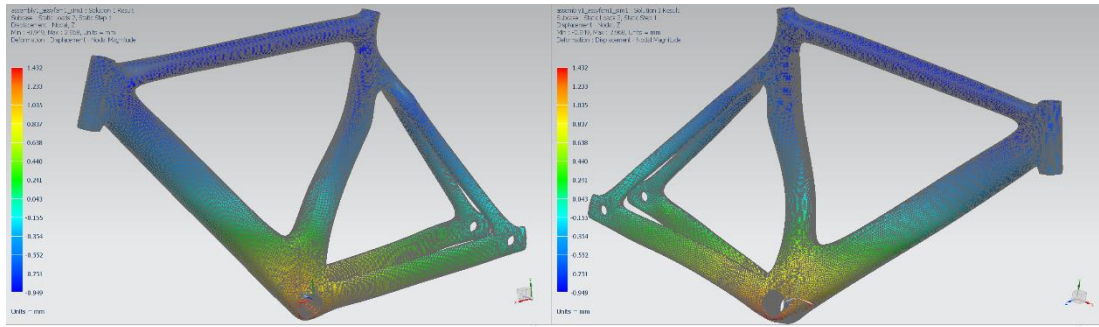
Z axis displacement Case 1



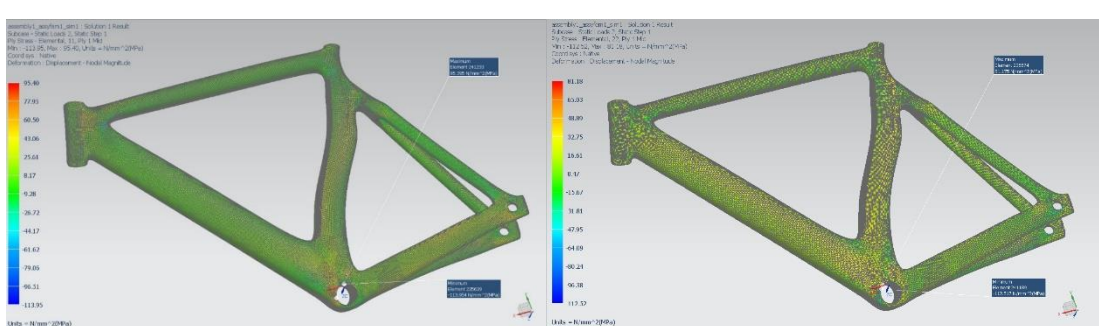
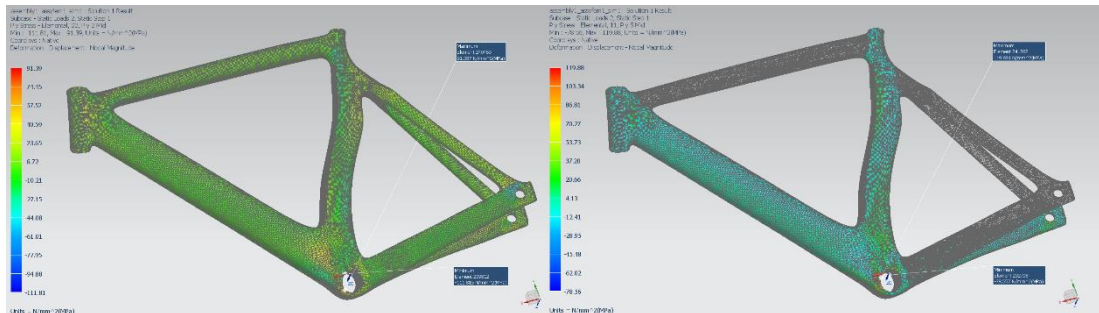
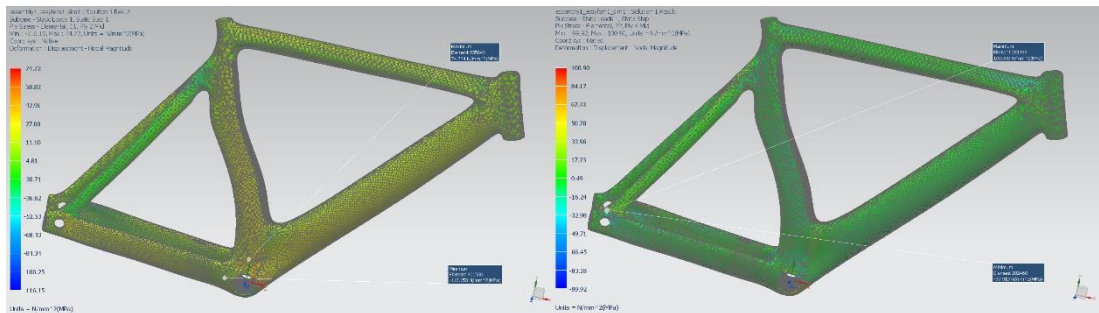
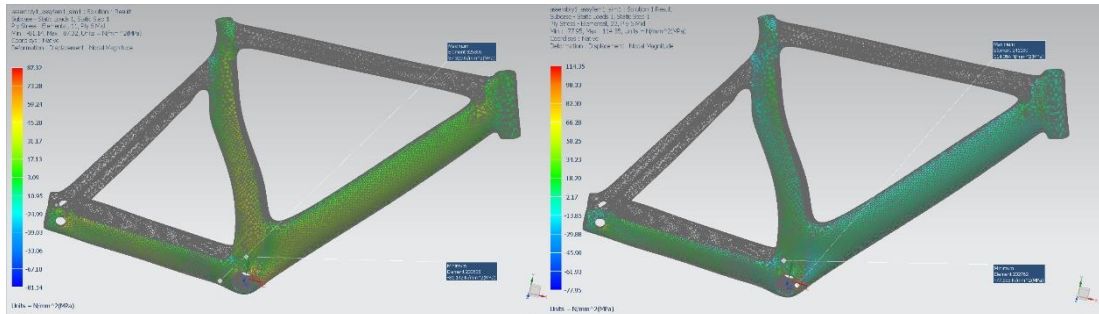
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 2^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 4^η στρώση τα 111.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 110.4 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 155.1 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 150.2 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 148.5 MPa στη μεσαία τριβή στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 134.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 121.7 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 98.6 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 3^η στρώση τα 161.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 151.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 146.1 MPa στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 109.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 140.4 MPa στο ίδιο σημείο στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 105.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 152.9 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 141 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 2

Top Summary

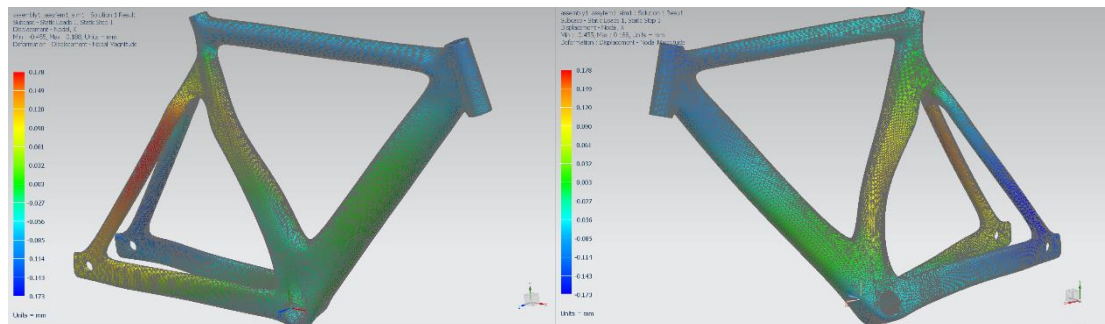
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	1	seat_tube	Interlaminar	-1,49E+05	8,18E+04	0,00E+00	-2,04E+03	7,27E+03	2,35E+03	1,15E+05
Max Stress 11	2	3	seat_tube	Interlaminar	1,61E+05	-1,20E+05	0,00E+00	-5,13E+02	-1,01E+04	2,17E+03	1,40E+05
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	8,46E+03	-1,53E+05	0,00E+00	-8,30E+03	-5,24E+03	6,14E+02	8,11E+04
Max Stress 22	1	3	seat_tube	Interlaminar	-1,18E+05	1,55E+05	0,00E+00	1,34E+03	1,10E+04	2,84E+03	1,37E+05
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-5,96E+03	-7,41E+03	0,00E+00	3,81E+02	1,64E+01	-1,70E+02	8,18E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-5,96E+03	-7,41E+03	0,00E+00	3,81E+02	1,64E+01	-1,70E+02	8,18E+02
Min Stress 12	1	4	seat_tube	Interlaminar	-4,24E+04	9,19E+04	0,00E+00	-2,53E+04	-4,10E-12	-1,43E-12	7,17E+04
Max Stress 12	2	4	seat_tube	Interlaminar	-2,65E+04	7,50E+04	0,00E+00	2,68E+04	3,81E-12	-1,13E-12	5,74E+04
Min Stress 23	1	2	seat_tube	Interlaminar	-1,33E+04	3,69E+03	0,00E+00	7,11E+02	-1,68E+04	-3,34E+03	8,52E+03
Max Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-1,17E+04	3,57E+03	0,00E+00	-2,94E+02	1,72E+04	-1,26E+03	7,63E+03
Min Stress 31	1	2	seat_tube	Interlaminar	2,80E+03	-8,72E+03	0,00E+00	-1,38E+03	4,11E+03	-1,32E+04	5,92E+03
Max Stress 31	2	2	seat_tube	Interlaminar	6,95E+03	-1,38E+04	0,00E+00	3,79E+02	-1,62E+03	1,62E+04	1,04E+04
Min Maximum Shear Stress	2	7	head_tube	Interlaminar	-2,53E+00	-2,52E+00	0,00E+00	-7,18E-02	1,03E+00	-1,07E+00	7,21E-02
Max Maximum Shear Stress	2	3	seat_tube	Interlaminar	1,60E+05	-1,41E+05	0,00E+00	4,80E+03	-9,01E+03	2,68E+03	1,50E+05

Static Loads Case 1

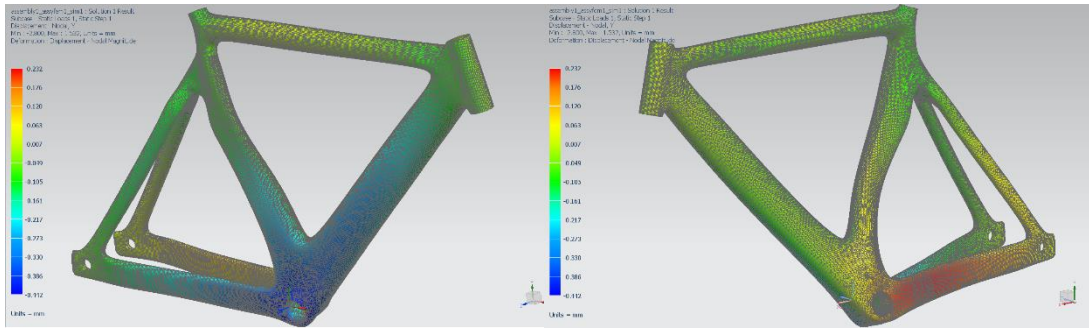
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-1,49E+05	8,18E+04	0,00E+00	-2,04E+03	7,27E+03	2,35E+03	1,15E+05
Max Stress 11	4	seat_tube	Interlaminar	1,11E+05	-1,03E+04	0,00E+00	-9,83E+03	-3,13E-12	3,65E-13	6,16E+04
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,41E+04	-1,22E+05	0,00E+00	-3,25E+03	2,20E+03	-1,94E+03	4,39E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-1,18E+05	1,55E+05	0,00E+00	1,34E+03	1,10E+04	2,84E+03	1,37E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-5,96E+03	-7,41E+03	0,00E+00	3,81E+02	1,64E+01	-1,70E+02	8,18E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-5,96E+03	-7,41E+03	0,00E+00	3,81E+02	1,64E+01	-1,70E+02	8,18E+02
Min Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	-4,24E+04	9,19E+04	0,00E+00	-2,53E+04	-4,10E-12	-1,43E-12	7,17E+04
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	4,61E+03	6,38E+04	0,00E+00	2,37E+04	0,00E+00	-6,28E+02	3,79E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,33E+04	3,69E+03	0,00E+00	7,11E+02	-1,68E+04	-3,34E+03	8,52E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,05E+04	-1,89E+04	0,00E+00	-1,83E+04	1,58E+04	4,50E+03	1,87E+04
Min Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	2,80E+03	-8,72E+03	0,00E+00	-1,38E+03	4,11E+03	-1,32E+04	5,92E+03
Max Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	-4,57E+04	7,03E+04	0,00E+00	-1,86E+04	1,43E+04	9,46E+03	6,09E+04
Min Maximum Shear Stress	3	head_tube	Interlaminar	4,24E-01	5,96E-01	0,00E+00	1,75E-01	-4,34E+00	3,30E-01	1,95E-01
Max Maximum Shear Stress	3	seat_tube	Interlaminar	-1,35E+05	1,53E+05	0,00E+00	7,35E+03	9,70E+03	3,39E+03	1,44E+05

Static Loads Case 2

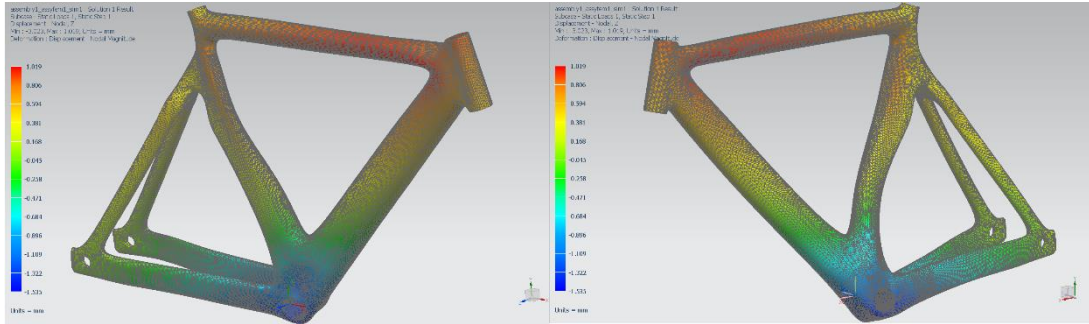
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-1,40E+05	-3,18E+04	0,00E+00	-5,38E+03	-1,12E+03	-2,37E+03	5,46E+04
Max Stress 11	3	seat_tube	Interlaminar	1,61E+05	-1,20E+05	0,00E+00	-5,13E+02	-1,01E+04	2,17E+03	1,40E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	8,46E+03	-1,53E+05	0,00E+00	-8,30E+03	-5,24E+03	6,14E+02	8,11E+04
Max Stress 22	2	seat_tube	Interlaminar	-9,76E+04	1,46E+05	0,00E+00	6,60E+03	-1,54E+03	-9,76E+02	1,22E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,12E+03	-2,94E+03	0,00E+00	-1,00E+03	2,86E+02	-2,92E+02	3,19E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,12E+03	-2,94E+03	0,00E+00	-1,00E+03	2,86E+02	-2,92E+02	3,19E+03
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-5,22E+04	-6,45E+04	0,00E+00	-2,03E+04	-3,70E+03	-2,40E+03	2,12E+04
Max Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	-2,65E+04	7,50E+04	0,00E+00	2,68E+04	3,81E-12	-1,13E-12	5,74E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	6,18E+03	-3,03E+04	0,00E+00	1,90E+04	-1,49E+04	3,47E+03	2,64E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,17E+04	3,57E+03	0,00E+00	-2,94E+02	1,72E+04	-1,26E+03	7,63E+03
Min Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	-3,09E+04	2,88E+04	0,00E+00	-4,82E+03	-2,05E+03	-9,42E+03	3,03E+04
Max Stress 31	2	seat_tube	Interlaminar	6,95E+03	-1,38E+04	0,00E+00	3,79E+02	-1,62E+03	1,62E+04	1,04E+04
Min Maximum Shear Stress	7	head_tube	Interlaminar	-2,53E+00	-2,52E+00	0,00E+00	-7,18E-02	1,03E+00	-1,07E+00	7,21E-02
Max Maximum Shear Stress	3	seat_tube	Interlaminar	1,60E+05	-1,41E+05	0,00E+00	4,80E+03	-9,01E+03	2,68E+03	1,50E+05



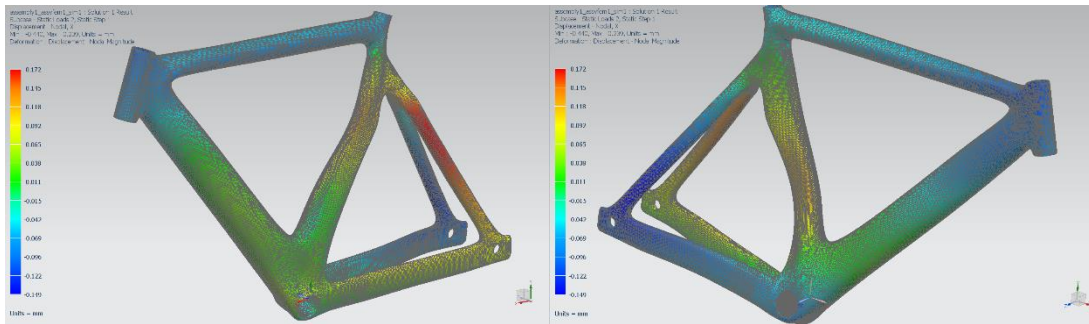
X axis displacement Case 1



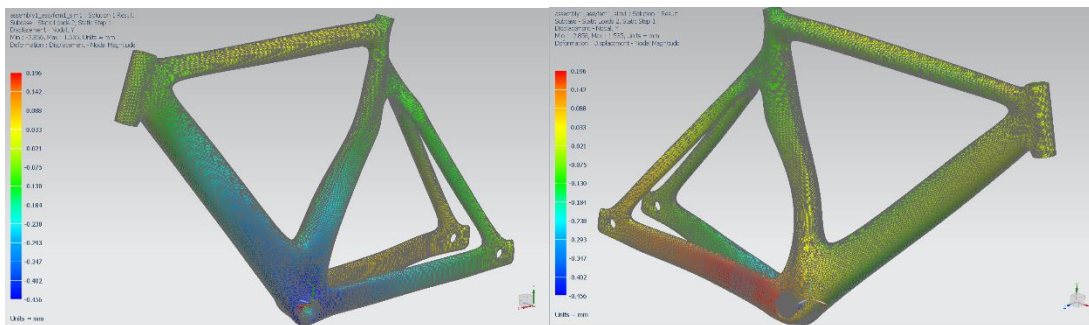
Y axis displacement Case 1



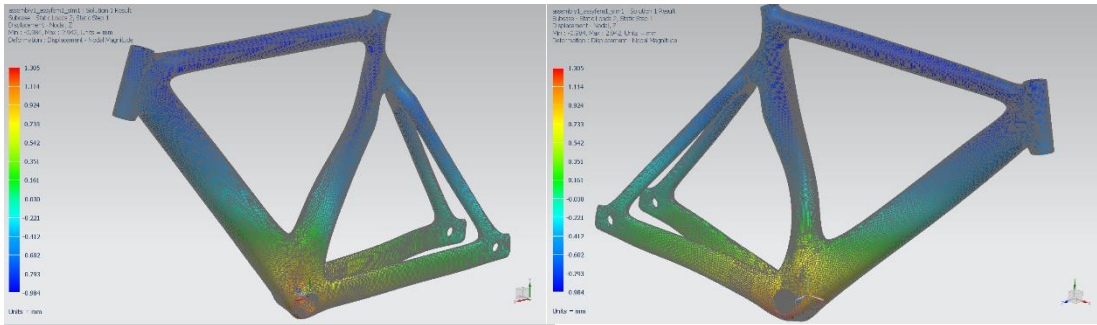
Z axis displacement Case 1



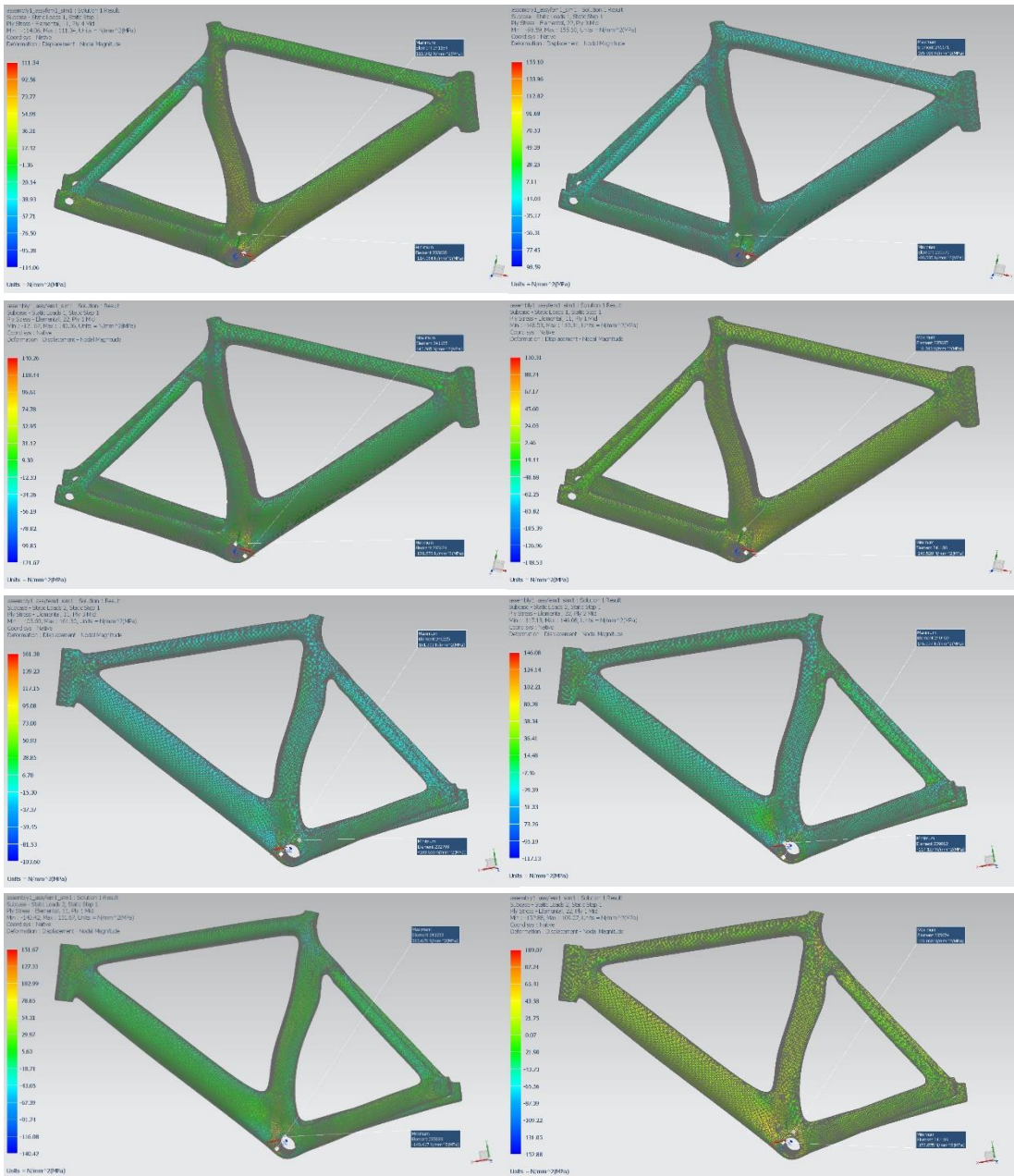
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 3^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 219 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 218.2 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 230.4 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 220.6 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 249.9 MPa στη μεσαία τριβή στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 189.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 139 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 125.4 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 257.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 243.8 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 123.4 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 89.7 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 233.1 MPa στο ίδιο σημείο στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 171.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 198.3 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 137.5 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 3

Top Summary

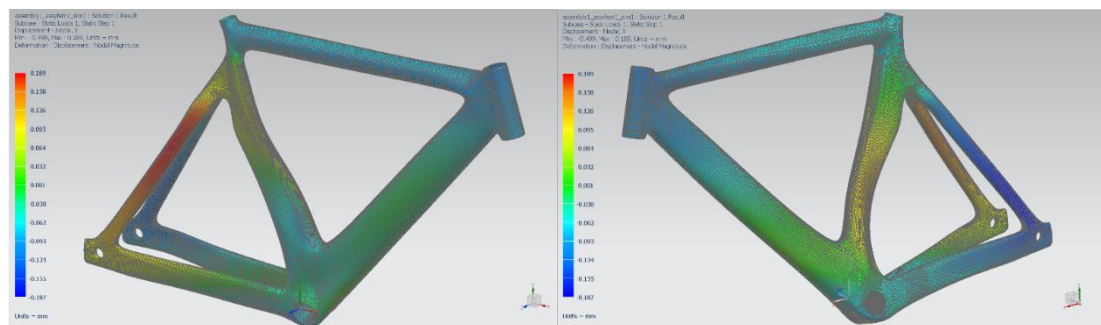
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	2	seat_tube	Interlaminar	-2,50E+05	3,62E+04	0,00E+00	-2,65E+03	2,01E+03	-2,74E+03	1,43E+05
Max Stress 11	2	2	seat_tube	Interlaminar	2,58E+05	-1,84E+04	0,00E+00	5,40E+02	-1,22E+04	-7,12E+03	1,38E+05
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	-4,29E+04	-1,98E+05	0,00E+00	-1,41E+04	3,37E+03	2,20E+02	7,90E+04
Max Stress 22	1	3	seat_tube	Interlaminar	-1,06E+05	2,30E+05	0,00E+00	1,49E+04	5,99E+03	7,62E+03	1,69E+05
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-6,40E+03	-7,70E+03	0,00E+00	5,56E+02	-4,46E+00	-1,49E+02	8,55E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-6,40E+03	-7,70E+03	0,00E+00	5,56E+02	-4,46E+00	-1,49E+02	8,55E+02
Min Stress 12	1	5	seat_tube	Interlaminar	7,67E+02	1,66E+04	0,00E+00	-3,48E+04	3,75E-12	0,00E+00	3,57E+04
Max Stress 12	2	5	seat_tube	Interlaminar	-8,68E+03	1,67E+04	0,00E+00	3,63E+04	-3,27E-12	0,00E+00	3,85E+04
Min Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-6,41E+04	1,85E+04	0,00E+00	2,10E+04	-1,97E+04	1,33E+04	4,63E+04
Max Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-2,66E+04	4,95E+02	0,00E+00	-9,28E+02	1,94E+04	3,03E+03	1,36E+04
Min Stress 31	1	3	seat_tube	Interlaminar	-8,23E+03	2,11E+04	0,00E+00	-1,80E+03	2,55E+03	-1,78E+04	1,48E+04
Max Stress 31	2	3	seat_tube	Interlaminar	9,04E+03	4,52E+03	0,00E+00	-2,91E+03	-1,20E+03	2,03E+04	3,69E+03
Min Maximum Shear Stress	1	3	head_tube	Interlaminar	-7,14E-01	-2,25E-01	0,00E+00	-1,23E-01	-3,92E+00	3,36E-01	2,74E-01
Max Maximum Shear Stress	2	3	seat_tube	Interlaminar	2,28E+05	-1,30E+05	0,00E+00	9,38E+03	-4,34E+03	6,77E+03	1,79E+05

Static Loads Case 1

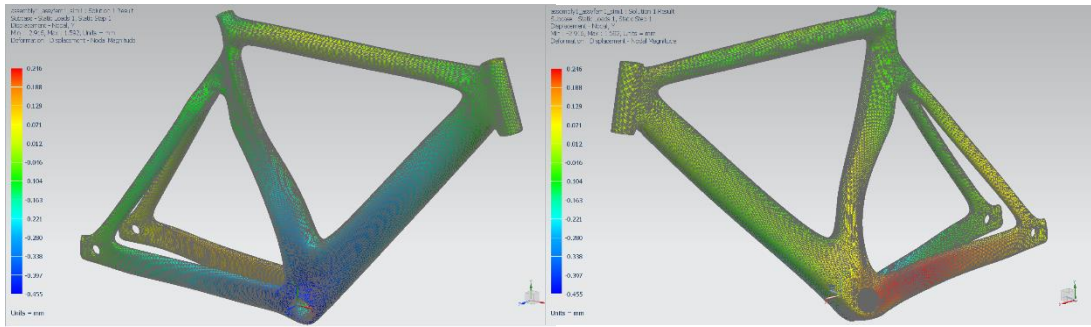
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-2,50E+05	3,62E+04	0,00E+00	-2,65E+03	2,01E+03	-2,74E+03	1,43E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	2,19E+05	-9,15E+03	0,00E+00	-8,01E+03	2,56E-12	0,00E+00	1,14E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,65E+04	-1,39E+05	0,00E+00	-5,41E+03	9,30E+01	-3,03E+03	5,15E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-1,06E+05	2,30E+05	0,00E+00	1,49E+04	5,99E+03	7,62E+03	1,69E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,40E+03	-7,70E+03	0,00E+00	5,56E+02	-4,46E+00	-1,49E+02	8,55E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,40E+03	-7,70E+03	0,00E+00	5,56E+02	-4,46E+00	-1,49E+02	8,55E+02
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	7,67E+02	1,66E+04	0,00E+00	-3,48E+04	3,75E-12	0,00E+00	3,57E+04
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	7,14E+04	1,41E+05	0,00E+00	3,60E+04	-1,10E+03	-7,12E+03	4,99E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-3,65E+03	-9,16E+02	0,00E+00	1,72E+03	-1,65E+04	-7,52E+03	2,19E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,10E+05	2,39E+04	0,00E+00	-2,01E+04	1,81E+04	1,45E+04	6,98E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-8,23E+03	2,11E+04	0,00E+00	-1,80E+03	2,55E+03	-1,78E+04	1,48E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,29E+05	1,79E+05	0,00E+00	-2,51E+03	4,47E+03	1,74E+04	1,54E+05
Min Maximum Shear Stress	3	head_tube	Interlaminar	-7,14E-01	-2,25E-01	0,00E+00	-1,23E-01	-3,92E+00	3,36E-01	2,74E-01
Max Maximum Shear Stress	3	seat_tube	Interlaminar	-1,08E+05	2,30E+05	0,00E+00	1,42E+04	5,69E+03	7,07E+03	1,69E+05

Static Loads Case 2

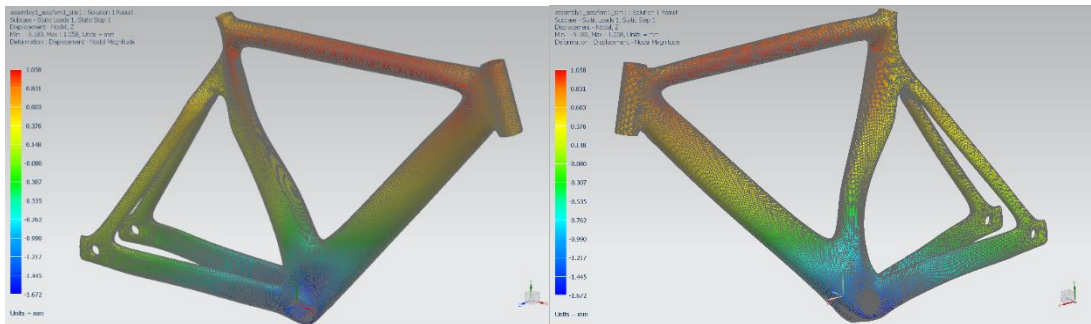
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-2,33E+05	3,51E+04	0,00E+00	3,99E+03	-2,07E+03	-2,48E+03	1,34E+05
Max Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	2,58E+05	-1,84E+04	0,00E+00	5,40E+02	-1,22E+04	-7,12E+03	1,38E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-4,29E+04	-1,98E+05	0,00E+00	-1,41E+04	3,37E+03	2,20E+02	7,90E+04
Max Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	4,57E+04	1,23E+05	0,00E+00	1,74E+04	1,51E+02	4,02E+00	4,26E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,65E+03	-2,45E+03	0,00E+00	-1,16E+03	2,92E+02	-2,96E+02	3,26E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	3,65E+03	-2,45E+03	0,00E+00	-1,16E+03	2,92E+02	-2,96E+02	3,26E+03
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-9,00E+04	-9,69E+04	0,00E+00	-3,19E+04	-6,19E+03	-2,58E+03	3,21E+04
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-8,68E+03	1,67E+04	0,00E+00	3,63E+04	-3,27E-12	0,00E+00	3,85E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-6,41E+04	1,85E+04	0,00E+00	2,10E+04	-1,97E+04	1,33E+04	4,63E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-2,66E+04	4,95E+02	0,00E+00	-9,28E+02	1,94E+04	3,03E+03	1,36E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,47E+04	2,63E+04	0,00E+00	5,70E+03	2,21E+02	-1,34E+04	8,12E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	9,04E+03	4,52E+03	0,00E+00	-2,91E+03	-1,20E+03	2,03E+04	3,69E+03
Min Maximum Shear Stress	3	head_tube	Interlaminar	1,69E+00	1,04E+00	0,00E+00	1,98E-01	3,78E+00	8,40E-01	3,79E-01
Max Maximum Shear Stress	3	seat_tube	Interlaminar	2,28E+05	-1,30E+05	0,00E+00	9,38E+03	-4,34E+03	6,77E+03	1,79E+05



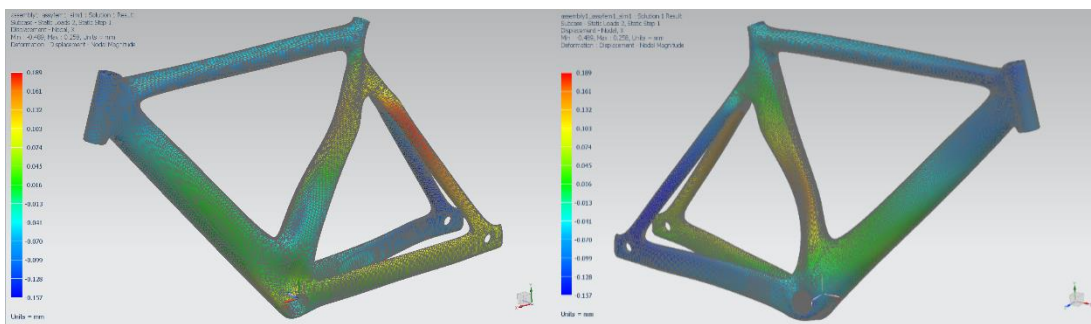
X axis displacement Case 1



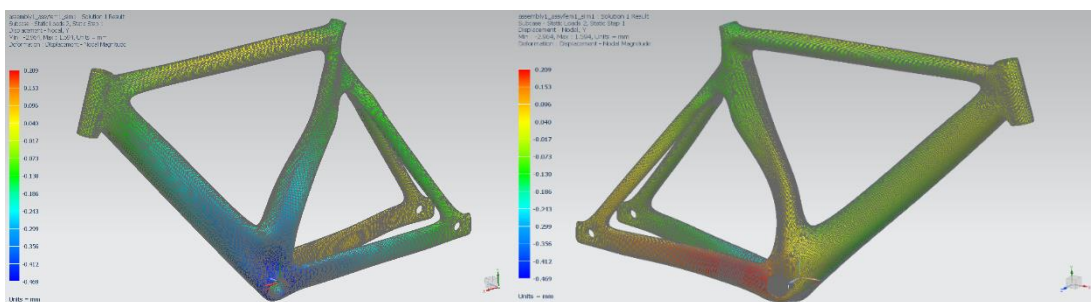
Y axis displacement Case 1



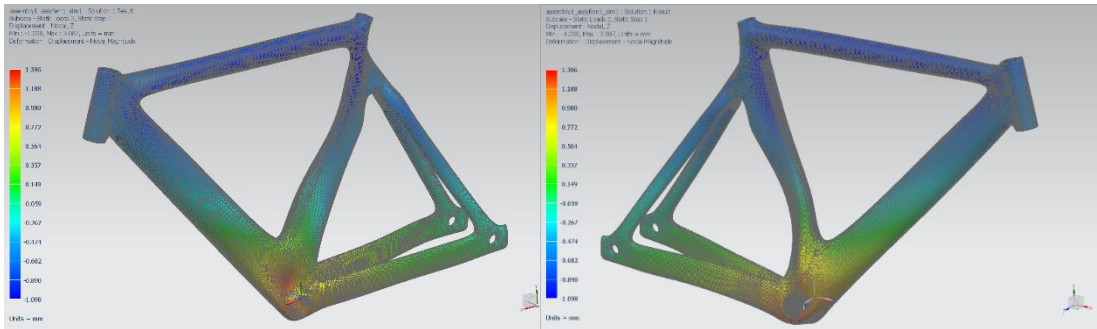
Z axis displacement Case 1



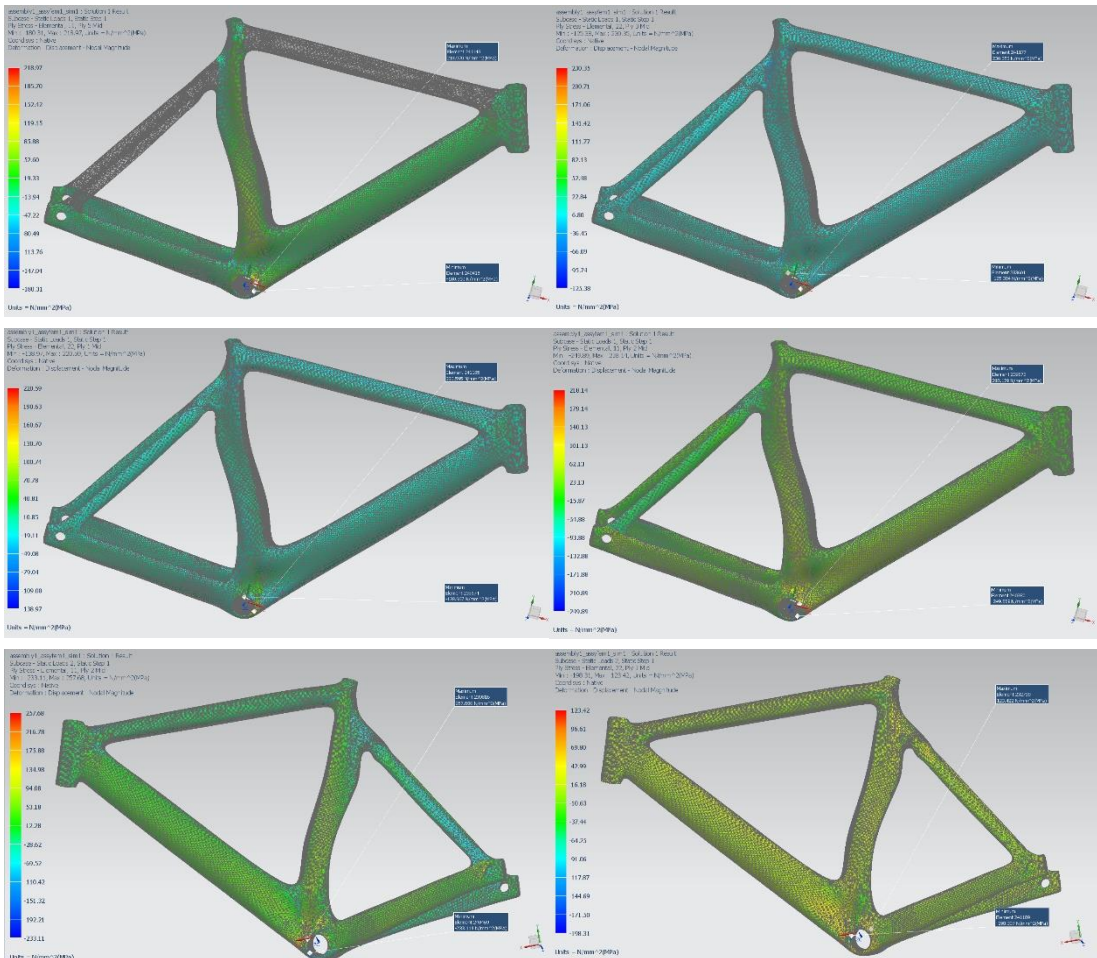
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 4^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 214.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 212 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 230.8 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 222 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 251.2 MPa στη μεσαία τριβή στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 189.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 133.8 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 127.6 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 250.6 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 238.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 126.8 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 87.2 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 235.6 MPa στο ίδιο σημείο στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 171.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 197.7 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 136.2 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 4

Top Summary

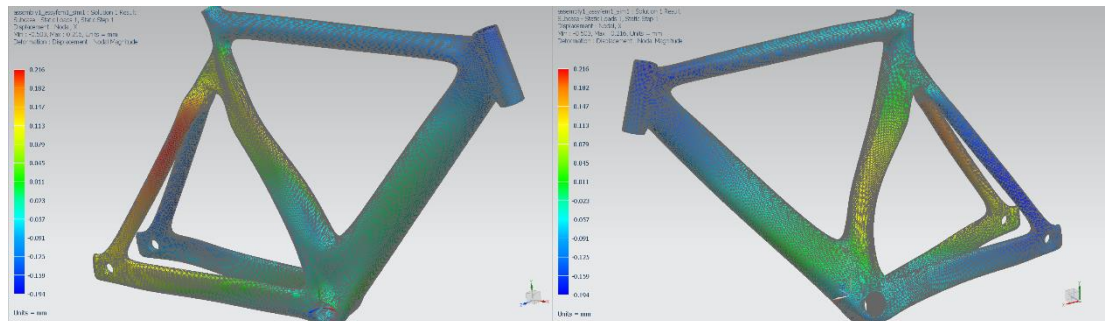
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	2	seat_tube	Interlaminar	-2,51E+05	3,65E+04	0,00E+00	-2,78E+03	2,11E+03	-2,67E+03	1,44E+05
Max Stress 11	2	2	seat_tube	Interlaminar	2,51E+05	-1,76E+04	0,00E+00	4,44E+02	-1,21E+04	-7,11E+03	1,34E+05
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	-4,56E+03	-1,98E+05	0,00E+00	-1,39E+04	-4,90E+03	2,57E+03	9,76E+04
Max Stress 22	1	3	seat_tube	Interlaminar	-1,06E+05	2,31E+05	0,00E+00	1,49E+04	6,04E+03	7,67E+03	1,69E+05
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-6,99E+03	-7,68E+03	0,00E+00	8,32E+02	1,27E-01	-1,03E+02	9,01E+02
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-6,99E+03	-7,68E+03	0,00E+00	8,32E+02	1,27E-01	-1,03E+02	9,01E+02
Min Stress 12	1	5	seat_tube	Interlaminar	1,12E+03	1,65E+04	0,00E+00	-3,46E+04	3,83E-12	0,00E+00	3,54E+04
Max Stress 12	2	5	seat_tube	Interlaminar	-8,28E+03	1,66E+04	0,00E+00	3,63E+04	-3,36E-12	0,00E+00	3,83E+04
Min Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-6,47E+04	1,85E+04	0,00E+00	2,11E+04	-2,00E+04	1,35E+04	4,67E+04
Max Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-2,62E+04	5,93E+02	0,00E+00	-9,48E+02	1,87E+04	2,90E+03	1,34E+04
Min Stress 31	1	3	seat_tube	Interlaminar	-8,26E+03	2,11E+04	0,00E+00	-1,76E+03	2,46E+03	-1,71E+04	1,48E+04
Max Stress 31	2	3	seat_tube	Interlaminar	9,41E+03	4,27E+03	0,00E+00	-2,89E+03	-1,15E+03	1,96E+04	3,87E+03
Min Maximum Shear Stress	1	3	head_tube	Interlaminar	2,63E+00	2,97E+00	0,00E+00	4,22E-01	-4,73E+00	-1,41E-01	4,56E-01
Max Maximum Shear Stress	2	3	seat_tube	Interlaminar	2,29E+05	-1,29E+05	0,00E+00	9,47E+03	-4,44E+03	6,82E+03	1,80E+05

Static Loads Case 1

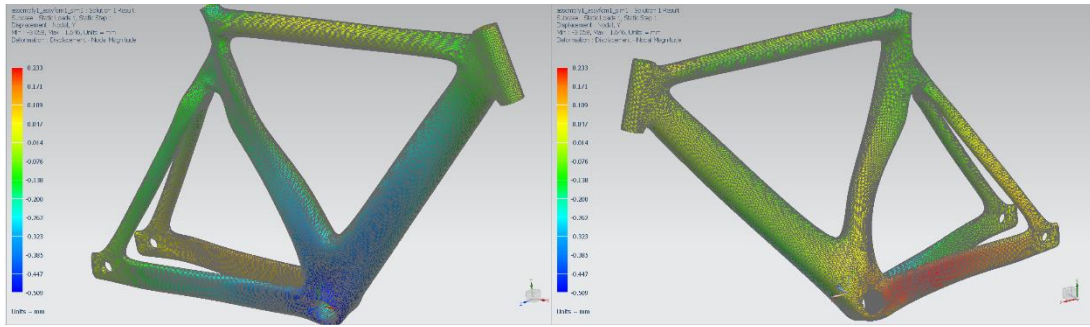
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-2,51E+05	3,65E+04	0,00E+00	-2,78E+03	2,11E+03	-2,67E+03	1,44E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	2,14E+05	-9,53E+03	0,00E+00	-7,63E+03	2,56E-12	0,00E+00	1,12E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-3,33E+04	-1,34E+05	0,00E+00	-4,45E+03	4,15E+02	-2,91E+03	5,05E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-1,06E+05	2,31E+05	0,00E+00	1,49E+04	6,04E+03	7,67E+03	1,69E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,99E+03	-7,68E+03	0,00E+00	8,32E+02	1,27E-01	-1,03E+02	9,01E+02
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-6,99E+03	-7,68E+03	0,00E+00	8,32E+02	1,27E-01	-1,03E+02	9,01E+02
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	1,12E+03	1,65E+04	0,00E+00	-3,46E+04	3,83E-12	0,00E+00	3,54E+04
Max Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	7,08E+04	1,42E+05	0,00E+00	3,61E+04	2,27E+03	-1,06E+03	5,07E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-2,79E+03	-8,56E+02	0,00E+00	1,75E+03	-1,58E+04	7,26E+03	2,00E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,10E+05	2,39E+04	0,00E+00	-2,02E+04	1,83E+04	1,46E+04	6,99E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-8,26E+03	2,11E+04	0,00E+00	-1,76E+03	2,46E+03	-1,71E+04	1,48E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,28E+05	1,77E+05	0,00E+00	-2,55E+03	4,58E+03	1,73E+04	1,53E+05
Min Maximum Shear Stress	3	head_tube	Interlaminar	2,63E+00	2,97E+00	0,00E+00	4,22E-01	-4,73E+00	-1,41E-01	4,56E-01
Max Maximum Shear Stress	3	seat_tube	Interlaminar	-1,07E+05	2,30E+05	0,00E+00	1,42E+04	5,75E+03	7,11E+03	1,69E+05

Static Loads Case 2

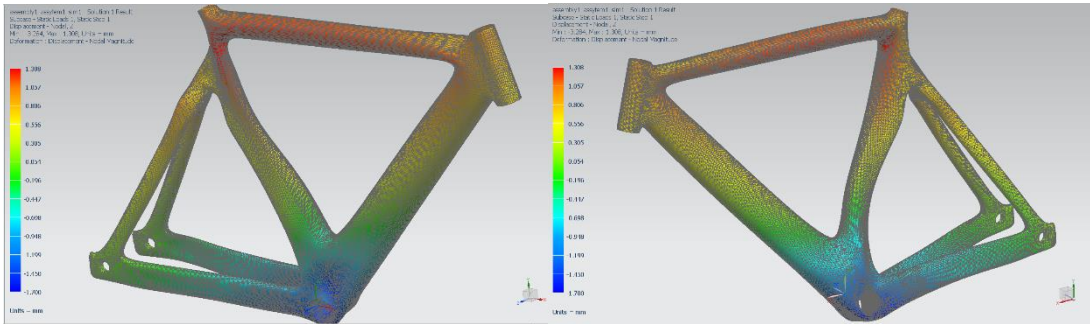
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-2,36E+05	3,56E+04	0,00E+00	4,13E+03	-2,20E+03	-2,41E+03	1,36E+05
Max Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	2,51E+05	-1,76E+04	0,00E+00	4,44E+02	-1,21E+04	-7,11E+03	1,34E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-4,56E+03	-1,98E+05	0,00E+00	-1,39E+04	-4,90E+03	2,57E+03	9,76E+04
Max Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	4,58E+04	1,27E+05	0,00E+00	1,79E+04	1,31E+02	4,83E+00	4,43E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,72E+03	-2,56E+03	0,00E+00	-1,35E+03	2,92E+02	-3,16E+02	3,88E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	4,72E+03	-2,56E+03	0,00E+00	-1,35E+03	2,92E+02	-3,16E+02	3,88E+03
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-8,66E+04	-9,23E+04	0,00E+00	-3,08E+04	-6,37E+03	-2,64E+03	3,09E+04
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-8,28E+03	1,66E+04	0,00E+00	3,63E+04	-3,36E-12	0,00E+00	3,83E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-6,47E+04	1,85E+04	0,00E+00	2,11E+04	-2,00E+04	1,35E+04	4,67E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-2,62E+04	5,93E+02	0,00E+00	-9,48E+02	1,87E+04	2,90E+03	1,34E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,69E+04	2,30E+04	0,00E+00	5,49E+03	2,22E+02	-1,29E+04	6,30E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	9,41E+03	4,27E+03	0,00E+00	-2,89E+03	-1,15E+03	1,96E+04	3,87E+03
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-2,79E+00	-1,87E+00	0,00E+00	2,10E-01	2,83E+00	-5,44E-01	5,04E-01
Max Maximum Shear Stress	3	seat_tube	Interlaminar	2,29E+05	-1,29E+05	0,00E+00	9,47E+03	-4,44E+03	6,82E+03	1,80E+05



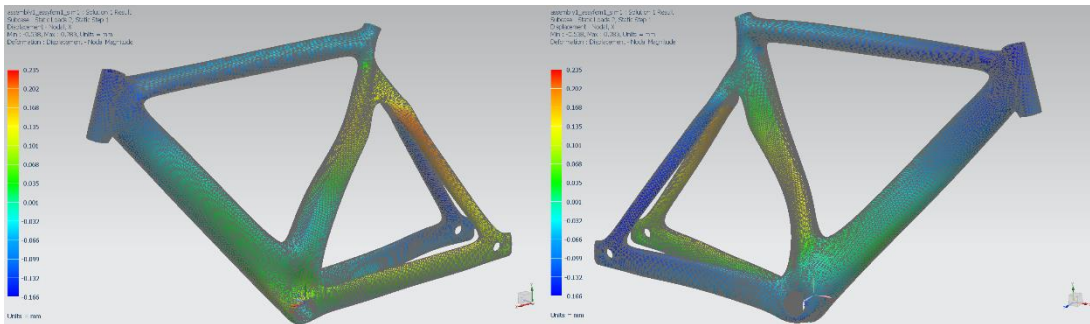
X axis displacement Case 1



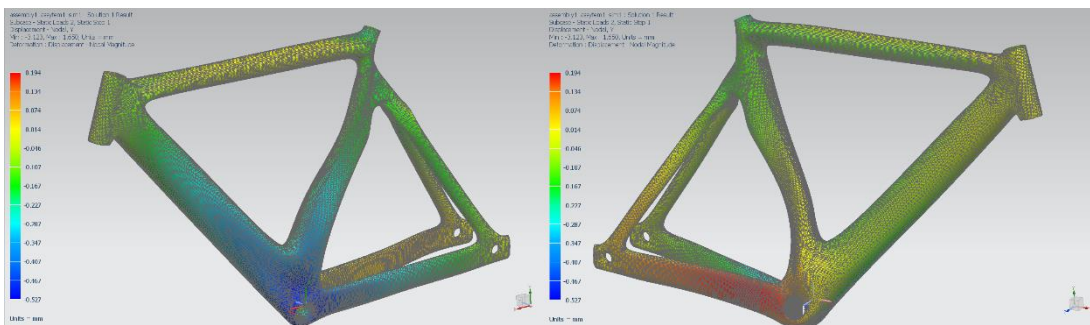
Y axis displacement Case 1



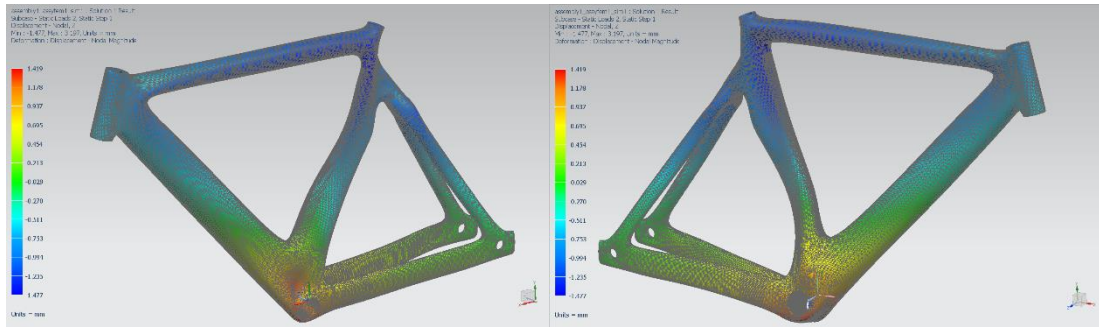
Z axis displacement Case 1



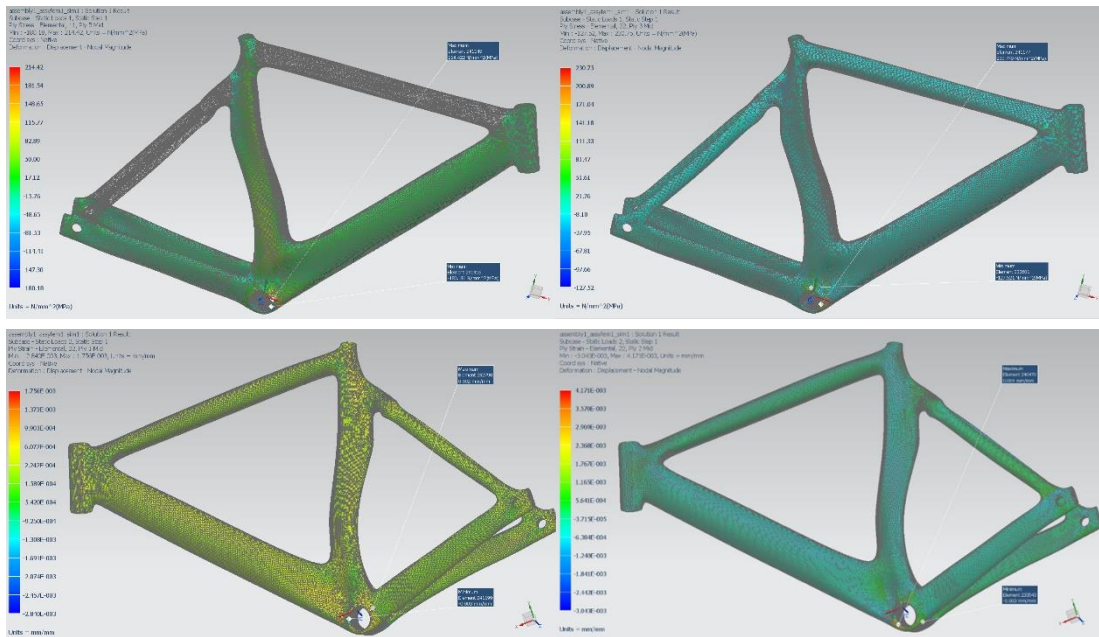
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 5^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 413.5 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 324.2 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 38.4 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 31 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 550.3 MPa στη μεσαία τριβή στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 288.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο άκρο του κάτω δεξιού ψαλιδιού 32.8 MPa στην 6^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 28.5 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 428.6 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 326.2 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 43.3 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 30.9 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 556.5 MPa στο ίδιο σημείο στην 2^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 360.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 28.7

MPa στην 7^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 28.3 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 5

Top Summary

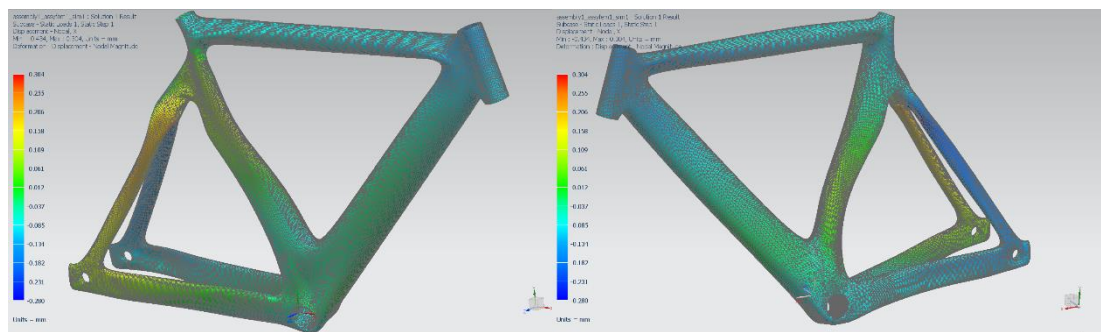
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	2	seat_tube	Interlaminar	-3,94E+04	-7,53E+03	0,00E+00	-2,14E+03	3,92E+02	-1,83E+02	1,61E+04
Max Stress 11	2	1	seat_tube	Interlaminar	3,94E+04	7,53E+03	0,00E+00	2,14E+03	-3,92E+02	1,83E+02	1,61E+04
Min Stress 22	1	6	chainstay_left	Interlaminar	-4,53E+01	-3,80E+04	0,00E+00	-7,44E+02	9,70E+02	-2,68E+02	1,90E+04
Max Stress 22	2	7	seat_tube	Interlaminar	4,53E+01	3,80E+04	0,00E+00	7,44E+02	-9,70E+02	2,68E+02	1,90E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-4,58E+02	-4,26E+03	0,00E+00	-6,18E+02	2,26E+02	-2,49E+02	2,00E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-4,58E+02	-4,26E+03	0,00E+00	-6,18E+02	2,26E+02	-2,49E+02	2,00E+03
Min Stress 12	1	7	seat_tube	Interlaminar	-1,91E+04	-2,97E+04	0,00E+00	-3,57E+03	-7,05E+01	-1,33E+02	6,39E+03
Max Stress 12	2	7	seat_tube	Interlaminar	1,91E+04	2,97E+04	0,00E+00	3,57E+03	7,05E+01	1,33E+02	6,39E+03
Min Stress 23	2	3	seat_tube	Interlaminar	2,25E+04	4,89E+03	0,00E+00	1,65E+03	-3,08E+03	-1,15E+03	8,94E+03
Max Stress 23	2	3	seat_tube	Interlaminar	-2,25E+04	-4,89E+03	0,00E+00	-1,65E+03	3,08E+03	1,15E+03	8,94E+03
Min Stress 31	1	4	seat_tube	Interlaminar	2,29E+04	5,23E+03	0,00E+00	1,17E+03	-2,26E+03	-1,83E+03	8,93E+03
Max Stress 31	2	4	seat_tube	Interlaminar	-2,29E+04	-5,23E+03	0,00E+00	-1,17E+03	2,26E+03	1,83E+03	8,93E+03
Min Maximum Shear Stress	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,41E+01	-1,39E+01	0,00E+00	-2,01E-01	-2,66E-01	3,57E-01	2,19E-01
Max Maximum Shear Stress	2	2	seat_tube	Interlaminar	-2,35E+02	3,79E+04	0,00E+00	-5,10E+02	1,41E+02	2,64E+02	1,91E+04

Static Loads Case 1

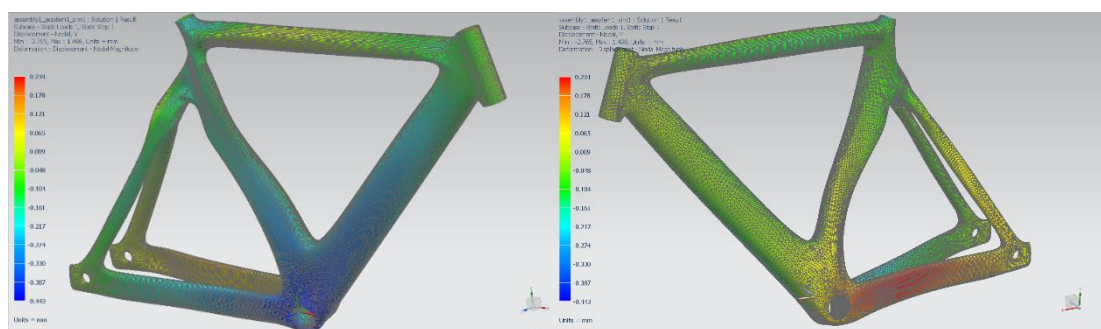
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-5,50E+05	-1,24E+02	0,00E+00	-8,92E+03	1,08E+04	2,91E+03	2,75E+05
Max Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	4,13E+05	-4,69E+03	0,00E+00	-6,14E+03	8,29E+03	3,12E+03	2,09E+05
Min Stress 22	6	Laminate3	Interlaminar	-4,88E+04	-3,28E+04	0,00E+00	-7,42E+03	3,11E-12	0,00E+00	1,09E+04
Max Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	2,11E+04	3,84E+04	0,00E+00	-1,00E+04	-5,72E-13	-3,02E-13	1,32E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,45E+04	-7,57E+02	0,00E+00	1,24E+03	2,83E+01	-2,90E+01	1,19E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-2,45E+04	-7,57E+02	0,00E+00	1,24E+03	2,83E+01	-2,90E+01	1,19E+04
Min Stress 12	7	seat_tube	Interlaminar	4,48E+04	9,26E+02	0,00E+00	-2,78E+04	-8,20E-13	2,43E-11	3,54E+04
Max Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	9,16E+04	6,50E+02	0,00E+00	2,33E+04	8,38E+03	9,65E+03	5,11E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-4,86E+03	-3,11E+02	0,00E+00	2,08E+03	-5,40E+04	-2,11E+04	3,08E+03
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-9,79E+04	8,32E+03	0,00E+00	-1,79E+04	6,37E+04	1,82E+04	5,60E+04
Min Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	-1,32E+04	1,22E+03	0,00E+00	1,97E+03	1,19E+04	-1,16E+05	7,48E+03
Max Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	2,36E+04	2,22E+03	0,00E+00	2,26E+04	2,94E+03	7,30E+04	2,50E+04
Min Maximum Shear Stress	1	head_tube	Interlaminar	-1,22E+00	-7,31E-01	0,00E+00	1,08E-01	-4,43E+00	4,98E+00	2,68E-01
Max Maximum Shear Stress	1	seat_tube	Interlaminar	-5,46E+05	6,30E+03	0,00E+00	-2,72E+03	1,19E+04	1,01E+03	2,76E+05

Static Loads Case 2

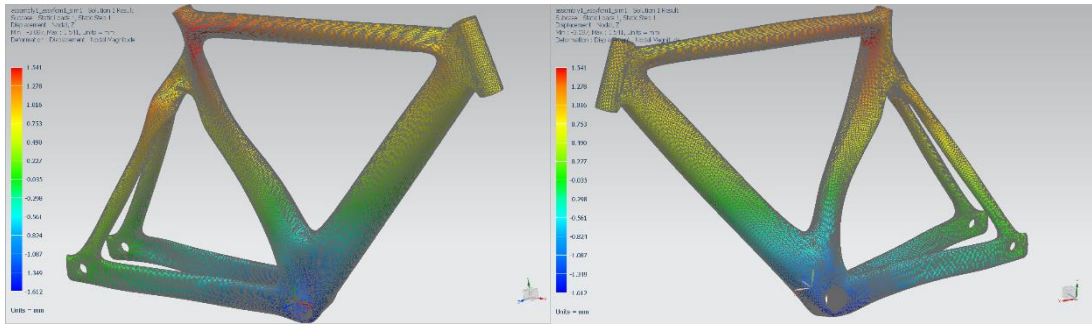
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-5,56E+05	6,65E+03	0,00E+00	7,52E+03	-1,08E+04	5,02E+03	2,82E+05
Max Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	4,29E+05	1,25E+00	0,00E+00	8,60E+03	-4,35E+04	2,31E+04	2,14E+05
Min Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	-2,50E+04	-2,87E+04	0,00E+00	6,84E+03	5,58E-13	7,70E-13	7,08E+03
Max Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	9,96E+04	4,33E+04	0,00E+00	2,27E+04	3,48E-14	8,06E-13	3,62E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,60E+04	-5,44E+02	0,00E+00	-1,64E+03	1,00E+02	-1,91E+02	1,34E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	2,60E+04	-5,44E+02	0,00E+00	-1,64E+03	1,00E+02	-1,91E+02	1,34E+04
Min Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	1,58E+05	7,00E+02	0,00E+00	-2,64E+04	-2,47E+03	6,26E+03	8,29E+04
Max Stress 12	7	seat_tube	Interlaminar	-1,65E+03	6,96E+03	0,00E+00	2,91E+04	9,00E-13	3,41E-12	2,94E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-1,84E+04	9,20E+03	0,00E+00	1,98E+04	-6,89E+04	7,66E+04	2,41E+04
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	6,32E+04	-6,76E+03	0,00E+00	1,73E+04	1,16E+05	2,17E+04	3,90E+04
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	1,18E+03	6,00E+01	0,00E+00	-1,79E+02	1,32E+03	-3,32E+04	5,86E+02
Max Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	-3,06E+04	1,68E+03	0,00E+00	-3,93E+02	-9,20E+03	1,36E+05	1,61E+04
Min Maximum Shear Stress	4	head_tube	Interlaminar	-1,65E+01	-1,69E+01	0,00E+00	-1,12E+00	3,87E+00	9,09E-01	1,13E+00
Max Maximum Shear Stress	2	seat_tube	Interlaminar	-5,56E+05	6,65E+03	0,00E+00	7,52E+03	-1,08E+04	5,02E+03	2,82E+05



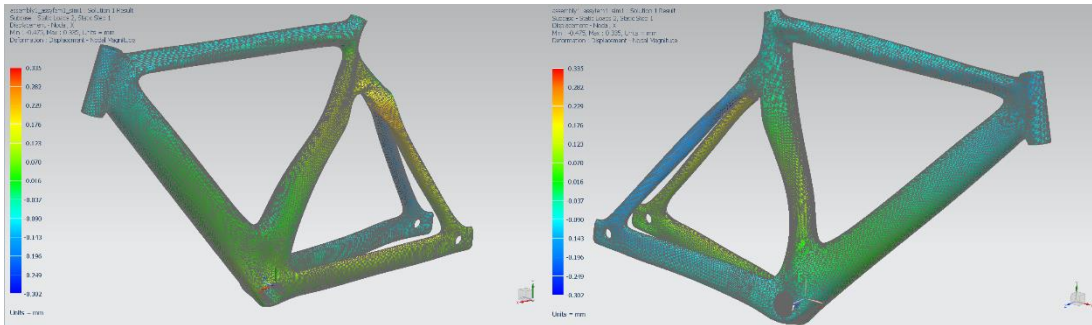
X axis displacement Case 1



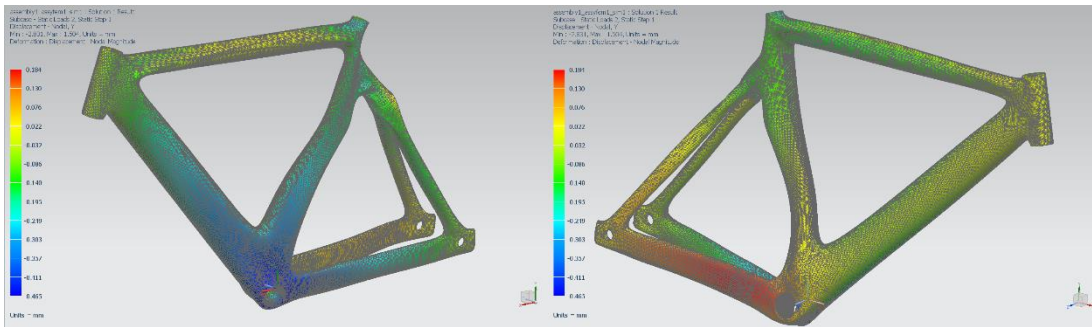
Y axis displacement Case 1



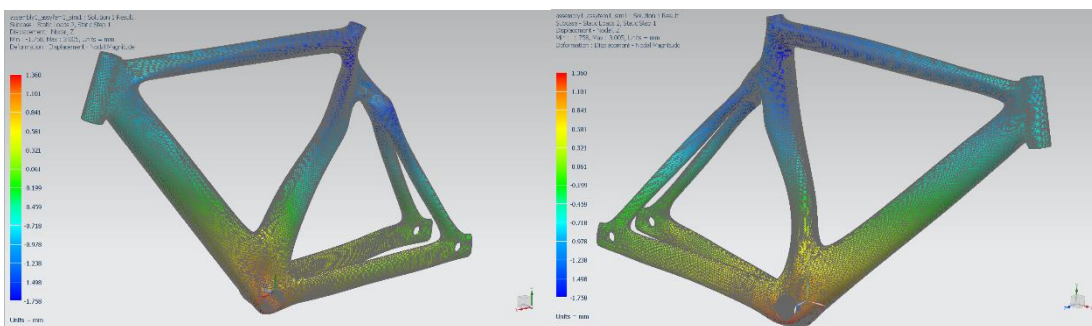
Z axis displacement Case 1



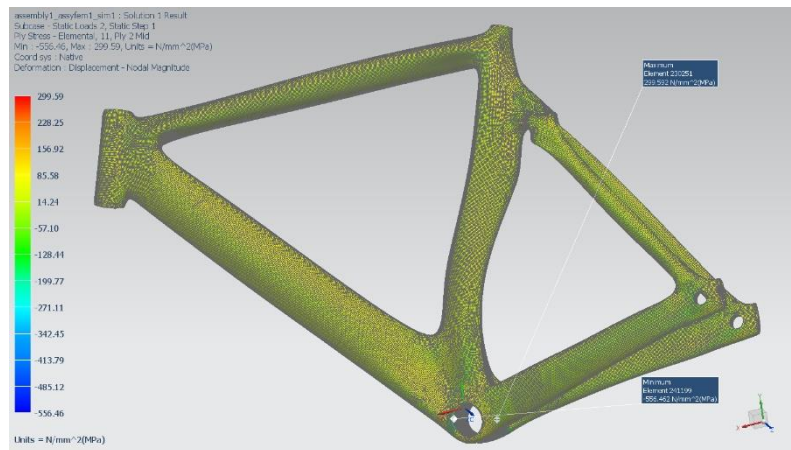
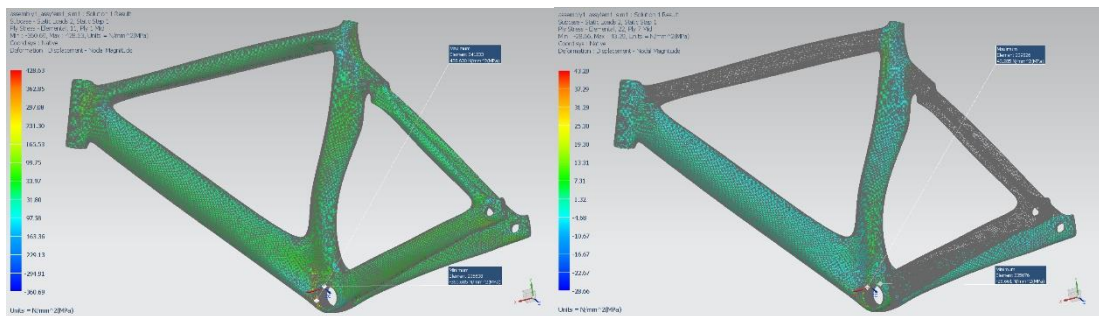
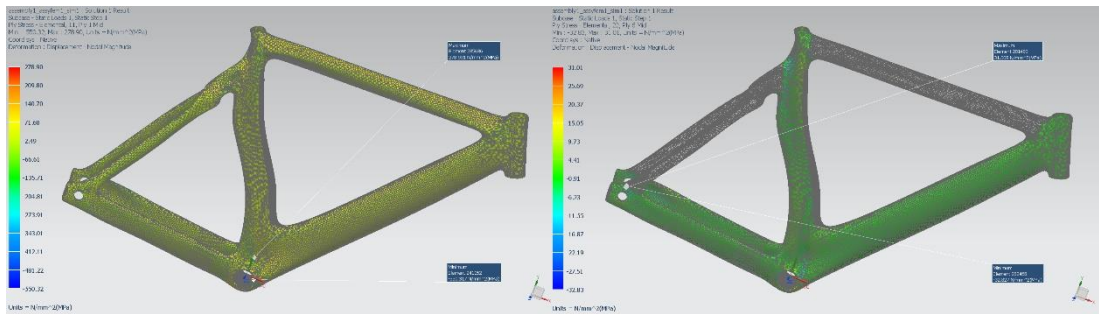
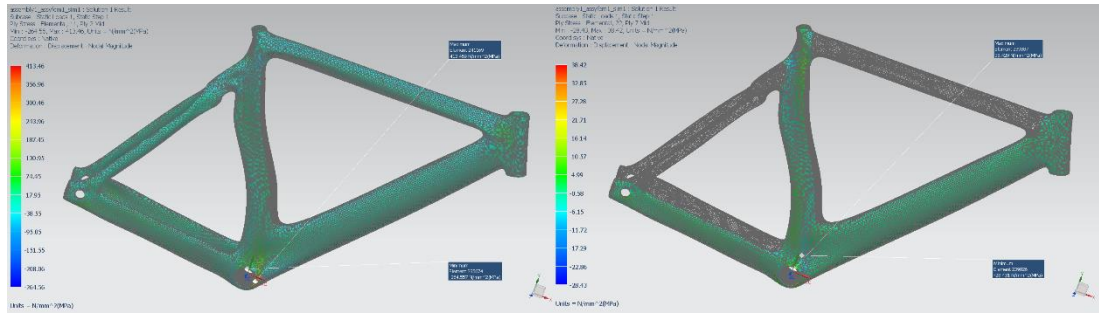
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 6^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 350 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 256.5 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 240.2 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 209.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 254.3 MPa στη μεσαία τριβή στην 5^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 230.8 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 173.4 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 129.9 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 345.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 265.5 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 152.2 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 90.8 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 305.2 MPa στο ίδιο σημείο στην 5^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 247.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 250.3 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 142.5 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 6

Top Summary

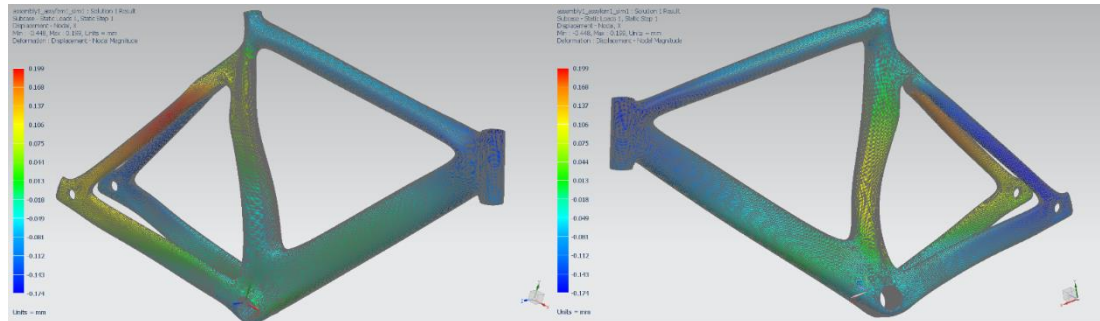
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	5	seat_tube	Interlaminar	-3,05E+05	-7,06E+03	0,00E+00	4,87E+03	7,84E-14	0,00E+00	1,49E+05
Max Stress 11	1	5	seat_tube	Interlaminar	3,50E+05	7,63E+03	0,00E+00	-1,60E+03	-1,16E-13	0,00E+00	1,71E+05
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	3,91E+03	-2,50E+05	0,00E+00	-1,36E+04	-6,01E+03	2,32E+03	1,28E+05
Max Stress 22	1	3	seat_tube	Interlaminar	-7,21E+04	2,40E+05	0,00E+00	1,42E+04	6,46E+03	-1,44E+02	1,57E+05
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,42E+04	-5,68E+03	0,00E+00	1,26E+03	3,82E+01	-1,22E+02	4,44E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,42E+04	-5,68E+03	0,00E+00	1,26E+03	3,82E+01	-1,22E+02	4,44E+03
Min Stress 12	1	5	seat_tube	Interlaminar	-3,57E+02	-7,39E+02	0,00E+00	-2,63E+04	4,00E-13	0,00E+00	2,63E+04
Max Stress 12	2	5	seat_tube	Interlaminar	1,64E+04	-2,14E+03	0,00E+00	2,67E+04	-4,24E-13	0,00E+00	2,82E+04
Min Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-8,88E+04	1,38E+04	0,00E+00	1,84E+04	-5,38E+04	4,79E+04	5,45E+04
Max Stress 23	1	2	seat_tube	Interlaminar	-1,37E+05	1,75E+04	0,00E+00	-1,70E+04	5,12E+04	5,44E+04	7,90E+04
Min Stress 31	1	3	seat_tube	Interlaminar	-7,50E+03	2,31E+04	0,00E+00	-1,61E+03	1,01E+04	-1,13E+05	1,54E+04
Max Stress 31	2	3	seat_tube	Interlaminar	1,26E+04	5,26E+03	0,00E+00	-2,63E+03	-7,61E+03	1,30E+05	4,50E+03
Min Maximum Shear Stress	1	5	head_tube	Interlaminar	-5,88E+01	-5,88E+01	0,00E+00	-2,39E-01	-1,75E+00	-2,31E-01	2,40E-01
Max Maximum Shear Stress	2	1	seat_tube	Interlaminar	1,32E+05	-2,15E+05	0,00E+00	-2,06E+03	-1,23E+04	9,01E+02	1,73E+05

Static Loads Case 1

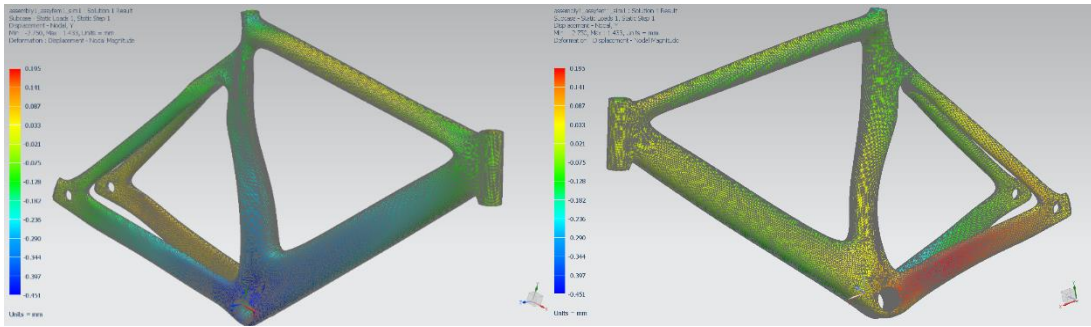
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	-2,54E+05	-5,81E+03	0,00E+00	-7,25E+03	-2,68E-14	0,00E+00	1,24E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	3,50E+05	7,63E+03	0,00E+00	-1,60E+03	-1,16E-13	0,00E+00	1,71E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-2,11E+04	-1,73E+05	0,00E+00	2,00E+03	1,28E+04	-3,61E+03	7,62E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-7,21E+04	2,40E+05	0,00E+00	1,42E+04	6,46E+03	-1,44E+02	1,57E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,42E+04	-5,68E+03	0,00E+00	1,26E+03	3,82E+01	-1,22E+02	4,44E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,42E+04	-5,68E+03	0,00E+00	1,26E+03	3,82E+01	-1,22E+02	4,44E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-3,57E+02	-7,39E+02	0,00E+00	-2,63E+04	4,00E-13	0,00E+00	2,63E+04
Max Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	4,69E+04	1,55E+05	0,00E+00	2,29E+04	2,00E+03	2,49E+03	5,89E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-5,00E+03	-2,34E+02	0,00E+00	0,00E+00	-4,16E+04	-1,72E+04	2,93E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,37E+05	1,75E+04	0,00E+00	-1,70E+04	5,12E+04	5,44E+04	7,90E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-7,50E+03	2,31E+04	0,00E+00	-1,61E+03	1,01E+04	-1,13E+05	1,54E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-5,71E+04	2,23E+05	0,00E+00	1,80E+04	1,74E+04	5,68E+04	1,41E+05
Min Maximum Shear Stress	5	head_tube	Interlaminar	-5,88E+01	-5,88E+01	0,00E+00	-2,39E-01	-1,75E+00	-2,31E-01	2,40E-01
Max Maximum Shear Stress	1	seat_tube	Interlaminar	-2,22E+05	1,24E+05	0,00E+00	-8,59E+02	1,22E+04	1,80E+03	1,73E+05

Static Loads Case 2

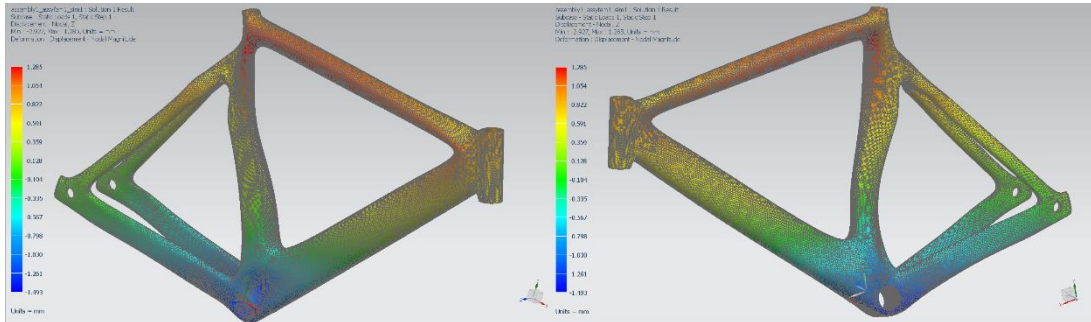
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	-3,05E+05	-7,06E+03	0,00E+00	4,87E+03	7,84E-14	0,00E+00	1,49E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	3,45E+05	7,65E+03	0,00E+00	-5,42E+02	4,08E-14	0,00E+00	1,69E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	3,91E+03	-2,50E+05	0,00E+00	-1,36E+04	-6,01E+03	2,32E+03	1,28E+05
Max Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-4,45E+04	1,52E+05	0,00E+00	2,57E+03	1,17E+04	-2,32E+03	9,84E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,23E+04	-8,47E+03	0,00E+00	-1,92E+03	2,48E+02	-3,98E+02	1,05E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,23E+04	-8,47E+03	0,00E+00	-1,92E+03	2,48E+02	-3,98E+02	1,05E+04
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-1,36E+05	-1,79E+05	0,00E+00	-1,93E+04	4,10E+03	2,80E+02	2,88E+04
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	1,64E+04	-2,14E+03	0,00E+00	2,67E+04	-4,24E-13	0,00E+00	2,82E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-8,88E+04	1,38E+04	0,00E+00	1,84E+04	-5,38E+04	4,79E+04	5,45E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-3,37E+04	9,72E+02	0,00E+00	-2,80E+02	4,74E+04	1,46E+04	1,74E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,63E+03	-1,09E+04	0,00E+00	-1,31E+04	-7,63E+03	-2,65E+04	1,39E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,26E+04	5,26E+03	0,00E+00	-2,63E+03	-7,61E+03	1,30E+05	4,50E+03
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-4,83E+01	-5,01E+01	0,00E+00	-4,48E-01	3,35E+00	5,58E-01	1,04E+00
Max Maximum Shear Stress	1	seat_tube	Interlaminar	1,32E+05	-2,15E+05	0,00E+00	-2,06E+03	-1,23E+04	9,01E+02	1,73E+05



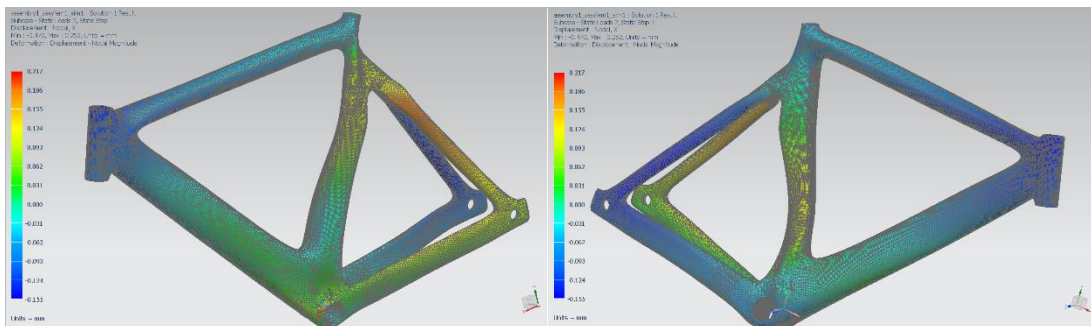
X axis displacement Case 1



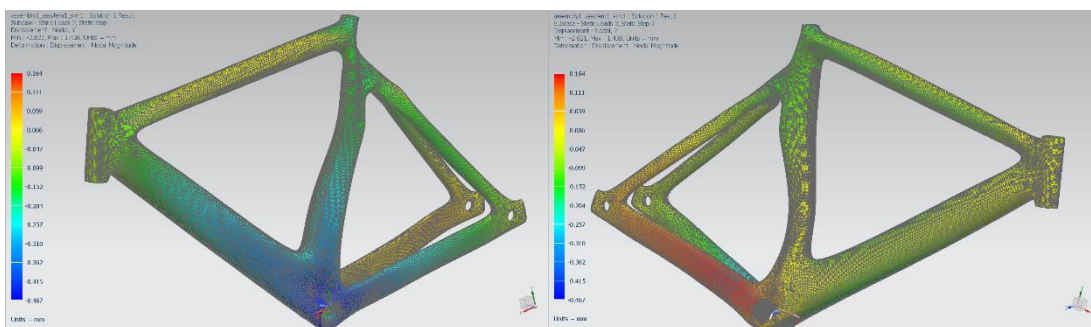
Y axis displacement Case 1



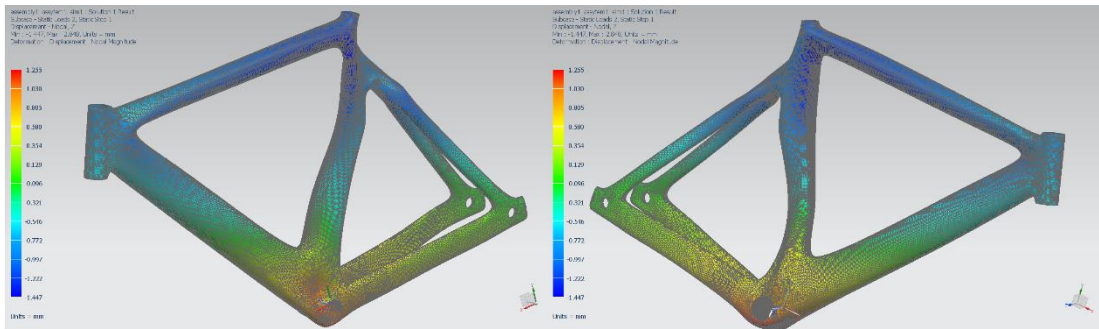
Z axis displacement Case 1



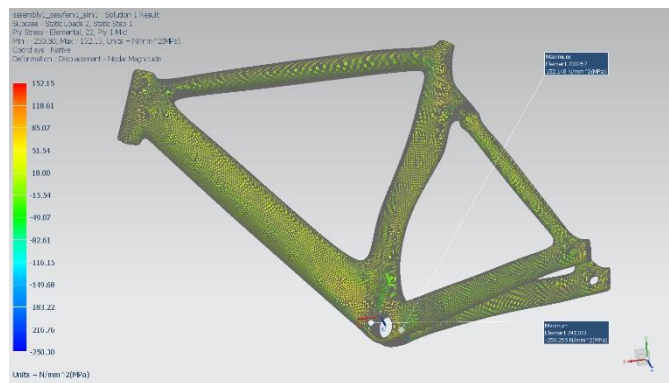
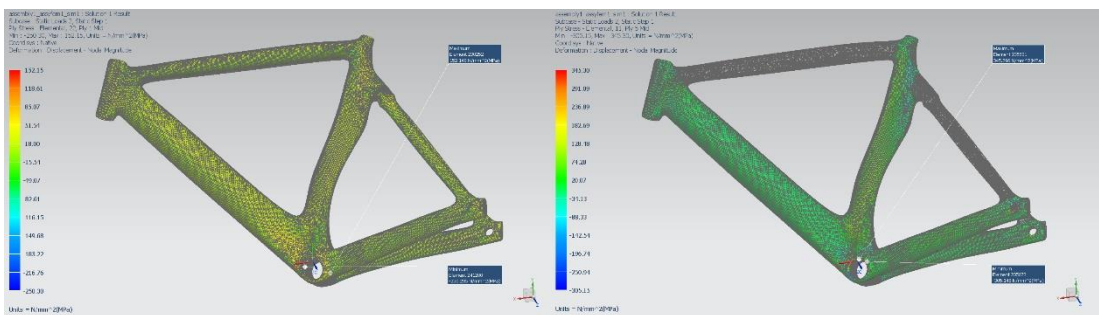
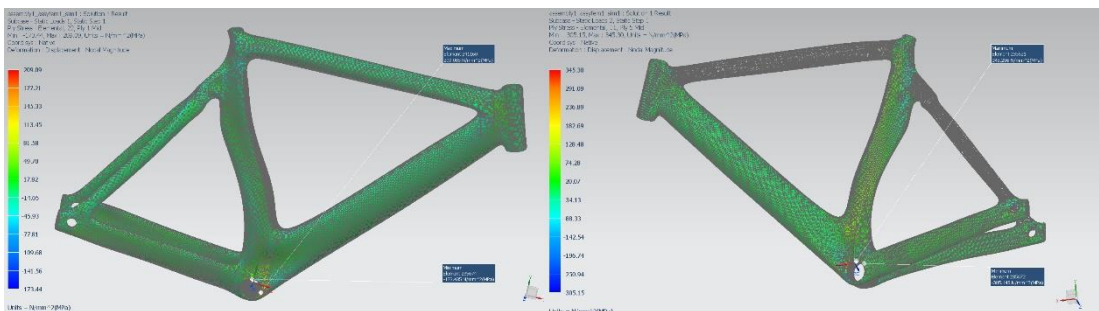
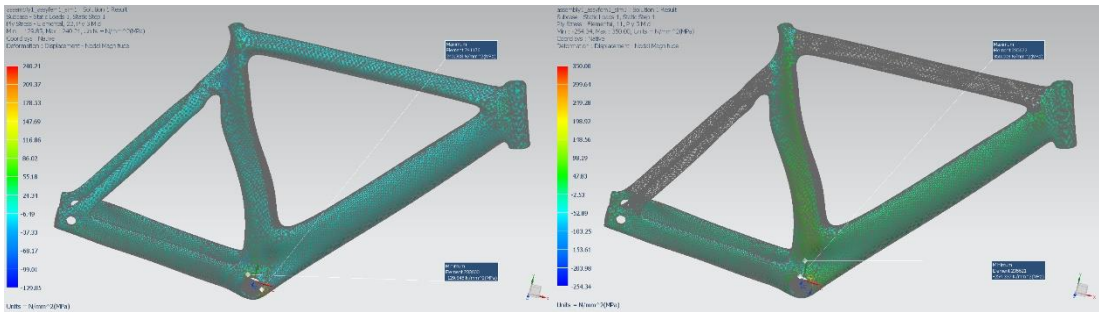
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 7^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον Χ άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 356.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 256.7 MPa. Κατά τον Υ άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 240.2 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 209 MPa. Επίσης κατά τον Χ άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 254.8 MPa στη μεσαία τριβή στην 5^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 241.6 MPa. Κατά τον Υ άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 177.2 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 128.5 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον Χ άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 351.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 268.9 MPa. Κατά τον Υ άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 150.4 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 89.7 MPa. Επίσης κατά τον Χ άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 306 MPa στο ίδιο σημείο στην 5^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 253.1 MPa. Κατά τον Υ άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 250.3 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 145.2 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 7

Top Summary

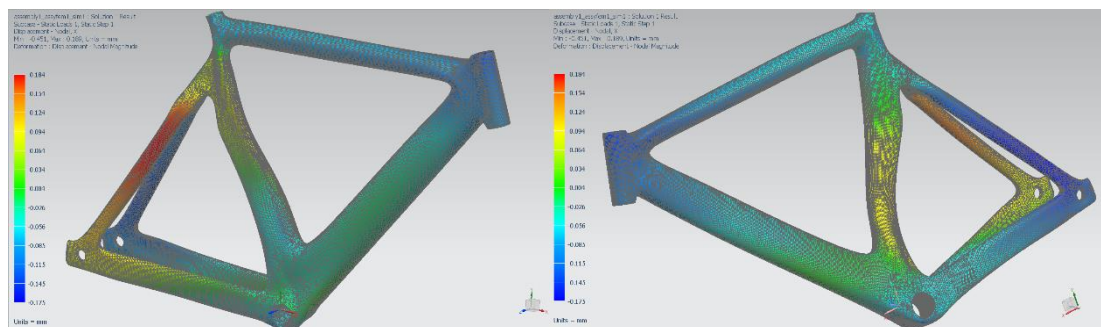
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	5	seat_tube	Interlaminar	-3,06E+05	-7,08E+03	0,00E+00	4,70E+03	7,73E-14	0,00E+00	1,50E+05
Max Stress 11	1	5	seat_tube	Interlaminar	3,57E+05	7,81E+03	0,00E+00	-1,41E+03	-1,17E-13	0,00E+00	1,74E+05
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	6,14E+03	-2,50E+05	0,00E+00	-1,35E+04	-5,73E+03	2,33E+03	1,29E+05
Max Stress 22	1	3	seat_tube	Interlaminar	-7,27E+04	2,40E+05	0,00E+00	1,42E+04	6,42E+03	-1,67E+02	1,57E+05
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,27E+04	-4,89E+03	0,00E+00	1,19E+03	2,73E+01	-3,28E+01	4,07E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,27E+04	-4,89E+03	0,00E+00	1,19E+03	2,73E+01	-3,28E+01	4,07E+03
Min Stress 12	1	5	seat_tube	Interlaminar	-3,82E+02	-6,20E+02	0,00E+00	-2,63E+04	3,87E-13	0,00E+00	2,63E+04
Max Stress 12	2	5	seat_tube	Interlaminar	1,68E+04	-1,98E+03	0,00E+00	2,66E+04	-4,15E-13	0,00E+00	2,82E+04
Min Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-8,78E+04	1,38E+04	0,00E+00	1,83E+04	-5,34E+04	4,75E+04	5,40E+04
Max Stress 23	1	2	seat_tube	Interlaminar	-1,36E+05	1,75E+04	0,00E+00	-1,70E+04	5,10E+04	5,42E+04	7,87E+04
Min Stress 31	1	3	seat_tube	Interlaminar	-7,51E+03	2,31E+04	0,00E+00	-1,63E+03	1,03E+04	-1,16E+05	1,54E+04
Max Stress 31	2	3	seat_tube	Interlaminar	1,24E+04	5,32E+03	0,00E+00	-2,64E+03	-7,74E+03	1,32E+05	4,40E+03
Min Maximum Shear Stress	1	3	head_tube	Interlaminar	1,27E+00	1,59E+00	0,00E+00	1,07E-01	-2,49E+01	3,20E+00	1,92E-01
Max Maximum Shear Stress	1	5	seat_tube	Interlaminar	3,57E+05	7,81E+03	0,00E+00	-1,41E+03	-1,17E-13	0,00E+00	1,74E+05

Static Loads Case 1

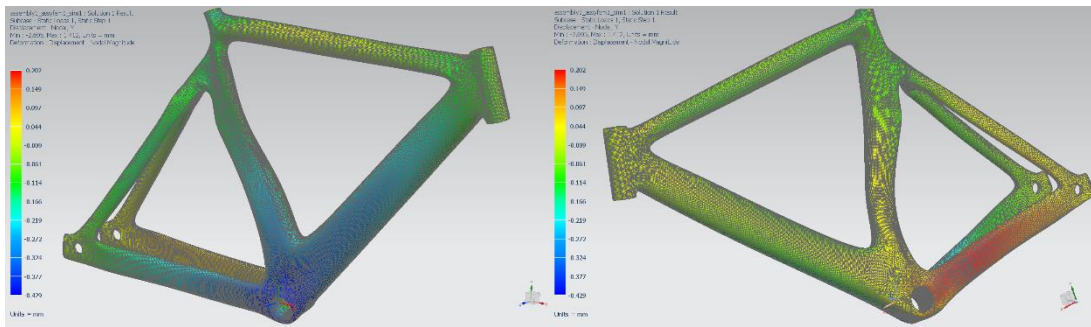
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	-2,55E+05	-5,80E+03	0,00E+00	-7,23E+03	-2,63E-14	0,00E+00	1,25E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	3,57E+05	7,81E+03	0,00E+00	-1,41E+03	-1,17E-13	0,00E+00	1,74E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-2,25E+04	-1,77E+05	0,00E+00	1,74E+03	1,27E+04	-3,63E+03	7,74E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-7,27E+04	2,40E+05	0,00E+00	1,42E+04	6,42E+03	-1,67E+02	1,57E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,27E+04	-4,89E+03	0,00E+00	1,19E+03	2,73E+01	-3,28E+01	4,07E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,27E+04	-4,89E+03	0,00E+00	1,19E+03	2,73E+01	-3,28E+01	4,07E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-3,82E+02	-6,20E+02	0,00E+00	-2,63E+04	3,87E-13	0,00E+00	2,63E+04
Max Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	4,67E+04	1,54E+05	0,00E+00	2,28E+04	1,95E+03	2,39E+03	5,85E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-5,50E+03	-2,53E+02	0,00E+00	0,00E+00	-1,70E+03	-4,24E+04	3,13E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,36E+05	1,75E+04	0,00E+00	-1,70E+04	5,10E+04	5,42E+04	7,87E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-7,51E+03	2,31E+04	0,00E+00	-1,63E+03	1,03E+04	-1,16E+05	1,54E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-5,75E+04	2,22E+05	0,00E+00	1,80E+04	1,73E+04	5,66E+04	1,41E+05
Min Maximum Shear Stress	3	head_tube	Interlaminar	1,27E+00	1,59E+00	0,00E+00	1,07E-01	-2,49E+01	3,20E+00	1,92E-01
Max Maximum Shear Stress	5	seat_tube	Interlaminar	3,57E+05	7,81E+03	0,00E+00	-1,41E+03	-1,17E-13	0,00E+00	1,74E+05

Static Loads Case 2

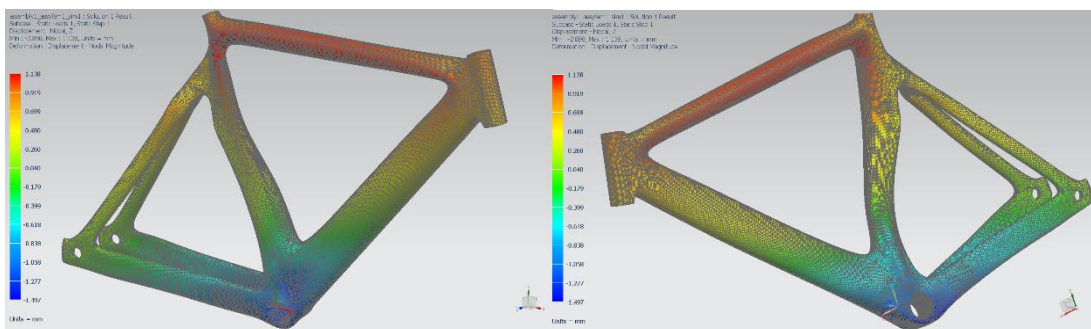
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	-3,06E+05	-7,08E+03	0,00E+00	4,70E+03	7,73E-14	0,00E+00	1,50E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	3,51E+05	7,77E+03	0,00E+00	-6,28E+02	4,07E-14	0,00E+00	1,72E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	6,14E+03	-2,50E+05	0,00E+00	-1,35E+04	-5,73E+03	2,33E+03	1,29E+05
Max Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-4,38E+04	1,50E+05	0,00E+00	2,55E+03	1,17E+04	-2,31E+03	9,72E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,13E+04	-6,50E+03	0,00E+00	-1,58E+03	1,05E+02	-2,76E+02	9,04E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,13E+04	-6,50E+03	0,00E+00	-1,58E+03	1,05E+02	-2,76E+02	9,04E+03
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-1,36E+05	-1,81E+05	0,00E+00	-1,96E+04	4,60E+03	3,60E+02	2,99E+04
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	1,68E+04	-1,98E+03	0,00E+00	2,66E+04	-4,15E-13	0,00E+00	2,82E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-8,78E+04	1,38E+04	0,00E+00	1,83E+04	-5,34E+04	4,75E+04	5,40E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-3,40E+04	9,37E+02	0,00E+00	-2,73E+02	4,82E+04	1,49E+04	1,75E+04
Min Stress 31	4	head_tube	Interlaminar	-8,37E+02	1,60E+03	0,00E+00	-1,08E+01	1,19E+03	-2,71E+04	1,22E+03
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,24E+04	5,32E+03	0,00E+00	-2,64E+03	-7,74E+03	1,32E+05	4,40E+03
Min Maximum Shear Stress	6	head_tube	Interlaminar	8,81E-01	1,66E+00	0,00E+00	-5,23E-02	6,61E+00	2,01E+00	3,94E-01
Max Maximum Shear Stress	1	seat_tube	Interlaminar	1,33E+05	-2,13E+05	0,00E+00	-1,93E+03	-1,21E+04	8,93E+02	1,73E+05



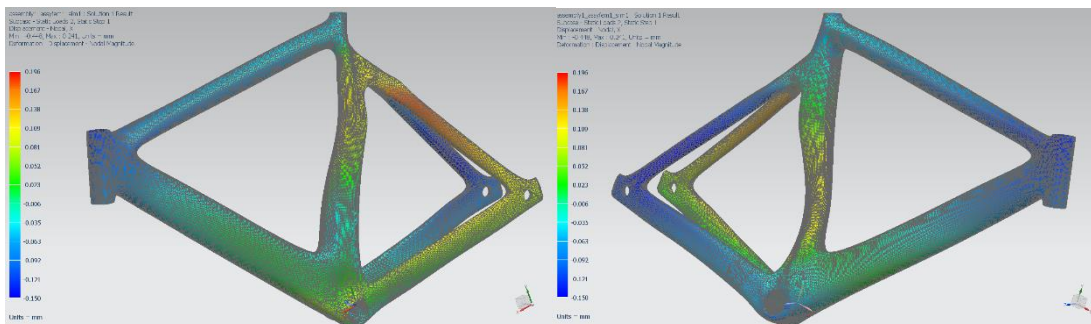
X axis displacement Case 1



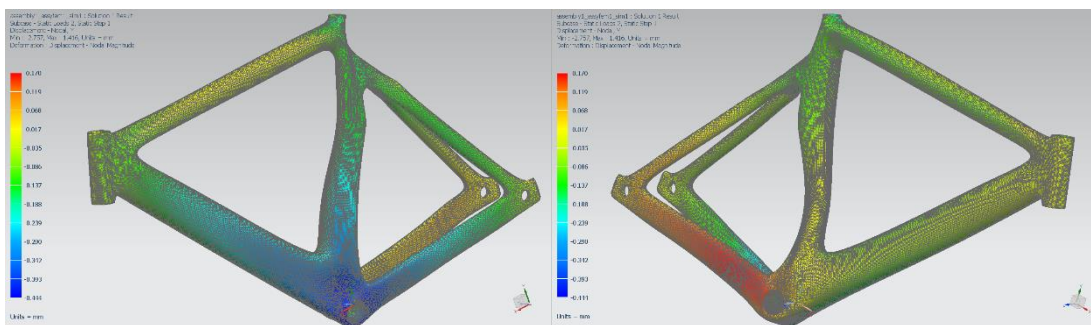
Y axis displacement Case 1



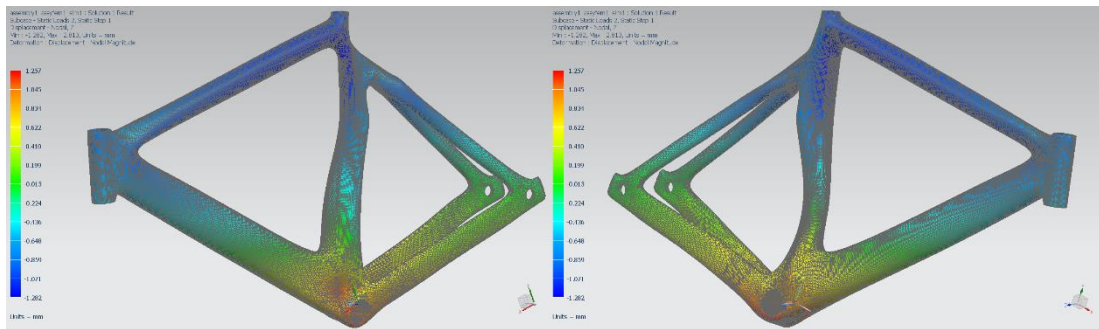
Z axis displacement Case 1



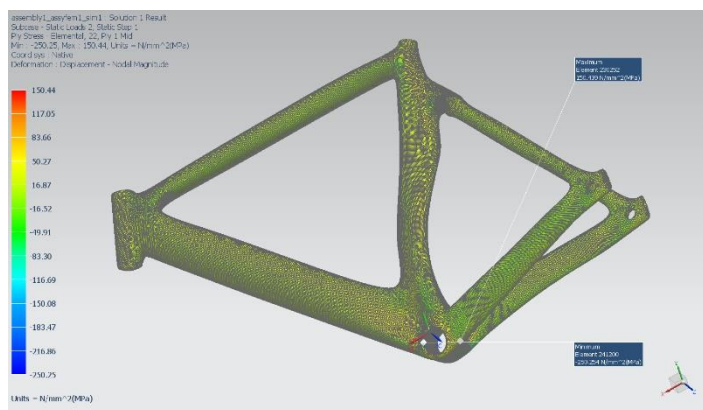
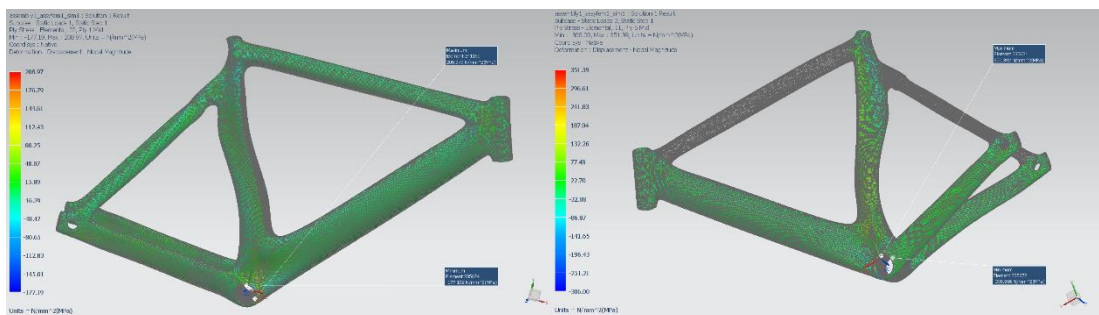
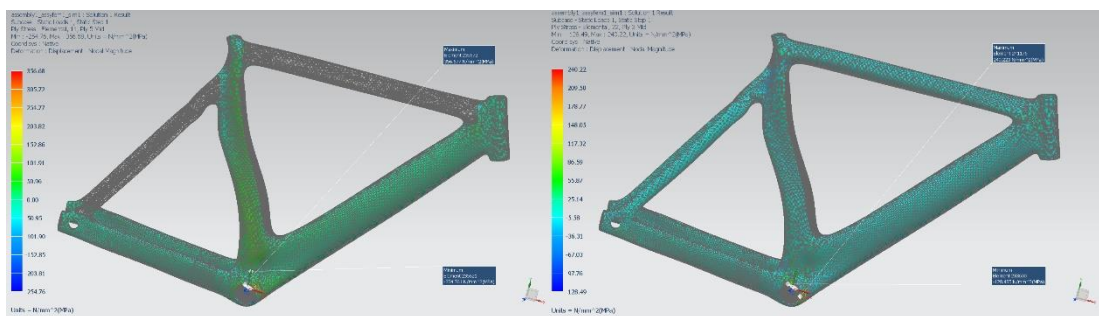
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 8^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 347.7 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 256.2 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 239.8 MPa στην 3^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 208.8 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 253.7 MPa στη μεσαία τριβή στην 5^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 240.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 170.9 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 130.8 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 5^η στρώση τα 305.4 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 245.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 250 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 140.7 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 304.4 MPa στο ίδιο σημείο στην 5^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 245.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 250 MPa στην 1^η στρώση με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 140.7 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 8

Top Summary

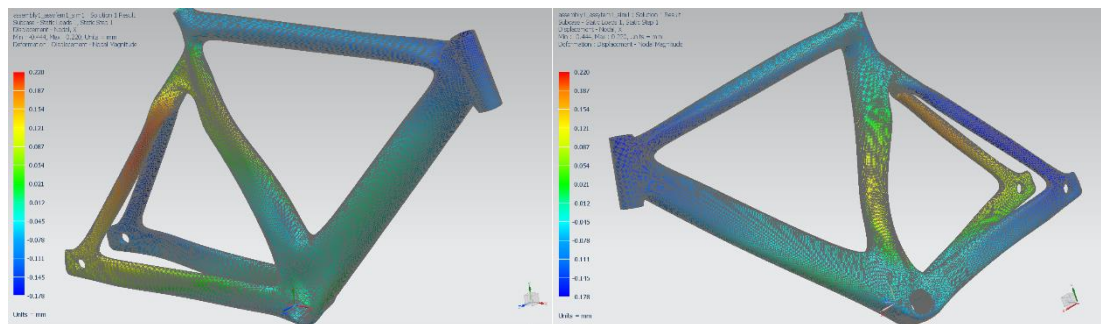
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	5	seat_tube	Interlaminar	-3,04E+05	-7,04E+03	0,00E+00	4,98E+03	7,89E-14	0,00E+00	1,49E+05
Max Stress 11	1	5	seat_tube	Interlaminar	3,48E+05	7,57E+03	0,00E+00	-1,71E+03	-1,16E-13	0,00E+00	1,70E+05
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	2,49E+03	-2,50E+05	0,00E+00	-1,36E+04	-6,16E+03	2,31E+03	1,27E+05
Max Stress 22	1	3	seat_tube	Interlaminar	-7,16E+04	2,40E+05	0,00E+00	1,42E+04	6,48E+03	-1,29E+02	1,56E+05
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,44E+04	-5,91E+03	0,00E+00	1,25E+03	5,90E+01	-1,26E+02	4,43E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,44E+04	-5,91E+03	0,00E+00	1,25E+03	5,90E+01	-1,26E+02	4,43E+03
Min Stress 12	1	5	seat_tube	Interlaminar	-2,24E+02	-8,09E+02	0,00E+00	-2,62E+04	4,06E-13	0,00E+00	2,62E+04
Max Stress 12	2	5	seat_tube	Interlaminar	1,63E+04	-2,24E+03	0,00E+00	2,67E+04	-4,28E-13	0,00E+00	2,82E+04
Min Stress 23	2	2	seat_tube	Interlaminar	-8,90E+04	1,38E+04	0,00E+00	1,84E+04	-5,39E+04	4,80E+04	5,46E+04
Max Stress 23	1	2	seat_tube	Interlaminar	-1,37E+05	1,74E+04	0,00E+00	-1,70E+04	5,12E+04	5,44E+04	7,89E+04
Min Stress 31	1	3	seat_tube	Interlaminar	-7,50E+03	2,31E+04	0,00E+00	-1,60E+03	9,99E+03	-1,13E+05	1,54E+04
Max Stress 31	2	3	seat_tube	Interlaminar	1,27E+04	5,22E+03	0,00E+00	-2,62E+03	-7,56E+03	1,29E+05	4,56E+03
Min Maximum Shear Stress	2	2	head_tube	Interlaminar	-1,86E+01	-2,07E+01	0,00E+00	-1,03E+00	-2,76E+00	1,88E+00	1,48E+00
Max Maximum Shear Stress	2	1	seat_tube	Interlaminar	1,32E+05	-2,15E+05	0,00E+00	-2,12E+03	-1,24E+04	9,05E+02	1,73E+05

Static Loads Case 1

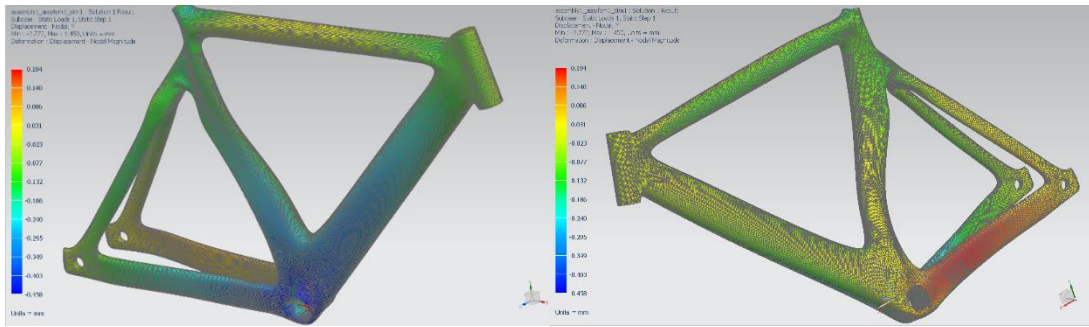
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	-2,54E+05	-5,81E+03	0,00E+00	-7,27E+03	-2,70E-14	0,00E+00	1,24E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	3,48E+05	7,57E+03	0,00E+00	-1,71E+03	-1,16E-13	0,00E+00	1,70E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-2,02E+04	-1,72E+05	0,00E+00	2,17E+03	1,28E+04	-3,62E+03	7,59E+04
Max Stress 22	3	seat_tube	Interlaminar	-7,16E+04	2,40E+05	0,00E+00	1,42E+04	6,48E+03	-1,29E+02	1,56E+05
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,44E+04	-5,91E+03	0,00E+00	1,25E+03	5,90E+01	-1,26E+02	4,43E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,44E+04	-5,91E+03	0,00E+00	1,25E+03	5,90E+01	-1,26E+02	4,43E+03
Min Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	-2,24E+02	-8,09E+02	0,00E+00	-2,62E+04	4,06E-13	0,00E+00	2,62E+04
Max Stress 12	3	seat_tube	Interlaminar	4,69E+04	1,56E+05	0,00E+00	2,29E+04	2,01E+03	2,52E+03	5,89E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-4,73E+03	-2,28E+02	0,00E+00	1,71E+03	-4,13E+04	-1,71E+04	2,82E+03
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-1,37E+05	1,74E+04	0,00E+00	-1,70E+04	5,12E+04	5,44E+04	7,89E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-7,50E+03	2,31E+04	0,00E+00	-1,60E+03	9,99E+03	-1,13E+05	1,54E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-5,68E+04	2,22E+05	0,00E+00	1,80E+04	1,74E+04	5,68E+04	1,41E+05
Min Maximum Shear Stress	4	head_tube	Interlaminar	-2,46E+01	-1,97E+01	0,00E+00	-3,65E-01	-2,08E+00	4,79E+00	2,45E+00
Max Maximum Shear Stress	1	seat_tube	Interlaminar	-2,11E+05	1,35E+05	0,00E+00	1,18E+03	1,65E+04	1,07E+03	1,73E+05

Static Loads Case 2

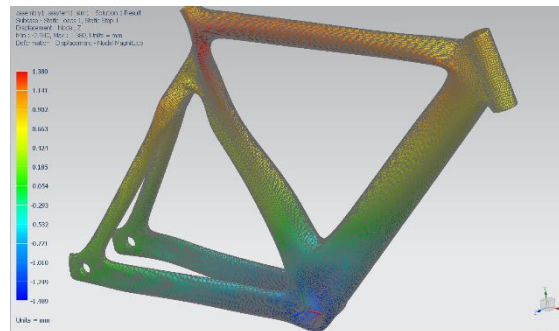
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	-3,04E+05	-7,04E+03	0,00E+00	4,98E+03	7,89E-14	0,00E+00	1,49E+05
Max Stress 11	5	seat_tube	Interlaminar	3,43E+05	7,61E+03	0,00E+00	-4,92E+02	4,09E-14	0,00E+00	1,68E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	2,49E+03	-2,50E+05	0,00E+00	-1,36E+04	-6,16E+03	2,31E+03	1,27E+05
Max Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-4,47E+04	1,54E+05	0,00E+00	2,60E+03	1,18E+04	-2,34E+03	9,92E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,28E+04	-8,95E+03	0,00E+00	-1,84E+03	2,09E+02	-3,93E+02	1,10E+04
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,28E+04	-8,95E+03	0,00E+00	-1,84E+03	2,09E+02	-3,93E+02	1,10E+04
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-1,36E+05	-1,77E+05	0,00E+00	-1,92E+04	3,82E+03	2,37E+02	2,81E+04
Max Stress 12	5	seat_tube	Interlaminar	1,63E+04	-2,24E+03	0,00E+00	2,67E+04	-4,28E-13	0,00E+00	2,82E+04
Min Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-8,90E+04	1,38E+04	0,00E+00	1,84E+04	-5,39E+04	4,80E+04	5,46E+04
Max Stress 23	2	seat_tube	Interlaminar	-3,36E+04	9,87E+02	0,00E+00	-2,87E+02	4,71E+04	1,45E+04	1,73E+04
Min Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	-1,92E+03	-1,02E+04	0,00E+00	-1,30E+04	-7,61E+03	-2,64E+04	1,36E+04
Max Stress 31	3	seat_tube	Interlaminar	1,27E+04	5,22E+03	0,00E+00	-2,62E+03	-7,56E+03	1,29E+05	4,56E+03
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-1,86E+01	-2,07E+01	0,00E+00	-1,03E+00	-2,76E+00	1,88E+00	1,48E+00
Max Maximum Shear Stress	1	seat_tube	Interlaminar	1,32E+05	-2,15E+05	0,00E+00	-2,12E+03	-1,24E+04	9,05E+02	1,73E+05



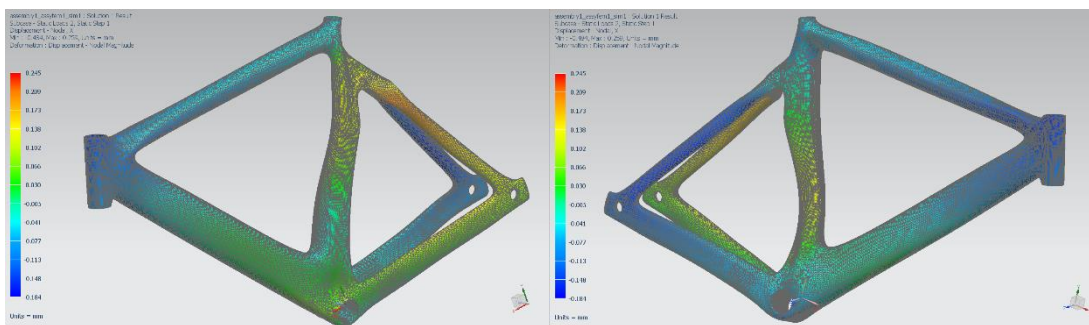
X axis displacement Case 1



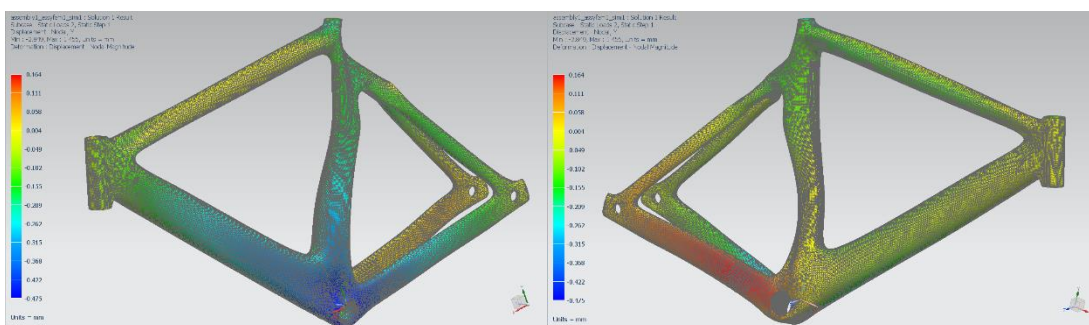
Y axis displacement Case 1



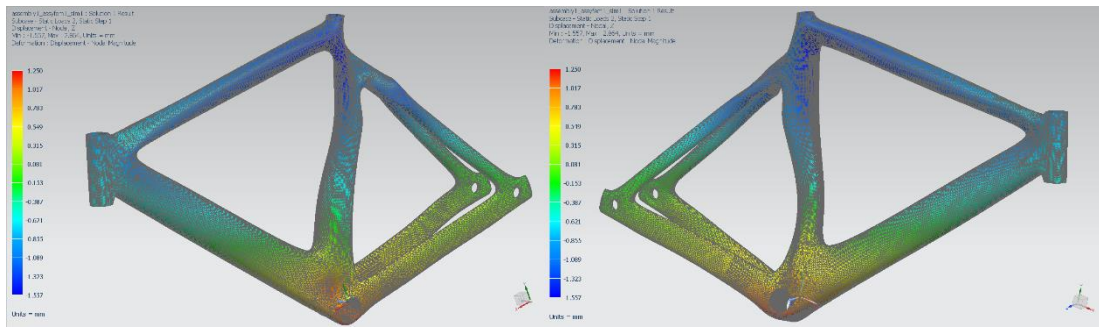
Z axis displacement Case 1



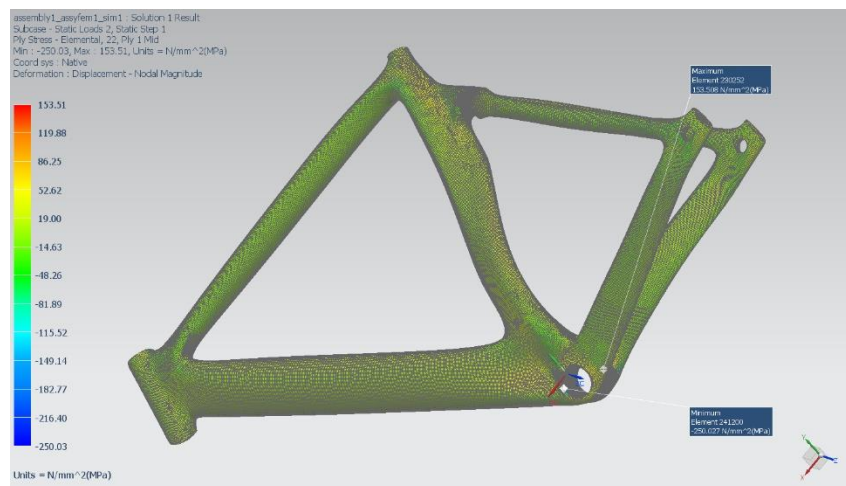
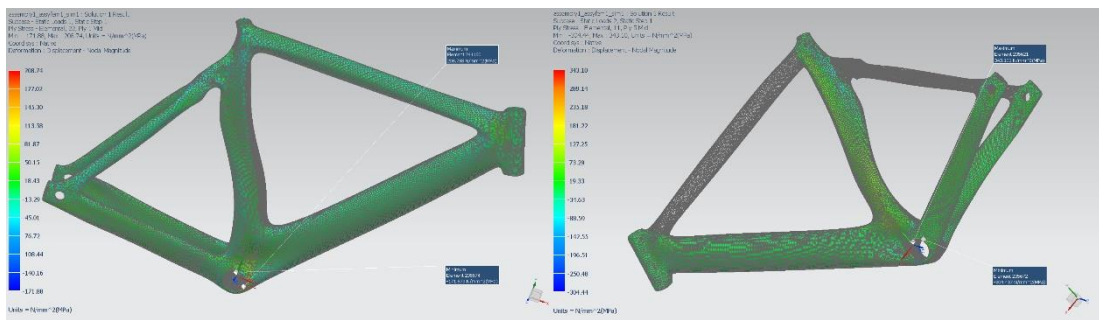
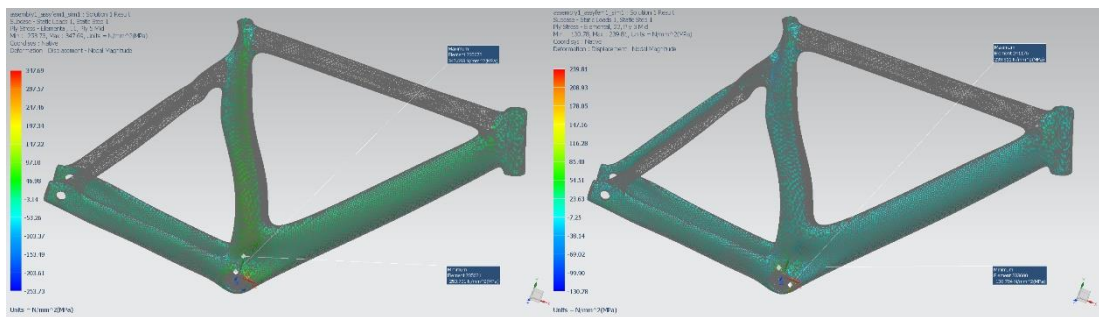
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 9^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 9^η στρώση τα 264.6 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 156.8 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 153.4 MPa στην 8^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 103.5 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 197.4 MPa στη μεσαία τριβή στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 174.4 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 161.1 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 70.9 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 9^η στρώση τα 273.6 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 164.6 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 113 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 100.7 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 211.8 MPa στο ίδιο σημείο στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 190.3 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 173.6 MPa στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 114.8 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 9

Top Summary

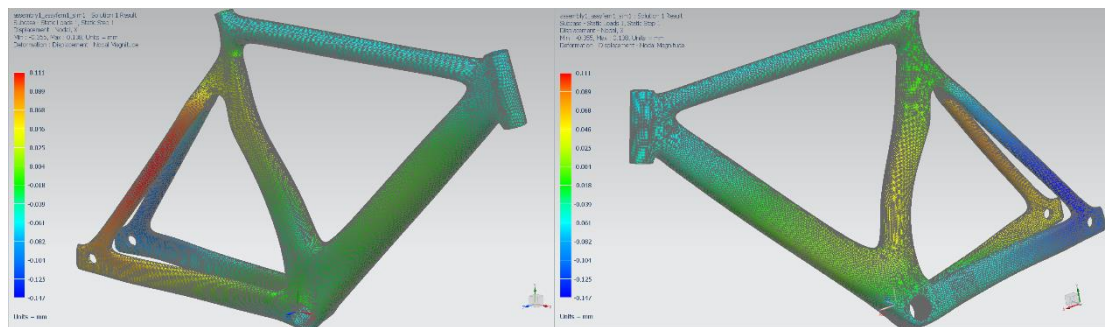
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	2	seat_tube	Interlaminar	-2,12E+05	-3,49E+03	0,00E+00	-6,36E+02	1,52E+03	-1,23E+04	1,04E+05
Max Stress 11	2	9	seat_tube	Interlaminar	2,74E+05	3,30E+03	0,00E+00	-2,51E+02	3,69E-13	4,70E-12	1,35E+05
Min Stress 22	2	1	seat_tube	Interlaminar	-1,01E+05	-1,74E+05	0,00E+00	-1,38E+04	-8,37E+03	7,05E+02	3,88E+04
Max Stress 22	1	8	seat_tube	Interlaminar	2,83E+04	1,53E+05	0,00E+00	8,99E+03	4,56E+03	8,42E+03	6,32E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-7,29E+03	-3,52E+03	0,00E+00	5,48E+02	-9,12E+00	3,39E-01	1,96E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-7,29E+03	-3,52E+03	0,00E+00	5,48E+02	-9,12E+00	3,39E-01	1,96E+03
Min Stress 12	2	1	seat_tube	Interlaminar	-1,51E+05	-1,42E+05	0,00E+00	-1,50E+04	-9,47E+03	6,29E+02	1,57E+04
Max Stress 12	1	8	seat_tube	Interlaminar	6,61E+04	1,52E+05	0,00E+00	1,21E+04	1,15E+03	-3,82E+02	4,48E+04
Min Stress 23	1	4	seat_tube	Interlaminar	-3,10E+04	3,87E+02	0,00E+00	3,41E+02	-7,69E+04	-7,19E+03	1,57E+04
Max Stress 23	2	4	seat_tube	Interlaminar	-2,97E+04	3,93E+02	0,00E+00	-4,25E+02	8,24E+04	6,49E+02	1,50E+04
Min Stress 31	1	5	seat_tube	Interlaminar	2,73E+04	-2,93E+02	0,00E+00	-1,58E+03	3,07E+04	-1,32E+05	1,39E+04
Max Stress 31	2	5	seat_tube	Interlaminar	4,51E+04	-6,65E+02	0,00E+00	3,61E+02	-2,23E+04	1,48E+05	2,29E+04
Min Maximum Shear Stress	2	9	head_tube	Interlaminar	-4,44E+01	-4,42E+01	0,00E+00	-9,51E-02	1,62E+00	4,54E-02	1,53E-01
Max Maximum Shear Stress	2	9	seat_tube	Interlaminar	2,74E+05	3,30E+03	0,00E+00	-2,51E+02	3,69E-13	4,70E-12	1,35E+05

Static Loads Case 1

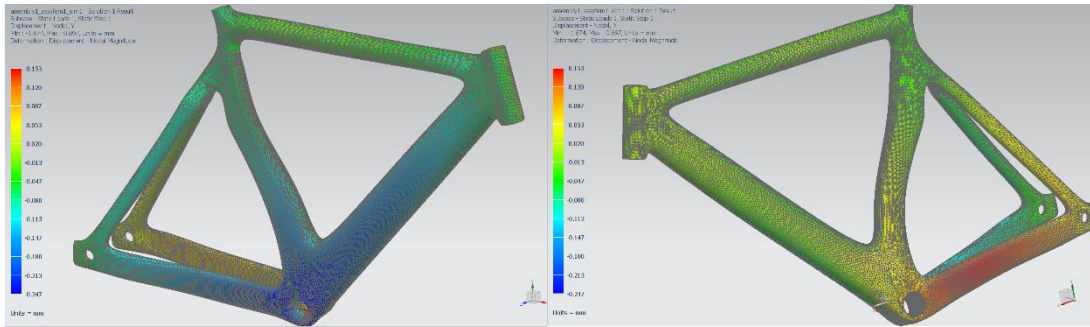
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-1,97E+05	-3,35E+03	0,00E+00	-7,30E+02	-1,63E+03	-1,26E+04	9,70E+04
Max Stress 11	9	seat_tube	Interlaminar	2,65E+05	2,88E+03	0,00E+00	-2,08E+02	-3,96E-13	4,83E-12	1,31E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-6,18E+04	-1,61E+05	0,00E+00	-8,35E+03	1,05E+04	-2,87E+03	5,03E+04
Max Stress 22	8	seat_tube	Interlaminar	2,83E+04	1,53E+05	0,00E+00	8,99E+03	4,56E+03	8,42E+03	6,32E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-7,29E+03	-3,52E+03	0,00E+00	5,48E+02	-9,12E+00	3,39E-01	1,96E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-7,29E+03	-3,52E+03	0,00E+00	5,48E+02	-9,12E+00	3,39E-01	1,96E+03
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-1,57E+05	-1,35E+05	0,00E+00	-1,42E+04	9,67E+03	-6,66E+02	1,79E+04
Max Stress 12	8	seat_tube	Interlaminar	6,61E+04	1,52E+05	0,00E+00	1,21E+04	1,15E+03	-3,82E+02	4,48E+04
Min Stress 23	4	seat_tube	Interlaminar	-3,10E+04	3,87E+02	0,00E+00	3,41E+02	-7,69E+04	-7,19E+03	1,57E+04
Max Stress 23	4	seat_tube	Interlaminar	-2,31E+04	6,98E+02	0,00E+00	-5,45E+01	6,02E+04	-1,71E+04	1,19E+04
Min Stress 31	5	seat_tube	Interlaminar	2,73E+04	-2,93E+02	0,00E+00	-1,58E+03	3,07E+04	-1,32E+05	1,39E+04
Max Stress 31	5	seat_tube	Interlaminar	-5,85E+04	7,41E+03	0,00E+00	-6,96E+03	5,22E+04	4,51E+04	3,37E+04
Min Maximum Shear Stress	6	head_tube	Interlaminar	3,10E-01	-2,69E-02	0,00E+00	-2,38E-02	-1,02E+01	-1,16E-01	1,70E-01
Max Maximum Shear Stress	9	seat_tube	Interlaminar	2,65E+05	2,88E+03	0,00E+00	-2,08E+02	-3,96E-13	4,83E-12	1,31E+05

Static Loads Case 2

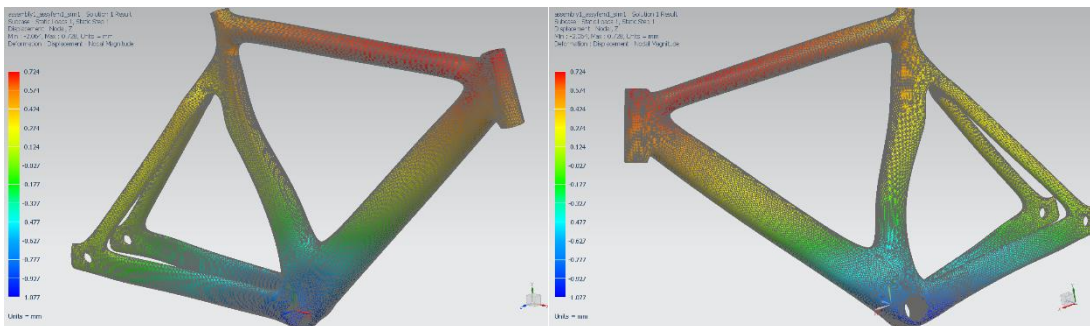
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-2,12E+05	-3,49E+03	0,00E+00	-6,36E+02	1,52E+03	-1,23E+04	1,04E+05
Max Stress 11	9	seat_tube	Interlaminar	2,74E+05	3,30E+03	0,00E+00	-2,51E+02	3,69E-13	4,70E-12	1,35E+05
Min Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	-1,01E+05	-1,74E+05	0,00E+00	-1,38E+04	-8,37E+03	7,05E+02	3,88E+04
Max Stress 22	1	seat_tube	Interlaminar	1,93E+04	1,13E+05	0,00E+00	3,25E+03	-8,66E+03	2,51E+03	4,69E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	6,10E+03	-3,76E+03	0,00E+00	-8,17E+02	-9,90E+00	-1,44E+02	5,00E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	6,10E+03	-3,76E+03	0,00E+00	-8,17E+02	-9,90E+00	-1,44E+02	5,00E+03
Min Stress 12	1	seat_tube	Interlaminar	-1,51E+05	-1,42E+05	0,00E+00	-1,50E+04	-9,47E+03	6,29E+02	1,57E+04
Max Stress 12	9	seat_tube	Interlaminar	-1,18E+04	6,13E+03	0,00E+00	1,20E+04	-1,64E-12	-1,52E-12	1,50E+04
Min Stress 23	4	seat_tube	Interlaminar	-9,21E+03	-9,53E+01	0,00E+00	-1,17E+03	-6,63E+04	2,82E+04	4,71E+03
Max Stress 23	4	seat_tube	Interlaminar	-2,97E+04	3,93E+02	0,00E+00	-4,25E+02	8,24E+04	6,49E+02	1,50E+04
Min Stress 31	6	head_tube	Interlaminar	-5,41E+02	1,37E+03	0,00E+00	-1,34E+01	5,95E+02	-2,38E+04	9,55E+02
Max Stress 31	5	seat_tube	Interlaminar	4,51E+04	-6,65E+02	0,00E+00	3,61E+02	-2,23E+04	1,48E+05	2,29E+04
Min Maximum Shear Stress	9	head_tube	Interlaminar	-4,44E+01	-4,42E+01	0,00E+00	-9,51E-02	1,62E+00	4,54E-02	1,53E-01
Max Maximum Shear Stress	9	seat_tube	Interlaminar	2,74E+05	3,30E+03	0,00E+00	-2,51E+02	3,69E-13	4,70E-12	1,35E+05



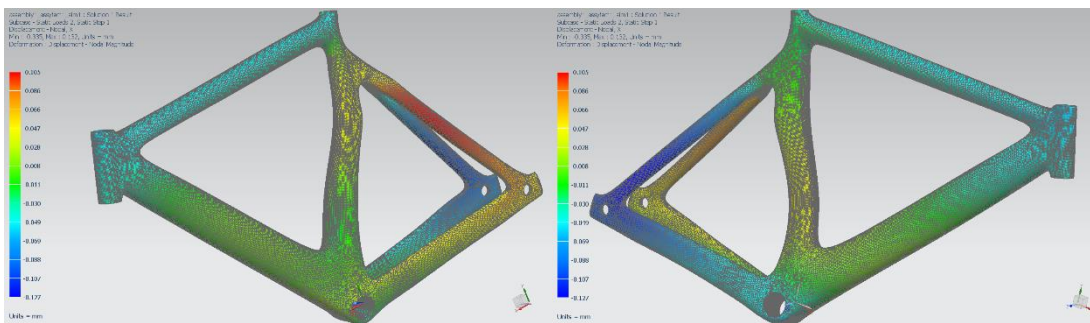
X axis displacement Case 1



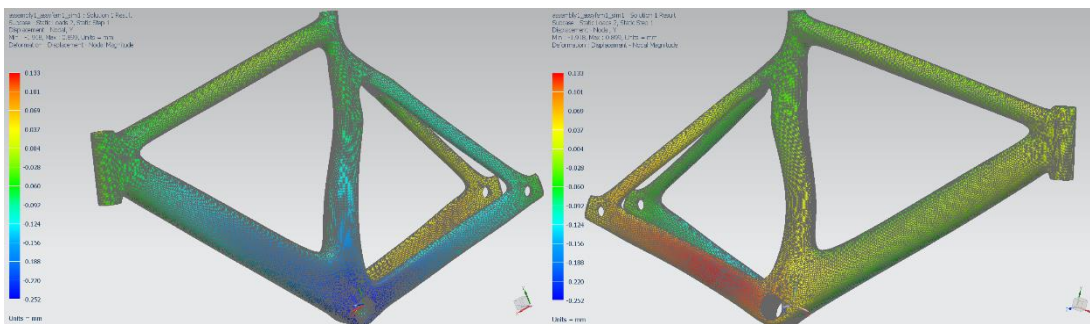
Y axis displacement Case 1



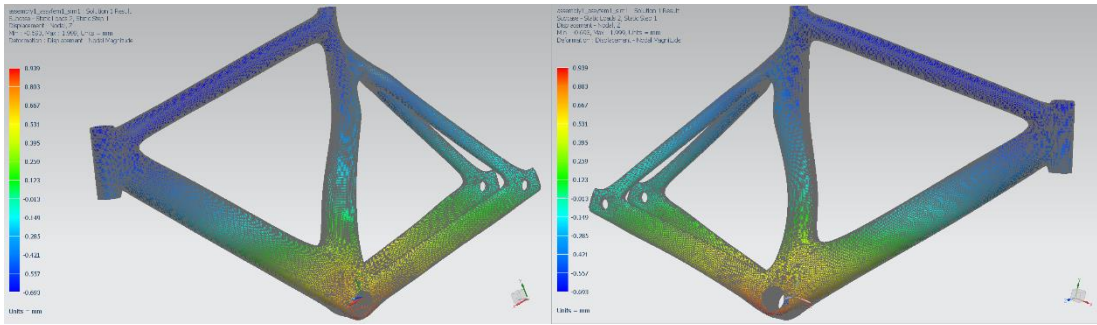
Z axis displacement Case 1



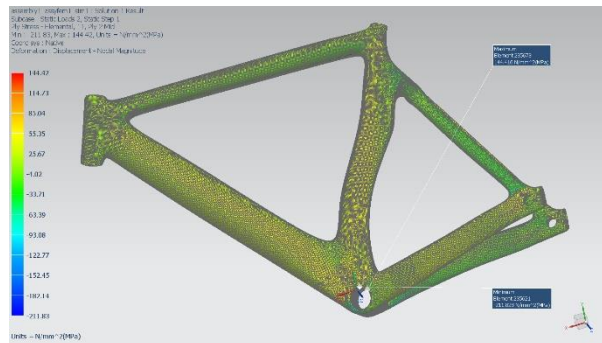
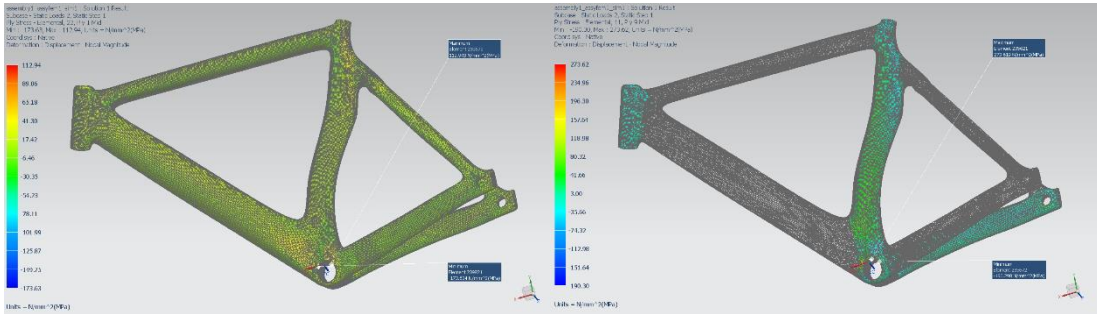
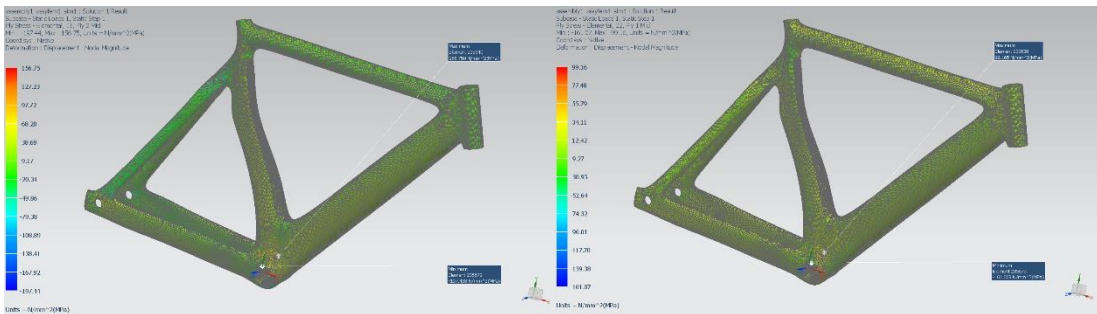
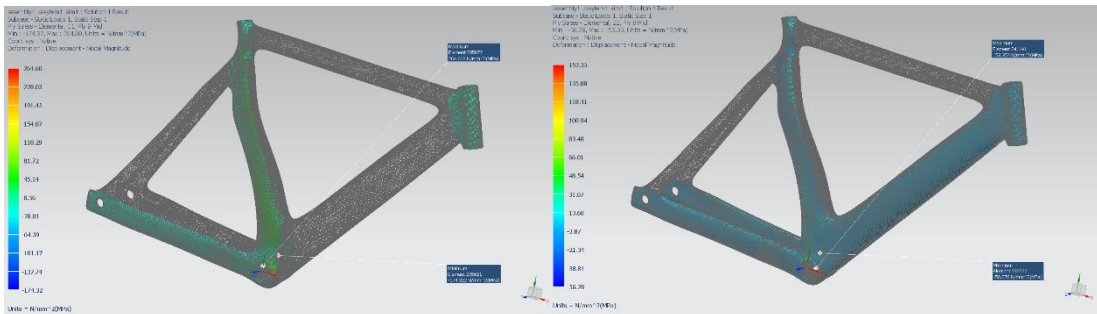
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

Στο 10^ο σενάριο (πρώτη περίπτωση), παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην δεξιά πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 2^η στρώση τα 408.3 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 303.2 MPa. Κατά τον Y άξονα στο ίδιο σημείο παρατηρείται μέγιστη τιμή 43.5 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 43.1 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 381.3 MPa στη μεσαία τριβή στην 1^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 244.9 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 45.7 MPa στην 6^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 34.8 MPa. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται εφελκυστικές τάσεις κατά τον X άξονα στην αριστερή πλευρά της μεσαίας τριβής, με μέγιστη τιμή στην 1^η στρώση τα 386.6 MPa και τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 294.8 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρείται μέγιστη τιμή 50 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 37.4 MPa. Επίσης κατά τον X άξονα παρατηρείται μέγιστη θλιπτική τάση 442.3 MPa στο ίδιο σημείο στην 2^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 280.7 MPa. Κατά τον Y άξονα παρατηρήθηκε μέγιστη τάση στο ίδιο σημείο 34.5 MPa στην 7^η στρώση, με τις υπόλοιπες να μη ξεπερνούν τα 32.5 MPa. Οι μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται σε αυτές τις περιοχές είναι κατά πολύ μικρότερες των ορίων αντοχής τάσεων του υλικού των στρώσεων. Άρα είναι δυνατόν να αντικατασταθούν στρώσεις υλικού με άλλο ελαφρύτερο και με μικρότερα όρια αντοχών, ή ακόμη και να αφαιρεθεί υλικό. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στον υπόλοιπο σκελετό.

- Scenario 10

Top Summary

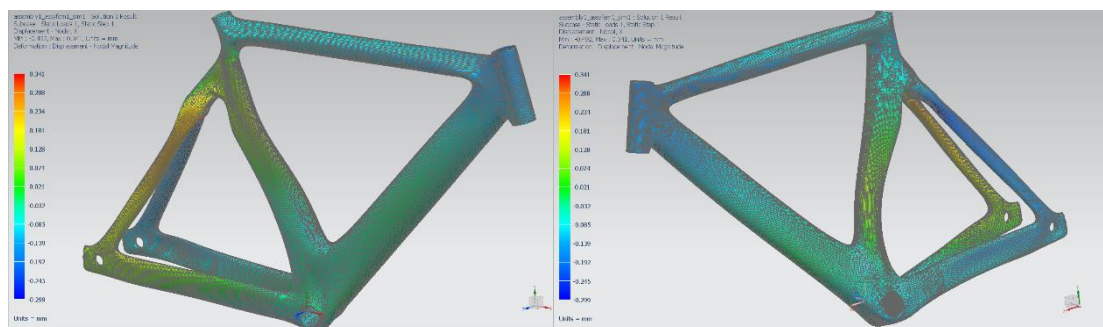
	Subcase	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
					mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	2	seat_tube	Interlaminar	-4,42E+05	1,05E+04	0,00E+00	6,50E+03	-1,23E+04	5,77E+03	2,26E+05
Max Stress 11	1	2	seat_tube	Interlaminar	4,08E+05	4,46E+02	0,00E+00	-1,24E+04	3,15E+03	1,75E+03	2,04E+05
Min Stress 22	1	6	chainstay_left	Interlaminar	-4,71E+04	-4,57E+04	0,00E+00	-8,65E+03	1,32E-12	-1,94E-13	8,68E+03
Max Stress 22	2	7	seat_tube	Interlaminar	6,94E+04	4,99E+04	0,00E+00	1,86E+04	1,63E-12	-2,80E-13	2,10E+04
Min Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,24E+04	-1,38E+03	0,00E+00	9,20E+02	7,73E+00	-5,36E+01	5,60E+03
Max Stress 33	1	1	head_tube	Interlaminar	-1,24E+04	-1,38E+03	0,00E+00	9,20E+02	7,73E+00	-5,36E+01	5,60E+03
Min Stress 12	1	7	seat_tube	Interlaminar	-5,58E+04	2,45E+04	0,00E+00	-5,04E+04	4,50E-12	1,04E-12	6,44E+04
Max Stress 12	2	7	seat_tube	Interlaminar	-6,29E+04	3,07E+04	0,00E+00	5,56E+04	-2,24E-12	8,60E-13	7,27E+04
Min Stress 23	2	3	seat_tube	Interlaminar	-2,34E+04	1,10E+04	0,00E+00	2,44E+04	-2,27E+04	1,39E+04	2,98E+04
Max Stress 23	2	3	seat_tube	Interlaminar	-2,58E+04	6,85E+01	0,00E+00	-5,92E+02	2,29E+04	3,04E+03	1,29E+04
Min Stress 31	1	4	seat_tube	Interlaminar	-1,25E+04	1,58E+03	0,00E+00	2,16E+03	2,90E+03	-1,73E+04	7,34E+03
Max Stress 31	2	4	seat_tube	Interlaminar	4,80E+03	5,99E+03	0,00E+00	-3,14E+04	-4,51E+03	2,83E+04	3,14E+04
Min Maximum Shear Stress	2	2	head_tube	Interlaminar	-6,77E-01	-2,34E-01	0,00E+00	-1,17E+00	1,90E+00	-1,17E+00	1,19E+00
Max Maximum Shear Stress	2	2	seat_tube	Interlaminar	-4,42E+05	1,05E+04	0,00E+00	6,50E+03	-1,23E+04	5,77E+03	2,26E+05

Static Loads Case 1

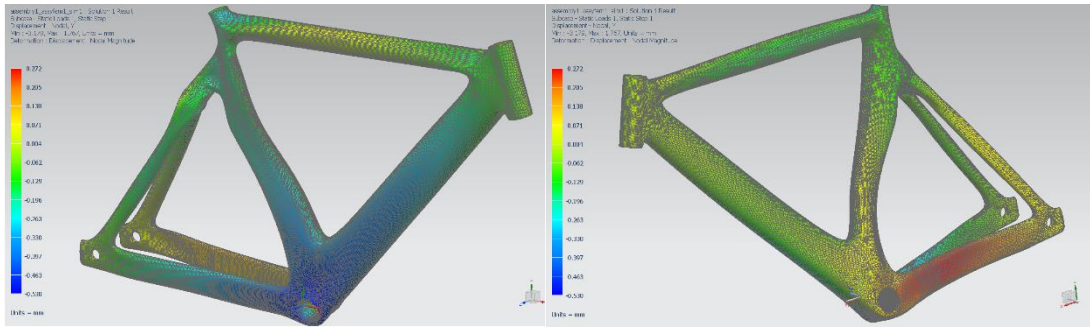
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	-3,81E+05	1,24E+03	0,00E+00	-9,27E+03	4,53E+03	3,63E+03	1,91E+05
Max Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	4,08E+05	4,46E+02	0,00E+00	-1,24E+04	3,15E+03	1,75E+03	2,04E+05
Min Stress 22	6	Laminate3	Interlaminar	-4,71E+04	-4,57E+04	0,00E+00	-8,65E+03	1,32E-12	-1,94E-13	8,68E+03
Max Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	3,36E+04	4,35E+04	0,00E+00	-3,85E+04	5,08E-13	2,60E-13	3,88E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,24E+04	-1,38E+03	0,00E+00	9,20E+02	7,73E+00	-5,36E+01	5,60E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	-1,24E+04	-1,38E+03	0,00E+00	9,20E+02	7,73E+00	-5,36E+01	5,60E+03
Min Stress 12	7	seat_tube	Interlaminar	-5,58E+04	2,45E+04	0,00E+00	-5,04E+04	4,50E-12	1,04E-12	6,44E+04
Max Stress 12	7	seat_tube	Interlaminar	-1,22E+04	-1,02E+04	0,00E+00	3,70E+04	-1,38E-12	-5,78E-13	3,70E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-2,08E+04	-1,61E+03	0,00E+00	0,00E+00	-1,72E+04	-1,03E+04	9,75E+03
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-7,14E+04	1,13E+04	0,00E+00	-2,31E+04	2,00E+04	1,34E+04	4,74E+04
Min Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	-1,25E+04	1,58E+03	0,00E+00	2,16E+03	2,90E+03	-1,73E+04	7,34E+03
Max Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	-1,22E+04	4,06E+03	0,00E+00	3,08E+04	4,16E+03	2,79E+04	3,19E+04
Min Maximum Shear Stress	3	head_tube	Interlaminar	7,46E-01	2,36E+00	0,00E+00	-8,81E-01	-4,06E+00	-2,31E-01	1,19E+00
Max Maximum Shear Stress	2	seat_tube	Interlaminar	4,08E+05	4,46E+02	0,00E+00	-1,24E+04	3,15E+03	1,75E+03	2,04E+05

Static Loads Case 2

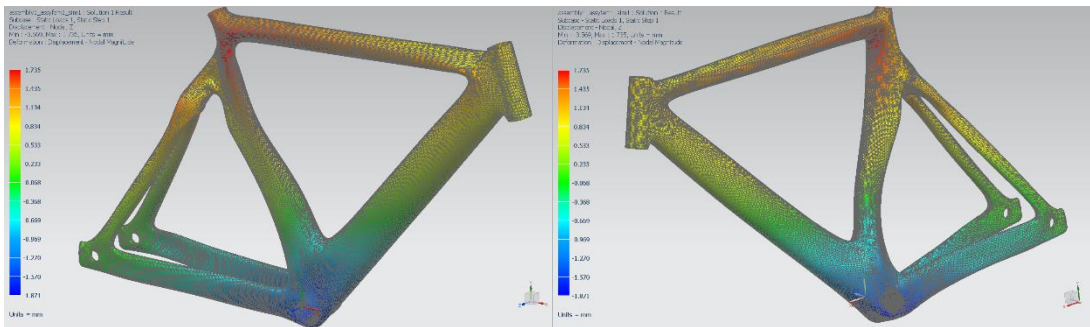
	Layer	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Shear
				mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)	mN/mm ² (kPa)
Min Stress 11	2	seat_tube	Interlaminar	-4,42E+05	1,05E+04	0,00E+00	6,50E+03	-1,23E+04	5,77E+03	2,26E+05
Max Stress 11	1	seat_tube	Interlaminar	3,87E+05	6,38E+03	0,00E+00	8,88E+03	-3,66E+03	1,79E+03	1,90E+05
Min Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	-2,20E+03	-3,45E+04	0,00E+00	5,91E+03	-1,38E-12	2,37E-13	1,72E+04
Max Stress 22	7	seat_tube	Interlaminar	6,94E+04	4,99E+04	0,00E+00	1,86E+04	1,63E-12	-2,80E-13	2,10E+04
Min Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,10E+04	-4,47E+02	0,00E+00	-1,44E+03	2,14E+02	-2,38E+02	5,88E+03
Max Stress 33	1	head_tube	Interlaminar	1,10E+04	-4,47E+02	0,00E+00	-1,44E+03	2,14E+02	-2,38E+02	5,88E+03
Min Stress 12	4	seat_tube	Interlaminar	1,33E+05	6,39E+02	0,00E+00	-3,95E+04	-3,56E+03	1,23E+04	7,68E+04
Max Stress 12	7	seat_tube	Interlaminar	-6,29E+04	3,07E+04	0,00E+00	5,56E+04	-2,24E-12	8,60E-13	7,27E+04
Min Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-2,34E+04	1,10E+04	0,00E+00	2,44E+04	-2,27E+04	1,39E+04	2,98E+04
Max Stress 23	3	seat_tube	Interlaminar	-2,58E+04	6,85E+01	0,00E+00	-5,92E+02	2,29E+04	3,04E+03	1,29E+04
Min Stress 31	2	Laminate1	Interlaminar	3,23E+04	-3,16E+03	0,00E+00	-7,74E+03	-1,63E+03	-1,35E+04	1,93E+04
Max Stress 31	4	seat_tube	Interlaminar	4,80E+03	5,99E+03	0,00E+00	-3,14E+04	-4,51E+03	2,83E+04	3,14E+04
Min Maximum Shear Stress	2	head_tube	Interlaminar	-6,77E-01	-2,34E-01	0,00E+00	-1,17E+00	1,90E+00	-1,17E+00	1,19E+00
Max Maximum Shear Stress	2	seat_tube	Interlaminar	-4,42E+05	1,05E+04	0,00E+00	6,50E+03	-1,23E+04	5,77E+03	2,26E+05



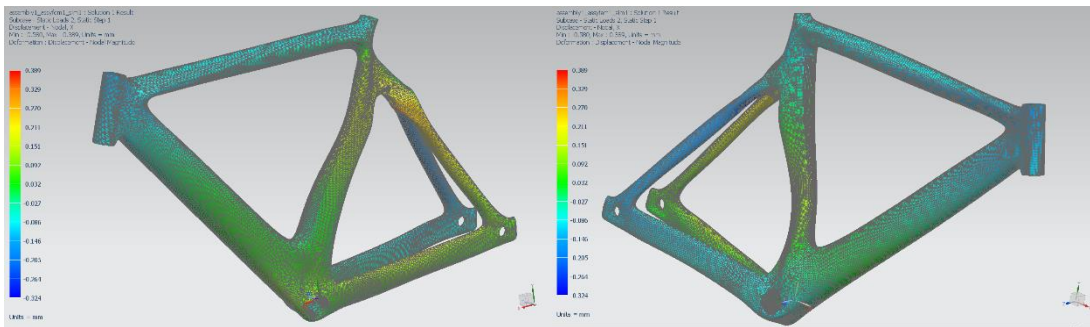
X axis displacement Case 1



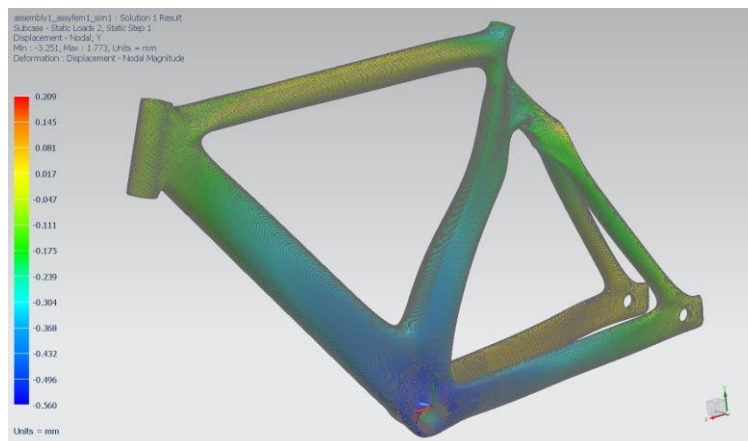
Y axis displacement Case 1



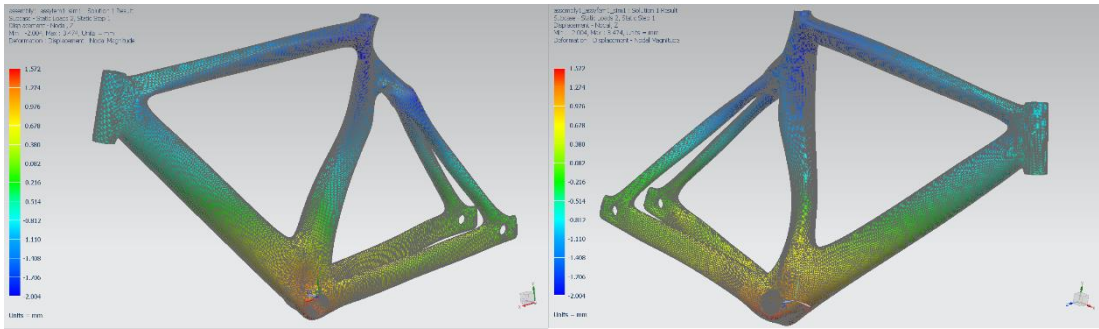
Z axis displacement Case 1



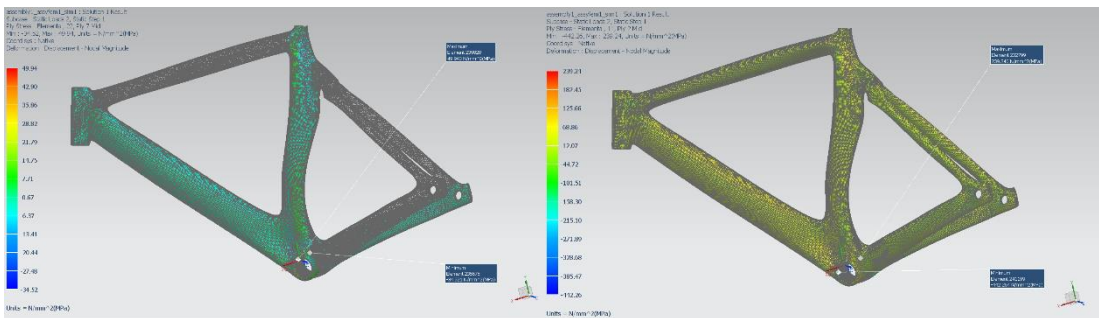
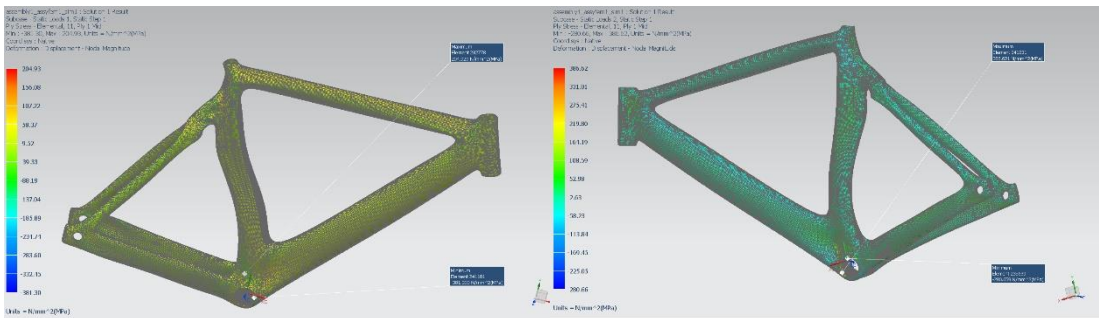
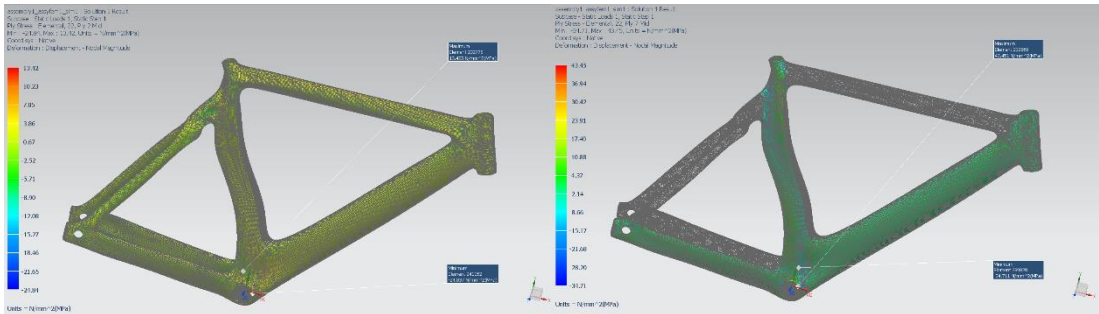
X axis displacement Case 2



Y axis displacement Case 2



Z axis displacement Case 2



Μέγιστες τιμές εφελκυστικών/θλιπτικών τάσεων ανά άξονα διεύθυνσης

