



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση και κατασκευή αεροδυναμικού πακέτου από
ανθρακονήματα για μονοθέσιο αυτοκίνητο τύπου Formula SAE
Analysis and manufacture of carbon fiber aerodynamic package
for a Formula SAE car

Ουσταμπασίδης Στέφανος

Επιβλέπων: Μανωλάκος Δημήτριος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Περίληψη

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και κατασκευή αεροδυναμικού πακέτου από ανθρακονήματα για μονοθέσιο αγωνιστικό αυτοκίνητο τύπου Formula Student. Γίνεται χρήση προγραμμάτων σχεδιασμού, ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και προσομοίωσης για να κατασκευασθούν οι αεροτομές, οι οποίες με την απαραίτητη προεργασία θα προσαρτηθούν στο καινούργιο μονοθέσιο.

Το Formula student πρόκειται μάλλον για τον μεγαλύτερο φοιτητικό διαγωνισμό μηχανολογίας, όπου οι ομάδες που συμμετέχουν κατασκευάζουν ένα μονοθέσιο από το μηδέν και ανταγωνίζονται σε διαφορετικές δοκιμασίες. Η ομάδα Formula Student του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου ονομάζεται Prom Racing Ntua Fsaε Team και τη σεζόν 2015-2016 κατασκεύασε το καινούργιο της μονοθέσιο προκειμένου να λάβει μέρος στους διαγωνισμούς του καλοκαιριού του 2016. Στο πλαίσιο της προσπάθειας αυτής βρίσκεται και το πεδίο ενασχόλησης της παρούσας διπλωματικής, αφού το καινούργιο μονοθέσιο της ομάδας θα έφερε για πρώτη φορά αεροδυναμικό πακέτο.

Στόχος ήταν η κατασκευή από το μηδέν του αεροδυναμικού πακέτου και η υλοποίηση των σχεδίων, που είχαν γίνει από τους αεροδυναμιστές της ομάδας, με το λιγότερο δυνατόν οικονομικό κόστος και βάρος, παραμένοντας όμως εντός των επιτρεπτών και επιθυμητών τιμών ακαμψίας και αντοχής. Βασικό εργαλείο για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί ήταν τα μηχανολογικά προγράμματα σχεδιασμού και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Solidworks και Siemens NX, ενώ χρειάστηκε να αποκτηθεί και το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την συγκεκριμένη ανάλυση.

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης έγινε η παραγγελία των αντίστοιχων μέτρων και ειδών υφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης έγινε σχεδιασμός των θηλυκών καλουπιών, τα οποία κατασκευάστηκαν από χορηγό της ομάδας και πάνω σε εκείνα έγινε η διαστρωμάτωση των ανθρακονημάτων υφασμάτων. Στη συνέχεια «ψήθηκαν» κάτω από πίεση (με την τεχνική της υποπίεσης) για να αποκτήσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες και τα τελικά τεμάχια, αφού υπέστησαν την κατάλληλη επεξεργασία προσαρτήθηκαν στο αυτοκίνητο υλοποιώντας το πρώτο αεροδυναμικό πακέτο της ομάδας.

Abstract

The subject of this diploma thesis is the study and manufacture of an aerodynamic carbon fibre package for a formula student car. Computational Aided Design (CAD) and Finite Element Analysis (FEA) softwares have been used to complete the study and the manufacture of the aero parts. In addition these parts have been adequately prepared to be placed on the new car.

The formula student team of the National Technical University of Athens is called Prom Racing Ntua Fsaе Team. During 2015-2016 the team manufactured their new car in order to participate in the competitions of summer 2016. The purpose of this diploma thesis is to facilitate the team's effort, as this was the first time that the car would have an aerodynamic package.

The goal of this diploma thesis was to produce from scratch this aero package and put into practice the designs created by the aero team members. This had to be done after taking into consideration the minimization of the cost and weight of the car, as well as not exceeding the mechanical strength limits. In order to achieve this goal, the basic tools that were used were the CAD and FEA softwares: Solidworks and Siemens NX. The theoretical background was also accumulated in order to complete this analysis and verify the results.

The results obtained from the analysis were used to calculate the amount of material that needed to be ordered and used. Furthermore, the female molds were designed and sent to a team's sponsor in order to manufacture them. The layup of the carbon fiber sheets was done on those molds. At a later stage, all the pieces were cured in the oven using vacuum pressure, in order to obtain their mechanical properties. After being properly finished, the cured parts were added in the car with suitable mounts.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπον καθηγητή της διπλωματικής μου κ. Μανωλάκο Δημήτριο για την καθοδήγηση που μου προσέφερε ιδιαίτερα στα πρώτα βήματα της εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης, που με έφερε σε επαφή με τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη και την εταιρία του Gram Carbon. Η πολύπλευρη βοήθεια τους ήταν καίριας σημασίας για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής. Παρείχαν σε εμένα προσώπικα αλλά και στην ομάδα τη δυνατότητα να χρησιμοποιούμε τις εγκαταστάσεις τους και τον εξοπλισμό τους, ακόμα και εκτός ωραρίου. Η χρήση του φούρνου, των αντλιών, των πάγκων εργασίας και των εργαλείων, των μηχανολογικών προγραμμάτων ακόμα και των υπολογιστών του ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και όχι μόνο. Επίσης ευχαριστώ τα μέλη της ομάδας που ανέλαβαν μέρος των αρμοδιοτήτων μου, ιδιαίτερα όταν υπηρετούσα για την στρατιωτική μου θητεία, και συνέβαλαν καθοριστικά για την ολοκλήρωση του αεροδυναμικού πακέτου για τους διαγωνισμούς την τελευταία κυριολεκτικά στιγμή.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	1
1.1	Formula SAE	1
1.2	Prom Racing	4
1.3	Αεροδυναμική και Formula SAE	7
1.4	Ανθρακονήματα στον μηχανοκίνητο αθλητισμό και στο FSAE	9
1.5	Simulation	10
2	Προετοιμασία Αεροδυναμικού μοντέλου.	11
2.1	Κανονισμοί.....	12
2.2	Κατασκευασιμότητα	13
2.3	Idealization of geometry.....	15
3	Finite Element Analysis σε Αλουμίνιο.....	17
3.1	Διακριτοποίηση	18
3.1.1	3D Mesh	19
3.1.2	2D Mesh	20
3.2	Οριακές συνθήκες και φορτίσεις.....	23
3.2.1	Υπολογισμός δυνάμεων και φορτίσεων.....	23
3.2.2	Οριακές συνθήκες – περιορισμοί.....	26
3.3	Αποτελέσματα	30
4	Καλούπια	43
4.1	Είδη καλουπιών	43
4.2	Η επιλογή του καλουπιού.....	44
4.3	Κατασκευή καλουπιών	47
5	Finite Element Analysis Carbon Fiber Reinforced Polymer.....	49
5.1	Τρόπος εφαρμογής της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για ανθρακονήματα.....	49
5.2	Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για ανθρακονημάτινες αεροτομές	51
5.3	Αποτελέσματα ανάλυσης	52
6	Κατασκευή	61
7	Παράρτημα	72
8	Βιβλιογραφία.....	81

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η μηχανολογική ανάλυση αντοχής και η κατασκευή αεροδυναμικού πακέτου από ανθρακονήματα για μονοθέσιο αυτοκίνητο τύπου Formula Student. Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός του πακέτου είχε προηγηθεί από τον τότε αεροδυναμιστή της ομάδας και συμφοιτητή μου Βασίλη Τσιολάκη. Μάλιστα η αεροδυναμική σχεδίαση αποτέλεσε την διπλωματική εργασία του επικεφαλής του τμήματος αεροδυναμικής της ομάδας Formula Student του πολυτεχνείου. Παρόλαυτα η κατασκευή του αεροδυναμικού πακέτου που είχε σχεδιασθεί δεν είχε μελετηθεί, από άποψη αντοχής, ούτε επιχειρηθεί ποτέ στο παρελθόν και έτσι αποτελούσε μία πρόκληση για την ομάδα. Ήταν η πρώτη φορά που επιχειρήθηκε να κατασκευαστούν ανθρακονημάτινα τεμάχια με δομικό χαρακτήρα, αλλά και η πρώτη φορά που η ομάδα θα κατασκεύαζε αεροδυναμικό πακέτο.

1.1 Formula SAE

Το Formula SAE πρόκειται για έναν διεθνή φοιτητικό διαγωνισμό μηχανικής, όπου ομάδες πανεπιστημίων και πολυτεχνείων ανά τον κόσμο καλούνται να κατασκευάσουν ένα μονοθέσιο αυτοκίνητο πίστας και να αναμετρηθούν στους διάφορους αγώνες που τον αποτελούν. Αποτελεί τον μεγαλύτερο διαγωνισμό μηχανικής στο επίπεδο της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης και οι αγώνες που φέρουν τον τίτλο Formula SAE προσελκύουν το ενδιαφέρον χιλιάδων ανθρώπων ανά τον κόσμο. Εταιρίες κολοσσοί της παγκόσμιας οικονομίας χορηγούν ομάδες, διοργανώσεις και βραβεία, ενώ κορυφαία ονόματα μηχανικών στον χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού, και όχι μόνο, παρευρίσκονται στους αγώνες είτε σαν κριτές, είτε σαν εκπρόσωποι των εκάστοτε αγώνων, είτε ως απλοί θεατές. Υπάρχουν δέκα επίσημοι αγώνες αυτή την στιγμή και πολλοί άλλοι μικρότεροι, με τον αριθμό να μεγαλώνει κάθε χρόνο. Οι σημαντικότεροι αγώνες που προσελκύουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον θα λέγαμε ότι είναι του Μίσιγκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες, της Μεγάλης Βρετανίας και της Γερμανίας.



Εικόνα 1. Ο διευθύνων σύμβουλος της F1 Ross Brawn σε διαγωνισμό Formula Student της Μεγάλης Βρετανίας. Κάποιοι χορηγοί της συγκεκριμένης ομάδας φαίνονται επίσης στο βάθος.

Το FSAE ξεκίνησε το 1980 από μέλη του συλλόγου μηχανικών αυτοκινήτων (Society of Automotive Engineers-SAE) του πανεπιστημίου του Όστιν Τέξας. Μία ομάδα φοιτητών και ενός καθηγητή έγραψαν τους κανονισμούς και αφού πήραν την συναίνεση από την διοίκηση του συλλόγου SAE ίδρυσαν τον διαγωνισμό. Στόχος ήταν να δημιουργήσουν έναν αγώνα για τους φοιτητές, υποψήφιους μηχανικούς, ο οποίος θα τους προέτρεπε να εφαρμόσουν στην πράξη την γνώση που αποκτούσαν από τα μαθήματα και να αποκτήσουν μια εμπειρία επίλυσης ενός πραγματικού μηχανολογικού προβλήματος. Η εμπειρία που αποκτάει κάποιος φοιτητής σε μία ομάδα Formula SAE είναι μία πρώτη πραγματική εργασιακή εμπειρία σε υψηλού μηχανολογικού επιπέδου και ανταγωνισμού περιβάλλον, που του δίνει σαφή εφόδια και τον προετοιμάζει για την μετέπειτα πορεία του.

Σήμερα η ιδέα πίσω από τους αγώνες αυτούς, μετά από χρόνια εξέλιξης είναι η εξής: Μία φοιτητική ομάδα αναλαμβάνει να σχεδιάσει και να κατασκευάσει ένα αγωνιστικό μονοθέσιο από το μηδέν, το οποίο να μπορεί να περάσει σε παραγωγή με στόχο, ως πελάτη, τον ερασιτέχνη οδηγό αγώνων του Σαββατοκύριακου. Το μονοθέσιο αυτό θα εξεταστεί σε διάφορες δυναμικές και στατικές δοκιμασίες με βάση τις οποίες θα βγει η τελική του κατάταξη. Στις δυναμικές δοκιμασίες το αυτοκίνητο οδηγείται από

κάποια μέλη της ομάδας και ανταγωνίζεται τα υπόλοιπα μονοθέσια του διαγωνισμού σε αγωνίσματα όπως η επιτάχυνση, γρηγορότερος γύρος, η αντοχή κλπ. Στις στατικές δοκιμασίες, από την άλλη οι κριτές βαθμολογούν τα σχέδια των φοιτητών, όσον αφορά την κατασκευή, την επιχειρηματική ιδέα και την ανάλυση κόστους.

Με βάση τα παραπάνω καθορίζονται οι στόχοι των ομάδων κατά την κατασκευή οι οποίοι στόχοι, εφόσον δεν πρόκειται για οδηγικό αγώνα, αλλά κυρίως μηχανολογικό, δεν περιορίζονται μόνο στις δυναμικές επιδόσεις του οχήματος. Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης η ευκολία παραγωγής, η ασφάλεια, το επιχειρηματικό πλάνο της εταιρίας κ.α. Τα τεστ που αποτελούν τους αγώνες, εξετάζουν λοιπόν το μονοθέσιο και την ομάδα σε όλους αυτούς τους τομείς.

Η βαθμολογία στους διαγωνισμούς καθορίζεται ως εξής. Σε σύνολο 1000 πόντων τους 675 τους παίρνουν τα δυναμικά αγωνίσματα και οι υπόλοιποι πάνε στα στατικά. Αυτό σημαίνει ότι μία ομάδα μπορεί να πάρει μέγιστο χιλίων πόντων αν βγει πρώτη σε όλα τα επιμέρους αγωνίσματα. Στα δυναμικά αγωνίσματα η μεγαλύτερη βαθμολογία δίνεται σε εκείνο της αντοχής με 275 βαθμούς, όπου η ομάδα καλείται να ολοκληρώσει μια διαδρομή 22 χιλιομέτρων στον μικρότερο δυνατό χρόνο. 125 βαθμοί δίνονται στην δοκιμασία του γρηγορότερου γύρου, ενώ από 100 βαθμούς παίρνουν οι δοκιμασίες της επιτάχυνσης και της οικονομίας καυσίμου. Τέλος 75 βαθμοί πάνε στην δοκιμασία της πίστας skid-pad όπου δοκιμάζεται η πλευρική επιτάχυνση που μπορεί να αναπτύξει το μονόθεσιο της εκάστοτε ομάδας. Στα στατικά αγωνίσματα 150 βαθμοί πάνε στη παρουσίαση του μηχανολογικού σχεδιασμού, όπου βαθμολογείται η μηχανολογική προσέγγιση του προβλήματος από την κάθε ομάδα. 100 βαθμοί πάνε στην ανάλυση κόστους και 75 στην παρουσίαση του επιχειρηματικού πλάνου της υποτιθέμενης κατασκευάστριας ομάδας-εταιρίας.

Οι κανονισμοί που διέπουν το σύνολο των αγώνων και εκδίδονται από την SAE International είναι πολύ συγκεκριμένοι, αλλά όχι απαραίτητα και περιοριστικοί. Δίνεται δηλαδή μεγάλη σημασία στην ασφάλεια, με περιορισμούς στους τομείς της σωστής διαστασιολόγησης του πλαισίου, της υποδύναμης του κινητήρα και άλλων τομέων που μπορεί να την επηρεάσουν οδηγών αλλά ταυτόχρονα υπάρχει μεγάλο περιθώριο σχεδιαστικής ελευθερίας. Έτσι σε έναν αγώνα μπορεί κανείς να δει σωληνωτά, ή μονοκοκ πλαίσια, αλουμιένιες ή κάρμπον ζάντες, αεροδυναμικό πακέτο ή όχι, τετρακύλινδρο ή δικύλινδρο ή μονοκύλινδρο κινητήρα. Τα τελευταία 5 περίπου χρόνια, επίσης πολλές διοργανώσεις έχουν εισάγει διαφορετικές κατηγορίες αποκλειστικά για ηλεκτρικά μονοθέσια, ενώ στους μεικτούς αγώνες οι διαφορές είναι πολύ μικρές, με τα ηλεκτρικά να έχουν ίσως ένα μικρό προβάδισμα στις νίκες έναντι των θερμικών πλέον.



Εικόνα 2. Ομαδική φωτογραφία από διαγωνισμό Formula Student. Γερμανία 2014

1.2 Prom Racing

Η ομάδα Formula Student του ΕΜΠ φέρει το όνομα Prom Racing και δραστηροποιείται στο πολυτεχνείο από το 2008. Παρόλαυτα η έλλειψη πόρων –οικονομικών και ανθρώπινων- της έχουν επιτρέψει την κατασκευή μόλις δύο μονοθεσίων (και ενός δοκιμαστικού) και αυτά με θυσίες και πολύ μεγάλη προσπάθεια των μελών της, ώστε να υπερκαλυφθεί το κενό των ελλείψεων αυτών. Τα δύο μονοθέσια αυτά αποτελούν την ιστορία της ομάδας και στόχος είναι να παραμένουν λειτουργικά και να χρησιμοποιούνται περιοδικά για δοκιμές κάθε φορά που κατασκευάζεται ένα επόμενο.

Το 2008 μετά τη δημιουργία της, η ομάδα έλαβε μέρος στον διαγωνισμό της Ιταλίας τον Σεπτέμβριο στην κατηγορία class 3, όπου οι ομάδες διαγωνίζονται μόνο με σχέδια. Εκεί κέρδισε και την πρώτη θέση, ενώ απέκτησε μια πολύ καλή εμπειρία για τη συνέχεια. Τα επόμενα χρόνια έγιναν κάποιες προσπάθειες κατασκευής και συμμετοχής, οι οποίες οδήγησαν στο πρώτο αυτοκίνητο της ομάδας το 2011, όταν η ομάδα είχε αποκτήσει την απαραίτητη εμπειρία από τα προηγούμενα χρόνια και βρήκε και την υποστήριξη που χρειαζόταν από εξωτερικούς χρηματοδότες. Έτσι το 2011 συμμετείχε στους αγώνες της Ουγγαρίας και Ιταλίας, όπου αποκόμισε πολύ σημαντικές εμπειρίες. Στον αγώνα της Ουγγαρίας κέρδισε την πρώτη θέση στον διαγωνισμό κόστους του μονοθεσίου, ενώ είχε συνολικά πολύ καλή εμφάνιση και στους δύο διαγωνισμούς. Τα σχόλια ήταν πολύ ενθαρρυντικά για την πρωτοεμφανιζόμενη τότε ομάδα του πολυτεχνείου, η οποία όμως δεν κατάφερε να τερματίσει στα αγωνίσματα αντοχής των διαγωνισμών εξαιτίας ενός προβλήματος στο σύστημα λίπανσης. Αυτό της στοίχισε και στην συνολική βαθμολογία, όπου σε περίπτωση τερματισμού θα βρισκόταν σε πολύ υψηλότερες θέσεις.

Μετά τους διαγωνισμούς πολλά μέλη της ομάδας αποχώρησαν, αφού είχε έρθει η σειρά τους να αποφοιτήσουν και νέα μέλη πήραν τη θέση τους. Έτσι το 2011 υπήρξε μία στρατολόγηση νέων μελών και έγινε η προσπάθεια να εκπαιδευτούν από τους παλαιότερους με τις βάσεις που είχε αποκτήσει πλέον η ομάδα. Το 2011-2012 καταναλώθηκε ως χρονιά προετοιμασίας της ομάδας εκ νέου δηλαδή, ενώ στη συνέχεια παρουσιάστηκε μεγάλη δυσκολία στη διαδικασία εύρεσης χορηγών, παρά τα ολοκληρωμένα καινούργια σχέδια. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι κάθε χρόνο σχεδόν, με εξαίρεση ίσως μία ή δυο χρονιές, η ομάδα είχε έτοιμα σχέδια για κατασκευή μονοθέσιου ενώ το βασικό εμπόδιο ήταν η εύρεση χορηγού. Η βοήθεια επίσης από το Πολυτεχνείο δεν ήταν ποτέ αρκετή, συγκριτικά με άλλες ομάδες και έτσι βασικό έργο και στόχος της ομάδας έγινε η εύρεση χορηγών.

Το 2015-2016 η ομάδα βρήκε επιτέλους χορηγό, κατασκεύασε το δεύτερο μονοθέσιο της και συμμετείχε για δεύτερη φορά σε διαγωνισμούς FSAE class 1 μετά την παρθενική της εμφάνιση το 2011. Το καινούργιο μονοθέσιο ήταν διαφορετικό σε πολλούς τομείς από το προηγούμενο, καθώς οι λίγες εμπειρίες της ομάδας και η σπάνια δυνατότητα συμμετοχής της σε διαγωνισμούς, της έχουν υπαγορεύσει να κάνει λίγα και μεγάλα βήματα προόδου, ώστε να παραμένει ανταγωνιστική. Η λύση βέβαια των περισσότερων μικρών βημάτων, με λίγες κάριες βελτιώσεις σε κάθε καινούργιο μονοθέσιο είναι σίγουρα πιο αποδοτική και ασφαλής ως νοοτροπία, αλλά κάτι τέτοιο αποδείχτηκε αδύνατο μέχρις στιγμής. Έτσι μετά το μονοθέσιο με σωληνωτό πλαίσιο και χωρίς αεροδυναμικά βοηθήματα το 2011, ήρθε το Prom 16, το αυτοκίνητο του 2016, με μόνοκοκ πλαίσιο και ανθρακονημάτινες αεροτομές.



Εικόνα 3. Prom 11b στο δυναμόμετρο. Κάρμπον πάνελ είχαν κολληθεί στους σωλήνες για αισθητικούς κυρίως λόγους. Μικρή αύξηση της ακαμψίας είναι εφικτή αν η συγκόλληση γίνει με τον σωστό τρόπο



Εικόνα 4. Prom 16 στον διαγωνισμό της Τσεχίας του 2016

Στην προσπάθεια μείωσης του κόστους και μεγιστοποίησης της απλότητας κατασκευής έγκειται η κατασκευή του μόνοκοκ πλαισίου από σάντουιτς αλουμινίου και όχι από ανθρακονήματα. Στην ουσία όμως πρόκειται, μάλλον, για ένα ενδιάμεσο βήμα μεταξύ του χαλύβδινου σωληνωτού πλαισίου του 2011 και των ανθρακονημάτων πλαισίων των επόμενων μονοθεσιών. Η παρούσα διπλωματική αποτελεί μεταξύ άλλων και μέρος της διαδικασίας αυτής αφού θα προσπαθήσει να βάλει μία βάση γύρω από τις ιδιότητες των ανθρακονημάτων και της διαδικασίας που απαιτεί η κατασκευή carbon τεμαχίων.



Εικόνα 5. Μόνοκοκ πλαιοιο από sandwich αλουμινίου για το μονοθέσιο Prom16

Η ίδια προσπάθεια μείωσης του κόστους και ο μικρός προϋπολογισμός της ομάδας έχουν καθορίσει και τον χαρακτήρα της. Πολλές ομάδες που έχουν τη δυνατότητα, δίνουν τα σχέδια της πλειοψηφίας των εξαρτημάτων τους για κατασκευή από εξωτερικούς συνεργάτες, σε αντίθεση με την Prom που κατασκευάζει το 80 τοις εκατό του μονοθεσίου στο εργαστήριο. Έχει γίνει πάγια τακτική της ομάδας να κατασκευάζουμε όσα τεμάχια είναι δυνατόν μόνοι μας με όποιες εγκαταστάσεις έχουμε στη διάθεση μας, κάτι που είναι πλέον πέρα από ανάγκη και συνειδητή επιλογή. Έτσι επιλέξαμε να κατασκευάσουμε και τις ανθρακονημάτινες αεροτομές για το αυτοκίνητο στον χώρο μας με την πολύτιμη βοήθεια άλλων εργαστηρίων του πολυτεχνείου και εξωτερικών συνεργατών.

Επομένως, η χρήση κάρμπον για την κατασκευή του αεροδυναμικού πακέτου, αναμένεται να προσδώσει στην ομάδα και την απαραίτητη εμπειρία για μεταγενέστερη πιο εκτεταμένη χρήση. Στόχος είναι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσο το δυνατόν αποδοτικότερα για την κατασκευή του πλαισίου από το ίδιο υλικό στην επόμενη προσπάθεια κατασκευής μονοθεσίου, αν φυσικά το επιτρέπουν τα οικονομικά της ομάδας. Περισσότερα εξαρτήματα επίσης, όπως το τιμόνι, η εισαγωγή αέρα, τα ψαλίδια και πολλά ακόμη θα μπορούσαν να κατασκευάζονται από κάρμπον στα επόμενα μονοθέσια της ομάδας.

1.3 Αεροδυναμική και Formula SAE

Οι αεροτομές στον διαγωνισμό Formula Student, παρά τις πολλές αντίθετες γνώμες στα πρώτα χρόνια τοποθέτησής τους, έχουν αποδειχτεί ιδιαίτερα σημαντικές για τις δυναμικές δοκιμασίες και τις επιδόσεις ενός μονοθεσίου. Παρά τις χαμηλές ταχύτητες που επιτυγχάνονται στους διαγωνισμούς, λόγω της διαγράμμισης των πιστών, η αεροδυναμική παίζει περισσότερο ρόλο από όσο κανείς θα περίμενε. Το κόστος, ο χρόνος κατασκευής τους και το βάρος δεν είναι ικανά στοιχεία για να αντισταθμίσουν τα πλεονεκτήματα ενός αεροδυναμικού πακέτου στις επιδόσεις των αυτοκινήτων με αποτέλεσμα η συντριπτική πλειοψηφία να κατασκευάζει και να χρησιμοποιεί τέτοια πακέτα τα τελευταία χρόνια. Στην Prom Racing ήταν στόχος από το 2011-12 το επόμενο μονοθέσιο που θα κατασκευάζαμε να έφερε αεροτομές. Αυτό έγινε επιτέλους πραγματικότητα το 2016 με την κατασκευή που θα αναλύσουμε στη συνέχεια της διπλωματικής αυτής.

Η αεροδυναμική μπήκε πολύ διστακτικά στον χώρο του Formula SAE σε αντίθεση με όλους τους υπόλοιπους διαγωνισμούς μονοθεσίων σε πίστα, όπου η ιδέα της αεροδυναμικής και της κάθετης δύναμης καλωσορίστηκε με ενθουσιασμό από την αρχή. Από το 1968 που πρωτοπαρουσιάστηκε μονοθέσιο με αεροδυναμικά φτερά στη Formula 1 η ιδέα έγινε πολύ δημοφιλής, ενώ τη δεκαετία του '70 δόθηκε πολύ μεγάλη έμφαση στη βελτιστοποίηση των αεροδυναμικών βοηθημάτων. Παρόλαυτά στο FSAE μέχρι το 2010-2011 πολύ λίγες ομάδες εμπιστευόντουσαν την επιλογή αυτή με ίσως βασικότερο υποστηρικτή την ομάδα του πανεπιστημίου του Monash της Αυστραλίας. Είναι γεγονός, δε ότι από τη δεκαετία του '90 διάφορα μονοθέσια sporadικά κάνανε χρήση αεροτομών, αλλά η συντριπτική πλειοψηφία δεν τις προτιμούσε παρότι ήδη από τότε φαινόταν να είναι πολύ γρήγορα τα μονοθέσια που χρησιμοποιούσαν.

Ο κύριος λόγος που συνέβη αυτό είναι ότι το FSAE πρόκειται για έναν διαγωνισμό μηχανικής και όχι ταχύτητας και οδήγησης, όπως αναφέραμε και παραπάνω. Αυτό σημαίνει ότι δεν αρκεί ένα γρήγορο μονοθέσιο που θα πέρνει καλές θέσεις στα δυναμικά αγωνίσματα για να πάρει η ομάδα τους

πολυπόθητους βαθμούς της πρώτης θέσης. Με τα αγωνίσματα του κόστους, της οικονομίας του καυσίμου και των παρουσιάσεων (μηχανολογικών και επιχειρηματικών πλάνων) η κυριαρχία των αεροτομών δεν ήταν δεδομένη. Θα έπρεπε κανείς να είναι σίγουρος για τους λόγους που συνοδεύουν μία τέτοια επιλογή και για τους βαθμούς που θα κερδίσει στα δυναμικά αγωνίσματα πριν κάνει χρήση αεροδυναμικών συσκευών. Χρήση, η οποία δεν θα μπορούσε παρά να αφαιρέσει πόντους στις δοκιμασίες του κόστους και της κατανάλωσης καυσίμου.

Ακόμη όμως και χωρίς αυτούς τους παράγοντες, η έμφαση που δίνεται –όπως αρμόζει- στην ασφάλεια, σε έναν φοιτητικό διαγωνισμό και οι μικρές ταχύτητες που επιτυγχάνονται δεν λειτουργούν προς όφελος των αεροτομών. Το ελάχιστο βάρος και η μηχανική πρόσφυση θεωρούνται πιο σημαντικό σε τόσο μικρές ταχύτητες καθώς οι αεροτομές δουλεύουν καλύτερα σε μεγαλύτερες ταχύτητες όταν ο αέρας που επιδρά σε αυτές είναι σαφώς περισσότερος. Επομένως, για να δουλέψουν οι αεροτομές στις ταχύτητες αυτές σωστά θα έπρεπε να έχουν πολύ μεγάλες επιφάνειες και να είναι ογκώδης. Κάτι που σημαίνει πολύ μεγάλη οπισθέλκουσα και σχετικά μεγάλο βάρος.

Έχει αποδειχτεί όμως σήμερα, ότι ακόμα και σε αυτές τις ταχύτητες, ένα σωστά σχεδιασμένο αεροδυναμικό πακέτο προσφέρει πολύ περισσότερα από ότι αφαιρεί. Σήμερα οι ομάδες που χρησιμοποιούν αεροδυναμικό πακέτο είναι μάλλον περισσότερες από το 50 τοις εκατό παγκοσμίως, ενώ αν προσέξουμε τις κορυφαίες ομάδες των διαγωνισμών η αναλογία αυτή μεγαλώνει εμφαντικά υπέρ της χρήσης αεροτομών.



Εικόνα 6. GFR Team Austria 2014. Μία από τις κορυφαίες ομάδες στον διαγωνισμό της Αυστρίας, τον οποίο είχε κερδίσει εκείνη την χρονιά. Η έμφαση στην αεροδυναμική είναι φανερή.

1.4 Ανθρακονήματα στον μηχανοκίνητο αθλητισμό και στο FSAE

Η χρήση σύνθετων υλικών και ιδιαίτερα των ανθρακονημάτων ανθεί στον χώρο της μηχανικής τα, όχι και τόσο, τελευταία χρόνια. Ειδικά στον χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού το κάρμπον έχει κάνει την εμφάνισή του εδώ και 35 χρόνια ξεκινώντας από την formula 1. Πρώτη η ομάδα της McLaren κατάσκευασε ανθρακονημάτινο μόνοκοκ πλαίσιο το 1981 και έκτοτε το ύφασμα αυτό με τις εκπληκτικές ιδιότητες μόνο άνοδο έχει γνωρίσει όσον αφορά τη χρήση του.

Γρήγορα όλες οι ομάδες ακολούθησαν το δρόμο του ανθρακονημάτινου πλαισίου, ενώ πλέον το κάρμπον αποτελεί το υλικό κατασκευής των περισσότερων μερών ενός αυτοκινήτου formula 1. Από τα μέρη της ανάρτησης και το πλήρες αεροδυναμικό πακέτο μέχρι τα φρένα ή ακόμα και το κουβούκλιο του κιβωτίου αποτελούνται από ανθρακονήματα.



Εικόνα 7. McLaren MP4 1 1981 Monocoque. First ever CFRP monocoque in F1

Στον χώρο του Formula SAE τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλη απήχηση επίσης, η οποία μεγαλώνει ακόμη περισσότερο, όσο η εμπειρία των ομάδων, το επίπεδο ανταγωνισμού και οι προϋπολογισμοί μεγαλώνουν. Ήδη από τη δεκαετία του '80 είχε κάνει την εμφάνισή του ένα μονοθέσιο, με μόνοκοκ πλαίσιο από σύνθετα υλικά. Ήταν του πανεπιστημίου του Όστιν με σασί από Κέβλαρ. Παρόλαυτά τη δεκαετία του 2000 άρχισαν ουσιαστικά κάποιες ομάδες να εμπιστεύονται τα κάρμπον μόνοκοκ πλαίσια ως λύση ενώ την επόμενη δεκαετία (2010 και μετά) εδραιώθηκαν για τα καλά. Οι περισσότερες ομάδες, που έχουν την οικονομική δυνατότητα πλέον έχουν κάποιου είδους κάρμπον μόνοκοκ πλαισίου (είτε ολόκληρο είτε υβριδικό με σωληνωτό υποπλάισιο πίσω για την στήριξη του μοτέρ και της πίσω ανάρτησης). Οι υπόλοιπες έχουν σωληνωτά χαλύβδινα πλαίσια κατά κύριο λόγο, ενώ πολύ λιγότερες χρησιμοποιούν αλουμινένια μόνοκοκ ή σωληνωτά, τα οποία αθροιστικά είναι μάλλον λιγότερα από δέκα με τα τελευταία να είναι τα πλέον σπάνια. Η ομάδα του πανεπιστημίου του Μάρμπουργκ είχε κάνει μία καλή εμφάνιση με σωληνωτό από αλουμίνιο πριν 3 χρόνια, αλλά η δυσκολία

στην κατασκευή (κολλήσεις TIG) και οι κανονισμοί που ευνοούν κατά κάποιο τρόπο τα χαλύβδινα σωληνωτά τα έχουν κάνει δυσεύρετα.

Ο συνδυασμός βάρους, αντοχής σε εφελκυσμό, ακαμψίας, αλλά και η θερμοκρασιακή αντοχή και η μικρή θερμική διαστολή των ανθρακονημάτων έχει κάνει το υλικό αυτό τόσο δημοφιλές στον χώρο των μηχανοκίνητων αθλημάτων. Σε εφελκυσμό οι ίνες άνθρακα μπορεί να ξεπερνάνε την αντοχή ενός απλού χάλυβα ως και δέκα φορές, σε αντίθεση με ένα φύλλο ανθρακονημάτων που έχει μόλις τέσσερις φορές μεγαλύτερη αντοχή. Αυτό συμβαίνει διότι μία ίνα άνθρακα έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό από το σύνθετο υλικό που προκύπτει μετά την προσθήκη των απαραίτητων ρητινών, αλλά δεν έχει καμία χρησιμότητα στον πραγματικό κόσμο σε αυτήν την μορφή. Έτσι απαιτείται μία ακριβή και ακριβής διαδικασία, η οποία θα προσδώσει τις απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες στο τελικό σύνθετο υλικό που ονομάζουμε ανθρακόνημα, ενώ η επιστημονικά ορθή ονομασία του είναι Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), δηλαδή ενισχυμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα.

Η ποιότητα, οι μηχανικές ιδιότητες και η τελική επιφάνεια των τεμαχίων είναι ανάλογες του τετραγώνου του κόστους παραγωγής και αυτό (το μεγάλο κόστος) αποτελεί μάλλον το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ανθρακονημάτων. Για τον λόγο αυτό και η ομάδα formula student του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν είχε την αντίστοιχη εμπειρία στην χρήση τους τα προηγούμενα χρόνια. Η κατασκευή ενός τέτοιου πλαισίου θα κόστιζε σχεδόν όσο το μισό μπάτζετ της. Παρόλαυτα η κατασκευή των αεροτομών ήταν μονόδρομος όσον αφορά το υλικό κατασκευής και μία καλή ευκαιρία επαφής με το υλικό.

1.5 Simulation

Για την κατασκευή οποιουδήποτε τεμαχίου, από οποιοδήποτε υλικό απαιτείται μια προεργασία. Η προεργασία αυτή εκτός των άλλων περιλαμβάνει την μελέτη, ώστε το τεμάχιο να αντέχει στις καταπονήσεις και να προβλέπεται η συμπεριφορά του στα διάφορα φορτία. Ιδιαίτερα στην περίπτωση μας όπου τα τεμάχια που κατασκευάζονται προορίζονται για την παραλαβή φορτιών, η μελέτη της αντοχής κρίνεται απολύτως απαραίτητη.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, η μελέτη αυτή μπορεί να είναι πολύ πιο ακριβής και εκτεταμένη, από εκείνη που γινόταν παλαιότερα με την αναλυτική λύση εξισώσεων στο χέρι. Να επισημάνουμε ότι παλαιότερα πολλές φορές, όταν οι καταστάσεις το απαιτούσαν και η αναλυτική λύση ήταν σχεδόν αδύνατη, ο μόνος τρόπος μελέτης ήταν ουσιαστικά εμπειρικά. Δηλαδή χαλώντας και σπάζοντας διάφορα δοκίμια μέχρι να καταλήξει ο εκάστοτε μηχανικός σε εκείνο που θεωρούσε καλύτερο για το σκοπό του, αναλόγως την περίπτωση. Αυτό φυσικά συνεπάγεται κόστος σε χρήματα, σε μηχανολογική ακρίβεια και σε χρόνο. Μεγάλο μέρος του κόστους αυτού και στους τρεις τομείς το γλυτώνουμε πλέον με την χρήση των προγραμμάτων προσομοίωσης.

Τα προγράμματα αυτά παρέχουν τη λύση μέσω της μεθόδου της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, η οποία πρόκειται ουσιαστικά για τη λύση των ίδιων διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας όμως άλλες αριθμητικές μεθόδους. Στη χρήση τέτοιων προγραμμάτων για την μελέτη της αντοχής των αεροτομών του μονοθεσίου επικεντρώνεται και το κύριο μέρος της διπλωματικής αυτής,. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Siemens NX εξετάζουμε διάφορα μοντέλα αεροτομών, με

διαφορετικές διαστρωματώσεις για να βρούμε εκείνο που παρέχει τον καλύτερο συνδυασμό βάρους - αντοχής.

Μία τέτοια ανάλυση θα ήταν σχετικά απλή και αρκετά συνηθισμένη για ένα τεμάχιο από αλουμίνιο, χάλυβα ή κάποιο άλλο συμβατικό υλικό και δεν θα είχε αξία τόσο εκτεταμένη μελέτη, κάτι όμως που στην περίπτωση μας δεν ισχύει. Τα σύνθετα υλικά, και δη το κάρμπον, που έχει τόσες πολλές μεταβλητές που μπορούν να αλλάξουν κατά την κατασκευή των τεμαχίων παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους.

Λίγα προγράμματα είναι σε θέση να εκπληρώσουν με σχετική ακρίβεια τους υπολογισμούς σε ανθρακονημάτινα τεμάχια. Ακόμα και αυτά όμως, για να είναι η ανάλυση αξιόπιστη απαιτούν την διεξαγωγή πειραμάτων για τον καθορισμό κάποιων βασικών τιμών για τις ιδιότητες του υλικού (υφάσματος-ρητίνης) που χρησιμοποιείται. Το Siemens NX ήταν σχεδόν μονόδρομος για την συγκεκριμένη διαδικασία και απόδειξη αυτού είναι ότι ακόμα και μεγάλες ομάδες της Formula 1 το χρησιμοποιούν για αντίστοιχες εργασίες. Προηγούμενα μέλη της ομάδας που εργάζονται αυτή τη στιγμή σε ομάδες της Formula 1 κάνουν χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος κατόπιν οδηγιών των ομάδων.

Ακόμα και αν δεν συμβάδιζε απόλυτα με τα προγράμματα σχεδιασμού που χρησιμοποιούσε η ομάδα μέχρι σήμερα για τον σχεδιασμό και την ανάλυση των υπολοίπων τεμαχίων η «επικοινωνία» του με αυτά ήταν πολύ εύκολη. Το πρόγραμμα που επιλέξαμε είχε τη δυνατότητα μεταφοράς αρχείων, και επεξεργασίας τους από το ένα πρόγραμμα στο άλλο με πολύ άμεσο τρόπο. Έτσι υπήρχε ουσιαστικά αλληλεπίδραση μεταξύ των προγραμμάτων, η οποία ήταν πολύ χρήσιμη για την εξοικονόμηση χρόνου.

2 Προετοιμασία Αεροδυναμικού μοντέλου.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω οι κανονισμοί στο FSAE είναι πολύ συγκεκριμένοι και λεπτομερείς. Αν το μονοθέσιο που θα παρουσιαστεί στους διαγωνισμούς δεν τους πληρεί στο ακέραιο κινδυνεύει να αποκλειστεί από τον διαγωνισμό κατά την διαδικασία του τεχνικού ελέγχου. Πριν από κάθε διαγωνισμό λαμβάνει χώρα από κριτές ο τεχνικός έλεγχος, όπου εξετάζονται σχολαστικά τα μονοθέσια και τους επιτρέπεται να αγωνιστούν μόνο αφού πάρουν τα αντίστοιχα αυτοκόλλητα έγκρισης. Η περίπτωση αποκλεισμού κάποιας ομάδας δεν είναι καθόλου σπάνια, γεγονός που φανερώνει και τη σοβαρότητα που διέπει τους διαγωνισμούς αυτούς στο θέμα της ασφάλειας.

Έτσι πριν την κατασκευή των αεροτομών, έπρεπε να είμαστε σίγουροι ότι όλοι οι σχετικοί κανονισμοί θα τηρηθούν στο ακέραιο. Κάποιες αλλαγές στα σχέδια έπρεπε να γίνουν εξαιτίας αλλαγών στους κανονισμούς. Τα σχέδια και η αεροδυναμική μελέτη του αεροδυναμιστή είχαν ολοκληρωθεί την προηγούμενη χρονιά με την προοπτική ότι δεν θα υπήρχαν σημαντικές αλλαγές στους κανονισμούς, αλλά κάποιες μικροαλλαγές θα μπορούσαν να επιτευχθούν.

Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία σχεδιασμού είναι η πρόληψη στον τομέα της κατασκευής. Δηλαδή το κατά πόσο είναι είναι το σχέδιο κατασκευάσιμο και με ποιον τρόπο. Ιδιαίτερα σε μία μικρή ομάδα Formula Student χωρίς ιδιαίτερα μηχανήματα και εγκαταστάσεις ή τεράστια ποσά διαθέσιμα για κατασκευαστικούς σκοπούς η πρόβλεψη υπέρ του σταδίου της

κατασκευής έχει ακόμη μεγαλύτερη βαρύτητα. Εύκολα κατασκευάσιμα σχέδια θα επηρεάσουν σημαντικά τη διαδικασία κατασκευής, διευκολύνοντας όλα τα μέλη που συμμετέχουν. Πολλές φορές, βέβαια η πρόληψη δεν επιτυγχάνεται στον απόλυτο βαθμό λόγω διάφορων παραγόντων, που μπορεί να μην τους γνωρίζει ο σχεδιαστής εκ των προτέρων. Είναι σύνηθες λοιπόν τα τελικά σχέδια ενός σχεδιαστή που θεωρούνται ολοκληρωμένα από τον ίδιο να υποβάλλονται σε αλλαγές ή να ζητούνται διορθώσεις, εκ μέρους της κατασκευαστικής ομάδας, όταν φτάσουν στο στάδιο αυτό.

Στην περίπτωση των συγκεκριμένων αεροτομών, οι αλλαγές που απαιτούνταν δεν ήταν πολύ σημαντικές και μπορούσαν να πραγματοποιηθούν χωρίς την συνδρομή του αεροδυναμιστή της ομάδας. Το γεγονός όμως ότι τα σχέδια, ως προϊόν ερευνητικής εργασίας, αποτελούσαν την απολύτως βέλτιστη έκδοση των αεροτομών από ερευνητικής και αεροδυναμικής απόψεως, σήμαινε εκ των πραγμάτων ότι θα χρειαζούν κάποιες αλλαγές για το στάδιο της κατασκευής.

Αν και δεν ήταν απαραίτητο, όπως προαναφέρθηκε, ζητήθηκε η συνδρομή του υπεύθυνου για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό, πριν πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες αλλαγές ώστε να είμαστε σίγουροι για το τελικό αποτέλεσμα. Ο λόγος είναι ότι θέλαμε να γνωρίζουμε κατά πόσο αυτές οι αλλαγές θα επηρέαζαν την αεροδυναμική συμπεριφορά του αυτοκινήτου, μιας και υπήρχαν διάφοροι συντελεστές που μας υποχρέωναν σε μετατροπή των σχεδίων προς διάφορες κατευθύνσεις. Οι κύριοι συντελεστές ήταν η κατασκευασσιμότητα όπως αναφέρθηκε στα διάφορα στάδια κατασκευής, αλλά και οι κανονισμοί.

2.1 Κανονισμοί

Οι κανονισμοί από το 2015 και μετά παρουσιάζουν αλλαγές ανά δύο χρόνια σε αντίθεση με τα προηγούμενα χρόνια, όταν μικρές αλλαγές παρουσιάζονταν σχεδόν κάθε χρόνο. Έτσι πλέον οι αλλαγές γίνονται μόνο τις μονές χρονιές, εκτός αν η διοργάνωση θεωρήσει σημαντικό να κάνει κάποιες πιο μικρές αλλαγές στις ενδιάμεσες «ζυγές» χρονιές. Οι λόγοι για τις αλλαγές των κανονισμών είναι θέματα ασφαλείας, να αναγκάσουν τις ομάδες να σκεφτούν νέους τρόπους αντιμετώπισης των προβλημάτων, αλλά και να παραμείνουν στην αιχμή της ολοένα ανανεώσιμης τεχνολογίας. Αφού στόχος όμως ήταν οι διαγωνισμοί του 2016 και την χρονιά εκείνη έγιναν κάποιες μικρές αλλαγές αναγκαστήκαμε να αναπροσαρμόσουμε τα σχέδια του αεροδυναμικού πακέτου.

Αρχικά να αναφέρουμε ότι η προηγούμενη χρονιά διαγωνισμών, το 2015, ήταν μία χρονιά που οι κανονισμοί, οι οποίοι αφορούσαν τα αεροδυναμικά βοηθήματα είχαν σημαντικές αλλαγές και προσθήκες. Ανάμεσα σε άλλους, η πίσω πτέρυγα περιορίστηκε σε πλάτος ώστε να μην ξεπερνάει το εσωτερικό μέρος των ελαστικών στον πίσω άξονα, οι ακμές όλων των μπροστινών αεροδυναμικών συσκευών, που θα μπορούσαν να έρθουν σε επαφή με πεζό απέκτησαν ένα ελάχιστο ράδιο, αλλά το πιο σημαντικό για την συγκεκριμένη εργασία είναι ότι έγινε προσθήκη κανονισμών όσον αφορά τη στήριξη των αεροτομών.

Αφορμή για την συγκεκριμένη προσθήκη υπήρξαν κάποια φαινόμενα απόσπασης των αεροτομών και μη καλής στήριξης τους από διάφορες ομάδες κατά την περίοδο των διαγωνισμών του καλοκαιριού του 2014. Έτσι προστέθηκε ο κανονισμός T 9.7 (2015-16 Formula SAE Rules), ο οποίος αναφέρει ότι το σύστημα στήριξης των αεροδυναμικών συσκευών θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε εκείνες να μην ταλαντώνονται ή κουνιούνται υπερβολικά κατά την κίνηση του μονοθεσίου. Ο σκόπος

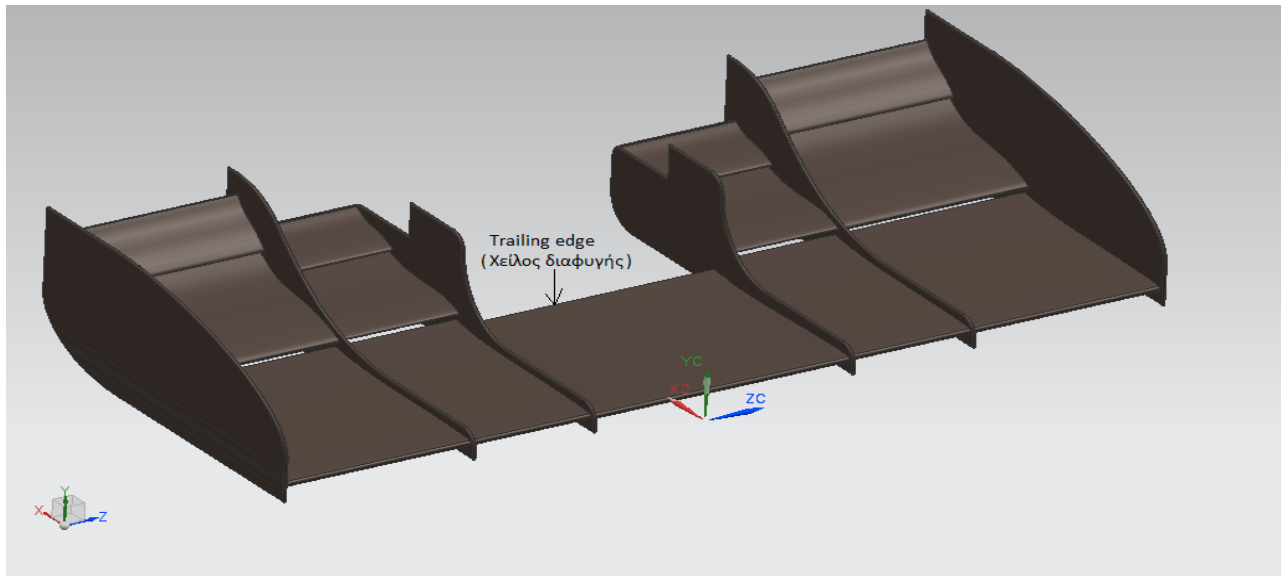
όπως αναφέρουν είναι να μειωθεί η πιθανότητα αποκόλλησης της αεροτομής από το μονοθέσιο. Επίσης, στην περίπτωση που οι κριτές διαπιστώσουν κίνηση των αεροτομών θα εφαρμόσουν δύναμη 200N σε κάποιο, οποιοδήποτε σημείο και θα εξετάσουν την συμπεριφορά τους. Αν αποκλίνουν περισσότερο από 25 χιλιοστά ή παρουσιάσουν μόνιμη παραμόρφωση από 5 χιλ και πάνω θα πρέπει να ληφθούν μέτρα αποκατάστασης των φαινομένων αυτών.

Ο κανονισμός, ο οποίος αναφερόταν στις ακμές των μπροστινών αεροδυναμικών συσκευών υπαγόρευε ότι οι κατακόρυφες συσκευές, όπως τα endplates (οι κατακόρυφες πλάκες στις άκρες των στοιχείων των αεροτομών που κατευθύνουν τη ροή του αέρα προς το υπόλοιπο αυτοκίνητο) θα είχαν ελάχιστο πλάτος 6 χιλ. Αυτό γιατί το ελάχιστο ράδιο που επέτρεπαν για τέτοιου είδους ακμή ήταν 3χιλ. Έτσι το αρχικό πάχος των στοιχείων που ήταν στην πλειοψηφία τους μεγαλύτερο, άλλαξε και εφόσον και το συνολικό πλάτος της μπροστινής πτέρυγας ήταν σταθερό, θα έπρεπε να μικρύνουν τα στοιχεία.

2.2 Κατασκευασιμότητα

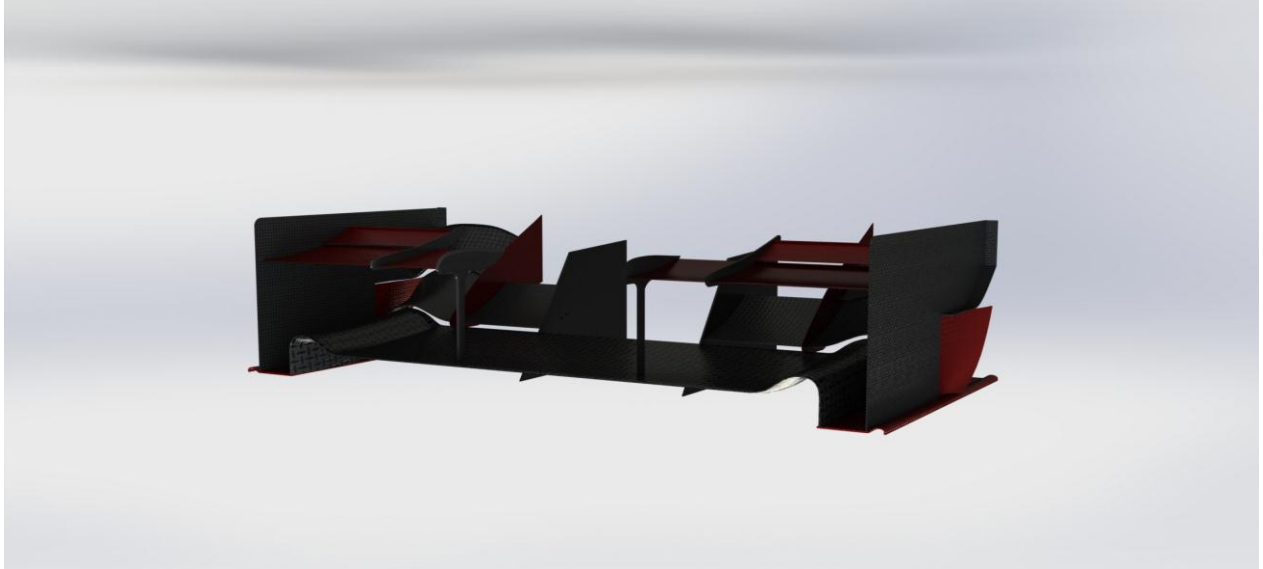
Ένας άλλος λόγος για τον οποίο θα χρειαζόταν να γίνουν μετατροπές στα σχέδια του αεροδυναμιστή είναι η κατασκευασιμότητα τους. Με τον όρο κατασκευασιμότητα εννοούμε το αν και κατά πόσο είναι εύκολο αυτά τα σχέδια να κατασκευαστούν. Δύσκολα σημεία τα οποία θα έπρεπε να εξετάσουμε ήταν λεπτές αιχμές αεροδυναμικών στοιχείων (συνήθως τα trailing edges), πολύπλοκα στοιχεία με καμπύλες και στους τρεις άξονες καθώς και πολύ μεγάλα στοιχεία.

Η καθεμία από αυτές τις περιπτώσεις έχει ξεχωριστό ενδιαφέρον από τις άλλες, αφού εμφανίζουν ξεχωριστά προβλήματα και δυσκολίες. Οι πολύ λεπτές αιχμές (των trailing edges) παρουσιάζουν πρόβλημα στην αντοχή και τη δημιουργία καλουπιών. Trailing edge είναι η αιχμή ή χείλος διαφυγής του αέρα (πίσω κομμάτι της αεροτομής), το οποίο καθορίζει την πορεία του αέρα αμέσως μετά την διαφυγή του από το αεροδυναμικό στοιχείο. Ιδανικά για τον αεροδυναμιστή αυτό το χείλος θα ήθελε να είναι απόλυτη αιχμή με μηδενικό πάχος, κάτι το οποίο πρακτικά δεν είναι πραγματοποιήσιμο. Έτσι τα σημεία απέκτησαν ελάχιστο ράδιο ανάλογα με τις δυνάμεις που έφεραν. Το ελάχιστο από άποψης κατασκευαστικής δυνατότητας κρίθηκε το ράδιο 1.5 χιλιοστού. Το ελάχιστο αυτό καθορίζεται από τα κοπτικά εργαλεία που έχει στη διάθεση του ο μηχανικός που θα επεξεργαστεί τα καλούπια, καθώς και από την ποσότητα υλικού, το οποίο πρέπει να έχει ένα κομμάτι για να αντέχει τις δυνάμεις.



Εικόνα 8. Το ελάχιστο ράδιο στα στοιχεία της μπροστινής αεροτομής ήταν 1.5mm

Τα πολύπλοκα κομμάτια από την άλλη με καμπύλες και στους 3 άξονες είναι αδύνατον να φτιαχτούν χωρίς ένα ενιαίο θυληκό καλούπι (διαιρούμενο βέβαια) το οποίο παρουσιάζει πολλά προβλήματα στην κατασκευή. Πολύ μεγάλο καλούπι σε μήκος σημαίνει ότι χρειάζεται και πολύ μεγάλη φρέζα για να κοπεί, καθώς και πολύ υλικό για να υπάρχει περιθώριο αρκετά μεγάλης διαμόρφωσης. Ακόμα και τα απλά επίπεδα κομμάτια, που μπορεί να μην απαιτούσαν τη χρήση φρέζας δεν θα χωρούσαν στους φούρνους που διαθέταμε και άρα απορίπτονταν. Η αρχική ιδέα λόγω απλότητας κατασκευής ήταν να κατασκευάσουμε τα τεμάχια χρησιμοποιώντας αρσενικά καλούπια από αφρό, οπότε πολύπλοκα σχέδια θα ήταν αδύνατον να κατασκευαστούν. Έτσι για κάθε μοντέλο αεροτομής που είχε τέτοιου είδους καμπύλες για λόγους ερευνητικούς, σχεδιαζόταν και το αντίστοιχο του που θα προοριζόταν για κατασκευή.



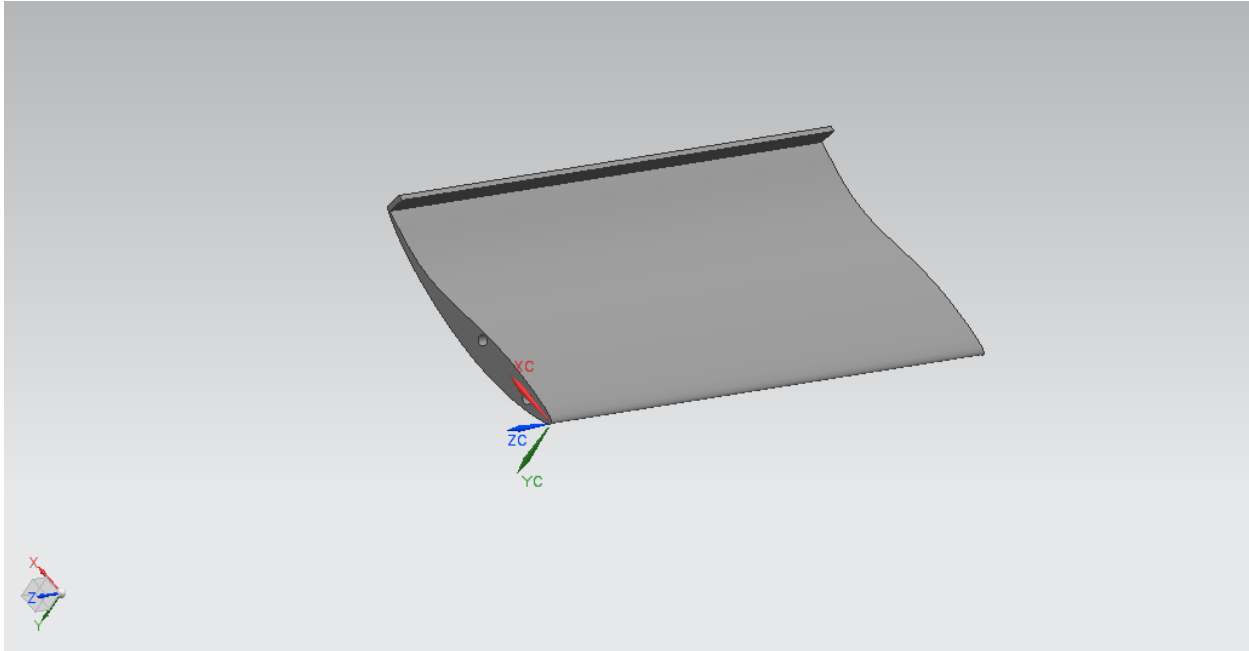
Εικόνα 9. Το χαμηλότερο στοιχείο που φαίνεται στο σχέδιο του αεροδυναμιστή της ομάδας Βασίλη Τσιολάκη δεν ήταν δυνατόν να κατασκευασθεί, όσο χρήσιμες και αν είναι οι δίνες που δημιουργούν τα «τούνελ» από αεροδυναμικής απόψεως.

2.3 Idealization of geometry

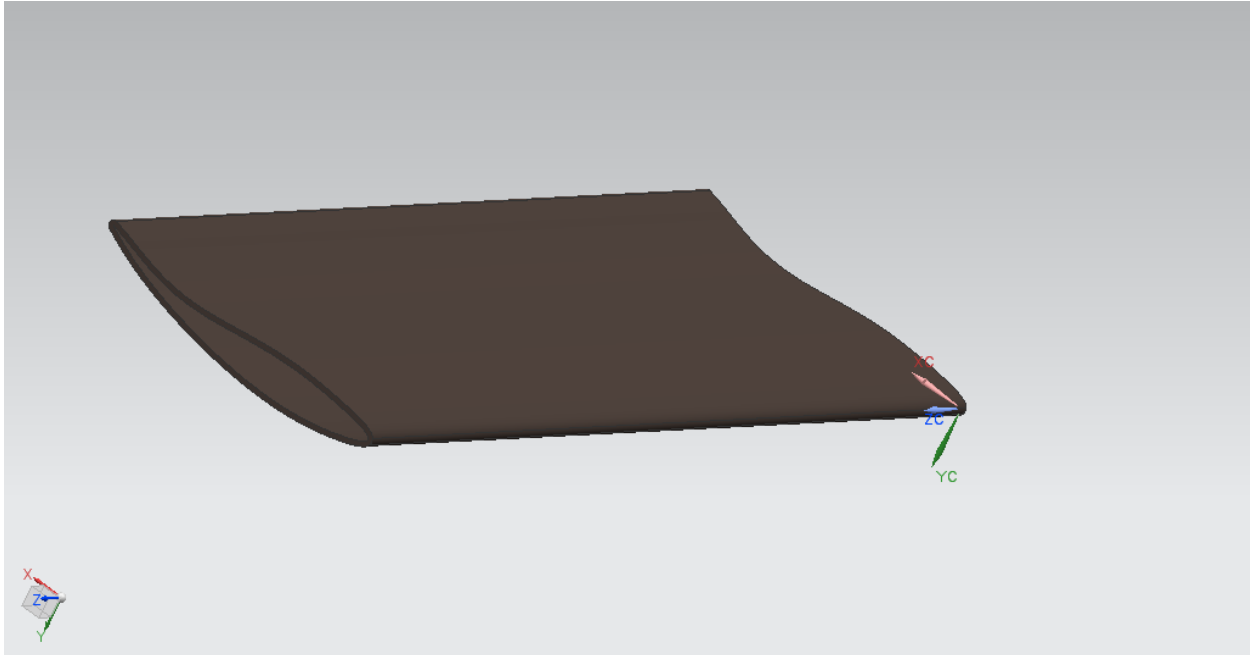
Όπως έχουμε αναφέρει τα σχέδια που λάβαμε ήταν αποτέλεσμα αεροδυναμικής έρευνας και υπολογισμών. Ως τέτοια το μόνο που είχε σημασία είναι οι εξωτερικές επιφάνειες και οι διαμορφώσεις που αυτές φέρουν. Ένα τέτοιο σχέδιο όμως διαφέρει αρκετά από το τελικό μηχανολογικό σχέδιο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να γίνει ανάλυση αντοχής με πεπερασμένα στοιχεία. Έτσι τα σχέδια ακολούθησαν την διαδικασία μοντελοποίησης τους σε μορφή που να είναι δυνατόν να γίνει η ανάλυση σχετικά εύκολα και γρήγορα. (idealization of geometry)

Κάνοντας την ανάλυση σε υπολογιστή κάποια σημεία των αεροτομών μπορεί να παρουσιάζουν προβλήματα και μεγάλες απαιτήσεις υπολογιστικών πόρων, χωρίς το αποτέλεσμα να είναι τόσο σημαντικό για τα συγκεκριμένα σημεία. Έτσι δουλειά του μηχανικού που κάνει την ανάλυση είναι να “ελαφρύνει” όσο μπορεί τις απαιτήσεις εκείνες και να εστιάσει στα σημεία που μπορεί να υπάρχουν προβλήματα. Σε αυτή την διαδικασία ρόλο παίζει και η διακριτοποίηση όπως θα δούμε σε επόμενα κεφαλαία. Παρόλαυτά, γωνίες 90 μοιρών που σχηματίζουν τα πτερύγια *garmin* με την υπόλοιπη αεροτομή είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σημείου που δεν χρήζει τόσο μεγάλης προσοχής, παρουσιάζει όμως μεγάλες απαιτήσεις. Αν επιχειρήσουμε να το διακριτοποιήσουμε μαζί με την υπόλοιπη αεροτομή θα παρουσιάσει προβλήματα λόγω της μεγάλης γωνίας. Άρα κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης, τέτοια σημεία αφαιρέθηκαν ή τροποποιήθηκαν ώστε να εκμεταλλευτούμε καλύτερα τις μικρές σχετικά υπολογιστικές δυνατότητες που μας ήταν διαθέσιμες. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι πιο εύκολο να γίνει υπολογισμός ενός τέτοιου μικρού επίπεδου κολλητού πτερυγίου για την αντοχή του με αναλυτικό τρόπο, παρά να ενσωματωθεί στην υπόλοιπη ανάλυση της αεροτομής στον υπολογιστή.

Άλλα σημεία τα οποία έχριζαν προσοχής κατά την διαδικασία εξιδανίκευσης της γεωμετρίας (όπως είναι η ακριβής μετάφραση του αγγλικού όρου) είναι πιο προφανή. Απομηνάρια της διαδικασίας του σχεδιασμού, όπως γραμμές, ενώσεις κ.α. που δεν εξυπηρετούν κάπου αλλά μπορεί να καταναλώνουν υπολογιστικούς πόρους καθώς και η μετατροπή των στοιχείων σε κέλυφος (shell) με κενό στην μέση, από συμπαγή (solid) που ήταν σχεδιασμένα αρχικά.



Εικόνα 10. Αεροτομή, όπως την πήραμε μετά την αεροδυναμική μελέτη με *garmin*, γωνία στο χείλος διαφυγής αέρα και συμπαγή δομή.



Εικόνα 11. Η ίδια αεροτομή μετά από επεξεργασία, όπου είναι έτοιμη για ανάλυση αντοχής. Χωρίς garmin, κούφια (όπως θα είναι το τελικό τεμάχιο) και με ράδιο στην πίσω ακμή.

Οποιαδήποτε αλλαγή έγινε στις εξωτερικές επιφάνειες του αεροδυναμικού πακέτου (π.χ. προσθήκη ραδίου στις αιχμές, αλλαγή στοιχείων ώστε να έχουν την ίδια γεωμετρία με άλλα ίδιου μεγέθους και να μην χρειάζονται πολλά καλούπια, απλοποίηση καμπυλών και γωνιών) ήταν σε συνενόηση με τον αεροδυναμιστή, ο οποίος ήλεγχε κατά πόσο η κάθε αλλαγή επηρέαζε την αεροδυναμική του αυτοκινήτου και καταλήγαμε αναλόγως.

3 Finite Element Analysis σε Αλουμίνιο

Το επόμενο βήμα στην διαδικασία ήταν να γίνει ανάλυση αντοχής της κατασκευής με τη χρήση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για αλουμινένιες αεροτομές. Ο τελικός στόχος είναι να γίνει η ίδια ανάλυση για ανθρακονημάτινες αεροτομές, αλλά η χρήση του αλουμινίου στην αρχή μας διευκολύνει τελικά στην όλη διαδικασία παρέχοντας μας αποτελέσματα χρήσιμα και απαραίτητα για λόγους που θα αναλύσουμε παρακάτω.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων γενικώς είναι μια μέθοδος επίλυσης μηχανολογικών προβλημάτων που θα ήταν σχεδόν αδύνατο να λυθούν με αναλυτικό τρόπο. Πρόκειται για την λύση συστημάτων πολλών μερικών διαφορικών εξισώσεων οι οποίες εκφράζουν τη συμπεριφορά ενός μηχανολογικού κατά κύριο λόγο προβλήματος. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα ανάλυσης μηχανολογικών κατασκευών, μεταφοράς θερμότητας και υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Ουσιαστικά πρόκειται για αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος, όπου το αρχικό πρόβλημα διαιρείται σε αρκετά πιο μικρά και απλά προβλήματα τα οποία αποτελούν τα πεπερασμένα στοιχεία.

Στη συνέχεια το σύστημα που έχει προκύψει λύνεται με αριθμητικές μεθόδους μέχρι να συγκλίνουν οι τιμές για τις μεταβλητές που αναζητάμε.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για ανθρακονήματα, όμως είναι μια διαδικασία που παίρνει χρόνο να γίνει και κάθε προσομοίωση απαιτεί περισσότερους πόρους απ' ότι μια αντίστοιχη για αλουμίνιο. Η διαδικασία προσομοίωσης και ανάλυσης για αλουμινένια τεμάχια από την άλλη είναι συγκεκριμένη και λίγο πολύ γνωστή. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται, οι ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται και οι τρόποι διακριτοποίησης (meshing) πριν την προσομοίωση αυτή είναι προκαθορισμένοι.

Στόχος της προσομοίωσης με αλουμίνιο ήταν να εξάγουμε κάποια γρήγορα συμπεράσματα που θα μας οδηγούσαν σε μία πρώτη ιδέα των αποτελεσμάτων που περιμένουμε για τα ανθρακονήματα. Η έρευνα εστιαζόταν κυρίως στο πάχος των αλουμινένιων τεμαχίων καθώς από εκεί και μετά θα μπορούσαμε να κάνουμε μία πρώτη εκτίμηση για το πάχος των αντίστοιχων ανθρακονημάτων. Γνωρίζοντας χοντρικά το συνολικό πάχος των στοιχείων αεροτομών και το πάχος της κάθε στρώσης θα μπορούσαμε στη συνέχεια να υπολογίσουμε πόσα υφάσματα θα χρειαζόμασταν με βάση τις επιφάνειες που θέλαμε να καλύψουμε. Με τον χρόνο να μας πιέζει ώστε να προλάβουμε να έχουμε έτοιμο αυτοκίνητο για τους διαγωνισμούς η παραγγελία των υφασμάτων έπρεπε να δρομολογηθεί άμεσα και η λύση του αλουμινίου ήταν ο καλύτερος τρόπος να γίνει μια, όχι πολύ μακρινή, εκτίμηση των υλικών.

Η επίλογη του υλικού για την προσομοίωση ήταν αλουμίνιο αεροπορικού τύπου 7071, με το οποίο λόγω προηγούμενης εμπειρίας υπήρχε μια ιδέα αντιστοιχίας σε ανθρακόνημα. Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του ήταν ούτως ή άλλως γνωστά, οπότε το μόνο που έμενε ήταν να δημιουργήσουμε το υλικό στο πρόγραμμα που χρησιμοποιούσαμε και να τα χρησιμοποιήσουμε για την ανάλυση.

3.1 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση είναι η διαδικασία παραγωγής πλέγματος (mesh) που προσεγγίζει ένα γεωμετρικό χώρο. Ουσιαστικά χωρίζουμε έναν χώρο που περιγράφεται από μερικές διαφορικές εξισώσεις σε πολλά μικρά στοιχεία (elements) ώστε να μπορούμε να προσεγγίσουμε την λύση των εξισώσεων αυτών με αριθμητικές μεθόδους.

Πρόκειται ίσως για το πιο σημαντικό βήμα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων πέρα από την σωστή αποτύπωση των δυνάμεων που ασκούνται στο τεμάχιο που εξετάζουμε. Αλλαγές στο πλέγμα μπορεί να αποφέρουν σημαντικές αλλαγές στο τελικό αποτέλεσμα ειδικά αν το πλέγμα έχει σημεία όπου τα στοιχεία του δεν αντιστοιχούν σωστά στην γεωμετρία και παρουσιάζουν σφάλματα. Τέτοια σφάλματα είναι πολύ συχνά σε αναλύσεις με την μέθοδο των FEA, και πολλές φορές πολύ δύσκολο να τα αποτρέψουμε τελείως. Προκαλούνται λόγω δυσαναλογίας σε σχήματα με αποτέλεσμα και τα ίδια τα στοιχεία να μην είναι συμμετρικά και να απαιτείται μεγάλο πλήθος στοιχείων ώστε το πλέγμα να είναι πιο πυκνό. Μία γεωμετρία που έχει μελετηθεί και προετοιμαστεί σωστά (idealization of geometry) και ένα πυκνό πλέγμα είναι συνήθως ο τρόπος για να αποφύγουμε τα περισσότερα σφάλματα στοιχείων κατά την διακριτοποίηση. Στόχος είναι τουλάχιστον στα σημεία που κρίνουμε ότι μπορεί να είναι κρίσιμα για την ανάλυση μας (συγκέντρωση τάσεων, σημεία όπου ασκούνται οι δυνάμεις κ.α.) να έχει γίνει σωστή διακριτοποίηση. Στο υπόλοιπο μοντέλο προσπαθούμε απλά να ελαχιστοποιήσουμε τα προβληματικά στοιχεία. Μερικές φορές δεν είναι ανάγκη να εκμηδενίσουμε τον αριθμό των στοιχείων

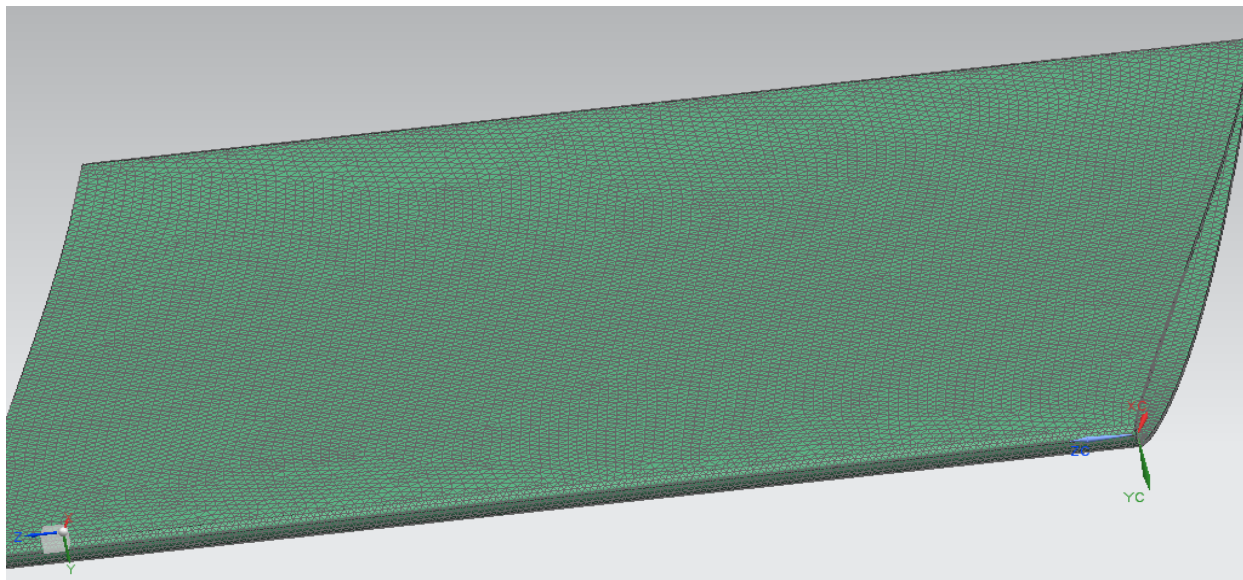
που παρουσιάζουν σφάλμα και μπορεί η ανάλυση να είναι ακριβής ακόμα και με λίγα τέτοια στοιχεία σε σημεία που δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Αυτή η επεξεργασία του πλέγματος γίνεται με διάφορα εργαλεία που μας επιτρέπουν να προκαθορίσουμε την μορφή του πλέγματος χειροκίνητα. Σε σημεία ενδιαφέροντως, όπως τρύπες, γωνίες κλπ., μπορεί ο εκάστοτε μηχανικός να ελέγξει την μορφή του πλέγματος. Αυτό γίνεται με είτε με τον ορισμό συγκεκριμένου πλήθους στοιχείων γύρω από μία αιχμή για παράδειγμα, είτε με τον ορισμό του μεγέθους των στοιχείων γύρω από το σημείο αυτό. Ο μηχανικός είναι επίσης υπεύθυνος να ορίσει την προοδευτικότητα με την οποία θα γίνει η μετάβαση από το υπόλοιπο πλέγμα, ενώ οι παράμετροι που μπορεί να χειριστεί είναι πάρα πολλοί ακόμα. Αυτό δίνει στον μηχανικό μεγάλη ελευθερία στον καθορισμό του τελικού πλέγματος, αλλά και ευθύνη να γνωρίζει την θεωρία γύρω από το πως οι παράμετροι αυτοί μπορεί να επηρεάσουν θετικά ή και αρνητικά το τελικό αποτέλεσμα.

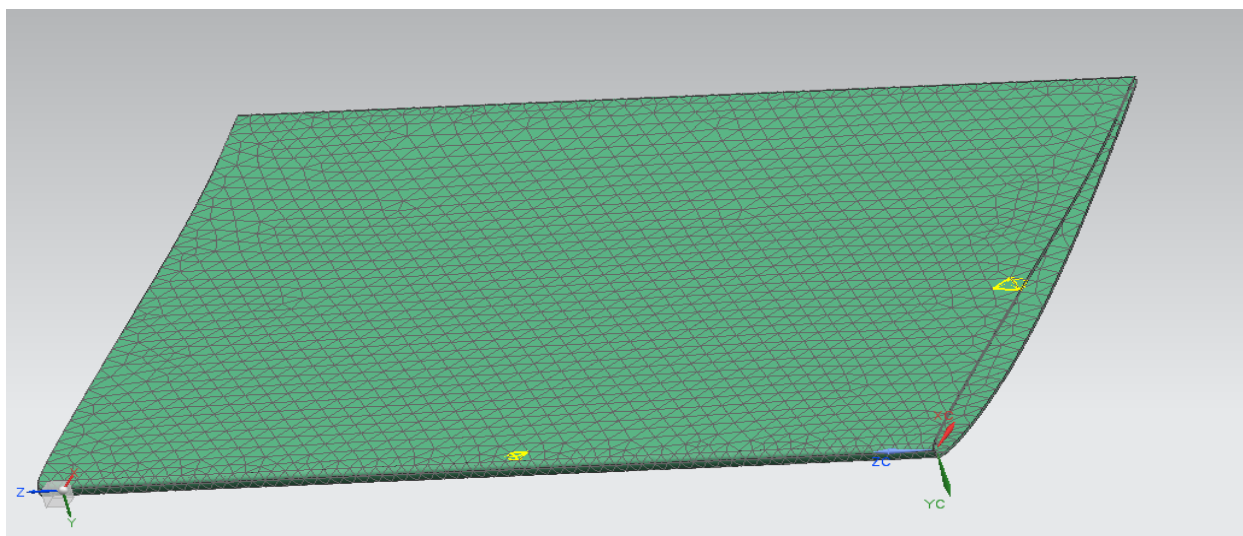
3.1.1 3D Mesh

Το μοντέλο στο οποίο εφαρμόζουμε τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να είναι είτε τρισδιάστατο είτε δισδιάστατο. Τα τρισδιάστατα μοντέλα αναλύονται και μοντελοποιούνται με την εφαρμογή ενός τρισδιάστατου πλέγματος. Αυτό σημαίνει ότι τα στοιχεία (elements) που το αποτελούν είναι επίσης τρισδιάστατα και μπορεί να είναι είτε τετράεδρα, είτε πεντάεδρα (πυραμίδα ή πρίσμα), είτε εξάεδρα.

Το τρισδιάστατο μοντέλο, σε αντίθεση με το δισδιάστατο έχει πάχος όπως φαίνεται και στην εικόνα παρακάτω, και αν η γεωμετρία είναι απλή είναι και ο πιο απλός τρόπος ανάλυσης. Αυτό γιατί όλα τα σχέδια CAD σε αυτά τα προγράμματα είναι από την φύση τους τρισδιάστατα και άρα ένα τέτοιο μοντέλο δεν χρειάζεται τη διαδικασία μετατροπής του σε δισδιάστατο. Με την λογική αυτή είναι το μοντέλο που προτιμάται συχνότερα αν η γεωμετρία είναι απλή με σχετικά μικρό μέγεθος ώστε να μην είναι πολύ μεγάλος ο όγκος των στοιχείων που θα ανγκαστεί να επεξεργαστεί ο υπολογιστής μας. Να αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι οι υπολογισμοί των εξισώσεων γίνονται για κάθε κόμβο (κορυφή) του κάθε στοιχείου. Έτσι για ένα τετράεδρο θα χρειαστούν υπολογισμοί στις τέσσερις κορυφές του, ενώ για ένα εξάεδρο θα χρειαστούν υπολογισμοί σε 8 σημεία.



Εικόνα 12. Πυκνό τρισδιάστατο πλέγμα με σωστά στοιχεία χωρίς σφάλμα. Διακρίνεται το πάχος του μοντέλου στο πλάι



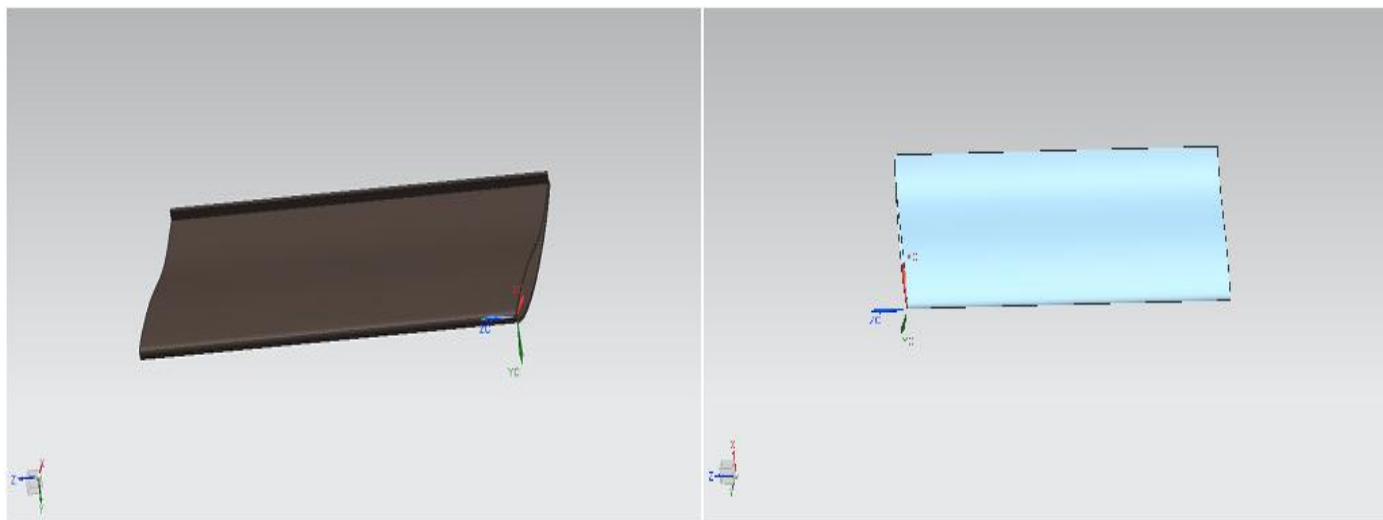
Εικόνα 13. Πιο αραιό πλέγμα με κάποια σημεία που χρήζουν προσοχής. Τα στοιχεία που είναι σημαδεμένα με κίτρινο χρώμα είναι στοιχεία που χρήζουν προσοχής και ίσως παρουσιάσουν μικρή επιρροή στο αποτέλεσμα. Κόκκινα στοιχεία, που δεν έχουμε εδώ σημαίνει ότι τα στοιχεία παρουσιάζουν σφάλμα και η ανάλυση δεν θα μπορέσει να ολοκληρωθεί.

3.1.2 2D Mesh

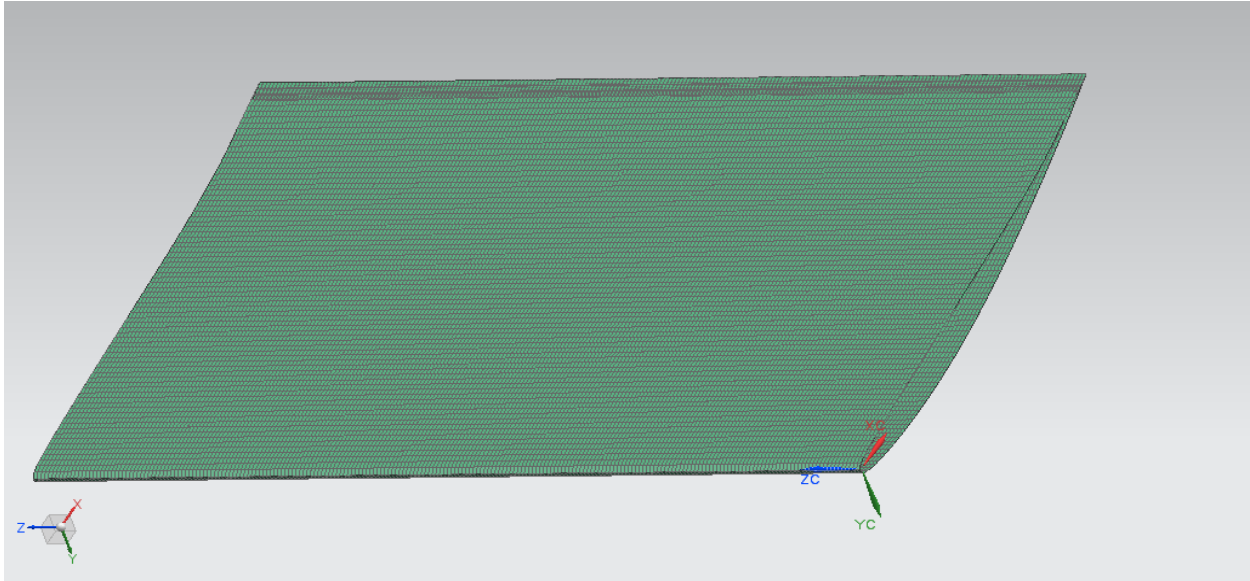
Το δισδιάστατο πλέγμα από την άλλη αποτελείται από τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Τα στοιχεία που παρουσιάζουν σφάλματα μπορεί να έχουν πολύ μικρές πλευρές ή πολύ οξείες γωνίες λόγω της γεωμετρίας που καλύπτουν. Ωστόσο το δισδιάστατο πλέγμα προτιμάται από το τρισδιάστατο, κάθε φορά που αναζητούνται αποτελέσματα ακριβείας. Όσο λιγότερες μεταβλητές υπάρχουν στο

μοντέλο που καλείται να λύσει ο υπολογιστής τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια, καθώς και το πλέγμα μπορεί να είναι πολύ πιο λεπτομερές και με περισσότερα στοιχεία. Δισδιάστατο πλέγμα δεν σημαίνει βέβαια ότι δεν μπορούμε να επεξεργαστούμε το αρχείο στις 3 διαστάσεις του, αλλά ότι η παράμετρος του πάχους έχει αφαιρεθεί από τα στοιχεία. Έτσι τα πεπερασμένα στοιχεία είναι στην πραγματικότητα δισδιάστατα ενώ το πλέγμα κινείται και στις 3 διαστάσεις αναλόγως με την μορφή του μοντέλου. Το πάχος δίνεται ως παράμετρος στις ιδιότητες του πλέγματος.

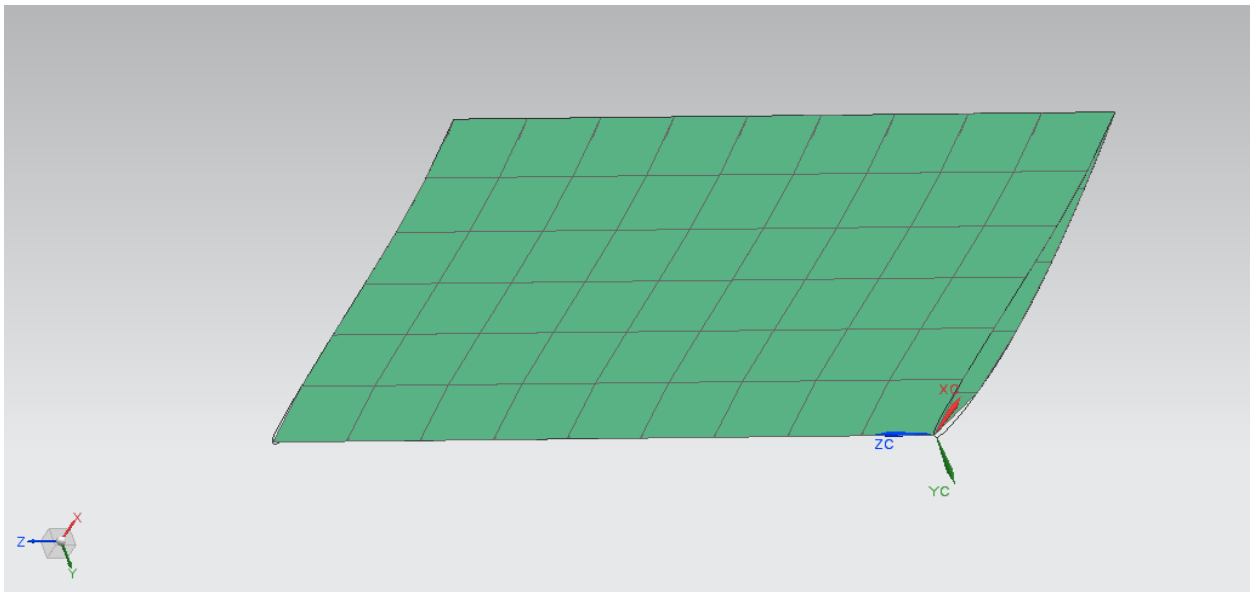
Στην περίπτωση του αλουμινίου εφαρμόσαμε και τα δύο είδη πλέγματος με πολλές διαφορετικές διακριτοποιήσεις μέχρι να καταλήξουμε σε αποτελέσματα που να συγκλίνουν. Παρόλαυτά στο διαδικασία διακριτοποίησης για κάρμπον, το πρόγραμμα μας επιτρέπει την εφαρμογή δισδιάστατων μόνο πλεγμάτων. Αυτό είναι αναμενόμενο αν σκεφτεί κανείς ότι το ανθρακόνημα κατασκευάζεται σε πολύ λεπτά υφάσματα τα οποία τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο για να δωθεί το απαραίτητο πάχος. Άρα η γεωμετρία θα πρέπει πάντα να μοντελοποιείται στο δισδιάστατο επίπεδο. Αυτό γίνεται σχετικά απλά αν έχει γίνει σωστά η διαδικασία μοντελοποίησης που περιγράφουμε στο κεφάλαιο 2.3, αλλά είναι πολύ χρονοβόρο και πολύπλοκο αν δεν έχει εφαρμοστεί το συγκεκριμένο βήμα.



Εικόνα 14. Μετατροπή τρισδιάστατου στοιχείου σε διαδιάστατο χωρίς πάχος. Έχει αφαιρεθεί και το gurney flap για διευκόλυνση στην ανάλυση



Εικόνα 15. Πυκνό διασδιάστατο πλέγμα αεροτομής. Είναι εμφανής η έλλειψη πάχους σε σύγκριση με την προηγούμενη φωτογραφία, ενώ το πλήθος των στοιχείων και ο χρόνος μοντελοποίησης του υπολογιστή ήταν πολύ μικρότερα.



Εικόνα 16. Πολύ αραιό πλέγμα με στοιχεία σχεδόν 25 φορές μεγαλύτερα από τα προηγούμενα. Παρόλαυτα και λόγω απλής γεωμετρίας τα στοιχεία δεν παρουσιάζουν σφάλμα. Στην περίπτωση τρισδιάστατου πλέγματος με τόσο μεγάλα στοιχεία, το σφάλμα θα ήταν βέβαιο.

Για το συγκεκριμένο βήμα της δισδιάστατης προσομοίωσης το πρόγραμμα παρέχει εργαλεία μετατροπής ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε δισδιάστατο. Το δισδιάστατο μοντέλο προτιμάται κάθε φορά που είναι εφικτό για τέτοιου είδους προσομοιώσεις από έμπειρους μηχανικούς. Μπορεί το τρισδιάστατο να είναι πιο εύκολο να προετοιμαστεί για τον μηχανικό, το δισδιάστατο όμως είναι σαφώς πιο εύκολο να αναλυθεί από τον υπολογιστή και τα αποτελέσματά του είναι πιο αξιόπιστα. Ένα δισδιάστατο μοντέλο μπορεί να προκύψει είτε σχεδιάζοντας το στοιχείο με αυτόν τον τρόπο από την αρχή, είτε μετατρέποντας το αντίστοιχο τρισδιάστατο.

3.2 Οριακές συνθήκες και φορτίσεις

Με τον όρο οριακές συνθήκες, γενικά εννοούμε τις σταθερές παραμέτρους του προβλήματος μας, που ορίζουν ουσιαστικά τα όρια του προβλήματος. Στην περίπτωση μας, όπως και στις περισσότερες αναλύσεις μηχανολογικών κατασκευών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οι παράμετροι αυτές είναι οι δυνάμεις που ασκούνται στην κατασκευή και οι περιορισμοί που συγκρατούν το τεμάχιο.

Οι οριακές συνθήκες είναι το πιο σημαντικό στοιχείο σε μία ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, όπως αναφέραμε και προηγουμένως. Λάθος αποτύπωση του μέτρου των δυνάμεων, του τρόπου και τόπου που ασκούνται στην κατασκευή καθώς και των περιορισμών της όλης κατασκευή θα αποδώσουν λανθασμένα τελικά αποτελέσματα. Δεν αρκεί δηλαδή να βρούμε το ακριβές μέτρο της δύναμης που θα ασκηθεί, προφανώς απαραίτητο, αλλά πρέπει να μελετηθεί και ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμόσουμε τη δύναμη στο μοντέλο ώστε να μην υπάρχουν αποκλίσεις από το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επίσης το τεμάχιο που μελετάμε κάθε φορά έχει στοιχεία που το περιορίζουν στην κίνηση του. Αυτοί οι περιορισμοί πρέπει να μοντελοποιηθούν σωστά ώστε να μην δημιουργούν περισσότερες ή λιγότερες τάσεις από την πραγματικότητα. Πολλές φορές είναι αδύνατο και συνήθως ασύμφωρο και πολύπλοκο για το ίδιο το πρόγραμμα να συμπεριλάβουμε όλες τις μεθόδους ασφάλισης (βίδες, διαμορφώσεις, συναρμογές) στο μοντέλο, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούμε είτε δυνάμεις είτε constraints (περιορισμούς) του ίδιου του προγράμματος για την διαδικασία της ανάλυσης.

3.2.1 Υπολογισμός δυνάμεων και φορτίσεων

Το πρώτο βήμα για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών του προβλήματος μας ήταν λοιπόν να βρούμε τις δυνάμεις που ασκούνται στις αεροτομές. Αυτές θα τις παίρναμε φυσικά από τους υπολογισμούς του αεροδυναμιστή της ομάδας, ο οποίος είχε κάνει εκτεταμένη χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής για τον ακριβή υπολογισμό τους.

Το μόνο πρόβλημα ήταν ότι οι προσομοιώσεις που είχε τρέξει στο πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής CFD (Computational Fluid Dynamics) ήταν για μία μέση ταχύτητα που επιτυγχάνουν τα μονοθέσια στο αγώνισμα της αντοχής και όχι για την μέγιστη. Αυτό ήταν πολύχρησιμο για τη μελέτη της δυναμικής (vehicle dynamics) του αυτοκινήτου, αλλά δεν εξυπηρετούσε σε μία ανάλυση των δυνάμεων, όπου στόχος είναι να αντέχουν οι αεροτομές για όλες τις ταχύτητες. Αυτό σημαίνει ότι θα έπρεπε να εξετάσουμε το χειρότερο δυνατό σενάριο, δηλαδή την μέγιστη ταχύτητα. Την μέση ταχύτητα αυτή την είχαν ορίσει στα 20m/s, που αντιστοιχούν σε 72 km/h. Αυτή είναι επίσης μια ταχύτητα αναφοράς που θα βοηθούσε ώστε να υπάρχει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των διάφορων

προσομοιώσεων και άλλων ομάδων, αλλά διαφέρει αρκετά από την μέγιστη ταχύτητα που επιτυγχάνουν τα μονοθέσια στην πίστα, η οποία είναι γύρω στα 120 km/h.

Η άμεση λύση επομένως ήταν να κάνουμε έναν μαθηματικό υπολογισμό των αντίστοιχων δυνάμεων για την μέγιστη ταχύτητα με βάση τα δεδομένα που ήδη είχαμε. Αυτό ήταν μία πρώτη λύση, που πραγματοποιήθηκε λόγω πίεσης χρόνου, αφού, ούτως ή άλλως θα ξαναγινόταν προσομοίωση μετά την ενσωμάτωση κάποιων αλλαγών στα αρχικά σχέδια, οι οποίες περιγράφηκαν και σε προηγούμενα κεφάλαια.

Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της αεροδυναμικής άνωσης:

$$L = 1/2 C_L * A * \rho * V^2$$

Από την οποία υπολογίσαμε το συντελεστή αεροδυναμικής άνωσης επί το εμβαδόν:

$$C_L * A$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το γινόμενο αυτό μπορεί κανείς να βρει το αποτέλεσμα της άνωσης για οποιαδήποτε ταχύτητα.

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τις διάφορες τιμές του μέτρου της κάθετης δύναμης. Η δύναμη αυτή στην περίπτωση μας έχει αντίθετη φορά (downforce) από την άνωση που αναζητούν τα αεροπλάνα.

Aero Percentage Calculation						
		F	R	U	Total	side tower
Data		284	216	92,5	660,5	68
%		0,43	0,33	0,14	1	0,10

Force Calculation										
Speed (km/h)		Downforce (N)				constant	Drag (N)			
km/h	m/s	Front Wing	Rear Wing	Underbody	Total	CL*A	Front Wing	Rear Wing	Underbody	Total
72	20	284,00	216,00	92,50	660,50	2,56				237,00
70	19,44444	268,44	204,17	87,43	624,32	2,56	96,32	73,26	31,37	224,02
80	22,22222	350,62	266,67	114,20	815,43	2,56	125,81	95,69	40,98	292,59
90	25	443,75	337,50	144,53	1032,03	2,56	159,23	121,10	51,86	370,31
100	27,77778	547,84	416,67	178,43	1274,11	2,56	196,58	149,51	64,03	457,18
110	30,55556	662,89	504,17	215,90	1541,68	2,56	237,86	180,90	77,47	553,18
120	33,33333	788,89	600,00	256,94	1834,72	2,56	283,07	215,29	92,20	658,33

constant		side tower	
Cd*A	Drag Power (HP)	downforce(N)	drag(N)
0,92			
0,92	5,88		
0,92	8,78		
0,92	12,50		
0,92	17,14		
0,92	22,82		
0,92	29,63	188,89	67,78

Πίνακας υπολογισμού αεροδυναμικών συντελεστών και δυνάεων

Όπως φαίνεται στον πίνακα υπολογίζουμε επίσης και την ιπποδύναμη που χρειάζεται το μονοθέσιο για να αντισταθμίσει τις απώλειες λόγω οπισθέλκουσας που δημιουργούν οι αεροτομές. Αυτό το κάναμε από απλή περιέργεια και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$P=F*V$$

Όπου P είναι η ισχύς (ιπποδύναμη), F η οπισθέλκουσα δύναμη και V η ταχύτητα του μονοθεσίου σε κάθε διαφορετική περίπτωση. Βλέπουμε ότι για ταχύτητα 120 χιλ/ώρα χρειάζεται ιπποδύναμη 30

αλόγων για αν αντισταθίσουμε την απώλεια. Αυτό σημαίνει ότι εκείνη την στιγμή ο κινητήρας του αυτοκινήτου ανταποκρίνεται σαν να έχει υποδύναμη κατά 30 άλογα λιγότερο από ότι κανονικά. (1KW = 1.36 HP)

Οι δυνάμεις αυτές θα ασκηθούν στις αντίστοιχες επιφάνειες των αεροτομών με την κατάλληλη κατανομή και αφού εφαρμοστούν και οι οριακές συνθήκες θα μελετηθεί η συμπεριφορά των αεροτομών και τα αποτελέσματα που παράγει η προσομοίωση.

3.2.2 Οριακές συνθήκες – περιορισμοί

Για να μπορέσουμε να ολοκληρώσουμε το επόμενο βήμα έπρεπε να βρούμε τον τρόπο με τον οποίο θα προσαρτηθούν οι αεροτομές στο μονοθέσιο. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει από σημεία και τρόπους στήριξης των αεροτομών, μέχρι τον τρόπο κατασκευής των φτερών και των ενώσεων τους με τα υπόλοιπα φτερά καθώς και με τα endplates.

Άλλα στοιχεία που οριοθετούν την ανάλυση και την κατασκευή των αεροτομών είναι το όριο διαροής του υλικού που χρησιμοποιούμε, το μέτρο ελαστικότητας του (δεν θέλουμε υπερβολικές παραμορφώσεις στις αεροτομές), οι κανονισμοί και γενικά η στιβαρότητα της κατασκευής.

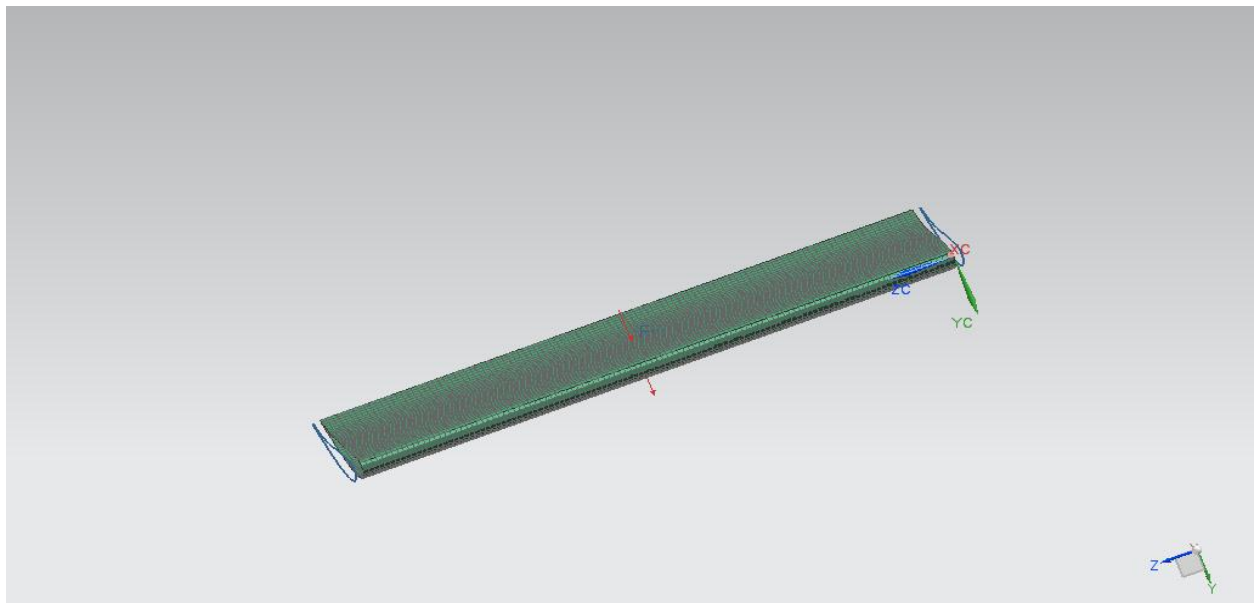
Με βάση τον ανταγωνισμό, την απλότητα κατασκευής και το ελάχιστο βάρος ξεκινήσαμε να ελέγχουμε αν το μοντέλο της μπροστινής πτέρυγας θα άντεχε με βασική στήριξη τα εσωτερικά endplates πάνω στο σασί και όλα τα υπόλοιπα στοιχεία κολλημένα το ένα με το άλλο μέχρι και το ακριανό εξωτερικό endplate. Γνωρίζοντας τις ιδιότητες της κόλλας και τις επιφάνειες που κολλάμε, χρησιμοποιήσαμε ένα μοντέλο στο οποίο θεωρήσαμε τις επιφάνειες πακτωμένες και ελέγξαμε τα μεγέθη των τάσεων που αναπτύσσονται στις ενώσεις. Αυτά ήταν αρκετά μικρότερα από τις τάσεις που μπορεί να αντέξει η κόλλα, οπότε θεωρήσαμε ότι αντέχει. Έτσι στη συνέχεια επικεντρωθήκαμε στην κατάλληλη επιλογή πάχους των αεροτομών μετά από πολλές δοκιμές, ώστε να πάρουμε μία εικόνα για το πάχος και τα υφάσματα που θα χρησιμοποιήσουμε για τα ανθρακονήματα. Θα δούμε τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων με αλουμίνιο στην επόμενη υποενοήτητα.

Μία πρώτη και απλή προσομοίωση που θα δοκίμαζε τις αεροτομές βασίζεται στους κανονισμούς. Εκεί αναφέρεται ότι οι κριτές σε περίπτωση που διαπιστώσουν κίνηση μεγαλύτερη του λογικού θα εφαρμόσουν δύναμη περίπου 200N για να εξετάσουν τη στήριξη της αεροτομής. Η συνολική παραμόρφωση δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 25 χιλιοστά. Άρα ένα πρώτο τεστ είναι η εφαρμογή αυτή της δύναμης σε επικίνδυνα σημεία και η δοκιμή της αντοχής της αεροτομής.

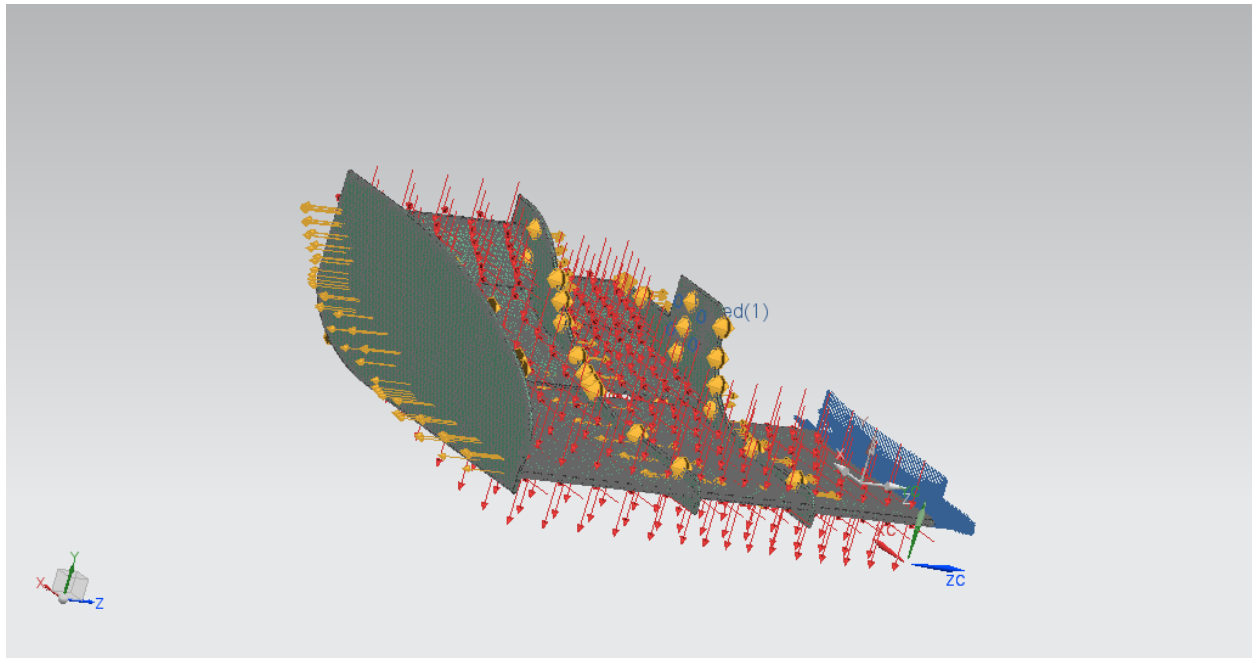
Κάνοντας μία πρώτη προσομοίωση και ασκώντας μία δύναμη σημειακά (σε έναν κόμβο) λίγο μεγαλύτερη από αυτήν που αναφέρεται (250N αντί για 200N) στο κέντρο ενός στοιχείου διαπιστώνουμε την αντοχή του στοιχείου για το χειρότερο δυνατό σενάριο. Το σενάριο βέβαια αυτό δεν είναι καν ρεαλιστικό γιατί ούτε η δύναμη που ασκούν οι κριτές είναι 250N, ούτε πρόκειται ποτέ να ασκηθεί σε ένα μοναδικό κόμβο-σημείο. Για τον λόγο αυτό «τρέξαμε» και ένα σενάριο με την δύναμη να ασκείται σε εύρος λίγων κόμβων (μία μικρή περιοχή στο κέντρο της αεροτομής) μετά την πρώτη.

Παρόλαυτα αν το τεμάχιο άντεχε στην πρώτη περίπτωση και δεν αποτύγχανε, τότε σίγουρα θα άντεχε και γενικά το συγκεκριμένο τεστ.

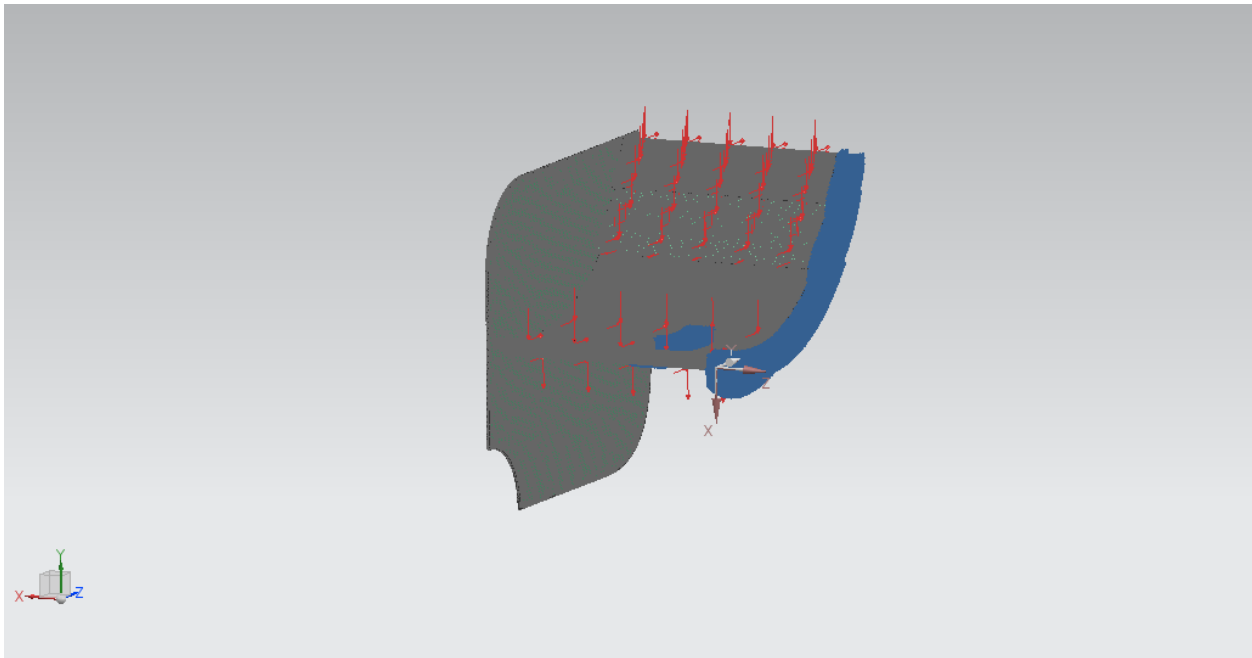
Παρακάτω φαίνονται κάποια μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με τις οριακές συνθήκες, όπως τις ορίσαμε πριν γίνει η προσομοίωση. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις.



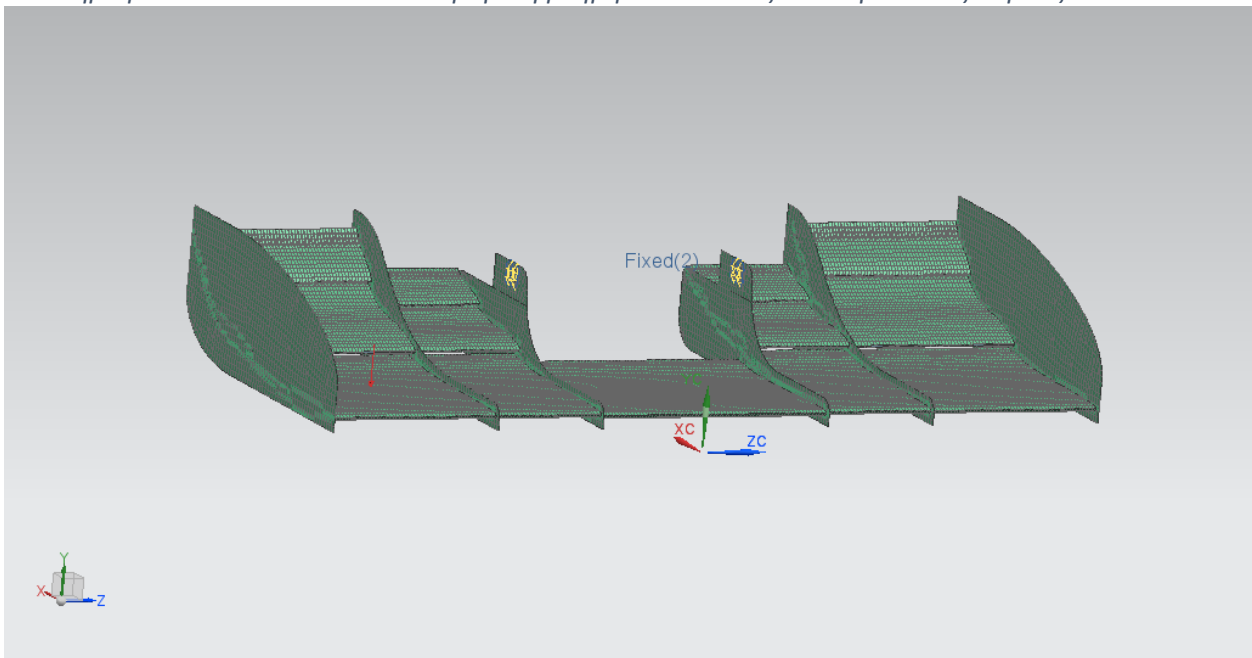
Εικόνα 17. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του αεροδυναμικού στοιχείου υποβάλλεται σε τεστ με βάση τους κανονισμούς. Διακρίνεται το πλέγμα (πράσινο) ενώ, με μπλε στις άκρες είναι η πάκτωση και με κόκκινα βελάκια η σημειακή δύναμη σε έναν κόμβο. Η συγκεκριμένη ανάλυση είναι στον δισδιάστατο χώρο.



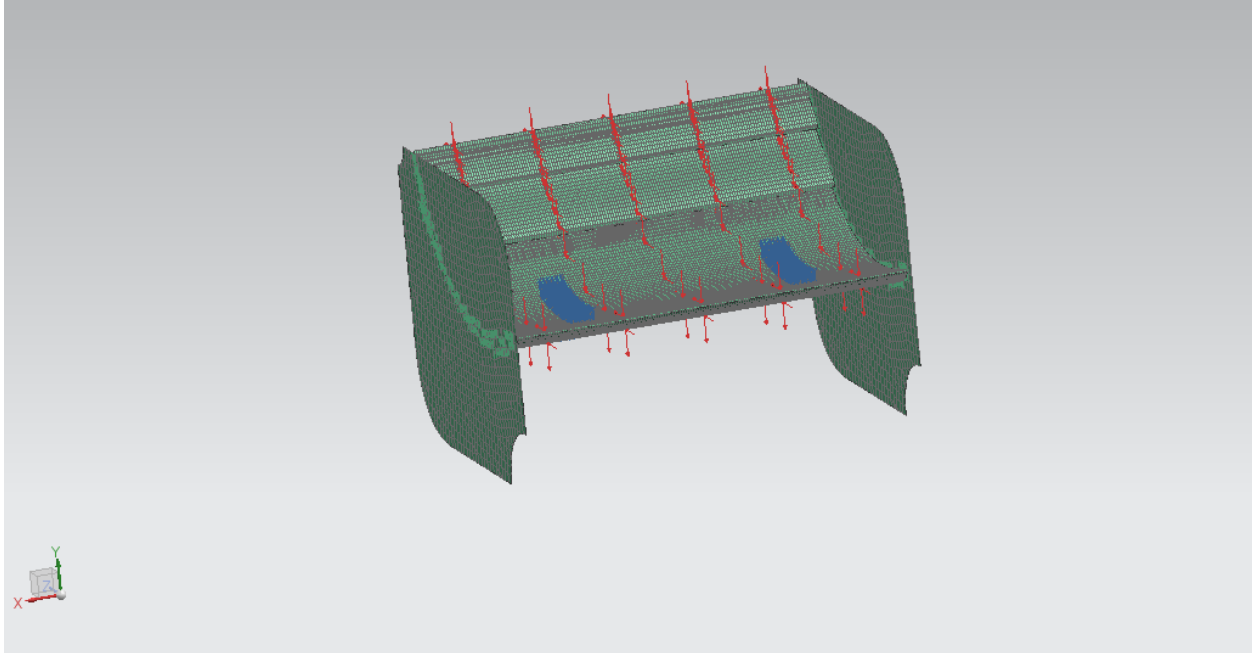
Εικόνα 18. Τρισδιάστατο πλήρες μοντέλο έτοιμο για προσομοίωση. Στις αναλύσεις 3d χρησιμοποιήσαμε το μισό μοντέλο της πτέρυγας και εφαρμόσαμε συμμετρικό περιορισμό. Οι δυνάμεις ασκούνται έχουν την κατανομή που πήραμε από τις προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής του αεροδυναμιστή της ομάδας. Με κίτρινο χρώμα φαίνονται οι κολλημένες επιφάνειες, όπως τις έχουμε ορίσει.



Εικόνα 19. Μοντέλο πίσω αεροτομής τρισδιάστατο πάλι με συμμετρικό περιορισμό μιας και τα ολόκληρα μοντέλα απαιτούσαν πολύ μεγάλη μνήμη και πολλούς υπολογιστικούς πόρους.



Εικόνα 20. Προσομοίωση σε δισδιάστατο μοντέλο με εφαρμοσμένη δύναμη 250N σε έναν μοναδικό κόμβο για έλεγχο των κανονισμών. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται ο έλεγχος του πλέγατος γύρω από τις τρύπες, από τις οποίες συγκροτούνται οι αεροτομές. Εκεί το πλέγμα έγινε τοπικά πιο πυκνό για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα και σωστή γεωμετρία των στοιχείων του, καθώς πρόκειται για κρίσιμο σημείο.



Εικόνα 21. Μοντέλο ολόκληρης πίσω πτέρυγας. Με πράσινο έντονο χρώμα στα πλάγια των endplates φαίνονται οι ενώσεις των αεροτομών. Έχουν χρησιμοποιηθεί γραμμικά στοιχεία 1D connections που ενώνουν τα ίδια τα πλέγματα μεταξύ τους αντί για τις ενώσεις μεταξύ των γεωμετριών.

3.3 Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων των αεροτομών με υλικό το αλουμίνιο 7075-T6. Οι δυνάμεις που χρησιμοποιήθηκαν στις τελικές προσομοιώσεις προέκυψαν από την ανάλυση του τελικού μοντέλου από τον Νεοκλή Τραϊφόρο. Οι «τελικές» δυνάμεις αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω. Οι ιδιότητες του υλικού υπάρχουν στο αντίστοιχο παράρτημα στο τέλος της διπλωματικής, ενώ για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι διακριτοποίησης και οι οριακές συνθήκες όπως παρουστήκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στόχος του κεφαλαίου αυτού και των αναλύσεων από αλουμίνιο είναι βασικά να δώσει την δυνατότητα στην ομάδα να κάνει παραγγελία των ανθρακονημάτων υφασμάτων, υπολογίζοντας την ποσότητα προσεγγιστικά, χωρίς να χάσει όλο τον χρόνο που απαιτείται για την προσομοίωση σε κάρμπον. Η αναλογία στο πάχος αλουμινίου-ανθρακονήματος είναι περίπου 1/1 για τα συγκεκριμένα πάχη και ειδικά για λίγο μεγαλύτερα του 1.5 χιλιοστού. Σε πάχη κοντά στο 1 χιλιοστό, όπως ήταν κάποια τεμάχια στις δοκιμές μας, όπως θα δούμε παρακάτω τα ανθρακονημάτινα είχαν σημαντικά μικρότερη αντοχή σε κάμψη από τα αλουμινένια. Στο τέλος του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί ο πίνακας με τον υπολογισμό της ποσότητας των ανθρακονημάτων υφασμάτων.

	72 km/h					120km/h		
Element	Drag (N)	Lift (N)	L/D	Cd A	CL A	U (m/sec)	Drag (N)	Lift (N)
Full car	339,9156	-845,852	-2,48842	1,41161	-3,51268	33,5	954	-2373
Aeropackage	217,5189	-909,513	-4,18131	0,903318	-3,77705	33,5	610	-2552
Chassis	108,3245	37,32574	0,344573	0,449853	0,155007	33,5	304	105
Dummy	8,679619	12,47906	1,437743	0,036045	0,051823	33,5	24	35
Front Wheels	6,685904	8,84547	1,323003	0,027765	0,036734	33,5	19	25
Rear Wheels	7,148507	17,68709	2,474235	0,029686	0,073451	33,5	20	50
Front wing	44,00899	-311,492	-7,07792	0,182762	-1,29357	33,5	123	-874
Rear wing	120,9013	-293,577	-2,42823	0,502082	-1,21917	33,5	339	-824
Towers	47,37749	-124,465	-2,6271	0,19675	-0,51688	33,5	133	-349
Splitter						33,5	0	0
Underbody	5,120419	-179,974	-35,1483	0,021264	-0,7474	33,5	14	-505

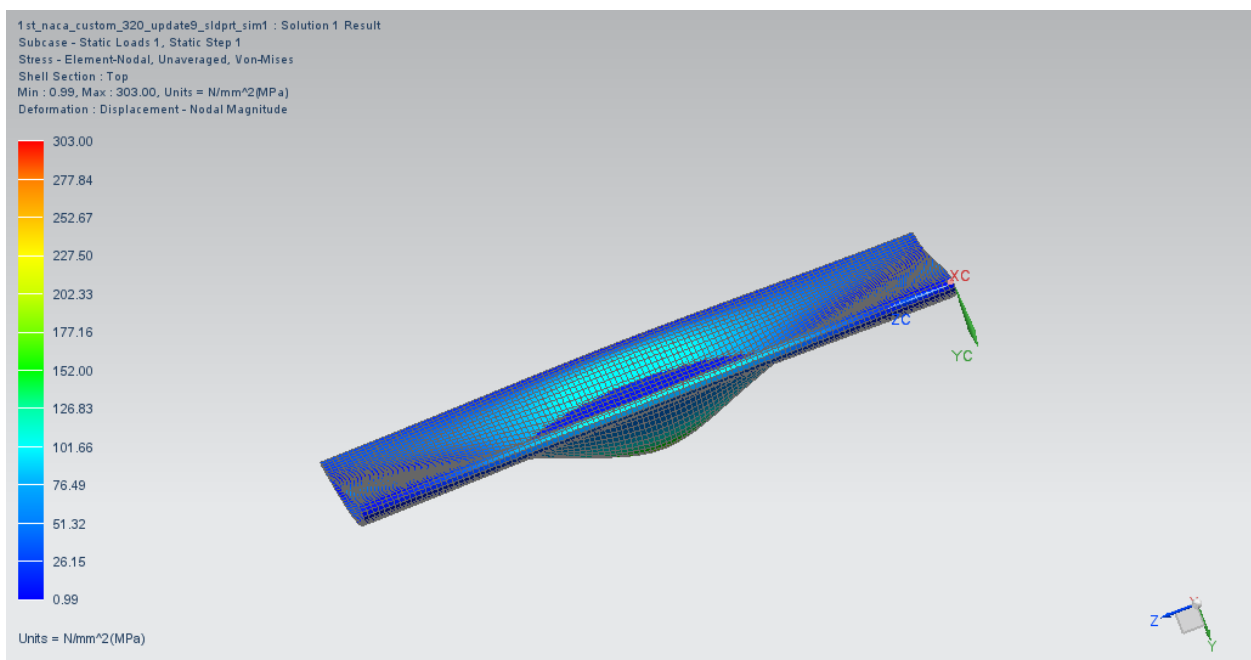
Front wing	72 km/h					120km/h		
FW 1 st	4,130932	-83,78	-	0,017155	0,34792	33,5	12	-235
FW 2 nd	7,840623	21,0617	-	0,032561	0,08747	33,5	22	-59
FW 2 nd chassis	2,379804	11,0574	-	0,009883	0,04592	33,5	7	-31
FW 3 rd	5,229043	4,14117	-	0,021715	-0,0172	33,5	15	-12
FW 3 rd chassis	1,454049	3,08094	-	0,006038	0,01279	33,5	4	-9
FW middle	-0,36613	57,7827	157,818	-0,00152	0,23996	33,5	-1	-162

Rear wing	72 km/h					120km/h		
RW jouko	51,27775	251,042	-	0,212947	1,04253	33,5	144	-704
RW 2 nd parsec	44,53086	34,1216	-	0,184929	-0,1417	33,5	125	-96
RW 3 rd parsec	22,08927	-9,541	-0,431	0,091733	-0,039	33,5	62	-27

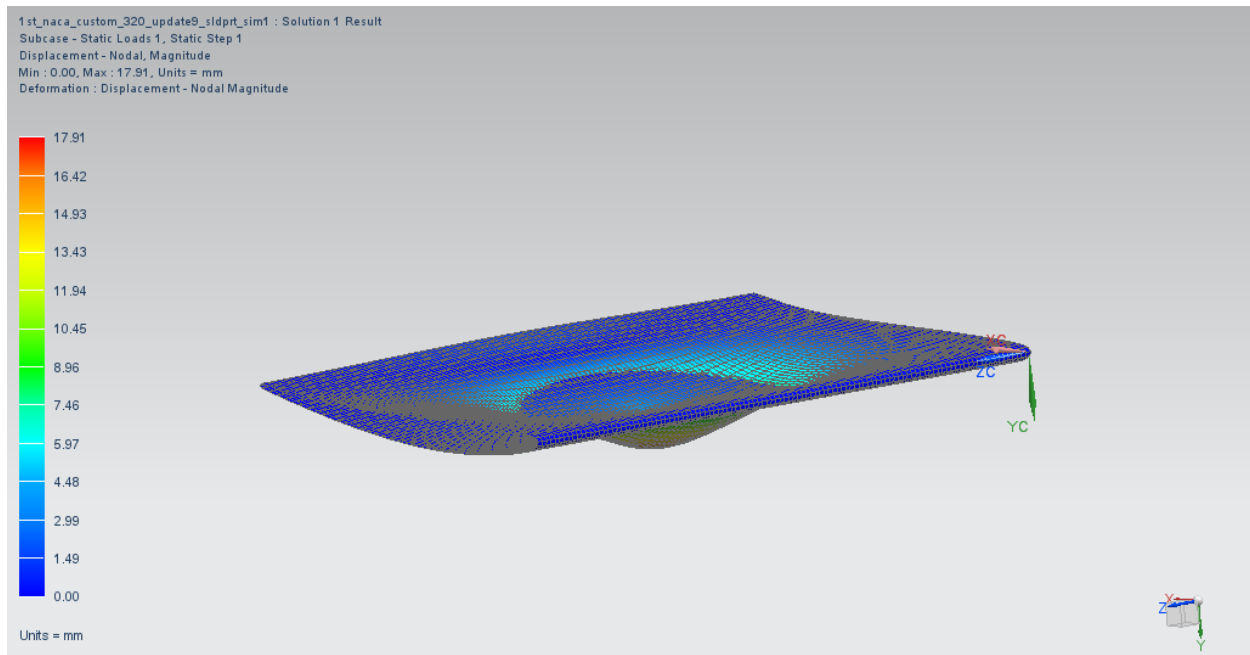
Πίνακας αποτελεσμάτων των αναλύσεων υπολογιστικής ρευστομηχανικής που έτρεξε ο Νεοκλής Τραϊφόρος, μέλος της ομάδας Prom Racing

Μετά από πολλές δοκιμές, αποτυχημένες και επιτυχημένες, καταλήξαμε στα αποτελέσματα για το πάχος του αλουμινίου που θα παρουσιαστούν παρακάτω. Οι δοκιμές που θα παρουσιαστούν είναι οι απολύτως σωστές και κάποιες που ήταν κοντά στο τελικό αποτέλεσμα και βοήθησαν στην εύρεση αυτών. Όπως είναι λογικό δεν μπορούν να παρουσιαστούν όλες οι προσομοιώσεις καθώς είναι πάρα πολλές και κάτι τέτοιο δεν θα είχε νόημα. Τα μοντέλα που παρουσιάζονται εμπίπτουν επίσης στην ίδια κατηγορία των δοκιμών. Με την απεικόνιση των μοντέλων μπορεί ο αναγνώστης να καταλάβει καλύτερα την νοοτροπία και τον τρόπο που μας δίνει τα αποτελέσματα ένα αξιόπιστο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

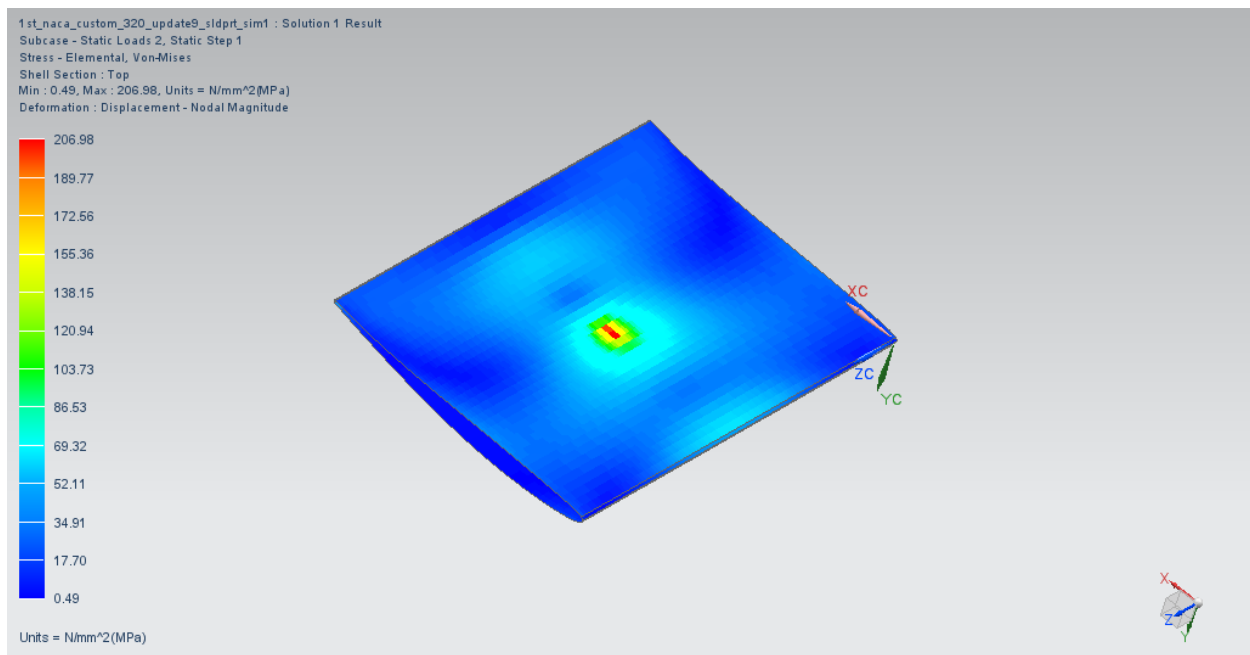
Οι δοκιμές αυτές λοιπόν, αφορούν τα μεγαλύτερα και πιο φορτισμένα στοιχεία της εμπρός και πίσω πτέρυγας ξεχωριστά για τα σωστά πάχη από φύλλα αλουμινίου, αν τις κατασκευάζαμε από τέτοια καθώς και τις πλήρεις πτέρυγες για τα ίδια πάχη. Ο τρόπος λειτουργίας ήταν ο εξής: Εξετάζαμε τα στοιχεία που έχουν τη μεγαλύτερη φόρτιση και τις περισσότερες περιπτώσεις να αποτύχουν ξεχωριστά και στη συνέχεια τα πλήρη μοντέλα. Αν αντέχουν και τα 2 αυτά, τότε μειώνουμε λίγο το πάχος και ξαναδοκιμάζουμε μέχρι να αποτύχουν. Στη συνέχεια κρίνουμε το ιδανικό πάχος κατά την άποψη μας κρατάμε τα αποτελέσματα που αυτό μας δίνει.



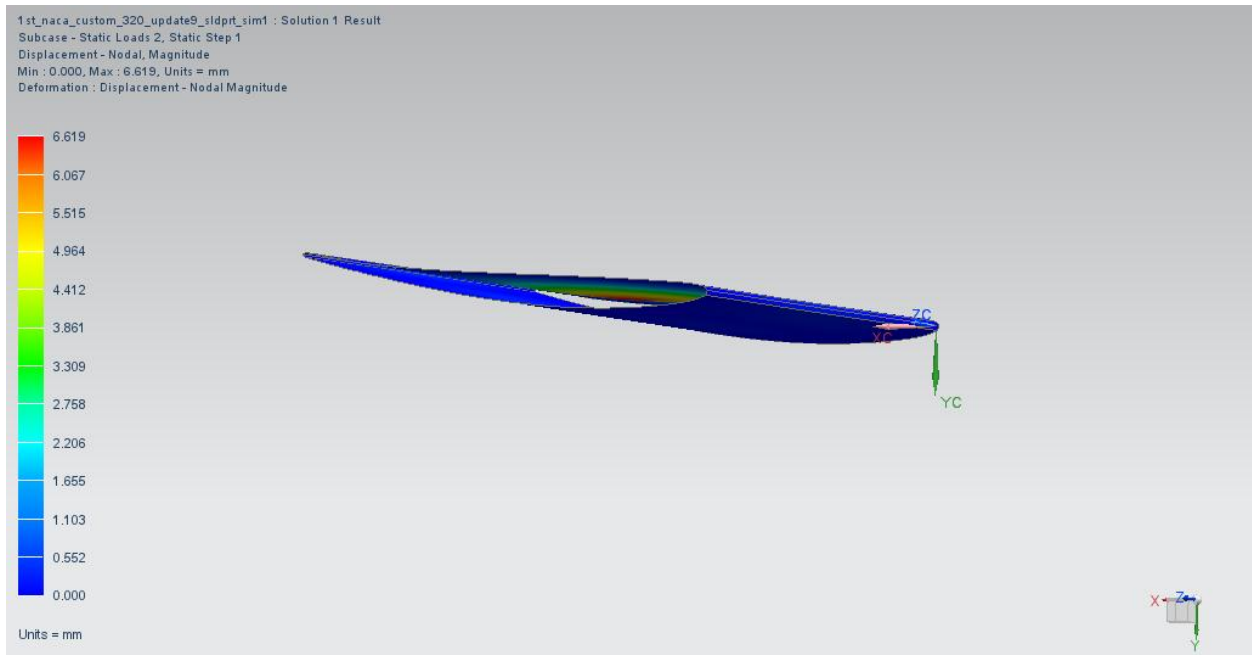
Εικόνα 22. Αποτελέσματα τάσης για προσομοίωση εμπρός στοιχείου με φόρτιση σημειακή μέτρου 250N. Η συγκεκριμένη προσομοίωση έγινε με πάχος αεροτομής 1 χιλιοστό. Όπως φαίνεται από το σχήμα πρόκειται για 2d mesh.



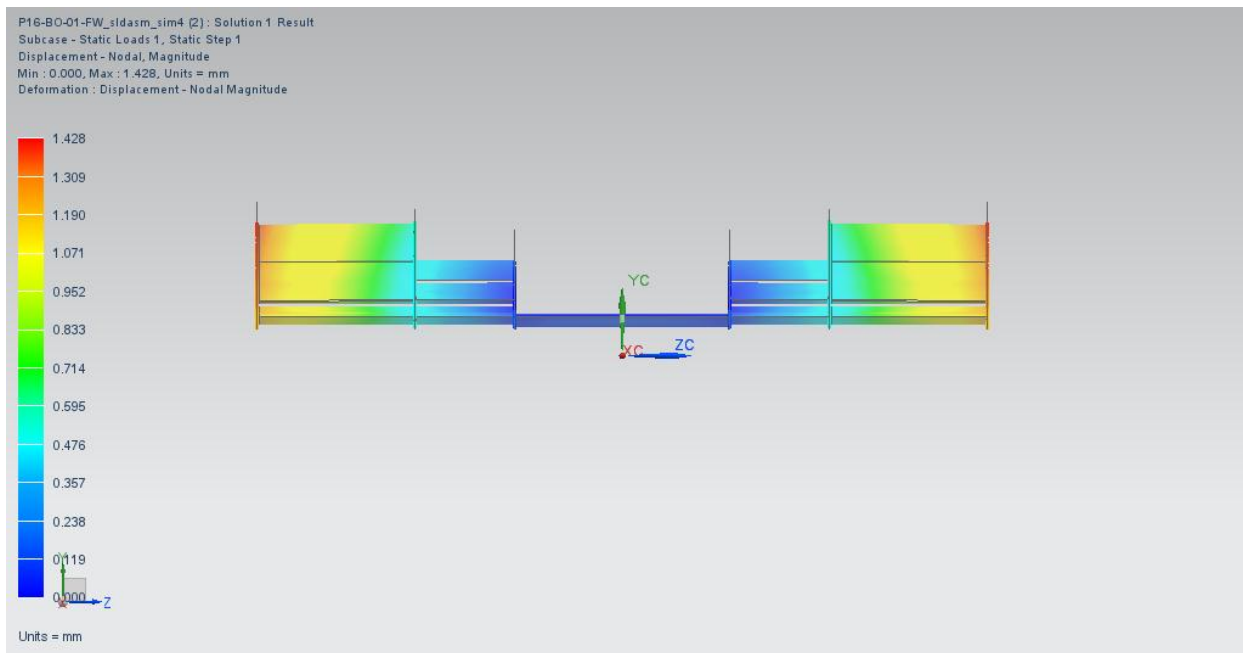
Εικόνα 23. Αποτελέσματα μετατόπισης για την ίδια προσομοίωση. Τα αποτελέσματα δεν είναι αποδεκτά και για τον λόγο αυτό αυξήσαμε το πάχος του αλουμινίου. Η μετατόπιση δίνεται σε κλίμακα για να είναι πιο εμφανής οπτικά.



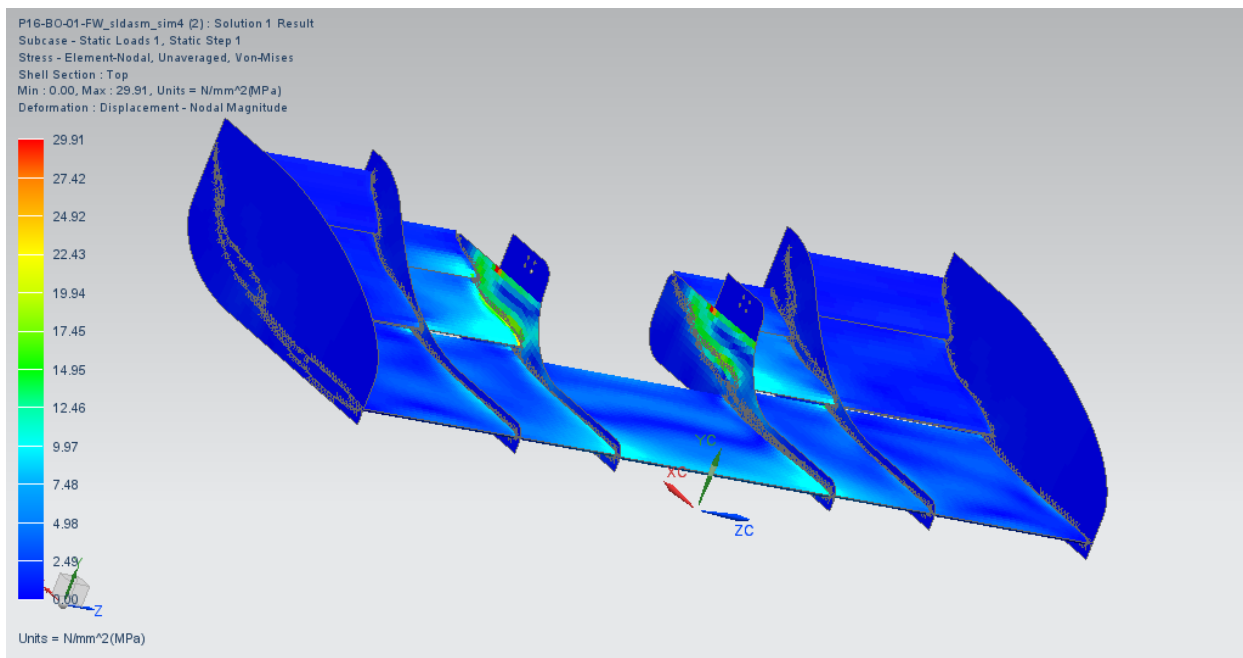
Εικόνα 24. Τα αποτελέσματα της για την ίδια φόρτιση με παραπάνω για πάχος αλουμινίου 1.5 χιλιοστό.



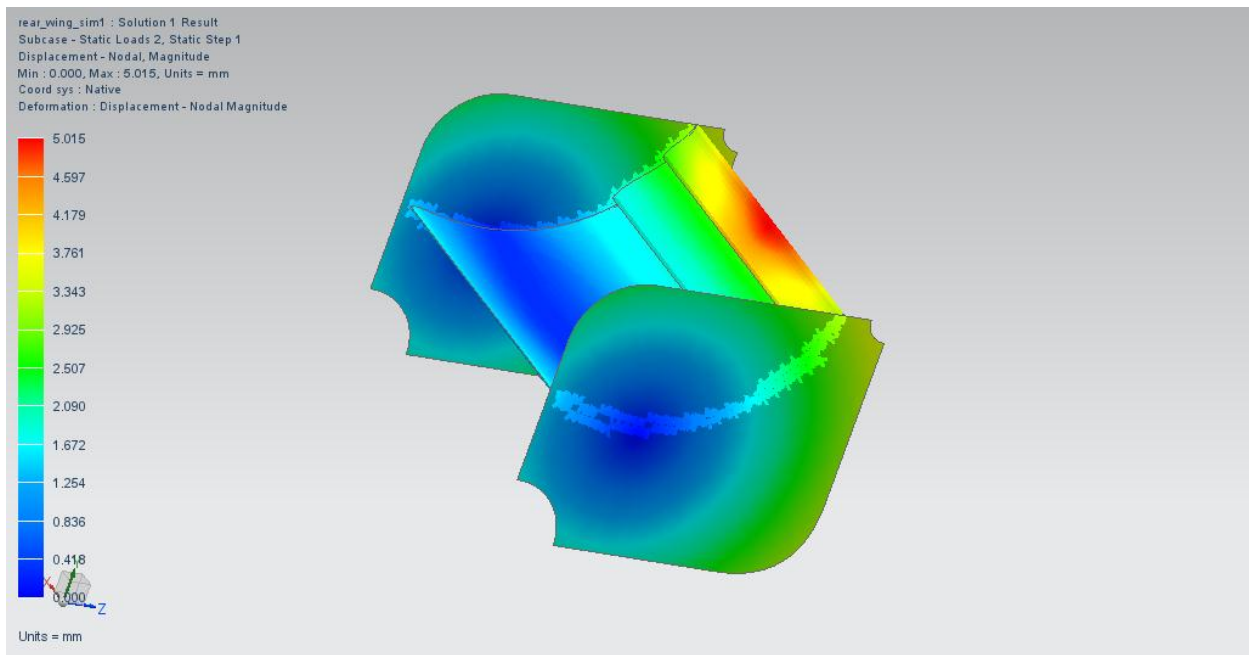
Εικόνα 25. Εδώ φαίνεται η μετατόπιση, όπως είναι πραγματικά και όχι σε κλίμακα όπως πριν. Είναι φυσικά αρκετά μικρότερη ούτως ή άλλως, λόγω της διαφοράς πάχους μισού χιλιοστού.



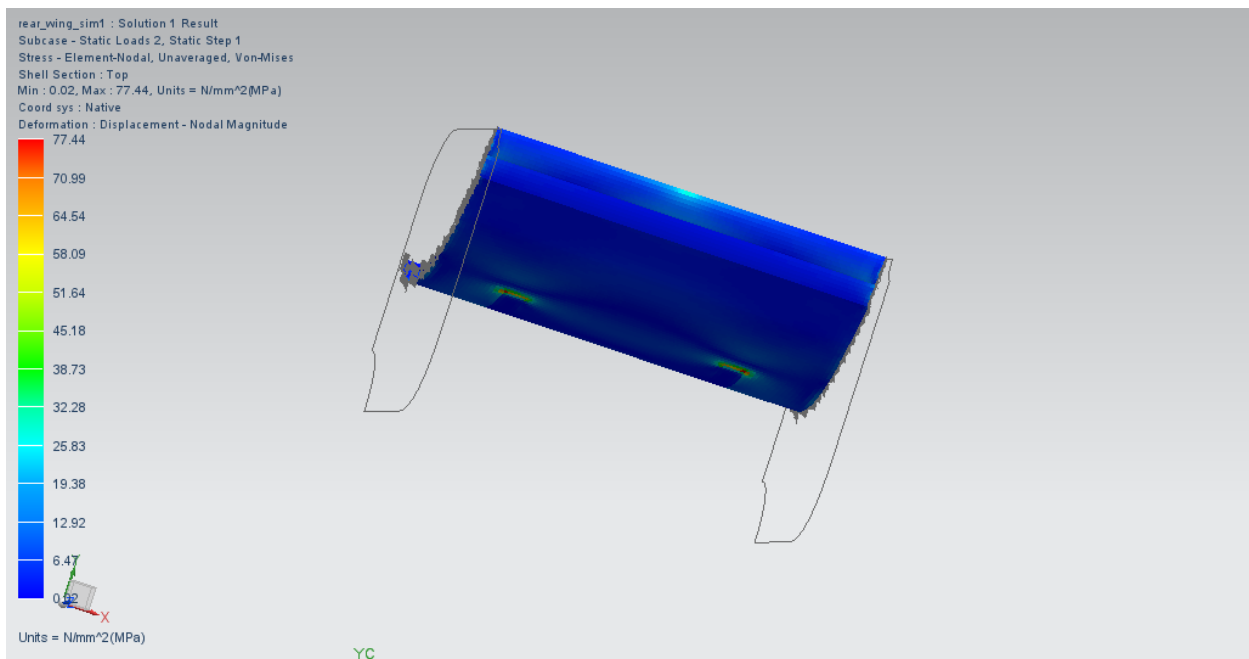
Εικόνα 26. Εδώ φαίνεται το μοντέλο της πλήρους αεροτομής για φύλλο αλουμινίου 1,5 χιλιοστό. Παραμόρφωση σε πραγματικό μέγεθος (χωρίς κλίμακα).



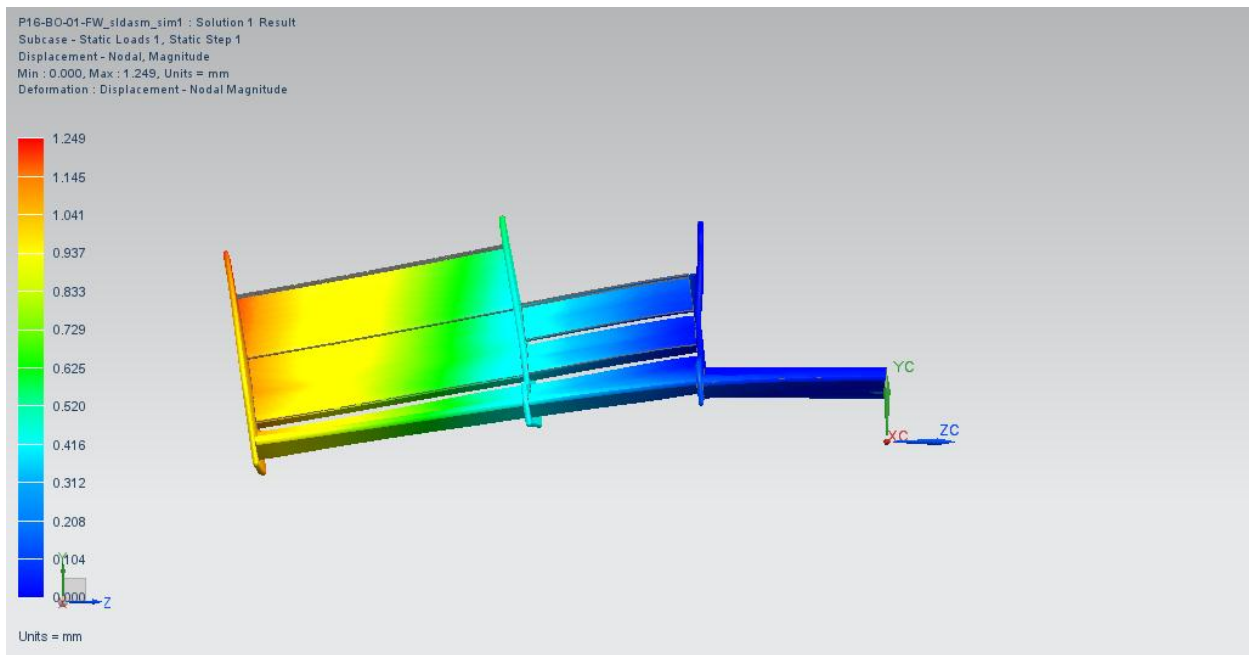
Εικόνα 27. Στη συγκεκριμένη εικόνα είναι εμφανή τα σημεία τα οποία φορτίζονται ιδιαίτερα λόγω του αεροδυναμικού φορτίου. Αιχμές και σημεία κοντά σε αυτές έχουν την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων.



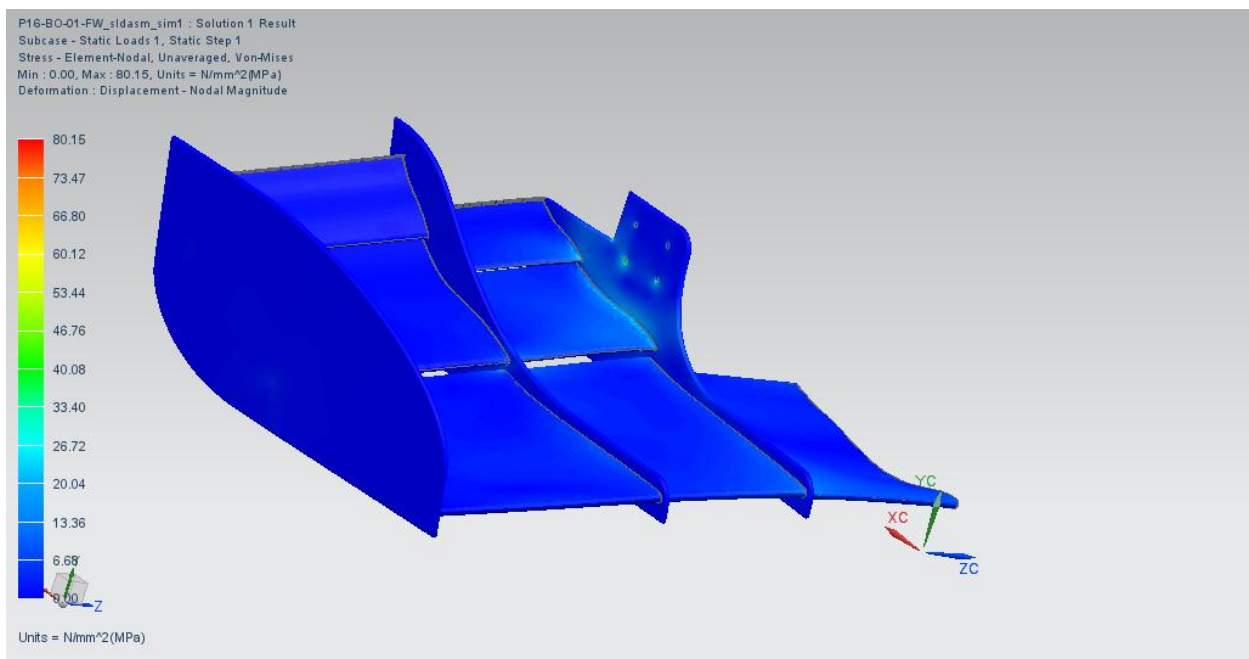
Εικόνα 28. Μοντέλο πίσω αεροτομής για για σημειακή φόρτιση 250N. Πρόκειται για παραμόρφωση σε πραγματική κλίμακα.



Εικόνα 29. Η τάση για το ίδιο μοντέλο. Το πάχος του αλουμινίου είναι 1,5 χιλ. Στα πλαϊνά μέσα από τα διάφανα endplates φαίνονται τα γραμμικά στοιχεία ενώσεων που έχουμε χρησιμοποιήσει.



Εικόνα 30. Εικόνα παραμόρφωσης για 3d simulation με πάχος αλουμινίου 1,5χιλ. Μετατόπιση σε κλίμακα. Στο πλάι φαίνεται το πραγματικό μέγεθος της μετατόπισης.



Εικόνα 31. Οι τάσεις για την ίδια προσομοίωση με προηγούμενως. Το φορτίο είναι από την κατανομή που προέκυψε από τις προσομοιώσεις αεροδυναμικής, που παρουσιάζει στον πίνακα παραπάνω. Είναι εμφανή τα σημεία συγκέντρωσης τάσης.

Το τελικό πάχος που κρατήσαμε είναι το 1.5 χιλιοστό για το συγκεκριμένο είδος αλουμινίου που χρησιμοποιούμε. Το 1 χιλιοστό αποτύγχανε στα συγκεκριμένα μοντέλα. Σε κάποια μικρά κομμάτια με μικρές φορτίσεις το 1 χιλιοστό αλουμινίου ήταν αρκετό, αλλά παρουσιαζόταν πρόβλημα κατά την προσπάθεια υπολογισμού με αντιστοιχία του πάχους που θα είχε το ανθρακονημάτινο τεμάχιο και γι αυτό δεν παρουσιάζονται και οι συγκεκριμένες δοκιμές, αφού τελικά δεν μας οφέλησαν τα αποτελέσματά τους. Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα το στοιχείο της εμπρός πτέρυγας αντέχει στο 1 χιλιοστό πάχους, αλλά είναι σχετικά οριακά όσον αφορά την τάση και το όριο διαρροής του υλικού, ενώ η παραμόρφωση (παρότι εντός πλαισίων και κανονισμών) κρίθηκε πολύ μεγάλη. Στα υπόλοιπα μοντέλα και ειδικά στην πίσω πτέρυγα το 1 χιλιοστό αποτύγχανε. Οι τρισδιάστατες αναλύσεις έγινα στα πλήρη μοντέλα για να βεβαιώσουμε και τα αποτελέσματα από τις δισδιάστατες. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει απόλυτη αντιστοιχία λόγω των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού, αλλά κινείται σε πολύ λογικά επίπεδα η αντιστοιχία αυτή και θεωρείται επιτυχής.

MODEL		2d Aluminium 7075-T6 (yield_strength: 500Mpa)		3d Aluminium	
FORNT WING ELEMENTS		250N to 1 node loading	Aero loading at 120 kmh	250N to 1 node loading	Aero loading
1mm thness 1st_naca_custom_el	Stress (Mpa)	303	214		
	Disp (mm)	17,9	9,5		
1.5mm thness 1st_naca_custom_el	Stress (Mpa)	207	3,64		
	Disp (mm)	6,62	0,21		
1.5mm thness assembly	Stress (Mpa)	180,86	29,3	201,2	80,15
	Disp (mm)	5,856	1,42	5,173	1,29
REAR WING ELEMENTS					
Juko 1.5mm thness	Stress (Mpa)	104,41	96		
	Disp (mm)	23,1	21,32		
assembly 1.5mm thness	Stress (Mpa)	77,2	55,48	88,2	65,36
	Disp(mm)	5,05	3,6	5,28	4,1

Πίνακας απεικόνισης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης για αλουμίνιο

Το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα ολοκληρωμένης αναφοράς για κάθε προσομοίωση την οποία όμως δεν μπορούμε να την επισυνάψουμε στο συγκεκριμένο έγγραφο. Υπάρχει όμως στα αρχεία της διπλωματικής. Παρακάτω επισυνάπτονται κάποια στιγμιότυπα της οθόνης όπου φαίνεται μία τέτοια αναφορά.

Αρχική σελίδα του Mozilla ... x Simulation Report x Siemens Documentation x +

file:///C:/Users/stefanio/AppData/Local/Temp/P16-BO-01-FW_sldasm_fem4/P16-BO-01-FW_sldasm_sim4 (2)/Solution_1/Report.htm

Siemens PLM Software

Front Wing Assembly Simulation (aluminium 1.5mm-aero load)

Title: Introduction
Solution Summary: Solution Summary
Materials: Materials
Sections: Sections
Modeling Objects: Modeling Objects
User Defined Groups: User Defined Groups
Meshes: Meshes
Physical Property Tables: Physical Property Tables
Solution Steps: Solution Steps
Loads: Loads
Constraints: Constraints
Solution Objects: Solution Objects
Results: Results
Images: Images

Author: stefanio
Company: Siemens PLM Software Inc
Date: 3/3/2017
Software Used: NX 10.0.3.5

Introduction

Solution Summary

Environment

Solution: Solution 1
 Solver: NX NASTRAN
 Analysis Type: Structural
 Solution Type: SOL 101 Linear Statics - Global Constraints
 Linearity: Linear

Simulation Navigator:

Name	Color	Status	Filter	Environment	Description
P16-BO-01-FW_sldasm_sim4 (2).sim		Displayed & Work		Default: NX NASTRAN - Structural	
P16-BO-01-FW_sldasm_fem4.fem				Default: NX NASTRAN - Structural	
CSYS			(Filter : Off)(Sort : Off)		
Groups			(Filter : Off)(Sort : Off)		
Fields					
Modeling Objects (Filtered)			(Filter : On)(Sort : Off)		

EN 8:35 πμ 3/3/2017

Αρχική σελίδα του Mozilla ... x Simulation Report x Siemens Documentation x +

file:///C:/Users/stefanio/AppData/Local/Temp/P16-BO-01-FW_sldasm_fem4/P16-BO-01-FW_sldasm_sim4 (2)/Solution_1/Report.htm

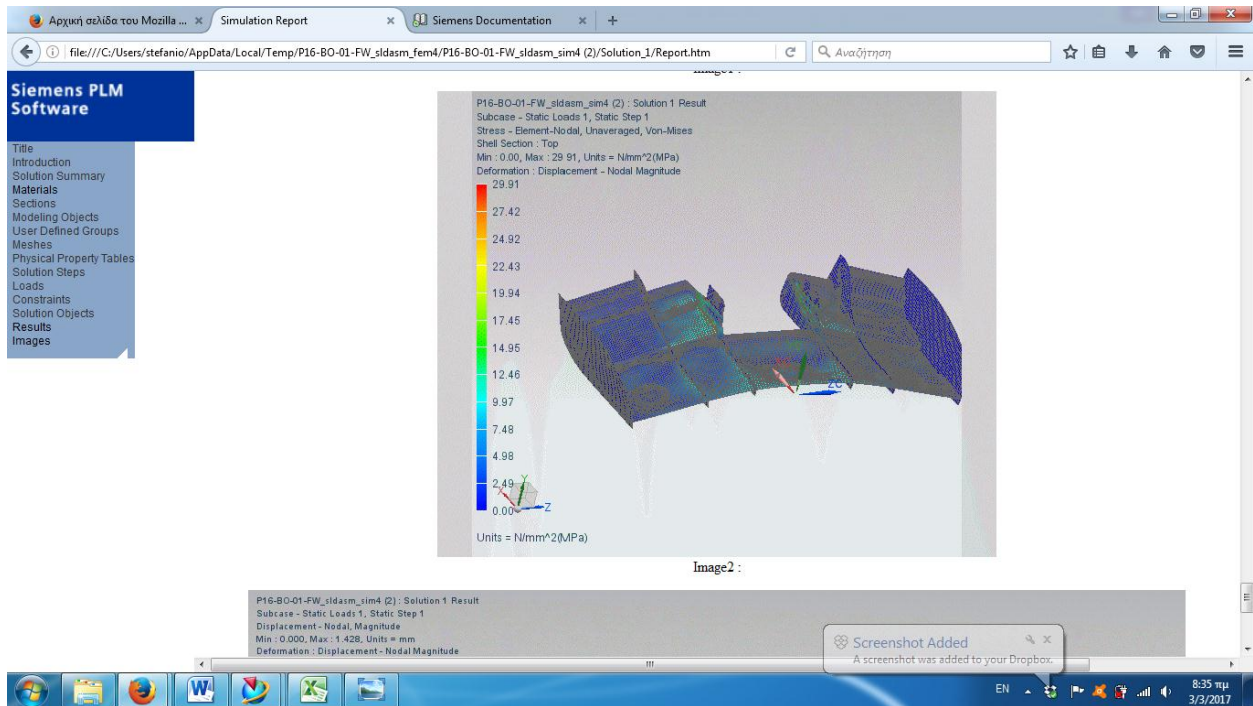
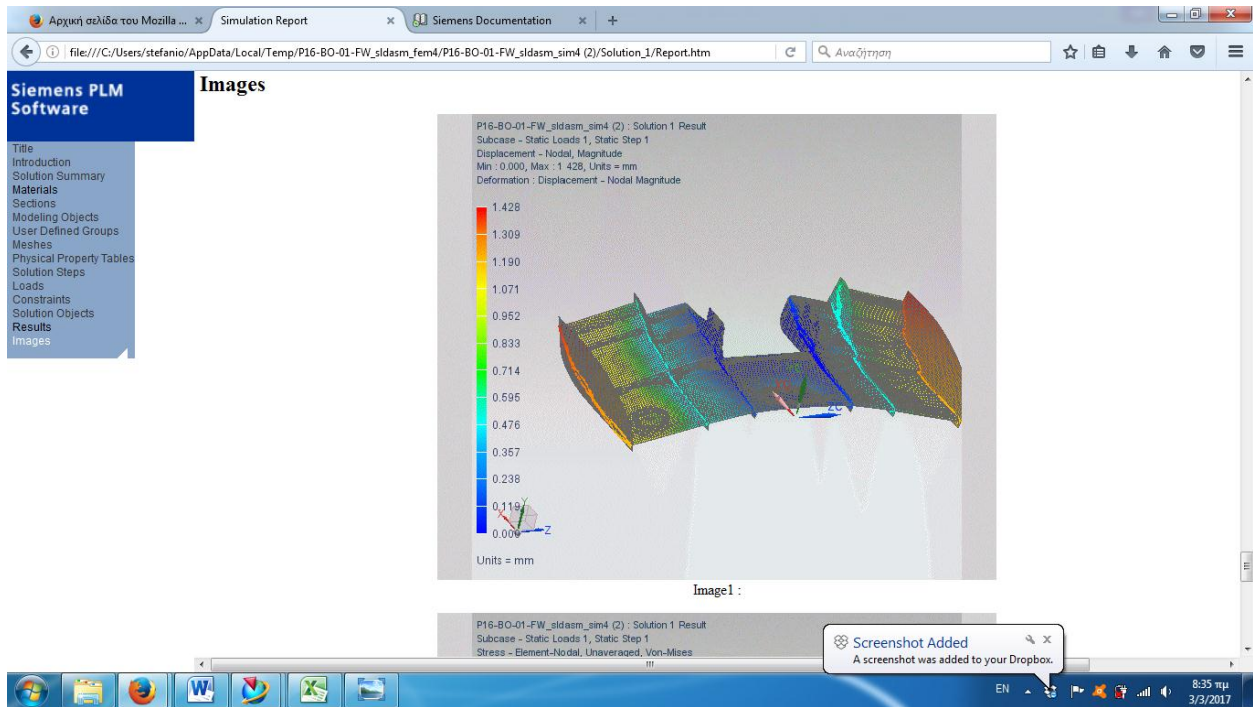
Siemens PLM Software

Material Summary

Material Name	Material Category	Material Type	Source
aluminum 7075-T6_1_2_2		Isotropic	Library

Alternate Name	(null)
Category	
Sub-Category	
Mass Density (RHO)	2.81 g/cm ³
Young's Modulus (E)	71700 N/mm ² (MPa)
(null)	(null)
Poisson's Ratio (NU)	0.33
Shear Modulus (G)	26900 N/mm ² (MPa)
Structural Damping Coefficient (GE)	Not defined
Stress-Strain Input Data Type	(null)
Stress-Strain (H)	Stress-Strain (H)
Type of Nonlinearity (TYPE)	(null)
Yield Function Criterion (YF)	(null)
Hardening Rule (HR)	(null)
Initial Yield Point (LIMIT1)	379 N/mm ² (MPa)
Initial Friction Angle (LIMIT2)	Not defined
Yield Strength	Yield Strength
Ultimate Tensile Strength	Ultimate Tensile Strength
Tsai-Wu Interaction Coefficient (F12)	Not defined
Max Stress Tension (ST)	Not defined
Max Stress Compression (SC)	Not defined

EN 8:35 πμ 3/3/2017



Εικόνα 32. Στιγμιότυπα της οθόνης του υπολογιστή που μας δείχνουν την μορφή μιας αναφοράς των αποτελεσμάτων του προγράμματος.

Όπως αναφέραμε στόχος του συγκεκριμένου βήματος ήταν να γίνει παραγγελία των υφασμάτων μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία ανάλυσης των αλουμιένιων τεμαχίων. Παρακάτω βλέπουμε έναν πίνακα που δημιουργήσαμε για να υπολογίσουμε την συγκεκριμένη παραγγελία. Εφόσον υπήρχαν τα σχέδια των αεροδυναμικών συσκευών μπορούσαμε να υπολογίσουμε τις επιφάνειες τους μέσω των προγραμμάτων CAD που χρησιμοποιούμε. Στη συνέχεια γνωρίζοντας το πάχος της κάθε στρώσης κάρμπον περίπου (0.25χιλ) μπορούμε να υπολογίσουμε το πλήθος των υφασμάτων που απαιτούνται για να πετύχουμε το συνολικό πάχος της ανθρακονημάτινης συσκευής, που προέκυψε από την αναλογία ένα προς ένα με το αλουμίνιο. Γνωρίζοντας το πάχος (δηλαδή πλήθος των υφασμάτων) και τις επιφάνειες με έναν πολλαπλασιασμό καταλήγουμε στα συνολικά τετραγωνικά μέτρα που χρειαζόμαστε.

Εδώ να αναφέρουμε ότι για την παραγγελία χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές ασφαλείας ώστε να μην υπάρχει τελικά λιγότερο κάρμπον από εκείνο που χρειαζόμασταν, γιατί η διαδικασία από την παραγγελία μέχρι την παραλαβή ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα. Οι συντελεστές αυτοί προέκυψαν απο διάφορους υπολογισμούς και αθροίζοντας τους όλους ήμασταν σίγουροι ότι δεν θα παραγγέλναμε λιγότερα μέτρα από εκείνα που χρειαζόμασταν. Αρχικά έγινε ένας εμπειρικός υπολογισμός της φύρας (του πεταμένου υλικού που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί δηλαδή) ο οποίος υπολογίστηκε επί του συνόλου των μέτρων που είχαμε υπολογίσει. Επίσης υπήρχαν συντελεστές ασφαλείας ούτως ή αλλιως στον υπολογισμό των αλουμιένιων, όπου το πάχος σε αρκετές περιπτώσεις θα μπορούσε να ήταν μικρότερο και δημιουργήθηκε ένας έξτρα συντελεστής ασφαλείας από την απόφαση μας να μην υπάρχει κάρμπον τεμάχιο με πάχος μικρότερο του 1.5 χιλιοστού. Ο λόγος της απόφασης αυτής παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5, όπου γίνεται αναφορά στον υπολογισμό των ανθρακονημάτινων διαστρωματώσεων

Παρακάτω παρουσιάζεται ο συγκεκριμένος πίνακας.

Aero part	Surface		Downforce (N)	Drag (N)	Downforce/drag (ratio)	Pressure		Foam Block Volume		thickness (mm)	plies	carbon fiber	
	(mm ²)	(m ²)				(Pa)	(Mpa)	(mm ³)	(m ³)			(m ²)	endplates
front wing (total)	2938016,00	2,94	741,00	283,00	2,62	252,21	0,00	7146900,00	0,07			elements	5,30
1st el	880717,00	0,88	518,70	198,10	N/A	588,95	0,00	3920000,00	0,04	0,75	6,00	5,28	
2nd el	452412,00	0,45	148,20	56,60	N/A	327,58	0,00	2500000,00	0,03	0,75	6,00	2,71	
3rd el	280607,00	0,28	74,10	28,30	N/A	264,07	0,00	7269000,00	0,01	0,75	6,00	1,68	
rear wing (total)	3168463,00	3,17	563,00	215,00	2,62	177,69	0,00	8630400,00	0,09			0,00	4,22
1st el	753137,00	0,75	394,10	150,50	N/A	523,28	0,00	6803400,00	0,07	1,50	6,00	4,52	
2nd el	306430,00	0,31	168,90	64,50	N/A	551,19	0,00	1827000,00	0,02	0,75	6,00	1,84	
underbody (total)	5278704,00	5,28	418,00	159,70	2,62	79,19	0,00	103500464,00	0,10			0,00	
patwma	382922,00	3,83	241,00	92,00	6,60	62,94	0,00	67789964,00	0,07			0,00	7,66
side towers	144948,00	1,45	177,00	67,70				3571050,00	0,04			0,00	0,86
1st el	224714,00	0,22								0,75	6,00	1,35	
2nd el	141192,00	0,14								0,50	4,00	0,56	
3rd el	84600,00	0,08								0,50	4,00	0,34	
4th el	59203,00	0,06								0,50	4,00	0,24	
sidepods(bo dywork)	499602,00	0,50	-22,30	32,30	-0,69			1000000,00	0,10	0,50	4,00	2,00	
wheels		0,00	-16,20	11,40	-1,42								
car		0,00	321,10	124,70	2,57								
TOTAL	11884785,00	11,88	1683,50	701,40	2,40			361273464,00	0,36			20,53	18,03
TOTAL CARBON												38,56	
με φύρα												50,13	

Πίνακας υπολογισμού τετραγωνικών υφασμάτων που χρειαζόμασταν. Με βάση αυτόν έγινε και η παραγγελία

Επομένως 50m² υφάσματος πλεκτού και 10 μονής κατεύθυνσης για ενίσχυση σε σημεία παραγγέλθηκαν αμέσως μετά τις συγκεκριμένες αναλύσεις.

4 Καλούπια

Το επόμενο βήμα στην διαδικασία ήταν η σχεδίαση και κατασκευή των καλουπιών για τις αεροτομές. Βασικές παράμετροι ήταν ο προϋπολογισμός, ο οποίος ήταν σχεδόν μηδενικός για το συγκεκριμένο βήμα, ο χρόνος παράδοσης των καλουπιών και η ποιότητα. Με βάση τον προϋπολογισμό τα καλούπια θα έπρεπε να κατασκευαστούν χωρίς κόστος και από πολύ φθηνό υλικό. Ο χρόνος παράδοσης που είχαμε ήταν επίσης πολύ πιεστικός για να καταφέρουμε να προλάβουμε τους διαγωνισμούς, ενώ η ποιότητα, που ήταν το μόνο στοιχείο που θα μπορούσαμε να θυσιάσουμε στην συγκεκριμένη εξίσωση δεν είχε μεγάλα περιθώρια υποβάθμισης. Εφόσον τα τεμάχια για κατασκευή ήταν αεροδυναμικά βοηθήματα, τα οποία επηρεάζουν τη ροή του αέρα, η εξωτερική επιφάνεια των αεροτομών θα έπρεπε να είναι λεία και γυαλιστερή ώστε να μην δημιουργεί προβλήματα συνεκτικότητας στη ροή που είχε μελετηθεί. Ίσως ένα στοιχείο που θα μπορούσαμε να θυσιάσουμε λίγο παραπάνω κατά την κατασκευή ήταν οι συντελεστές αντοχής των υλικών, λόγω των μεγάλων συντελεστών ασφαλείας που είχαμε θέσει κατά την ανάλυση και των παραμέτρων θα ενίσχυαν την όλη κατασκευή. Αυτές οι παράμετροι είναι μέρος της κατασκευαστικής διαδικασίας και θα παρουσιαστούν σε επόμενα κεφάλαια.

4.1 Είδη καλουπιών

Τα καλούπια για ανθρακονήματα κατατάσσονται σε διαφόρων ειδών, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του τελικού τεμαχίου, τον τρόπο κατασκευής του ίδιου του καλουπιού, το υλικό κ.α. Υπάρχουν καλούπια θυληκά ή αρσενικά, καλούπια που κατασκευάζονται απευθείας ή καλούπια, τα οποία απαιτούν την κατασκευή ενός μοντέλου για να κατασκευαστούν, καλούπια αλουμινένια, σιδερένια, από σύνθετα υλικά, από αφρό, ξύλο ή και άλλα υλικά. Ακόμη και το γυαλί μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό πάνω στο οποίο θα κατασκευασθεί ένα κάρμπον πάνελ παραδείγματος χάρη.

Τα καλούπια αυτά επιλέγονται και χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες, τους περιορισμούς και τα αποτελέσματα που αναζητάμε. Άλλα καλούπια θα χρησιμοποιηθούν για κατασκευή τεμαχίων με προεμποτισμένα υφάσματα, που απαιτούν ψήσιμο και μεγάλες πιέσεις και άλλα για τεμάχια που δεν απαιτούν αντοχή σε τόσο μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις. Συνήθως τα καλούπια που χρησιμοποιούνται για προεμποτισμένα υφάσματα θα είναι σιδερένια, χαλύβδινα, αλουμινένια, ή από σύνθετα υλικά ικανά να ανταποκριθούν στις θερμοκρασίες και πιέσεις που απαιτεί η διαδικασία. Τέτοια καλούπια, λόγω και του υλικού κατασκευής τους, προσδίδουν στο τελικό αντικείμενο μία πολύ καλή εξωτερική επιφάνεια συνήθως, η οποία είναι εκείνη που βρίσκεται σε επαφή με το καλούπι.

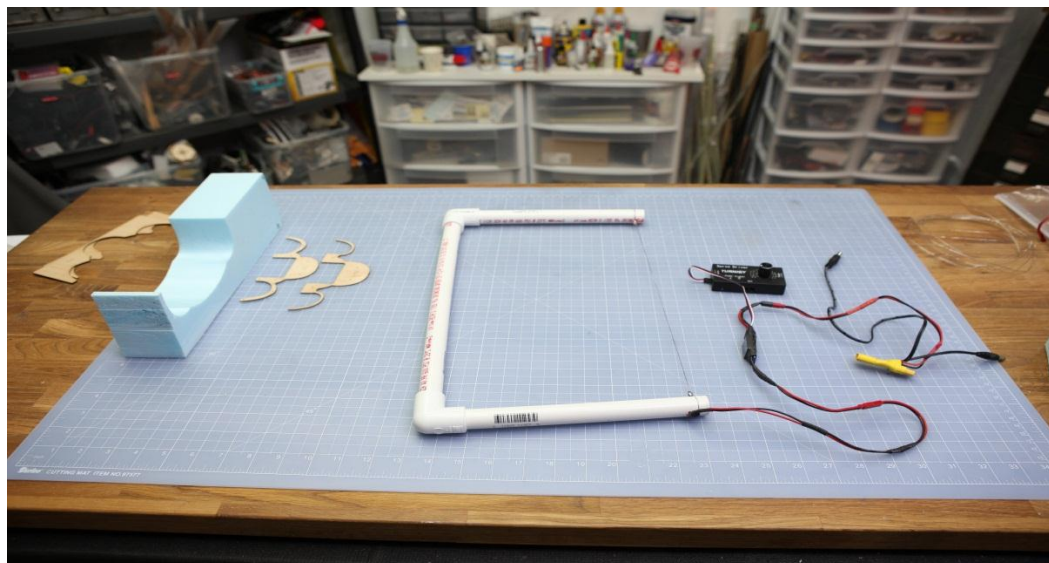
Αναλόγως ποια επιφάνεια μας ενδιαφέρει περισσότερο να έχει καλή ποιότητα ορίζουμε και τον τρόπο κατασκευής του τεμαχίου. Στην περίπτωση μας, για παράδειγμα η επιφάνεια που μας ενδιέφερε περισσότερο είναι η εξωτερική, αφού εκείνη έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Άρα το ιδανικό καλούπι θα είναι θηλυκό. Δηλαδή ένα εξωτερικό καλούπι (διαιρούμενο συνήθως) μέσα στο οποίο θα γίνεται η διαστρωμάτωση των υφασμάτων άνθρακα. Συνήθως το θηλυκό καλούπι είναι το διανικότερο για κατασκευές από ανθρακονήματα, αφού η ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας ζητείται να είναι αψεγάδιαστη. Υπάρχουν περιπτώσεις βέβαια, που μπορεί να ζητείται να είναι η εσωτερική επιφάνεια η «καλή» επιφάνεια του τεμαχίου (πχ. κύλινδροι που μπορεί να περνάει κάτι από μέσα τους) στις οποίες το αρσενικό καλούπι είναι η λύση για τον σκοπό του κατασκευαστή. Στις περιπτώσεις αυτές συνήθως

το αρσενικό καλούπι είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο και από τέτοιο υλικό, ώστε να μπορεί να βγει στη συνέχεια από το καλούπι. Αυτό γίνεται κατά κύριο λόγο, διαλύοντας το καλούπι, το οποίο μπορεί να είναι από αφρό, είτε με κάποιο υγρό είτε με άλλο τρόπο. Στη συνέχεια το τελικό τεμάχιο μένει κούφιο με την εσωτερική επιφάνεια, να έχει την ζητούμενη ποιότητα.

4.2 Η επιλογή του καλουπιού

Μπορεί η επιφάνεια που μας ενδιέφερε να ήταν η εξωτερική και σίγουρα η προφανής επιλογή θηλυκού καλουπιού να ήταν η καλύτερη από άποψη ποιότητας για τις αεροτομές του μονοθεσίου μας, αλλά η επιλογή του καλουπιού δεν ήταν τόσο εύκολη στην περίπτωσή μας. Το περιορισμένο μπάτζετ της ομάδας δεν μας επέτρεπε την αγορά μπλοκ αλουμινίου για την κατασκευή των καλουπιών και σίγουρα δεν μας επέτρεπε επίσης την αμοιβή για την επεξεργασία από CNC που θα απαιτούνταν. Η επεξεργασία των «τούβλων» αλουμινίου που χρειαζόταν ήταν πολύ χρονοβόρα και το CNC που χρησιμοποιούσε η ομάδα μόνη της έπρεπε να δουλέψει σε άλλα πιο σημαντικά κομμάτια. Επομένως θα αναγκάζομασταν να αναζητήσουμε εξωτερικό CNC. Αυτή βέβαια θα ήταν η ιδανική λύση, την οποία ακολουθούν όλες οι ομάδες της φόρμουλα 1 και οι οικονομικά ισχυρότερες ομάδες στο formula student. Παρόλαυτα αν μέναμε εκεί η ομάδα δεν θα είχε αεροτομές στο τέλος της σεζόν που θα πήγαινε στους διαγωνισμούς.

Ψάχνοντας λοιπόν για πολύ οικονομικές λύσεις με σχεδόν το ένα δέκατο του καθιερωμένου μπάτζετ για αντίστοιχες κατασκευές καταλήξαμε ότι αναγκαστικά τα καλούπια μας θα ήταν αρσενικά και μάλιστα από μαλακό υλικό ώστε να μπορούμε να το κατεργαστούμε στο εργαστήριο. Έτσι το πλάνο ήταν να χρησιμοποιήσουμε αφρό ως υλικό κατασκευής και θερμό σύρμα για την διαμόρφωση των προφίλ των αεροτομών. Αυτή ήταν μία πολύ απλή λύση καθώς το εργαλείο κοπής θα το κατασκευάζαμε μόνοι μας σχεδόν χωρίς κόστος και το κόστος του αφρού ήταν πολύ μικρό.



Εικόνα 33. Αυτοσχέδιο εργαλείο κοπής με θερμό σύρμα για κοπή αφρού

Η λύση αυτή όμως, μετά από έρευνα καταλήξαμε, ότι δεν θα δουλέψει όπως θα επιθυμούσαμε, από την στιγμή που είχαμε επιλέξει για υλικό κατασκευής ανθρακόνημα με προεμποτισμένες ίνες. Η επεξεργασία τέτοιων υφασμάτων απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις τις οποίες ο απλός αφρός (εξηλασμένη πολυστερίνη) δεν θα μπορούσε να αντέξει χωρίς σοβαρές παραμορφώσεις. Εκεί καταλήξαμε μετά από συνάντηση με μηχανολόγο μεγάλης εταιρείας με μονωτικά υλικά, όπου η παραμόρφωση που υπολογίσαμε για πίεση μίας ατμόσφαιρας και θερμοκρασίες κοντά στους 70 βαθμούς κελσίου για ώρες ξεπερνούσε σημαντικά το 10 τοις εκατό.

Βέβαια υπάρχουν άλλοι αφροί ρνς, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρον ως αρσενικά καλούπια ή πηρύνες σε κατασκευές σάντουιτς με σύνθετα υλικά και έχουν εντελώς διαφορετικές ιδιότητες από τους απλούς πολυστερενίου. Ο αφρός αυτός όμως είναι πολύ ακριβός για τόσο μεγάλες ποσότητες που χρειαζόμασταν και δεν είχαμε την οικονομική δυνατότητα να τον αποκτήσουμε.

TECHNICAL DATA FIBRANxps		Designation code according to EN 12164	Measurement units	300 - L	400 - L	500 - L	600 - L	700 - L	300 - I	MAESTRO	ETICS GF	ETICS BT	FABRIC	standard
Shape of edge profile				L	L	L	L	L	I	D	L	L	I	
Surface				smooth surface							waffled surface	rough surface with channels	rough surface	
Board's dimensions			mm	1250 /600	1250 /600	1250 /600	1250 /600	1250 /600	1250 /600	2500 /600	1250 /600	2500 /600	upon request	EN 822
Thickness tolerance		t1		t1	t1	t1	t1	t1	t1	t1	t3	t3	t3	EN 822
Declared compressive strength at 10% deformation		CS(10Y)	kPa	300	400	500	600	700	300'	250-300	200-300	200-300	300-700	EN 824
Declared thermal conductivity (after 25 years)	20 mm < d < 30 mm	λ_2	W/mK	0,033							0,033	0,033	0,033	EN 12667
	40 mm < d < 300 mm			0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	
Thermal conductivity (after 90 days)		λ		0,032	0,032	0,033	0,033	0,033	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	
Long term water absorption by total immersion	smooth surface	WL(T30,2)	vol.%	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3				EN 12087
	rough surface	WL(I1,1,2)									<1,2	<1,2	<1,2	
Water absorption by diffusion		WD(V3)	vol.%	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5				EN 12088
Water vapour diffusion resistance factor		MDI	-	150-50	150-50	150-50	150-50	150-50	150-50	100-50	50	50	50	EN 12086
Declared value of dimensional stability at a temperature of 70°C and of 90% humidity		DS(30)S	%	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	EN 1484
Declared level of deformation at a compressive load of 40 kPa and a temperature of 70°C		DL(7)S	%	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	EN 1485
Compressive modulus of elasticity E		-	MPa	20	25	30	35	40	20	15	15	15	15	EN 824
Shear strength τ		-	MPa								0,15	0,15	0,15	EN 13510
Shear modulus G		-	MPa								2,6	2,6	2,6	EN 13510
Tensile strength perpendicular to the faces σ_{\perp}		T0400	kPa								>400	>400	>400	EN 1487

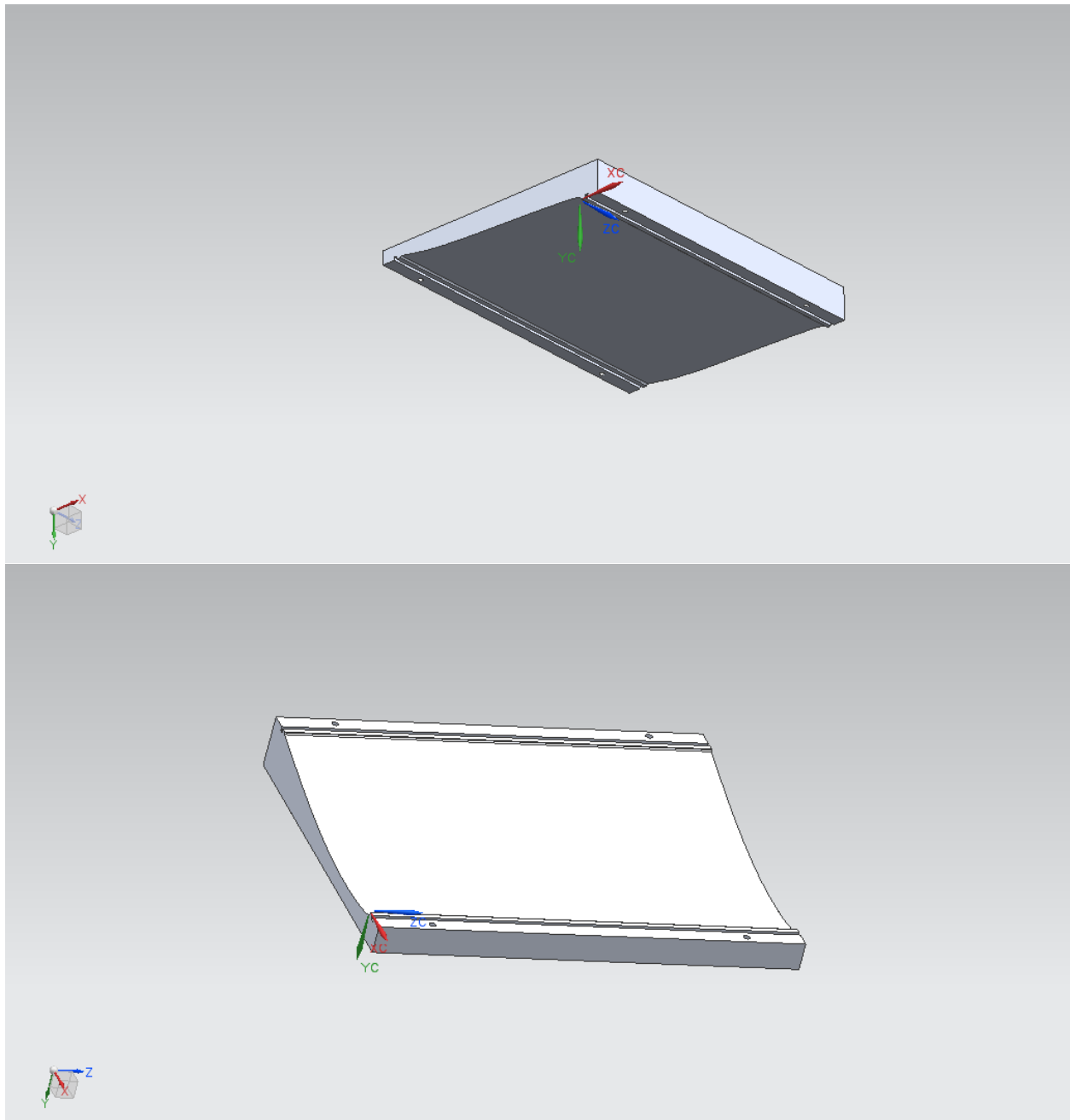
Εικόνα 34. Πίνακας ιδιοτήτων για εξηλασμένη πολυστερίνη που δείχνει ότι στους 70 βαθμούς κελσίου και 40KPa πίεσης (στο 40% της πίεσης που ασκούμε στο τεμάχιο) η παραμόρφωση είναι λίγο κάτω από 5%. Σύμφωνα με μηχανολόγο της εταιρείας ο αφρός δεν ήταν κατάλληλος για την χρήση που τον προορίζαμε

Τελικά μετά από έρευνα και συζητώντας με τον διδάκτορα Αλέξανδρο Κιτσέλη καταλήξαμε ότι αν μπορούσαμε να κατασκευάσουμε τα καλούπια από ξύλο κατεργασμένο σε CNC router θα ήταν μάλλον η καλύτερη επιλογή που είχαμε. Το ξύλο (mdf στην περίπτωση μας) δεν είναι ακριβό, αλλά αντέχει σε αρκετά μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες σε σχέση με τον αφρό. Επίσης τα καλούπια αυτά θα ήταν θηλυκά (αρνητικά) που σημαίνει ότι θα μπορούσαμε να έχουμε αρκετά καλύτερη επιφάνειες από εκείνη που θα είχαμε με τα θετικά (αρσενικά) καλούπια.

Έτσι μετά από αρκετές αρνητικές απαντήσεις ήρθαμε σε επαφή με την εταιρεία LNV-CNC του κ. Κωνσταντού στην Θεσσαλονίκη, ο οποίος δέχτηκε να συζητήσουμε το ενδεχόμενο συνεργασίας και τον ευχαριστούμε πολύ γι' αυτό. Ήταν ιδιαίτερα πρόθυμος να μας χορηγήσει την πλήρη κατεργασία ξύλινων καλουπιών για τις αεροτομές μας και μάλιστα να το κάνει στο μικρό χρονικό διάστημα που είχαμε στη διάθεση μας. Επομένως, το επόμενο βήμα ήταν ο σχεδιασμός των θηλυκών καλουπιών των αεροδυναμικών συσκευών και η αποστολή των σχεδίων στον κ.Κωνσταντό ώστε να γίνει η κατεργασία τους. Πρώτα όμως θα προσαμόζαμε τα σχέδια αυτά ώστε να είναι δυνατή η κατεργασία τους από το ρούτερ.

4.3 Κατασκευή καλουπιών

Τα καλούπια τελικά θα ήταν θηλυκά διαιρούμενα (πάνω και κάτω) και ξύλινα. Σημαντικά καλύτερη επιλογή από εκείνη που είχαμε κάνει αρχικά των αρσενικών καλουπιών από αφρό. Το ξύλο με την κατάλληλη επεξεργασία πριν γίνει η διαστρωμάτωση θα μπορούσε να αφήσει πολύ καλή εξωτερική επιφάνεια στα αεροδυναμικά στοιχεία καθώς και να ανταπεξέλθει αρκετά καλά στην πίεση και την υψηλή θερμοκρασία κατά την διάρκεια του ψησίματος των ανθρακονημάτων. Τα ξύλινα καλούπια επίσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μία φορές σε αντίθεση με εκείνα από αφρό. Αυτό δίνει ακόμα μεγαλύτερη αξία στην απόφαση της ομάδας να χρησιμοποιήσει ίδια αεροδυναμικά προφίλ σε διάφορα σημεία των αεροδυναμικών συσκευών ώστε να ελαχιστοποιήσει τα καλούπια που θα κατασκευάζονταν. Το γεγονός επίσης ότι τα καλούπια θα ήταν διαιρούμενα ήταν πολύ χρήσιμο γιατί πέρα από την ευκολία που θα προσέφερε στην αποκόλληση των κομματιών και επαναχρησιμοποίηση των καλουπιών για τα επόμενα, θα βοηθούσε ιδιαίτερα και στην επίτευξη του ελάχιστου δυνατού ραδίου. Αυτό γιατί στο σημείο με το ελάχιστο ράδιο όπως οι αιχμές πρόσπτωσης και διαφυγής του αέρα το ράδιο δεν θα ήταν ενιαίο, αλλά θα προέκυπτε από την ένωση των διαιρεμένων καλουπιών.



Εικόνα 35. Πάνω και κάτω σχέδιο καλυπτιού για προφίλ αεροδυναμικού στοιχείου της μπροστινης πτέρυγας.



Εικόνα 36. Καλούπια αεροτομών, από κατεργασμένα μπλοκ ενωμένων ινοσανίδων mdf, όπως εστάλησαν από την κατεργασία τους. Στη συνέχεια έγινε προετοιμασία των καλουπιών αυτών με γυαλιστικά και κεριά για να αποκτήσουν τα τεμάχια την κατάλληλη επιφάνεια και να ξεκολλήσουν από το καλούπι.

5 Finite Element Analysis Carbon Fiber Reinforced Polymer

Έχοντας κάνει όλη την προετοιμασία το μόνο που έμενε πλέον ήταν να γίνει η ανάλυση των τελικών τεμαχίων και το πλάνο κατασκευής των αεροδυναμικών στοιχείων, ώστε να ξεκινήσει η κατασκευή μόλις τα υλικά έφταναν στο εργαστήριο. Στόχος του βήματος αυτού είναι να κάνουμε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στις αεροδυναμικές συσκευές με την τελική διαστρωμάτωση υφασμάτων άνθρακα που αυτά θα φέρουν. Όπως είναι λογικό για την εύρεση της τελικής διαστρωμάτωσης αυτής έγιναν πάρα πολλά «τρεξίματα» στο πρόγραμμα προσομοίωσης τα οποία δεν είχε νόημα να παρουσιαστούν. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν κυρίως οι σωστές προσομοιώσεις και η λογική πίσω από την εύρεση της κάθε διαστρωμάτωσης.

5.1 Τρόπος εφαρμογής της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για ανθρακονήματα

Μια πολύ καλή αφετηρία για την ανάλυση κατασκευής ανθρακονημάτων τεμαχίων είναι η ήδη ολοκληρωμένη ανάλυση των αντίστοιχων αλουμιένων. Το πάχος που έχει προκύψει ότι αντέχει στα αλουμιένια τεμάχια είναι και το πάχος που θα δοκιμαστεί ως αφετηρία για τα ανθρακονημάτινα. Ο λόγος που έγινε η ανάλυση στο αλουμίνιο είναι για να γίνει αρχικά αντιστοιχία πάχους ένα προς ένα με διαστρωμάτωση πλεκτών υφασμάτων ανά 45 μοίρες. Έτσι δημιουργούμε ένα τεμάχιο quasi-isotropic με

σχεδόν αντίστοιχες ιδιότητες με εκείνες του αλουμινένιου. Στη συνέχεια μπορούμε να κάνουμε δοκιμές χρησιμοποιώντας την κρίση μας και την εμπειρία για να αλλάξουμε τη διαστρωμάτωση, κερδίζοντας σε βάρος και κόστος, ανάλογα με την κατεύθυνση της φόρτισης και των υφασμάτων που χρησιμοποιούμε.

Με τον όρο quasi-isotropic εννοούμε ένα υλικό που έχει τις ίδιες ιδιότητες όταν οι δυνάμεις ασκούνται στο επιπέδο του, δηλαδή ανταποκρίνεται σαν ορθοτροπικό για θλίψη εφελκυσμό, αλλά έχει άλλες ιδιότητες σε δυνάμεις εκτός επιπέδου, όπως καμπτικές. Τα υφάσματα άνθρακα έχουν τεράστια αντοχή και ακαμψία σε εφελκυσμό. Αυτή τους η ιδιότητα τους δίνει στην συνέχεια και την ακαμψία σε κάμψη αναλόγως την διεύθυνση αυτής. Αυτό γίνεται επειδή στην κάμψη η μία πλευρά του τεμαχίου εφελκύεται και η άλλη θλίβεται. Έτσι αν τα νήματα είναι προσανατολισμένα στην ίδια διεύθυνση με την φόρτιση για κάμψη, τα νήματα που εφελκύνονται και θλίβονται –αλλά κυρίως τα πρώτα- αντιδρούν στην κίνηση αυτή και δίνουν μεγάλη ακαμψία στο τεμάχιο. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο το πάχος, τόσο περισσότερο θα εφελκυστεί το αντίστοιχο ύφασμα για μικρότερη κάμψη. Επομένως ένα πολύ λεπτό κάρμπον πάνελ δεν παρουσιάζει σχεδόν καθόλου αντοχή σε κάμψη, ενώ ένα χοντρό παρουσιάζει τεράστια. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται πυρήνες στα ανθρακονημάτινα τεμάχια. Με αυτό τον τρόπο τεμάχια με πολύ λίγα φύλλα κάρμπον μπορούν να έχουν μεγάλη ακαμψία, όσο μεγαλώνει η απόσταση της μία πλευράς με την άλλη. Αυτός είναι και ένας τρόπος να μειώσει κανείς το κόστος και το βάρος.

Σε προηγούμενο κεφάλαιο κάναμε λόγο για την απόφαση που πήραμε να μην υπάρχει κάρμπον τεμάχιο με πάχος μικρότερο του 1.5 χιλιοστού. Ο λόγος για την απόφαση αυτή είναι ακριβώς αυτός που παρουσιάζεται στην προηγούμενη παράγραφο. Η αντιστοιχία χοντρικά ένα προς ένα σε πάχος των ανθρακονημάτων με το αλουμίνιο (σε βάρος πολύ μικρότερη φυσικά, αφού το κάρμπον είναι πολύ πιο ελαφρύ) ισχύει από ένα μέγεθος πάχους και πάνω. Αυτό γιατί όταν οι δυνάμεις είναι καμπτικές, όπως στην περίπτωση μας και το πάχος του κάρμπον τεμαχίου είναι πολύ μικρό (<1 χιλιοστού) η παραμόρφωση σε κάμψη θα είναι τεράστια και μπορεί και να αστοχήσει τελικά το τεμάχιο. Όσο αυξάνει το πάχος αυτό των τεμαχίων το ανθρακόνημα γίνεται όλο και πιο αποδοτικό και η αναλογία αυτή μπορεί να αλλάξει από ένα μέγεθος και πάνω ευνοικά προς το ανθρακόνημα.

Αφού λοιπόν γίνει η ανάλυση με τον τρόπο που αναφέραμε και με βάση τα δεδομένα της αντίστοιχης ανάλυσης των αλουμινένιων τεμαχίων εστιάζουμε στην όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματική χρήση των υφασμάτων άνθρακα. Έχοντας τα πρώτα αποτελέσματα μπορούμε αναλύοντάς τα να παρατηρήσουμε τα σημεία, που χρειάζονται ενίσχυση ή που μπορούν να ελαφρωθούν γιατί δεν παραλαμβάνουν βαρύ φορτίο. Επίσης μπορούμε να κάνουμε επιλεκτική χρήση υφασμάτων μονής κατεύθυνσης εκμεταλλευόμενοι τη δυνατότητα που μας παρέχει το κάρμπον να προσαρμόσουμε τις ιδιότητες τους όπως μας βολεύει. Έτσι μπορούμε να ελαφρύνουμε την κατασκευή και να μειώσουμε και το κόστος χρησιμοποιώντας φθηνότερα υφάσματα και ενισχύοντας μόνο την κατεύθυνση παραλαβής των φορτίων. Συνήθως σημεία μελετημένη κατασκευή από ανθρακονήματα χρησιμοποιείται μεικτή διαστρωμάτωση από υφάσματα UD (unidirectional) και Woven ώστε να εκμεταλλευτεί καλύτερα ο ανίστοιχος κατασκευαστής την ελευθερία ρυθίσεων που του παρέχει το ανθρακόνημα.

5.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για ανθρακονημάτινες αεροτομές

Στην παρούσα ανάλυση πολύ σημαντικό ρόλο έχουν οι κανονισμοί που αναγκάζουν τα στοιχεία να έχουν ιδιαίτερα υψηλή αντοχή η οποία δεν προκύπτει από την ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων. Συγκεκριμένα ο κανονισμός αναφέρει ότι αν διαπιστωθεί ταλάντωση θα εφαρμοσθεί δύναμη 200N στην αεροτομή για να εξεταστεί η στήριξη των αεροτομών. Η παραμόρφωση- μετατόπιση που θα εμφανιστεί από την δύναμη αυτή θα πρέπει να είναι μικρότερη από 25 χιλιοστά και η πλαστική παραμόρφωση μικρότερη από 5 χιλιοστά όπως αναφέρει. Αυτός είναι ένας κανονισμός ο οποίος στοχεύει να εξετάσει τη στήριξη των αεροτομών και να επιβεβαιώσει ότι αυτές δεν θα αποσπαστούν από το αυτοκίνητο. Είναι ένας πολύ χρήσιμος κανονισμός, μιας και στο παρελθόν είχαν εμφανιστεί τέτοια επικίνδυνα φαινόμενα.

Το πρόβλημα όμως είναι ότι δεν αναφέρει σε ποιο σημείο της πτέρυγας μπορεί να ασκηθεί η δύναμη αυτή. Μία δύναμη σχεδόν σημειακή στο κέντρο του ακριανού στοιχείου έχει πολύ περισσότερες πιθανότητες δημιουργίας σημαντικού προβλήματος στην αεροτομή και στο συγκεκριμένο στοιχείο. Από την άλλη αν η δύναμη 200N ασκηθεί κοντά στην στήριξη του στοιχείου στο endplate και έχει μία κατανομή πίεσης με μεγαλύτερη διασπορά, το φορτίο αυτό θα έχει πολύ διαφορετικές συνέπειες στο ίδιο στοιχείο. Εφόσον όμως δεν αναφέρεται κάτι παραπάνω εξετάσαμε και πάλι το χειρότερο δυνατό σενάριο, ώστε να είμαστε σίγουροι για την κατασκευή.

Στην ανάλυση μας παρουσιάζονται και οι δύο περιπτώσεις φορτίσεως των αεροτομών καθώς και δύο διαφορετικοί τρόποι προσομοίωσης των διαστρωματώσεων. Το λογισμικό πακέτο προσφέρει την επιλογή του zone based και του global layup (zone based). Οι διάφορες μεταξύ των δυο έγκειται στον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα στρώνει τις στρώσεις πάνω στο σχέδιο cad που έχουμε εισάγει. Επίσης υπάρχει διάφορα στην ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται ο προσανατολισμός των ινών. Η zone based μέθοδος αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικότητας μιας και προσομοιώνει σε πολύ καλό βαθμό τις κατευθύνσεις των ινών μετά την εισαγωγή τους στο καλούπι.

Οι ιδιότητες των υλικών έχουν προκύψει μετά από πειράματα που έκανε ο διδάκτωρας Αλέξανδρος Κιτσέλης στο εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών, με διάφορα δοκίμια, που φορτίστηκαν μέχρι αστοχίας ώστε να υπολογιστούν οι πραγματικές τους ιδιότητες. Βέβαια στην όλη διαδικασία βοήθησαν και οι ιδιότητες των υλικών που προσφέρει η ίδια η εταιρεία και παρουσιάζονται στο παράρτημα στο τέλος της διπλωματικής.

Θεωρήθηκε γραμμικό το φαινόμενο των καταπονήσεων και επίσης θεωρήθηκε ότι τα υλικά θα παραμείνουν στην ελαστική περιοχή τους. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ο solver 101 του λογισμικού πακέτου.

Λόγω του ότι πέρνουμε διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε στρώση που χρησιμοποιείται και δεν ήταν δυνατόν να βάλουμε τα αποτελέσματα από κάθε στρώση έχουμε συγκεντρώσει τα αποτελέσματα σε πίνακες του excel οι οποίοι περιλαμβάνουν τα πιο σημαντικά στοιχεία των αποτελεσμάτων.

Zone based layup

Αρχικά ακολουθήσαμε την zone based μέθοδο που προσφέρει το πρόγραμμα κατά την οποία τοποθετείς στρώσεις σε shell elements ορίζοντας την κατεύθυνση των ινών, το υλικό και τό πάχος των στρώσεων.

Global layups

Η μέθοδος αυτή, που χρησιμοποιήσαμε στην συνέχεια είναι η πιο εξελιγμένη μέθοδος για τις κατευθύνσεις των ινών. Ο χρήστης με τον ορισμό κάποιων παραμέτρων σχετικά με τον προσανατολισμό ορίζει την κατεύθυνση των ινών. Έπειτα γίνεται χρήση αλγορίθμων draping οπου το ύφασμα στρώνεται πάνω στην επιφάνεια του αεροδυναμικού στοιχείου. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει κοψίματα στο ύφασμα για να τυλιχτεί καλύτερα. Επίσης ορίζεται το σημείο από το οποίο ξεκινάει το lay up και η κατεύθυνση του.

Η μέθοδος του global lay up δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα αφού το πρόγραμμα ξέρει ακριβώς τον προσανατολισμό της ινας όπως αυτή θα έμπαινε στο καλούπι. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς κάνουμε το lay up στο καλούπι μπορεί το ύφασμα να αλλάξει κατεύθυνση ανάλογα με τις αλλαγές τις επιφάνειας. Γενικότερα η μέθοδος αυτή παράγει αποτελέσματα πολύ κοντά στην πραγματικότητα.

Όπως θα δούμε όμως, από την αντιστοιχία των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων που παρουσιάζουμε παρακάτω σε πίνακες, το γεγονός ότι η γεωμετρία των καλουπιών είναι αρκετά απλή, χωρίς γωνίες και περίεργες διαμορφώσεις κάνει την ανάλυση zone based πολύ ακριβής στα αποτελεσμάτά της. Για τον λόγο αυτό η πληθώρα των προσομοιώσεων έγιναν με zone based μέθοδο, για λόγους ταχύτητας και μη κατανάλωσης άχρηστων υπολογιστικών πόρων και η μέθοδος των global layups ή αλλιώς ply based χρησιμοποιήθηκε για την εξακρίβωση κάποιων εκ των αποτελεσμάτων.

5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες και πίνακες με τα αποτελέσματα της ανάλυσης για ανθρακονημάτινες αεροτομές.

ELEMENT	SIMULATION	Thickness	plies	DISPLACEMENT	VON MISES STRESS - ELEMENTAL					
					PLY1	PLY2	PLY3	PLY4	PLY5	PLY6
naca_middle_front_wing	PLY BASED	1.5 mm	6*0.25 woven	0,961	12.1	7.080	10.82	7.787	12.54	8.975
						12.8	8.760	11.44	7.66	10.07
	ZONE BASED ALUMINIUM	6*0.25 woven	0,961	12.8	8.756	11.44	7.775	12.54	8.967	
				1,24	27.23					

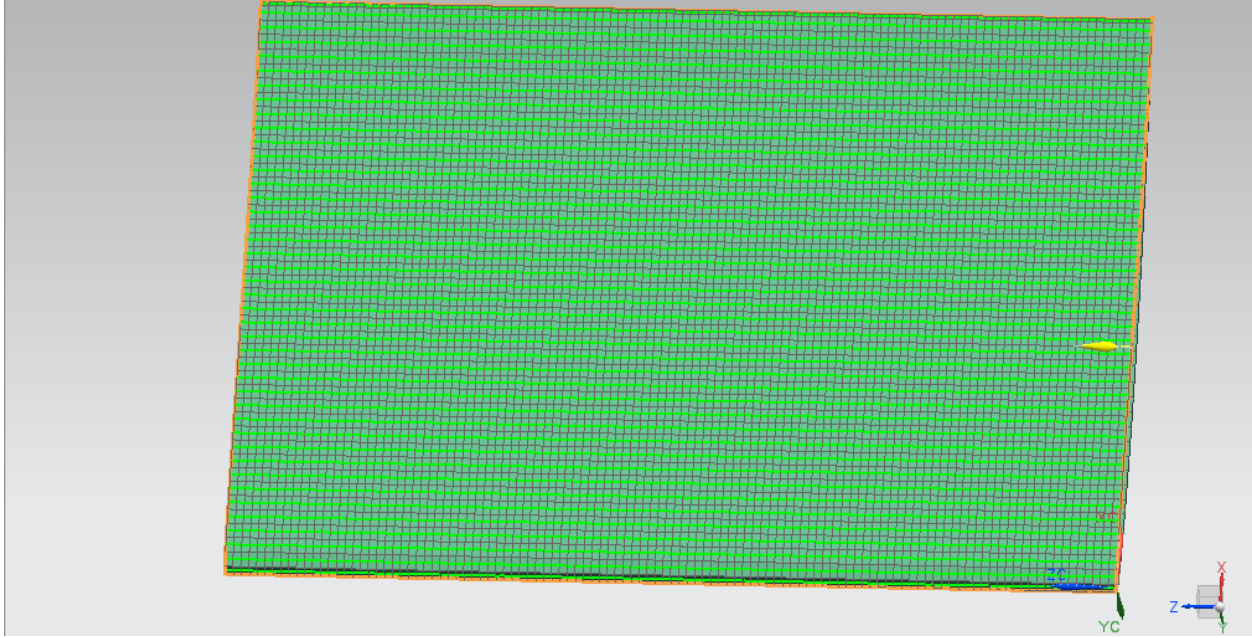
Πίνακας αντιστοιχίας των αποτελεσμάτων από ανάλυση αεροδυναμικού στοιχείου της εμπρός πτέρυγας μεταξύ ply based και zone based διαστρωματώσεων καθώς και των αποτελεσμάτων αλουμινίου. Στο ply based υπάρχουν 12 στρώσεις γιατί όπως είπαμε το πρόγραμμα εκτελεί ρεαλιστική διαστρωμάτωση με αλγόριθμο, η οποία γίνεται στο κάθε κομμάτι του καλουπιού (πάνω και κάτω).

MODEL		2d Carbon zone_based	
FORNT WING ELEMENTS		250N to 1 node loading	Aero loading at 120 kmh
1mm thness 1st_naca_custom_el	Stress (Mpa)	7,30E+05	
	Disp (mm)	9,40E+04	
1.5mm thness 1st_naca_custom_el	Stress (Mpa)	188,3 / 193,07 (ply based)	5,03 / 4,56 (ply based)
	Disp (mm)	9,3 / 8,78 (ply based)	0,292 / 0,293 (ply based)
1.5mm thness assembly	Stress (Mpa)	173,75 / 179,23 (ply based)	92,79 / 94,36 (ply based)
	Disp (mm)	9,6 / 9,97 (ply based)	3,94 / 3,96 (ply based)
REAR WING ELEMENTS			
assembly 1.5mm thness	Stress (Mpa)	76,63	55,21
	Disp (mm)	7,008	5,08

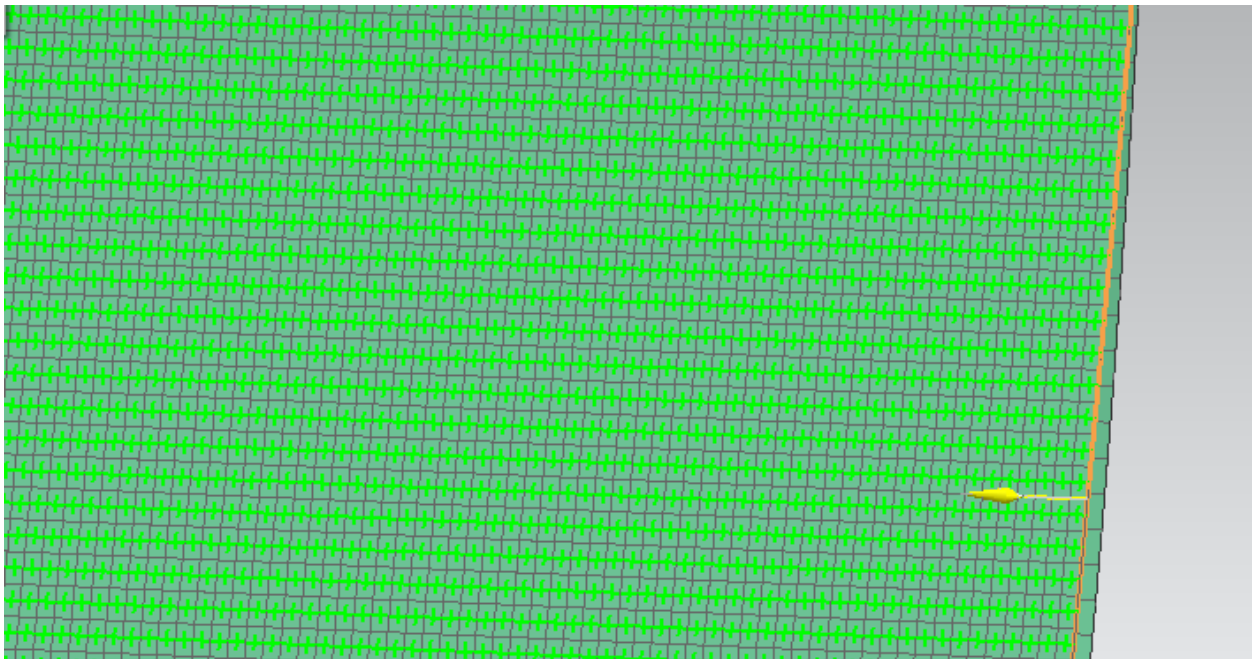
Πίνακας αποτελεσμάτων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για ανθρακονήματα

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)	Description
6	T300_woven_pdf_1	0,25	0	
5	T300_woven_pdf_1	0,25	45	
4	M46J_UD_pdf	0,16	0	
3	T300_woven_pdf_1	0,25	0	
2	T300_woven_pdf_1	0,25	45	
1	T300_woven_pdf_1	0,25	0	

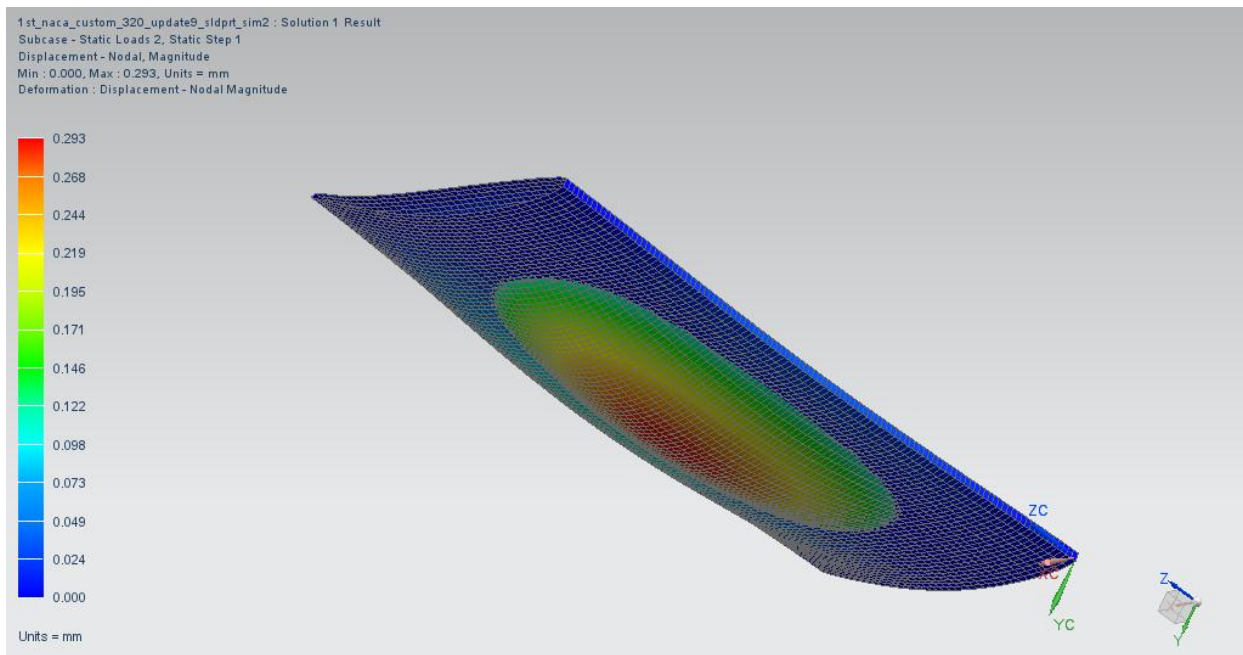
Πίνακας στρώσεων υφασμάτων ανθρακονημάτων για στοιχείο της εμπρός αεροτομής



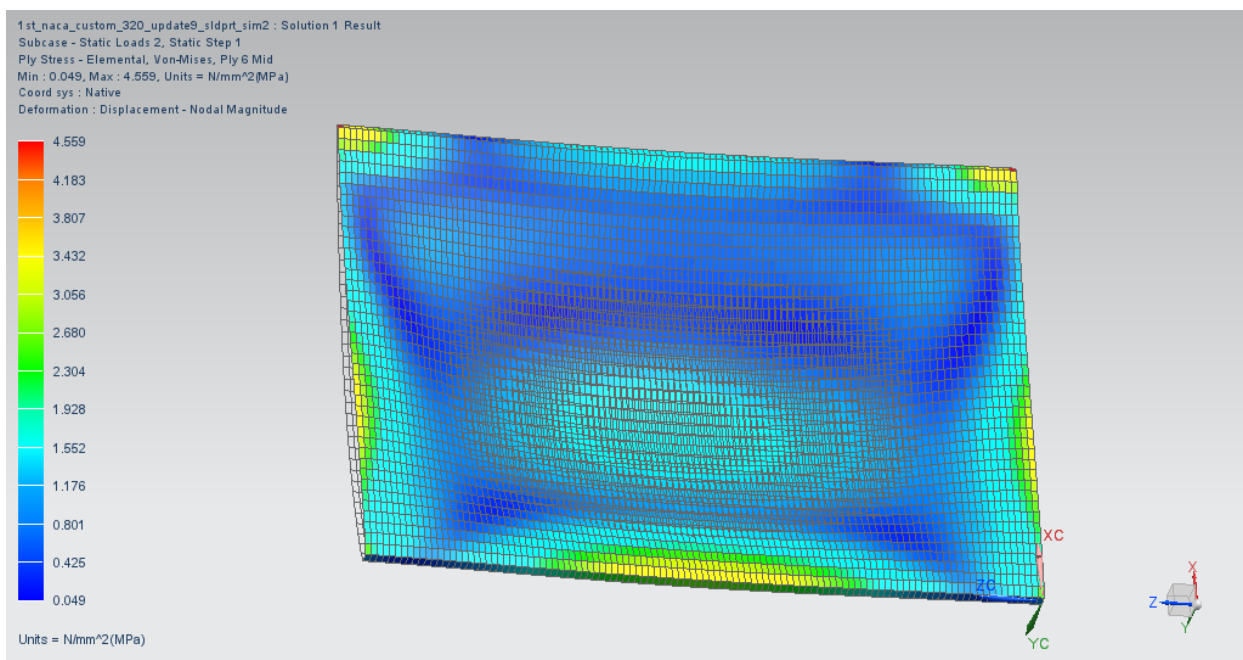
Εικόνα 37. Draping υφάσματος UD από τη μέθοδο global layer του λογισμικού



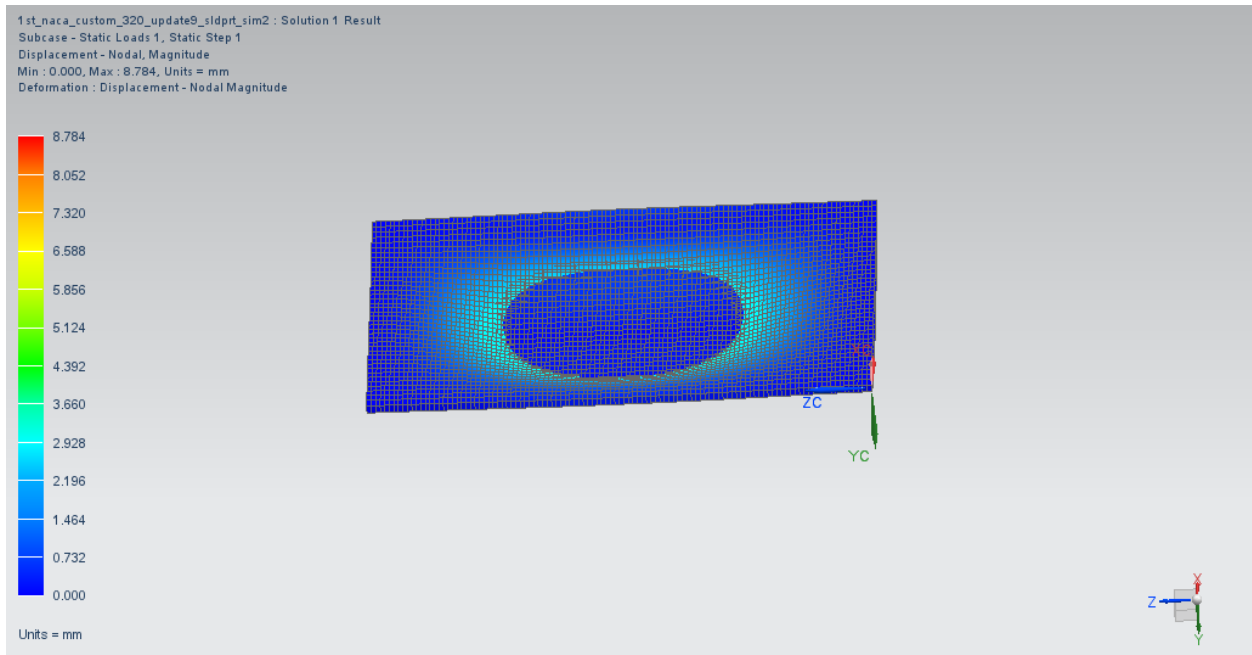
Εικόνα 38. Κοντινό στιγμιότυπο οδόνης από την φορά των ινών για woven ύφασμα. Με κίτρινο βελάκι φαίνεται το σημείο εκκίνησης και η φορά σκεπάσματος του καλουπιού με το ύφασμα



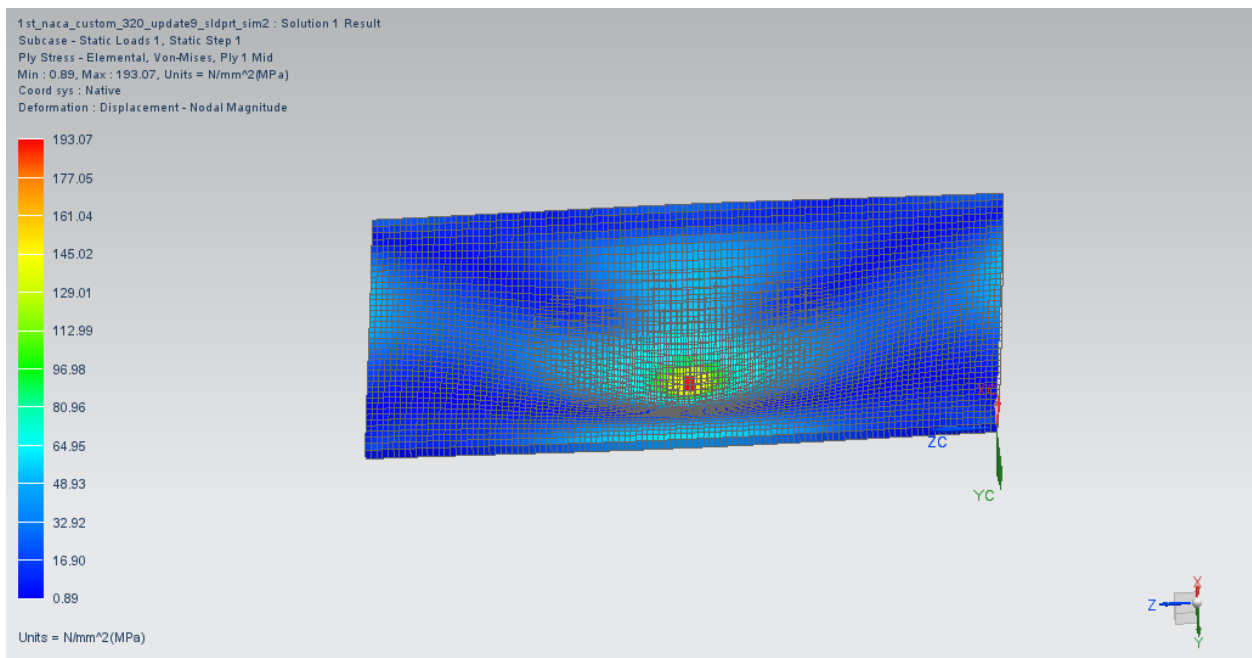
Εικόνα 39. Displacement για στοιχείο με ply based και αεροδυναμικά φορτία



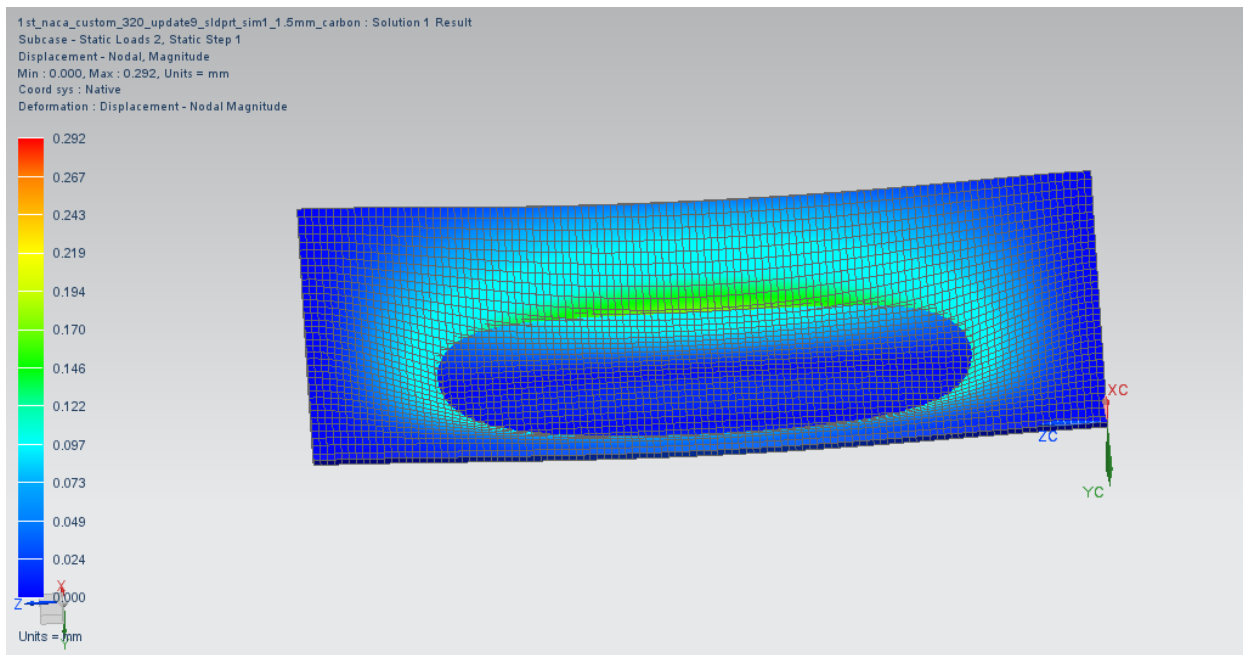
Εικόνα 40. Μέγιστο stress σε στρώση ανθρακονημάτινου υφάσματος για την ίδια φόρτιση



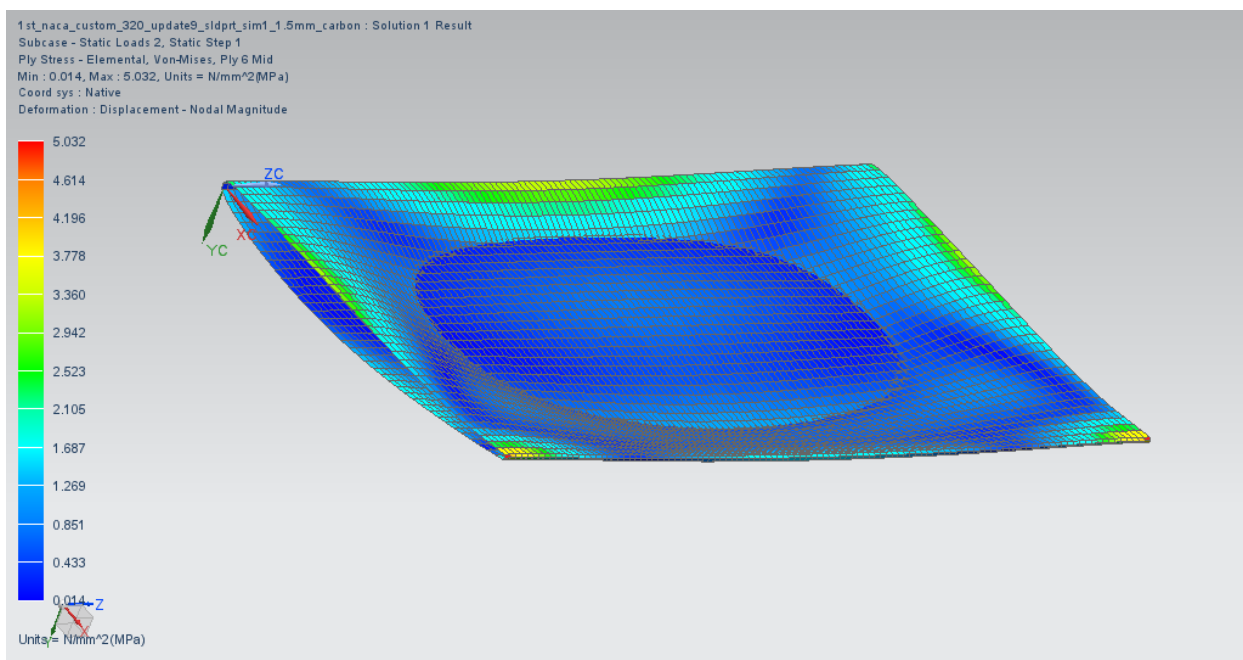
Εικόνα 41. Μέγιστο stress για ply based στο ίδιο στοιχείο με σημειακή φόρτιση 250N



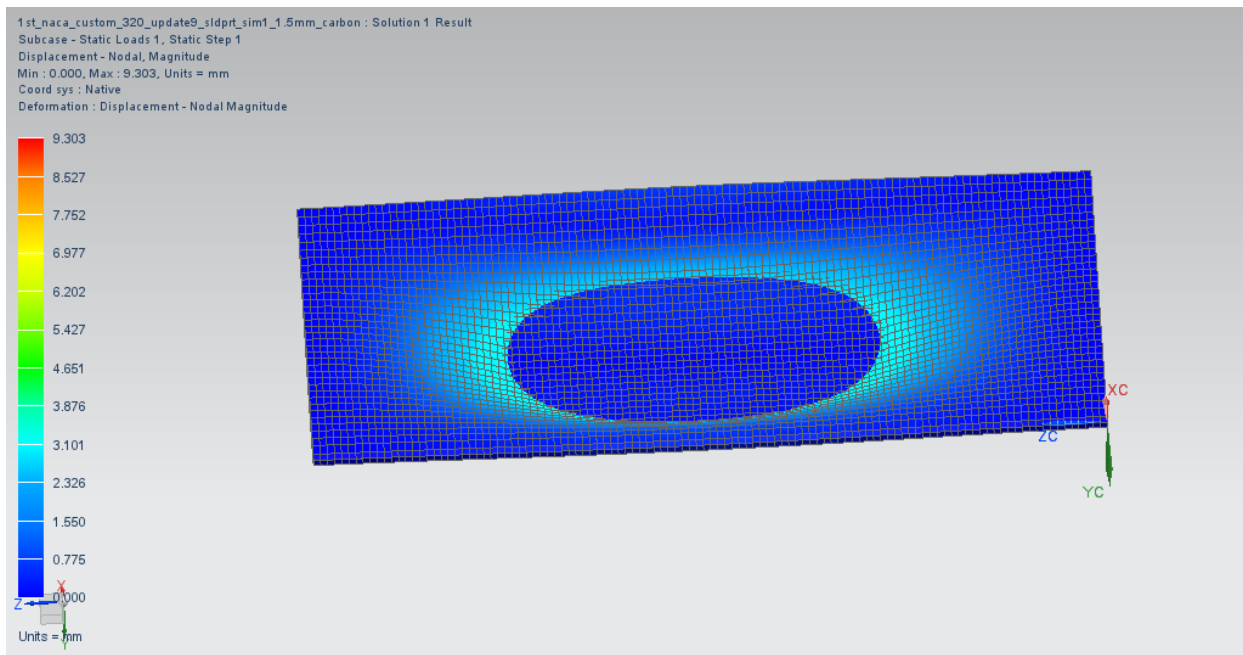
Εικόνα 42. Displacement για την ίδια περίπτωση όπως στην προηγούμενη φωτογραφία



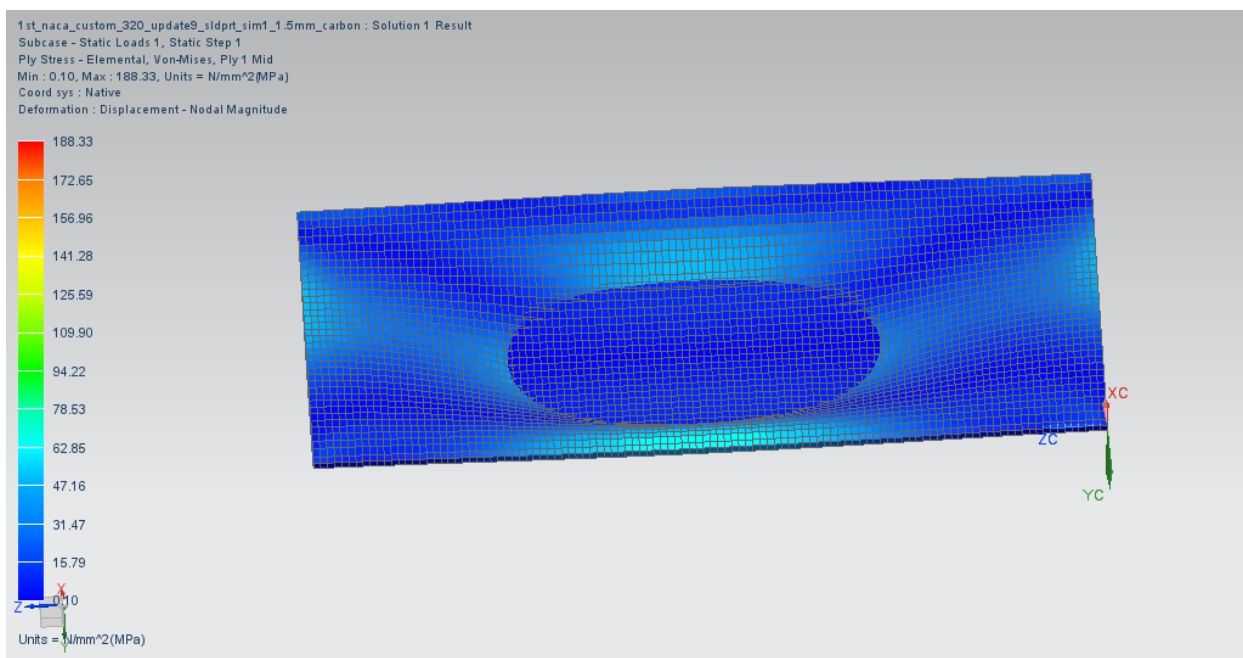
Εικόνα 43. Displacement για φόρτιση με βάση τα αεροδυναμικά φορτία στα 120km/h. zone based layer



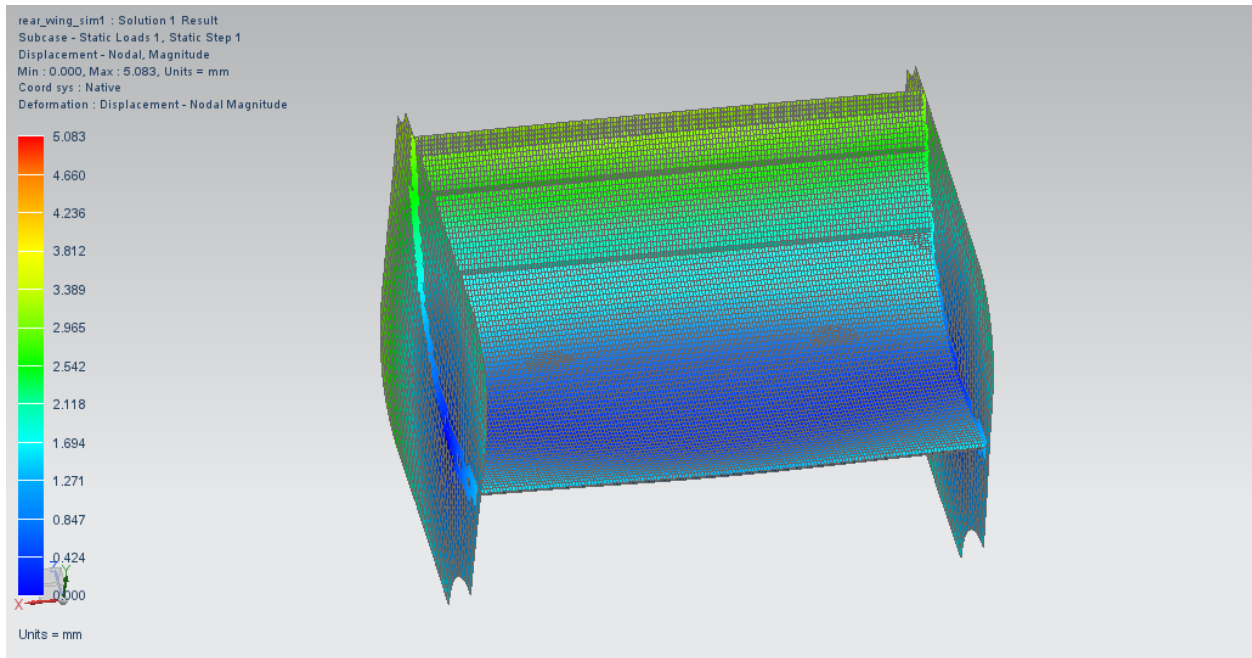
Εικόνα 44. Max stress per ply για την ίδια φόρτιση με προηγουμενως



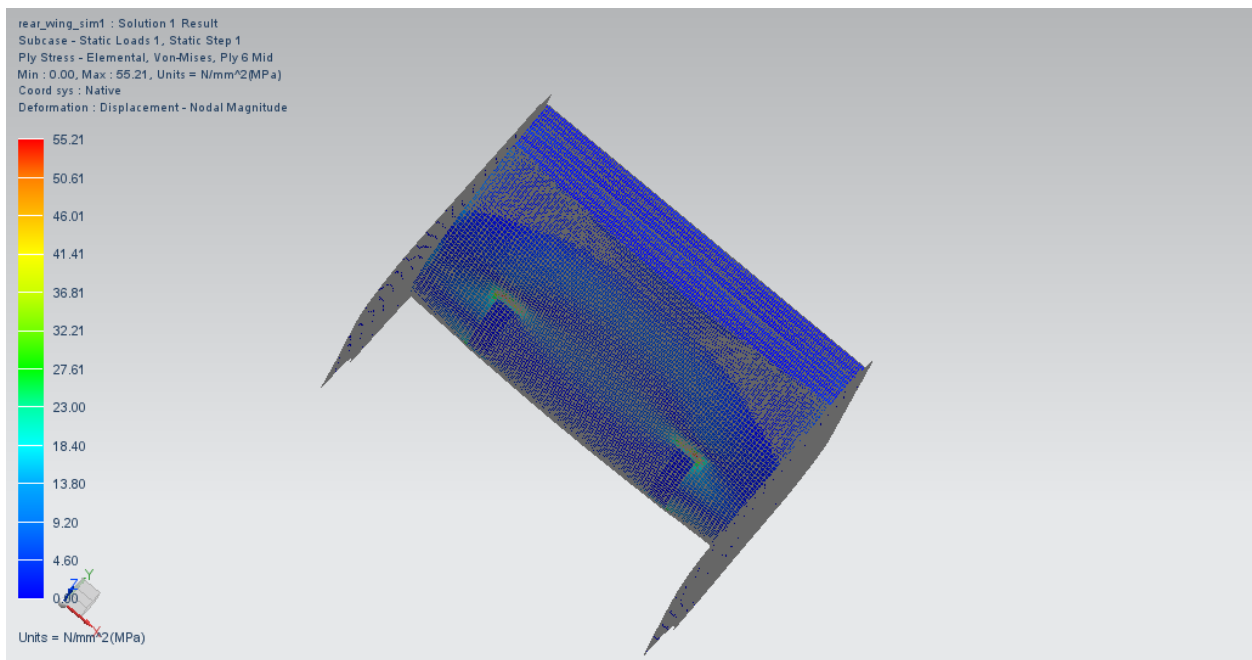
Εικόνα 45. Καταπόνηση στοιχείου για σημειακή δύναμη



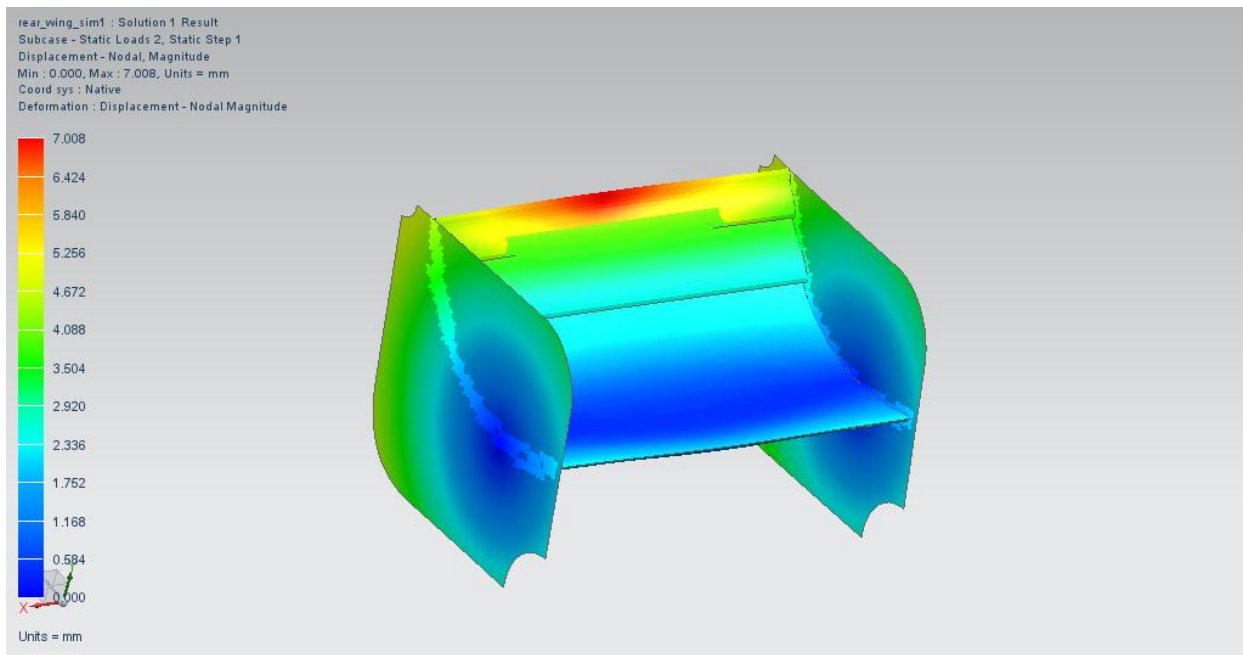
Εικόνα 46. Παραμόρφωση στοιχείου για σημειακή δύναμη



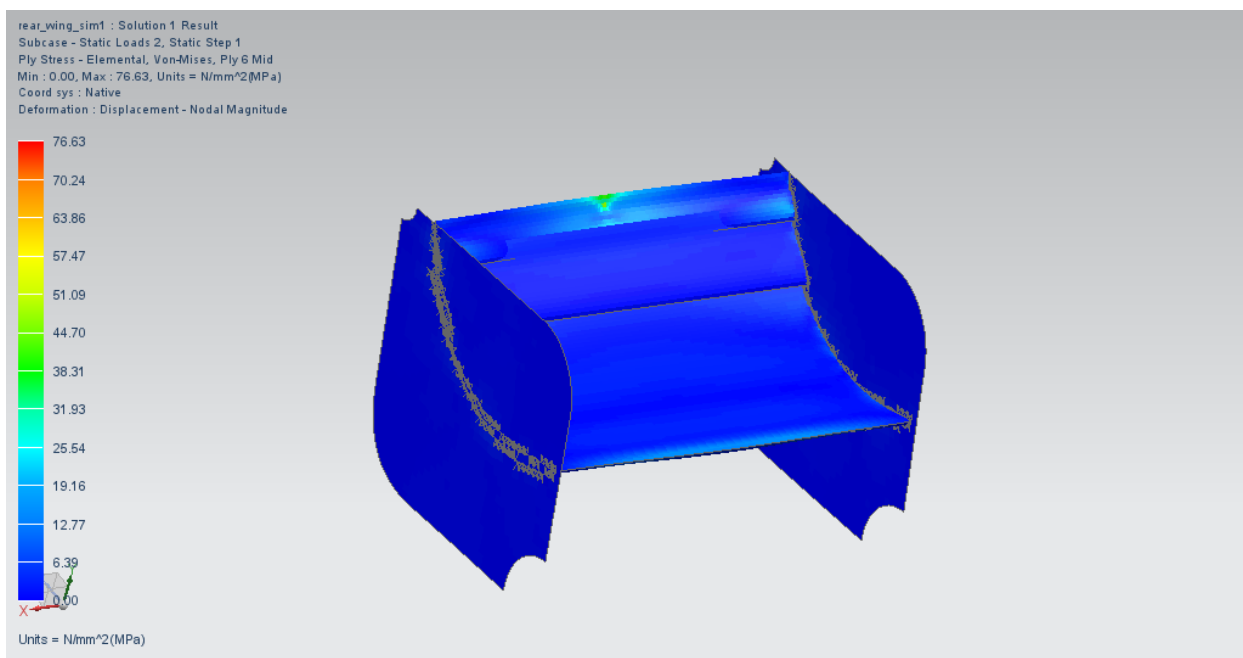
Εικόνα 47. Μέγιστη παραμόρφωση στην πίσω πτέρυγα για αεροδυναμικό φορτίο



Εικόνα 48. Μέγιστη καταπόνηση ανά στρώση για αεροδυναμικό φορτίο



Εικόνα 49. Maximum Displacement για σημειακή δύναμη 250N



Εικόνα 50. Μέγιστη καταπόνηση για την ίδια δύναμη

6 Κατασκευή

Το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας ήταν να αξιοποιήσουμε την όλη προεργασία που έχει γίνει πραγματοποιώντας τη κατασκευή των αεροτομών. Έχοντας κάνει σωτά όλη την προεργασία το τελευταίο βήμα είναι προκαθορισμένο. Με προσοχή στη λεπτομέρεια και την βοήθεια ενός πιο έμπειρου κατασκευαστή θα είχαμε ένα αρκετά καλό αποτέλεσμα βάση και τον προϋπολογισμό της όλης κατασκευής.

Το ύφασμα της επιλογής μας ήταν προεμποτισμένα υφάσματα άνθρακα πλεκτά καθώς και μονής κατεύθυνσης για διάφορους λόγους. Ένας από αυτούς είναι ότι πρόκειται για την πιο «καθαρή» και υγιεινή πρακτική κατασκευής ανθρακονημάτων τεμαχίων. Η διαδικασία αυτή δεν απαιτεί την ανάμιξη της ρητίνης με διαλύτες και στην συνέχεια με τα υφάσματα, μία διαδικασία που απαιτεί πολύ καλά αεριζόμενους χώρους και σίγουρα δεν πρόκειται για την πιο υγιεινή διαδικασία κατασκευής. Επίσης, λόγω της ρητίνης που είναι ακόμα σε υγρή μορφή, το ύφασμα κατά την τοποθέτηση του κολλάει λίγο στο καλούπι με αποτέλεσμα να κάνει την τοποθέτηση του με τον τρόπο και στα σημεία ακριβώς που θέλουμε πιο εύκολη και σίγουρη. Η διαδικασία της διαστρωμάτωσης αυτή είναι πολύ σημαντική, γιατί όταν τα υφάσματα που μπαίνουν στο καλούπι έχουν τομές ή παραμορφώσεις το τελικό αποτέλεσμα της αντοχής τους επηρεάζεται σημαντικά

Επίσης το γεγονός ότι το ύφασμα είναι προεμποτισμένο από το εργοστάσιο παραγωγής του με το κατάλληλο ποσοστό ρητίνης εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή αναλογία βάρους και αντοχής. Κάθε φορά που η μίξη αυτή δεν γίνεται από το εργοστάσιο, αλλά χειρωνακτικά χωρίς τα ίδια εργαλεία ακριβείας και την ίδια γνώση υπάρχει πλεόνασμα ρητίνης το οποίο συνήθως απλώς προσθέτει βάρος χωρίς κανένα όφελος. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα αυτό μπορεί να λειτουργεί και αρνητικά στη διαδικασία «στερεοποίησης» και «κιουραρίσματος» της κατασκευής. Ένας ακόμη λόγος είναι ότι τα στοιχεία που δίνουν ως τελικές ιδιότητες του υλικού είναι πολύ πιο κοντά στις πραγματικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου, μιας και ο ανθρώπινος παράγοντας εμπλέκεται σε λιγότερες διεργασίες. Επίσης το γεγονός ότι ο διδάκτωρας Αλέξανδρος Κιτσέλης είχε πραγματοποιήσει στο παρελθόν πειράματα με τα ίδια υλικά για να εξακριβώσει τις ιδιότητες των τελικών τεμαχίων είναι ένα ακόμη στοιχείο αυτοπεποίθησης για την τελική κατασκευή. Τέτοια πειράματα είναι σπάνια λόγω δυσκολίας πρόσβασης σε αντίστοιχους μηχανισμούς με εκείνους του εργαστηρίου του τομέα κατεργασιών καθώς και λόγω του κόστους των τεμαχίων που αστοχούν. Τα δεδομένα που είχαμε εκ των προτέρων ήταν πολύ σημαντικά για να τ απορρίψουμε. Τέλος το γεγονός ότι τα προεμποτισμένα υφάσματα και βασικά οι ρητίνες περνάνε από κύκλους θέρμανσης κάτω από πολύ υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις οδηγεί σε υλικά με πολύ καλές ιδιότητες, οι οποίες διαρκούν και με τον χρόνο και επηρεάζονται λιγότερο από εξωτερικούς παράγοντες στη συνέχεια, όπως θερμοκρασία κλπ.

Βεβαίως κάθε επιλογή, πέρα από θετικά δεν θα μπορούσε να μην έχει και τα αρνητικά της. Ορισμένα προβλήματα ή δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε με την συγκεκριμένη επιλογή των προεμποτισμένων υφασμάτων δεν ήταν ικανά αν αντισταθμίσουν τα στοιχεία που μας οδήγησαν εκεί. Παρόλαυτα η λύση του θετικού καλουπιού αποκλείστηκε λόγω της αδυναμίας του αφρού να αντέξει τη θερμοκρασία και την πίεση που χρειάζεται το προεμποτισμένο ύφασμα για να πετύχει τις ιδιότητες του. Βεβαίως η δυσκολία αυτή μας οδήγησε στην καλύτερη λύση των ξύλινων θηλυκών καλουπιών, η οποία όμως ήταν πιο χρονοβόρα. Τελικώς όμως προλάβσαμε τις ημερομηνίες που έπρεπε και δημιουργήσαμε και ένα προηγούμενο στην ομάδα που θα βοηθήσει σε μελλοντικές κατασκευές.

Παρακάτω θα δούμε ότι με το συγκεκριμένο καλούπι από mdf παρουσιάστηκαν και άλλα προβλήματα, τα οποία δεν προβλέψαμε και δυσκόλεψαν αρκετά την κατασκευαστική διαδικασία. Το mdf είναι ένα υλικό το οποίο λόγω της μικρής πυκνότητας και σκληρότητας, έχει μεγάλη απορροφητικότητα. Αυτό σημαίνει ότι όταν βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο με υγρασία, η υγρασία αυτή εισχωρεί στο εσωτερικό του, η οποία κάνει την μεταφορά θερμότητας μία πού δύσκολη διαδικασία. Εκεί οφείλεται η δυσκολία «ψησίματος» κάποιων κάρμπων τεμαχίων, καθώς ακόμα και μετά από πολλές ώρες του καλουπιού με την διαστρωμάτωση μέσα στον φούρνο, το φύλλα άνθρακα δεν είχαν αποκτήσει τη θερμοκρασία που χρειαζόταν.

Κατά την κατασκευαστική διαδικασία δημιουργήθηκαν πλάνα για τον κάθε κύκλο ψησίματος, ανάλογα με τα τεμάχια που βρίσκονταν μέσα στον φούρνο. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν μετρητικά συστήματα ώστε να μπορούμε να γνωρίζουμε την θερμοκρασία των υφασμάτων στο εσωτερικό των καλουπιών και να παρακολουθούμε την διαδικασία του ψησίματος βγάζοντας χρήσιμα συμπεράσματα.. Έτσι ακόμα και για τα στοιχεία που χρειάστηκε να ξαναγίνει η διαδικασία αυτή από την αρχή λόγω αποτυχημένης πρώτης φοράς τα δεδομένα που παίρναμε ήταν σημαντικά ώστε να μην έχουμε ξανά το ίδιο αποτέλεσμα.

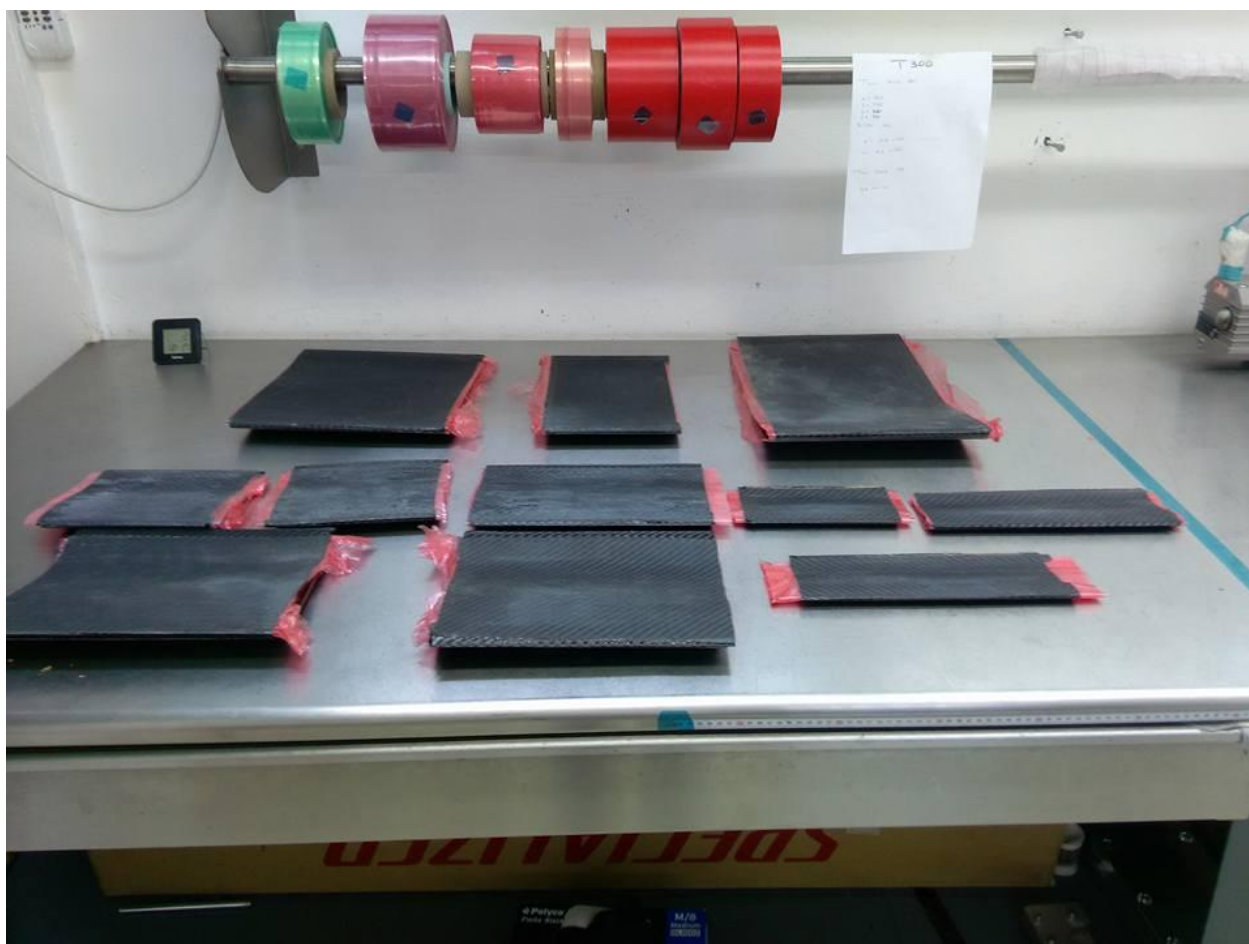
Άλλα πρακτικά προβλήματα που αντιμετωπίσαμε αλλά δεν ευθύνονται στην επιλογή της μεθόδου ήταν με την διαδικασία της τοποθέτης σακούλας ώστε να επιτευχθεί κενό (υποπίεση) και να γίνει το curing των στοιχείων. Ιδιαίτερα στα πολύ μεγάλα στοιχεία -κάποια καλούπια με δυσκολία χωρούσαν μέσα στον φούρνο του εργαστηρίου, ο οποίος έχει ύψος 2 μέτρα περίπου- η προσπάθεια μόνωσης της σακούλας αυτής ήταν πολύ δύσκολη διαδικασία. Επίσης λόγω bridging της σακούλας, το οποίο είναι πρόβλημα εφαρμογής, όπου ουσιαστικά κάποιο μέρος της σακούλας εφελκύεται υπερβολικά γιατί δεν πατάει σε κάποιο σημείο η σακούλα είχε την τάση να σκάει. Αυτό σημαίνει ότι η όλη διαδικασία της μόνωσης αυτής έπρεπε να ξαναγίνει από την αρχή. Αυτό ήταν ακόμη χειρότερο βέβαια όταν συνέβη εντός του φούρνου και αφού είχε περάσει αρκετή ώρα ψησίματος χωρίς μώς να έχουν πάρει τα υφάσματα τις ιδιότητές τους. Αυτό σήμαινε ότι η όλη διαδικασία έπρεπε να ξαναγίνει από την αρχή αρκετά βήματα πίσω.

Τα αναλώσιμα που χρειάστηκαν για την κατασκευή αυτή επίσης είχαν ένα κόστος παραπάνω από ότι αν δεν χρειαζόταν φούρνος. Προμηθευτήκαμε σωληνάκια μακρυνά για να δημιουργούμε υποπίεση από έξω από τον φούρνο. Σακούλες κενού, υφάσματα αναπνοής, τσίχλα για μόνωση, μανόμετρα για έλεγχο της πίεσης, αισθητήρες θερμοκρασίας, οι οποίοι είχαν κολληθεί πάνω στο τεμάχιο μέσα στον φούρνο, ώστε να γνωρίζουμε την θερμοκρασία ήταν μερικά από τα υλικά.

Στη συνέχεια ακολουθούν φωτογραφίες από την διαδικασία κατασκευής των αεροτομών, αλλά και την ίδια το κατασκευασμένο αεροδυναμικό πακέτα. Οι αεροτομές μετά την κατασκευή τους γεμίστηκαν με αφρό πολυουρεθάνης, κάτι που ενίσχυσε την αντοχή τους, αλλά και με τα κατάλληλα ίντερτς έγινε η κόλληση και συγκράτηση με βιδες των στοιχείων μεταξύ τους.



Εικόνα 51. Στοιχεία εροτομών μόλις έχουν αποκολληθεί από τα αντίστοιχα καλούπια



Εικόνα 52. Η εσωτερική σακούλα ενώνεται μετην εξωτερική και δημιουργώντας κενό πείχουν τις στρώσεις ανθρακονημάτων πάνω στα καλούπια



Εικόνα 53. Καλούπια με στρώσεις έτοιμα για ψήσιμο. Φαίνεται η πλήρης διάταξη που χρησιμοποιήσαμε



Εικόνα 54. Τρύπες στον φούρνο για να περνάνε σα σωληνάκια που πάνε στην αντλία κενού. Φαίνεται το μανόμετρο με το οποίο ελέγχουμε την πίεση στο εσωτερικό του φούρνου



Εικόνα 55. Καλούπια αεροτομών έτοιμα για curing. Ο αέρας έχει απορροφηθεί από έξω για να δοκιμαστούν οι σακούλες. Εξωτερική σακούλα ενώνεται με την εσωτερική για να "πατήσουν" τα ανθρακονήματα στο καλούπι. Ενδιάμεσα δεν υπάρχει σακούλα



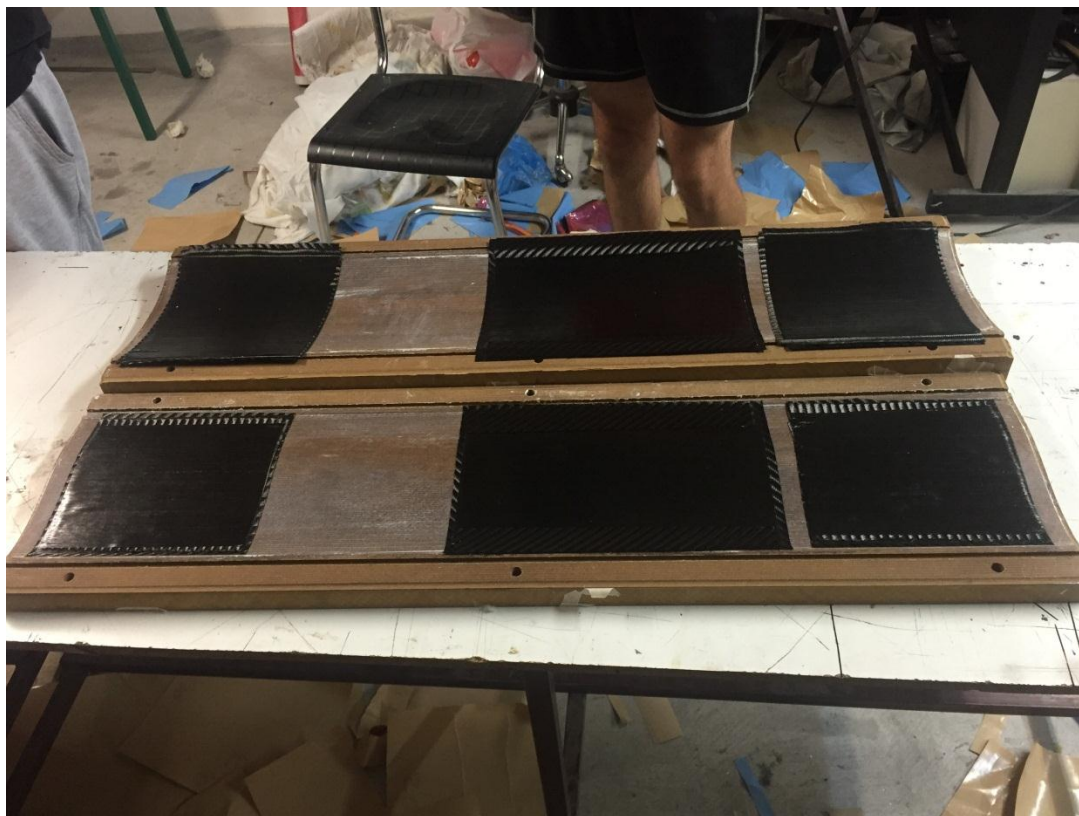
Εικόνα 56. Το καλούπι του diffuser μπορούσε να κατασκευαστεί από απλές λαμαρίνες αφού δεν είχε καμπύλες



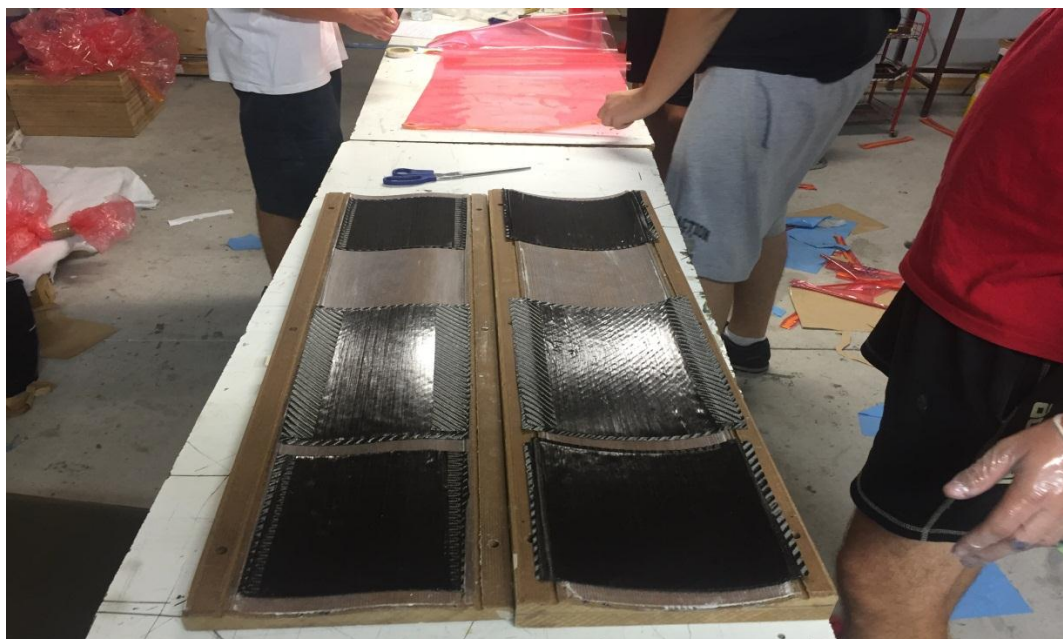
Εικόνα 57. Lay up σε siderpod και diffuser



Εικόνα 58. Το siderpod λόγω σχήματος ήταν μάλλον το πιο δύσκολο κομμάτι να αποκολληθεί



Εικόνα 59. Πάνω και κάτω καλούπι κεντράτονται για να ακουμπήσουν σωστά οι διαστρωματώσεις



Εικόνα 60. Χρησιμοποιώντας ίδια προφίλ αεροτομών σε διάφορα σημεία μπορούν να κατασκευάζονται παραπάνω από ένα τεμάχια σε κάθε καλούπι



Εικόνα 61. Πάνω και κάτω καλούπι ενώνονται και κεντράρονται με τις βίδες, ενώ η εσωτερική σακούλα τοποθετείται απλά και θα ενωθεί με την εξωτερική πριν το ψήσιμο



Εικόνα 62. Πίσω αεροτομή έτοιμη



Εικόνα 63. Εμπρός αεροτομή και side bodywings έτοιμα



Εικόνα 64. Πλήρες αεροδυναμικό πακέτο πάνω στο αυτοκίνητο

7 Παράρτημα

Ιδιότητες των υλικών, από τους ίδιες της εταιρίες κατασκευής τους.

Υφασμα M46J

TECHNICAL DATA SHEET No. CFA-015		TORAYCA® M46J DATA SHEET		
MJ type high modulus fiber with enhanced tensile and compressive strength over M series fibers. Mainly used for premium sporting goods, aerospace, and industrial applications.				
F I B E R P R O P E R T I E S				
		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		611 ksi	4,210 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		63.3 Msi	436 GPa	TY-030B-01
Strain		1.0 %	1.0 %	TY-030B-01
Density		0.066 lbs/in ³	1.84 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.0E-04 in.	5 μm	
Yield	6K	6,679 ft/lbs	223 g/1000m	TY-030B-03
	12K	3,347 ft/lbs	445 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	50A, 50B		1.0 %	TY-030B-05
	Twist	Twisted, Untwisted		
F U N C T I O N A L P R O P E R T I E S				
CTE			-0.9 α·10 ⁻⁶ /°C	
Specific Heat			0.17 Cal/g·°C	
Thermal Conductivity			0.202 Cal/cm·s·°C	
Electric Resistivity			0.9 x 10 ⁻³ Ω·cm	
Chemical Composition: Carbon			>99 %	
Na + K			<50 ppm	
C O M P O S I T E P R O P E R T I E S *				
Tensile Strength		320 ksi	2,210 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus		38.5 Msi	265 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain		0.8 %	0.8 %	ASTM D-3039
Compressive Strength		155 ksi	1,080 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength		210 ksi	1,420 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus		32.0 Msi	220 GPa	ASTM D-790
ILSS		11.5 ksi	8 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength		7.0 ksi	47 MPa	ASTM D-3039
* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.				

TORAYCA®
T300 DATA SHEET

Baseline carbon fiber used in aerospace applications. Has 30 year production history and is known for its balanced composite properties, high quality, consistency, reliability and supplyability.

FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		512 ksi	3,530 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		1.5 %	1.5 %	TY-030B-01
Density		0.064 lbs/in ³	1.76 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-030B-03
	3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-030B-03
	6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	40A, 40B		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	40D		0.7 %	TY-030B-05
	50A, 50B		1.0 %	TY-030B-05
Twist		Twisted, Untwisted, or Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.41 α·10 ⁻⁶ /°C
Specific Heat	0.19 Cal/g·°C
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm·s·°C
Electric Resistivity	1.7 x 10 ⁻³ Ω·cm
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	270 ksi	1,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	260 ksi	1,810 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	10 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.0 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

Οι ιδιότητες των υλικών στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε είναι οι εξής:

M46 UD

Material : M46J_UD_
Parent Material : M46J_UD
Parent Material Library : M46J_UD
Parent Material Library Version : 1.0
Material properties:
Locally defined material
Material Type: Orthotropic
Label: 2
Alternate Name :
Category :
Sub-Category :
Mass Density (RHO) : 1.6 kg/mm³
===== Mechanical
Young's Modulus (E) : 175000 N/mm²(MPa)
Young's Modulus (E2) : 8000 N/mm²(MPa)
Young's Modulus (E3) : Not defined
: Major Poisson's Ratio
Poisson's Ratio (NU) : 0.3
Poisson's Ratio (NU23) : Not defined
Poisson's Ratio (NU13) : Not defined
Shear Modulus (G) : 5000 N/mm²(MPa)
Shear Modulus (G13) : Not defined
Shear Modulus (G23) : Not defined
Structural Damping Coefficient (GE) : Not defined
Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain
Stress-Strain (H) : Not defined
Type of Nonlinearity (TYPE) : PLASTIC
Yield Function Criterion (YF) : von Mises
Hardening Rule (HR) : Isotropic
Initial Yield Point (LIMIT1) : Not defined
Initial Friction Angle (LIMIT2) : Not defined
===== Strength
Yield Strength : Not defined
Yield Strength - 2 : Not defined
Yield Strength - 12 : Not defined
Ultimate Tensile Strength : 1000 N/mm²(MPa)
Ultimate Tensile Strength 2 : 40 N/mm²(MPa)
Ultimate Tensile Strength 12 : Not defined
Tsai-Wu Interaction Coefficient (F12): Not defined
Max Stress Tension (ST) : 1000 N/mm²(MPa)
Tension (ST2) : 40 N/mm²(MPa)
Tension (ST3) : Not defined
Max Stress Compression (SC) : 850 N/mm²(MPa)
Compression (SC2) : 200 N/mm²(MPa)
Compression (SC3) : Not defined
Max Stress Shear (SS) : 60 N/mm²(MPa)
Shear (S13) : Not defined
Shear (S23) : Not defined
Max Strain Tension (XT) : 0.55 mm/mm
Tension (XT2) : 0.5 mm/mm
Tension (XT3) : Not defined
Max Strain Compression (XC) : 0.45 mm/mm

Compression (XC2) : 2.5 mm/mm 138
 Compression (XC3) : Not defined
 Max Strain Shear (XS) : 1.2 mm/mm
 Shear (X13) : Not defined
 Shear (X23) : Not defined
 ===== Durability
 Stress-Life Data : Field
 Stress Life Data Field2 : Stress Life Data Field2:
 Stress Amplitude - 1 (default value: 1425 N/mm²(MPa))
 Stress Amplitude - 2 (default value: 675 N/mm²(MPa))
 Stress Amplitude - 12 (default value: 675 N/mm²(MPa))
 Strain-Life Data : Expression
 Fatigue Ductility Coefficient : Not defined
 Fatigue Ductility Coefficient - 2 : Not defined
 Fatigue Ductility Coefficient - 12 : Not defined
 Fatigue Ductility Exponent : Not defined
 Fatigue Ductility Exponent - 2 : Not defined
 Fatigue Ductility Exponent - 12 : Not defined
 Cyclic Yield Strength : Not defined
 Cyclic Strength Coefficient : Not defined
 Cyclic Strain Hardening Exponent : Not defined
 Fatigue Limit Strength in Bending : Not defined
 Fatigue Limit Strength in Torsion : Not defined
 Percent Reduction in Area : 0
 ===== Thermal/Electrical
 Temperature (TREF) : Not defined
 Specific Heat (CP) : Not defined
 Thermal Expansion Coefficient (A) : Not defined
 Thermal Expansion (A2) : Not defined
 Thermal Expansion (A3) : Not defined
 Thermal Conductivity (K) : Not defined
 Thermal Conductivity (K2) : Not defined
 Thermal Conductivity (K3) : Not defined
 Latent Heat (L) : Not defined
 Phase Change Temperature : Not defined
 Phase Change Temperature Range : Not defined
 Specific Heat Above Phase Change : Not defined
 Resistivity : Not defined
 Scattering : Not defined
 Extinction : Not defined
 Scattering : Not defined
 Extinction : Not defined
 ===== Creep
 : None
 ===== Viscoelasticity
 Domain : None
 ===== Visual
 Crosshatch Pattern :
 ===== Damage
 : None
 ===== Stress Life Data Field2:
 Stress Amplitude - 1 (default value: 1425 N/mm²(MPa))
 Stress Amplitude - 2 (default value: 675 N/mm²(MPa))
 Stress Amplitude - 12 (default value: 675 N/mm²(MPa))
 0 1600 800 800

M46 wooven

Library Material : M46J_woovenCategory
Library Reference M46J_wooven_pdf.xml
Material Type : OrthotropicMaterial
Version : 1.0
Alternate Name : Not Defined
Mass Density (RHO) : 1.6g/cm³
===== Mechanical
Young's Modulus (E) : 85000N/mm²(MPa)
Young's Modulus (E2) : 85000N/mm²(MPa)
: 0
Poisson's Ratio (NU) : 0.1
Shear Modulus (G) : 5000N/mm²(MPa)
Stress-Strain Input Data Type : 0
Type of Nonlinearity (TYPE) : 1
Yield Function Criterion (YF) : 1
Hardening Rule (HR) : 1
===== Strength
Tension (ST) : 350N/mm²(MPa)
Tension (ST2) : 350N/mm²(MPa)
Compression (SC) : 150N/mm²(MPa)
Compression (SC2) : 150N/mm²(MPa)
Shear (SS) : 35N/mm²(MPa)
Tension (XT) : 0.4mm/mm
Tension (XT2) : 0.4mm/mm
Compression (XC) : 0.15mm/mm
Compression (XC2) : 0.15mm/mm
Shear (XS) : 0.7mm/mm
===== Durability
Stress-Life Data : 0
Strain-Life Data : 0
Percent Reduction in Area : 0
===== Creep
: 0
===== Viscoelasticity
Domain : 0
===== Visual
Crosshatch Pattern : Not Defined
===== Damage
: 3 140

T300 wooven

Library Material : T300_wooven_
Category
Library Reference T300_wooven_pdf_durability_1.xml
Material Type : OrthotropicMaterial
Version : 1.0
Alternate Name : Not Defined
Mass Density (RHO) : 1.44g/cm³
===== Mechanical
Young's Modulus (E) : 70000N/mm² (MPa)
Young's Modulus (E2) : 70000N/mm² (MPa)
Young's Modulus (E3) : 7000N/mm² (MPa)
: 0
Poisson's Ratio (NU) : 0.1
Poisson's Ratio (NU23) : 0.1
Poisson's Ratio (NU13) : 0.1
Shear Modulus (G) : 5000N/mm² (MPa)
Shear Modulus (G13) : 5000N/mm² (MPa)
Shear Modulus (G23) : 5000N/mm² (MPa)
Stress-Strain Input Data Type : 0
Type of Nonlinearity (TYPE) : 1
Yield Function Criterion (YF) : 1
Hardening Rule (HR) : 1
===== Strength
Tension (ST) : 600N/mm² (MPa)
Tension (ST2) : 600N/mm² (MPa)
Tension (ST3) : 35N/mm² (MPa)
Compression (SC) : 570N/mm² (MPa)
Compression (SC2) : 570N/mm² (MPa)
Compression (SC3) : 35N/mm² (MPa)
Shear (SS) : 90N/mm² (MPa)
Tension (XT) : 0.85mm/mm
Tension (XT2) : 0.85mm/mm
Compression (XC) : 0.8mm/mm
Compression (XC2) : 0.8mm/mm
Shear (XS) : 0.8mm/mm
===== Durability
Stress-Life Data : 1
Strain-Life Data : 0
Percent Reduction in Area : 0
===== Creep
: 0
===== Viscoelasticity
Domain : 0
===== Visual
Crosshatch Pattern : Not Defined
===== Damage
: 3 141

T700 UD

Library Material : T700 UD0_
Category
Library Reference T700 UD0_pdf_durability.xml
Material Type : OrthotropicMaterial
Version : 1.0
Alternate Name : Not Defined
Mass Density (RHO) : 1.39kg/mm³
===== Mechanical
Young's Modulus (E) : 135000N/mm² (MPa)
Young's Modulus (E2) : 10000N/mm² (MPa)
Young's Modulus (E3) : 10000N/mm² (MPa)
: 0
Poisson's Ratio (NU) : 0.3
Poisson's Ratio (NU23) : 0.3
Poisson's Ratio (NU13) : 0.3
Shear Modulus (G) : 5000N/mm² (MPa)
Shear Modulus (G13) : 5000N/mm² (MPa)
Shear Modulus (G23) : 5000N/mm² (MPa)
Stress-Strain Input Data Type : 0
Type of Nonlinearity (TYPE) : 1
Yield Function Criterion (YF) : 1
Hardening Rule (HR) : 1
===== Strength
Tension (ST) : 1500N/mm² (MPa)
Tension (ST2) : 50N/mm² (MPa)
Tension (ST3) : 30N/mm² (MPa)
Compression (SC) : 1200N/mm² (MPa)
Compression (SC2) : 250N/mm² (MPa)
Compression (SC3) : 30N/mm² (MPa)
Shear (SS) : 70N/mm² (MPa)
Tension (XT) : 1.05mm/mm
Tension (XT2) : 0.5mm/mm
Compression (XC) : 0.85mm/mm
Compression (XC2) : 2.5mm/mm
Shear (XS) : 1.4mm/mm
===== Durability
Stress-Life Data : 1
Strain-Life Data : 0
Percent Reduction in Area : 0
===== Creep
: 0
===== Viscoelasticity
Domain : 0
===== Visual
Crosshatch Pattern : Not Defined
===== Damage
: 3 142

Aluminum 7075

Library Material : aluminum 7075-T6
Category
Library Reference aluminum 7075-T6_1_2_2.xml
Material Type : IsotropicMaterial
Version : 1.0
Alternate Name : Not Defined
Mass Density (RHO) : 2.81g/cm³
===== Mechanical
Young's Modulus (E) : 71700N/mm²(MPa)
: 0
Poisson's Ratio (NU) : 0.33
Shear Modulus (G) : 26900N/mm²(MPa)
Stress-Strain Input Data Type : 0
Stress-Strain (H) : Tabular Data:
strain stress
mm/mm N/mm²(MPa)
0.00524 379
0.00542 390
0.0056 400
0.00579 410
0.00603 421
0.00629 431
0.00659 441
0.00691 452
0.00728 462
0.0077 472
0.00816 483
0.00865 493
0.00902 500
0.00943 507
Type of Nonlinearity (TYPE) : 1
Yield Function Criterion (YF) : 1
Hardening Rule (HR) : 1
Initial Yield Point (LIMIT1) : 379N/mm²(MPa)
===== Strength
Yield Strength : Tabular Data:
temperature stress
C N/mm²(MPa)
371 32
316 45
260 62
204 87
149 186
100 448
24 503
-28 517
-80 545
-196 634
Ultimate Tensile Strength : Tabular Data:
temperature stress
C N/mm²(MPa)
371 41
316 55
260 76 143

204 110
149 214
100 483
24 572
-28 593
-80 621
-196 703
=====
Durability
Stress-Life Data : 0
Strain-Life Data : 0
Percent Reduction in Area : 0
=====
Thermal/Electrical
Temperature (TREF) : 21C
Thermal Expansion Coefficient (A) : 2.32e-0051/C
Thermal Conductivity (K) : 130W/mm-C
Specific Heat (CP) : 960J/kg-K
Phase Change Temperature : 477C
=====
Creep
: 0
=====
Viscoelasticity
Domain : 0
=====
Visual
Crosshatch Pattern : Not Defined
=====
Miscellaneous
Fixed Stock Thickness : 0
Adhesive : Not Defined

8 Βιβλιογραφία

- 1) Σημειώσεις μαθήματος Προηγμένα υλικά Δημήτριος Μανωλάκος
- 2) Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά Δημήτρης Ι. Παντελής
- 3) Milliken, w., F., Milliken, D., L., "Race Car Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, Inc., 1995.
- 4) Σχεδιασμός και κατασκευή ανθρακονημάτινου τιμονιού αγωνιστικού ποδηλάτου - Μάρκος Κασιόπης Επιβλέπων Καθηγητής Ε.Μ.Π. Κος Δημ. Μανωλάκος
- 5) NX Laminate Composites Student Guide October, 2011 MT15029-s-nx8
- 6) Fatigue of Fiber-reinforced Composites Anastasios P. Vassilopoulos • Thomas Keller
- 7) Racecar: Searching for the Limit in Formula SAE, Matt Brown
- 8) History of Formula Student Competition, Formula SAE organization
- 9) An Approach to Using Finite Element Models to Predict Suspension Member Loads in a Formula SAE Vehicle, Lane Thomas Borg
- 10) Μηχανική των υλικών ελαστικότητα αντοχή, Γ.Α. Παπαδόπουλος, Β.Γ. Βαδαλούκα
- 11) 2016 Formula SAE Rules

Ιστοσελίδες

<http://www.torayca.com>

<http://www.carbonfiber.gr.jp>

<http://www.wikipedia.com>

<http://www.advanced-composites.co.uk/>