
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΛΑΚΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ
ΜΕ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ

ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ – ΣΩΤΗΡΙΑΣ ΔΟΥΚΑ

08102001

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ Ν.

ΑΘΗΝΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2009

Ευχαριστίες

Για τη βοήθεια και συμπαράσταση που μου έδειξαν για την ολοκλήρωση της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, και ιδιαίτερα τους κυρίους Θανάση Μαρκουλή και Χάρη Ξάνθη, για τη συμβολή τους στη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών

Τον κύριο Κωνσταντίνο Ανυφαντή, Υ.Δ. της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, για τη συμβολή του στη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, και τις συμβουλές και καθοδήγησή του για την μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία

Τον συμφοιτητή μου Άρη Πάντο, για τις πολύ σημαντικές πληροφορίες που μου παρείχε, για την ολοκλήρωση της εργασίας

Τέλος, τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Νικόλαο Τσούβαλη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών για τις συμβουλές και καθοδήγηση που έδωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, για την υπομονή που έδειξε μέχρι αυτή να ολοκληρωθεί και για την εμπειρία που αποκόμισα από αυτή τη συνεργασία.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν πόνημα αποτελεί τη διπλωματική εργασία της φοιτήτριας Χριστίνας – Σωτηρίας Δούκα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εργασία διεξήχθη το διάστημα Ιούνιος 2007 – Απρίλιος 2009, στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής, υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή Ν. Τσούβαλη.

Η εργασία ασχολείται με τη πειραματική και αριθμητική ανάλυση λυγισμού πλακών από σύνθετα υλικά, στις οποίες κατά την κατασκευή τους σκόπιμα είχαν προστεθεί γεωμετρικές ατέλειες. Σκοπός της εργασίας είναι να εξακριβωθούν οι ιδιότητες του υλικού, να μελετηθεί η συμπεριφορά των πλακών σε λυγισμό και τα αποτελέσματα να χρησιμοποιηθούν σε πρόγραμμα μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων, που να προσομοιάζει τις πειραματικές συνθήκες λυγισμού των πλακών. Το πειραματικό μέρος της εργασίας έγινε σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο της Δανίας (Technical University of Denmark - DTU) στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού δικτύου αριστείας MARSTRUCT (Network of Excellence in Marine Structures).

Για τη διεξαγωγή των παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές χαρακτηρισμού υλικών (εφελκυσμός, θλίψη, διάτμηση), κατά ASTM και ISO, σε δοκίμια από πολύστρωτο σύνθετο υλικό, κατασκευασμένα στα εργαστήρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και του Πολυτεχνείου της Δανίας. Από τις δοκιμές υπολογίστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες (μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό και θλίψη, λόγος Poisson, μέτρο διάτμησης), και οι αντοχές του υλικού. Οι τιμές των ιδιοτήτων χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική ανάλυση.

Την περίοδο Απρίλιος – Οκτώβριος 2007 εκτελέστηκαν τα πειράματα σε πλάκες με γεωμετρική ατέλεια. Οι πλάκες είχαν κατασκευαστεί στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, από σύνθετο πολύστρωτο υλικό, σε 2 πάχη: λεπτές, ονομαστικού πάχους 9.0 mm και μεσαίου πάχους, με ονομαστικό πάχος 15.0mm. Ήταν δε, μοιρασμένες σε 3 ομάδες, ανάλογα με το μέγεθος της κεντρικής γεωμετρικής ατέλειας: Τελείως επίπεδες (τέλειες – perfect), χωρίς γεωμετρική ατέλεια, με μικρή γεωμετρική ατέλεια (small imperfection), ονομαστικού μεγέθους 3.2 mm και με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια (large imperfection), ονομαστικού μεγέθους 9.6 mm. Οι πλάκες υποβλήθηκαν σε δοκιμές λυγισμού, στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου της Δανίας. Από τα πειράματα εξήχθησαν δεδομένα σχετικά με τις μετατοπίσεις και τις παραμορφώσεις που υπέστησαν οι πλάκες .

Το τελευταίο μέρος της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Στόχος ήταν η προσομοίωση των πειραμάτων λυγισμού, ώστε να εξετασθεί το ενδεχόμενο αριθμητικής ανάλυσής τους. Για το λόγο αυτό τα μοντέλα βασίστηκαν στην μορφή των πειραματικών δοκιμίων, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες υλικού που είχαν υπολογιστεί για το σκοπό αυτό. Στην μοντελοποίηση εξετάστηκαν οι συνοριακές συνθήκες των πλακών, και η επίδρασή τους στα τελικά αποτελέσματα τάσης – έκκεντρης μετατόπισης της πλάκας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	2
1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	3
1.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	4
1.1.1 ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ.....	4
1.1.2 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ.....	5
1.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ.....	7
1.3 ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ.....	9
1.3.1 ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	10
1.3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	11
1.4 ΛΥΓΙΣΜΟΣ.....	15
2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΥΛΙΚΩΝ.....	16
2.1 ΔΟΚΙΜΙΑ.....	16
2.1.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	16
2.1.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	17
2.2 ΔΟΚΙΜΕΣ.....	22
2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	27
2.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ.....	27
2.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ – ΔΟΚΙΜΙΑ DTU.....	31
2.3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ – ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΜΠ (ΝΤΥΑ).....	40
2.3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ DTU.....	49
2.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	51
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΛΑΚΩΝ.....	52
3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΚΩΝ.....	53
3.1.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	53
3.1.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	55
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	59
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	65
4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	83
4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	84
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	85
4.2.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΑΚΑΣ.....	85
4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	88
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	92
4.4 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ.....	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη συμπεριφορά σύνθετων πολύστρωτων υλικών σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης (θλίψη). Τα σύνθετα πολύστρωτα υλικά αποτελούνται από στρώσεις ινών, συνήθως γυαλιού, που ενώνονται και συγκρατούνται μεταξύ τους από μια μήτρα ρητίνης. Λόγω της μορφής και κατασκευής τους οι φυσικές ιδιότητες και η μηχανική συμπεριφορά τους διαφέρουν από εκείνες των «παραδοσιακών» υλικών που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές, όπως ο χάλυβας ή το αλουμίνιο. Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με το βάρος τους απ'ότι τα συνήθη υλικά κατασκευών. Επίσης, πλήθος άλλων ιδιοτήτων όπως η αντοχή σε διάβρωση, κόπωση, θραύση, οι αντιπυρικές ιδιότητές τους, καθώς και η ευκολία διαμόρφωσής τους καθιστούν τα σύνθετα υλικά χρησιμότερα σε πολλές εφαρμογές, μεταξύ άλλων η ναυπηγική και η αεροναυπηγική.

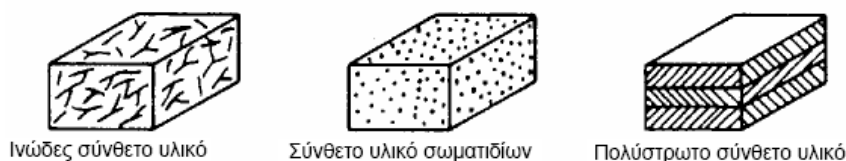
Παρά την γενικά πολύ καλή μηχανική συμπεριφορά τους, ο τρόπος κατασκευής των σύνθετων υλικών έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζουν ατέλειες στη δομή και στη μορφή τους. Οι ατέλειες αυτές είναι συνηθέστερα διαχωρισμός των στρώσεων των ινών, κενά σημεία όπου θα έπρεπε να υπάρχει ρητίνη, ή ατέλειες στη μορφή – μικρότερο ή μεγαλύτερο πάχος από το κανονικό, ατελής ευθυγράμμιση του στοιχείου κ.λ.π. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά είναι ανισοτροπικά, δηλαδή οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν είναι ίδιες σε όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι, ενώ η συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό είναι πολύ καλή, σε θλιπτικά φορτία υποφέρουν περισσότερο, και συχνά οι όποιες ατέλειες μεγεθύνονται και χειροτερεύουν τη συμπεριφορά του υλικού.

Ο λυγισμός είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε κατασκευαστικά στοιχεία υπό θλιπτική φόρτιση. Αρχικά οι παραμορφώσεις του στοιχείου ακολουθούν το επίπεδο του θλιπτικού φορτίου. Όταν όμως το φορτίο ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή, λαμβάνουν χώρα παραμορφώσεις εκτός επιπέδου. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και οι παραμορφώσεις που συμβαίνουν σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να επηρεαστούν από την ύπαρξη ατέλειας στην κατασκευή του.

1.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

1.1.1 ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

Ως σύνθετα ορίζονται εκείνα που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά, με σημαντικές διαφορές στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του καθενός. Ως αποτέλεσμα, το σύνθετο υλικό που προκύπτει από τον συγκερασμό τους έχει καλύτερες ιδιότητες από αυτές των επιμέρους υλικών. Η συνηθέστερη μορφή σύνθετων αποτελείται από ένα υλικό ενίσχυσης (π.χ. γυαλί) «εγκλωβισμένο» μέσα σε μια μήτρα από ένα πιο εύπλαστο υλικό (π.χ. ρητίνη). Όσον αφορά το σχήμα και μέγεθος των υλικών ενίσχυσης, τα σύνθετα υλικά υποδιαιρούνται σε *ινώδη* (fibrous), όπου η ενίσχυση έχει τη μορφή ινών κατανεμημένων στη μήτρα, *σωματιδίων*, όπου οι ενισχύσεις έχουν περίπου ίδιες τις τρεις διαστάσεις τους, σε σχήμα σφαιρικό, κυβικό, νιφάδων κ.λ.π., και *πολύστρωτα* (laminates) τα οποία αποτελούνται από στρώσεις των ενισχυτικών υλικών, με συγκεκριμένο προσανατολισμό, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους με το συνδετικό υλικό (Σχήμα 1.1). Στην παρούσα εργασία ενδιαφέρουν τα πολύστρωτα υλικά, αφού από αυτά είναι κατασκευασμένα τα εργαστηριακά δοκίμια.



Σχήμα 1.1: Είδη σύνθετων υλικών ανάλογα με τη μορφή

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά αποτελούνται από στρώσεις του υλικού ενίσχυσης, ενωμένων μεταξύ τους με το συνδετικό υλικό. Οι στρώσεις αποτελούνται συνήθως από νήματα ινών, τα οποία ράβονται, κολλώνται ή πλέκονται μεταξύ τους, δημιουργώντας την εντύπωση «υφάσματος» ή «φύλλου». Πολλά τέτοια «φύλλα» τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και ενώνονται με ρητίνη, η οποία μπαίνει ανάμεσα σε κάθε φύλλο για να τα συγκρατεί και να αυξήσει τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται στα πολύστρωτα μπορεί να είναι από: γυαλί, άνθρακα (ανθρακονήματα – carbon fiber) ή αραμιδικές (Kevlar). Αντίστοιχα, οι ρητίνες μπορεί να είναι πολυεστερικές, βινυλεστερικές, εποξειδικές ή φαινολικές. Ανάλογα με τις απαιτήσεις χρήσης επιλέγεται ο καλύτερος συνδυασμός. Στην παρούσα εργασία, ο συνδυασμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ίνες γυαλιού σε εποξειδική ρητίνη.

Ανάλογα με τον τρόπο κατανομής των ινών για τον σχηματισμό των «υφασμάτων», αυτά διακρίνονται σε :

Υαλοπίλημα (chopped strand mat), όπου οι ίνες δεν έχουν προσανατολισμό, είναι άτακτα κατανεμημένες και χαλαρά συνδεδεμένες μεταξύ τους (σχήμα 1.2 α).

Πλεξίδες νημάτων και υαλούφασμα (roving – woven roving), όπου οι ίνες ενώνονται παράλληλα δημιουργώντας πλεξίδες. Οι πλεξίδες στη συνέχεια πλέκονται κάθετα μεταξύ τους, δημιουργώντας τα υαλοϋφάσματα (woven roving, Σχήμα 1.2.β). Εκτός από πλεξίδες, και απλές ίνες που έχουν υποστεί περιστροφή πλέκονται μεταξύ τους δημιουργώντας τα υφάσματα πυκνής πλέξης (woven fabric, clothes).

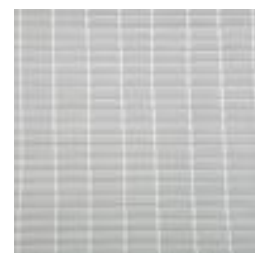
Μονοαξονικά (unidirectional) υφάσματα, όπου οι ίνες ράβονται ή συγκρατούνται παράλληλα μεταξύ τους, προσανατολισμένες σε μία διεύθυνση (σχήμα 1.2 γ).



(α) Υαλοπίλημα (Chopped strand mat)



(β) Πλεγμένο ύφασμα (woven roving)



(γ) Μονοαξονικό ύφασμα

Σχήμα 1.2 : Τρεις τύποι υαλοϋφασμάτων

1.1.2 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ

Τα πολυστρωτα σύνθετα υλικά κατασκευάζονται τοποθετώντας ένα «φύλλο» ινών , βρέχοντάς το με ρητίνη, και στη συνέχεια τοποθετώντας το επόμενο φύλλο από πάνω, κ.ο.κ. Τα φύλλα ινών δεν έχουν πάντα τον ίδιο προσανατολισμό, αντίθετα τις περισσότερες φορές αυτή η ανομοιομορφία επιδιώκεται, αφού αυτή είναι που προσδίδει στο πολυστρωτο τις επιθυμητές ιδιότητές του. Τα πολυστρωτα κατασκευάζονται και μορφοποιούνται με δύο κυρίως τρόπους, με απλή επαφή και με πίεση. Και στις δύο περιπτώσεις είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός καλουπιού, συνήθως από μέταλλο, ξύλο ή και από σύνθετο υλικό. Με τη χρήση του καλουπιού δίνεται το επιθυμητό σχήμα στις κατασκευές. Σε κάθε περίπτωση κατασκευής πολυστρωτου, το καλούπι καλύπτεται από ρητίνη καλής ποιότητας, το λεγόμενο gel coat, το οποίο προσδίδει ομαλότητα και προστασία στην εξωτερική επιφάνεια.

Στη μορφοποίηση με απλή επαφή (Σχήμα 1.3) απλώνεται ρητίνη επάνω στο gel coat, με πινέλο ή με ψεκασμό. Στη συνέχεια απλώνεται επάνω στη ρητίνη η πρώτη στρώση ενισχυτικών ινών, με τον επιθυμητό προσανατολισμό. Η στρώση διαβρέχεται πλήρως από ρητίνη, με χρήση πινέλου ή/και ρολού. Στη συνέχεια και με τον ίδιο τρόπο τοποθετούνται όλες οι στρώσεις ινών. Αυτός είναι και ο πιο διαδεδομένος, βασικός τρόπος κατασκευής πολυστρωτου. Μια άλλη περίπτωση μορφοποίησης με απλή επαφή είναι ο σύγχρονος ψεκασμός ινών μικρού μήκους και ρητίνης.



Σχήμα 1.3 : Μορφοποίηση με απλή επαφή

Στη μορφοποίηση με πίεση (Σχήμα 1.4), αφού τοποθετηθούν και διαβρεχτούν οι ίνες με ρητίνη, τοποθετείται επάνω από το καλούπι και το μη στερεοποιημένο πολυστρωτο ένα ελαστικό διάφραγμα, στεγανοποιούνται αεροστεγώς τα άκρα και αναρροφάται ο αέρας από το χώρο κάτω από το διάφραγμα, έτσι ώστε το πολυστρωτο να φορτιστεί από πίεση έως και 1 bar. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη κατανομή ρητίνης, απομάκρυνση της περίσσειας ρητίνης και αποφυγή κενών αέρα. Επίσης, η διαδικασία μπορεί να επιταχυνθεί με τοποθέτηση του συστήματος σε φούρνο, ώστε να γίνει πιο γρήγορα η σκλήρυνση της ρητίνης.



Σχήμα 1.4: Μορφοποίηση με πίεση (vacuum bag moulding)

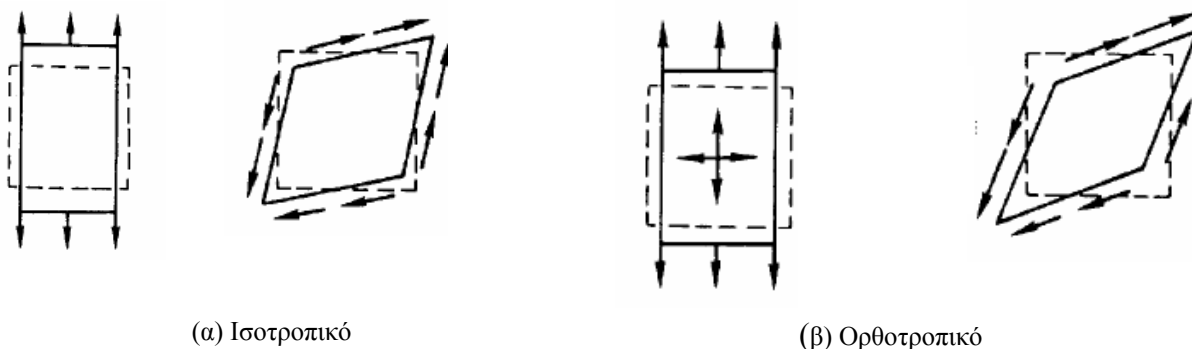
Άλλοι, πιο εξειδικευμένοι τρόποι κατασκευής πολυστρωτων είναι η μέθοδος περιέλιξης ινών, η μέθοδος έκχυσης ρητίνης, η μορφοποίηση με έλξη.

1.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ

Τα κατασκευαστικά υλικά χαρακτηρίζονται από τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες ποσοτικοποιούν τη συμπεριφορά τους, σε συγκεκριμένες φορτίσεις. Οι ιδιότητες αυτές είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young $\{E\}$, το οποίο σχετίζει τις παραμορφώσεις που παραλαμβάνει ένα υλικό σε σχέση με την κατακόρυφη τάση που δέχεται, ο λόγος Poisson $\{\nu\}$, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των παραμορφώσεων που λαμβάνει ένα υλικό σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, και το μέτρο διάτμησης $\{G\}$, το οποίο δείχνει τις παραμορφώσεις σε σχέση με τη διατμητική τάση που δέχεται ένα υλικό.

Συνήθη κατασκευαστικά υλικά, όπως τα μέταλλα, είναι ιστροπικά, δηλαδή οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση επιβολής του φορτίου. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι από όποια κατεύθυνση κι αν επιβληθεί φορτίο, η απόκριση του υλικού θα είναι ίδια σε όλες τις περιοχές. Η μηχανική συμπεριφορά των ιστροπικών υλικών μπορεί να χαρακτηριστεί από 2 μεγέθη, το μέτρο ελαστικότητας E και το λόγο Poisson ν . Το μέτρο διάτμησης ιστροπικών υλικών εξαρτάται από τα άλλα δύο μεγέθη.

Τα σύνθετα πολύστρωτα είναι συχνά ορθοτροπικά, δηλαδή έχουν τουλάχιστον 2 επίπεδα συμμετρίας στα οποία οι ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Μια εφαρμοζόμενη τάση προκαλεί διαφορετική παραμόρφωση στη διεύθυνση εφαρμογής της και στην κάθετη σ' αυτήν διεύθυνση, ενώ το μέτρο διάτμησης είναι ανεξάρτητο των μεγεθών E και ν . Για τον χαρακτηρισμό των ορθοτροπικών υλικών απαιτούνται 9 μεγέθη, 3 για κάθε διεύθυνση: E_{xy} , E_{yz} , E_{xz} , ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{xz} , G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} . Στα ορθοτροπικά υλικά δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ διατμητικών τάσεων – ορθών παραμορφώσεων ($\tau - \epsilon$), ορθών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων ($\sigma - \gamma$), καθώς και διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων σε διαφορετικά επίπεδα. Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η συμπεριφορά ενός ιστροπικού (Σχήμα 1.5α) και ενός ορθοτροπικού (Σχήμα 1.5β) υλικού, σε ορθή τάση και σε διάτμηση.



Σχήμα 1.5 : Συμπεριφορά σε ορθή τάση και σε διάτμηση ιστροπικών και ορθοτροπικών υλικών

Οι σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά είναι γραμμικές, και ακολουθούν το νόμο του Hooke, ο οποίος στα ομογενή ισότροπα υλικά ορίζει ότι η σχέση μεταξύ μιας επιβαλλόμενης τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ που προκαλείται είναι :

$$\sigma = E * \epsilon$$

Στα ορθοτροπικά σύνθετα υλικά οι σχέσεις μεταξύ των 3 ορθών και 3 διατμητικών τάσεων, και των αντίστοιχων παραμορφώσεων σε κάθε επίπεδο ορίζονται από το μητρώο δυσκαμψίας C_{ij} :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix}$$

Σχέση 1.1

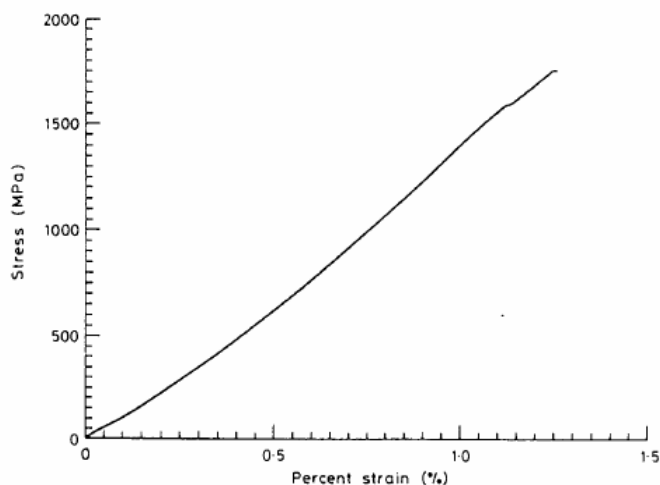
Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται ευρύτερα το μητρώο ενδοτικότητας, $[S_{ij}]$, το οποίο είναι το αντίστροφο του μητρώου δυσκαμψίας ($[S_{ij}] = [C_{ij}]^{-1}$).

Η ευκολία χρήσης του μητρώου ενδοτικότητας $[S_{ij}]$ συνίσταται στο ότι τα στοιχεία του ορίζονται συναρτήσει των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} & , & & S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} & , & & S_{13} &= -\frac{\nu_{13}}{E_1} \\ S_{21} &= -\frac{\nu_{21}}{E_2} & , & & S_{22} &= \frac{1}{E_2} & , & & S_{32} &= -\frac{\nu_{23}}{E_2} \\ S_{13} &= -\frac{\nu_{31}}{E_3} & , & & S_{23} &= -\frac{\nu_{32}}{E_3} & , & & S_{33} &= \frac{1}{E_3} \\ S_{44} &= \frac{1}{G_{23}} & , & & S_{55} &= \frac{1}{G_{13}} & , & & S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned}$$

Σχέση 1.2

Σημειώνεται επίσης ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μόνο γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι σε κατάσταση φόρτισης, οι παραμορφώσεις αυξάνονται ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση, με σταθερό ρυθμό, μέχρι να επέλθει τελικά η θραύση. Η συμπεριφορά αυτή κατατάσσει τα σύνθετα υλικά ως ψαθυρά. Στο Σχήμα 1.6 απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων σύνθετου υλικού, όπου φαίνεται η γραμμική ελαστική συμπεριφορά τους.



Σχήμα 1.6: Τυπική καμπύλη – τάσεων παραμορφώσεων μονοαξονικού σύνθετου υλικού

1.3 ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ

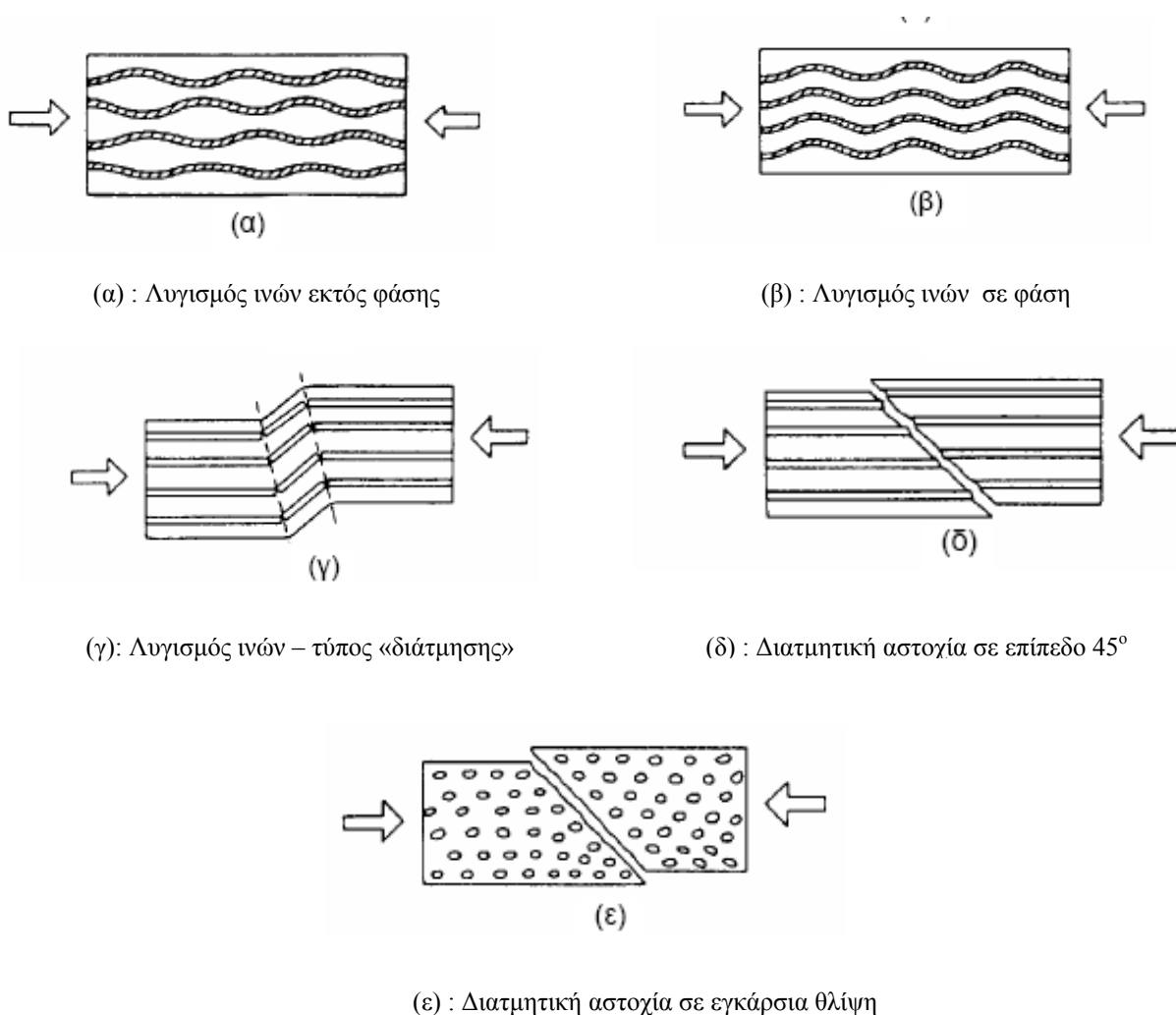
Οι αστοχίες στα σύνθετα υλικά έχουν σχέση είτε με την αντοχή, είτε με τη δυσκαμψία. Οι αστοχίες που οφείλονται στην αντοχή παρουσιάζονται όταν κάποια τάση υπερβεί την ικανότητα του πολύστρωτου να φέρει φορτία, ενώ οι αστοχίες που οφείλονται στη δυσκαμψία εμφανίζονται όταν οι παραμορφώσεις υπερβούν τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια του πολύστρωτου. Σε κάθε περίπτωση, λόγω της ορθοτροπικότητας των πολύστρωτων σύνθετων υλικών, η εκτίμηση της αντοχής τους είναι πιο πολύπλοκη, σε σχέση με τα ισότροπα υλικά. Η πιο σημαντική δυσκολία οφείλεται στο γεγονός ότι οι αντοχές των πολύστρωτων, όπως και οι ελαστικές τους σταθερές, μεταβάλλονται στις διάφορες δευθύνσεις. Επομένως, σε ένα ορθοτροπικό υλικό, μπορεί να μετρηθεί άπειρος αριθμός αντοχών, ακόμη και με τη διεξαγωγή μιας μονοαξονικής δοκιμής, ανάλογα με τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Για σχεδιαστικούς λόγους ο αριθμός των αντοχών περιορίζεται σε 5, στις κύριες διευθύνσεις του υλικού. Τελικά οι αντοχές που χρησιμοποιούνται είναι

Εφελκυσμός στη διεύθυνση 1	X_t
Θλίψη στη διεύθυνση 1	X_c
Εφελκυσμός στη διεύθυνση 2	Y_t
Θλίψη στη διεύθυνση 2	Y_c
Διάτμηση στο επίπεδο 1-2	S

1.3.1 ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία, ιδιαίτερα ενδιαφέρει η αστοχία πολύστρωτου σε θλίψη. Η αστοχία μιας στρώσης υπό την επίδραση θλιπτικών φορτίων παράλληλων στη διεύθυνση των ινών σχετίζεται με τον μικροσκοπικό λυγισμό των μεμονωμένων ινών, οι οποίες λειτουργούν σαν δοκοί – κολώνες σε ελαστική έδραση που παρέχεται από τη ρητίνη που τις περιβάλλει. Ο λυγισμός μπορεί να είναι τύπου «έκτασης» (Σχήμα 1.4 α, 1.4β), ο οποίος εμφανίζεται μόνο σε στρώσεις με πολύ μικρό όγκο ινών, ή τύπου «διάτμησης» (Σχήμα 1.4 γ), ο οποίος οδηγεί στη δημιουργία έκκεντρων ζωνών. Οι ζώνες αυτές παρατηρούνται πολύ συχνά κατά την αστοχία πολύστρωτων σε θλίψη. Σε σύνθετα υλικά που περιέχουν ίνες υψηλής δυσκαμψίας, μπορεί να προηγηθεί του λυγισμού των ινών αστοχία της μήτρας σε διάτμηση σε επίπεδο 45° (Σχήμα 1.4 δ). Παρόμοια μορφή κατάρρευσης προκαλείται και από θλιπτικά φορτία κάθετα στις ίνες, αστοχία που περιλαμβάνει τη θραύση πολύ λίγων ή καθόλου ινών.

Η αστοχία σε θλίψη των πολύστρωτων από ίνες και ρητίνη επηρεάζεται πολύ από τις διαφόρων ειδών ατέλειες, όπως η ατελής ευθυγράμμιση των ινών, η μη ικανοποιητική γειτνίαση των ινών, ατελείς δεσμοί ινών – ρητίνης και τα κενά, ιδίως όταν αυτά εμφανίζονται στην κοινή επιφάνεια ίνας- ρητίνης.



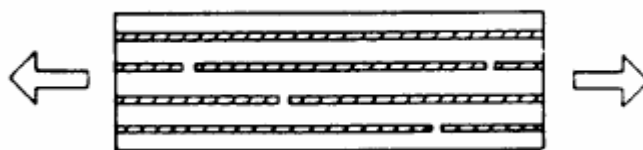
Σχήμα 1.7 : Τρόποι αστοχίας σε θλίψη μιας μονοαξονικής στρώσης

Η αστοχία ενός πολύστρωτου σε εφελκυσμό, με φορτίο παράλληλο στη διεύθυνση των ινών είναι πολύπλοκη διαδικασία. Στα τυπικά σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού και πολυεστερική ρητίνη, η μέγιστη παραμόρφωση των ινών είναι μεγαλύτερη από εκείνη της ρητίνης ($\epsilon_f > \epsilon_m$). Τότε επέρχεται πρώτα αστοχία της ρητίνης και το φορτίο μεταβιβάζεται στις ίνες, οπότε δεν επηρεάζεται σημαντικά η αντοχή της στρώσης (Σχήμα 1.8). Στα σύνθετα με πολυεστερική ή εποξική ρητίνη και ίνες άνθρακα, η θραύση των ινών προηγείται της θραύσης της ρητίνης. Όταν θραύονται οι ίνες, με την προϋπόθεση ότι ο δεσμός ίνας – ρητίνης είναι καλός, μεταφέρεται φορτίο με διάτμηση από τις σπασμένες ίνες μέσω της ρητίνης στις παρακείμενες άθικτες ίνες (Σχήμα 1.9). Έτσι, οι σπασμένες ίνες ανακτούν την ικανότητα να φέρουν φορτία σε μια απόσταση από την θραύση ίση περίπου με 10 ως 100 φορές τη διάμετρο της ίνας. Η θραύση της στρώσης επέρχεται όταν αθροίζονται πολλές θραύσεις ινών κοντά στην ίδια εγκάρσια διατομή, ικανές να υπερνικήσουν την ικανότητα αυτή.

Η αστοχία μιας μονοαξονικής στρώσης σε εφελκυστικό φορτίο κάθετο στη διεύθυνση των ινών εμφανίζεται με τη μορφή ρηγμάτωσης της ρητίνης και αποχωρισμού του δεσμού ίνας – ρητίνης.



Σχήμα 1.8: Ρηγμάτωση ρητίνης πριν τη θραύση των ινών



Σχήμα 1.9: Θραύση πρώτα των ινών

1.3.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Για τον έλεγχο της αντοχής ενός πολύστρωτου, αναπτύχθηκαν διάφορα κριτήρια αστοχίας, που εφαρμόζονται σε ορθοτροπικά υλικά. Αρκετά από αυτά βασίστηκαν σε κριτήρια αστοχίας ορθοτροπικών υλικών, ενώ άλλα μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε συγκεκριμένα σύνθετα υλικά. Για τα σύνθετα υλικά πολύ συχνά χρησιμοποιούνται τα κριτήρια μέγιστης τάσης, μέγιστης παραμόρφωσης, το κριτήριο Tsai – Hill και το κριτήριο Tsai – Wu.

- Κριτήριο Μέγιστης Τάσης:

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, εμφανίζεται αστοχία όταν οποιαδήποτε από τις τάσεις στις κύριες διευθύνσεις υπερβεί την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή. Οπότε η αστοχία επέρχεται όταν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

$$\begin{array}{ll}
 \underline{\text{Εφελκυσμός}} & \underline{\text{Θλίψη}} \\
 \sigma_1 < X_t & \sigma_1 < X_c \\
 \sigma_2 < Y_t & \sigma_2 < Y_c \\
 \underline{\text{Διάτμηση}} & \\
 |T_{12}| < S &
 \end{array}$$

Όπου σ_1 , σ_2 οι τάσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού, δηλαδή σ_1 η τάση παράλληλα στις ίνες, σ_2 η τάση σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες.

- Κριτήριο Μέγιστης Παραμόρφωσης:

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό παρουσιάζεται αστοχία όταν οποιαδήποτε από τις παραμορφώσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού υπερβεί την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή. Οπότε η αστοχία επέρχεται όταν ικανοποιούνται οι σχέσεις:

$$\begin{array}{ll}
 \underline{\text{Εφελκυσμός}} & \underline{\text{Θλίψη}} \\
 \varepsilon_1 < X_{\varepsilon t} & \varepsilon_1 < X_{\varepsilon c} \\
 \varepsilon_2 < Y_{\varepsilon t} & \varepsilon_2 < Y_{\varepsilon c} \\
 \underline{\text{Διάτμηση}} & \\
 |Y_{12}| < S_{\varepsilon} &
 \end{array}$$

Όπου κι εδώ οι δείκτες 1 και 2 δείχνουν διεύθυνση παράλληλη ή κάθετη στη διεύθυνση των ινών, ενώ αντίστοιχα $X_{\varepsilon t}$, $X_{\varepsilon c}$ είναι οι μέγιστες επιτρεπόμενες εφελκυστικές ή θλιπτικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση 1, $Y_{\varepsilon t}$, $Y_{\varepsilon c}$ είναι οι μέγιστες επιτρεπόμενες εφελκυστικές ή θλιπτικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση 2 και S_{ε} η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση.

Λόγω της γραμμικότητας στην ελαστική συμπεριφορά των σύνθετων, τα κριτήρια μέγιστης τάσης και παραμόρφωσης είναι όμοια. Οι μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις συνδέονται μέσω των λόγων :

$$X_{\varepsilon t} = \frac{X_t}{E_1}$$

Σχέση 1.3

$$Y_{\varepsilon t} = \frac{Y_t}{E_2}$$

Σχέση 1.4

$$S_{\varepsilon} = \frac{S}{G_{12}}$$

Σχέση 1.5

- Κριτήριο Tsai – Hill:

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, έχουμε έναρξη αστοχίας σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, όταν παραβιάζεται η ανισότητα:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} < 1$$

Σχέση 1.6

όπου X, Y, S είναι οι αντοχές στις διευθύνσεις 1 και 2 και στο επίπεδο 1- 2, ανάλογα με το είδος των τάσεων. Όταν οι τάσεις είναι εφελκυστικές, χρησιμοποιούνται οι αντοχές σε εφελκυσμό (X_t, Y_t), ενώ αν οι τάσεις είναι θλιπτικές χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχες αντοχές σε θλίψη X_c, Y_c .

- Κριτήριο Tsai – Wu:

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, σε μια ορθοτροπική στρώση σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, για να μη συμβαίνει αστοχία πρέπει:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 < 1$$

Σχέση 1.7

όπου:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}$$

Σχέση 1.8

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}$$

Σχέση 1.9

$$F_{11} = -\frac{1}{X_t X_c}$$

Σχέση 1.10

$$F_{22} = -\frac{1}{Y_t Y_c}$$

Σχέση 1.11

$$F_6 = 0$$

Σχέση 1.12

$$F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

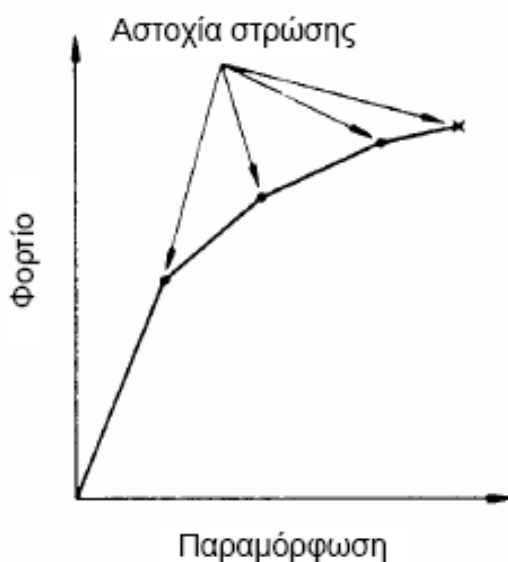
Σχέση 1.13

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right]$$

Σχέση 1.14

σ είναι η αντοχή του υλικού σε διαξονικό εφελκυσμό, ενώ οι δείκτες στις αντοχές X, Y, S είναι οι ίδιοι όπως αναφέρονται και προηγουμένως.

Οι παραπάνω σχέσεις, καθώς και ο υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά αναφέρονται σε μία μόνο στρώση. Επομένως, με τις μεθόδους αυτές μπορεί να ελεγχθεί αν θα αστοχήσει κάποια από τις στρώσεις, ή, αντίστροφα, ποια στρώση θα αστοχήσει πρώτα σε συγκεκριμένο φορτίο. Οι στρώσεις αστοχούν με τη σειρά, ξεκινώντας από τις πιο ευαίσθητες, που είναι συνήθως εκείνες που έχουν ίνες διατεταγμένες κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου. Έτσι, η αστοχία πρώτης στρώσης μπορεί να συμβεί σε σχετικά μικρό φορτίο, χωρίς το πολύστρωτο να κινδυνεύει ολοκληρωτικά. Μερικές φορές, η επίδραση αστοχίας πρώτης στρώσης μπορεί να μην είναι εμφανής στη μακροσκοπική συμπεριφορά του πολύστρωτου. Καθώς όμως αστοχούν περισσότερες στρώσεις η μείωση της δυσκαμψίας γίνεται εμφανής, και η απόκριση του πολύστρωτου αποκλίνει από την αρχική συμπεριφορά. Όμως, το πολύστρωτο είναι ικανό να φέρει ακόμη φορτία, τα οποία προκαλούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από εκείνες που θα προκαλούσαν πριν την αστοχία πρώτης στρώσης. Σταδιακά με αυτό τον τρόπο αστοχούν όλο και περισσότερες στρώσεις, με την αντίστοιχη μείωση δυσκαμψίας του πολύστρωτου. Αυτή η σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας έχει ως αποτέλεσμα η μορφή της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων να εμφανίζει «γόνατα», για κάθε σημείο όπου οι στρώσεις που έχουν αστοχήσει είναι τέτοιες, ώστε να μειώνεται σημαντικά η δυσκαμψία. Ανάμεσα όμως στα «γόνατα» - και κατά συνέπεια στις επιμέρους αστοχίες στρώσεων – το πολύστρωτο διατηρεί τη γραμμική ελαστική συμπεριφορά του (Σχήμα 1.10)



Σχήμα 1.10 : Καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης πολύστρωτου

1.4 ΛΥΓΙΣΜΟΣ

Ο λυγισμός είναι φαινόμενο που παρατηρείται σε κατασκευαστικά στοιχεία, συνήθως δοκούς, κολώνες ή κελύφη, όταν αυτά φορτίζονται θλιπτικά. Ορίζεται ως «αιφνίδια μείωση της ικανότητας του στοιχείου να φέρει θλιπτικά φορτία». Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι αν και οι επιβαλλόμενες θλιπτικές τάσεις δεν έχουν πάρει τις μέγιστες τιμές τους, το στοιχείο παραμορφώνεται, και δεν μπορεί να παραλάβει άλλα φορτία. Στην παρούσα εργασία ενδιαφέρει η απόκριση σε λυγισμό ενός ελάσματος, καθώς προσομοιάζει τη μορφή των πολύστρωτων πλακών.

Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει ένα έλασμα μέχρι να υποστεί λυγισμό ονομάζεται κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Για πλάκες από ομογενή ισότροπα υλικά, απλά εδρασμένες, υπό ομοαξονική ομοιόμορφη θλιπτική φόρτιση, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού υπολογίζεται από τη σχέση του Euler:

$$\sigma_{EL} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad , \quad k = \left(\frac{m}{a/b} + \frac{a/b}{m}\right)^2$$

Σχέση 1.15

όπου

E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

ν ο λόγος Poisson

t το πάχος του ελασματος

a,b οι διαστάσεις των πλευρών του ελάσματος, με a την πλευρά παράλληλα και b την πλευρά κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης

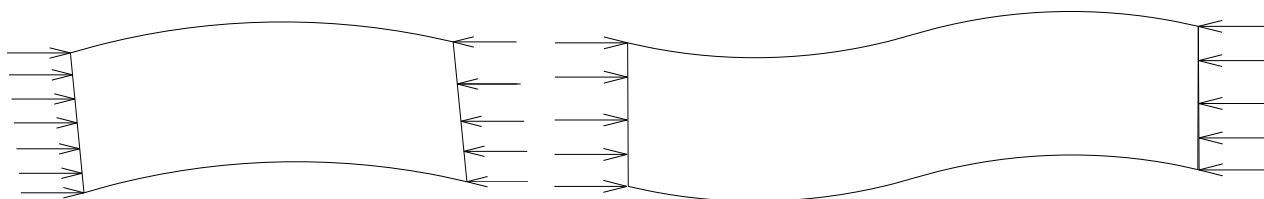
m η τιμή ιδιομορφής

Το βέλος κάμψης σε ένα έλασμα που βρίσκεται σε ισορροπία περιγράφεται από τη σχέση:

$$w(x, y) = C \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot y}{b}\right) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right)$$

Σχέση 1.16

η τιμή m ονομάζεται ιδιοτιμή του λυγισμού. Στην πράξη, η ιδιοτιμή περιγράφει τον αριθμό ημικυμάτων που θα δημιουργηθούν με το λυγισμό, λόγω εφαρμογής θλιπτικού φορτίου (Σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11: Σχηματική αναπαράσταση ιδιομορφών λυγισμού πλάκας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΥΛΙΚΩΝ

Εισαγωγή

Τους μήνες Οκτώβριο – Νοέμβριο 2007 πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ δοκιμές χαρακτηρισμού υλικών, προκειμένου να εξακριβωθούν οι φυσικές ιδιότητες των πολύστρωτων σύνθετων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα περαιτέρω πειράματα.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού, θλίψης και διάτμησης κατά τα πρότυπα της ASTM. Χρησιμοποιήθηκαν 2 ομάδες δοκιμών, καθεμία κατασκευασμένη από υλικό που παρήχθη στο ΕΜΠ και στο πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης DTU, προς έλεγχο και σύγκριση. Επιπλέον, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις και των 2 ιδρυμάτων, για κάθε ένα από τα 2 υλικά.

2.1 ΔΟΚΙΜΙΑ

2.1.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών στο ΕΜΠ είναι η τυπική εποξειδική ρητίνη τύπου “ D.E.R. 358”, χαμηλού ιξώδους (600-750 mPa.s στους 25°C), από την εταιρεία Dow Plastics. Ο καταλύτης είναι προϊόν της ΡΟ.ΙΝΤ.ΕΡ S.r.l με κωδικό όνομα EPAMINE PC13. Έχει πολύ χαμηλό ιξώδες (70-140 mPa.s στους 25°C) και ο χρόνος χρήσης 150g στους 25°C είναι περίπου 50 λεπτά. Οι μονοαξονικές ίνες γυαλιού E-glass είναι προϊόν της Owens Corning με κωδικό όνομα UNI-CD-600. Το βάρος του είναι 623g/m² με 50 g/m² στη διεύθυνση *weft* και τα υπόλοιπα στη διεύθυνση *warp*.

Οι πλάκες από όπου κόπηκαν τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο σάκου κενού (vacuum bag moulding). Οι παράμετροι της μεθόδου διατηρήθηκαν όμοιες με εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των γεωμετρικά ατελών πλακών που υποβλήθηκαν σε θλίψη. Οι στρώσεις γυαλιού απλώθηκαν και επιστρώθηκαν με ρητίνη χειρωνακτικά, η μία μετά την άλλη. Με το πέρας της επίστρωσης και πριν στερεοποιηθεί η ρητίνη, όλη η διάταξη καλύφθηκε με τα διάφορα υλικά της μορφοποίησης υπό κενό (ύφασμα αποκόλλησης, διάτρητη μεμβράνη, συσκευή αναρρόφησης, σάκος κενού, ταινία σφράγισης) και ο αναρροφήθηκε ο αέρας με τη βοήθεια αντλίας κενού. Εφαρμόστηκε υποπίεση 0.6 bar, σταθερή μέχρι τη στερεοποίηση της ρητίνης. Με αυτή τη μέθοδο επιτεύχθηκε πάχος μονοαξονικών στρώσεων glass/epoxy περίπου 0.5mm. Έτσι κατασκευάστηκαν τελικά 3 πλάκες, μία των 2 στρώσεων για τις δοκιμές εφελκυσμού στις 0°, μία των 4 στρώσεων για δοκιμές εφελκυσμού στις 90° και θλίψης στις 0° και μία των 8 στρώσεων για δοκιμές θλίψεως στις 90° και δοκιμές διάτμησης, ώστε το πάχος των δοκιμών να ανταποκρίνεται στα πρότυπα.

Η περιεκτικότητα γυαλιού των πλακών μετρήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο Β του διεθνούς προτύπου ISO 1172:1996 (δοκιμή καύσης). Πάρθηκαν δείγματα από τις πλάκες 2 και 4 στρώσεων και ο μέσος όρος της περιεκτικότητας γυαλιού υπολογίσθηκε στο 67,8%. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα σε γυαλί που μετρήθηκε για κάθε πλάκα

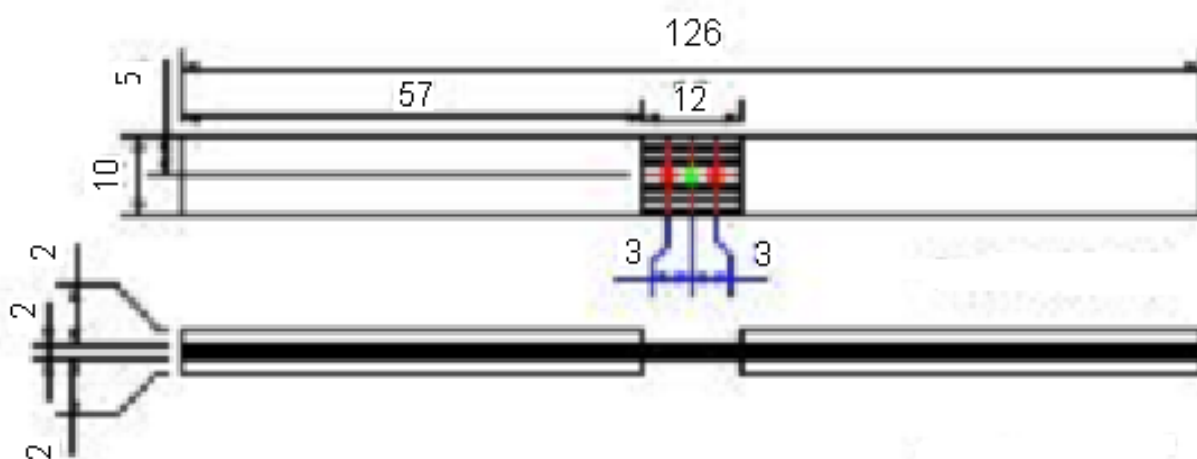
Πίνακας 2.1: % Περιεκτικότητα σε ίνες γυαλιού — Υλικό ΕΜΠ

	Sample 1	Sample 2	Average	Overall Average
2-ply plate	68.7	69.4	69.1	67.8
4-ply plate	67.4	65.4	66.4	

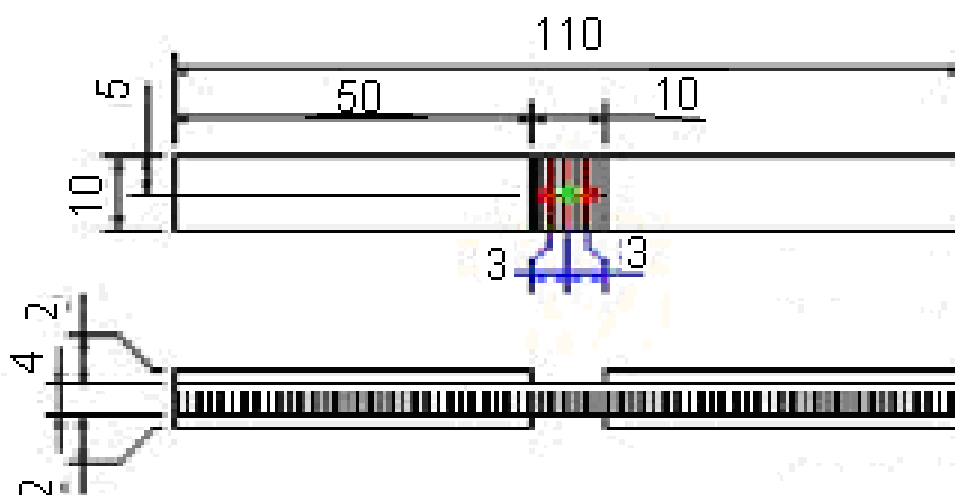
2.1.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM για τις αντίστοιχες δοκιμές. Οι ονομαστικές διαστάσεις των δοκιμίων παρατίθενται στη συνέχεια

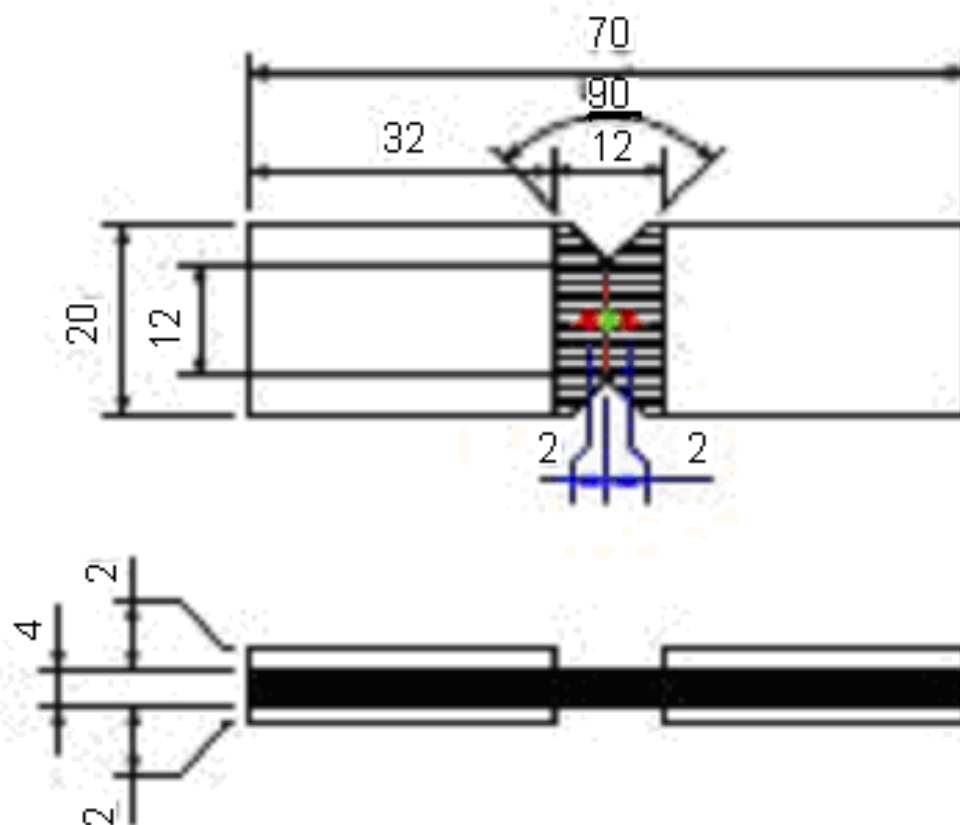
Θλίψη 0°



Θλίψη 90°



Διάτμηση



- Περιοχή μέτρησης πάχους & πλάτους
- Περιοχή μέτρησης πάχους & πλάτους
Κέντρο strain gage

Στη συνέχεια, στους πίνακες 2.2 και 2.3 παρουσιάζονται οι πραγματικές διαστάσεις των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν σε DTU και ΕΜΠ, όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο. Όπου υπάρχει το σημείο {---}, σημαίνει ότι ελήφθη 1 μέτρηση, η οποία παρατίθεται στη στήλη «AVERAGE». Ειδικότερα στα δοκίμια διάτμησης (S-DTU και S-NTUA) μετρήθηκαν μόνο το πάχος τους στην περιοχή της εγκοπής (Thickness) και το πλάτος της εγκοπής (width), καθώς αυτά είναι τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, όπως ορίζεται από το πρότυπο. Γι'αυτό και απουσιάζουν οι μετρήσεις μήκους.

Πίνακας 2.2 : Πραγματικές Διαστάσεις δοκιμίων DTU

	Length1 (mm)	Lenth2 (mm)	AVERAGE (mm)	Width1 (mm)	Width2 (mm)	Width3 (mm)	AVERAGE (mm)	Thickness1 (mm)	Thickness2 (mm)	Thickness3 (mm)	AVERAGE (mm)	AVERAGE AREA (mm²)
TENSION 0°												
BHT1B-01	138.00	137.80	137.90	14.87	14.86	14.80	14.840	0.81	0.81	0.80	0.806	11.96
BHT1B-02	137.55	137.55	137.55	14.91	14.81	14.82	14.846	0.83	0.71	0.80	0.780	11.58
BHT1B-03	137.60	137.60	137.60	14.91	14.83	14.81	14.850	0.75	0.76	0.76	0.758	11.26
BHT1B-04	137.00	137.70	137.35	14.87	14.85	14.86	14.860	0.61	0.62	0.65	0.626	9.30
BHT1B-05	137.55	137.60	137.80	14.83	14.82	14.83	14.383	0.71	0.66	0.74	0.703	10.11
TENSION 90°												
BHT2B-01	124.70	124.30	124.50	24.93	24.97	24.99	24.96	1.25	1.48	1.40	1.376	34.34
BHT2B-02	125.0	124.15	124.58	24.92	24.95	24.99	24.95	1.37	1.56	1.38	1.436	35.83
BHT2B-03	124.70	124.20	124.45	24.92	24.97	24.97	24.95	1.36	1.59	1.43	1.446	36.07
BHT2B-04	124.45	124.00	124.43	24.87	24.96	24.98	24.94	1.41	1.51	1.42	1.446	36.06
BHT2B-05	124.75	124.50	124.63	24.92	24.98	24.97	24.96	1.27	1.50	1.38	1.383	34.52
COMPRESSION 0°												
BHT2001	10.00	9.75	9.87	9.75	9.72	9.75	9.74	1.39	1.37	1.36	1.37	13.34
BHT2002	10.00	9.75	9.87	9.75	9.74	9.76	9.75	1.54	1.55	1.58	1.55	15.11
BHT2003	9.80	9.90	9.85	9.76	9.73	9.75	9.75	1.44	1.42	1.43	1.43	13.94
BHT2004	9.85	9.85	9.85	9.74	9.72	9.74	9.73	1.28	1.26	1.29	1.27	12.35
BHT2005	9.85	9.80	9.83	9.80	9.76	9.78	9.78	---	---	---	1.35	13.20
BHT2006	9.75	9.80	9.78	9.78	9.74	9.76	9.76	---	---	---	1.37	13.37
BHT2007	9.90	9.65	9.77	9.78	9.73	9.77	9.76	---	---	---	1.33	12.98
COMPRESSION 90°												
BHT3B01	9.50	9.90	9.70	9.79	9.76	9.79	9.78	---	---	---	3.26	31.88
BHT3B02	9.95	9.80	9.88	9.79	9.77	9.78	9.78	---	---	---	3.25	31.78
BHT3B03	10.00	9.80	9.90	9.80	9.79	9.80	9.80	3.15	3.14	3.14	3.14	30.77
BHT3B04	9.95	9.80	9.88	9.80	9.79	9.82	9.80	3.05	3.04	3.06	3.05	29.89
BHT3B05	9.85	9.55	9.70	9.80	9.78	9.80	9.80	3.13	3.02	3.15	3.10	30.38
BHT3B06	9.80	9.60	9.70	9.80	9.78	9.79	9.79	---	---	---	3.40	33.29
SHEAR												
S-DTU-1	---	---	---	---	---	---	11.62	3.33	3.35	---	3.34	38.81
S-DTU-2	---	---	---	---	---	---	11.73	3.16	3.21	---	3.19	37.36
S-DTU-3	---	---	---	---	---	---	11.53	3.15	3.10	---	3.13	36.03
S-DTU-4	---	---	---	---	---	---	11.80	3.14	3.19	---	3.17	37.35
S-DTU-5	---	---	---	---	---	---	11.66	3.06	3.09	---	3.08	35.85
S-DTU-6	---	---	---	---	---	---	11.55	3.05	---	---	3.05	35.23

Πίνακας 2.3: Πραγματικές Διαστάσεις δοκιμών NTUA

	Length 1 (mm)	Length 2 (mm)	AVERAGE (mm)	Width1 (mm)	Width2 (mm)	Width 3 (mm)	AVERAGE (mm)	Thickness1 (mm)	Thickness2 (mm)	Thickness3 (mm)	AVERAGE (mm)	AVERAGE AREA (mm ²)
TENSION 0°												
T-0-6	---	---	137.06	15.45	14.57	14.65	14.89	1.10	1.10	1.17	1.12	16.68
T-0-7	---	---	138.00	14.57	14.32	14.32	14.40	1.17	1.12	1.18	1.16	16.70
T-0-8	---	---	137.66	14.28	14.57	15.05	14.63	1.14	1.09	1.09	1.10	16.09
T-0-9	---	---	137.10	14.84	13.98	13.64	14.15	1.13	1.17	1.19	1.60	22.64
T-0-10	---	---	137.76	15.16	15.50	15.80	15.63	1.16	1.11	1.17	1.15	17.97
TENSION 90°												
T-90-6	---	---	123.74	24.82	24.70	24.90	24.80	2.25	2.25	2.19	2.56	63.49
T-90-7	---	---	124.22	25.46	25.40	25.40	25.42	2.39	2.32	2.30	2.34	59.48
T-90-8	---	---	123.84	25.20	24.90	25.20	25.08	2.26	2.36	2.30	2.30	57.68
T-90-9	---	---	124.00	25.60	26.20	25.60	25.89	2.39	2.25	2.21	2.28	59.03
T-90-10	---	---	124.00	24.60	25.10	25.05	24.93	2.19	2.26	2.28	2.24	55.84
COMPRESSION 0°												
C-0-6	10.00	10.00	10.00	10.39	10.31	10.37	10.35	1.97	2.00	1.97	1.99	20.60
C-0-7	10.00	10.00	10.00	10.47	10.37	10.37	10.42	2.03	2.00	2.06	2.02	21.05
C-0-8	10.00	10.05	10.00	10.45	10.44	10.38	10.45	2.02	2.02	2.06	2.02	21.10
C-0-9	10.00	10.25	10.13	10.33	10.34	10.27	10.34	1.88	1.90	2.06	1.89	19.54
C-0-10	10.45	9.30	9.88	10.54	10.65	10.60	10.60	---	---	---	1.99	21.16
COMPRESSION 90°												
C-90-6	9.85	9.60	9.73	11.11	11.05	11.02	11.08	4.34	4.41	4.37	4.38	48.53
C-90-7	10.30	10.00	10.15	10.65	10.68	10.69	10.67	4.37	4.34	4.40	4.36	46.52
C-90-8	10.0	10.00	10.00	11.02	11.01	11.03	11.02	4.49	4.50	4.44	4.50	49.59
C-90-9	9.70	10.00	9.85	11.40	11.35	11.32	11.38	4.63	4.56	4.59	4.60	52.35
C-90-10	9.55	9.70	9.63	10.76	10.72	10.71	10.74	4.54	4.33	4.49	4.44	47.69
SHEAR												
S-NTUA-6	---	---	---	---	---	---	10.88	4.51	4.52	---	4.52	49.12
S-NTUA-7	---	---	---	---	---	---	10.81	4.59	4.47	---	4.53	48.97
S-NTUA-8	---	---	---	---	---	---	10.95	4.64	4.47	---	4.56	49.88
S-NTUA-9	---	---	---	---	---	---	10.84	4.68	4.51	---	4.60	49.80
S-NTUA-10	---	---	---	---	---	---	10.57	4.60	4.55	---	4.58	48.36

2.2 ΔΟΚΙΜΕΣ

Για την εύρεση των ιδιοτήτων του υλικού πραγματοποιήθηκαν από τα πανεπιστήμια DTU και ΕΜΠ οι παρακάτω δοκιμές, συνήθειες για σύνθετα υλικά, σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα.

- ASTM D3039M:
 - Εφελκυσμός στις 0° για τη μέτρηση:
 - Εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας E_{1t} στη διεύθυνση των ινών
 - Λόγος Poisson ν_{12}
 - Μέγιστη εφελκυστική τάση X_{1t} στη διεύθυνση των ινών
 - Εφελκυσμός στις 90° για τη μέτρηση:
 - Εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας E_{2t} στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες
 - Μέγιστη εφελκυστική τάση X_{2t} στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες
- ISO 14126 :
 - Θλίψη στις 0° για μέτρηση:
 - Θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας E_{1c} στη διεύθυνση των ινών
 - Μέγιστη θλιπτική τάση X_{1c} στη διεύθυνση των ινών
 - Θλίψη στις 90° για μέτρηση:
 - Θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας E_{2c} στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες
 - Μέγιστη θλιπτική τάση X_{2c} στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες
- ASTM D5379 :
 - Δοκιμή διάτμησης κατά Iosipescu για μέτρηση:
 - Μέτρο διάτμησης G_{12}
 - Μέγιστη διατμητική τάση S
- Δοκίμια:

Σύμφωνα με τα πρότυπα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε 5 δοκίμια κατασκευασμένα στο ΕΜΠ και σε 5 δοκίμια κατασκευασμένα από το DTU, στις διαστάσεις που αναφέρονται στην παράγραφο 2.1.2

- Εφαρμογή Φορτίου - Δειγματοληψία

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στη συσκευή, ευθυγραμμίζοντας τη μεγαλύτερη πλευρά τους με τη διεύθυνση επιβολής φορτίου. Η επιβολή φορτίου έγινε με εφαρμογή μετατόπισης από την κεφαλή της συσκευής στα δοκίμια. Ο ρυθμός επιβολής φορτίου και η συχνότητα δειγματοληψίας σε κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 2.4:

Πίνακας 2.4 : Ρυθμός επιβολής μετατόπισης και συχνότητα δειγματοληψίας δοκιμών

Δοκιμή	Δοκίμια	Ρυθμός επιβολής μετατόπισης	Συχνότητα δειγματοληψίας
Εφελκυσμός 0° ΕΜΠ	T – 0	1 mm / min	0.2 sec
Εφελκυσμός 90° ΕΜΠ	T – 90	0.5 mm / min	
Εφελκυσμός 0° DTU	BHT1B		
Εφελκυσμός 90° DTU	BHT2B		
Θλίψη 0° ΕΜΠ	C – 0		
Θλίψη 90° ΕΜΠ	C – 90		
Θλίψη 0° DTU	BHT2		
Θλίψη 90° DTU	BHT3B		
Διάτμηση DTU	S – DTU – 1/2/3	0.1 sec	
Διάτμηση DTU	S – DTU – 4		1 mm / min
Διάτμηση DTU	S – DTU – 5		2 mm / min
Διάτμηση ΕΜΠ	S – NTUA		0.5 mm / min

Από τη συσκευή μέτρησης όπου ήταν συνδεδεμένα τα δοκίμια, ελήφθησαν μετρήσεις για τα τέσσερα μεγέθη : χρόνο, μετατόπιση κεφαλής, φορτίο, και οι παραμορφώσεις που μετρώνταν από τα strain gages. Το σήμα από την συσκευή έδινε το φορτίο που επιβαλλόταν στα δοκίμια, ενώ τα σήματα από τα strain gages έδιναν τις μετατοπίσεις που τα δοκίμια υφίσταντο. Τα σήματα της δειγματοληψίας μετρώνταν σε volt, και μετατράπηκαν για τις ανάγκες των υπολογισμών στα κατάλληλα μεγέθη με τη χρήση των αντίστοιχων συναρτήσεων μεταφοράς.

- Αισθητήρες παραμορφώσεων:

- Εφελκυσμός 0° :

Ένα μονό strain gage, μήκους 5 mm, 120 Ω , για κάθε ένα από 3 δοκίμια

Μία ροζέτα 0/90, μήκους 5 mm, 120 Ω , για κάθε ένα από 2 δοκίμια.

- Εφελκυσμός 90° :

Ένα μονό strain gage, μήκους 5 mm, 120 Ω , για κάθε ένα από 3 δοκίμια

Μία ροζέτα 0/90, μήκους 5 mm, 120 Ω , για κάθε ένα από 2 δοκίμια

- Θλίψη 0° :

Ένα μονό strain gage, μήκους 2 mm, 120 Ω , σε κάθε πλευρά για κάθε ένα από 3 δοκίμια

Μία ροζέτα 0/90, μήκους 2 mm, 120 Ω , σε κάθε πλευρά για κάθε ένα από 2 δοκίμια

- Θλίψη 90° :

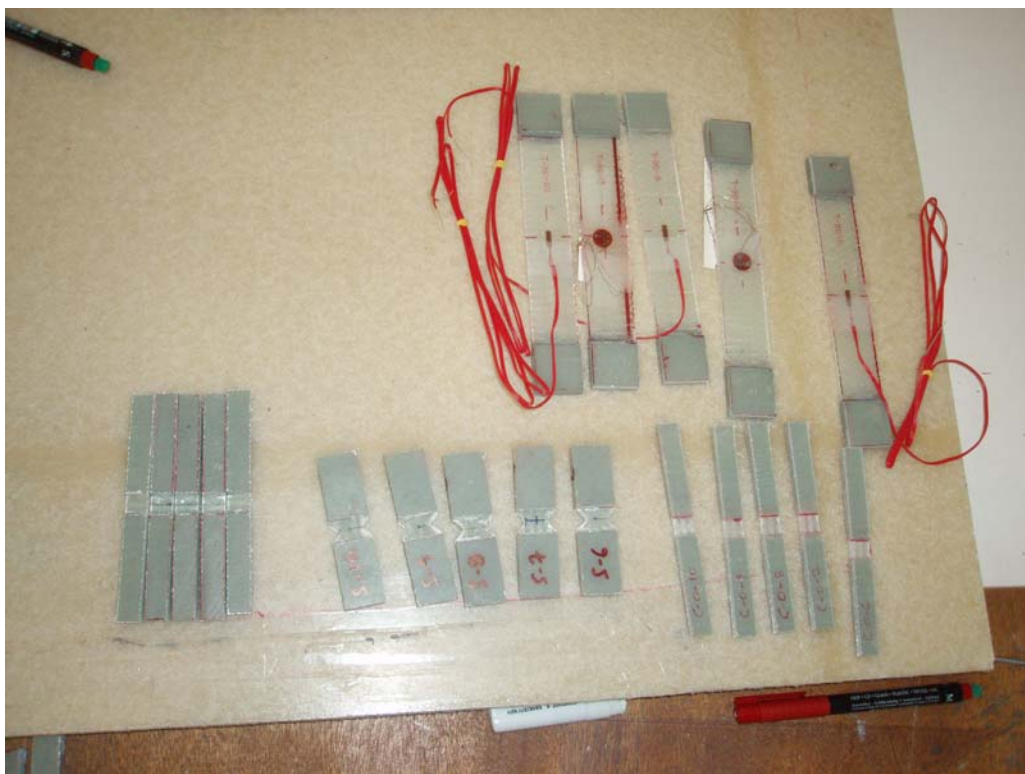
Ένα μονό strain gage, μήκους 2 mm, 120 Ω , σε κάθε πλευρά για κάθε ένα από 3 δοκίμια

Μία ροζέτα 0/90, μήκους 2 mm, 120 Ω , σε κάθε πλευρά για κάθε ένα από 2 δοκίμια

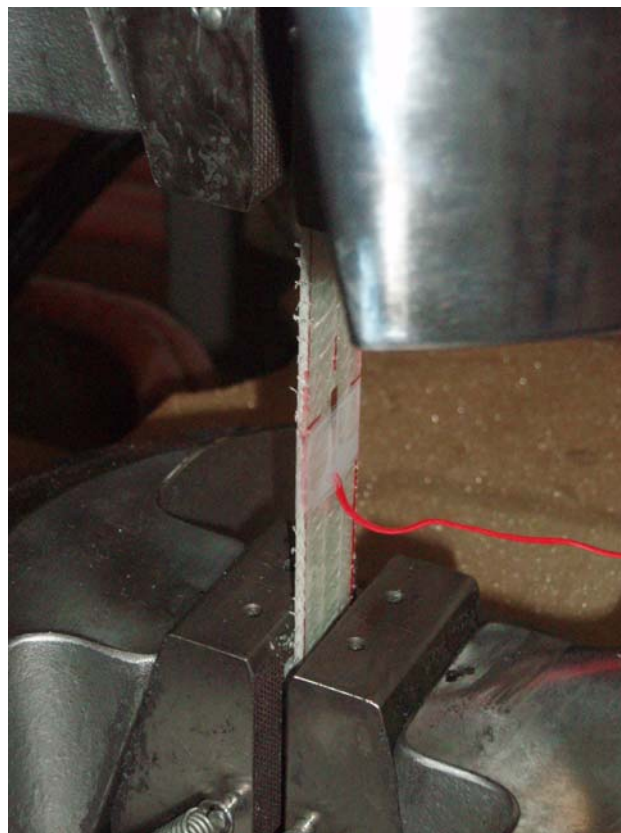
- Διάτμηση:

Μία ροζέτα $\pm 45^\circ$, μήκους 2 mm, 350 Ω , σε κάθε δοκίμιο

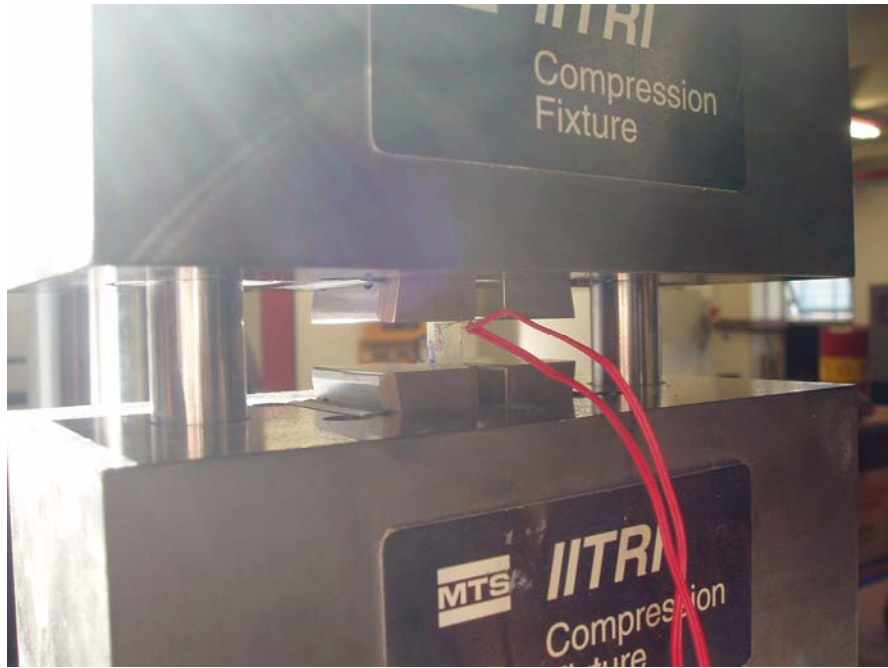
Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες των δοκιμίων ΕΜΠ πριν τη θραύση τους (Σχήμα 2.1), από τις δοκιμές εφελκυσμού (Σχήμα 2.2) και θλίψης (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.1: Δοκίμια ΕΜΠ



Σχήμα 2.2: Δοκιμή εφελκυσμού



Σχήμα 2.3: Δοκιμή Θλίψης

2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΞΑΓΩΓΗΣ

Παρακάτω παρατίθενται οι σχέσεις που οδήγησαν στην εξαγωγή των ιδιοτήτων του υλικού, έπειτα από τις πειραματικές μετρήσεις.

- Εφελκυσμός:

- Τάση

$$\sigma_i = P_i / A,$$

όπου σ_i : η τάση (MPa)

P_i : το φορτίο σε κάθε σημείο μέτρησης (N)

A : η μέση διατομή (mm²), όπου

$A = w \cdot t$, όπου w το μέσο πλάτος και t το μέσο πάχος του δοκιμίου

- Μέγιστη τάση – Αντοχή εφελκυσμού

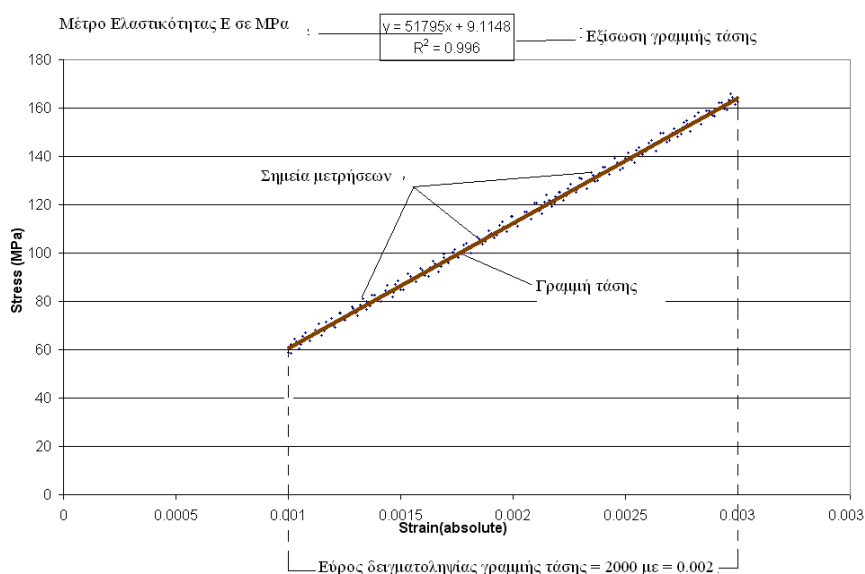
$$X_t = P_{\max} / A$$

όπου X_t : η αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)

P_{\max} : το μέγιστο φορτίο πριν την αστοχία (N)

- Μέτρο Ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται από την εξίσωση γραμμής τάσης των μετρήσεων σ και ϵ . Όπως περιγράφεται στο Σχήμα 2.4, κατασκευάζεται διάγραμμα με τετμημένες τις τιμές παραμόρφωσης, οι οποίες κυμαίνονται σε ένα εύρος ονομαστικής παραμόρφωσης $0.002 = 2000 \mu\epsilon$ από $0.001 (=1000 \mu\epsilon)$ ως $0.003 (=3000 \mu\epsilon)$, και τεταγμένες τις αντίστοιχες τιμές επιβαλλόμενης τάσης, σ . Από τις μετρήσεις αυτές εξάγεται η γραμμή τάσης του διαγράμματος, και εξίσωσή της, η οποία είναι της μορφής $\alpha x + \beta$. Ο συντελεστής α της εξίσωσης δίνει το μέτρο ελαστικότητας σε MPa.



Σχήμα 2.4: Τρόπος εξαγωγής εφελκυστικού μέτρου ελαστικότητας

Το εύρος των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στο διάγραμμα για την εξαγωγή του εφελκυστικού μέτρου ελαστικότητας δίνεται στο πρότυπο, ίσο με {1000 με ~ 3000με}. Όμως, στα δοκίμια εφελκυσμού στις 90° το εύρος παραμορφώσεων από το οποίο εξήχθη το μέτρο ελαστικότητας διαφέρει ως προς το πρότυπο, καθώς τα δοκίμια αστόχησαν πρόωρα και έτσι δεν έλαβαν επαρκείς παραμορφώσεις, δηλαδή τουλάχιστον 3000 με. Στον παρακάτω πίνακα 2.5 παρουσιάζονται αυτά τα δοκίμια, και το εύρος παραμορφώσεων που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητά τους.

Πίνακας 2.5: Δοκίμια με διαφορετικό εύρος παραμόρφωσης, λόγω πρόωρης αστοχίας.

Δοκίμια DTU	Εύρος παραμορφώσεων	Δοκίμια ΕΜΠ	Εύρος παραμορφώσεων
BHT2B01	502 ~ 1702.6	T-90-6	104~2100
BHT2B03	302.2~ 1005	T-90-7	226~1607
BHT2B04	302.2~1303	T-90-8	200.6~2195
BHT2B05	200.6~545	T-90-9	4.2~1657
		T-90-10	6~1604

- Λόγος Poisson

$$\nu = \text{AVERAGE} (- \varepsilon_{\text{transv}} / \varepsilon_{\text{long}})$$

όπου ν : Λόγος Poisson

$\varepsilon_{\text{transv}}$: Παραμόρφωση κάθετη στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, μετρούμενη σε εύρος από 1000με, ως 3000με

$\varepsilon_{\text{long}}$: Παραμόρφωση παράλληλη στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, μετρούμενη σε εύρος από 1000με, ως 3000με.

Ο υπολογισμός του λόγου Poisson έγινε από τις μετρήσεις που ελήφθησαν από τα δοκίμια BHT1B01, BHT2B05, T-0-6, T-0-7, T-90-7, T-90-9, καθώς μόνο σε αυτά τα δοκίμια είχαν τοποθετηθεί ροζέτες που επέτρεπαν τη μέτρηση των παραμορφώσεων σε δύο διευθύνσεις, παράλληλα και κάθετα στη διεύθυνση επιβολής φορτίου.

• Θλίψη

- Τάση – Αντοχή

$$\sigma_{\text{CM}} = P_{\text{max}} / A$$

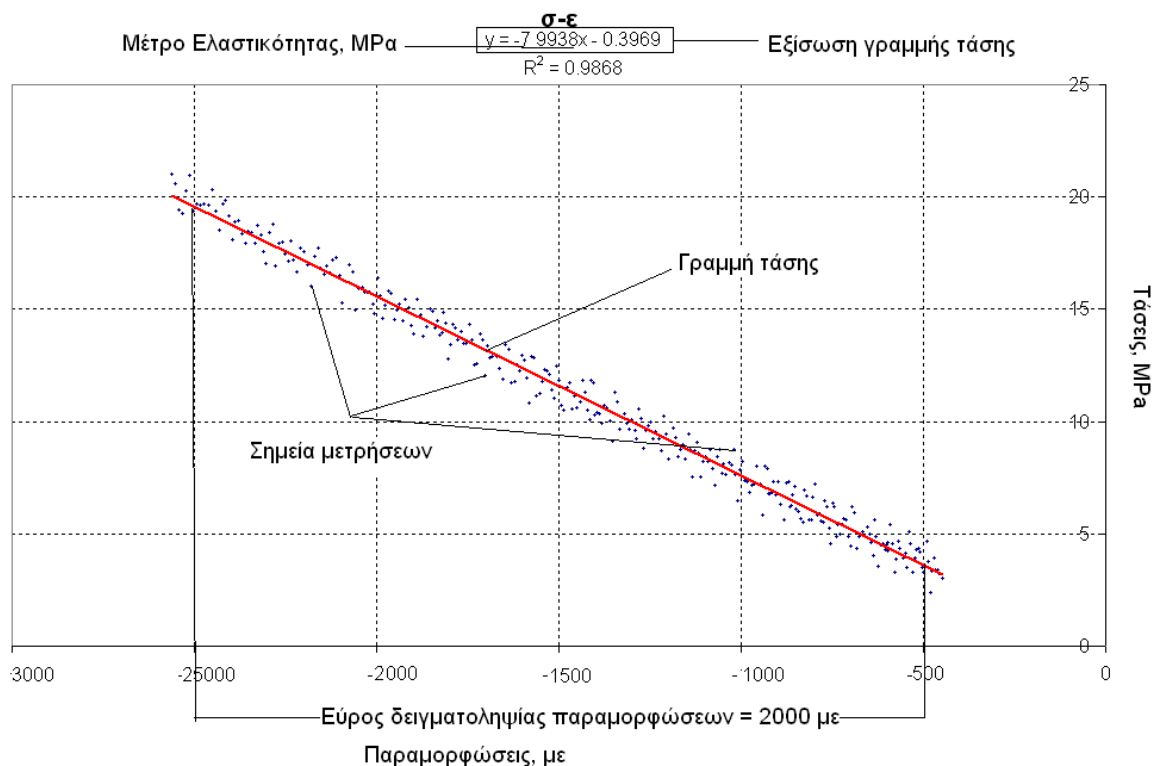
όπου σ_{CM} : θλιπτική αντοχή (MPa)

P_{max} : μέγιστο επιβαλλόμενο θλιπτικό φορτίο (N)

A : επιφάνεια διατομής, με $A = b \cdot h$, όπου b : το πλάτος του δοκιμίου (mm), h : το πάχος του δοκιμίου (mm)

- Θλιπτικό Μέτρο Ελαστικότητας

Το θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας, όπως και το εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας, λαμβάνεται από την εξίσωση γραμμής τάσης των σημείων διαγράμματος που ορίζεται από τις παραμορφώσεις μεταξύ $0.0005 = 500$ με και $0.0025 = 2500$ με και τις αντίστοιχες τιμές επιβαλλόμενης θλιπτικής τάσης. Η εξίσωση γραμμής τάσης είναι της μορφής $\alpha x + \beta$, και το θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας, σε MPa, ισούται με τον συντελεστή α . Το Σχήμα 2.5 παρουσιάζει γραφικά τον τρόπο εξαγωγής του θλιπτικού μέτρου ελαστικότητας.



Σχήμα 2.5: Τρόπος εξαγωγής θλιπτικού μέτρου ελαστικότητας

Όπως συνέβη και στα δοκίμια εφελκυσμού, κάποια δοκίμια θλίψης αστόχησαν αρκετά νωρίς, με αποτέλεσμα οι τιμές παραμορφώσεων να μην προσφέρουν το απαιτούμενο εύρος για την εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι τιμές των παραμορφώσεων ελήφθησαν από τις υπάρχουσες, ώστε να ικανοποιούν το εύρος των 2000 με. Τα δοκίμια στα οποία συνέβη αυτό είναι τα: C – 0 – 8, με εύρος τιμών παραμόρφωσης {345,1306} με και C – 0 – 9, με εύρος τιμών παραμόρφωσης {100,2472} με.

- Θλιπτική Παραμόρφωση:

$$\epsilon_{cM} = (\epsilon_{11a} + \epsilon_{11b}) / 2$$

όπου ϵ_{11a} , ϵ_{11b} οι διαμήκεις παραμορφώσεις στις αντίθετες πλευρές του δοκιμίου

- Λόγος Poisson

$$\nu = \text{AVERAGE} (- \varepsilon_{\text{transv}} / \varepsilon_{\text{long}})$$

όπου ν : Λόγος Poisson

$\varepsilon_{\text{transv}}$: Μέση θλιπτική παραμόρφωση κάθετη στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, μετρούμενη σε εύρος από 500 με, ως 2500 με

$\varepsilon_{\text{long}}$: Μέση θλιπτική παραμόρφωση παράλληλη στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, μετρούμενη σε εύρος από 500 με, ως 2500 με.

Αντίστοιχα με τα δοκίμια θλίψης, ο υπολογισμός του λόγου Poisson έγινε από τις μετρήσεις που ελήφθησαν από τα δοκίμια BHT2004, BHT2005, BHT3B04, BHT3B05, C-0-9, C-0-10, C-90-4, C90-5, καθώς μόνο σε αυτά τα δοκίμια είχαν τοποθετηθεί ροζέτες που επέτρεπαν τη μέτρηση των παραμορφώσεων σε δύο διευθύνσεις, παράλληλα και κάθετα στη διεύθυνση επιβολής φορτίου.

• Διάτμηση

- Τάση

$$\tau_i = P_i / A,$$

όπου τ_i : διατμητική τάση (MPa)

P_i : το φορτίο σε κάθε σημείο μέτρησης (N)

A : η μέση διατομή (mm^2), όπως ορίζεται στο πρότυπο: $A = w \cdot h$,
όπου w : το πλάτος του δοκιμίου στην περιοχή εγκοπής
 h : το πάχος του δοκιμίου στην περιοχή εγκοπής

- Μέγιστη τάση – Αντοχή σε διάτμηση

$$S = P_{\text{max}} / A$$

όπου X_i : η αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)

P_{max} : το μέγιστο φορτίο (N) πριν την αστοχία ή σε παραμόρφωση 5% (=50000 με)

- Διατμητική παραμόρφωση

$$\gamma_i = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}|$$

όπου γ_i : η διατμητική παραμόρφωση για i σημείο μέτρησης (με)

ε_{+45} : η παραμόρφωση για $+45^\circ$ για i σημείο μέτρησης (mm)

ε_{-45} : η παραμόρφωση για -45° για i σημείο μέτρησης (mm)

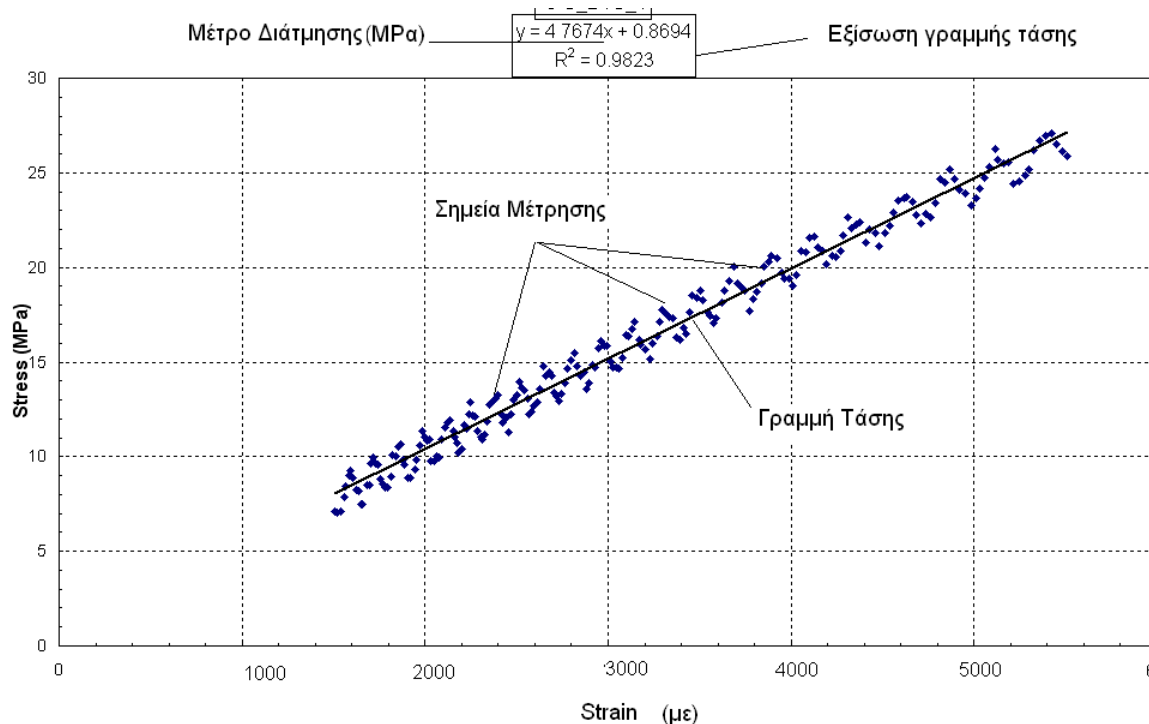
- Μέγιστη διατμητική παραμόρφωση

$$\gamma_\alpha = \min \{ 5\%, \gamma_{\text{ultimate}} \}$$

η παραμόρφωση γ στο φορτίο αστοχίας ή 5% (=50000 με), όποιο είναι μικρότερο

- Μέτρο Διάτμησης

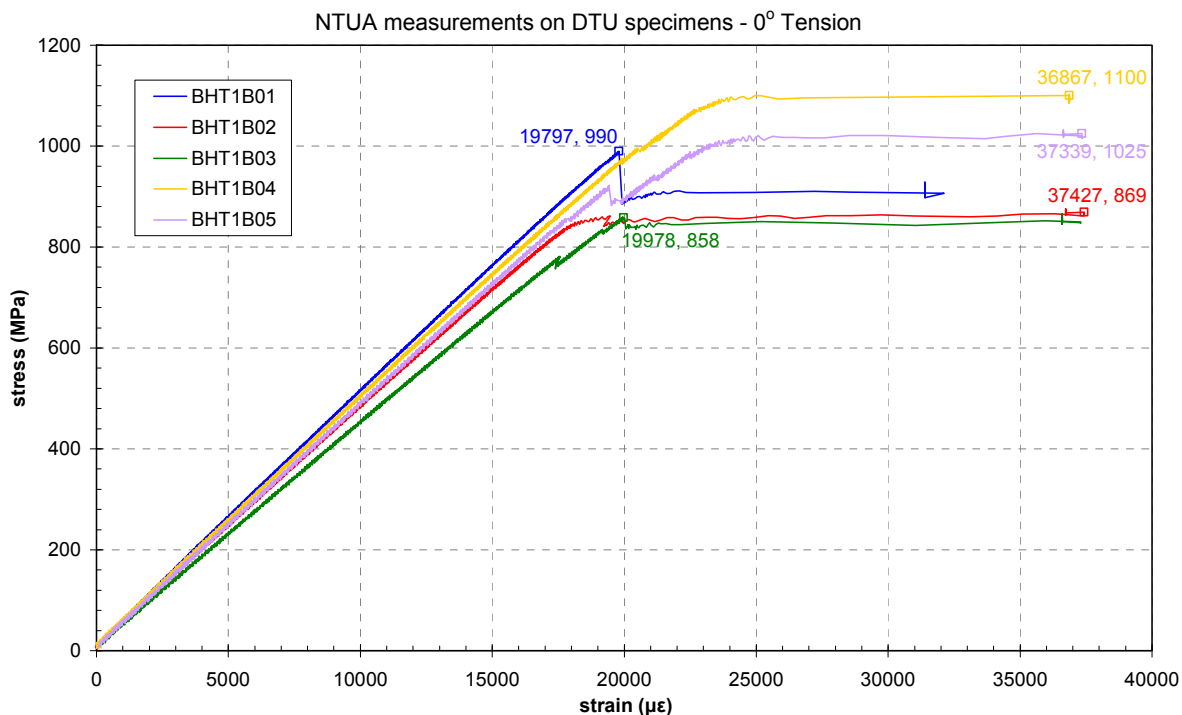
Το μέτρο διάτμησης εξάγεται, όπως και το θλιπτικό και εφελκυστικό μέτρο ελαστικότητας, από την εξίσωση γραμμής τάσης του διαγράμματος διατμητικής τάσης τ , διατμητικής παραμόρφωσης γ . Το εύρος της μετρούμενης παραμόρφωσης για τη διάτμηση είναι 4000 $\mu\epsilon$, ξεκινώντας από το ελάχιστη μέτρηση μεταξύ (1500,2500 $\mu\epsilon$). Οι μετρήσεις δηλαδή γίνονται για παραμορφώσεις που κυμαίνονται στο διάστημα ($\min\{1500,2500\}, \min\{5500,6500\}$) $\mu\epsilon$. Στο παρακάτω Σχήμα 2.6 φαίνεται γραφικά ο τρόπος εξαγωγής του μέτρου διάτμησης.



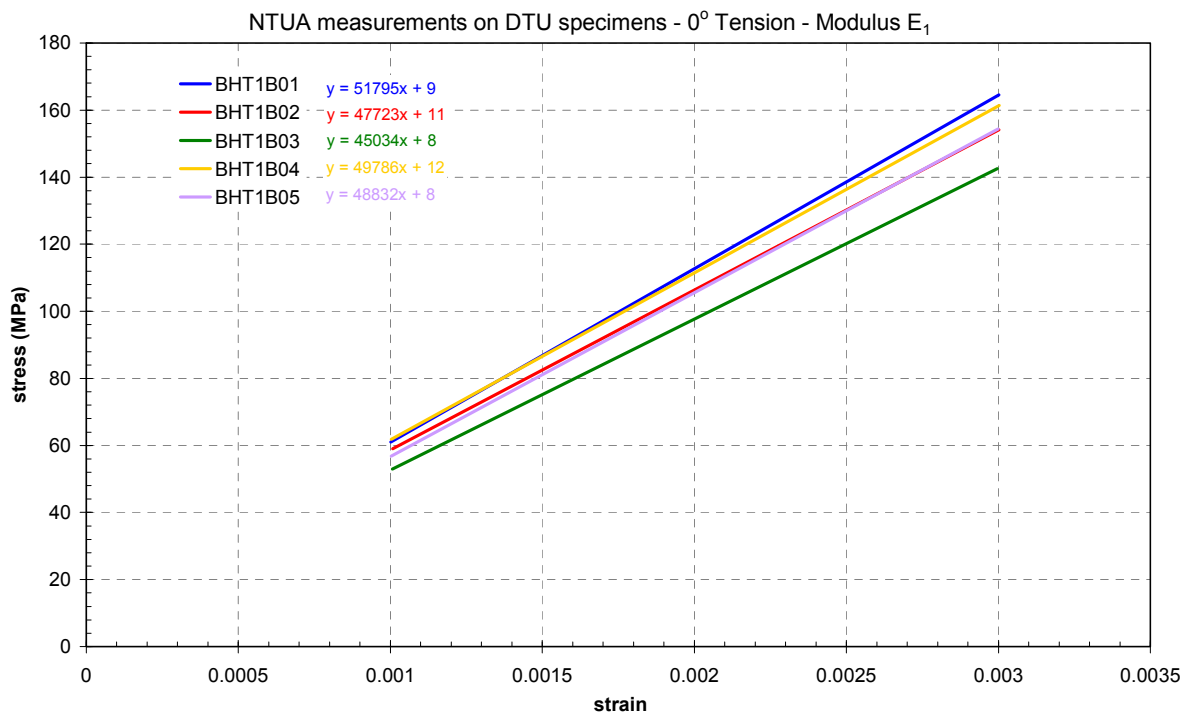
Σχήμα 2.6: Τρόπος εξαγωγής μέτρου διάτμησης

2.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ – ΔΟΚΙΜΙΑ DTU

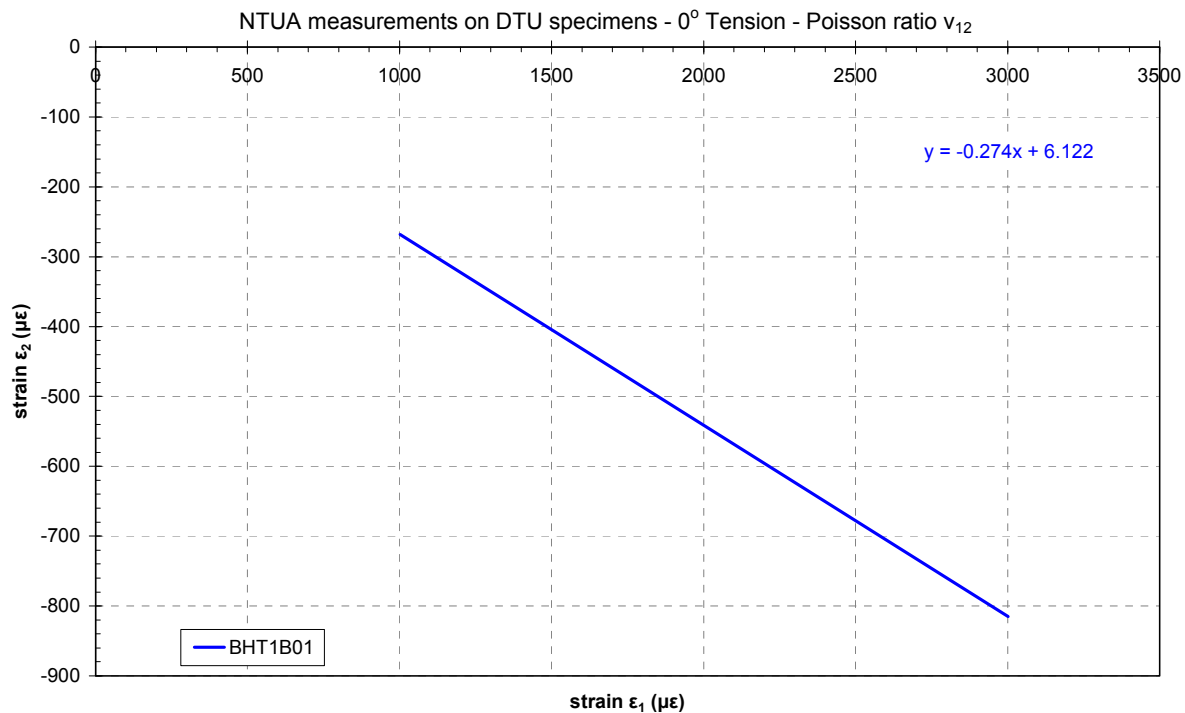
Στη συνέχεια, στα σχήματα 2.7~ 2.20 παρατίθενται οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των δοκιμών που έγιναν στα υλικά DTU,, καθώς και οι γραφικές εκτιμήσεις των διαφόρων μέτρων ελαστικότητας και λόγων Poisson. Στον πίνακα 2.6 παρουσιάζονται οι τιμές των ιδιοτήτων που υπολογίστηκαν για τα δοκίμια DTU, με βάση τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο του ΕΜΠ.



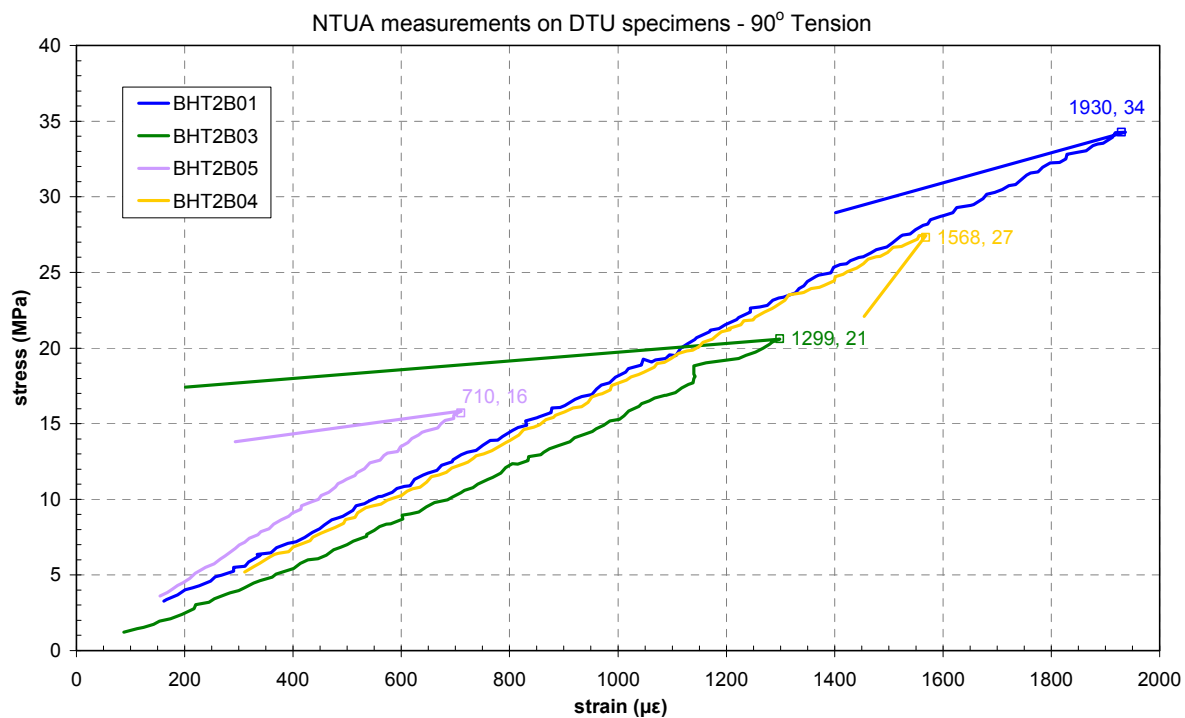
Σχήμα 2.7 Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT1B – Εξέλιξη τάσης σ_1 - παραμόρφωσης ϵ_1 στις 0°



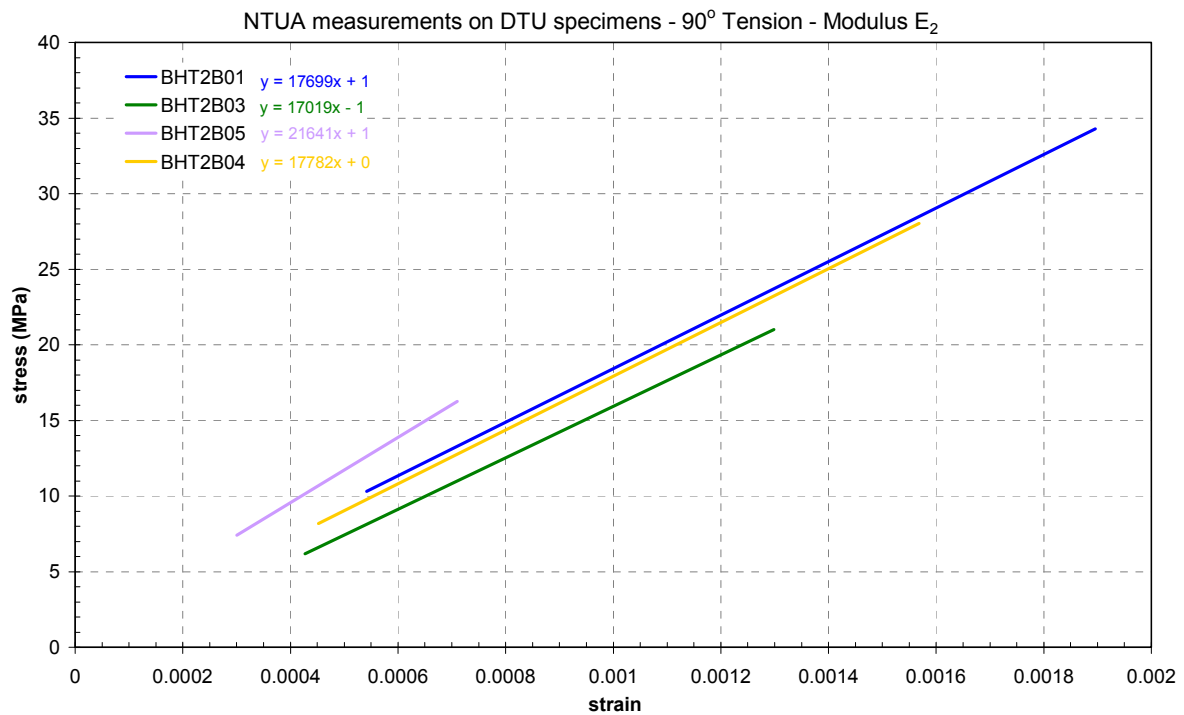
Σχήμα 2.8: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT1B – Εκτίμηση Εφελκυστικού Μέτρου Ελαστικότητας E_{1t}



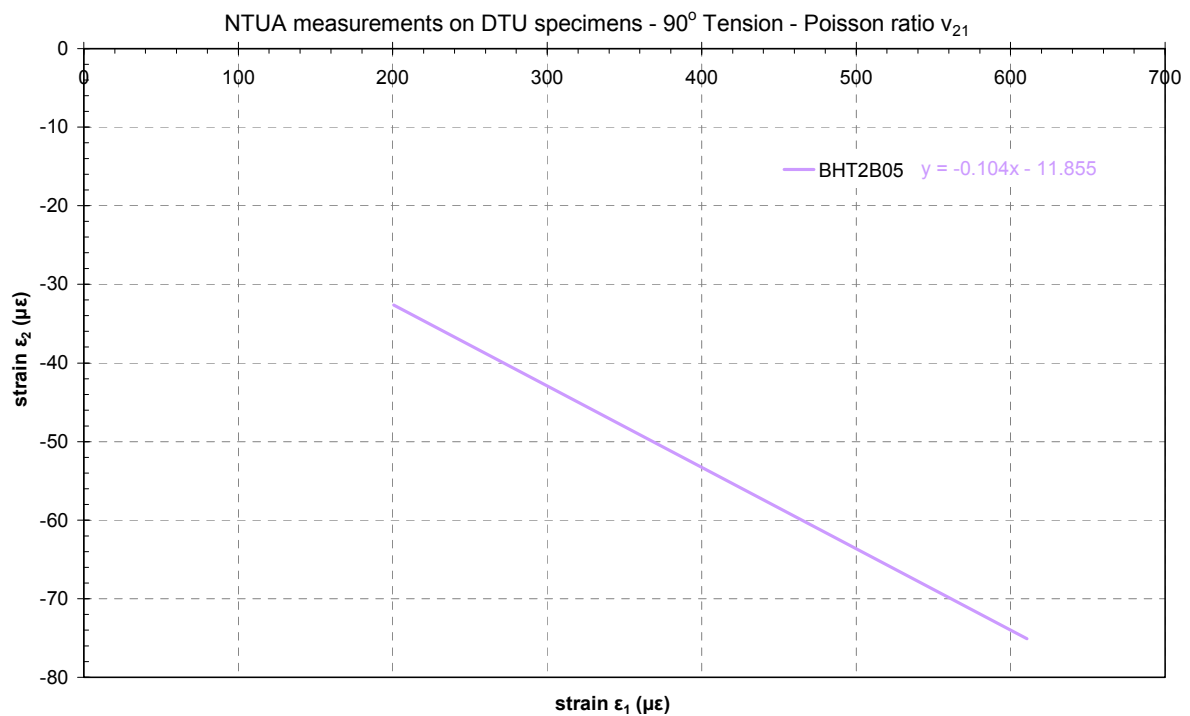
Σχήμα 2.9: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT1B – Εκτίμηση Λόγου Poisson ν_{12}



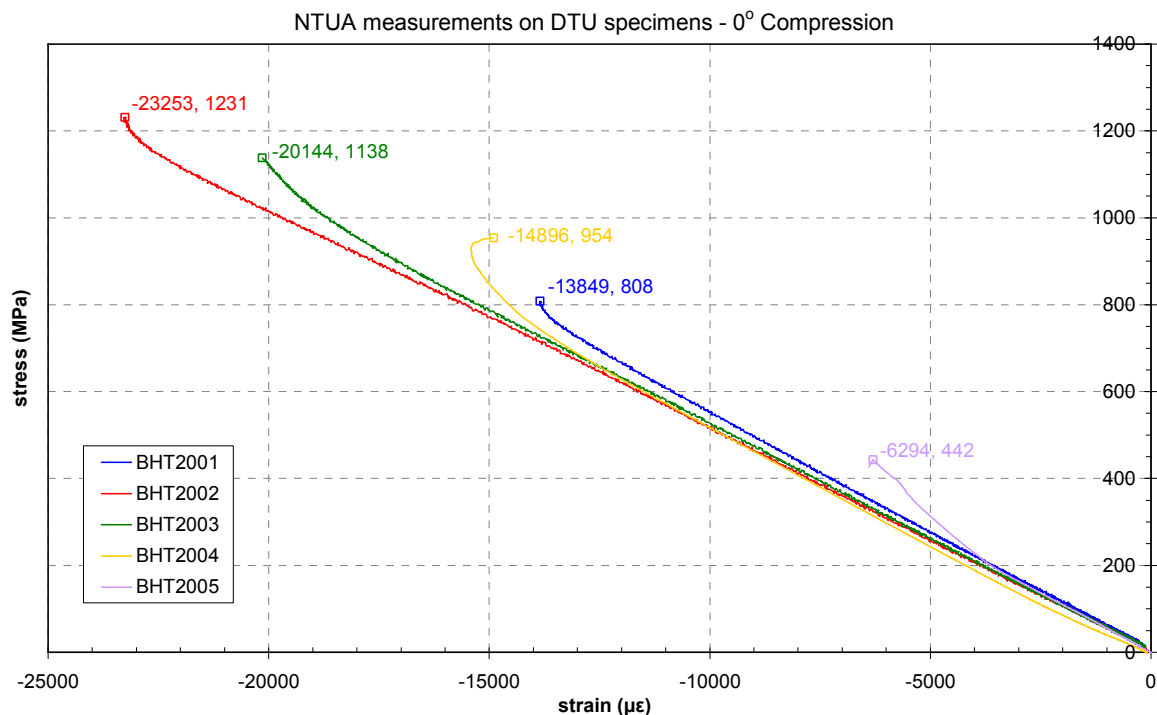
Σχήμα 2.10: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT2B - Εξέλιξη τάσης σ_2 - παραμόρφωσης ϵ_2 στις 90°



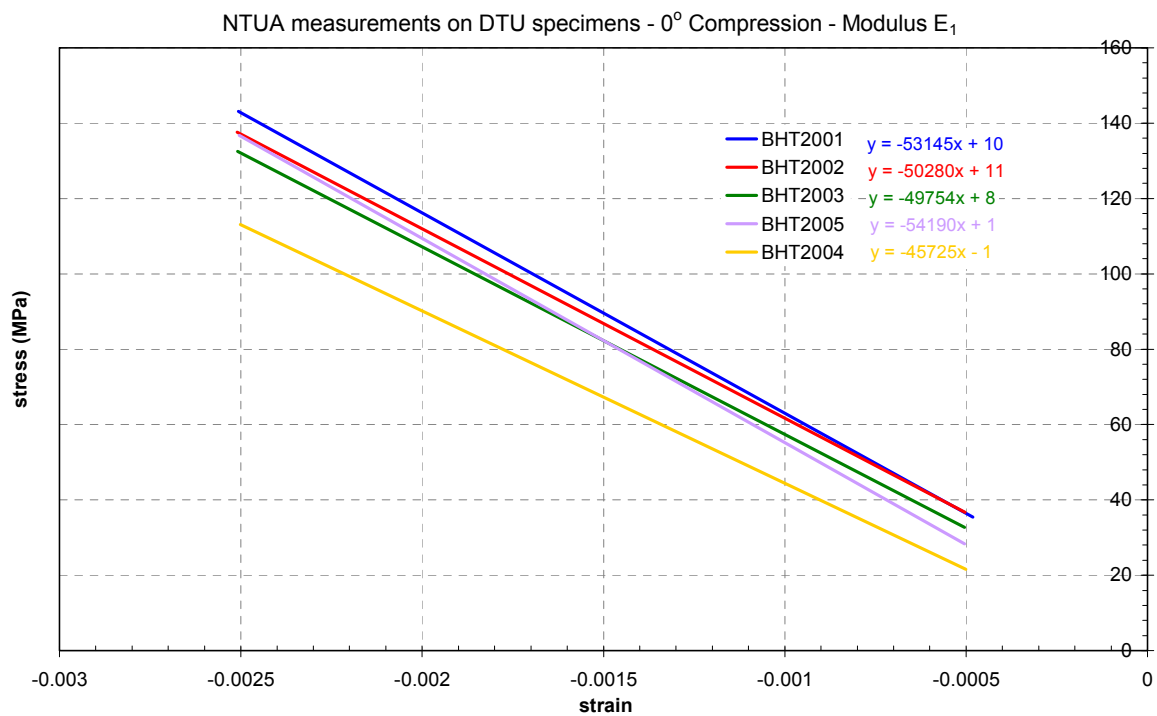
Σχήμα 2.11: Δοκίμα υλικού DTU – Σειρά BHT2B - Εκτίμηση Εφελκυστικού Μέρους Ελαστικότητας E_{21}



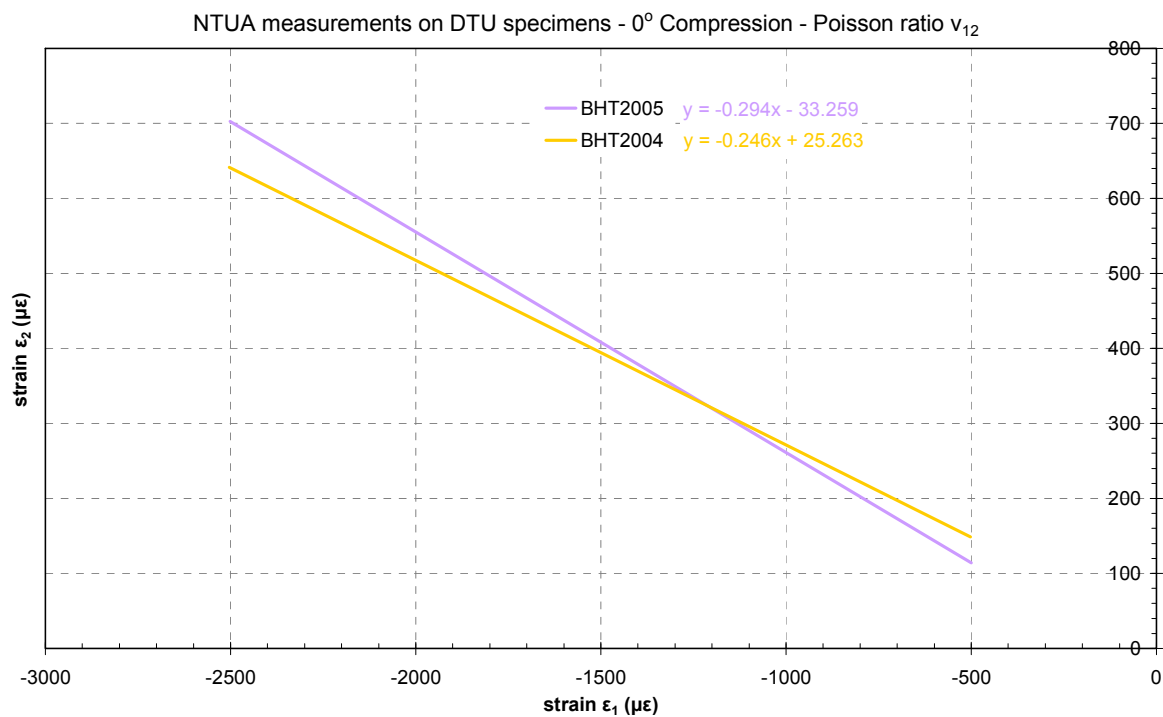
Σχήμα 2.12 : Δοκίμα υλικού DTU – Σειρά BHT2B - Εκτίμηση Λόγου Poisson ν_{21}



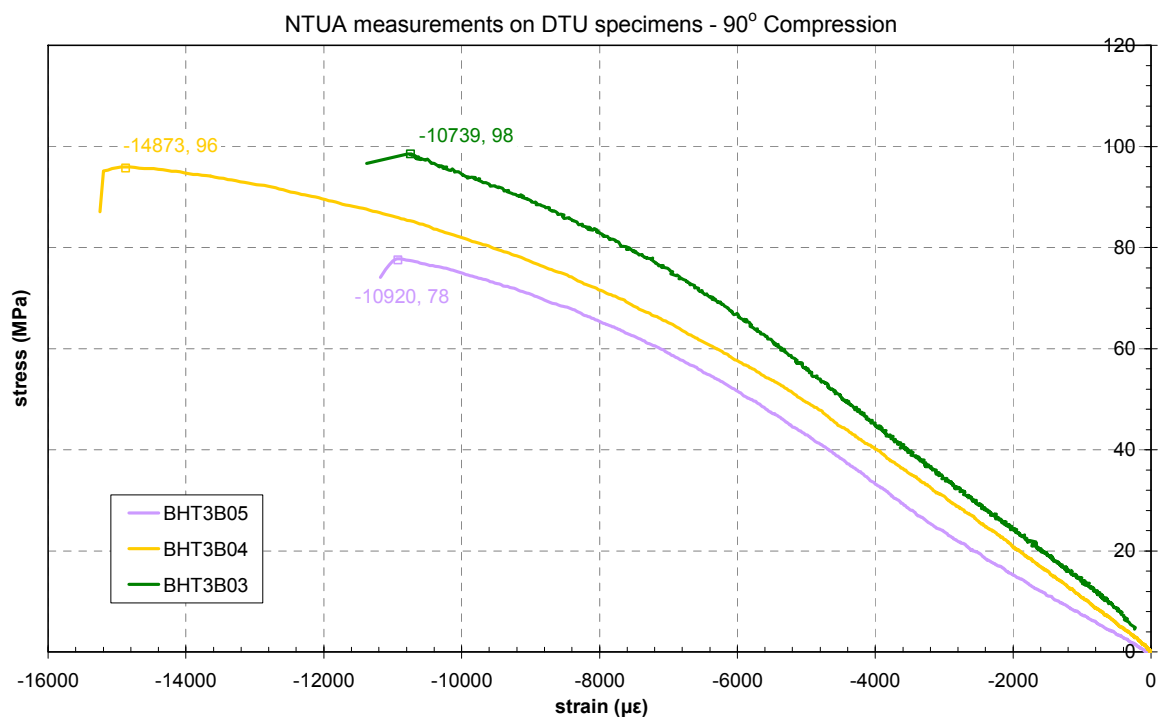
Σχήμα 2.13: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT2 - Εξέλιξη τάσης σ_1 - παραμόρφωσης ϵ_1 στις 0°



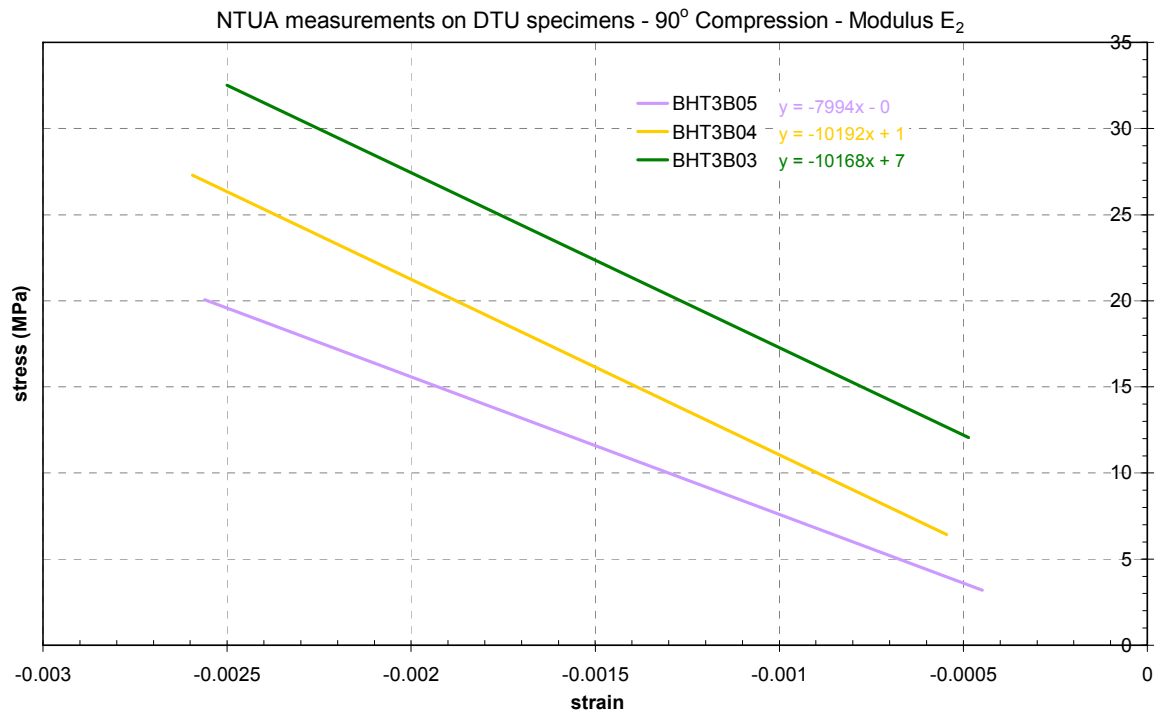
Σχήμα 2.14: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT2 - Εκτίμηση Θλιπτικού Μέρους Ελαστικότητας E_{1c}



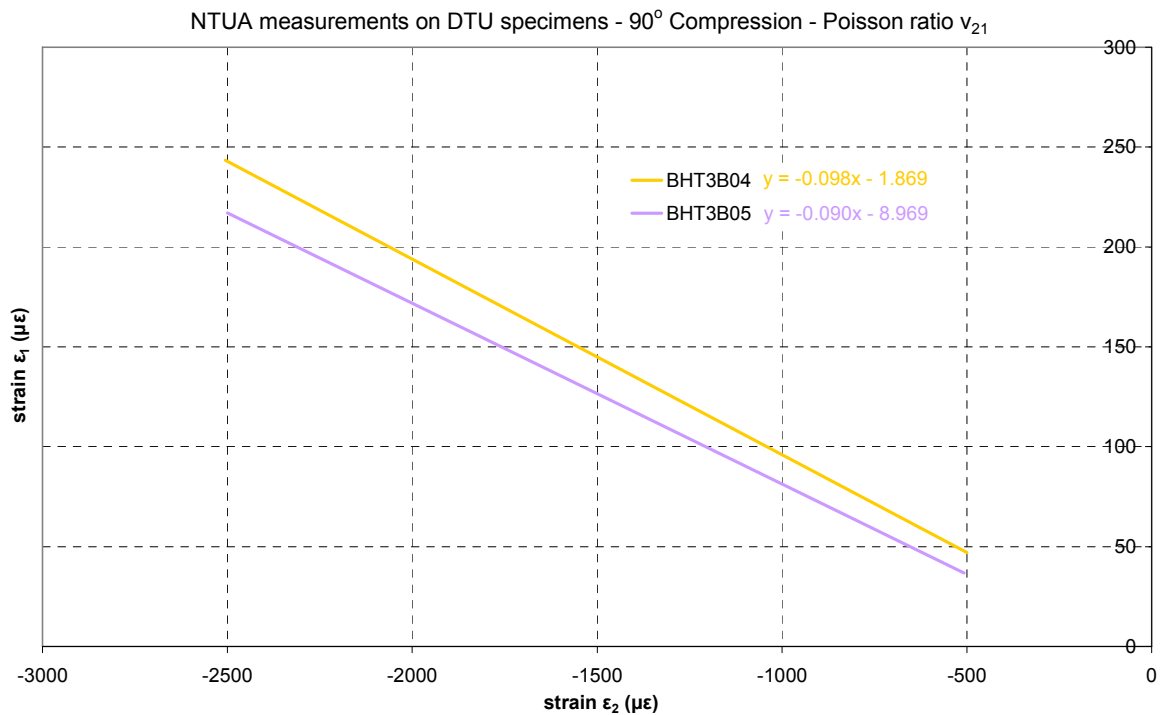
Σχήμα 2.15: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT2 - Εκτίμηση Λόγου Poisson ν_{12}



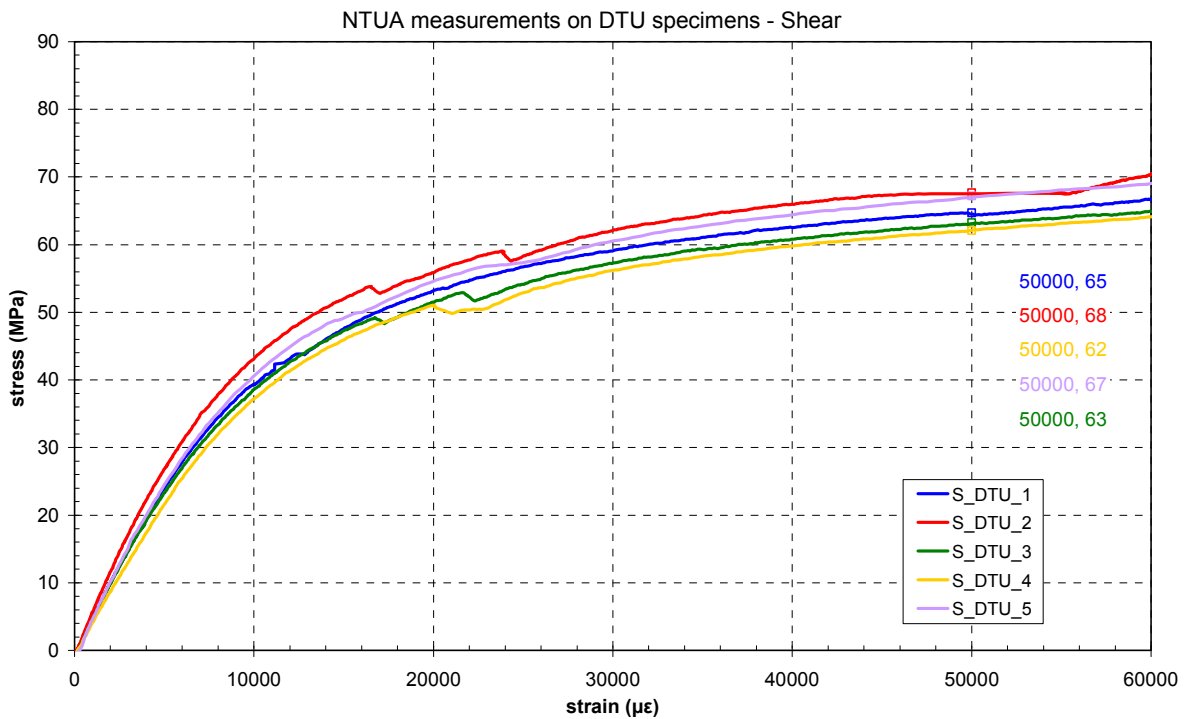
Σχήμα 2.16: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT3B - Εξέλιξη τάσης σ_2 - παραμόρφωσης ϵ_2 στις 90°



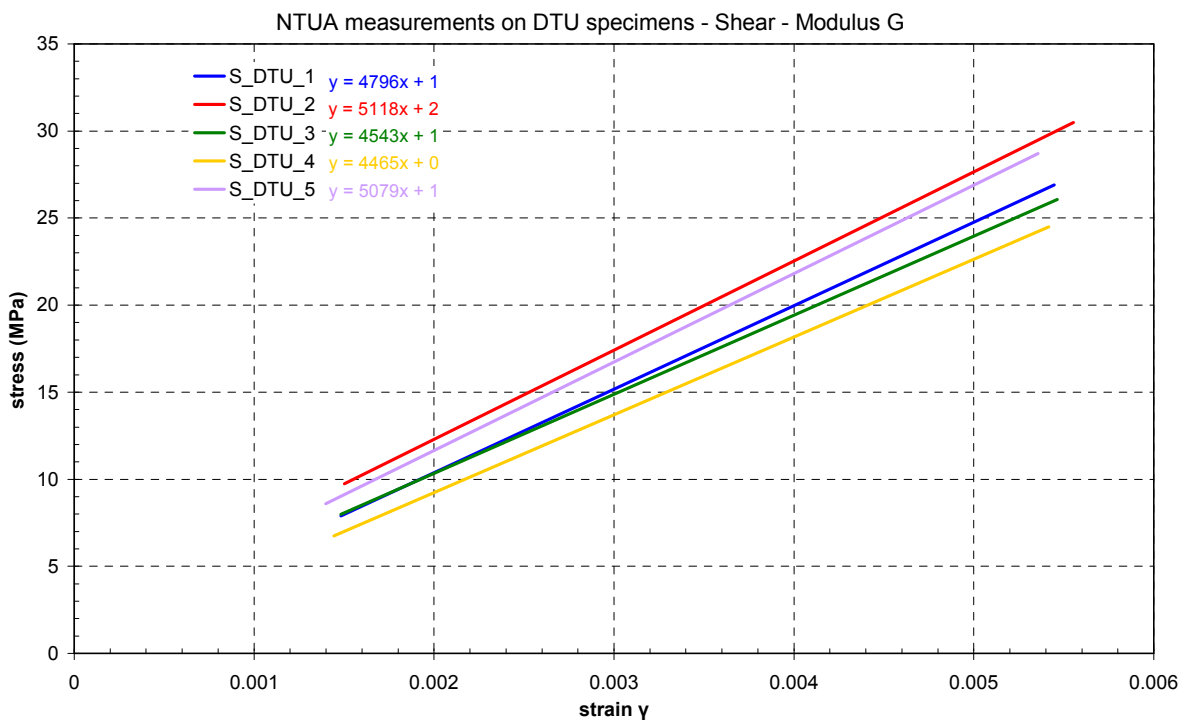
Σχήμα 2.17: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT3B - Εκτίμηση Θλιπτικού Μέρους Ελαστικότητας E_{2c}



Σχήμα 2.18: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά BHT3B - Εκτίμηση Λόγου Poisson ν_{21}



Σχήμα 2.19: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά S_DTU – Διατμητική τάση τ - παραμόρφωση γ



Σχήμα 2.20: Δοκίμια υλικού DTU – Σειρά S_DTU- Εκτίμηση Διατμητικού Μέτρου Ελαστικότητας G_{12}

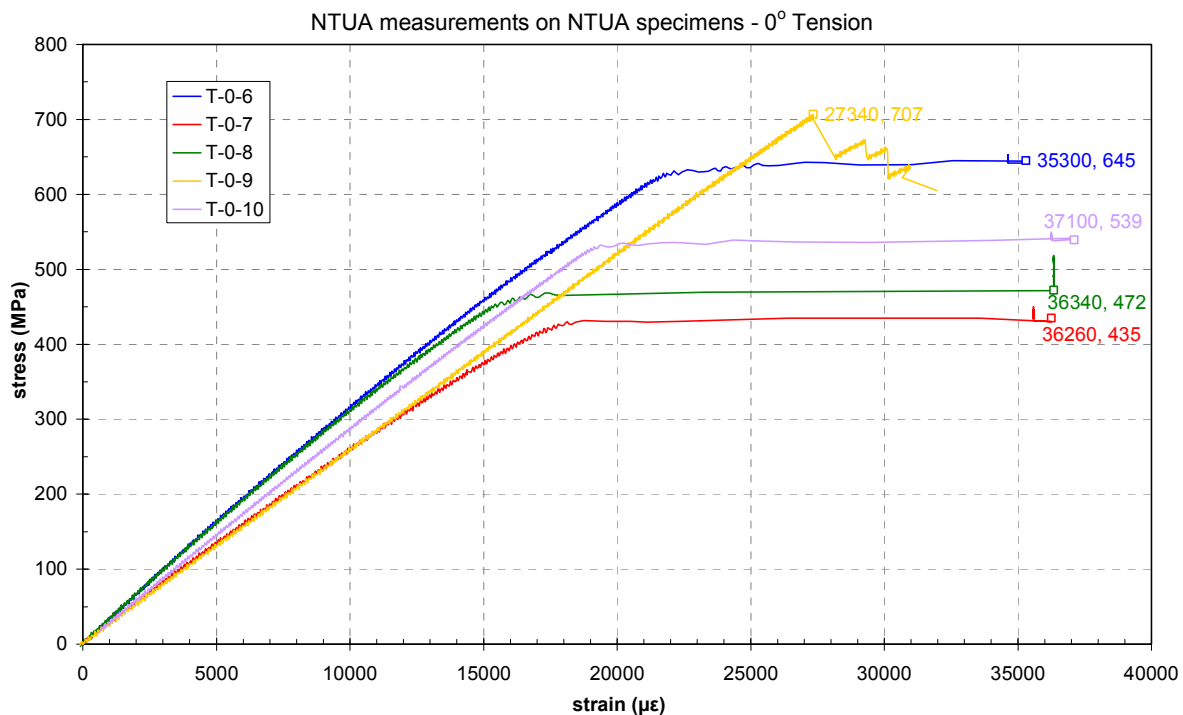
Πίνακας 2.6: Μηχανικές Ιδιότητες δοκιμίων υλικού DTU, κατά μετρήσεις ΕΜΠ

TENSION 0°				
Specimen	E_{1t} (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{1max} (%)	V_{12}
BHT1B01	51795	990	1.980	0.274
BHT1B02	47723	869	3.743	NOT MEASURED
BHT1B03	45034	858	1.998	NOT MEASURED
BHT1B04	49786	1100	3.687	NOT MEASURED
BHT1B05	48832	1025	3.734	NOT MEASURED
AVERAGE	48634	968	3.028	0.274
ST. DEV.	2507	104	0.949	
TENSION 90°				
Specimen	E_{2t} (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{2max} (%)	V_{21}
BHT2B01	17699	34	0.193	NOT MEASURED
BHT2B02	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED
BHT2B03	17019	21	0.130	NOT MEASURED
BHT2B04	17782	27	0.157	NOT MEASURED
BHT2B05	21641	16	0.071	0.104
AVERAGE	18535	24	0.138	0.104
ST. DEV.	2099	8	0.051	
COMPRESSION 0°				
Specimen	E_{1c} (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{1max} (%)	V_{12}
BHT2001	53145	808	1.385	NOT MEASURED
BHT2002	50280	1231	2.325	NOT MEASURED
BHT2003	49754	1138	2.014	NOT MEASURED
BHT2004	45725	954	1.490	0.246
BHT2005	54190	442	0.629	0.294
BHT2006	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED
BHT2007	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED
AVERAGE	50619	915	1.569	0.270
ST. DEV.	3315	311	0.651	0.034
COMPRESSION 90°				
Specimen	E_{2c} (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{2max} (%)	V_{21}
BHT3B01	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED
BHT3B02	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED
BHT3B03	10168	98	-1.074	NOT MEASURED
BHT3B04	10192	96	-1.487	0.098
BHT3B05	7994	78	-1.092	0.090
BHT3B06	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED
AVERAGE	9451	91	-1.218	0.094
ST. DEV.	1262	11	0.234	0.006

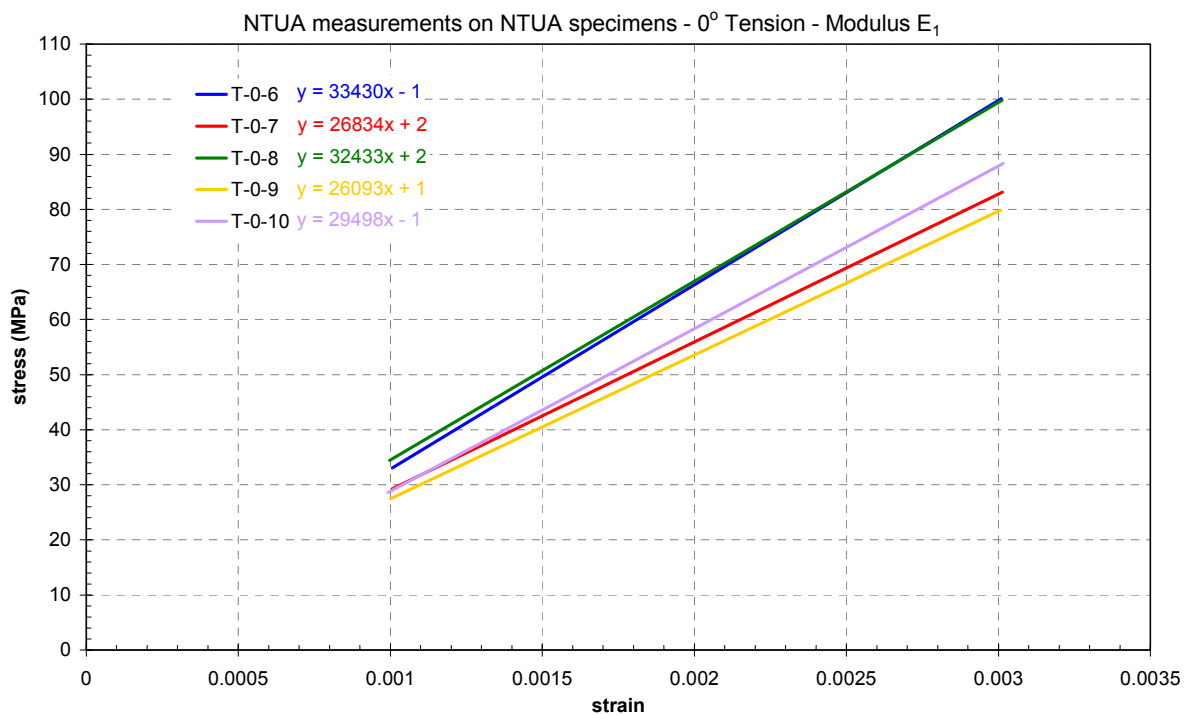
SHEAR				
Specimen	G ₁₂ (MPa)	T _{max} (MPa)	γ _{12max} (%)	-
S_DTU_1	4796	65	5.000	-
S_DTU_2	5118	68	5.000	-
S_DTU_3	4543	63	5.000	-
S_DTU_4	4465	62	5.000	-
S_DTU_5	5079	67	5.000	-
S_DTU_6	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED	-
AVERAGE	4800	65	5.000	-
ST. DEV.	299	2	0.000	-

2.3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ – ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΜΠ (ΝΤΥΑ)

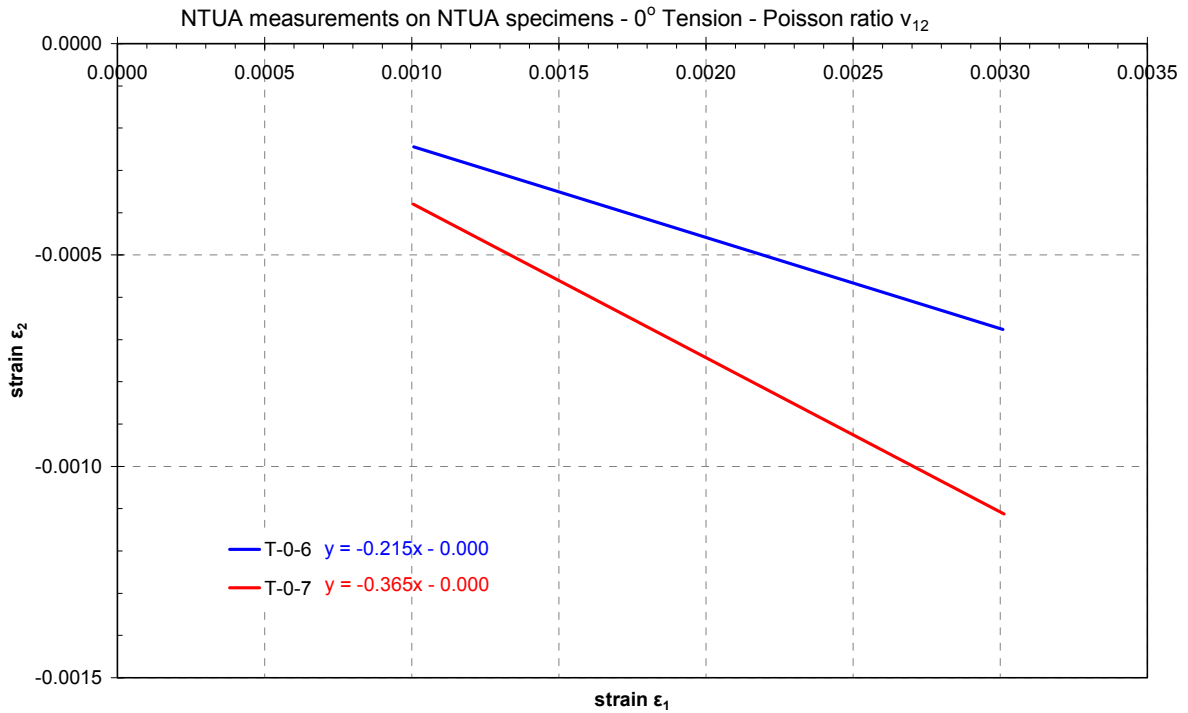
Στη συνέχεια, στα Σχήματα 2.21~ 2.34 παρατίθενται οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των δοκιμών που έγιναν στα υλικά ΝΤΥΑ, καθώς και οι γραφικές εκτιμήσεις των διαφόρων μέτρων ελαστικότητας και λόγων Poisson. Στον πίνακα 2.7 παρουσιάζονται οι τιμές των ιδιοτήτων που υπολογίστηκαν για τα δοκίμια ΝΤΥΑ, με βάση τις πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο του ΕΜΠ.



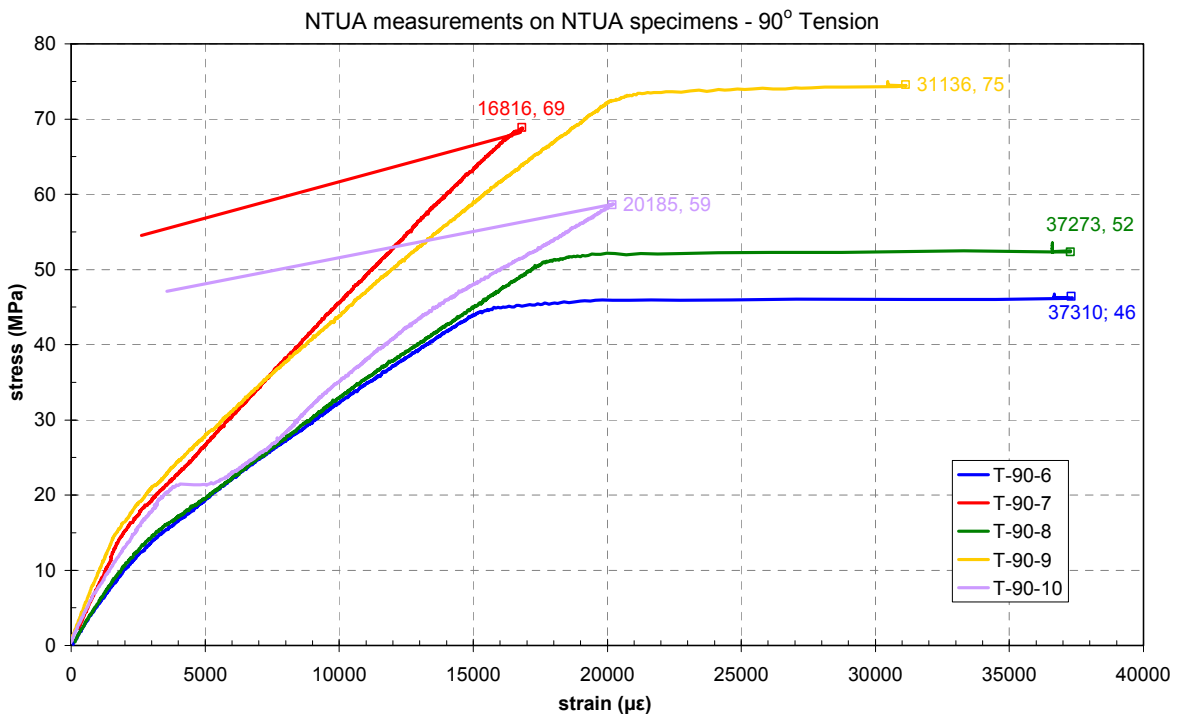
Σχήμα 2.21: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά T-0 - Εξέλιξη τάσης σ_1 - παραμόρφωσης ϵ_1 στις 0°



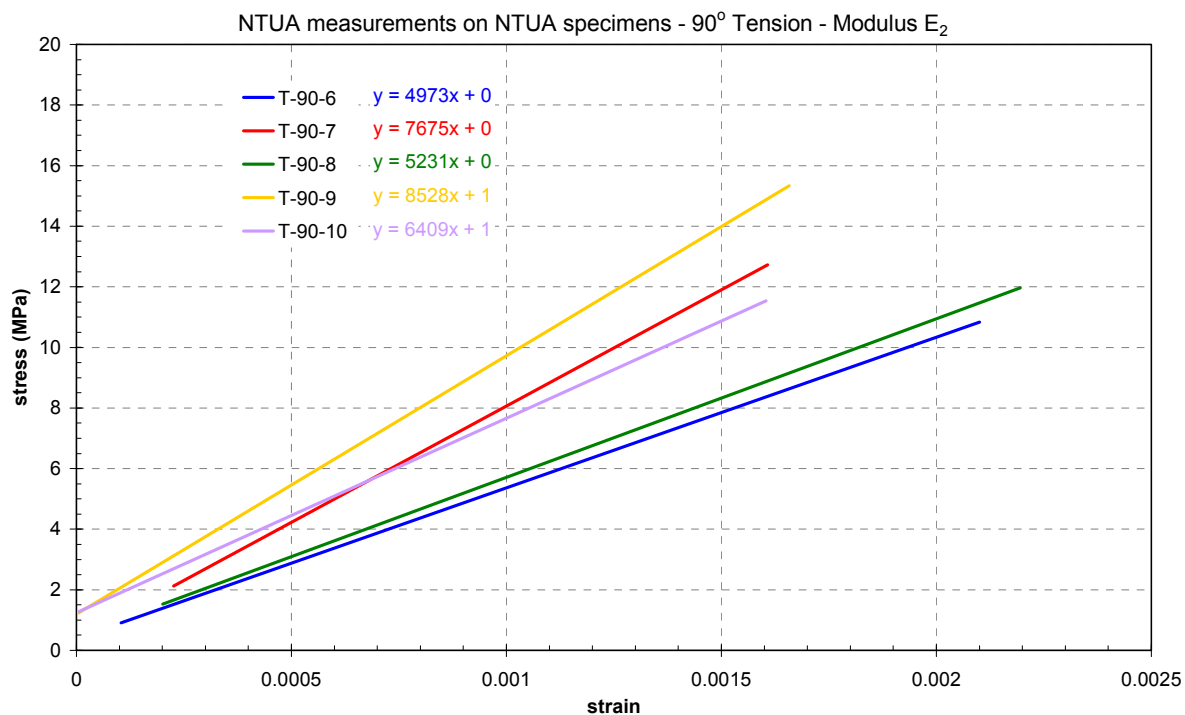
Σχήμα 2.22: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά T-0 - Εκτίμηση Εφελκυστικού Μέρους Ελαστικότητας E_{1t}



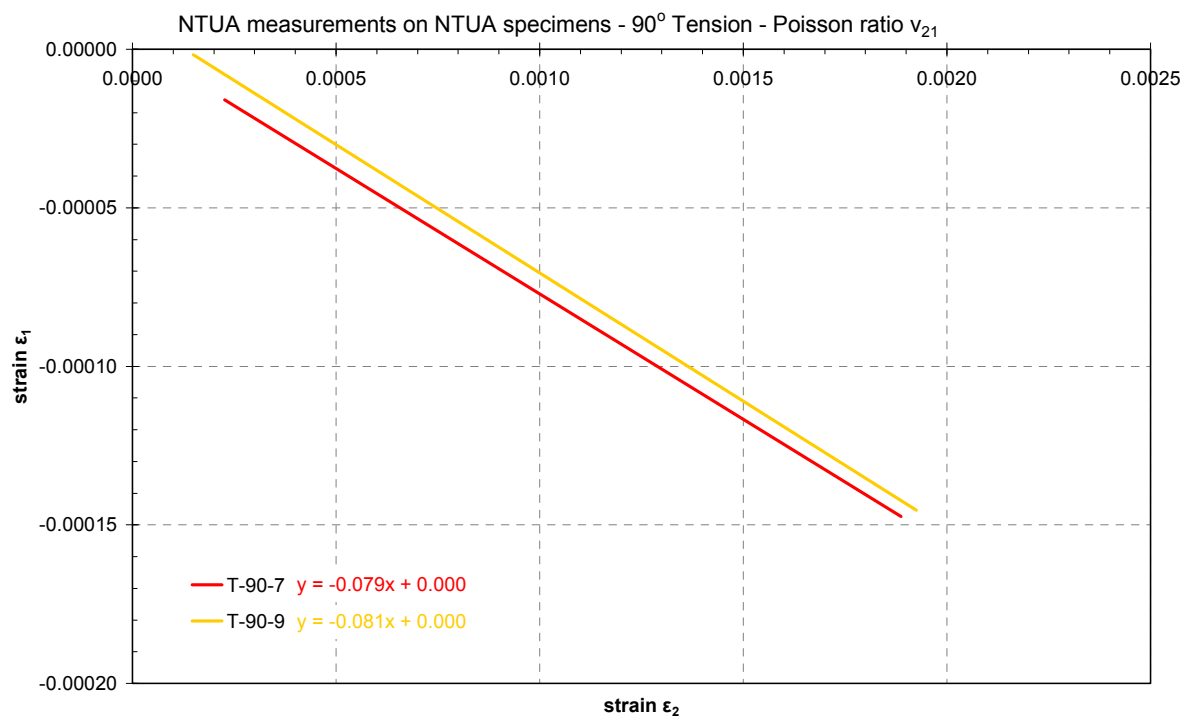
Σχήμα 2.23: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά T-0 – Εκτίμηση Λόγου Poisson ν_{12}



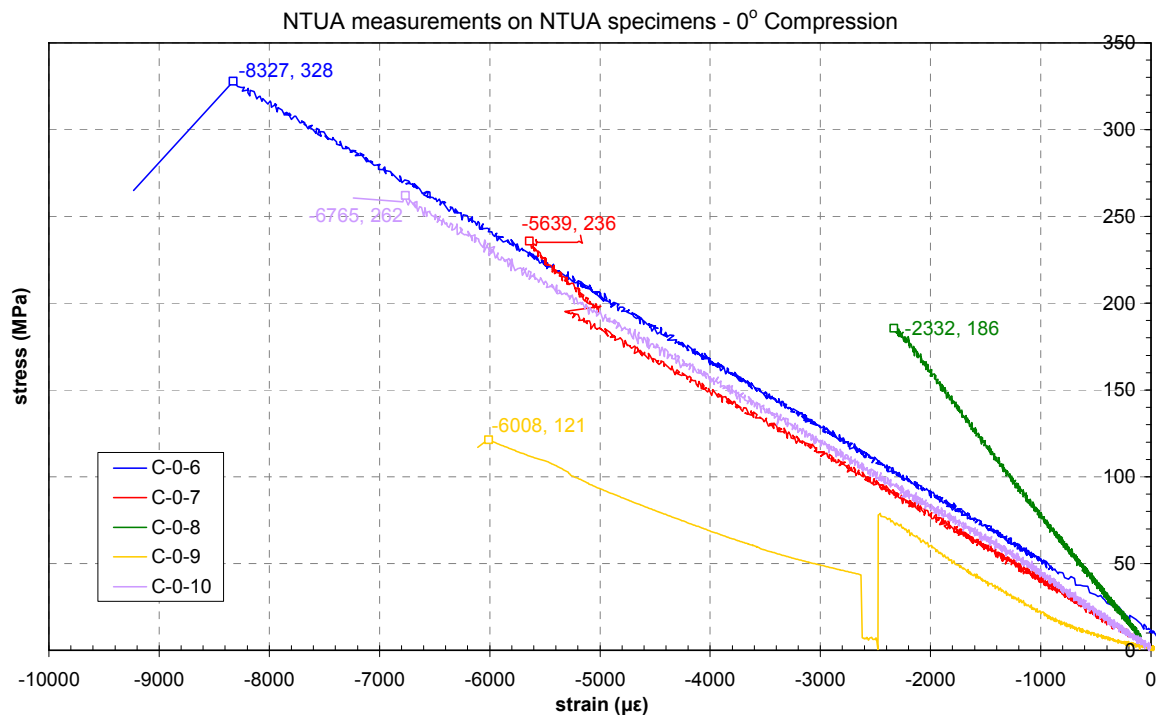
Σχήμα 2.24: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά T-90 - Εξέλιξη τάσης σ_2 - παραμόρφωσης ϵ_2 στις 90°



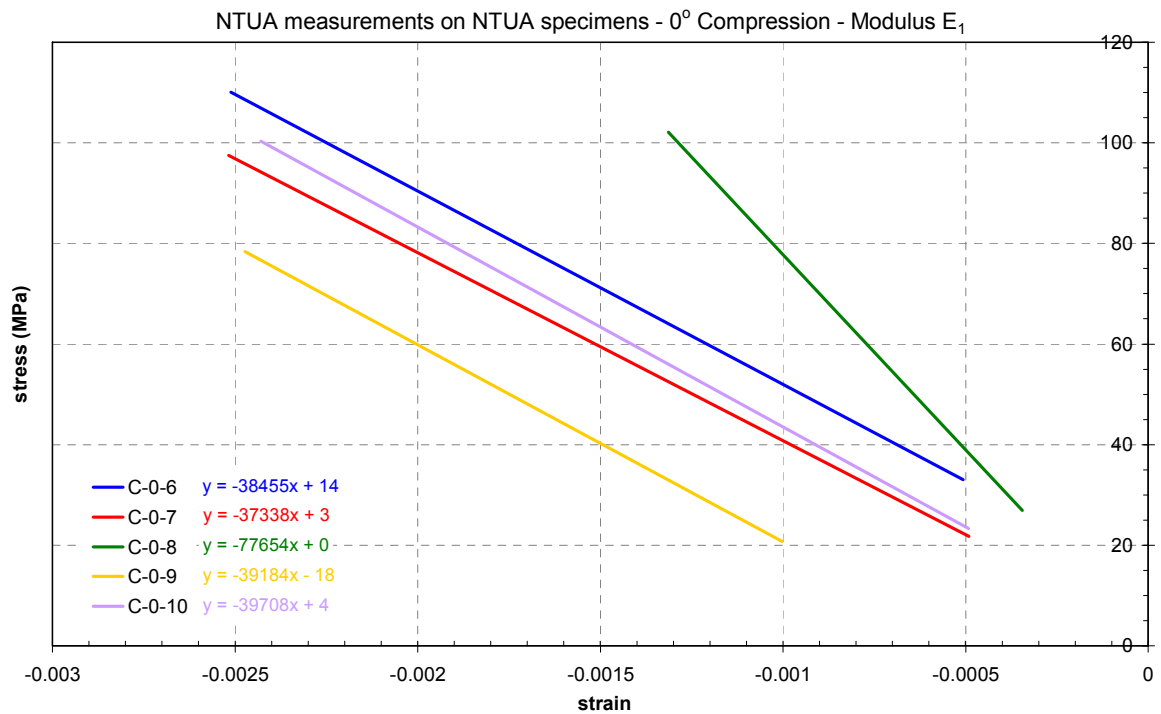
Σχήμα 2.25: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά T-90 - Εκτίμηση Εφελκυστικού Μέρους Ελαστικότητας E_{2t}



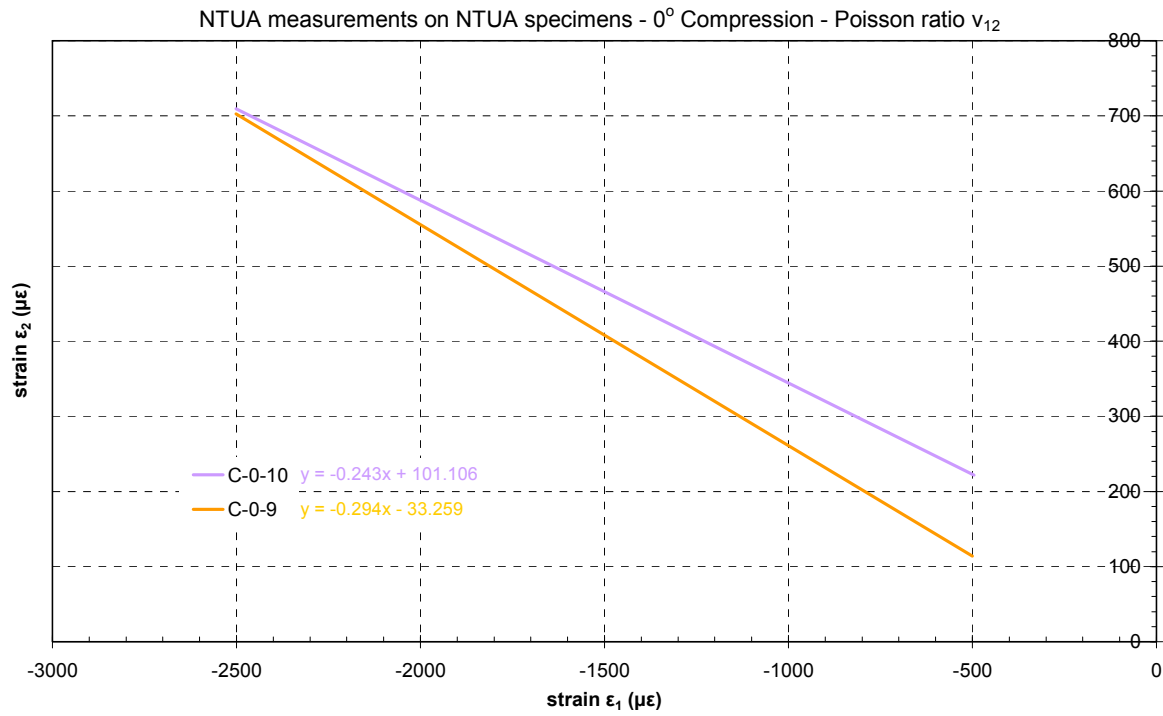
Σχήμα 2.26: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά T-90 - - Εκτίμηση Λόγου Poisson ν_{21}



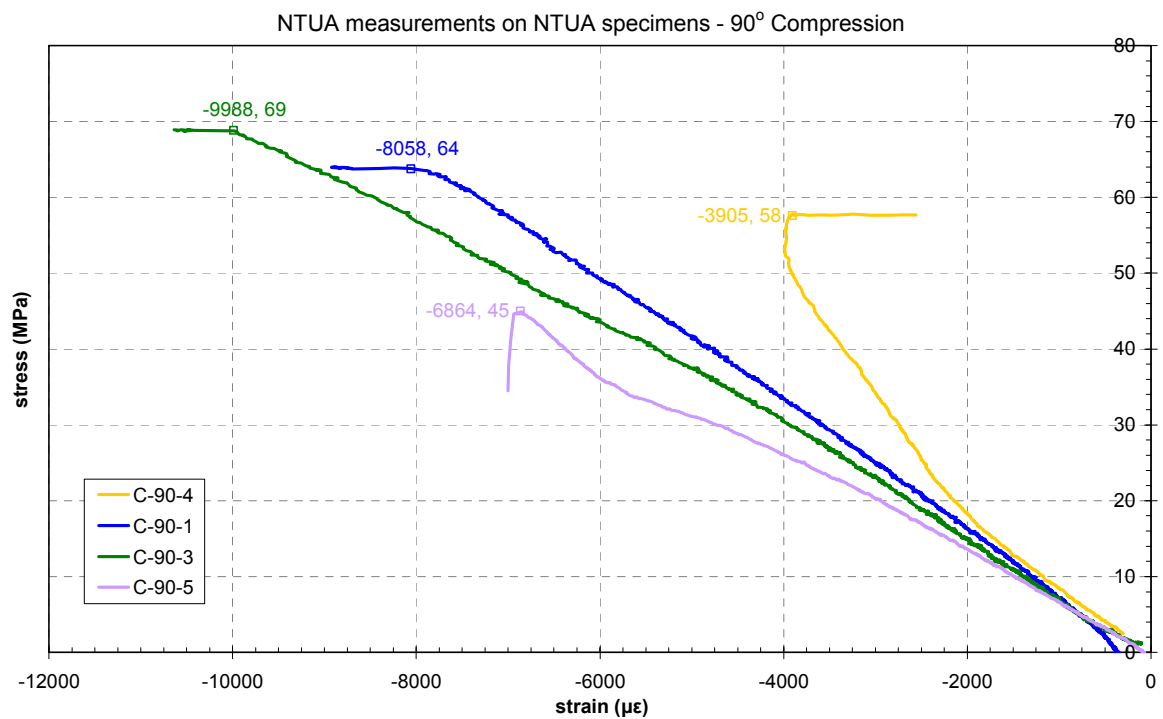
Σχήμα 2.27: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά C-0 - Εξέλιξη τάσης σ_1 - παραμόρφωσης ϵ_1 στις 0°



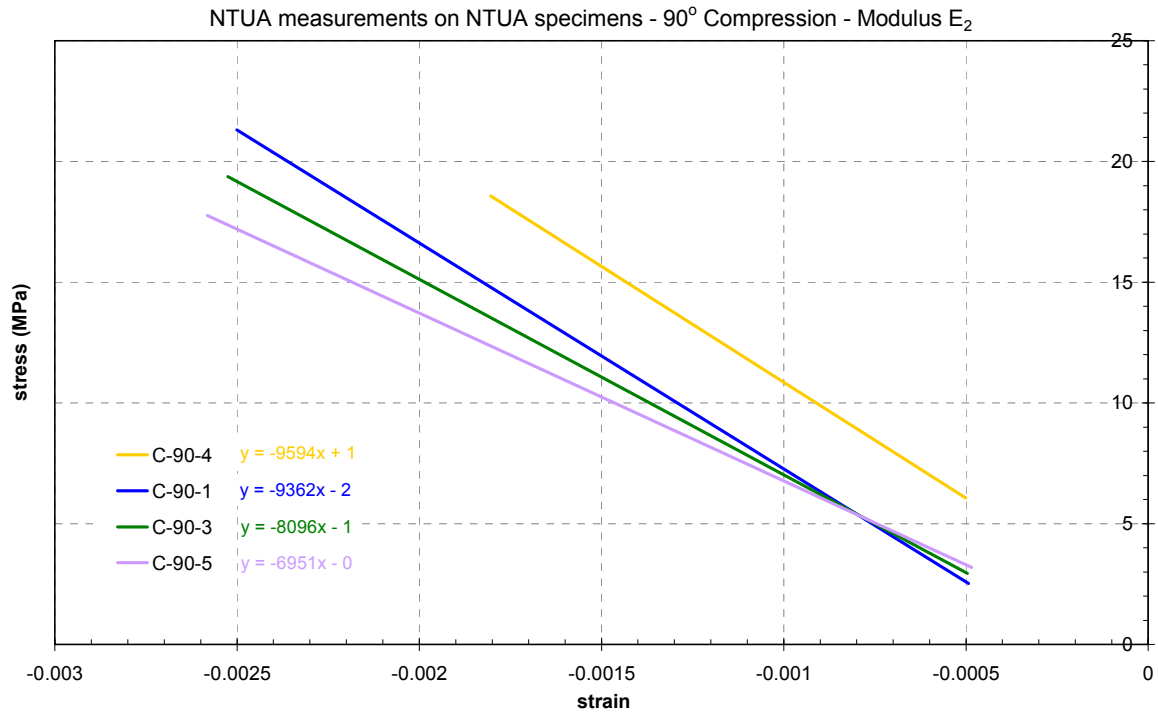
Σχήμα 2.28: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά C-0 - Εκτίμηση Θιπτικού Μέτρου Ελαστικότητας E_{1c}



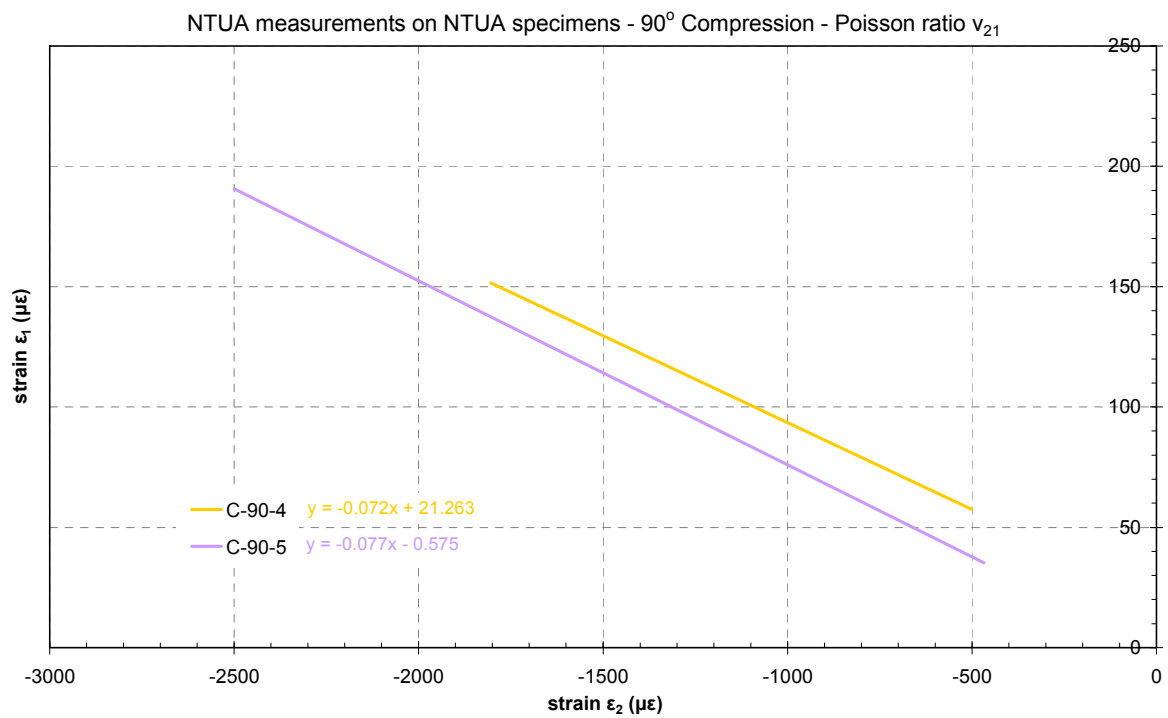
Σχήμα 2.29: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά C-0 - Εκτίμηση Λόγου Poisson ν_{12}



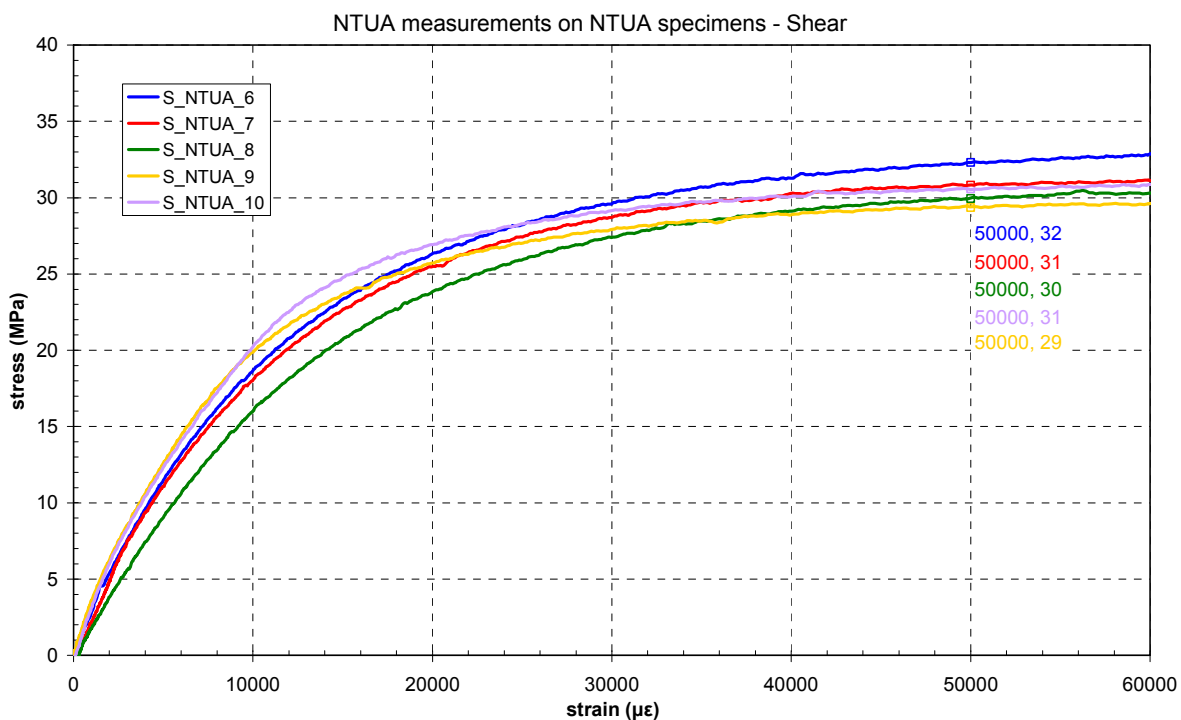
Σχήμα 2.30: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά C-90 - Εξέλιξη τάσης σ_2 - παραμόρφωσης ϵ_2 στις 90°



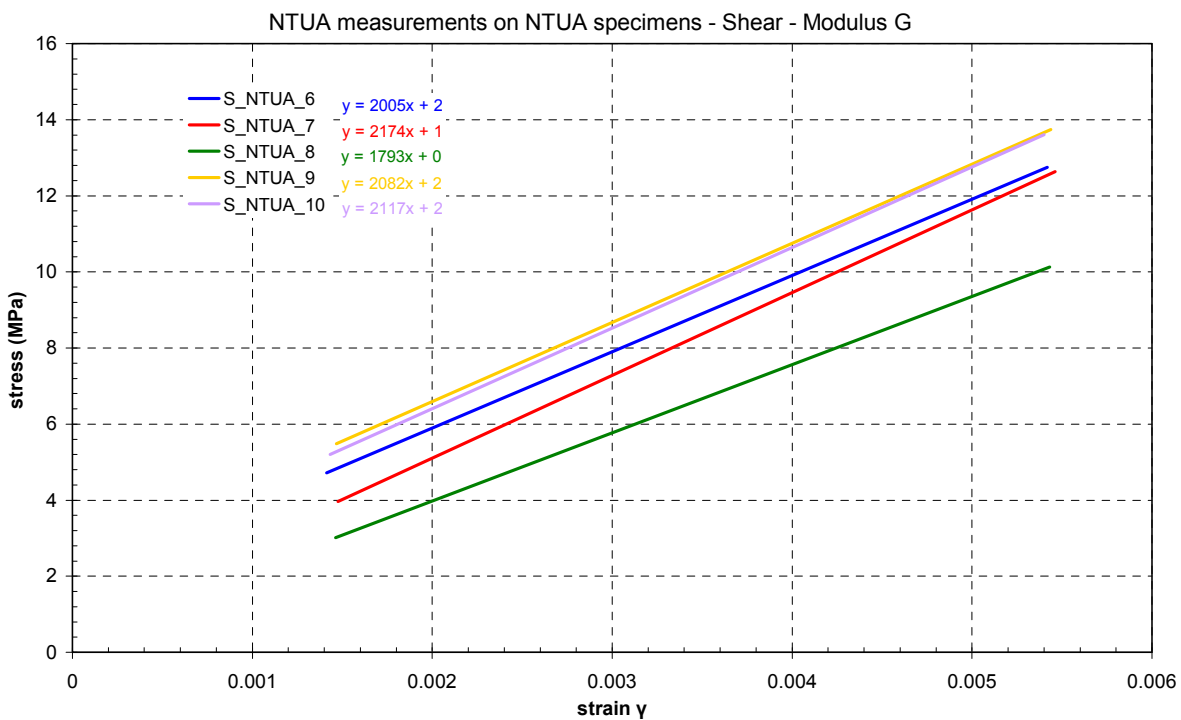
Σχήμα 2.31: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά C-90 - Εκτίμηση Θιπτικού Μέτρου Ελαστικότητας E_{2c}



Σχήμα 2.32: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά C-90 - Εκτίμηση Λόγου Poisson ν_{21}



Σχήμα 2.33: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά S_NTUA - Διατμητική τάση τ - παραμόρφωση γ



Σχήμα 2.34: Δοκίμια υλικού ΕΜΠ – Σειρά S_NTUA - Εκτίμηση Διατμητικού Μέτρου Ελαστικότητας G_{12}

Πίνακας 2.7: Μηχανικές Ιδιότητες δοκιμίων υλικού ΕΜΠ, κατά μετρήσεις ΕΜΠ

TENSION 0°				
Specimen	E _{1t} (MPa)	σ _{max} (MPa)	ε _{1max} (%)	ν ₁₂
T-0-6	33430	645	3.530	0.215
T-0-7	26834	435	3.626	0.365
T-0-8	32433	472	3.634	NOT MEASURED
T-0-9	26093	707	2.734	NOT MEASURED
T-0-10	29498	539	3.710	NOT MEASURED
AVERAGE	29658	559	3.447	0.290
ST. DEV.	3265	115	0.404	0.106
TENSION 90°				
Specimen	E _{2t} (MPa)	σ _{max} (MPa)	ε _{2max} (%)	ν ₂₁
T-90-6	4973	46	3.731	NOT MEASURED
T-90-7	7675	69	1.682	0.079
T-90-8	5231	52	3.727	NOT MEASURED
T-90-9	8528	75	3.114	0.081
T-90-10	6409	59	2.019	NOT MEASURED
AVERAGE	6563	60	2.855	0.080
ST. DEV.	1535	12	0.958	0.001
COMPRESSION 0°				
Specimen	E _{1c} (MPa)	σ _{max} (MPa)	ε _{1max} (%)	ν ₁₂
C-0-6	38455	328	0.833	NOT MEASURED
C-0-7	37338	236	0.564	NOT MEASURED
C-0-8	77654	186	0.233	NOT MEASURED
C-0-9	39184	121	0.601	0.294
C-0-10	39708	262	0.677	0.243
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
AVERAGE	38671	253	0.581	0.269
ST. DEV.	1027	59	0.220	0.036
COMPRESSION 90°				
Specimen	E _{2c} (MPa)	σ _{max} (MPa)	ε _{2max} (%)	ν ₂₁
C-90-1	9362	64	0.806	NOT MEASURED
C-90-2	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED	NOT TESTED
C-90-3	8096	69	0.999	NOT MEASURED
C-90-4	9594	58	0.391	0.072
C-90-5	6951	45	0.686	0.077
-	-	-	-	-
AVERAGE	8501	59	0.720	0.075
ST. DEV.	1225	10	0.255	0.004

SHEAR				
Specimen	G_{12} (MPa)	τ_{max} (MPa)	γ_{12max} (%)	-
S_NTUA_6	2005	32	5.000	-
S_NTUA_7	2174	31	5.000	-
S_NTUA_8	1793	30	5.000	-
S_NTUA_9	2082	29	5.000	-
S_NTUA_10	2117	31	5.000	-
-	-	-	-	-
AVERAGE	2034	31	5.000	-
ST. DEV.	148	1	0.000	-

Measurements in blue not taken into account in averaging

2.3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ DTU

Παράλληλα με τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του υλικού, πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες δοκιμές και στο πανεπιστήμιο DTU. Χάριν πληρότητας, στους παρακάτω Πίνακες 2.8 ~ 2.9 παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών, για το υλικό του ΕΜΠ και DTU αντίστοιχα.

Πίνακας 2.8: Ιδιότητες υλικού ΕΜΠ, κατά μετρήσεις DTU

BHT4A - Tension 0°			
Specimen #	E_{1t} [MPa]	ν_{12}	X_{111} [MPa]
1	31576	0.262	604
2	33230	0.264	705
3	33148	0.295	665
4	32479	0.246	793
5	35416	0.274	721
Average	33170	0.268	698
Std. Dev.	1420	0.02	70

BHT5A - Tension 90°		
Specimen #	E_{2t} [MPa]	X_{t22}
1	9654	51
2	8589	37
3	8808	42
4	9320	38
5	10318	45
Average	9338	43
Std. Dev.	690	6

BHT5B - Compression 0°		
Specimen #	E_{1c} [MPa]	X_{t22} [MPa]
2a	36058	166
2b	35711	195
3	35462	204
4	39033	247
5	39925	141
Average	37238	191
Std. Dev.	2081	40

BHT6A - Compression 90°		
Specimen #	E_{2c} [MPa]	X_{c22}
1	9593	76
2	9029	55
3	8790	74
4	10311	70
5	9958	70
Average	9536	69
Std. Dev.	632	8

BHT6B - Iosipescu Shear		
Specimen #	G_{12} [MPa]	S [MPa]
1	2990	30
2	1840	29
3	1952	31
4	2075	30
5	1987	31
Average	2169	30
Std. Dev.	467	1

Πίνακας 2.9: Ιδιότητες υλικού DTU, κατά μετρήσεις DTU

BHT4A - Tension 0°			
Specimen #	E_{1t} [MPa]	ν_{12}	X_{t11} [MPa]
2	56355	0.285	1222
3	64377	0.317	1226
4	53580	0.272	1100
5	54587	0.274	1074
6	52277	0.271	1081
Average	56235	0.284	1141
Std. Dev.	4789	0.02	77

BHT2A - Tension 90°		
Specimen #	E_{2t} [MPa]	X_{t22}
2	19616	18
3	21232	27
5	20417	20
Average	20422	22
Std. Dev.	808	5

BHT2C - Compression 0°		
Specimen #	E_{1c} [MPa]	X_{c22} [MPa]
2	99225	1388
3	56808	842
4	57688	842
5	57659	871
6	52582	818
Average	56184	952
Std. Dev.	19364	244

BHT3A - Compression 90°		
Specimen #	E_{2c} [MPa]	X_{c22}
2	15114	128
3	15330	123
4	17414	128
5	15394	128
6	15393	128
Average	15729	127
Std. Dev.	949	2

BHT3C - Iosipescu Shear		
Specimen #	G_{12} [MPa]	S [MPa]
1	4295	65
2	4407	65
3	4235	62
4	4016	61
6	4366	65
Average	4264	64
Std. Dev.	153	2

2.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες σύγκρισης των αποτελεσμάτων DTU και ΕΜΠ (ΜΡα), με ποσοστιαίες διαφορές, ως προς τα αποτελέσματα του DTU.

Πίνακας 2.10: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων και ποσοστιαίων διαφορών

	NTUA-material specimens			DTU-material specimens		
	NTUA test	DTU test	diff. %	NTUA test	DTU test	diff. %
E₁ - tension	29658	33170	10.6	48634	56235	13.5
E₁ - compression	38671	37238	-3.8	50619	56184	9.9
E₂ - tension	6563	9338	29.7	18535	20422	9.2
E₂ - compression	8501	9536	10.9	9451	15729	39.9
G₁₂	2034	1964	-3.6	4800	4264	-12.6
v₁₂	0.290	0.268	-8.2	0.274	0.284	3.5
X_t	559	698	19.9	968	1141	15.2
X_c	253	191	-32.5	915	952	3.9
Y_t	60	43	-41.9	24	22	-9.1
Y_c	59	69	14.5	91	127	28.3
S	31	30	-3.3	65	64	-1.6

Μεταξύ των αποτελεσμάτων από DTU και ΕΜΠ παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Οι διαφορές αυτές πιθανόν να οφείλονται σε φαινόμενα ολίσθησης μεταξύ των άκρων των δοκιμίων και των αρπαγών της μηχανής. Η τιμή του μέτρου του Young στη διεύθυνση κάθετα και παράλληλα στις ίνες εμφανίζεται μεγαλύτερη από την αρχικά υποτιθέμενη. Από την άλλη, οι τιμές μέγιστης τάσης είναι μικρότερες στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες. Πιθανότερη αιτία είναι το μεγαλύτερο ποσοστό ινών κατά την κατασκευή, και η μειωμένη αντοχή της μήτρας ρητίνης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΛΑΚΩΝ

Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, συνεχίστηκαν τα πειράματα λυγισμού σε πλάκες από σύνθετα υλικά, με τα οποία ασχολήθηκε και ο Α. Πάντος κατά την εκπόνηση της δικής του διπλωματικής εργασίας, το 2007. Αυτές οι πειραματικές δοκιμές αποτελούν μέρος ευρύτερης διαπανεπιστημιακής μελέτης, στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού δικτύου αριστείας MARSTRUCT (Network of Excellence in Marine Structures) και εκτελέστηκαν στα εργαστήρια του πανεπιστημίου της Δανίας (DTU) στην Κοπεγχάγη, την περίοδο Απρίλιο – Οκτώβριο 2007

Τα πειράματα έγιναν σε παραλληλόγραμμες πλάκες σύνθετου υλικού (ίνες γυαλιού και εποξειδική ρητίνη). Οι πλάκες είχαν τις ίδιες πλευρικές διαστάσεις, ήταν δε μοιρασμένες σε 3 ομάδες παχών (thin, mid-thick, thick), ώστε να αξιολογηθεί η αντοχή των πλακών και σε σχέση με το λόγο λυγηρότητας. Επιπλέον, οι πλάκες όλων των παχών ήταν μοιρασμένες σε 3 σετ, κάθε ένα από τα οποία περιελάμβανε πλάκες με διαφορετικό μέγεθος κεντρικής γεωμετρικής παραμόρφωσης (μηδενική, μικρή, μεγάλη). Συνολικά δηλαδή εξετάστηκαν 9 σετ πλακών. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη των πειραμάτων που έγιναν στις λεπτές πλάκες, η συνολική δε μελέτη του ΕΜΠ ασχολήθηκε με τις πλάκες μικρού και μεσαίου πάχους (thin, mid-thick – Χ.Δούκα, Α.Πάντος)

Στόχος αυτής της μελέτης είναι η διερεύνηση της λυγισμικής συμπεριφοράς των πολύστρωτων πλακών. Ως παράμετροι στη μελέτη αυτή λαμβάνονται το μέγεθος της κεντρικής ατέλειας, το οποίο είναι ανάλογο των πλευρικών διαστάσεων της πλάκας, και ο λόγος λυγηρότητας της πλάκας, ο οποίος στα πλαίσια των πειραμάτων εξαρτάται μόνο από τον πάχος τους. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα θα χρησιμεύσουν ως πειραματικά δεδομένα για την σύγκριση και επιβεβαίωση της ανάλυσης με διάφορα αριθμητικά μοντέλα.

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΚΩΝ

Η κατασκευή των δοκιμίων – πολύστρωτων πλακών για την διεξαγωγή των πειραμάτων λυγισμού αποτελεί μέρος της διπλωματικής εργασίας του Άρη Πάντου, «Λυγισμός πολύστρωτων δοκών και πλακών από σύνθετα υλικά με γεωμετρικές ατέλειες— Παραμετρική μελέτη και πειραματική διερεύνηση», (Αθήνα, 2009). Συγκεκριμένα, η κατασκευή των δοκιμίων και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στις παραγράφους 5.2.1 και 5.2.2 της εν λόγω εργασίας. Οι επόμενες παράγραφοι 3.1.1 και 3.1.2 αναφέρονται στις αντίστοιχες παραγράφους της εργασίας του Α.Πάντου, και παρατίθενται στην παρούσα διπλωματική εργασία χάριν πληρότητας.

3.1.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η διαδικασία για την κατασκευή των πλακών μικρού πάχους (thin) είναι η ίδια με αυτήν που ακολουθήθηκε και για την κατασκευή πλακών μεσαίου πάχους (mid-thick), και η περιγραφή της προέρχεται από την σχετική διπλωματική εργασία του Α.Πάντου. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:

- Εποξειδική ρητίνη (λεπτόρρευστη) της εταιρείας “DOW”, τύπου “D.E.R. 358” (ιξώδες στους 25°C : 600 – 750 mPa·s).
- Αργός σκληρυντής της εταιρείας “PO.INT.ER S.r.l.”, τύπου “Eramine PC13” (pot life ποσότητας 150 g στους 25°C : 50 min).
- Ύφασμα ενισχυτικών ινών γυαλιού τύπου E, μονοαξονικής πλέξης (Unidirectional), με επιφανειακό βάρος 623 g/m² (567 g/m² at 0° & 50 g/m² at 90°) της εταιρείας “Owens Corning”, τύπου “UNI-CD-600 / 127”.
- Πεπλεγμένο ύφασμα ενισχυτικών ινών γυαλιού τύπου E, με προσανατολισμό ινών ±45° (Biaxial), χωρίς πλέξη μεταξύ των δυο στρώσεων ινών διαφορετικού προσανατολισμού (non-woven – knitted fabric), με συνολικό επιφανειακό βάρος 306 g/m² και ισοσταθμισμένη (balanced) διαμόρφωση ινών στις δύο διευθύνσεις (150 g/m² @ +45°, 150 g/m² @ -45° & 6 g/m² ίνες πλέξης), της εταιρείας “Gavazzi”, τύπου “BXE300 1250 STD”.

(Α.Πάντος, κεφ. 5.2.1 «Υλικά & μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων»)

Σημειώνοντας «UD» τις μονοαξονικές στρώσεις και «BIAX» τις διαξονικές, οι στρωμάτωση των δύο σειρών πλακών που κατασκευάστηκαν στο ΕΜΠ έχει ως ακολούθως:

Λεπτές: [BIAX / 4xUD / BIAX / 6xUD / BIAX / 4xUD / BIAX]

Μεσαίου Πάχους:

[BIAX / 4xUD / BIAX / 4xUD / BIAX / 6xUD / BIAX / 4xUD / BIAX / 4xUD / BIAX]

Και οι δύο επιστρώσεις είναι συμμετρικές. Επιπλέον, και στις 2 επιστρώσεις, το βάρος των μονοαξονικών στρώσεων είναι το 88% του συνολικού βάρους των ινών.

Η αρχική εκτίμηση του πάχους καθενός από τα 2 είδη στρώσεων (UD & Biaxial), έγινε με κατασκευή και παχυμέτρηση 2 μικρών δοκιμαστικών πολύστρωτων πλακών (μια με 22 μονοαξονικές στρώσεις και μια με 6 στρώσεις biaxial), χρησιμοποιώντας ακριβώς την ίδια μέθοδο κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε και για την κατασκευή των δοκιμίων. Έτσι, προέκυψαν οι παρακάτω μέσες τιμές πάχους ανά στρώση:

$$t_{UD} = t_1 = 0.59 \text{ mm/στρώση}$$

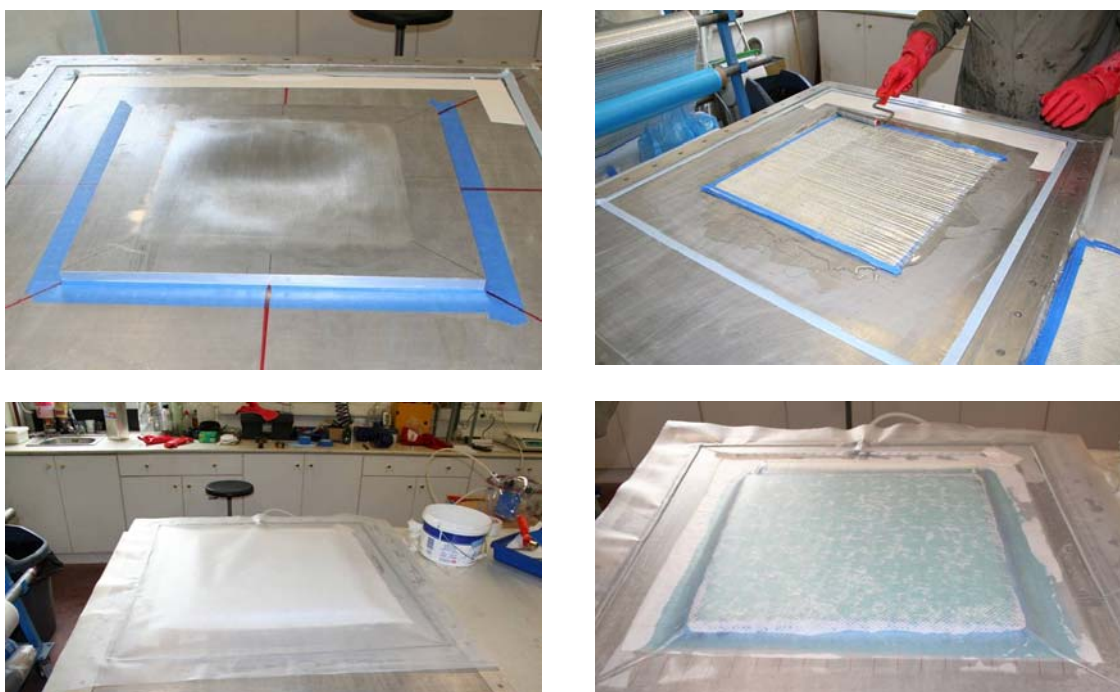
$$t_{Biax} = t_2 = 0.36 \text{ mm/στρώση}$$

(Α.Πάντος, κεφ. 5.2.1)

Η μέθοδος κατασκευής των πλακών είναι η ίδια με αυτήν κατασκευής των δοκιμίων χαρακτηρισμού των υλικών, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.1.

Για την κατασκευή των πλακών στο ΕΜΠ (λεπτές και μεσαίου πάχους) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος σάκου κενού. Με το κατάλληλο καλούπι (επίπεδο ή κοίλο), οι στρώσεις γυαλιού επιστρώθηκαν διαδοχικά με ρητίνη με το χέρι. Με το πέρας της επίστρωσης και πριν στερεοποιηθεί η ρητίνη, όλη η διάταξη καλύφθηκε με τα διάφορα υλικά της μορφοποίησης υπό κενό (ύφασμα αποκόλλησης, διάτρητη μεμβράνη, συσκευή αναρρόφησης, σάκος κενού, ταινία σφράγισης) και ο αναρροφήθηκε ο αέρας με τη βοήθεια αντλίας κενού, εφαρμόζοντας σταθερή υποπίεση περίπου ίση με 0.6 bar, μέχρι την πλήρη σκλήρυνση της ρητίνης (Σχήμα 3.1)

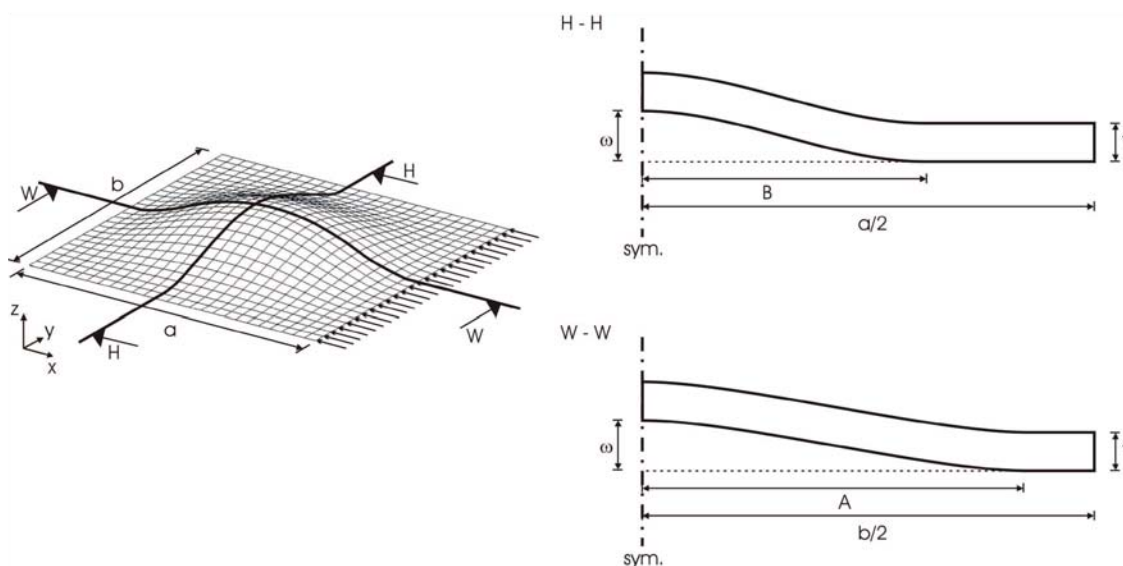
Οι πλάκες υπέστησαν μηχανουργική κατεργασία για να λάβουν τις τελικές ονομαστικές τους διαστάσεις, προκειμένου το σχήμα τους να γίνει όσο το δυνατόν ορθογώνιο. Δύο δείγματα από τα υπόλοιπα της κατεργασίας κάθε πλάκα χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες με δοκιμή καύσης. (βλ και Α.Πάντος, κεφ. 5.2.3 «Προετοιμασία και κατασκευή των δοκιμίων»)



Σχήμα 3.1: Κατασκευή πλακών ΕΜΠ με τη μέθοδο σάκου κενού (Α. Πάντος, κεφ. 5.2.3).

3.1.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Όπως αναφέρθηκε, στο ΕΜΠ κατασκευάστηκαν 2 ομάδες πλακών, μικρού και μεσαίου πάχους. Κάθε ομάδα αποτελούνταν από 3 σετ 3 πλακών. Κάθε σετ χαρακτηριζόταν από το μέγεθος της κεντρικής παραμόρφωσης (μηδενική, μικρή, μεγάλη). Η μορφή της γεωμετρικής ατέλειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2, ενώ στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται και οι ομάδες πλακών ανάλογα με το πάχος και το μέγεθος της ατέλειας.



Σχήμα 3.2: Μορφή γεωμετρικής ατέλειας

Πίνακας 3.1: Ομάδες δοκιμών και ονοματολογία

	<u>THIN</u>	<u>MID-THICK</u>
<u>Perfect</u>	S1-0-1	S2-0-1
	S1-0-2	S2-0-2
	S1-0-3	S2-0-3
<u>Small Imperfection</u> ($\omega = 3.2\text{mm}$)	S1-32-1	S2-32-1
	S1-32-2	S2-32-2
	S1-32-3	S2-32-3
<u>Large Imperfection</u> ($\omega = 9.6\text{mm}$)	S1-96-1	S2-96-1
	S1-96-2	S2-96-2
	S1-96-3	S2-96-3

Όλες οι πλάκες είχαν ονομαστικές διαστάσεις: μήκος L 400mm (παράλληλα στον άξονα επιβολής φορτίου) και πλάτος B 380mm. Τελικά το ανυποστήρικτο μήκος και πλάτος της πλάκας μετά την τοποθέτησή τους στη μηχανή δοκιμών ήταν περίπου $\alpha = 325\text{mm}$, $\beta = 320\text{mm}$ (Α.Πάντος, κεφ. 5.2.2).

Όσον αφορά την μορφή της γεωμετρικής ατέλειας, στα δοκίμια όπου αυτή υπάρχει, αντιστοιχεί στην 1η ιδιομορφή λυγισμού της αντίστοιχης επίπεδης πακτωμένης πλάκας, με ελαφρώς μικρότερες διαστάσεις ελεύθερης επιφάνειας από τις πραγματικές ($\alpha' = \beta' = 300\text{mm}$), και εντοπίζεται στο κέντρο της κάθε πλάκας. Η αναπαραγωγή αυτής της ιδιομορφής λυγισμού βασίστηκε σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, με χρήση θεωρητικών μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, όπως παραθέτονται στον Πίνακα 3.2 (Α.Πάντος, Πίνακας 5.5). Ο περιορισμός της έκτασης της γεωμετρικής ατέλειας σε $300 \times 300 \text{ mm}$, αντί $320 \times 320 \text{ mm}$, που είναι η ελεύθερη επιφάνεια της πλάκας, θεωρείται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα, και σκοπός του είναι η ύπαρξη μιας περιοχής επίπεδης γεωμετρικής μορφής στα άκρα της ελεύθερης επιφάνειας και κοντά στα σημεία εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών προκειμένου να εξασφαλισθούν κάποιες ανοχές για την τοποθέτηση των δοκιμίων στο πλαίσιο δοκιμών. (Α.Πάντος, κεφ. 5.2.2)

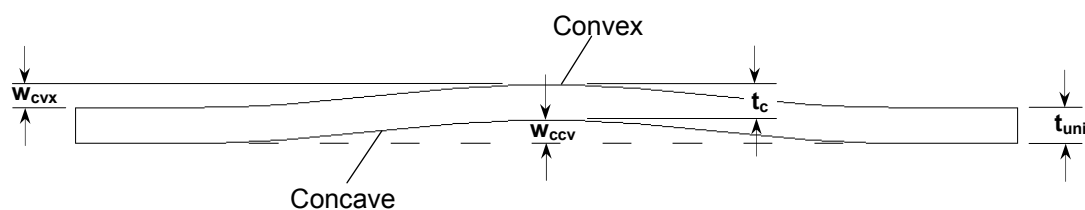
Πίνακας 3.2(α)

Θεωρητικές (UD E-Glass / Epoxy)	Μηχανικές	Ιδιότητες	Υλικού
$E_{11} =$	35205		MPa
$E_{22} =$	9835		MPa
$E_{33} =$	9835		MPa
$\nu_{12} =$	0.268		
$\nu_{23} =$	0.375		
$\nu_{13} =$	0.268		
$G_{12} =$	2531		MPa
$G_{23} =$	2329		MPa
$G_{13} =$	2531		MPa

Πίνακας 3.2(β)

Θεωρητικές (UD E-Glass / Epoxy)	Αντοχές	Υλικού
$X_T =$	697.5	MPa
$X_C =$	190.7	MPa
$Y_T =$	14.8	MPa
$Y_C =$	69.0	MPa
$Z_T =$	14.8	MPa
$Z_C =$	69.0	MPa
$S_{XY} =$	41.9	MPa
$S_{YZ} =$	27.9	MPa
$S_{XZ} =$	27.9	MPa

Η τελική μορφή των δοκιμίων με γεωμετρική ατέλεια φαίνεται στο Σχήμα 3.3 που ακολουθεί, όπου διακρίνονται και τα βασικά μεγέθη της, τα οποία επεξηγούνται στη συνέχεια. Η δημιουργία “μικρής” και “μεγάλης” γεωμετρικής ατέλειας έγινε ύστερα από κατάλληλη κλιμάκωση της εν λόγω γεωμετρικής μορφής, με μικρό και μεγάλο, αντίστοιχα, λόγο κλίμακας.



Σχήμα 3.3 : Μορφή δοκιμίων με γεωμετρική ατέλεια (Α.Πάντος, Σχήμα 5.4).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μεγεθών παρατίθενται στους παρακάτω Πίνακες 3.3, 3.4

Πίνακας 3.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά λεπτών (thin) πλακών

Plate Group	Plate	L (mm)	B (mm)	t_{uni} (mm)	$A = B \cdot t_{uni}$ (mm ²)	t_c (mm)	W_{cvx} (mm)	W_{ccv} (mm)
S1-0	<i>nominal</i>	400.00	380.00	9.00	3420.0	9.00	-	-
	S1-0-1	400.05	380.00	8.75	3325.0	8.89	-	-
	S1-0-2	400.55	380.15	9.50	3611.4	9.34	-	-
	S1-0-3	400.40	380.05	9.48	3724.5	9.85	-	-
S1-32	<i>nominal</i>	400.00	380.00	9.00	3420.0	9.00	3.20	3.20
	S1-32-1	400.00	380.00	8.53	3241.4	8.99	3.20	2.70
	S1-32-2	400.03	380.03	8.53	3241.7	8.24	3.10	3.40
	S1-32-3	400.08	380.10	8.61	3272.7	9.24	3.00	2.40
S1-96	<i>nominal</i>	400.00	380.00	9.00	3420.0	9.00	9.60	9.60
	S1-96-1	399.93	380.00	8.64	3283.2	9.43	9.50	8.70
	S1-96-2	399.83	379.88	8.76	3327.7	8.72	9.10	9.10
	S1-96-3	400.28	380.05	8.75	3325.4	9.59	9.70	8.90

Πίνακας 3.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλακών μεσαίου πάχους (mid-thick) (Α.Πάντος, Πίνακας 5.3)

Plate Group	Plate	L (mm)	B (mm)	t_{uni} (mm)	$A = B \cdot t_{uni}$ (mm ²)	t_c (mm)	W_{cvx} (mm)	W_{ccv} (mm)
S2-0	<i>nominal</i>	400.00	380.00	15.00	5700.0	15.00	-	-
	S2-0-1	399.90	380.53	15.63	5945.7	15.60	-	-
	S2-0-2	400.00	381.58	15.18	5790.4	15.10	-	-
	S2-0-3	399.93	380.63	15.35	5842.6	15.30	-	-
S2-32	<i>nominal</i>	400.00	380.00	15.00	5700.0	15.00	3.20	3.20
	S2-32-1	400.00	381.15	15.01	5720.5	16.41	3.33	1.92
	S2-32-2	400.00	379.80	14.66	5567.2	15.43	3.15	2.37
	S2-32-3	399.88	379.93	14.29	5427.6	14.77	3.24	2.76
S2-96	<i>nominal</i>	400.00	380.00	15.00	5700.0	15.00	9.60	9.60
	S2-96-1	400.13	379.85	14.81	5626.2	16.35	9.53	7.99
	S2-96-2	399.98	379.73	15.65	5941.7	18.42	9.60	6.83
	S2-96-3	400.00	379.65	14.36	5450.2	15.88	9.45	7.93

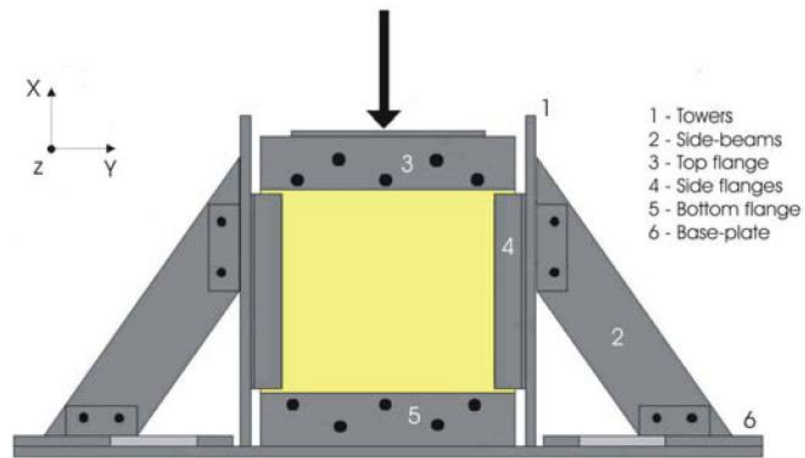
Παρατηρώντας τις τιμές των διαστάσεων στους πίνακες, φαίνεται ότι οι πλευρικές διαστάσεις (μήκος, πλάτος) των πλακών επετεύχθησαν με πολύ καλή ακρίβεια. Το ενιαίο πάχος t_{uni} είναι γενικά μικρότερο από το ονομαστικό, αν και η διαφορά είναι της τάξεως δεκάτου του χιλιοστού. Αντιθέτως, στις περισσότερες πλάκες με γεωμετρική ατέλεια το πάχος t_c στο κέντρο της πλάκας είναι μεγαλύτερο από το ενιαίο. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι πλάκες κατασκευάστηκαν σε ανοιχτό καλούπι κοίλης μορφής, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαφορά οφείλεται σε φαινόμενο «λιμνάσματος» της ρητίνης στην περιοχή αυτή. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, αλλά και του ότι η τιμή w_{cvx} , που αντιστοιχεί στην κυρτή πλευρά της πλάκας έχει εξαιρετική ακρίβεια, λόγω της επαφής της με το καλούπι, η τιμή της ατέλειας w_{ccv} είναι γενικά μικρότερη από αυτή της w_{cvx} . Οι διαφορές αυτές είναι πιο έντονες στις πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια, ίσως λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας υλικών που χρησιμοποιήθηκε, συνεπώς ανάλογα αυξήθηκαν και οι διαφορές .

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

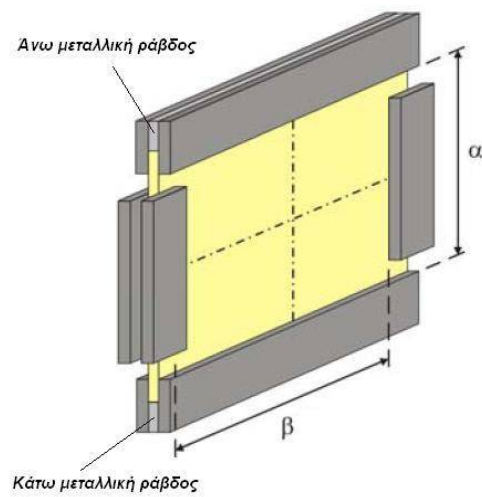
Η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας αναφέρεται στη διπλωματική εργασία του Α.Πάντου, κεφ. 5.2.5.

Οι δοκιμές πειραμάτων λυγισμού πραγματοποιήθηκαν στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου της Δανίας (DTU), χρησιμοποιώντας υδραυλική μηχανή δοκιμών Instron, μέγιστου φορτίου 5000 kN, στην οποία εφαρμόστηκε ειδικό πλαίσιο δοκιμών (test-rig), για την επιβολή των επιθυμητών φορτίων. Το ειδικό πλαίσιο αποτελείται από δύο κατακόρυφους στύλους, οι οποίοι εδράζονται σε ένα έλασμα βάσης και συγκρατώνται κατακόρυφα από δύο πλευρικές δοκούς. Οι πλάκες εισάγονται ανάμεσα στις πλευρικές φλάντζες των δύο στύλων και πακτώνονται ανάμεσα στην πάνω και κάτω φλάντζα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι πλάκες είναι ελεύθερες να κινηθούν στις διευθύνσεις x και y , ενώ δεν επιτρέπονται η κίνηση εκτός επιπέδου και η περιστροφή.

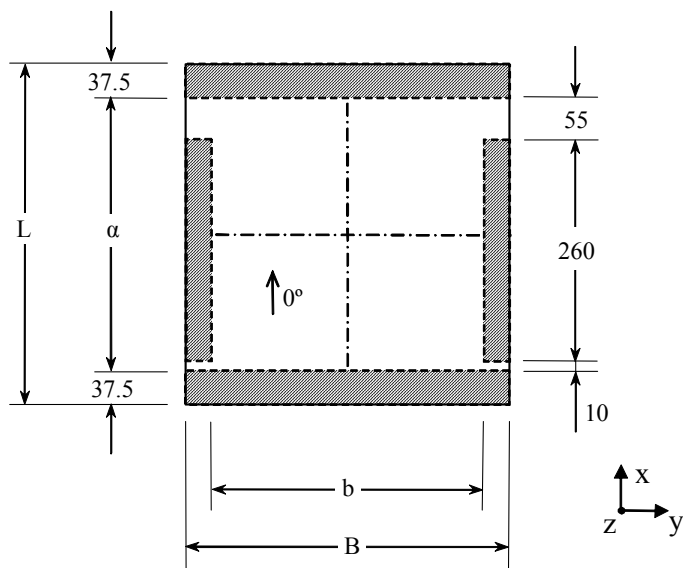
Η επιβολή του θλιπτικού φορτίου στην πλάκα γίνεται μέσω μιας οριζόντιας χαλύβδινης ράβδου, τη οποία τοποθετείται μεταξύ της άνω πλευρά της πλάκας και της μηχανής δοκιμών, ανάμεσα στις κορυφαίες φλαντζών. Μία παρόμοια ράβδος τοποθετείται μεταξύ της κάτω πλευρά της πλάκας και του ελάσματος βάσης του πλαισίου δοκιμών, ανάμεσα στις κάτω φλάντζες. Το έλασμα βάσης του πλαισίου εδράζεται με τη σειρά του στη βάση της υδραυλικής μηχανής δοκιμών. Έτσι, μόνο κατακόρυφες φορτίσεις μεταφέρονται στο πλαίσιο δοκιμών και τις πλάκες. Τέλος, οι διαστάσεις της πλάκας μετά την εισαγωγή της στο πλαίσιο δοκιμών είναι $\alpha=325$ mm και $\beta=320$ mm. (Σχήματα 3.5, 3.6, 3.7)



Σχήμα 3.5 : Το πλαίσιο δοκιμών (Α. Πάντος, Σχήμα 5.13)



Σχήμα 3.6: Λεπτομέρεια του πλαισίου δοκιμών, για την επιβολή φορτίου (Α.Πάντος, Σχήμα 5.14)



Σχήμα 3.7: Πραγματικές συνοριακές συνθήκες δοκιμίων (Α.Πάντος, Σχήμα 5.15)

Στην “πίσω” πλευρά των δοκιμίων, την κοίλη (concave) για τα δοκίμια με γεωμετρική ατέλεια, τοποθετήθηκαν 7 επιμηκυνσιόμετρα (strain gages), SG-A έως SG-I, καθώς και 3 όργανα μέτρησης των πλάγιων μετατοπίσεων (LVDTs), LVDT-A, LVDT-D και LVDT-C, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, για τη μέτρηση των διαμήκων παραμορφώσεων και των πλάγιων μετατοπίσεων αντίστοιχα της επιφάνειας του κάθε δοκιμίου. Οι ακριβείς θέσεις τοποθέτησης των strain gages και των LVDTs πάνω στα δοκίμια, φαίνεται στη σκαριφηματική διάταξη του Σχήματος 3.8 , 3.9.

Οι μετρήσεις των LVDT-A και SG-D, που βρίσκονται κοντά στο κέντρο του κάθε δοκιμίου, αναμένεται να μας δώσουν τα αποτελέσματα για τις καμπύλες λυγισμού των πλακών, ενώ τα υπόλοιπα μετρητικά όργανα τοποθετήθηκαν για αναφορά και πιθανή σύγκριση των αποτελεσμάτων με αποτελέσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Όπως φαίνεται και από τη διάταξη των μετρητικών οργάνων στο Σχήμα 3.6, έγιναν μετρήσεις για τα παρακάτω μεγέθη:

- Μετατόπιση εμβόλου κατά X
- Μετατόπιση εκτός επιπέδου (κατά z) στο κέντρο της πλάκας
- Μετατόπιση εκτός επιπέδου (κατά z) στην κορυφή της πλάκας, για την εκτίμηση της περιστροφής της και της επίδρασης στη συμπεριφορά της πλάκας
- Παραμορφώσεις στις θέσεις των strain gages.

Τα strain gages που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας Kyowa, τύπου KFG-20-120-C1-11L3M2R, με μήκος αναφοράς (active gage length) 20 mm και ονομαστική αντίσταση 120 Ω.

Μόνο για το δοκίμιο S2-0-1, η θέση του LVDT-C είναι διαφορετική απ' ότι στα υπόλοιπα δοκίμια και φαίνεται στη σκαριφηματική διάταξη του Σχήματος 3.9, ως θέση (LVDT-C').

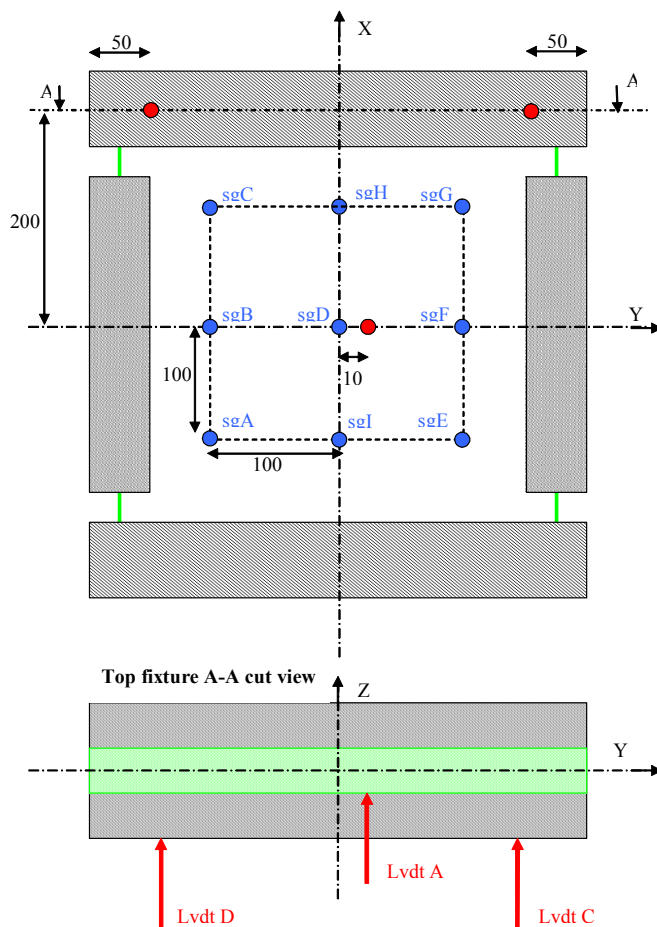
Ένα επιπλέον LVDT (LVDT-B), τοποθετήθηκε σε κατακόρυφη θέση, για τη μέτρηση της κατακόρυφης μετατόπισης του εμβόλου της υδραυλικής μηχανής (vertical piston displacement), ως επιβεβαίωση στα αποτελέσματα που πήραμε απ' ευθείας απ' το σύστημά της. Από την ίδια την μηχανή, ελήφθη επίσης σήμα μέτρησης του επιβαλλόμενου φορτίου.

Όλα τα μετρητικά όργανα (Strain gages και LVDTs), καθώς και το σύστημα της υδραυλικής μηχανής συνδέθηκαν, μέσω ενός συστήματος πρόσκτησης δεδομένων, στο ίδιο υπολογιστικό σύστημα, για την καταγραφή των σημάτων των μετρήσεων. Η συχνότητα δειγματοληψίας του συστήματος πρόσκτησης δεδομένων, η οποία στην προκειμένη περίπτωση εξαρτιόνταν από τον εκάστοτε αριθμό των μετρητικών οργάνων που είχαν συνδεθεί σε αυτό, ήταν για όλες τις δοκιμές 1.067 Hz με εξαίρεση τη δοκιμή της πλάκας S2-96-3, όπου λόγω σύνδεσης λιγότερων μετρητικών οργάνων, η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 1.412 Hz.

Στην “μπροστινή” πλευρά των δοκιμίων, την κυρτή (convex) για τα δοκίμια με γεωμετρική ατέλεια, εγκαταστάθηκε ένα οπτικό σύστημα μέτρησης τρισδιάστατων μετατοπίσεων και παραμορφώσεων (ARAMIS. Το οπτικό αυτό σύστημα περιλαμβάνει 2 κάμερες υψηλής συχνότητας λήψης (για τρισδιάστατη απεικόνιση), κατάλληλα φωτιστικά σώματα και υπολογιστικό σύστημα με το αντίστοιχο ειδικό λογισμικό.

Σε όλες τις δοκιμές, η επιβαλλόμενη φόρτιση είχε τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης κατακόρυφης θλιπτικής μετατόπισης, με ταχύτητα ίση με 1 mm/λεπτό.

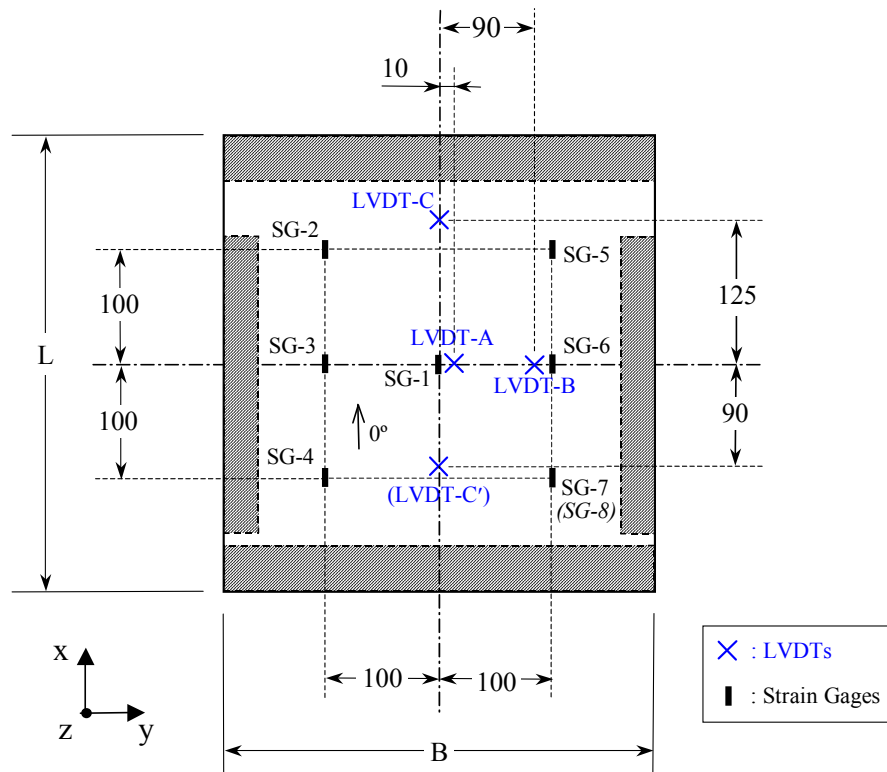
(Α. Πάντος, κεφ. 5.2.4)



Units in mm. LVDT B (not shown) measures the piston displacement

Σχήμα 3.8: Τοποθέτηση των strain gages και LVDT's στις λεπτές πλάκες

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τμηματικά, σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η πρώτη ομάδα δοκιμών περιελάμβανε τις πλάκες μεσαίου πάχους (S2-0, S2-32, S2-96) και τις λεπτές S1-0 και S1-32-1, ενώ η δεύτερη τις υπόλοιπες λεπτές πλάκες. Συνεπώς, υπάρχουν κάποιες διαφορές στις λεπτομέρειες της διάταξης όσον αφορά αυτές τις πλάκες. Επίσης δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τις πλάκες S1-32-2 και S1-96-3.



Σχήμα 3.9 : Διάταξη LVDT's και Strain Gages στις πλάκες μεσαίου πάχους. (Α.Πάντος, Σχήμα 5.17)

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

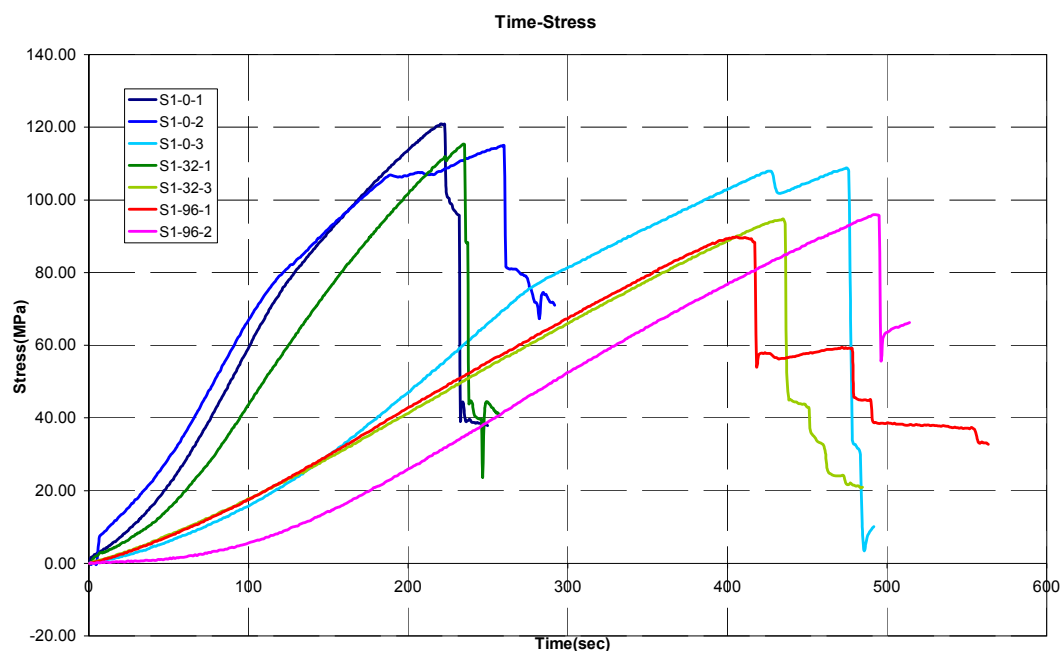
Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών για τις λεπτές (thin) πλάκες. Οι μετατοπίσεις και οι παραμορφώσεις παρουσιάζονται ως συναρτήσεις της τάσης κατά τον άξονα x, που αντιστοιχεί στο φορτίο που εφαρμόστηκε κατά την ίδια διεύθυνση. Η τάση υπολογίστηκε ως ο λόγος F/A, όπου F είναι η δύναμη αντίδρασης στις εκάστοτε επιβαλλόμενες μετατοπίσεις (μετρηθείσα από τον καταχωρητή φορτίου της υδραυλικής μηχανής), και A είναι η επιφάνεια διατομής της κάθε πλάκας.

Οι μετατοπίσεις που μετρήθηκαν από τα LVDT's είναι η μετατόπιση σε χιλιοστά του εκάστοτε σημείου, κάθετα στο επίπεδο της επιφάνειας της πλάκας (Σχήματα 3.11, 3.13, 3.15, 3.17, 3.19, 3.21, 3.23). Οι παραμορφώσεις αντιστοιχούν στις μετρήσεις των strain gages (Σχήματα 3.12, 3.14, 3.16, 3.18, 3.20, 3.22, 3.24). Επίσης, σε κάθε πλάκα υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται διαγράμματα της ομοιόμορφης παραμόρφωσης (uniform strain) και καμπτικής παραμόρφωσης (bending strain). Ως ομοιόμορφη παραμόρφωση λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων που απέδωσαν τα strain gages (SG-A, SG-C, SG-G, SG-E) (ή SG-2, SG-8 για τις πλάκες S1-0-1, S1-32-1). Ο λόγος γι' αυτή τη μέτρηση είναι διότι στην περιοχή των συγκεκριμένων strain gages η καμπτική παραμόρφωση που παρατηρείται στο κέντρο της πλάκας είναι μικρότερη, δίνονται έτσι καλύτερη εκτίμηση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης.

Κατά συνέπεια, ως καμπτική παραμόρφωση υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ της μέτρησης του κεντρικού strain gage (SG-D ή SG-1) και της ομοιόμορφης παραμόρφωσης, αφού η μέτρηση του κεντρικού επιμηκυσιόμετρου δίνει τη συνολική παραμόρφωση, η οποία είναι άθροισμα της ομοιόμορφης και της καμπτικής. Έτσι έχουμε:

$$\begin{aligned}\epsilon_{uni} &= \text{average} (\epsilon_{SG-A}, \epsilon_{SG-C}, \epsilon_{SG-E}, \epsilon_{SG-G},) \\ \epsilon_{bend} &= \epsilon_{SG-D} - \epsilon_{uni}\end{aligned}$$

Τα πειράματα για τις πλάκες S1-0-1 και S1-32-1 εκτελέστηκαν σε διαφορετική χρονική στιγμή. Κατά συνέπεια οι μετρήσεις είναι διαφορετικές. Λόγω περιορισμένων υλικών πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μόνο για τα SG – D, SG – C, SG – B, SG – E. Επίσης, δεν ελήφθησαν ικανοποιητικές μετρήσεις για το SG – H της S1-0-3 και το SG – F της S1-96-2, οπότε παραλείπονται από την παρουσίαση.



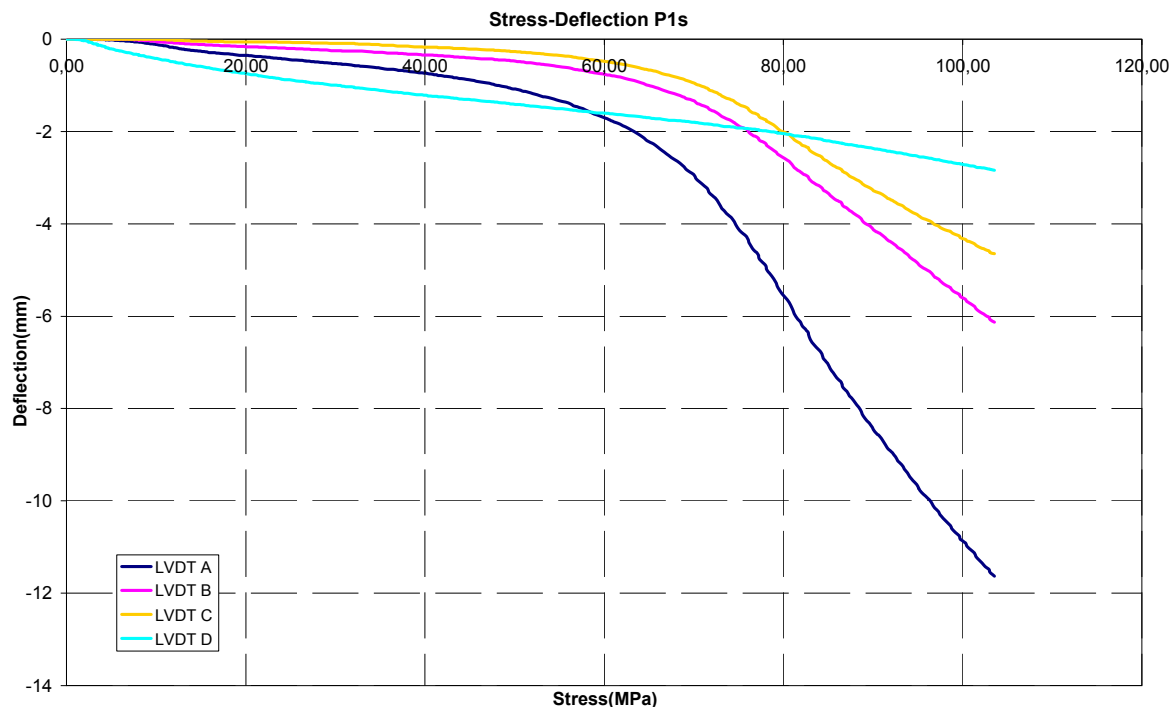
Σχήμα 3.10: Χρόνος – Επιβαλλόμενη Τάση

Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται μια γενική εικόνα της συμπεριφοράς των λεπτών πλακών, παρουσιάζοντας τη μεταβολή της επιβαλλόμενης τάσης ως συνάρτησης του χρόνου. Υπενθυμίζεται ότι κατά την πειραματική διαδικασία επιβαλλόταν συνεχώς αυξανόμενη παραμόρφωση. Στο διάγραμμα εμφανίζεται ξεκάθαρα η τάση θραύσης κάθε πλάκας και τα αντίστοιχα αποτελέσματα καταγράφονται στον πίνακα 3.5. Επίσης, είναι εμφανής η επίδραση του μεγέθους της ατέλειας, καθώς οι πλάκες με μικρή ατέλεια (σειρά S1-32), παρουσιάζουν μείωση του φορτίου θραύσης κατά μέσο όρο κατά 9% σε σχέση με τις τέλειες πλάκες (σειρά S1-0), και οι πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια (σειρά S1-96) παρουσιάζουν αντίστοιχη μείωση κατά 19%. Επίσης, από το Σχήμα 3.10 συμπεραίνεται ότι οι τέλειες πλάκες εμφανίζουν απότομη αστοχία, σε αντίθεση με τις πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια, οι οποίες παρουσιάζουν σταδιακή μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου μετά τη θραύση, η οποία σημαίνει και σταδιακή μορφή αστοχίας. Οι πλάκες με μικρές γεωμετρικές ατέλειες παρουσιάζουν ενδιάμεση συμπεριφορά.

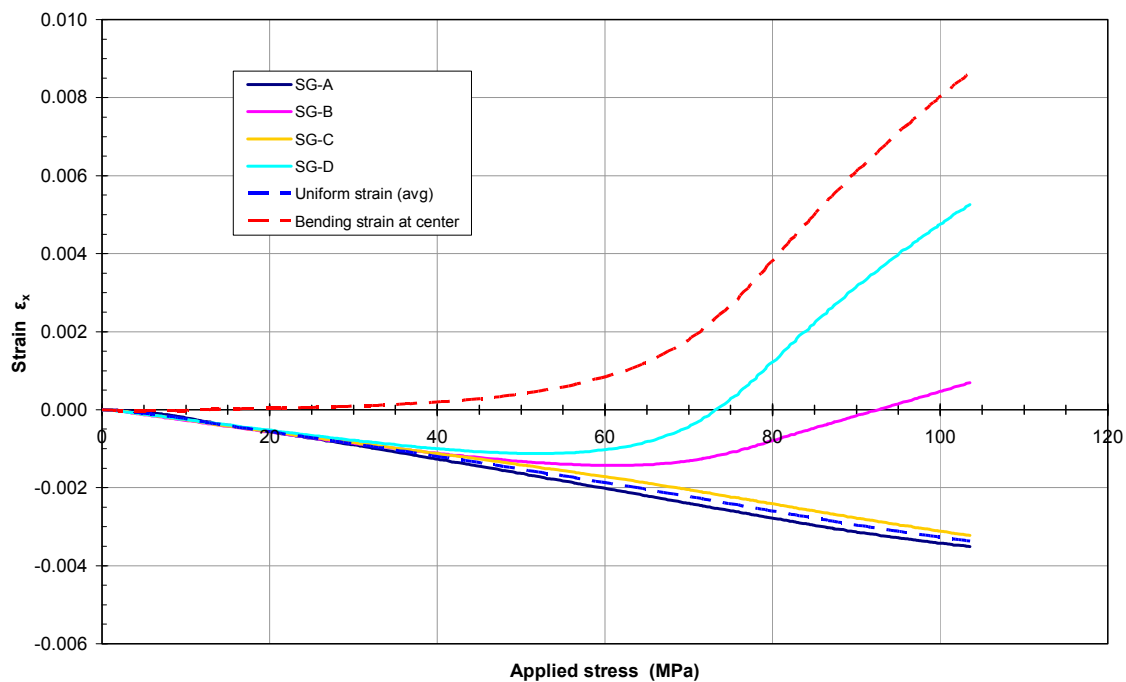
Πίνακας 3.5: Τάση θραύσης λεπτών πλακών

Plate	σ_u (Mpa)	$\sigma_{u,av}$ (Mpa)	Comparison
S1-0-1	120.9		
S1-0-2	115.0	114.9	100%
S1-0-3	108.8		
S1-32-1	115.3	105.0	91%
S1-32-3	94.7		
S1-96-1	89.7	93.6	81%
S1-96-2	97.5		

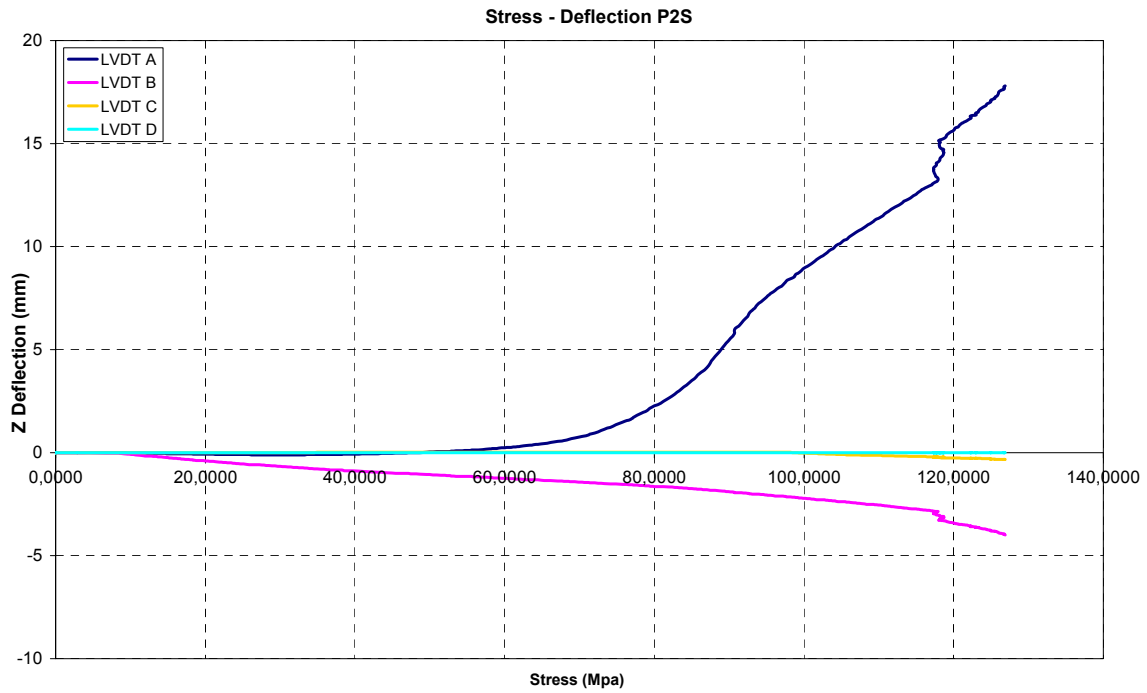
Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα τάσης – έκκεντρης μετατόπισης και τάσης – παραμόρφωσης για κάθε πλάκα ξεχωριστά (Σχήματα 3.11 ως 3.24).



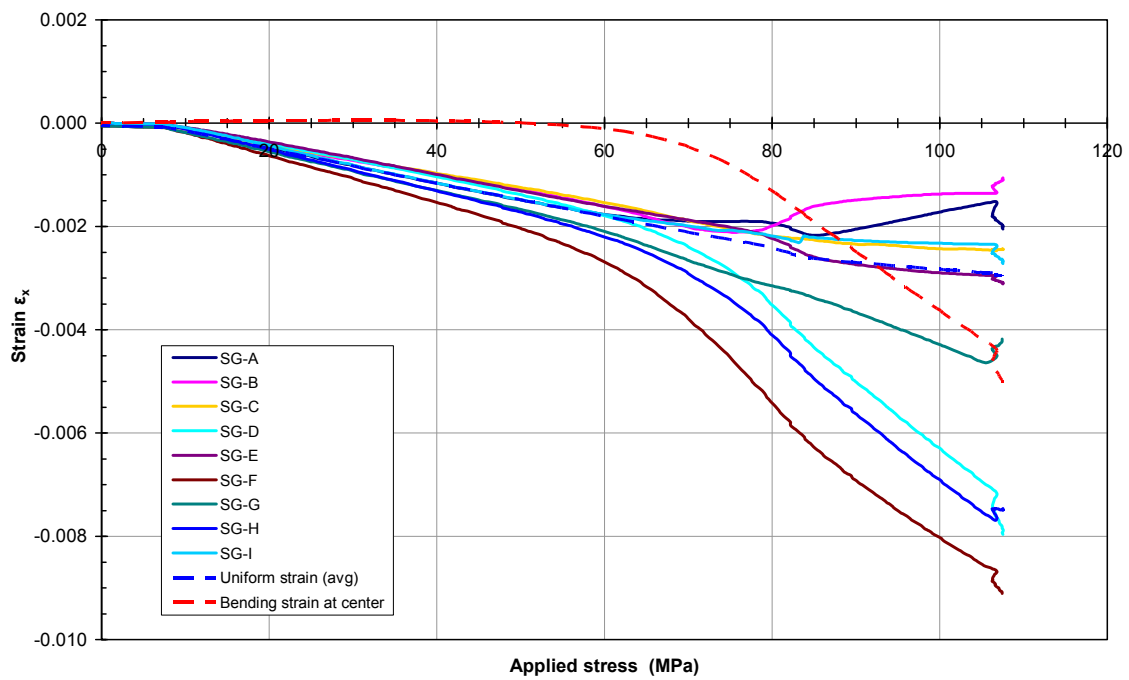
Σχήμα 3.11 : Τάση- έκκεντρη μετατόπιση S1-0-1



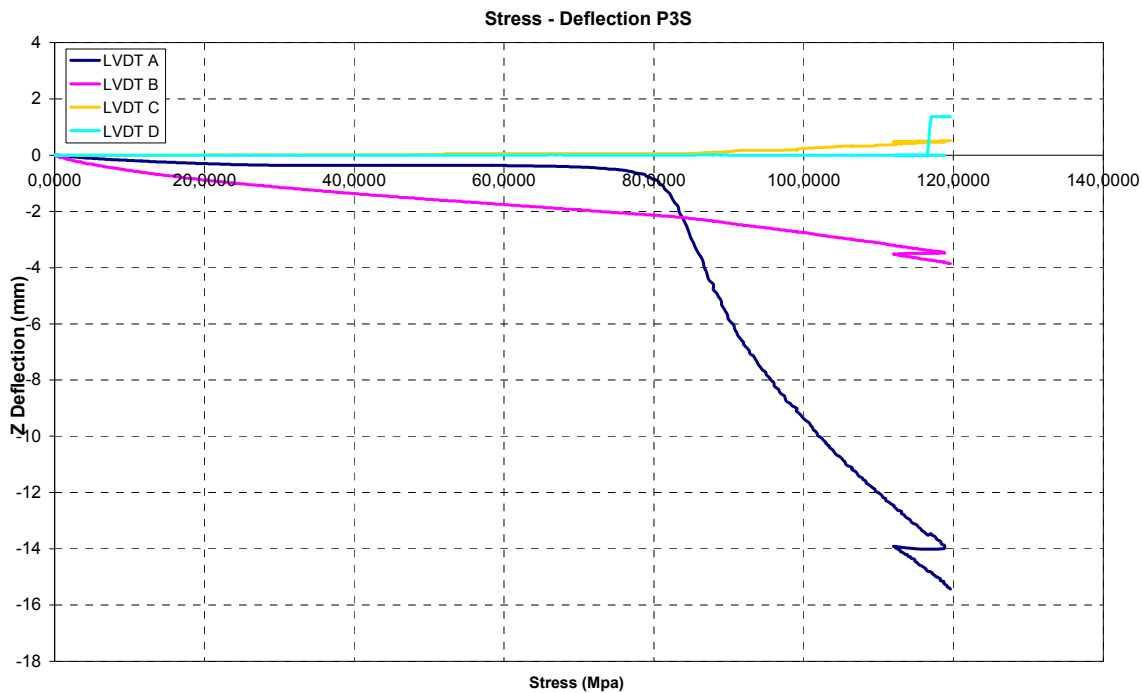
Σχήμα 3.12 : Τάση- παραμόρφωση S1-0-1



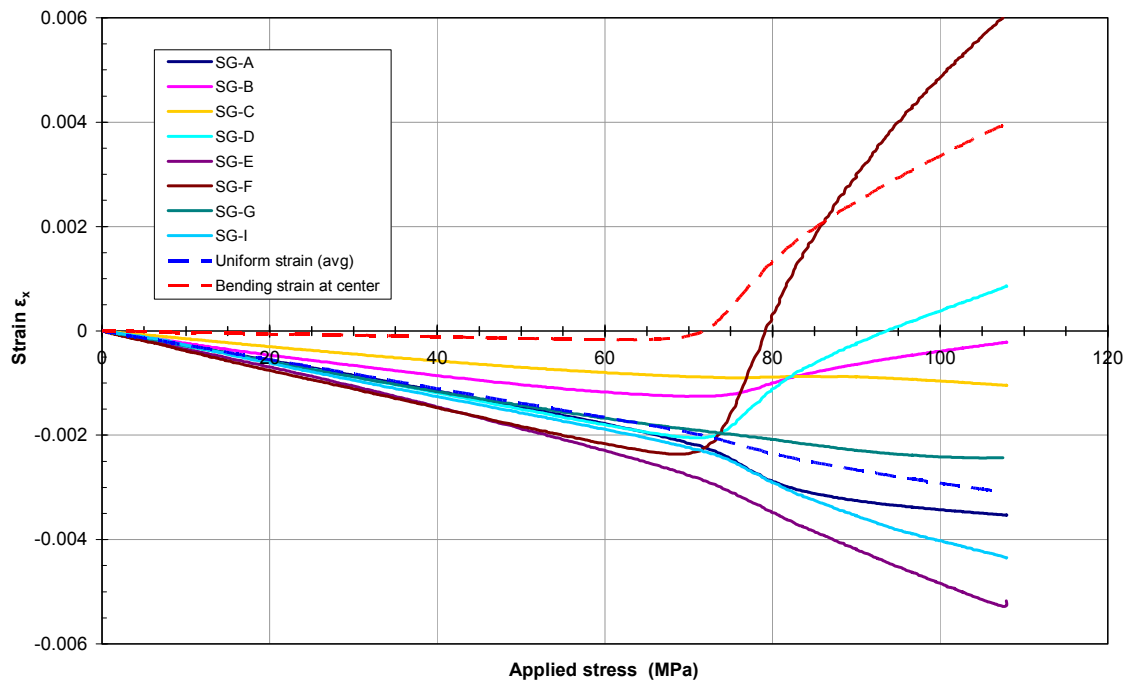
Σχήμα 3.13 : Τάση- έκκεντρη μετατόπιση S1-0-2



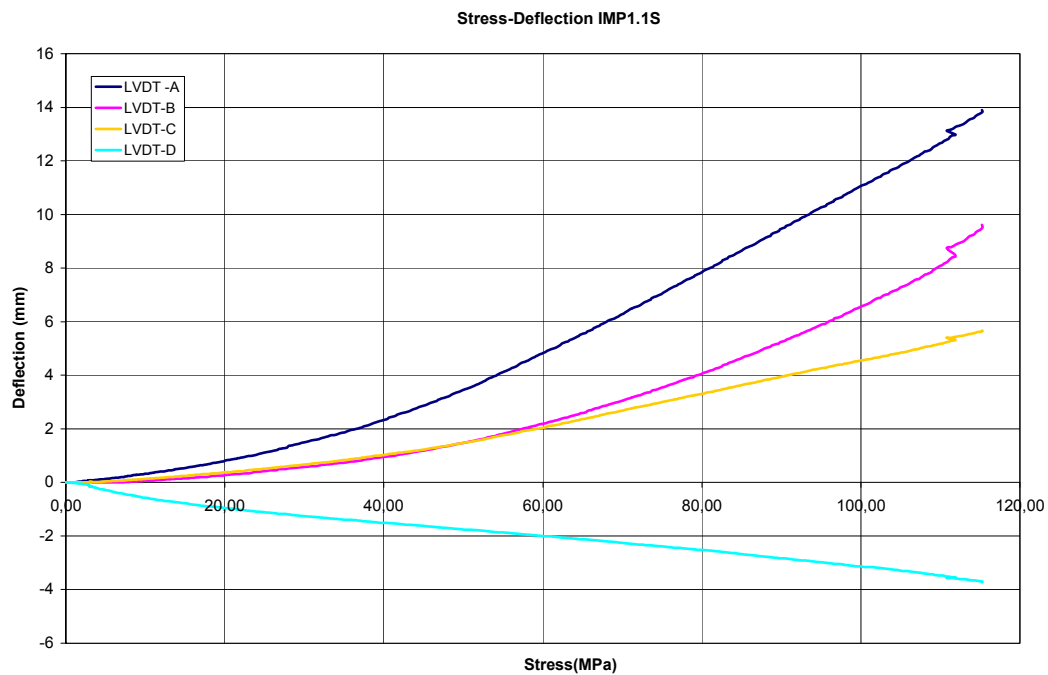
Σχήμα 3.14 : Τάση- παραμόρφωση S1-0-2



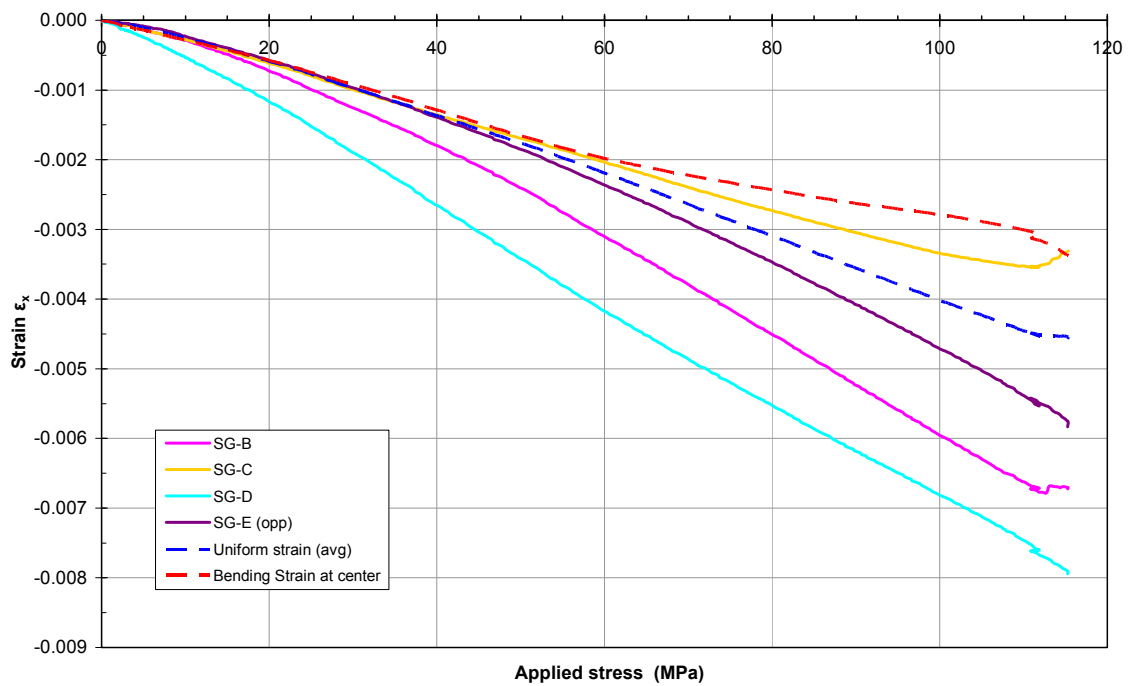
Σχήμα 3.15: Τάση- έκκεντρη μετατόπιση S1-0-3



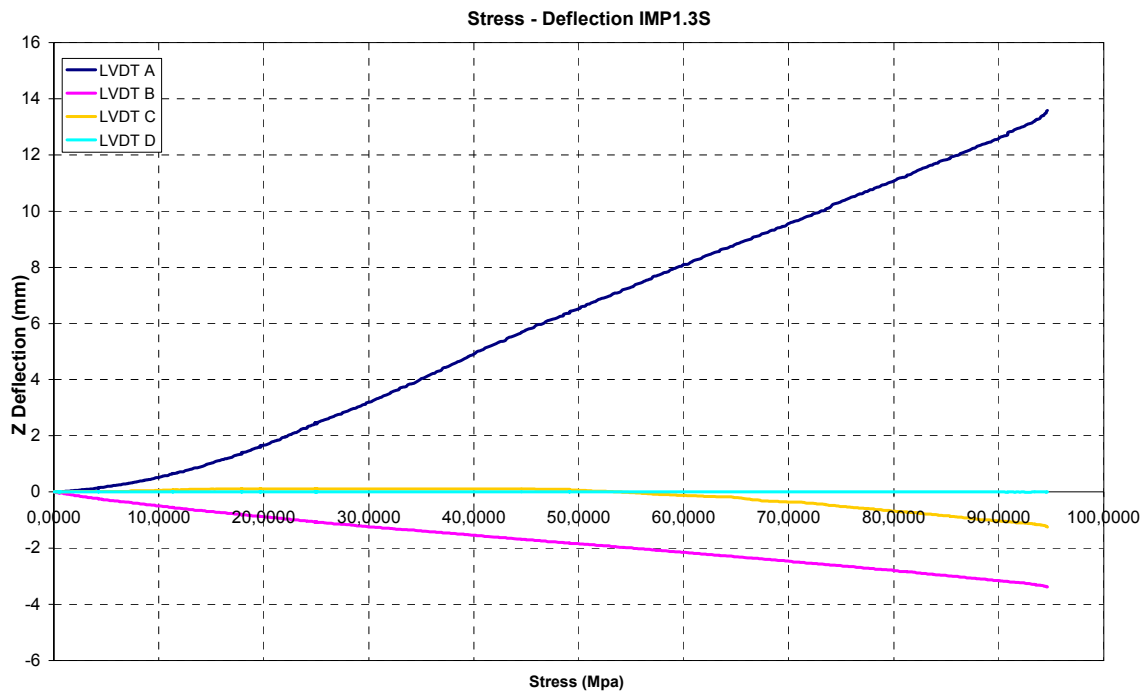
Σχήμα 3.16 Τάση- παραμόρφωση S1-0-3



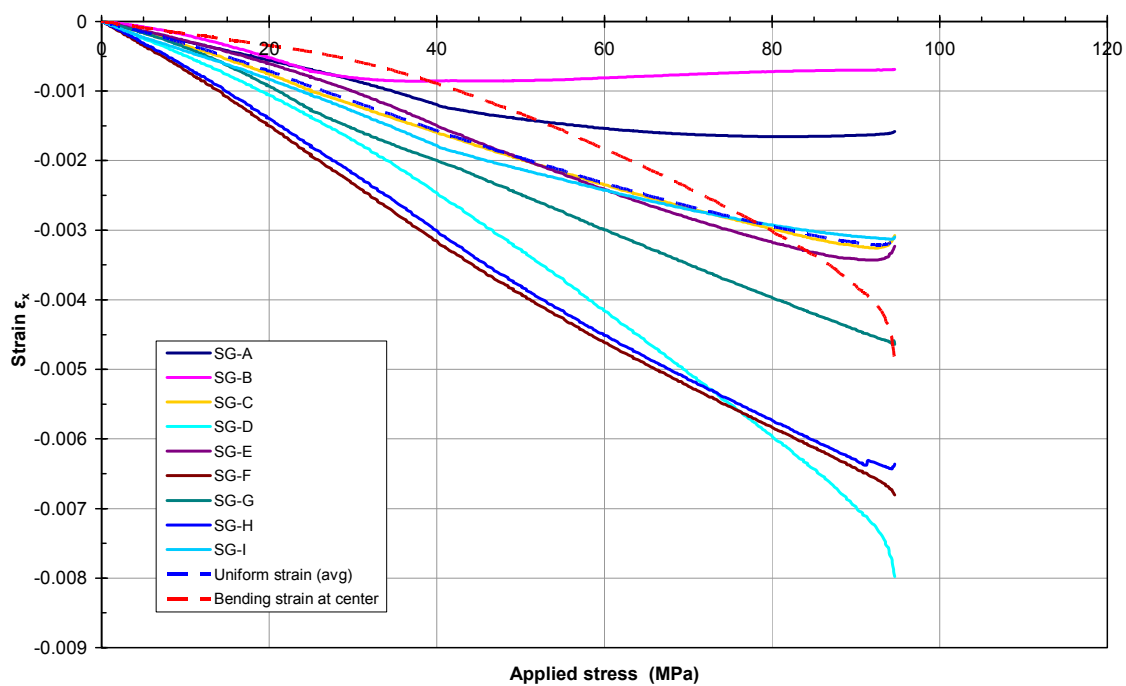
Σχήμα 3.17 : Τάση- έκκεντρη μετατόπιση S1-32-1



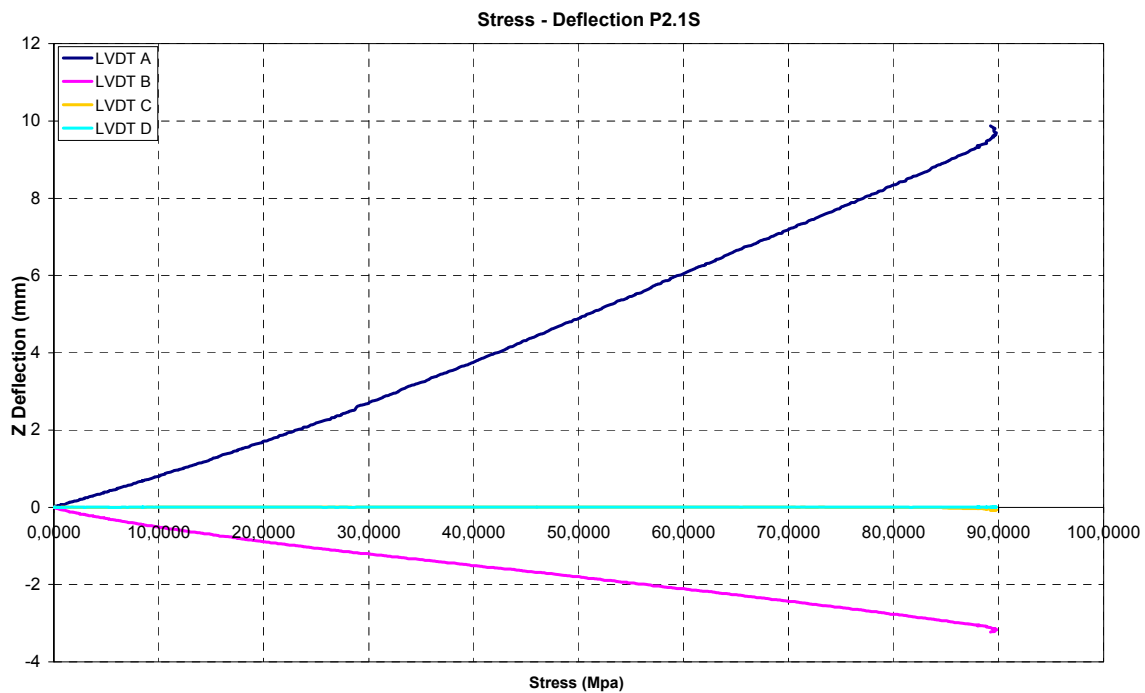
Σχήμα 3.18 : Τάση- παραμόρφωση S1-32-1



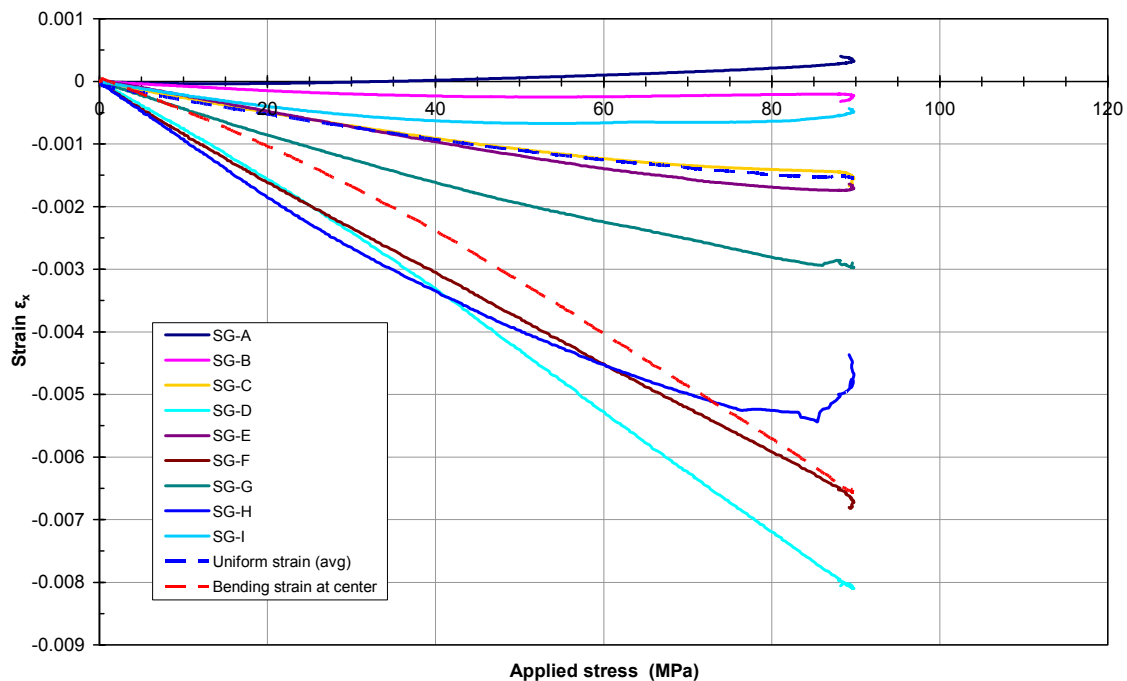
Σχήμα 3.19 : Τάση- έκκεντρη μετατόπιση S1-32-3



Σχήμα 3.20 : Τάση- παραμόρφωση S1-32-3



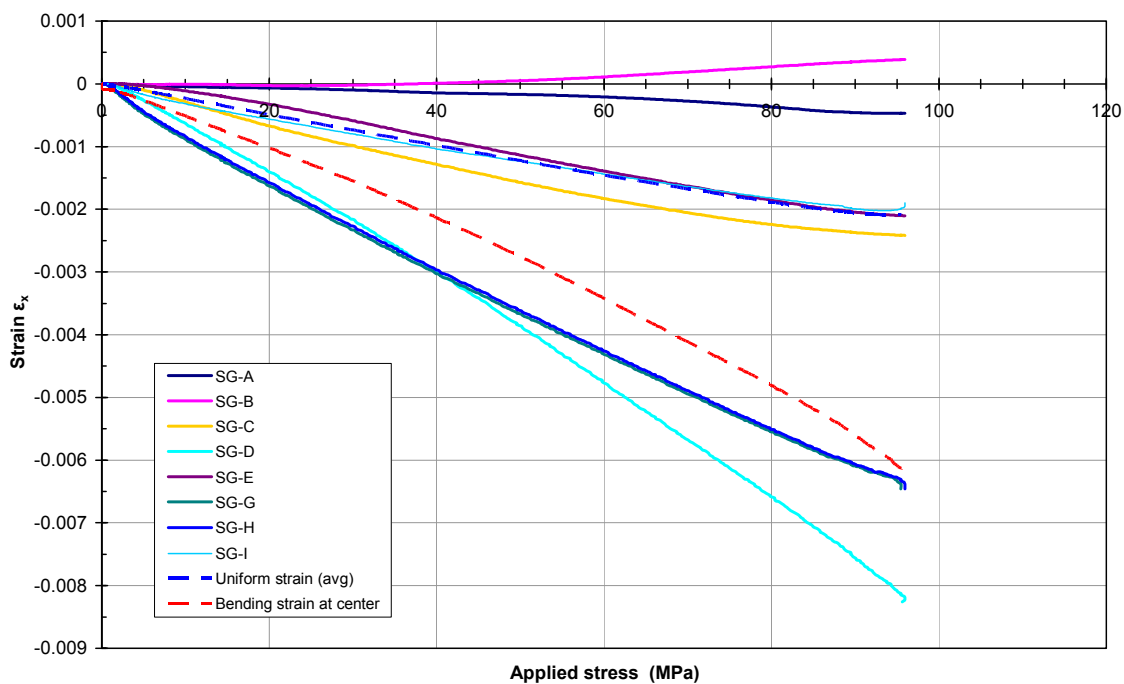
Σχήμα 3.21: Τάση- έκκεντρη μετατόπιση S1-96-1



Σχήμα 3.22 : Τάση- παραμόρφωση S1-96-1



Σχήμα 3.23 : Τάση- έκκεντρη μετατόπιση S1-96-2



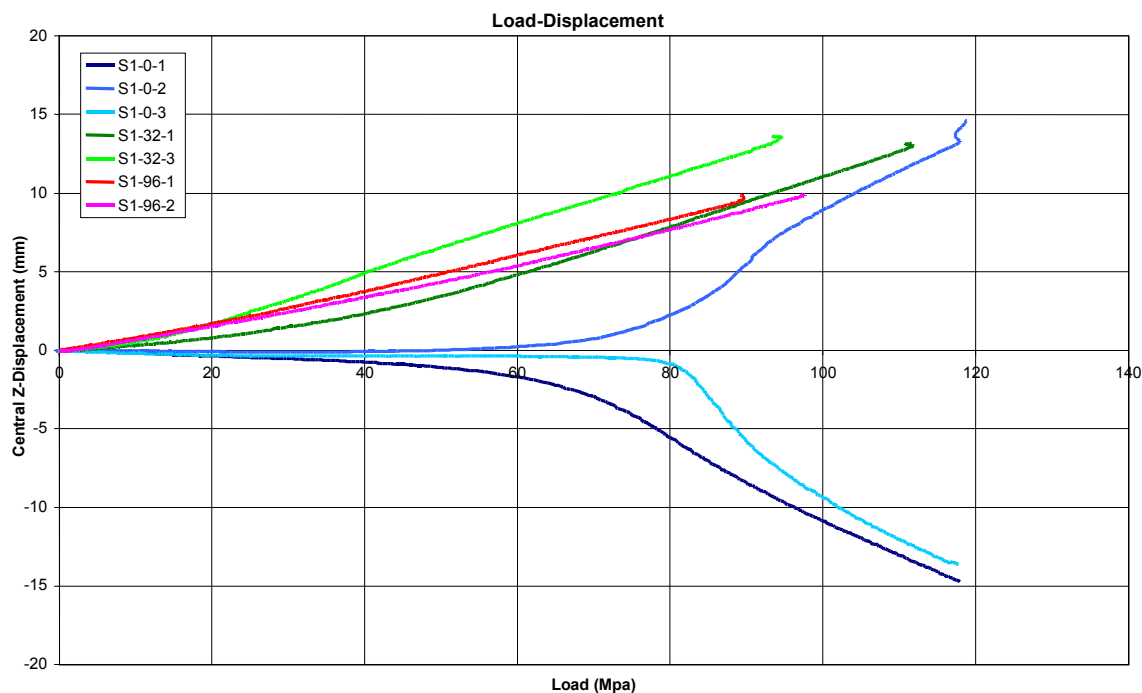
Σχήμα 3.24 : Τάση- παραμόρφωση S1-96-2

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των παραμορφώσεων, βλέπουμε ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις δεν μετρώνται στο κεντρικό strain gage (SG-D), όπως ήταν αναμενόμενο, αλλά σε άλλες περιοχές. Στις τέλειες πλάκες αρχικά μέγιστες παραμορφώσεις μετρώνται στο SG – F, έως την τάση των 80MPa περίπου, όπου η κεντρική παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη. (Σχήματα 3.10, 3.12, 3.14). Αντίστοιχα, στις πλάκες S1-96, αρχικά οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις μετρώνται στα SG – F και SG – H, έως τα 40 MPa περίπου, οπότε οι παραμορφώσεις του SG – D(κεντρικό) γίνονται μεγαλύτερες. Αντίστοιχα, ο ρυθμός μεταβολής των παραμορφώσεων μειώνεται για τα ακραία strain gages μετά από αυτό το σημείο, ενώ αυξάνεται για το κεντρικό. Για τις πλάκες S1-32 είναι δύσκολο να εξαχθούν παρόμοια ακριβή συμπεράσματα, καθώς δεν υπάρχει ακριβής αντιστοιχία των μετρήσεων των strain gages.

Αυτή η εξέλιξη των παραμορφώσεων μπορεί να σχετίζεται αφ' ενός με την αντίδραση της πλάκας ανάλογα με την θέση των επιμηκυνσιόμετρων, πράγμα που σημαίνει ότι πλησιέστερα στην κορυφή – περιοχή επιβολή φορτίου – οι παραμορφώσεις ήταν μεγαλύτερες, ενώ στην αντίθετη άκρη μικρότερες. Επιπλέον, το σημείο τομής της καμπύλης του κεντρικού επιμηκυνσιόμετρου με αυτά των μέγιστων παραμορφώσεων, καθώς και η αλλαγή του ρυθμού επιβολής μπορεί να καταδεικνύει την περιοχή πρώτης αστοχίας – «λυγισμού» της πλάκας. Αυτό εξηγείται διότι μετά το «λυγισμό» η κορυφή φορτίζεται λιγότερο, αφού η κεντρική περιοχή λαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των παραμορφώσεων.

Όσον αφορά τα διαγράμματα των LVDT's, οι μέγιστες μετατοπίσεις παρατηρούνται για το κεντρικό LVDT, (LVDT – A), ενώ στην περιοχή της κορυφής της πλάκας οι μετατοπίσεις είναι μηδαμινές, αποτέλεσμα των συνοριακών συνθηκών. Η τέταρτη μέτρηση δείχνει τη μετατόπιση του εμβόλου, γι' αυτό και έχει αρνητικές τιμές, καθώς και πολύ ομαλό ρυθμό μεταβολής.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μετατοπίσεων και παραμορφώσεων για όλες τις πλάκες.



Σχήμα 3.25 : Κεντρική μετατόπιση για όλες τις πλάκες

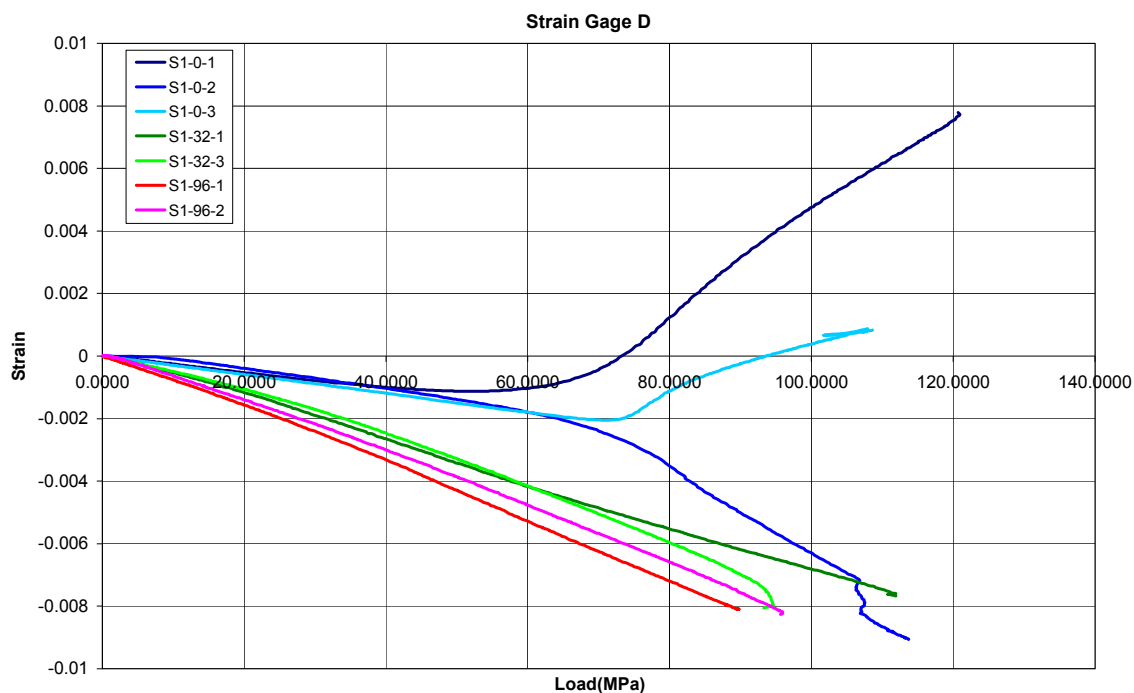
Παρατηρώντας το διάγραμμα κεντρικής κατακόρυφης μετατόπισης για τις πλάκες (Σχήμα 3.25), εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

Η μετατόπιση στις τέλειες πλάκες S1-0-1 και S1-0-3 έγινε προς την αντίθετη πλευρά από αυτή που ήταν τοποθετημένα τα LVDT's, γι' αυτό και οι μετρήσεις είναι αρνητικές. Αντιθέτως, στις υπόλοιπες πλάκες η μετατόπιση έγινε προς την πλευρά όπου ήταν τοποθετημένα τα όργανα. Αυτό είναι αναμενόμενο όσον αφορά τις ατελείς πλάκες, καθώς τα LVDT's ήταν τοποθετημένα στην κυρτή πλευρά τις ατέλειας, προς την οποία έγινε τελικά και η έκκεντρη μετατόπιση.

Η μορφή των καμπυλών είναι αρκετά διαφορετική για κάθε μέγεθος ατέλειας, καταδεικνύοντας τον τρόπο παραλαβής του φορτίου και αστοχίας. Για τις πλάκες χωρίς γεωμετρική ατέλεια είναι διακριτό το σημείο λυγισμού τις πλάκας. Η καμπυλότητα αυξάνει απότομα στην περιοχή φορτίου 80MPa, που σημαίνει ότι και η έκκεντρη μετατόπιση του κεντρικού σημείου τις πλάκας αυξήθηκε αισθητά – δηλαδή υπέστη λυγισμό.

Αντίθετα, οι πλάκες με γεωμετρική ατέλεια, ιδιαίτερα οι S1-96 (μεγάλη γεωμετρική ατέλεια) παρουσιάζουν ομαλή, σχεδόν γραμμική παραλαβή του φορτίου. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι δεν υπέστησαν καθόλου λυγισμό, οδηγούμενες σε ψαθυρή θραύση.

Οι καμπύλες αυτές θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, για εκτίμηση τις ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 3.26 : Παραμόρφωση στο κέντρο για όλες τις πλάκες

Το διάγραμμα του Σχήματος 3.26 παρουσιάζει τις παραμορφώσεις στο κέντρο των πλακών. Όπως και στο διάγραμμα μετατοπίσεων, οι λεπτές πλάκες εμφανίζουν έντονη αύξηση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης από την περιοχή των 70 περίπου MPa και μετά.

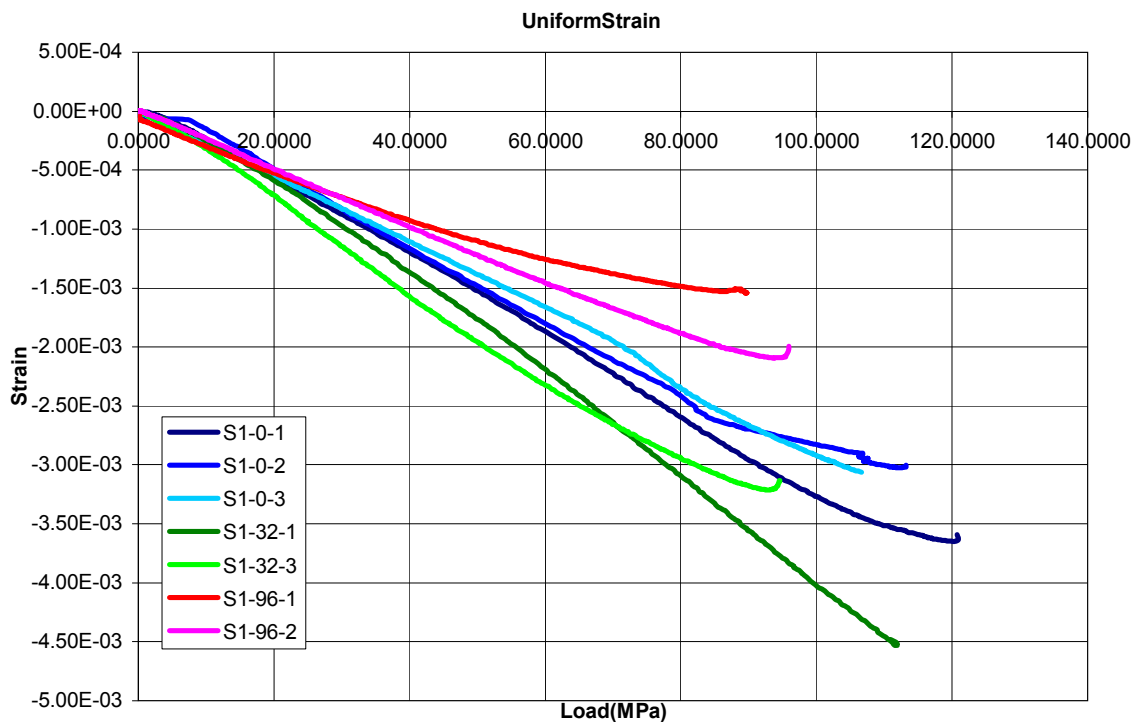
Πρακτικά, με βάση τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης ή έκκεντρης μετατόπισης – παραμόρφωσης του κέντρου τις πλάκας, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του φορτίου λυγισμού για τις πλάκες χωρίς γεωμετρικές ατέλειες. Η στιγμή λυγισμού εμφανίζεται στην καμπύλη με την απότομη αύξηση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης, ως προς την τάση. Εξετάζοντας τις καμπύλες καμπτικού φορτίου (bending strain), προσδιορίζεται το φορτίο για τις τέλειες πλάκες, περίπου ίσο με 65~70 MPa.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα ομοιόμορφης και καμπτικής παραμόρφωσης για τις τις πλάκες. Υπενθυμίζεται ότι η ομοιόμορφη παραμόρφωση είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων μακρύτερα από το κέντρο τις πλάκας, ενώ η καμπτική παραμόρφωση η διαφορά μεταξύ της μέτρησης του κεντρικού strain gage και της ομοιόμορφης.

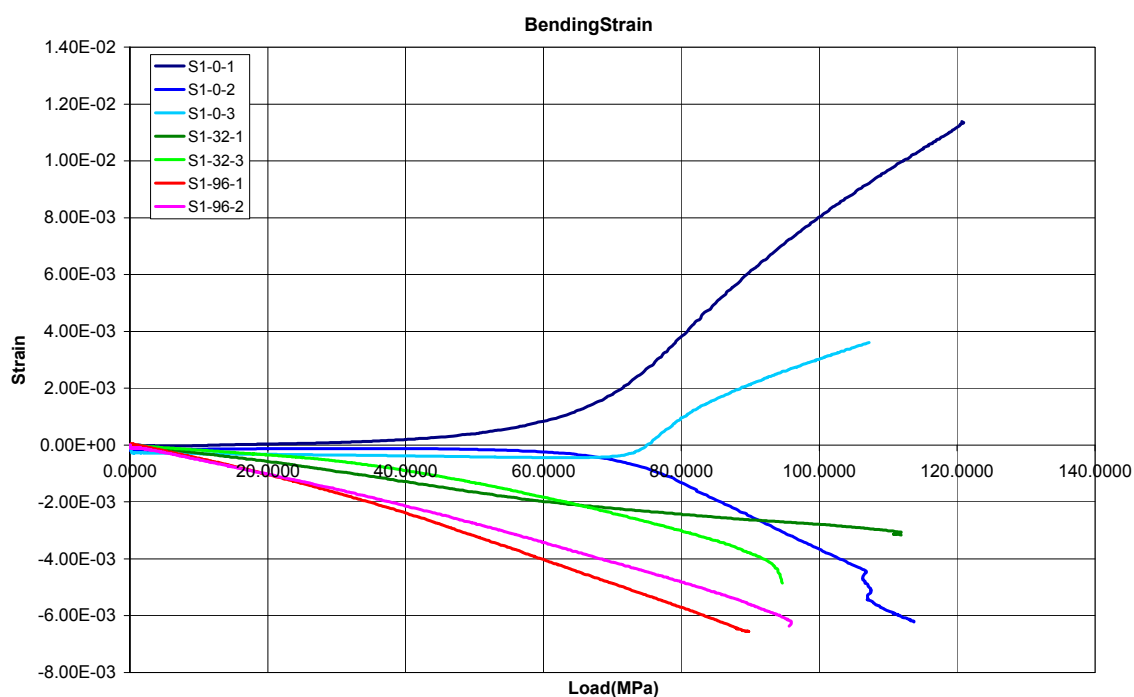
$$\epsilon_{uni} = \text{average} (\epsilon_{SG-A}, \epsilon_{SG-C}, \epsilon_{SG-E}, \epsilon_{SG-G})$$

$$\epsilon_{bend} = \epsilon_{SG-D} - \epsilon_{uni}$$

Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα (Σχήμα 3.25, 3.26), στο διάγραμμα καμπτικής παραμόρφωσης (Σχήμα 3.28) διακρίνεται η περιοχή λυγισμού των τέλειων πλακών



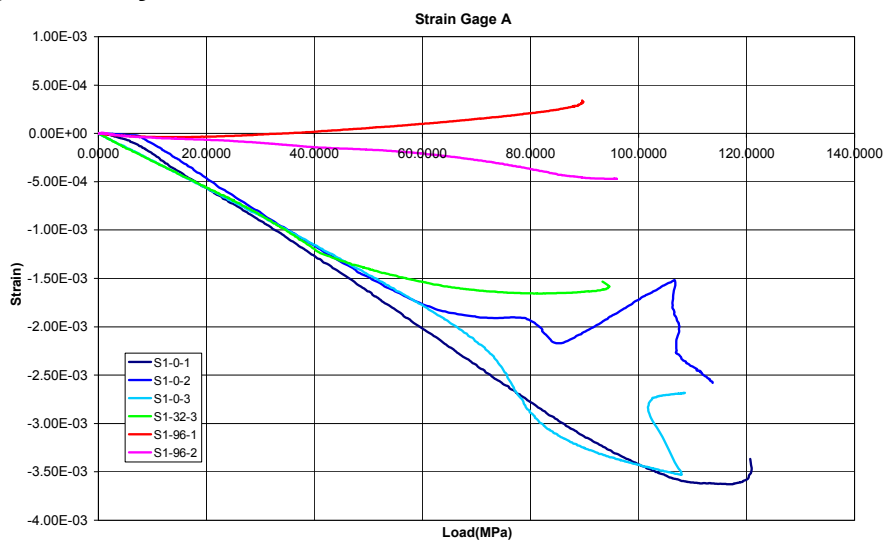
Σχήμα 3.27 : Ομοιόμορφη παραμόρφωση για τις τις πλάκες



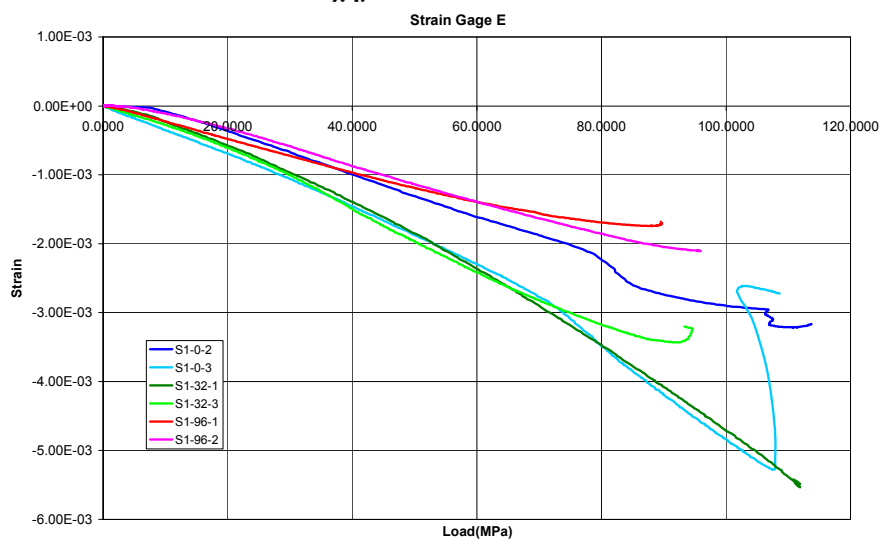
Σχήμα 3.28 : Καμπτική παραμόρφωση για όλες τις πλάκες

Στη συνέχεια, παρατίθενται διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων σύμφωνα με τις μετρήσεις από κάθε επιμηκυνσιόμετρο, ανάλογα με την περιοχή της πλάκας όπου ήταν τοποθετημένα. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν τη συμπεριφορά των πλακών ανάλογα με την περιοχή από όπου ελήφθησαν οι μετρήσεις.

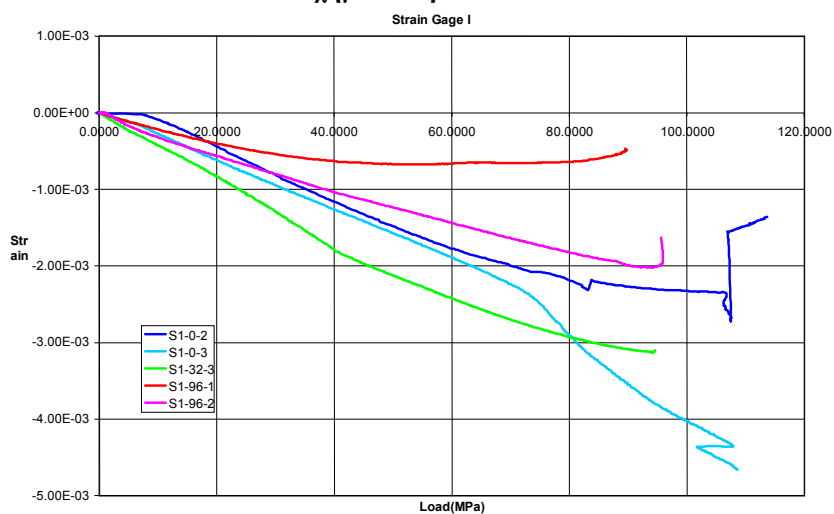
Κάτω πλευρά πλάκας: SG – A, SG – I, SG – E



Σχήμα 3.29 α : SG – A

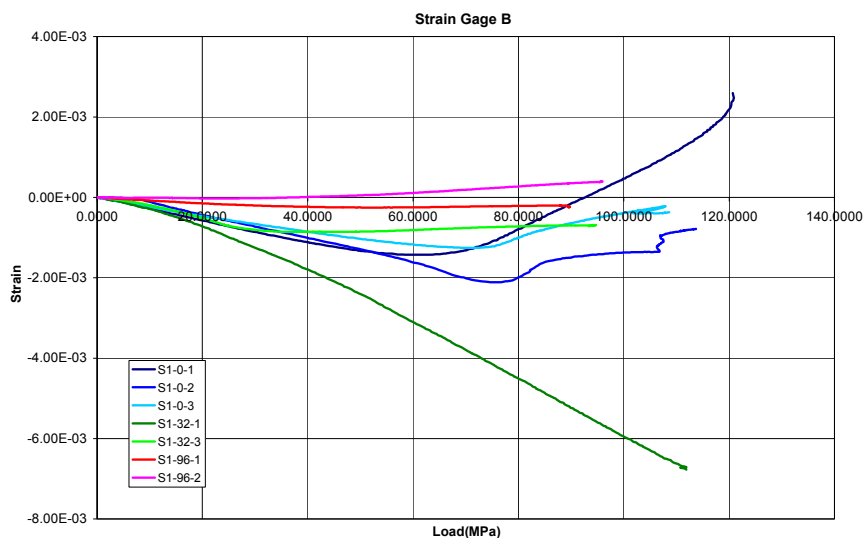


Σχήμα 3.29 β : SG - E

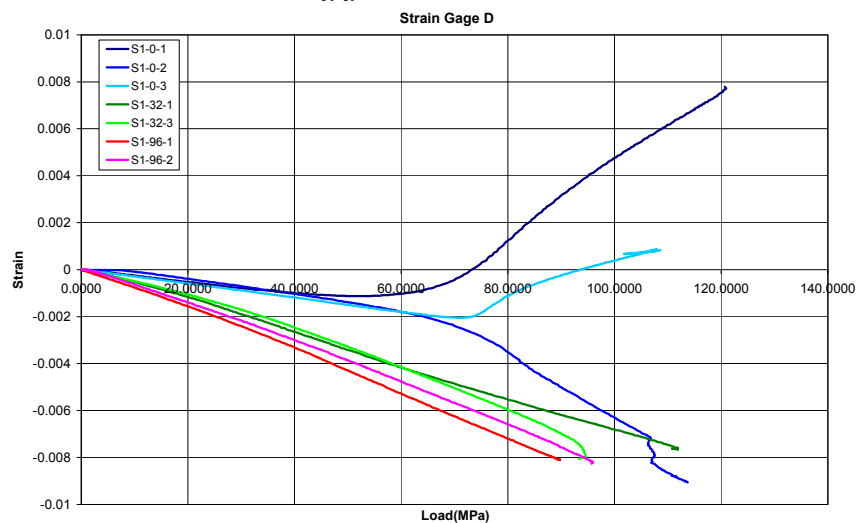


Σχήμα 3.29 γ : SG – I

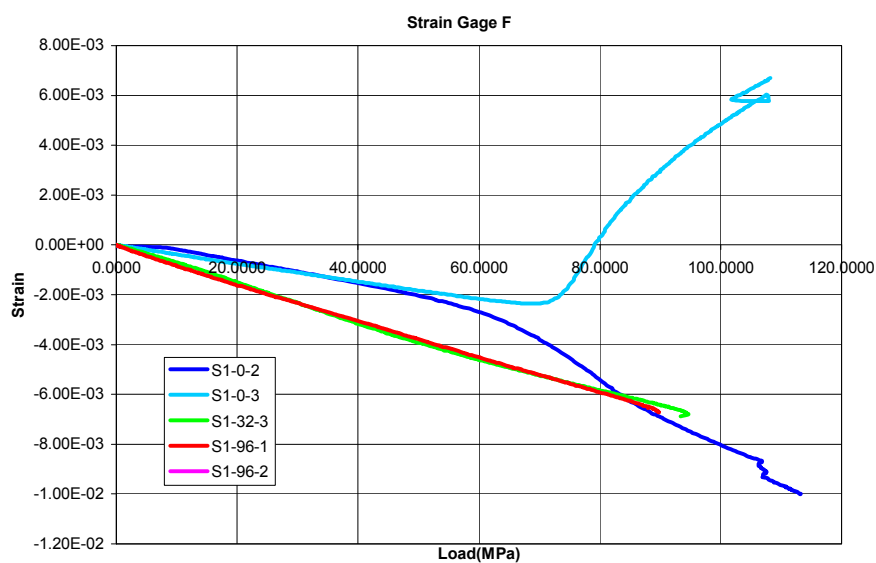
Κεντρική περιοχή πλάκας: SG – B, SG – D, SG – F



Σχήμα 3.30 α : SG – B

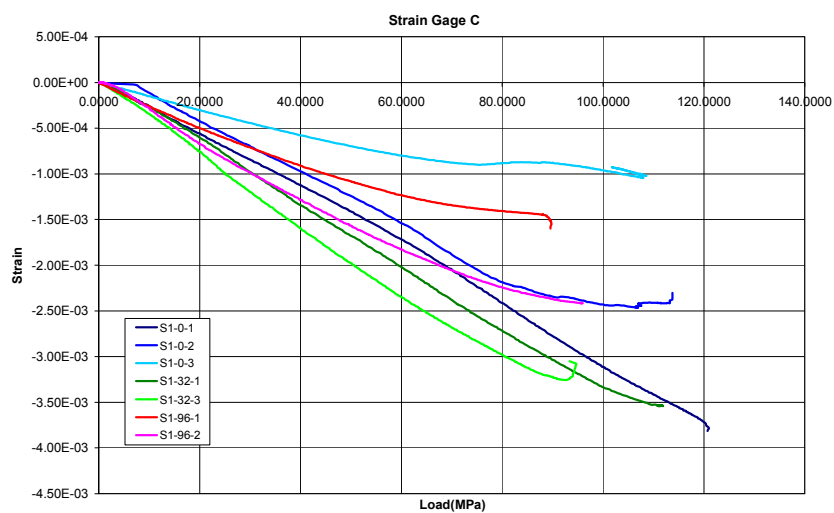


Σχήμα 3.30 β: SG -D

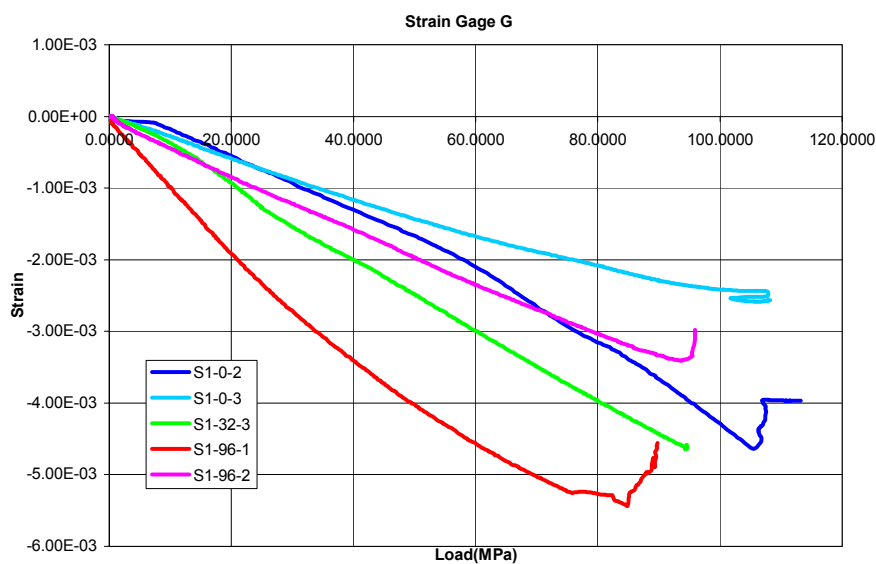


Σχήμα 3.30 γ: SG - F

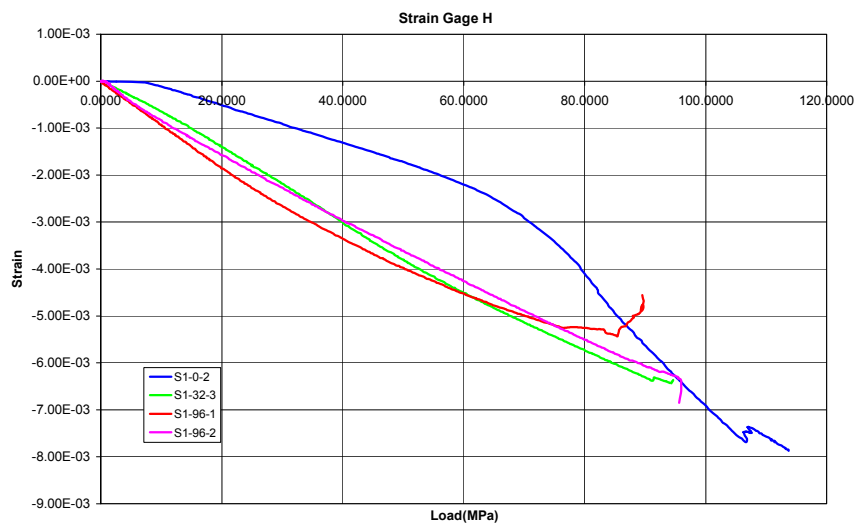
Άνω πλευρά πλάκας: SG – C, SG – H, SG – G



Σχήμα 3.31 α : SG-C



Σχήμα 3.31 β: SG - G



Σχήμα 3.31 γ : SG - H

Τα παραπάνω σχήματα δίνουν μια εντύπωση της συμπεριφοράς των πλακών ανάλογα με τη γεωμετρική ατέλεια. Ξεκινώντας από την κεντρική περιοχή (Σχήματα 3.29), παρατηρείται κι εδώ το σημείο λυγισμού των τέλειων πλακών, ενώ στις πλάκες με ατέλεια οι παραμορφώσεις αυξάνονται γραμμικά.

Σε γενικές γραμμές οι καμπύλες παραμορφώσεων και από τα 3 strain gages της κεντρικής περιοχής ακολουθούν παρόμοια κατανομή , με εξαίρεση το SG – B της πλάκας S1-0-2 (Σχήμα 3.30α). Η μονοτονία της καμπύλης αυτής από φθίνουσα, που καταδεικνύει θλιπτικές παραμορφώσεις, οι οποίες αντιστοιχούν και στο Σχήμα 3.30β (strain gage D), γίνεται αύξουσα μετά το σημείο λυγισμού, δείχνοντας εφελκυστικές παραμορφώσεις.

Συγκρίνοντας και με τις καμπύλες των SG – A και SG – C της ίδια πλάκας, παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο μεταβολής των παραμορφώσεων. Μια εξήγηση είναι ότι μετά το λυγισμό της, η πλάκα έπαψε να παραμορφώνεται ομοιόμορφα, παίρνοντας μεγαλύτερες θλιπτικές παραμορφώσεις στη δεξιά πλευρά (SG – G, SG – F, SG – E),ενώ η αριστερή υπέστη εφελκυσμό, η πλάκα δηλαδή υπέστη κάμψη γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Οι υπόλοιπες πλάκες παρουσιάζουν ομοιόμορφη συμπεριφορά σ' αυτό το σημείο.

Στην κάτω πλευρά των πλακών (Σχήματα 3.29) οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις παρατηρούνται στις πλάκες με μικρή γεωμετρική ατέλεια (S1-32), ενώ αντίθετα οι πλάκες με μεγάλη ατέλεια (S1-96) παρουσιάζουν τις μικρότερες παραμορφώσεις. Και για τα δύο μεγέθη ατέλειας, οι παραμορφώσεις αυξάνονται γραμμικά, όπως και για την κεντρική περιοχή. Επίσης και οι τέλειες πλάκες παρουσιάζουν γραμμικές παραμορφώσεις, με τιμές ενδιάμεσα των άλλων δύο ομάδων.

Στην άνω πλευρά της πλάκας (Σχήματα 3.31) οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις εμφανίζονται στις πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια, ενώ οι τέλειες πλάκες παρουσιάζουν τις μικρότερες. Κι εδώ ο ρυθμός μεταβολής των παραμορφώσεων είναι σχεδόν γραμμικός, τόσο για τις τέλειες όσο και για τις ατελείς πλάκες, κάτι που παρουσιάζεται και στο διάγραμμα ομοιόμορφης παραμόρφωσης (Σχήμα 3.25)

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα 3.6 παρουσιάζονται οι τάσεις, παραμορφώσεις και έκκεντρες μετατοπίσεις κάθε πλάκας τη στιγμή της θραύσης. Τα στοιχεία για τις πλάκες μεσαίου πάχους (σειρά S2) ελήφθησαν από τα δεδομένα της διπλωματικής εργασίας του Α.Πάντου.

Πίνακας 3.6: Τάση θραύσης και αντίστοιχες παραμορφώσεις

Plate	Τάση θραύσης (MPa)	Μετατόπιση κατά z, κέντρο της πλάκας (mm)	Ομοιόμορφη παραμόρφωση * 10 ⁻³	Καμπτική παραμόρφωση * 10 ⁻³
S1-0-1	120.9	15.67	-2.12	-10.01
S1-0-2	115.0	17.80	-1.24	-2.58
S1-0-3	108.8	14.00	-3.06	-3.92
S1-32-1	115.3	13.84	-4.54	-3.37
S1-32-3	94.7	13.58	-3.13	-4.85
S1-96-1	89.7	9.64	-1.54	-1.54
S1-96-2	97.5	9.80	-1.99	-2.08
S2-0-1	203.9	-3.75	-5.43	2.16
S2-0-2	182.4	-7.69	-5.62	5.50
S2-0-3	195.5	-6.33	-1.53	1.18
S2-32-1	151.9	9.20	-5.19	-6.34
S2-32-2	147.8	8.00	-4.88	-4.19
S2-32-3	155.3	8.40	-4.66	-2.83
S2-96-1	125.3	8.14	-4.59	-5.11
S2-96-2	130.8	8.36	-4.11	2.86
S2-96-3	132.6	8.42	-4.27	-2.03

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Εισαγωγή

Μετά τις εργαστηριακές δοκιμές λυγισμού των πλακών από σύνθετα υλικά, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, επιδιώκοντας την όσο το δυνατό καλύτερη προσομοίωση των πειραματικών συνθηκών. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS για μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία. Κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν συνολικά 6 μοντέλα, για τις ομάδες λεπτών (thin) και μεσαίου πάχους (mid-thick) πλακών, και για κάθε μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας (μηδενική, μικρή, μεγάλη). Οι διαστάσεις για κάθε μοντέλο ελήφθησαν από τον μέσο όρο των αντίστοιχων διαστάσεων (πάχος, μέγεθος γεωμετρικής ατέλειας) που μετρήθηκαν στα πειραματικά δοκίμια. Επίσης, μέσω της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ερευνήθηκαν οι συνοριακές συνθήκες του πειράματος, καθώς η προσομοίωση έγινε για 3 διαφορετικές συνοριακές συνθήκες: Πλήρως πακτωμένο, απλά εδραζόμενο, και συνδυασμός αυτών. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης μελετήθηκαν οι εκτός επιπέδου μετατοπίσεις του κέντρου κάθε πλάκας, και η συνεπίπεδη κατακόρυφη μετατόπιση της φορτισμένης πλευράς. Στόχος της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ήταν να εξεταστούν τα μοντέλα σε σχέση με τα πραγματικά – πειραματικά δεδομένα, καθώς και οι παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των μοντέλων σε σχέση με τα πειράματα.

4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η ανάλυση ή μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία είναι μια μέθοδος αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων. Με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων επιχειρείται η επίλυση των εξισώσεων που ορίζουν ένα κατασκευαστικό πρόβλημα. Η μέθοδος λειτουργεί κατακερματίζοντας τις κατασκευές σε μικρά διακριτά στοιχεία, τοποθετημένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναπαριστούν τις αρχικές κατασκευές. Για κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία ορίζεται αναλυτική σχέση δύναμης – μετατόπισης. Σε γενικές γραμμές η μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί ως η σχέση μεταξύ ενός διανύσματος δυνάμεων F , του μητρώου δυσκαμψίας K και ενός διανύσματος παραμόρφωσης U , ώστε $F = K \cdot U$

Η γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία βασίζεται στην παραδοχή ότι η δυσκαμψία K της κατασκευής παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό είναι προσεγγιστικό, καθώς ακόμη και μικρές παραμορφώσεις μπορεί να επιφέρουν μεταβολή στη δυσκαμψία. Παρ'όλ'αυτά, η προσέγγιση είναι ικανοποιητική για τη μηχανική μελέτη, έτσι τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης είναι αποδεκτά. Η γραμμική ανάλυση παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα δυνατότητας πολλαπλασιασμού των αποτελεσμάτων, ανάλογα με τη μεγέθυνση του φορτίου, καθώς επίσης και τη δυνατότητα χρήσης της αρχής της επαλληλίας. Όμως, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το αντικείμενο υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις. Έτσι, για πολλά προβλήματα χρειάζεται η επεξεργασία τους βάσει μη γραμμικής ανάλυσης.

Σε αντίθεση με τη γραμμική ανάλυση, στη μη γραμμική ανάλυση η δυσκαμψία των στοιχείων δεν θεωρείται σταθερή για όλη την προσομοίωση. Η δυσκαμψία περιλαμβάνει όρους γεωμετρίας, φορτίου και ακαμψίας υλικού για κάθε βήμα. Για το λόγο αυτό είναι πιο περίπλοκη στον ορισμό της και χρονοβόρα υπολογιστικά, αλλά αποδίδει πολύ καλύτερα σε προβλήματα απώλειας ευστάθειας, διαρροής υλικών και δημιουργίας ρωγμών, καθώς και σε προβλήματα μεγάλων παραμορφώσεων. Οι πηγές μη γραμμικότητας εντοπίζονται στο υλικό, στις συνοριακές συνθήκες ή στη γεωμετρία του μοντέλου. Εξαιτίας της μεταβολής της ακαμψίας η οποία λαμβάνεται υπ' όψιν στη μη γραμμική ανάλυση, η επίλυση γίνεται με επαναληπτικές μεθόδους. Για την εξασφάλιση σύγκλισης χρειάζονται αρκετές επαναλήψεις. Η επαναληπτική μέθοδος που αξιοποιείται στη μη γραμμική ανάλυση της παρούσας μελέτης είναι η Newton – Raphson.

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.2.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΑΚΑΣ

- Διαστάσεις

Στόχος της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία ήταν η όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση των πειραμάτων λυγισμού στις πλάκες από σύνθετα υλικά. Έτσι οι διαστάσεις των πλακών – μοντέλων ταυτίζονται με αυτές της περιοχής εφαρμογής φορτίου των πειραματικών. Οπότε, οι διαστάσεις των πλακών είναι :

$$\alpha = 325 \text{ mm}, \quad \beta = 320 \text{ mm}.$$

Στις πλάκες με γεωμετρική ατέλεια, η περιοχή της ατέλειας εκτείνεται, όπως και στα εργαστηριακά δοκίμια, σε μια περιοχή 300X300 mm, ενώ περιμετρικά υπάρχει μια «λωρίδα» επίπεδου υλικού, πλάτους 25 και 20 mm αντίστοιχα, σε κάθε διάσταση.

- Ακολουθία στρώσεων – Πάχος πολύστρωτου

Η ακολουθία των στρώσεων στο μοντέλο αντιστοιχεί στη σειρά των στρώσεων των εργαστηριακών δοκιμίων. Η διαφορά είναι πως για καλύτερη μοντελοποίηση οι διαξονικές στρώσεις δεν λαμβάνονται ως μία στρώση, αλλά ως 2 αλληπάλληλες μονοαξονικές, με προσανατολισμό $+45^\circ$ και -45° , με πάχος το μισό από αυτό των διαξονικών. Επιπλέον, για εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος κάθε ομάδα αλληπάλληλων μονοαξονικών στρώσεων μοντελοποιείται ως 2 συνεχόμενες στρώσεις με ισοδύναμο πάχος.

Οπότε, η ακολουθία στρώσεων στα μοντέλα είναι:

Λεπτές: [+45/-45 / 0₂ / 0₂ / +45/-45 / 0₃ / 0₃ / -45/+45 / 0₂ / 0₂ / -45/+45]

Μεσαίου Πάχους:

[+45/-45/0₂/0₂ / +45/-45/0₂/0₂ / +45/-45/0₃/0₃ / -45/+45/0₂/0₂ / -45/+45 / 0₂/0₂ / -45/+45]

Το πάχος της πλάκας διαφέρει σε κάθε ομάδα μοντέλων, αντίστοιχα με τα δοκίμια. Μία ομάδα περιλαμβάνει τις λεπτές πλάκες (MS1), και μία τις πλάκες μεσαίου πάχους (MS2). Το πάχος του μοντέλου προκύπτει ως το άθροισμα των παχών όλων των στρώσεων. Επομένως εξαρτάται από την ακολουθία στρώσεων σε κάθε μοντέλο, και από το πάχος των μονοαξονικών και διαξονικών στρώσεων. Οι διαξονικές στρώσεις λαμβάνονται ως ζεύγος μονοαξονικών, με γωνία $+45^\circ$ και -45° . Έτσι, για τον υπολογισμό του πάχους των διαξονικών στρώσεων λαμβάνεται ο διπλάσιος αριθμός στρώσεων, με το μισό πάχος, σε σχέση με τις μετρήσεις των εργαστηριακών δοκιμίων.

Οι μετρήσεις πάχους από δοκίμια κατασκευασμένα για αυτό το σκοπό (κεφ.3.1.1), δίνουν τις εξής τιμές, όπου t_1 το πάχος των μονοαξονικών και t_2 των διαξονικών: $t_1 = 0,59 \text{ mm}$, $2t_2 = 0,36 \text{ mm} \rightarrow t_2 = 0,18 \text{ mm}$

Οπότε ο λόγος πάχους διαξονικών/ μονοαξονικών στρώσεων προκύπτει:

$$B_{iax}/UD = t_2/t_1 = 0,18/0,59 = 0,30508475 \rightarrow t_2 = 0,30508475 * t_1$$

Για τις πλάκες μεσαίου πάχους έχουμε 22 μονοαξονικές στρώσεις, πάχους t_1 και 12 διαξονικές στρώσεις, πάχους t_2 , οπότε:

Αν t το συνολικό πάχος της πλάκας, τότε:

$$t = 22 \cdot t_1 + 12 \cdot t_2 \rightarrow t = 22 \cdot t_1 + 12 \cdot 0,30508475 \cdot t_1$$

$$t_1 = t / 25,661$$

$$t_2 = 0,30508475 \cdot t / 25,661$$

Αντίστοιχα, στις λεπτές πλάκες έχουμε 14 μονοαξονικές στρώσεις (t_1) και 8 διαξονικές (t_2), οπότε τα πάχη προκύπτουν:

$$t = 14 \cdot t_1 + 8 \cdot t_2 \rightarrow t = 14 \cdot t_1 + 8 \cdot 0,30508475 \cdot t_1$$

$$t_1 = t / 16,44$$

$$t_2 = 0,30508475 \cdot t / 16,44$$

Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η μοντελοποίηση του πάχους κάθε πλάκας, σε αντιστοιχία με τα πειραματικά δεδομένα, μια και το συνολικό πάχος του πολύστρωτου στο μοντέλο εξαρτάται από το πάχος και τον αριθμό των στρώσεων.

- Γεωμετρική ατέλεια

Στις πλάκες με αρχική γεωμετρική ατέλεια (S1-32, S1-96, S2-32, S2-96), η ατέλεια εκτείνεται σε μια περιοχή 300X300mm γύρω από το κέντρο της πλάκας. Αυτό συμβαίνει για να πλησιάζει η μορφή του μοντέλου αυτήν του πειραματικού δοκιμίου, όπου η ατέλεια εκτεινόταν σε περιοχή λίγο μικρότερη από την ελεύθερη επιφάνεια τη πλάκας, για την ευκολότερη τοποθέτηση του δοκιμίου στο πλαίσιο δοκιμών.

Η μορφή της γεωμετρικής ατέλειας περιγράφεται σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων Ox_1Y_1 (τοπικό σύστημα συντεταγμένων της ατέλειας), από την παρακάτω σχέση :

$$z = w_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_1}{\ell}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot y_1}{\ell}\right) , \quad 0 \leq x_1 \leq \ell , \quad 0 \leq y_1 \leq \ell$$

όπου λ είναι το μήκος της γεωμετρικής ατέλειας, δηλαδή στην περίπτωση μας, $\lambda=300$ και w_0 το μέγεθος της ατέλειας.

Τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν τελικά στα μοντέλα των πολύστρωτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1: Διαστάσεις μοντέλων

	t (mm)	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	w _o (mm)
S1-0	9.48	0.577	0.352	---
S1-32	8.55	0.520	0.317	3.1
S1-96	8.65	0.526	0.321	9.3
S2-0	15.38	0.599	0.366	---
S2-32	15.01	0.585	0.357	3.33
S2-96	14.94	0.582	0.355	9.526

- Ιδιότητες υλικού

Τα μοντέλα θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό με τα πειραματικά δοκίμια, δηλαδή εποξειδική ρητίνη, ενισχυμένη με στρώσεις μονοαξονικών ινών γυαλιού τύπου E. Ως μηχανικές ιδιότητες στρώσης λαμβάνονται αυτές που υπολογίστηκαν στις δοκιμές χαρακτηρισμού υλικού που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2, για το υλικό που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο του ΕΜΠ, μιας και από το ίδιο υλικό είναι κατασκευασμένες και οι πλάκες. Οι τιμές των ιδιοτήτων είναι αυτές που μετρήθηκαν στο πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης, (DTU), θεωρώντας πως αυτές οι μετρήσεις είναι ακριβέστερες λόγω καλύτερου εργαστηριακού εξοπλισμού. Για λόγους σύγκρισης κατασκευάστηκαν και μοντέλα – μόνο λεπτών πλακών – με μηχανικές ιδιότητες ίσες με αυτές που μετρήθηκαν στο εργαστήριο του ΕΜΠ. Οι τιμές για τα μέτρα ελαστικότητας E_x , E_y , είναι αυτές που μετρήθηκαν σε *θλίψη* (compressive moduli). Σημειώνεται επίσης ότι οι ιδιότητες στο επίπεδο yz δεν είχαν μετρηθεί εργαστηριακά, οπότε ελήφθησαν προσεγγιστικά. Παρ'όλ'αυτά, διερευνήθηκαν οι αλλαγές στη συμπεριφορά των μοντέλων, όταν οι ιδιότητες αυτές αποκλίνουν κατά 20% από τις δοθείσες τιμές, απ'όπου προέκυψε ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν επηρεάζονται. Συνεπώς αυτές οι τιμές ιδιοτήτων θεωρούνται έγκυρες.

Οι ιδιότητες και οι αντοχές που χρησιμοποιήθηκαν τελικά στα μοντέλα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα

	DTU measured Properties	NTUA measured Properties
E_x (MPa)	37238	36623
E_y (MPa)	9536	8821
E_z (MPa)	9536	8821
ν_{xy}	0.268	0.305
ν_{yz}	0.300	0.300
ν_{xz}	0.268	0.305
G_{xy} (MPa)	1964	2030
G_{yz} (MPa)	3668	3668
G_{xz} (MPa)	1964	2030

	DTU measured strength	NTUA measured strength
X_t (MPa)	698.0	559.0
Y_t (MPa)	43.0	60.0
Z_t (MPa)	43.0	60.0
X_c (MPa)	191.0	253.0
Y_c (MPa)	69.0	59.0
Z_c (MPa)	69.0	59.0
S_{xy} (MPa)	30.0	31.0
S_{yz} (MPa)	27.9	27.9
S_{xz} (MPa)	27.9	27.9

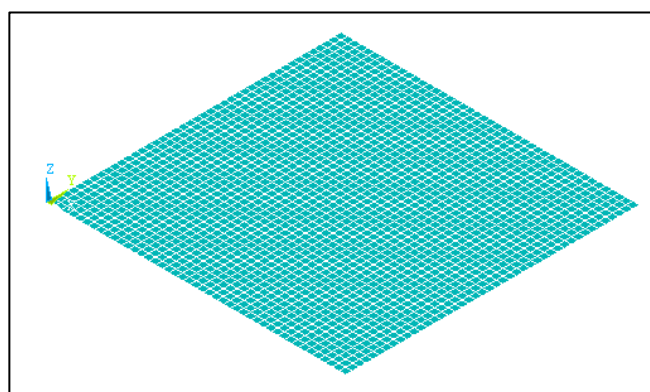
4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

- Στοιχεία

Για την μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων της πολύστρωτης πλάκας χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο SHELL181 της βιβλιοθήκης στοιχείων του προγράμματος ANSYS, το οποίο χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση κελυφών μικρού έως μετρίου πάχους, καθώς και πολύστρωτων κελυφών και κατασκευών «sandwich».

Το στοιχείο SHELL181 είναι τετρακομβικό, με 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετακίνηση κατά τη x,y,z διεύθυνση και περιστροφή γύρω από τους x,y,z άξονες. Ανταποκρίνεται καλά σε εφαρμογές γραμμικές και μη γραμμικές, με μεγάλες παραμορφώσεις ή/και περιστροφές.

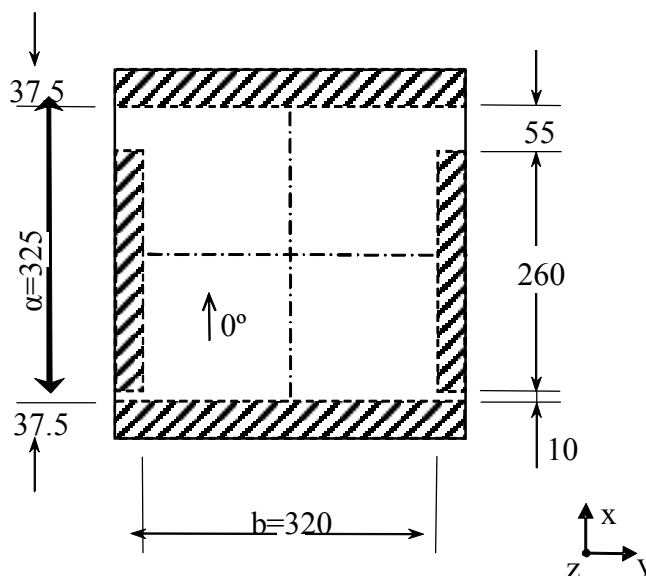
Όσον αφορά τον αριθμό των στοιχείων, βασίστηκε στους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στη διπλωματική του Α.Πάντου, για τη μοντελοποίηση πολύστρωτων πλακών (κεφ. 4.3.3). Στην εν λόγω εργασία, μετά από ανάλυση σύγκλισης, προέκυψε ως ιδανικός αριθμός στοιχείων τα 1024 με μέγεθος στοιχείου 10mm. Το στοιχείο όμως που είχε χρησιμοποιηθεί ήταν το SHELL99 από τη βιβλιοθήκη του ANSYS, το οποίο είναι οκτακομβικό. Εφόσον όμως την παρούσα μελέτη το στοιχείο που χρησιμοποιείται είναι τετρακομβικό, δημιουργείται η ανάγκη πολλαπλασιασμού των στοιχείων με την ανάλογη μείωση του μεγέθους τους, ώστε να επαρκεί ο αριθμός κόμβων. Μετά και από δοκιμές επιλέχθηκε τα στοιχεία να έχουν μέγεθος 7.5 mm, που δίνουν 1800 στοιχεία με περίπου 1980 κόμβους, αριθμός που επαρκεί για την ανάλυση, χωρίς να χρειάζεται υπερβολική υπολογιστική ισχύς.



Σχήμα 4.1: Μοντελοποίηση τέλειας πλάκας

- Συνοριακές Συνθήκες – Φόρτιση

Στην αριθμητική ανάλυση εξετάστηκαν και εξήχθησαν αποτελέσματα για 3 διαφορετικές συνοριακές συνθήκες, προκειμένου να εξακριβωθεί η καλύτερη προσομοίωση των πειραματικών συνθηκών. Κατασκευάστηκαν μοντέλα για πλάκες πλήρως πακτωμένες (Fully Clamped – CC), απλά εδραζόμενες (Simply Supported – SS) και πλάκες που συνδύαζαν συνοριακές συνθήκες πλήρους πάκτωσης στις φορτιζόμενες (οριζόντιες) πλευρές και απλής έδρασης στις αφόρτιστες (κατακόρυφες) πλευρές. (Horizontal Clamped Vertical Simply Supported – HCVSS). Οι συνοριακές συνθήκες εκτείνονται σε όλο το μήκος της άνω και κάτω πλευράς, αυτών δηλαδή που είναι κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης. Στις κατακόρυφες πλευρές (παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης), οι συνοριακές συνθήκες εκτείνονται στα 260mm, αφήνοντας περιθώριο 55mm προς τα πάνω και 10mm προς τα κάτω χωρίς περιορισμό. Έτσι οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου προσομοιάζουν εκείνες που είχαν οι πλάκες κατά τις εργαστηριακές δοκιμές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2.



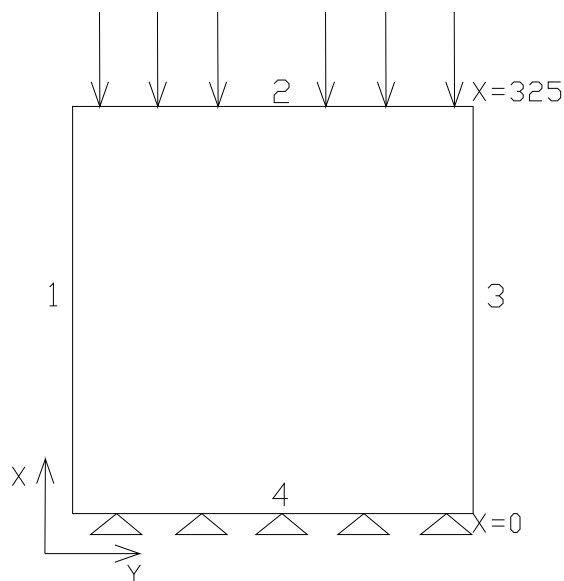
Σχήμα 4.2 : Έκταση συνοριακών συνθηκών προβλήματος

Στις πλήρως πακτωμένες πλάκες οι πλευρές έχουν τους λιγότερους βαθμούς ελευθερίας απ'ότι κάθε άλλο είδος συνοριακών συνθηκών που εφαρμόστηκε. Παρ'όλ' αυτά, επιτρέπονται κάποιες μετατοπίσεις, για καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών του προβλήματος. Συγκεκριμένα επιτρέπεται η συνεπίπεδη μετατόπιση των αφόρτιστων (κατακόρυφων) πλευρών, καθώς και η μετατόπιση κατά x όλων των πλευρών, πλην της πλήρως πακτωμένης ($x=0$).

Στις απλά εδραζόμενες πλάκες οι βαθμοί ελευθερίας κάθε πλευράς αυξάνονται. Στις φορτισμένες (οριζόντιες) πλευρές επιτρέπεται η μετατόπιση σε διεύθυνση κάθετη σ'αυτή του φορτίου (διεύθυνση y), ενώ στις αφόρτιστες (κατακόρυφες) επιτρέπεται και η κίνηση γύρω από τον x άξονα (παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης).

Τέλος εξετάστηκε άλλος ένας συνδυασμός συνοριακών συνθηκών. Οι οριζόντιες – φορτισμένες πλευρές διατηρήθηκαν πακτωμένες, ενώ οι κατακόρυφες – αφόρτιστες απλά εδρασμένες.

Ο παρακάτω πίνακας 4.3 παρουσιάζει αναλυτικά τις συνοριακές συνθήκες κάθε πλευράς, με αναφορά στους περιορισμούς των βαθμών ελευθερίας της κάθε μίας. Με «U» συμβολίζονται οι μετατοπίσεις και με «R» οι περιστροφές. Ο συμβολισμός κάθε πλευράς δίνεται στο Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3: Συμβολισμός πλευρών, και κατεύθυνση φόρτισης

Πίνακας 4.3: Περιορισμοί βαθμών ελευθερίας για κάθε είδος συνοριακών συνθηκών

Side	Fully Clamped (CC)	Simply Supported (SS)	Horizontal Clamped Vertical Simply Supported (HCVSS)
1	$U_z = 0, R_x=0, R_y=0$	$U_z = 0, R_y=0$	$U_z = 0, R_y=0$
2	$U_z=0, R_x=0, R_y=0, R_z=0$	$U_z=0, R_x=0, R_z=0$	$U_z=0, R_x=0, R_y=0, R_z=0$
3	$U_z = 0, R_x=0, R_y=0$	$U_z = 0, R_y=0$	$U_z = 0, R_y=0$
4	$U_x=0, U_z=0, R_x=0, R_y=0, R_z=0$	$U_x=0, U_z=0, R_x=0, R_z=0$	$U_x=0, U_z=0, R_x=0, R_y=0, R_z=0$

Το φορτίο επιβάλλεται ως θλιπτική μετατόπιση στην πλευρά (2) της πλάκας, όπου $x=325$ mm. Το μέγεθος της μετατόπισης σε κάθε πλάκα είναι τέτοιο ώστε μετά το τέλος της μη γραμμικής ανάλυσης, η τιμή της x-συνιστώσας της δύναμης αντίδρασης (FSUM) στην πλευρά 4 ($x=0$) να πλησιάζει αυτήν του φορτίου αστοχίας των πειραματικών δεδομένων. Ο προσδιορισμός των τιμών αυτών έγινε με δοκιμές σε μοντέλο πλήρως πακτωμένης πλάκας (CC). Τελικά οι τιμές μετατόπισης που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση είναι:

Πίνακας 4.4: Επιβαλλόμενη θλιπτική μετατόπιση σε κάθε μοντέλο πλάκας

Thin plates		Mid-Thick plates	
Plate	Initial translation U_x (mm)	Plate	Initial translation U_x (mm)
S1-0	-1.6	S2-0	-4.5
S1-32	-1.8	S2-32	-2
S1-96		S2-96	

Η μετατόπιση εφαρμόζεται κατά τη μη γραμμική ανάλυση σε 200 βήματα, με δυνατότητα αυτόματης υποδιαίρεσης αυτών από το υπολογιστικό πρόγραμμα για να εξασφαλισθεί σύγκλιση της λύσης.

Σημειώνεται επίσης ότι στα μοντέλα πλακών χωρίς γεωμετρική ατέλεια εκτελείται και ανάλυση ιδιοτιμών λυγισμού (eigenvalue analysis). Κατόπιν, το μοντέλο της πλάκας αναβαθμίζεται στην 1^η ιδιομορφή λυγισμού, με ένα ελάχιστο αρχικό βέλος κάμψης ($w_0 = 0.1$), και με την επιβολή της θλιπτικής μετατόπισης επιτυγχάνεται ο λυγισμός και η αστοχία της πλάκας.

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η έρευνα των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης επικεντρώθηκε στη μελέτη μετατοπίσεων: της εκτός επιπέδου μετατόπισης του κέντρου της πλάκας (U_z), και της κατακόρυφης μετατόπισης της φορτισμένης πλευράς της πλάκας (U_x). Παρήχθησαν διαγράμματα που παρουσιάζουν την εξέλιξη της σχέσης επιβαλλόμενης τάσης – μετατόπισης.

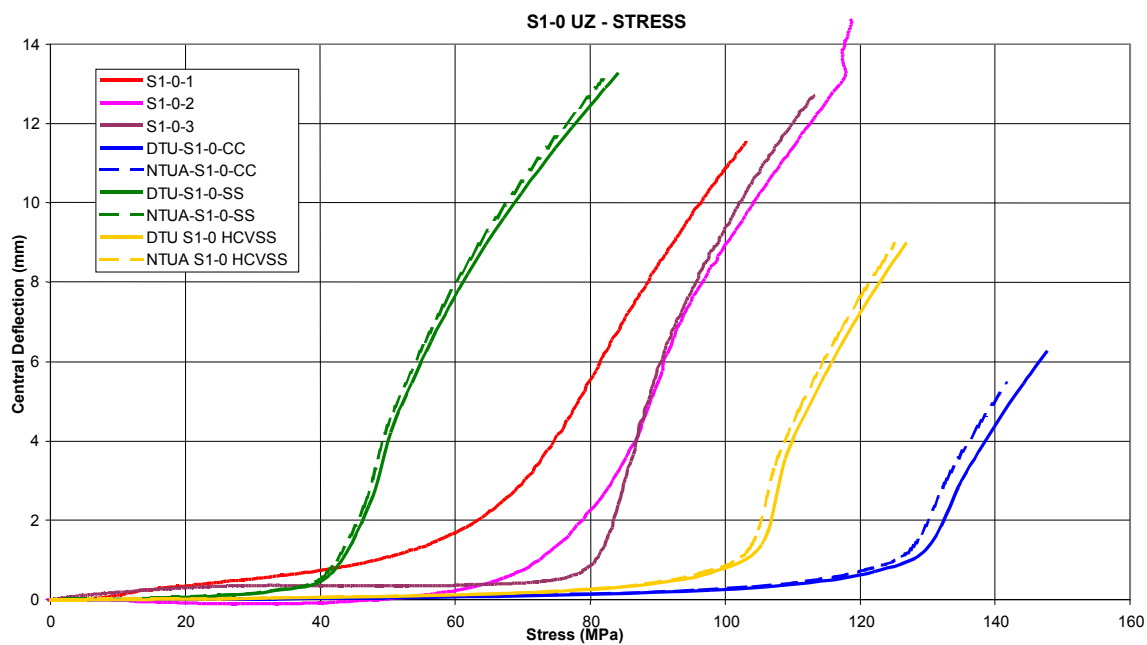
Η επιβαλλόμενη τάση υπολογίστηκε ως ο λόγος της συνιστώσας αντίδρασης στην πλευρά $x=0$, δια την επιφάνεια διατομής της πλάκας $A = a*t$:

$$P = F_x / (a*t) \text{ (MPa)}$$

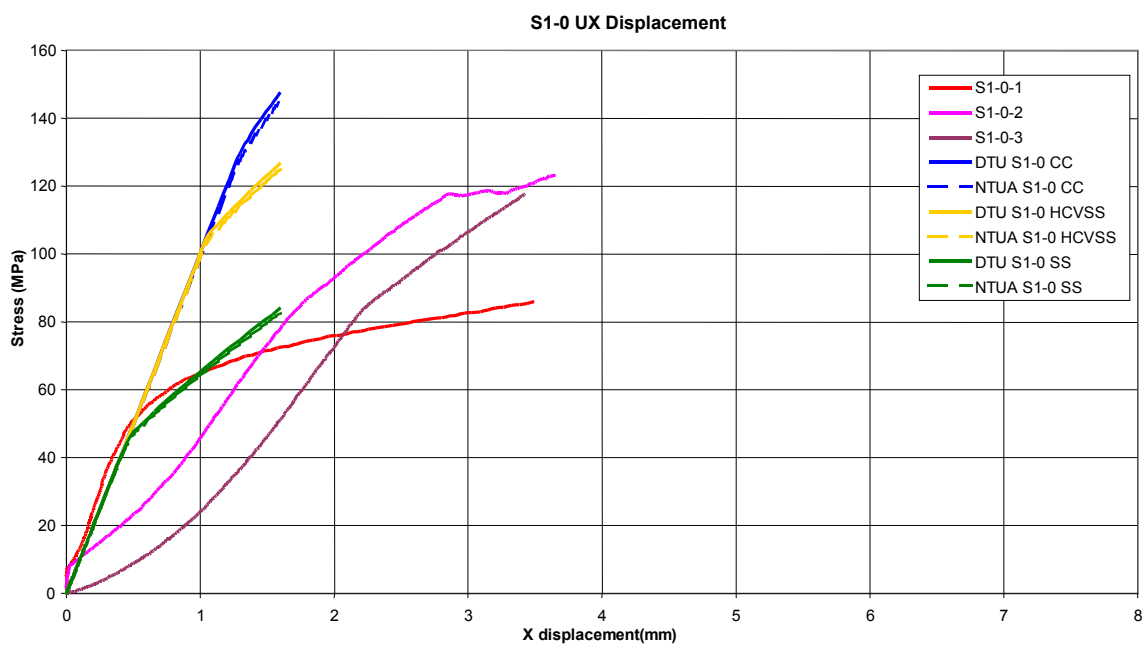
Η κεντρική μετατόπιση U_z (Σχήματα 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15) αντιστοιχεί στον κόμβο με συντεταγμένες ($X=162,5$, $Y = 170$), καθώς αυτή είναι η θέση του κεντρικού LVDT στα εργαστηριακά πειράματα. Η κατακόρυφη μετατόπιση U_x προέρχεται από τυχαίο κόμβο περί το μέσον της πλευράς, για τον ίδιο λόγο, ώστε να αντιστοιχεί δηλαδή όσον το δυνατό καλύτερα στη θέση του εμβόλου και του αντίστοιχου LVDT, κατά τις εργαστηριακές δοκιμές (Σχήματα 4.6, 4.8, 4.10, 4.12, 4.14, 4.16).

Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις για κάθε είδος πλάκας (λεπτές, μεσαίου πάχους, μηδενικής, μικρής, μεγάλης γεωμετρικής ατέλειας), για τα 3 είδη συνοριακών συνθηκών (πλήρως πακτωμένες – CC, απλά εδραζόμενες – SS, φορτιζόμενες πλευρές πακτωμένες και αφόρτιστες απλά εδρασμένες – HCVSS) , ενώ οι λεπτές πλάκες εξετάστηκαν με 2 σετ μηχανικών ιδιοτήτων (DTU και NTUA), και κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης – μετατόπισης. Στα ίδια γραφήματα παραθέτονται για σύγκριση τα διαγράμματα τάσης – μετατόπισης, όπως προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Για λόγους σύγκρισης, όλες οι μετατοπίσεις από τα πειραματικά δεδομένα ελήφθησαν με θετικό πρόσημο.

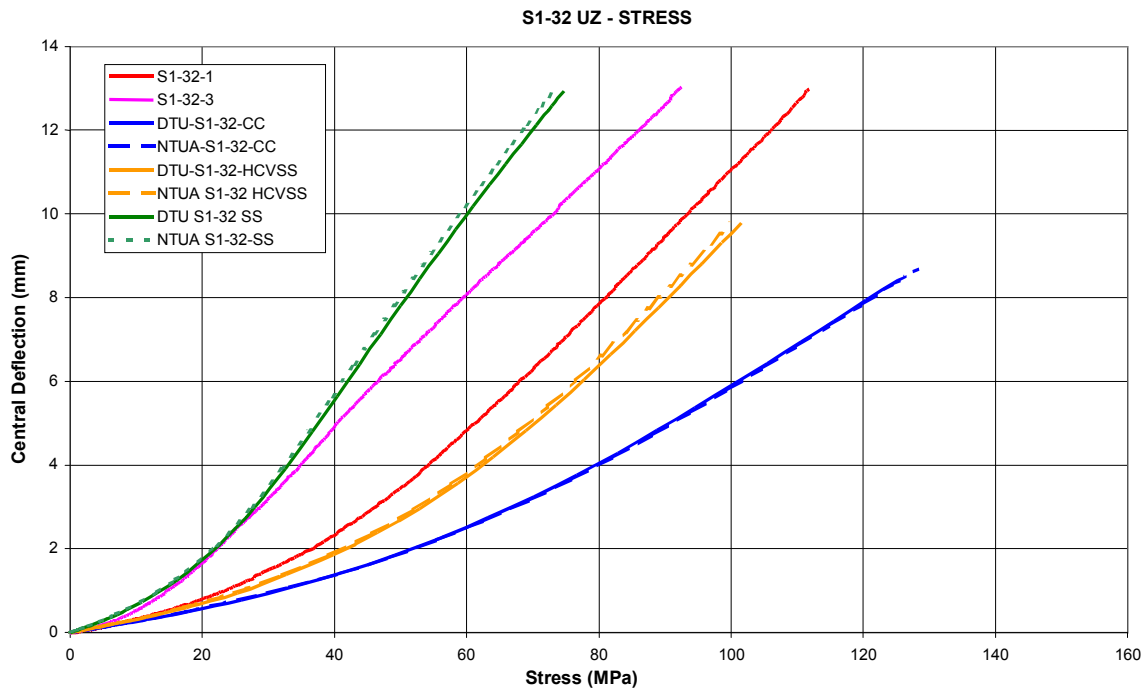
- Αποτελέσματα λεπτών πλακών



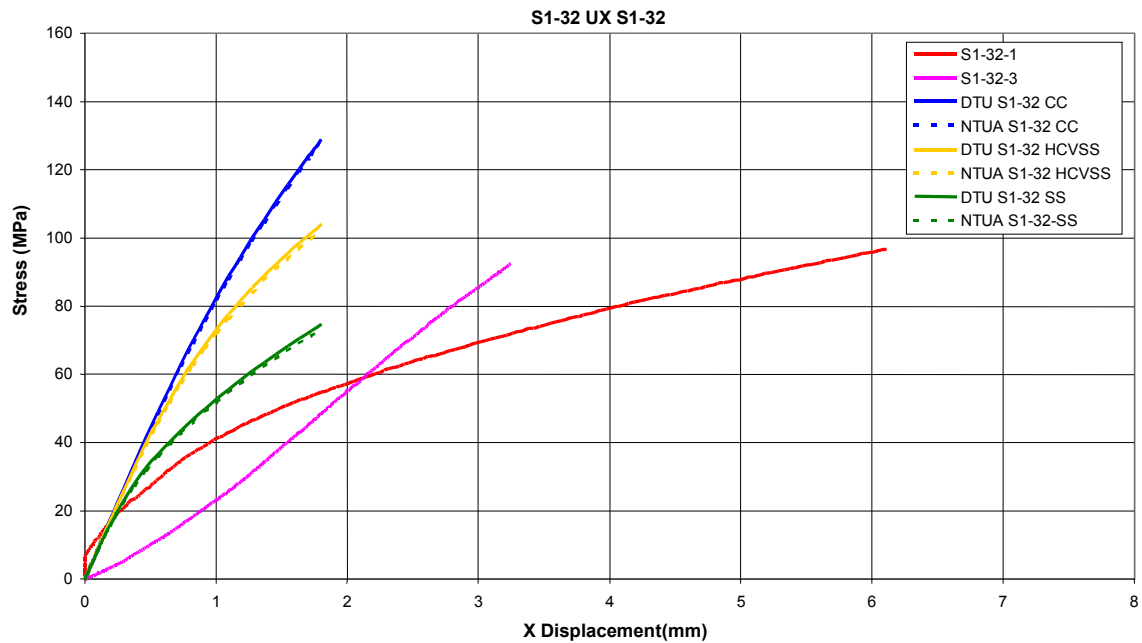
Σχήμα 4.5 : Κεντρική μετατόπιση Uz τέλειες πλάκες



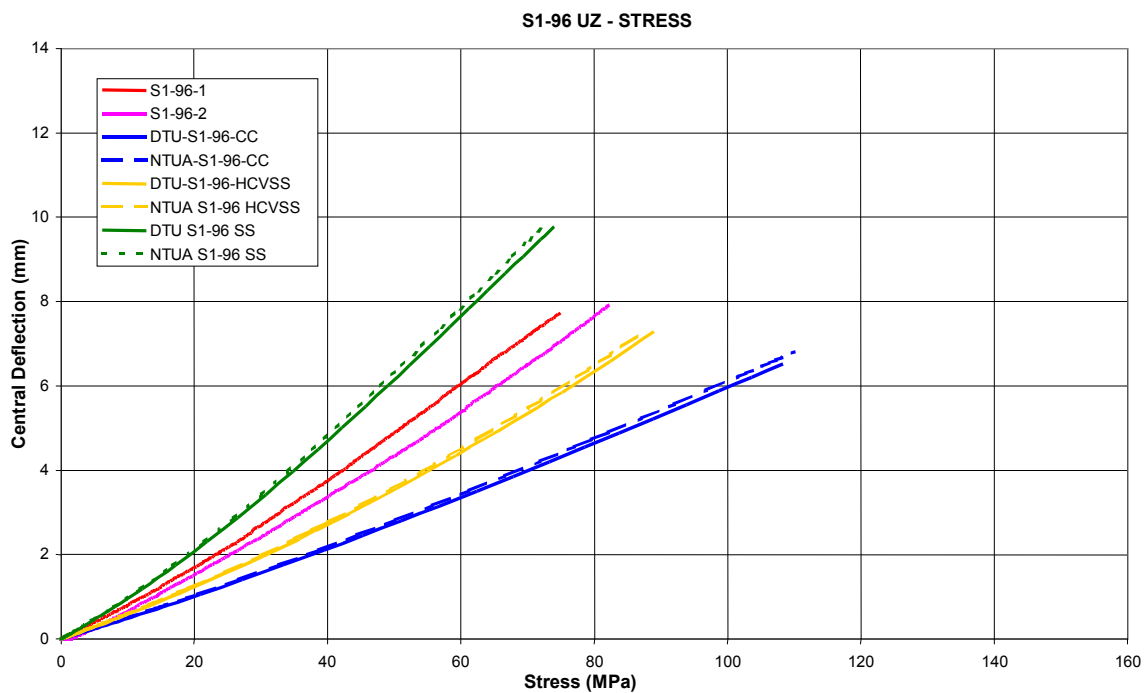
Σχήμα 4.6: Μετατόπιση Ux, τέλειες πλάκες



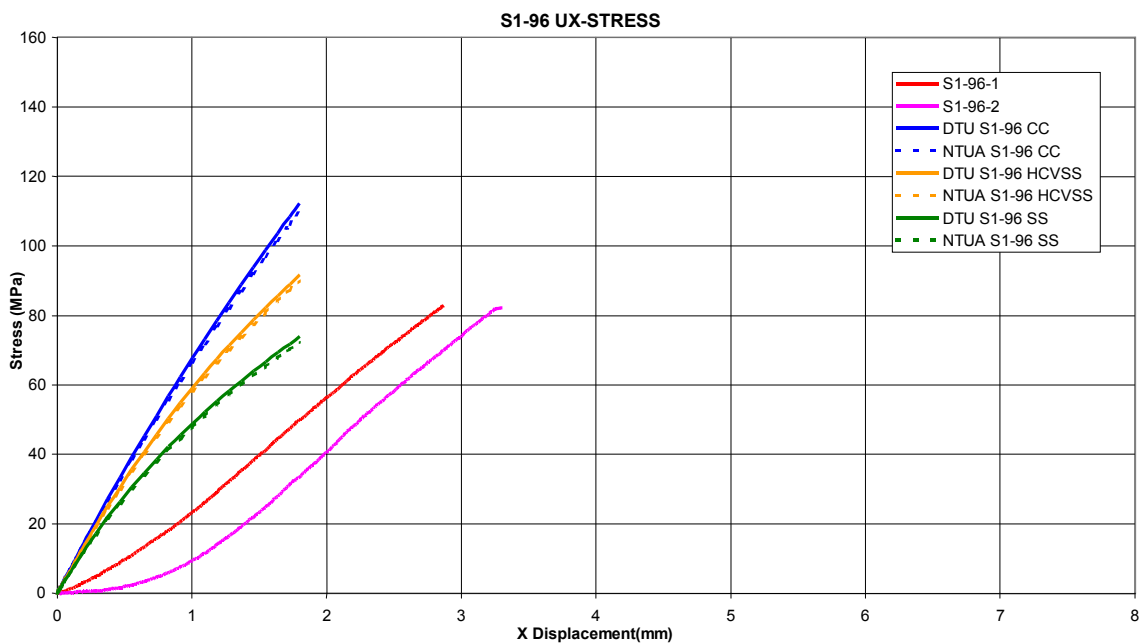
Σχήμα 4.7 : Μετατόπιση Uz, πλάκες με μικρή γεωμετρική ατέλεια



Σχήμα 4.8 : Μετατόπιση Ux, πλάκες με μικρή γεωμετρική ατέλεια



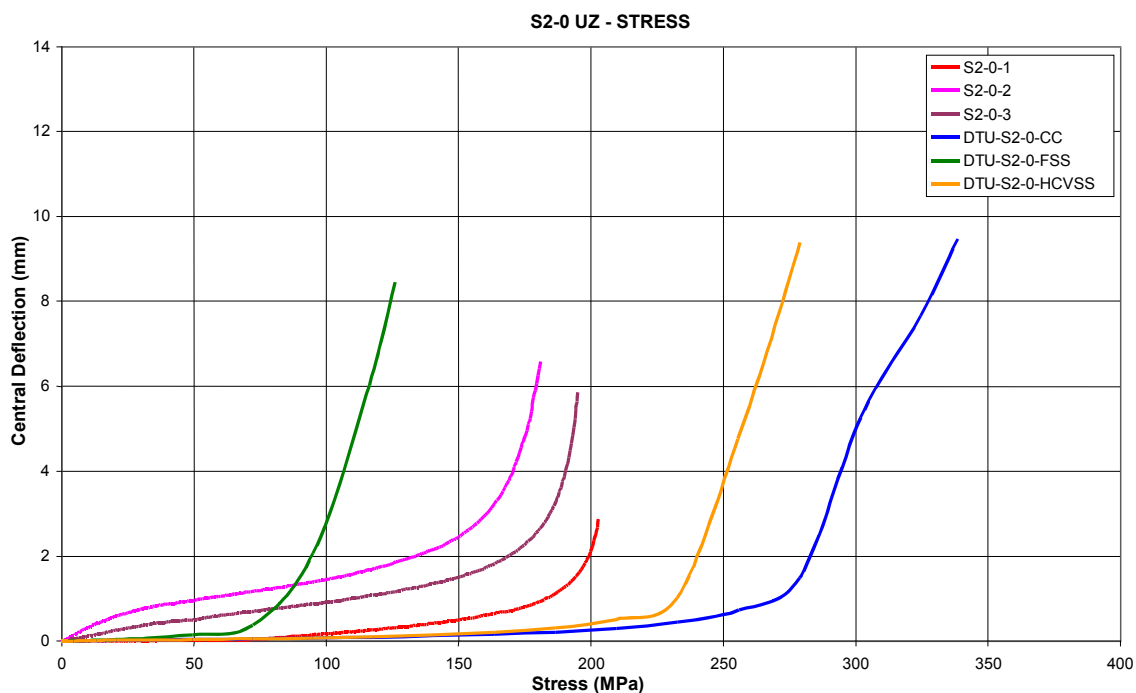
Σχήμα 4.9 : Μετατόπιση Uz, πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια



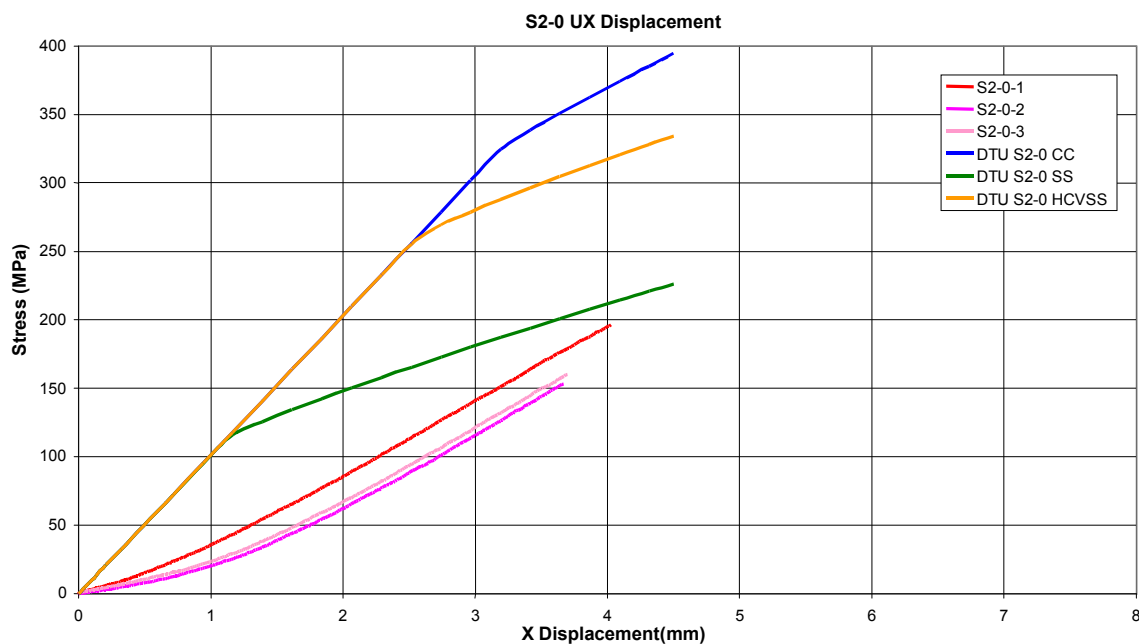
Σχήμα 4.10 : Μετατόπιση Ux, πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται αποτελέσματα μοντελοποίησης της πλάκας, με μηχανικές ιδιότητες κατά DTU και NTUA. Φαίνεται από τα διαγράμματα ότι οι διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες δεν επηρέασαν ιδιαίτερα τη μοντελοποίηση. Κατά συνέπεια, στην επεξεργασία των υπολοίπων πλακών δεν λαμβάνονται υπ' όψη οι διαφορές στις φυσικές ιδιότητες. Τα μοντέλα των πλακών μεσαίου πάχους επεξεργάστηκαν με βάση τις ιδιότητες κατά DTU, χωρίς αυτό να εμποδίζει την εξαγωγή συμπερασμάτων σε σχέση με την συμπεριφορά των πειραματικών δοκιμίων.

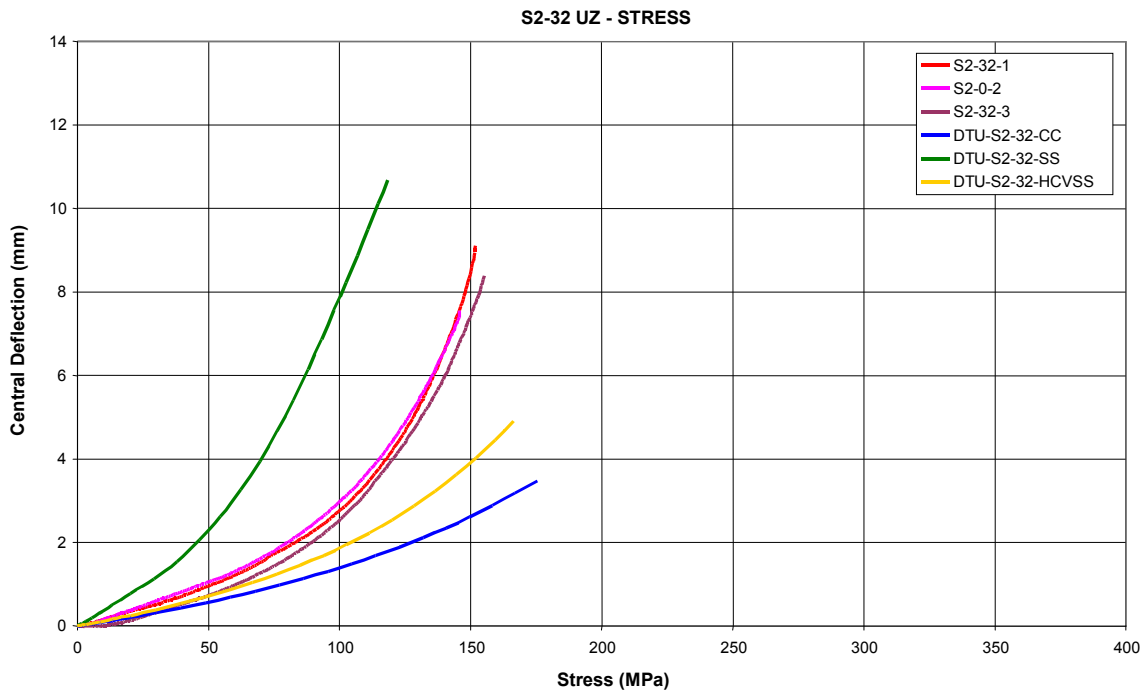
- Αποτελέσματα πλακών μεσαίου πάχους:



Σχήμα 4.11: Μετατόπιση Uz, πλάκες χωρίς γεωμετρική



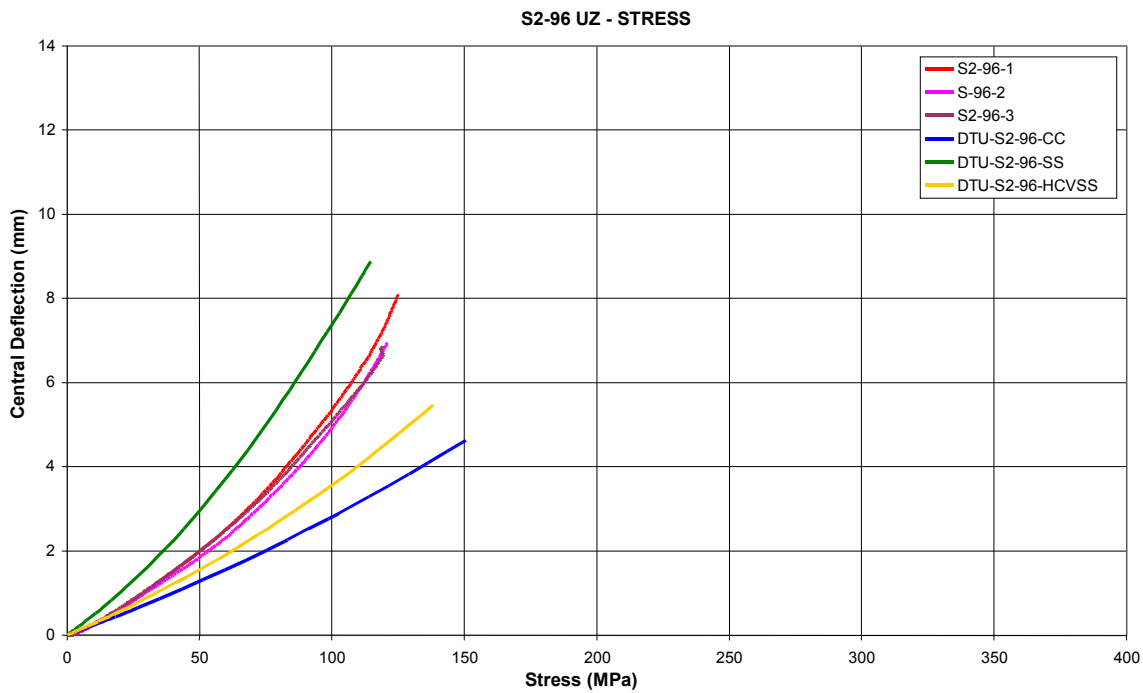
Σχήμα 4.12 : Μετατόπιση Ux, πλάκες χωρίς γεωμετρική ατέλεια



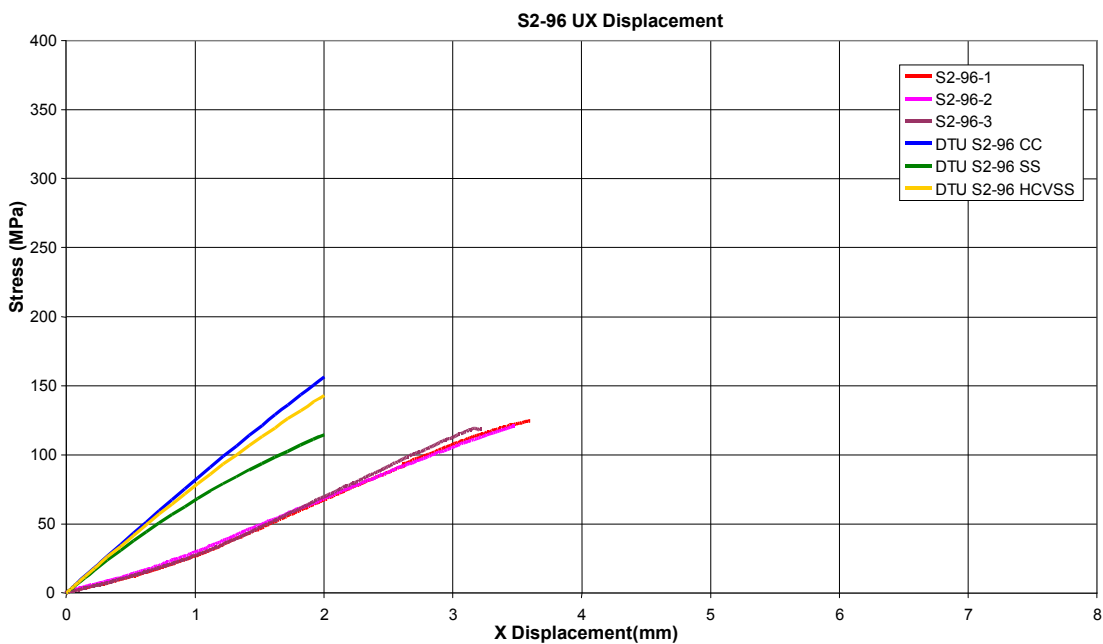
Σχήμα 4.13 : Μετατόπιση Uz, πλάκες με μικρή γεωμετρική ατέλεια



Σχήμα 4.14 : Μετατόπιση Ux, πλάκες με μικρή γεωμετρική ατέλεια



Σχήμα 4.15 : Μετατόπιση U_z , πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια



Σχήμα 4.16: Μετατόπιση U_x , πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια

Η μελέτη των αποτελεσμάτων επικεντρώθηκε στη σύγκριση της συμπεριφοράς των μοντέλων, βάσει της ομοιότητάς τους με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η κύρια διαφορά μεταξύ των μοντέλων ήταν οι εφαρμοζόμενες συνοριακές συνθήκες, οι οποίες έδωσαν και αντίστοιχα διαφοροποιημένα αποτελέσματα. Η επίδραση των διαφορετικών συνοριακών συνθηκών στα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης είναι ιδιαίτερα εμφανής σε όλα τα διαγράμματα, καθώς οι καμπύλες για κάθε συνοριακή συνθήκη απέχουν σημαντικά μεταξύ τους. Μικρότερες τιμές δίνουν οι συνοριακές συνθήκες απλής έδρασης (SS), μεγαλύτερες οι συνοριακές συνθήκες πλήρους πάκτωσης (CC). Ο συνδυασμός συνοριακών συνθηκών απλής έδρασης και πλήρους πάκτωσης (HCVSS) δίνει αποτελέσματα ενδιάμεσων τιμών.

Στα διαγράμματα τάσης – κεντρικής μετατόπισης (Σχήματα 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15) το σχήμα της καμπύλης των αριθμητικών αποτελεσμάτων πλησιάζει αυτό των πειραματικών. Στα αποτελέσματα και των 2 αναλύσεων για τις πλάκες χωρίς ατέλεια παρατηρείται έντονη αλλαγή καμπυλότητας, η οποία στα διαγράμματα των πειραματικών αποτελεσμάτων σηματοδοτεί την έναρξη του λυγισμού. Αντίστοιχα, η καμπυλότητα είναι μικρότερη στα διαγράμματα για πλάκες με μικρή γεωμετρική ατέλεια, και σχεδόν μηδενική (γραμμική συμπεριφορά) στα διαγράμματα για πλάκες με μεγάλη γεωμετρική ατέλεια. Επίσης, στα διαγράμματα των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τέλειες πλάκες (Σχήμα 4.5, 4.11), παρατηρείται «τμηματοποίηση» (stepping) στην περιοχή αυξημένης καμπυλότητας. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο μικρό αριθμό βημάτων κατά τη μη γραμμική ανάλυση. Μεγαλύτερος αριθμός βημάτων θα έδινε και πιο ομαλή καμπύλη.

Η εντονότερη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των μοντέλων και των πειραμάτων παρατηρείται στην κλίση των καμπυλών τάσης – κεντρικής μετατόπισης, η οποία δείχνει το ρυθμό εξέλιξης του φαινομένου. Η διαφορά γίνεται ιδιαίτερα έντονη στα αποτελέσματα πλακών με γεωμετρική ατέλεια. Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται ανάμεσα στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης πλακών με συνοριακές συνθήκες απλής έδρασης (SS) και συνδυασμού απλής έδρασης – πάκτωσης (HCVSS).

Όσον αφορά τα διαγράμματα κατακόρυφης μετατόπισης (U_x , Σχήμα 4.6,4.8,4.10,4.12,4.14,4.16), το εντονότερο χαρακτηριστικό τους είναι η κλίση τους. Ιδιαίτερα στα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις τέλειες πλάκες (Σχήμα 4.6,4.12) φαίνεται ότι η κλίση παρουσιάζει αλλαγή σε συγκεκριμένο σημείο, διαφορετικό για κάθε είδος συνιοριακών συνθηκών. Συγκεκριμένα, ενώ αρχικά η κλίση είναι ίδια για τις όλες τις καμπύλες, σε σημείο που να μην ξεχωρίζουν η μία από την άλλη στο διάγραμμα, από ένα συγκεκριμένο φορτίο και μετά μειώνεται, δημιουργώντας χαρακτηριστική «γωνία» στο διάγραμμα. Το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η αλλαγή είναι διαφορετικό για κάθε είδος συνιοριακών συνθηκών: μικρότερο για τις συνθήκες απλής έδρασης, και μεγαλύτερο για τις συνθήκες πλήρους πάκτωσης. Συγκρίνοντας και με τα φορτία όπου παρατηρείται έντονη αλλαγή κλίσης στα διαγράμματα κεντρικής μετατόπισης κατά z (πίνακας 4.5), παρατηρούμε ότι η αλλαγή καμπυλότητας στα διαγράμματα μετατόπισης κατά x γίνεται σε λίγο μεγαλύτερο φορτίο απ' ό,τι η αντίστοιχη αλλαγή στα διαγράμματα μετατόπισης κατά z . Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η ακαμψία της πλάκας μειώνεται αφού η έκκεντρη μετατόπιση του κέντρου της πάρει ικανή τιμή.

Πίνακας 4.5: Φορτία όπου παρατηρείται αλλαγή κλίσης

Thin plates (perfect)		Mid-Thick plates (perfect)		
Boundary Condition	Load at gradient change point {MPa} U_z	Load at gradient change point {MPa} U_x	Load at gradient change point {MPa} U_z	Load at gradient change point {MPa} U_x
SS	41.4	47.3	72.3	118.0
HCVSS	105.4	114.0	232.7	255.5
CC	129.8	135.2	278.9	324.6

Μια άλλη παρατήρηση στα διαγράμματα κατακόρυφης μετατόπισης (U_x) είναι ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης απέχουν από αυτές των εργαστηριακών πειραμάτων, ιδίως στα αποτελέσματα από τις πλάκες μεσαίου πάχους. Αντίθετα, στα διαγράμματα κεντρικής μετατόπισης (U_z) οι καμπύλες πειραματικών αποτελεσμάτων βρίσκονται ανάμεσα σε αυτές των αποτελεσμάτων μοντελοποίησης. Εξαίρεση αποτελεί η καμπύλη που αντιστοιχεί στην μετατόπιση της πλάκας S1-0-1, η οποία συμπίπτει σχεδόν με την καμπύλη MS1-0-SS, μέχρι περίπου το σημείο αλλαγής κλίσης (Σχήμα 4.5).

Μια άλλη διαφορά που παρατηρείται στα διαγράμματα κατακόρυφης μετατόπισης U_x μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι το πρόσημο της καμπυλότητας. Συγκεκριμένα, όλα τα διαγράμματα από τα αριθμητικά αποτελέσματα έχουν αρνητική καμπυλότητα. Αντίθετα, τα περισσότερα διαγράμματα από τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν αρχικά θετική καμπυλότητα, η οποία στη συνέχεια γίνεται αρνητική. Εξαίρεση αποτελούν οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις πλάκες S1-0-1 και S1-32-1, οι οποίες ακολουθούν τις καμπύλες αριθμητικών αποτελεσμάτων και έχουν αμιγώς αρνητική καμπυλότητα (Σχήμα 4.6, 4.8).

Τέλος, στα διαγράμματα κεντρικής και κατακόρυφης μετατόπισης, είναι εμφανής η διαφοροποίηση μεταξύ των μέγιστων τάσεων που αναπτύσσονται στα μοντέλα, ανάλογα με τις συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται. Παρόλο που η τελική φόρτιση (ως μετατόπιση) είναι η ίδια σε όλα τα μοντέλα (πίνακας 4.4), οι τάσεις είναι σαφώς μικρότερες στα μοντέλα με απλή έδραση, μεγαλύτερες στα μοντέλα με πλήρη πάκτωση, ενώ στα μοντέλα με συνδυασμό συνοριακών συνθηκών οι τιμές των μέγιστων τάσεων είναι περίπου στα 2/3 αυτών με πλήρη πάκτωση. Οι τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται στα πειραματικά δοκίμια βρίσκονται ανάμεσα σε αυτές των μοντέλων με απλή έδραση και συνδυασμό συνοριακών συνθηκών. Οι τιμές της μέγιστης τάσης που αναπτύσσεται σε κάθε μοντέλο δίνονται στον παρακάτω πίνακα 4.6:

Πίνακας 4.6: Μέγιστες τάσεις μοντέλων (MPa)

Perfect Thin		Perfect Mid - Thick	
MS1-0-SS	84.2	MS2-0-SS	226.5
MS1-0-HCVSS	127	MS2-0-HCVSS	334.6
MS1-0-CC	147.8	MS2-0-CC	394.6
Small Impefection Thin		Small Impefection Mid - Thick	
MS1-32-SS	74.7	MS2-32-SS	125
MS1-32-HCVSS	104	MS2-32-HCVSS	172
MS1-32-CC	129	MS2-32-CC	182.3
Large Impefection Thin		Large Impefection Mid - Thick	
MS1-96-SS	73.9	MS2-96-SS	114.8
MS1-96-HCVSS	91.6	MS2-96-HCVSS	143
MS1-96-CC	112.2	MS2-96-CC	156.3

4.3 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Κρίνοντας από τα αποτελέσματα, υπάρχει περιθώριο βελτίωσης των μοντέλων, ώστε η προσομοίωση των πειραμάτων να γίνει καλύτερη.

Επίσης, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι ένα μικρό μόνο μέρος όσων προσφέρει το υπολογιστικό πρόγραμμα, για τα οποία είναι δυνατή περαιτέρω διερεύνηση. Μερικά σημεία τα οποία χρειάζονται ανάπτυξη είναι:

- Μοντελοποίηση μεταβολής του πάχους των πολύστρωτων:

Εξετάζοντας τα πειραματικά δεδομένα, προκύπτει ότι το πάχος των πολύστρωτων δεν είναι απόλυτα ομοιόμορφο, όπως παρουσιάζεται στα μοντέλα. Αυτό συμβαίνει λόγω του τρόπου κατασκευής των πολύστρωτων πλακών. Κύριο χαρακτηριστικό είναι το αυξημένο πάχος στο κέντρο των πλακών με γεωμετρική ατέλεια, λόγω συσσώρευσης ρητίνης (βλ. κεφ. 3.1.2). Γενικότερα, όμως, το πάχος των πολύστρωτων παρουσιάζει μεταβολές, όπως προέκυψαν από παχυμετρήσεις που έγιναν στις πλάκες. (Α. Πάντος, κεφ. 5.2.3, Σχήμα 5.11, Χ.Δούκα, κεφ. 3.1.2). Το πάχος σε κάθε σημείο μέτρησης φαίνεται στους πίνακες 4.7. Θεωρείται σκόπιμη, λοιπόν, η κατασκευή μοντέλου που λαμβάνει υπ' όψιν τις μεταβολές του πάχους, ώστε να διαπιστωθεί η επίδρασή της στα αποτελέσματα.

Πίνακας 4.7α: Τιμές στα σημεία παχυμετρήσεων λεπτών πλακών

Thin panels thickness measurement							
	S1-0-1	S1-0-2	S1-0-3	S1-32-1	S1-32-3	S1-96-1	S1-96-2
1	8.89	9.34	9.85	8.99	9.24	9.43	8.72
2	8.85	9.3	9.6	8.45	8.55	8.8	8.8
3	8.85	9.4	9.65	8.55	8.7	8.7	8.85
4	8.75	9.25	9.4	8.55	8.5	8.55	8.8
5	8.65	9.5	9.45	8.55	8.45	8.5	8.72
6	8.72	9.55	9	8.4	8.4	8.85	8.85
7	8.8	9.75	9.35	8.5	8.8	8.5	8.95
8	8.85	10.1	9.3	8.2	8.55	8.55	8.75
9	8.55	9.35	9.5	8.4	8.55	8.55	8.85
10	8.8	9.05	9.8	8.6	8.65	8.6	8.8
11	8.8	9.75	9.15	8.5	8.45	8.35	8.55
12	8.55	9.9	9.6	8.5	8.7	8.7	8.8
13	8.6	9.3	9.6	8.45	8.4	8.3	8.35

Πίνακας 4.7β: Τιμές στα σημεία παχυμετρήσεων πλακών μεσαίου πάχους

Mid – thick panels thickness measurement									
	S2-0-1	S2-0-2	S2-0-3	S2-32-1	S2-32-2	S2-32-3	S2-96-1	S2-96-2	S2-96-3
1	15.6	15.1		16.41	15.43	14.77	16.35	18.42	15.88
2	16.1	15.4	15.5	14.7	14.5	14	14.15	15.3	14.35
3	16.1	15.4	14.8	15.2	15.1	14.35	14.9	15.6	14.4
4	16.3	15.2	14.9	14.8	14.4	14.1	14.55	15.6	14.2
5	15.9	15.1	14.9	14.9	14.5	14.15	14.55	15.85	14.35
6	15.5	14.8	15.5	14.3	14.2	14	14.6	15.45	14
7	15.4	15.1	15.2	15.1	14.8	14.5	14.75	16.25	14.35
8	15.6	15.4	15.1	14.5	14.4	14.2	14.9	15.35	14.3
9	15.7	15.6	05.4	15.1	14.5	14.2	14.7	15.75	14.3
10	16.3	15.5	16.4	15.2	15.1	14.75	15.2	15.45	14.5
11	15.4	14.9	15.5	14.9	14.1	14.05	14.65	14.65	13.8
12	14.8	14.7	15.4	15.3	15.3	14.75	14.75	15.2	14.5
13	14.4	15	15.6	14.7	14.2	13.9	14.2	14.55	13.7

- Αστοχία – Παραμορφώσεις

Από τα πειραματικά αποτελέσματα (κεφ. 3.3, πίνακας 3.6) είναι εύκολο να εντοπιστεί η στιγμή και το φορτίο της αστοχίας, μελετώντας απλά τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης και τάσης – χρόνου. Αντίθετα, στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ο τρόπος εφαρμογής του φορτίου είναι τέτοιος (επιβαλλόμενη μετατόπιση), ώστε η αστοχία να μην φαίνεται στο διάγραμμα. Απαιτείται λοιπόν διερεύνηση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης για την εξακρίβωση της στιγμής και του φορτίου αστοχίας.

Το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS δίνει τη δυνατότητα ελέγχου αστοχίας, με διάφορα κριτήρια (μέγιστης τάσης/παραμόρφωσης, Tsai-Wu). Στην παρούσα μοντελοποίηση ορίζονται συντελεστές για έλεγχο με το κριτήριο Tsai-Wu, οπότε αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί, χωρίς αυτό να αποκλείει τον έλεγχο με κάποιο άλλο κριτήριο, αν αυτό είναι ευχερέστερο. Ενδεικτικά παρουσιάζονται γραφήματα που δείχνουν την πρόοδο της αστοχίας σύμφωνα με το κριτήριο Tsai – Wu, για την πλάκα S1-32-CC (Σχήμα 4.17).

Η εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας γίνεται σε κάθε στρώση του πολύστρωτου. Επομένως, χρειάζεται περαιτέρω μελέτη, προκειμένου να διαπιστωθεί πού, τότε και για ποιο φορτίο επέρχεται αστοχία. Γι'αυτό υπάρχουν 2 δρόμοι έρευνας, τα αποτελέσματα των οποίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα:

Επισκόπηση όλων των στρώσεων (layers) σε όλα τα βήματα της μη γραμμικής ανάλυσης, ώστε να βρεθεί η στρώση, η περιοχή και το βήμα (χρόνος), στο οποίο επέρχεται αστοχία, δηλαδή ικανοποιείται το κριτήριο Tsai-Wu. Τα δεδομένα γι'αυτή τη στιγμή (φορτίο ως δύναμη αντίδρασης, μετατοπίσεις, παραμορφώσεις) να θεωρηθούν ως τιμές αστοχίας.

Ή

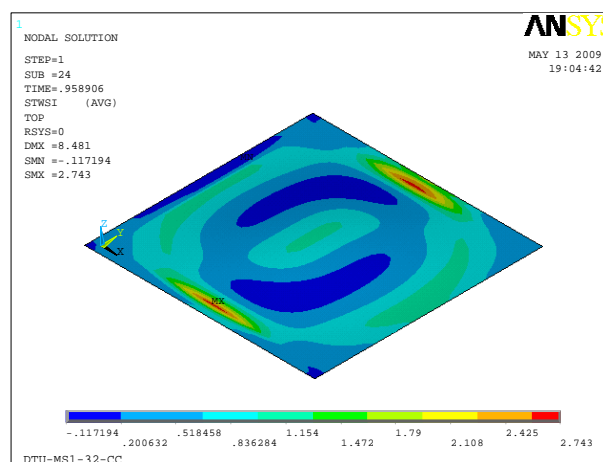
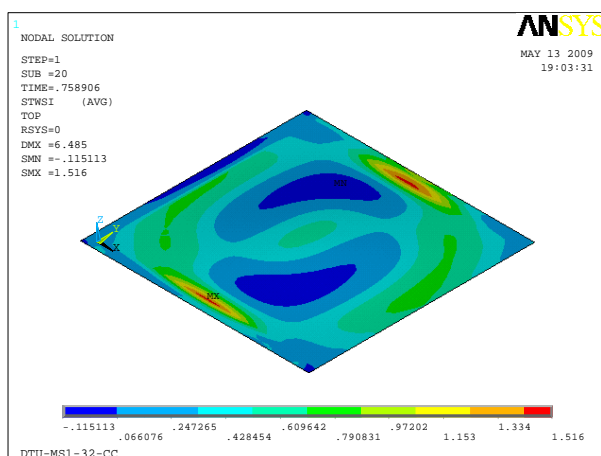
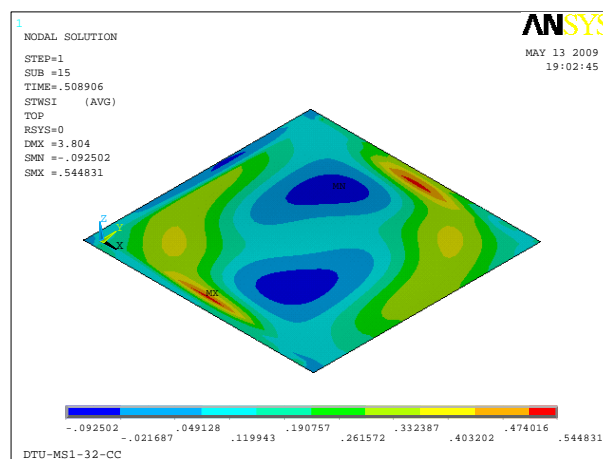
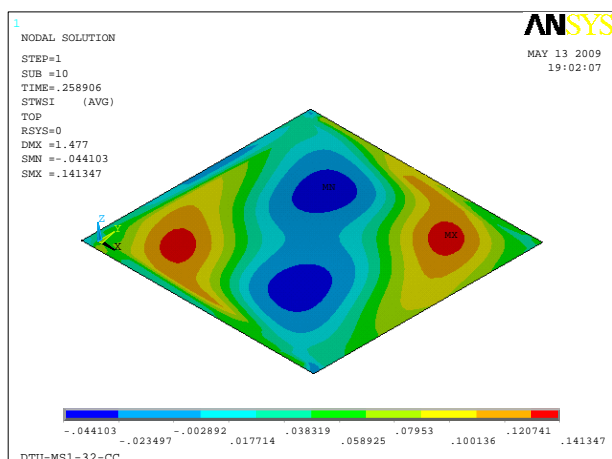
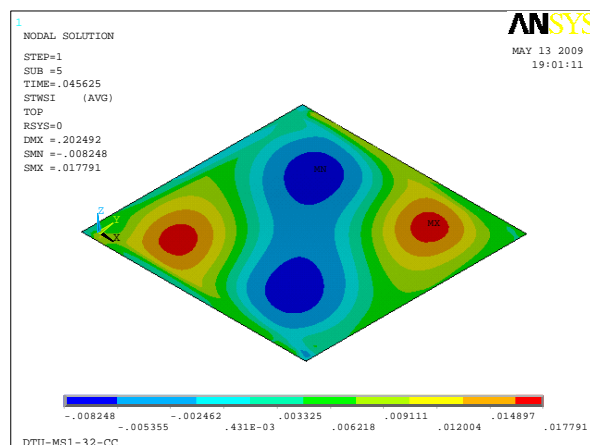
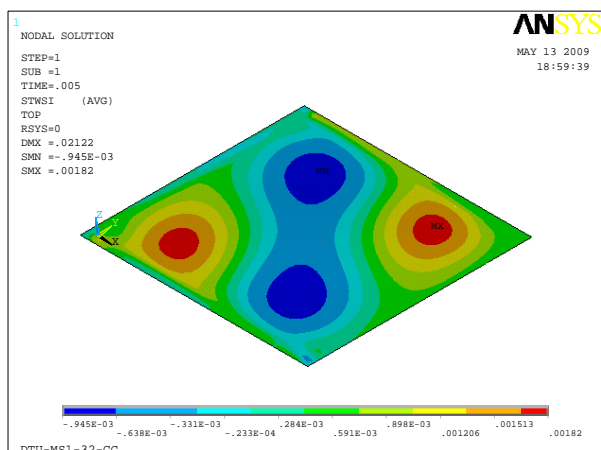
Επισκόπηση των μονοαξονικών στρώσεων, ώστε να εντοπιστεί η περιοχή που υποφέρει περισσότερο (μέγιστες παραμορφώσεις), απ'όπου θα θεωρηθεί στιγμή και φορτίο αστοχίας, στο βήμα όπου ικανοποιείται το κριτήριο Tsai-Wu για όλες τις στρώσεις.

Παρόμοιο πρόβλημα προκύπτει και στη μελέτη των παραμορφώσεων (strains). Το πρόγραμμα δίνει τις παραμορφώσεις σε κάθε στρώση του μοντέλου. Επομένως, για έλεγχο και σύγκριση των παραμορφώσεων, με αυτές που μετρήθηκαν στα εργαστηριακά πειράματα, θα πρέπει πρώτα να οριστεί η στρώση για την οποία γίνεται η μελέτη. Προτείνονται ως καλύτερες προσεγγίσεις:

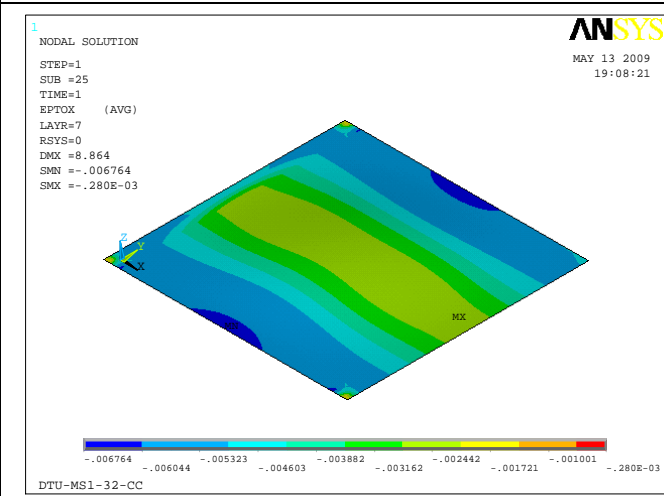
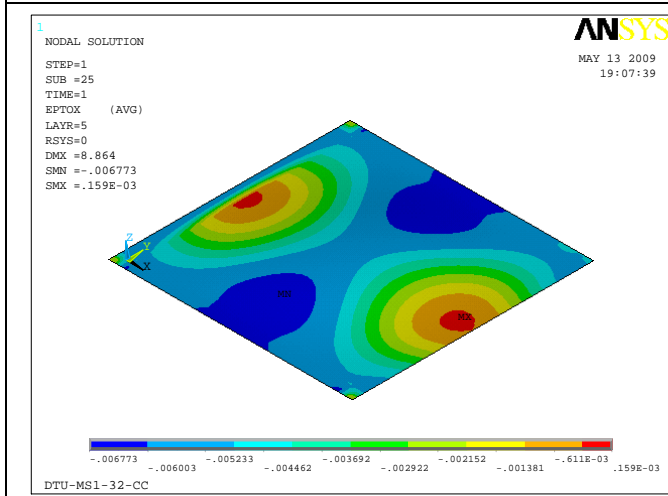
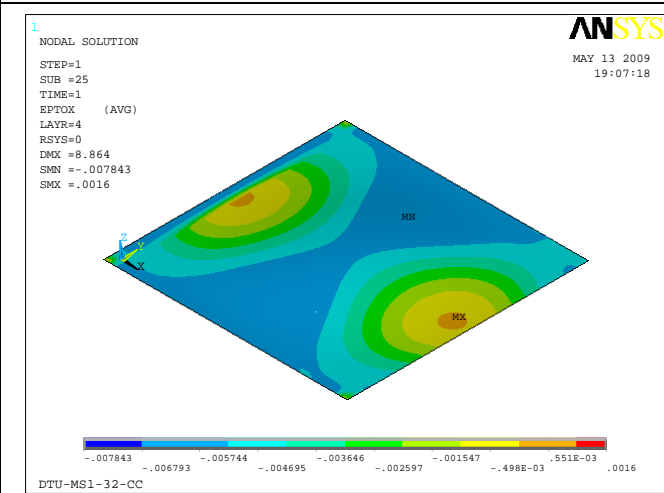
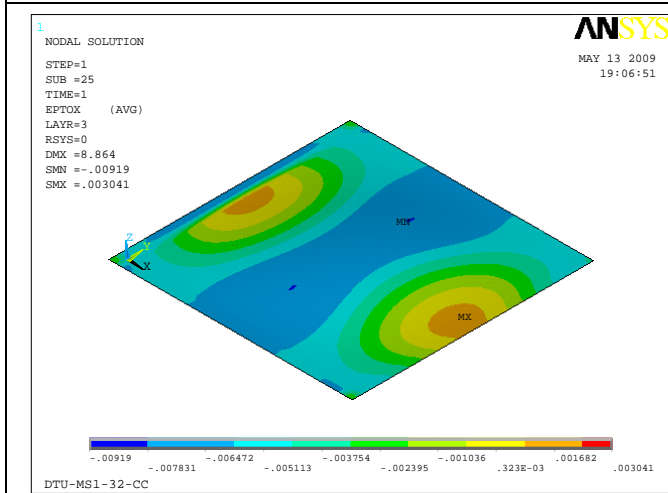
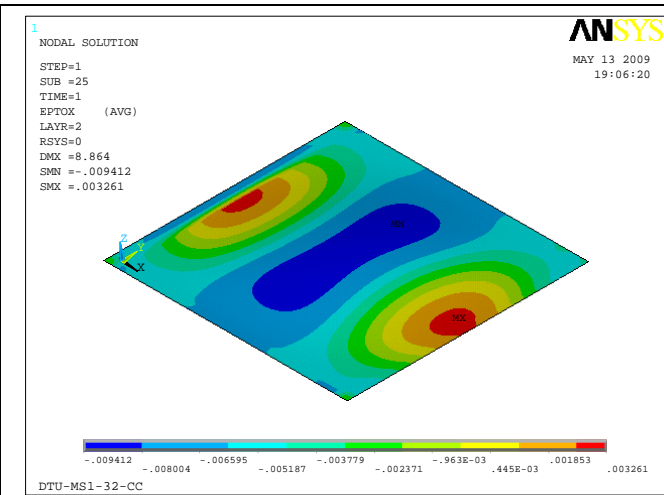
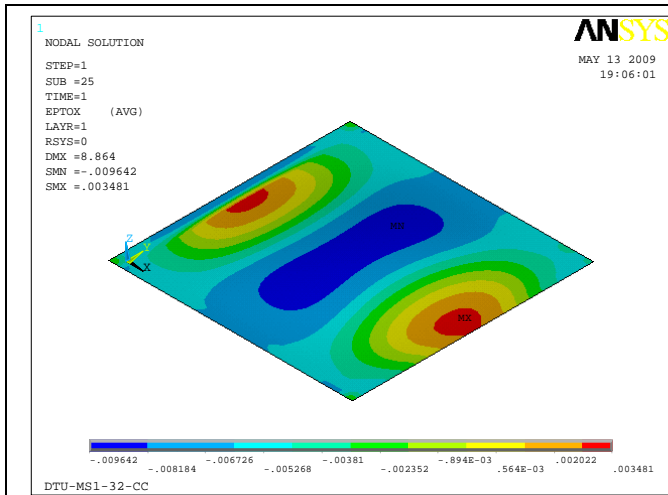
η μελέτη της ανώτερης στρώσης του μοντέλου, αφού αυτή συμπίπτει εκ των πραγμάτων, με τη στρώση τοποθέτησης του επιμηκυνσιόμετρου στα πειράματα, ή η εξακρίβωση της στρώσης που αστοχεί πρώτα, και η μελέτη των παραμορφώσεων σ' αυτήν.

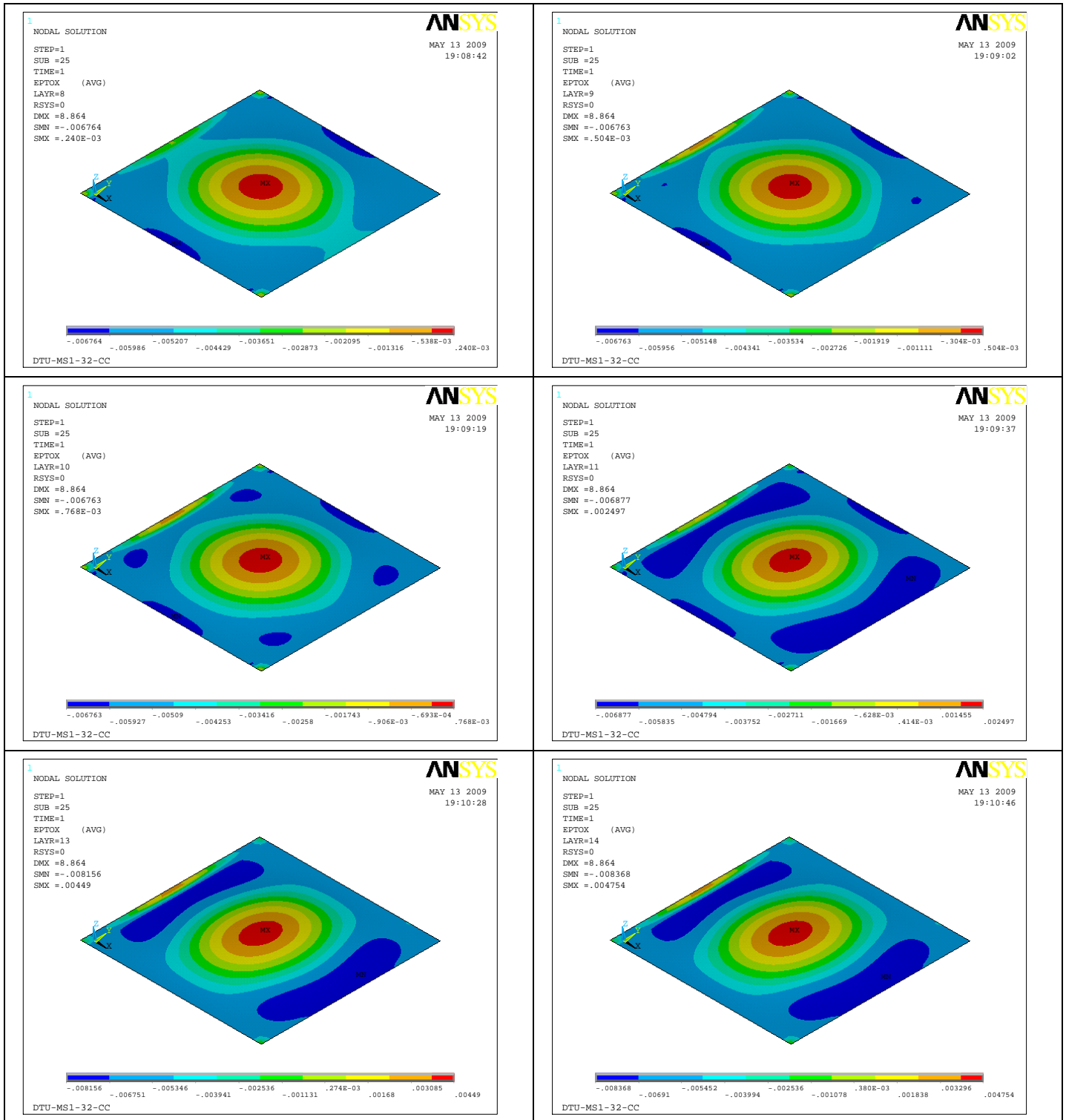
Ακόμη, οι μέγιστες παραμορφώσεις και η αστοχία στο μοντέλο επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες. Λόγω των περιορισμών μετατόπισης που επιβάλλεται στις άκρες της πλάκας, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις τείνουν να μεγιστοποιούνται στα σημεία εκείνα πολύ γρήγορα, οδηγώντας σε πρόωρη ικανοποίηση του κριτηρίου αστοχίας. Αυτό θα πρέπει να συνυπολογιστεί στη μελέτη αστοχίας, πιθανότατα να παραλειφθούν οι τιμές από τις περιοχές αυτές, και να ερευνηθεί η συμπεριφορά των μοντέλων μόνο στην κεντρική περιοχή. Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζονται τα γραφήματα των παραμορφώσεων που λαμβάνει κάθε στρώση της πλάκας S1-32-CC, στο τέλος της φόρτισης. Τα γραφήματα αυτά καταδεικνύουν τις διαφορές των παραμορφώσεων ανάλογα με τη στρώση στην οποία βρίσκονται, και ανάλογα με την περιοχή της πλάκας (πλησιέστερα στις άκρες ή στο κέντρο της).

Για τις παραπάνω έρευνες θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο τρόπος μοντελοποίησης των στρώσεων. Υπενθυμίζεται ότι οι μονοαξονικές στρώσεις μοντελοποιούνται ως μία στρώση με πολλαπλάσιο πάχος, και οι διαξονικές ως 2 αλληπάλληλες μονοαξονικές στρώσεις, με προσανατολισμό $+45^\circ$ και -45° . Αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης επηρεάζει σαφώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης, όταν πρόκειται για μεγέθη που ορίζονται για κάθε στρώση.



Σχήμα 4.17: Πρόδος αστοχίας κατά κριτήριο Tsai – Wu, πλάκα MS1-32-CC





Σχήμα 4.18: Τελικές – Μέγιστες παραμορφώσεις σε όλες τις στρώσεις τη πλάκας MS1-32-CC

- Ανάλυση προοδευτικής αστοχίας (Progressive Failure Analysis)

Λόγω της κατασκευής τους (ίνες γυαλιού σε μήτρα ρητίνης), τα σύνθετα υλικά δεν αστοχούν σε κάποια απόλυτα συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η αστοχία ξεκινά από τις πιο ευαίσθητες ίνες, είτε αυτές που είναι κάθετα στο φορτίο, οπότε δέχονται μεγαλύτερη φόρτιση, είτε είναι αυτές όπου λόγω κατασκευαστικών ατελειών δεν υπάρχει αρκετή ρητίνη για να παραλαμβάνει μέρος του φορτίου, είτε είναι αυτές πιο κοντά στις συνοριακές συνθήκες, οπότε δέχονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις κ.λ.π. Στη συνέχεια, και με τη συνεχιζόμενη επιβολή φορτίου, περισσότερες ίνες σπάνε, μέχρις ότου σπάσουν οι περισσότερες ίνες και ρηχθεί η μήτρα σε κάποια περιοχή του πολύστρωτου, οπότε η αστοχία είναι πλήρης.

Η παραπάνω συμπεριφορά δε λαμβάνεται υπ' όψιν στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάζονται. Αντίθετα, οι ιδιότητες του υλικού παραμένουν αναλλοίωτες σε όλη τη διάρκεια της φόρτισης, μέχρι την τελική αστοχία. Αυτό έχει σαν συνέπεια την εξαγωγή αποτελεσμάτων λιγότερο συντηρητικών όσον αφορά τις αντοχές του πολύστρωτου.

Η ανάλυση προοδευτικής αστοχίας (progressive failure analysis) λαμβάνει υπ' όψιν αυτό ακριβώς το φαινόμενο. Με κατάλληλες υπορουτίνες ελέγχει ένα προς ένα τα στοιχεία (elements) του μοντέλου. Όταν το φορτίο σε κάποιο στοιχείο ξεπεράσει αυτό της αστοχίας, το στοιχείο αυτό «μηδενίζεται», και η ανάλυση αρχίζει ξανά από την επιβολή φορτίου. Ένας τρόπος «μηδενισμού» του στοιχείου είναι η ελαχιστοποίηση των ιδιοτήτων του, με πολλαπλασιασμό των τιμών τους με μια πολύ μικρή ποσότητα, της τάξεως του 10^{-6} .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Πάντος ,Α. (2009), «Λυγισμός Πολύστρωτων δοκών και πλακών από σύνθετα υλικά με γεωμετρικές ατέλειες: Παραμετρική Μελέτη και Πειραματική Διερεύνηση» Διπλωματική Εργασία , Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Φεβρουάριος 2009

ASTM Standards:

D 3039/D 3039M – 00, «*Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*» , Απρίλιος 2000

D 5379/D5379M – 98, «*Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*», Δεκέμβριος 2000

ISO Standard 14126, «*Fiber – reinforced plastic composites / Determination of compressive properties in the in – plane direction*», Σεπτέμβριος 1999

ANSYS 10.0 Release Documentation

Reymond Hubert (2008) «*Numerical Analysis of Composite Plates in Buckling*», Master Thesis, Faculty of Engineering, Science and Mathematics, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Σεπτέμβριος 2008

Misirlis K., Downes J.,Dow R.S., «*Buckling of Imperfect Composite Plates: Validation of Numerical Models*», Master Thesis (Draft), University of Newcastle, Σεπτέμβριος 2008

Christian Jensen (2006), «*Defects in FRP panels and their influence on compressive strength*» Master Thesis, Technical University of Denmark (DTU)

Τσούβαλης Ν. (1998), «*Ανάλυση και σχεδίαση σκαφών από σύνθετα υλικά*», σημειώσεις μαθήματος , Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Καρύδης Π. (2000), «*Η μεταλλική κατασκευή του πλοίου – Θέματα τοπικής αντοχής*», Γ. Αργυρόπουλος Ε.Π.Ε., Αθήνα