



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ SANDWICH ΜΕ
ΕΝΘΕΜΑΤΑ**

Διπλωματική Εργασία

ΈΛΛΗΝΑΣ ΣΠΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2008

ΑΘΗΝΑ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ SANDWICH ΜΕ
ΕΝΘΕΜΑΤΑ**

Διπλωματική Εργασία

ΈΛΛΗΝΑΣ ΣΠΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2008

ΑΘΗΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή και εφαρμογές κατασκευών Sandwich	1.1
1.2 Χρήση ενθεμάτων στον πυρήνα μιας κατασκευής Sandwich	1.6
1.2.1 Γεωμετρία ενθεμάτων	1.7
1.3 Βιβλιογραφική έρευνα	1.9
1.4 Σκοπός διπλωματικής εργασίας	1.13

2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ANSYS ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

2.1 Περιγραφή Πειράματος	2.1
2.2 Δισδιάστατη Ανάλυση	2.4
2.3 Τρισδιάστατη Ανάλυση	2.23

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

3.1 Εισαγωγή	3.1
3.2 Γεωμετρία και Παράμετροι Δοκιμίων	3.3
3.3 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων	3.4
3.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	3.5
3.5 Σχολιασμός και Συμπεράσματα	3.74

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΑΚΑΣ SANDWICH ΜΕ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΕΝΘΕΜΑ

4.1 Εισαγωγή	4.1
4.2 Περιγραφή των Πλακών στη Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση	4.1
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	4.4
4.4 Σχολιασμός και Συμπεράσματα	4.10

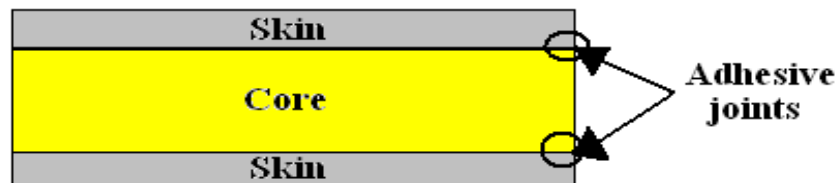
5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ SANDWICH

Μία κατασκευή Sandwich αποτελείται από τρία κύρια μέρη τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 1.1. Δύο λεπτά, άκαμπτα και δυνατά περιβλήματα διαχωρίζονται από ένα παχύ, ελαφρύ και αδύνατο πυρήνα. Τα περιβλήματα είναι συνδεδεμένα με τον πυρήνα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά του φορτίου μεταξύ των συστατικών μερών. Οι πλάκες Sandwich λειτουργούν με παρόμοιο σκεπτικό με εκείνο των μορφοδοκών I, δηλαδή επιτυγχάνεται καλύτερη αποτελεσματικότητα έναντι των εξωτερικών φορτίων, τοποθετώντας το υλικό μακριά από τον ουδέτερο άξονα. Τα περιβλήματα φέρουν την κάμψη, ενώ ο πυρήνας φέρει τα θλιπτικά φορτία και τα μεταφέρει στις στηρίξεις. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι ο πυρήνας των κατασκευών Sandwich είναι από διαφορετικό υλικό απ' ό τι τα περιβλήματα και απλώνεται σε όλο το μήκος παίρνοντας το ρόλο της στήριξης των περιβλημάτων, αντί να συγκεντρώνεται σε ένα στενό κορμό. Κατά την κάμψη τους οι πλάκες sandwich αναπτύσσουν μεγάλες διατμητικές δυνάμεις ολίσθησης στην περιοχή του δεσμού μεταξύ των περιβλημάτων και του πυρήνα. Έτσι αυτός ο δεσμός πρέπει να είναι αρκετά δυνατός, ώστε να αντέχει αυτές τις δυνάμεις απόσχισης που εμφανίζονται. Αν σπάσει ο δεσμός, τα περιβλήματα δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους και αυτό έχει ως συνέπεια την κακή λειτουργία της κατασκευής.



Σχήμα 1.1: Κύρια συστατικά μέρη κατασκευής Sandwich

Οι κατασκευές Sandwich χρησιμοποιούνται επιτυχώς σε διαστημόπλοια και αεροσκάφη, στις γάστρες και στις υπερκατασκευές πλοίων, σε υψηλής ταχύτητας τρένα, σε πτερύγια κινητήρα και σε δεξαμενές. Γενικά, χρησιμοποιούνται σε κατασκευές στις οποίες είναι σημαντικό να είναι υψηλός ο λόγος της αντοχής προς το βάρος και ο λόγος της ακαμψίας προς το βάρος. Τα άκαμπτα περιβλήματα προβάλλουν υψηλή αντίσταση στα εξωτερικά καμπτικά φορτία, ενώ ο πυρήνας προσφέρει σημαντική αντίσταση στα εξωτερικά και ποικίλα διατμητικά φορτία.

Η ύπαρξη του δεσμού ανάμεσα στα υλικά του πυρήνα και των περιβλημάτων, καθώς και τα πρόσθετα μέτρα που πρέπει να ληφθούν ώστε να επιτευχθεί καλή σύνδεση, καθιστά μια κατασκευή με πλάκες sandwich πιο δύσκολη από μία αντίστοιχη με ενισχυμένα πολύστρωτα. Παρόλα αυτά όμως μια κατασκευή με πλάκες sandwich θα είναι ελαφρότερη και θα καταλαμβάνει μικρότερο όγκο από μία αντίστοιχη με πολύστρωτα υλικά λόγω της αναγκαίας ύπαρξης, στη δεύτερη περίπτωση, ενισχυτικών νομέων. Έτσι η χρήση πλακών Sandwich αποδεικνύεται ιδιαίτερα πλεονεκτική για την κατασκευή μεγάλων επίπεδων επιφανειών όπως καταστρώματα, φρακτές, οροφές καμπινών κ.τ.λ.

Υλικά κατασκευών Sandwich

Μία κατασκευή Sandwich αποτελείται από τρία ή περισσότερα συνιστώσα μέρη, τα περιβλήματα (faces ή skins), τον πυρήνα (core) και το δεσμό πυρήνα περιβλήματος (adhesive joint). Γενικά, τα περιβλήματα μπορεί να είναι από διαφορετικά υλικά, όπως επίσης και οι δεσμοί πυρήνα – περιβλήματος μπορεί να είναι φτιαγμένοι από διαφορετικές κολλητικές ουσίες, των οποίων η επιλογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις της κατασκευής για αντοχή ή/και την κατασκευαστική διαμόρφωση. Η επιλογή έχει γίνει αχανής με βάση τα διαθέσιμα υλικά από τότε που χρησιμοποιούνται ως υλικά περιβλήματος τα ινώδη σύνθετα υλικά, το καθένα με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Ακόμα και η διαθεσιμότητα των υλικών πυρήνα έχει αυξηθεί σημαντικά με την εισαγωγή των κυψελοειδών πλαστικών. Προφανώς, η σχεδίαση κατασκευών Sandwich είναι τόσο ένα πρόβλημα επιλογής κατάλληλων υλικών, όσο και πρόβλημα διαστασιολόγησης της κατασκευής. Ο μεγάλος αριθμός των υλικών που υπάρχει όταν κατασκευάζουμε Sandwich μπορεί να φαίνεται ως ανυπέρβλητο εμπόδιο, αλλά στην ουσία είναι το κυριότερο πλεονέκτημα των κατασκευών αυτού του τύπου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές Sandwich δεν επιλέγονται με βάση μόνο τις μηχανικές τους ιδιότητες αλλά και λόγους αντοχής σε συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος, φινίρισμα, χρήση μίας συγκεκριμένης κατασκευαστικής διαδικασίας, κόστος, φθορά κ.τ.λ.

Υλικά Περιβλήματος

Είναι δυνατόν να εικάσουμε ότι οποιοδήποτε δομικό υλικό το οποίο είναι διαθέσιμο στη μορφή λεπτού φύλλου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη διαμόρφωση ενός περιβλήματος κατασκευής Sandwich. Ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα μέσα από επαρκείς υπολογισμούς να χρησιμοποιήσει κάθε υλικό μέχρι το ανώτατο όριο αντοχής του.

Τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα υλικά περιβλήματος μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα μεταλλικά και τα μη-μεταλλικά υλικά. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει το χάλυβα, τον ανοξείδωτο χάλυβα και κράματα αλουμινίου. Η δεύτερη και μεγαλύτερη κατηγορία, περιέχει υλικά όπως κόντρα πλακέ, τσιμέντο, ενισχυμένα πλαστικά, ινώδη σύνθετα υλικά. Η πιο σημαντική από τις κατηγορίες υλικών είναι τα ινώδη σύνθετα υλικά, τα οποία από την εισαγωγή τους είχαν μεγάλη επίδραση στην επέκταση της χρήσης των κατασκευών Sandwich. Αυτό συνέβη διότι πολλά σύνθετα υλικά παρουσιάζουν αντοχές παρόμοιες ή και μεγαλύτερες αυτών των μεταλλικών υλικών, αλλά με δυσκαμψία σημαντικά μικρότερη. Άλλος λόγος χρήσης τους είναι ότι η διαμόρφωση των σύνθετων υλικών για το περίβλημα είναι πιο εύκολη απ' ό,τι στα μεταλλικά υλικά. Βασικότερο χαρακτηριστικό τους όμως είναι η ανισοτροπικότητα, με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες σε διαφορετικές μεταξύ τους διευθύνσεις, γεγονός το οποίο προσφέρει το πλεονέκτημα της τοποθέτησης της διεύθυνσης με τις υψηλές ιδιότητες στη διεύθυνση ανάπτυξης των μεγαλύτερων τάσεων.

Υλικά Πυρήνα

Αν και δε φαίνεται με την πρώτη ματιά, αυτό το συστατικό υλικό είναι ίσως το πιο σημαντικό σε μια κατασκευή Sandwich. Οι πυρήνες που χρησιμοποιούνται μπορούν να χωριστούν σε τρεις κυρίως ομάδες, κυψελοειδείς, ξύλο Balsa, και αφρώδεις πυρήνες.

Πρωταρχικό μέλημα για το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί ως πυρήνας της κατασκευής Sandwich είναι να έχει χαμηλή πυκνότητα έτσι ώστε να συνεισφέρει στο ελάχιστο στο βάρος της συνολικής κατασκευής. Επιπλέον, το μέτρο ελαστικότητας σε διεύθυνση κάθετη προς τα περιβλήματα πρέπει να είναι υψηλό, έτσι ώστε να αποφεύγεται μείωση του πάχους του πυρήνα και κατά συνέπεια μείωση της θλιπτικής ακαμψίας. Ο πυρήνας συνήθως υπόκειται σε διάτμηση, με συνέπεια οι διατμητικές παραμορφώσεις του να επιδρούν στη συνολική παραμόρφωση και να του προκαλούν διατμητικές τάσεις. Η απαίτηση λοιπόν από το υλικό του πυρήνα είναι να μην καταρρέει υπό την επίδραση κάθετου φορτίου και επίσης το μέτρο διάτμησής του να είναι αρκετά υψηλό για να παρέχει την απαραίτητη διατμητική ακαμψία.

Κυψελοειδείς πυρήνες

Οι κυψελοειδείς πυρήνες μπορούν να παραχθούν σε μεγάλη ποικιλία, όσον αφορά στο μέγεθος της κυψέλης, με τους εξαγωνικής μορφής να είναι οι πιο συνηθισμένοι. Κυψελοειδείς πυρήνες από κράματα αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε αεροδιαστημικές εφαρμογές της προηγούμενης δεκαετίας. Τα πιο διαδεδομένα κράματα είναι τα 5052, 5056 και 2024. Οι κυψελοειδείς πυρήνες από χαρτί εμποτίζονται σε ρητίνη για να αποκτήσουν αντιδιαβροχικές ιδιότητες. Έτσι προκύπτει μία φτηνή κατασκευή αλλά με αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Μερικοί κατασκευαστές συμπληρώνουν το κενό ανάμεσα στις κυψέλες με έναν αφρό χαμηλού βάρους για αναπτυγμένη θερμική μόνωση.

Οι μη-μεταλλικοί κυψελοειδείς πυρήνες, όπως τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά, κατασκευάζονται με τη χρήση υφάσματος προκατασκευασμένης κυψελοειδούς μορφής το οποίο εμποτίζεται σε ρητίνη. Η ρητίνη στην οποία εμποτίζεται το ύφασμα είναι συνήθως φαινολική ή πολυεστερική. Οι φαινολικές προσφέρουν υψηλή αντοχή μέχρι τη θερμοκρασία των 180°C, ενώ οι πολυεστερικές αντέχουν μόνο μέχρι τους 80°C. Πολύ γνωστός τύπος εμποτισμένου υφάσματος κυψελοειδούς πυρήνα είναι το Nomex[®], το οποίο αποτελείται από ύφασμα αραμιδικό το οποίο εμποτίζεται σε ρητίνη. Είναι ευρέως διαδεδομένο λόγω της υψηλής σκληρότητάς του και της αντοχής του σε βλάβη, όπως επίσης για τις παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με τους κυψελοειδείς πυρήνες από κράματα αλουμινίου. Το Nomex[®] σε θερμοκρασία 180°C διατηρεί το 75% των μηχανικών ιδιοτήτων που έχει σε θερμοκρασία δωματίου. Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι εξαιρετικές, παρέχουν πολύ μεγάλη δυσκαμψία σε διεύθυνση κάθετη προς τα περιβλήματα και επίσης το μεγαλύτερο λόγο διατμητικής δυσκαμψίας προς αντοχή από όλα τα άλλα διαθέσιμα υλικά πυρήνα. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι το υψηλό τους κόστος.

Ξύλο Balsa

Το ξύλο balsa ήταν το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε σαν πυρήνας σε κατασκευές Sandwich. Η μικροσκοπική του δομή φανερώνει έναν υψηλό λόγο πλευρών σε διάταξη κλειστών κυψελών. Οι ιδιότητες του ξύλου balsa είναι ιδιαίτερος υψηλές στη διεύθυνση που είναι προσανατολισμένα τα «νερά» του, αλλά πολύ χαμηλότερες στις άλλες διευθύνσεις.

Η διαθεσιμότητα του ξύλου balsa εκτείνεται σε εύρος πυκνοτήτων από 100 μέχρι 300 kg/m³. Βασικό μειονέκτημα είναι ότι επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία με αποτέλεσμα να μειώνονται οι μηχανικές του ιδιότητες εάν απορροφήσει νερό. Οι διαθέσιμες μηχανικές του ιδιότητες, αν και περιορίζονται σε πειραματικές μετρήσεις για

τη μικρότερη πυκνότητα ξύλου balsa, εμφανίζονται ικανοποιητικές και υψηλότερες από πολλά κυψελοειδή πλαστικά.

Αφρώδεις πυρήνες

Οι αφρώδεις πυρήνες μπορούν να θεωρηθούν μακροσκοπικά ως ένα στερεό υλικό, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα κατασκευής στοιχείων Sandwich εύκολα. Επίσης η επιφάνεια επαφής του αφρού με το υλικό του δεσμού είναι πιο εύκολο να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε ο δεσμός να είναι καλύτερος. Πρόσθετο πλεονέκτημα παρέχουν με τη θερμική και ακουστική μόνωση που προσφέρουν, επιπλέον του γεγονότος ότι η κλειστή κυψελοειδής τους μορφή προσφέρει εξαιρετική αντίσταση στη διείσδυση του νερού. Η ποικιλία της διαθεσιμότητας των αφρών που υπάρχουν στο εμπόριο είναι μεγάλη, με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ο καθένας, από τους οποίους οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι παραθέτονται παρακάτω.

Αφρός PUR (Polyurethane)

Οι αφροί πολουρεθάνης παράγονται σε μεγάλη ποικιλία, ξεκινώντας από τους μαλακούς αφρούς, με περισσότερο ή λιγότερο ανοικτά κελιά, έως στερεού τύπου κλειστά κελιά και σε μεγάλο εύρος πυκνοτήτων. Η προσθήκη φωσφόρου δίνει ικανοποιητική αντοχή απέναντι στην πυρκαγιά. Αυτό συμβαίνει λόγω του υψηλού μοριακού βάρους των στοιχείων του αφρού, με συνέπεια τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι χαμηλότερες από τα περισσότερα άλλα υλικά πυρήνα, αλλά έχουν το μικρότερο κόστος.

Ο αφρός πολυστερενίου έχει δομή κλειστών κελιών και παράγεται σε εύρος πυκνοτήτων από 15 έως 300 kg/m³. Παρέχει αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες και θερμική μόνωση. Η πρωταρχική του χρήση ήταν ως μονωτής, αλλά τελευταίως έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σε κατασκευές που μεταφέρουν φορτία υπό ψύξη, όπως τα ψυχόμενα εμπορευματοκιβώτια.

Αφρός PVC (Polyvinyl chloride)

Οι δύο μορφές που διατίθεται αυτός ο αφρός είναι το γραμμικό PVC (linear PVC), και το PVC με διασταυρούμενους δεσμούς (cross-linked PVC). Το γραμμικό PVC προσφέρει εξαιρετική ακαμψία, αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες, αλλά λόγω του ότι είναι θερμοπλαστικό υλικό δεν ενδείκνυται για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο τύπος PVC με διασταυρούμενες στρώσεις είναι πιο άκαμπος, έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, είναι λιγότερο ευαίσθητος στην επίδραση της θερμοκρασίας αλλά πιο εύθραυστος. Διατίθεται σε εύρος πυκνοτήτων από 30 μέχρι 400 kg/m³. Οι μηχανικές του

ιδιότητες είναι καλύτερες από αυτές των PUR και PS αλλά είναι και πιο ακριβός. Πρόσθετο πλεονέκτημα είναι η δομή κλειστών κελιών που παρουσιάζει μικροσκοπικά, το οποίο εκτιμάται θετικά σε εφαρμογές όπου η απορρόφηση του νερού είναι απαγορευτική. Η χρήση του έχει επεκταθεί σε όλους τους τύπους των κατασκευών, με αποτέλεσμα να είναι οι πιο διαδεδομένοι αφροί.

Αφρός PMI (Poly-methacryl-imide)

Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των αφρών είναι καλές, ίσως οι καλύτερες από όλους τους αφρούς που βρίσκονται στο εμπόριο, όμως η τιμή τους είναι η υψηλότερη. Ο αφρός PMI είναι σχετικά εύθραυστος, με τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σε εφελκυσμό να φτάνει στο 5%.

1.2 ΧΡΗΣΗ ΕΝΘΕΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ ΜΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ SANDWICH

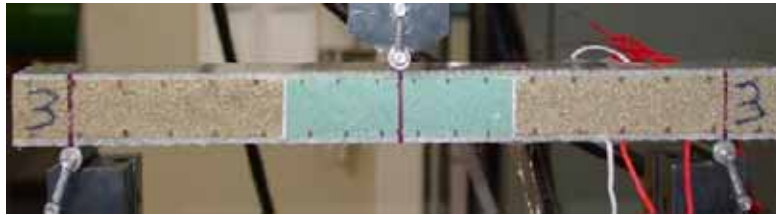
Γενικά, οι κατασκευές sandwich, είναι ευαίσθητες στην εφαρμογή πλάγιων εξωτερικών φορτίων και στηρίξεων, όπου λόγω αυτών των φαινομένων δημιουργούνται έντονες καμπτικές τάσεις, οι οποίες πολλές φορές οδηγούν σε πρόωρη αστοχία της κατασκευής. Σημαντικό ρόλο στην αστοχία μιας τέτοιας κατασκευής παίζει ο ελαστικός κανονικός πυρήνας, ο οποίος είναι επιρρεπής στις συγκεντρώσεις τάσεων. Έτσι, για την αποφυγή τέτοιων αστοχιών πολλές φορές χρησιμοποιούνται ενθέματα υψηλής ακαμψίας (inserts) στον πυρήνα, τα οποία τοποθετούνται στο σημείο εκείνο της κατασκευής όπου επιβάλλεται η φόρτιση και ενισχύουν τον πυρήνα.

Η χρήση ενθεμάτων στον πυρήνα των κατασκευών Sandwich είναι συνηθισμένο φαινόμενο. Με τον όρο 'ένθεμα' εννοούμε ένα κομμάτι 'σκληρού' πυρήνα, το οποίο τοποθετείται μέσα στην περιοχή του κανονικού (μαλακού) πυρήνα μιας διατομής Sandwich και διαχωρίζει τον υπάρχοντα πυρήνα. Το ένθεμα μπορεί να είναι ξύλο κοντραπλακέ (Plywood), αλουμίνιο (Aluminium), χάλυβας (Steel) ή άλλο μέταλλο ή έστω και αφρός μεγαλύτερης πυκνότητας από αυτόν του κανονικού πυρήνα.

Ο σημαντικότερος λόγος εισαγωγής ενός ενθέματος στον πυρήνα είναι η διευκόλυνση της μεταφοράς των ορθών και διατμητικών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους, χωρίς την κατάρρευση της κατασκευής Sandwich. Παρόλα αυτά όμως, δημιουργούνται ασυνέχειες στις συνδέσεις των δυο διαφορετικών πυρήνων, λόγω της αλλαγής των ελαστικών ιδιοτήτων τους. Αυτές οι ασυνέχειες φανερώνονται με την άνοδο των τοπικών τάσεων σε αυτή την περιοχή της κατασκευής, που καταγράφεται σε όλα τα συστατικά της (πυρήνας, περιβλήματα).

1.2.1 Γεωμετρία ενθεμάτων

Η πιο συνηθισμένη γεωμετρία ενθέματος είναι αυτή του ορθογωνίου (butt insert). Ένα ορθογώνιο ένθεμα τοποθετείται στη μέση της διατομής και διαχωρίζει τον κανονικό πυρήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.1



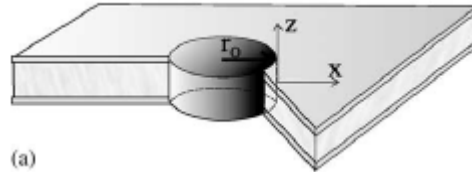
Σχήμα 1.2.1: Κατασκευή Sandwich με ορθογώνιο ένθεμα

Παραλλαγές του ορθογωνίου ενθέματος είναι η μετατροπή του σε σχήμα τραπέζιου (Bozhevolnaya E. and Lyckegaaard A., 2004). Η γεωμετρία αυτή, χρησιμοποιείται ως καλύτερη εκδοχή ενθέματος σε σχέση με το ορθογώνιο, αφού επιτυγχάνεται μείωση των τοπικών τάσεων. Στο Σχήμα 1.2.2 φαίνεται μια κατασκευή Sandwich με τραπεζοειδές ένθεμα. Η γεωμετρία του τραπέζιου (scarf insert) ποικίλλει ανάλογα με τη γωνία που θα επιλεγεί κι από τη μορφή του. Η μορφή του μπορεί να είναι η μεγάλη πλευρά πάνω και η μικρή κάτω ή και το ανάποδο.



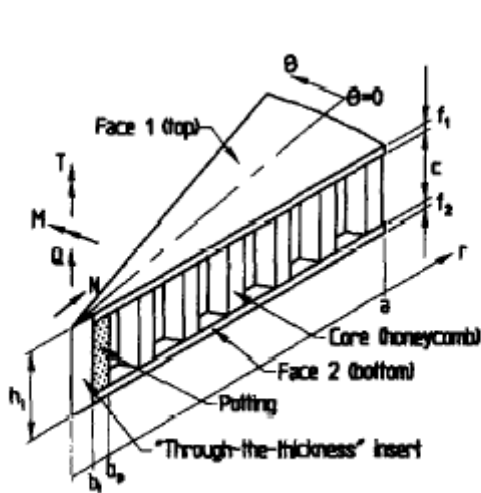
Σχήμα 1.2.2: Κατασκευή Sandwich με τραπέζιο ένθεμα

Εκτός από τη γεωμετρία των τετραπλεύρων ενθεμάτων, τα οποία είναι και τα πιο συνηθισμένα, υπάρχει και η γεωμετρία του κυκλικού ένθεματος (Bozhevolnaya E., 2004). Στο Σχήμα 1.2.3 παρουσιάζεται ένα τέτοιο ένθεμα.

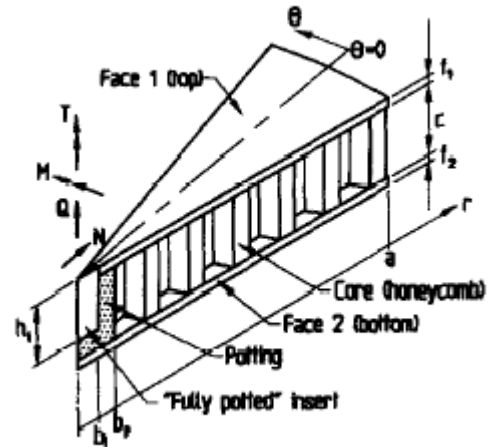


Σχήμα 1.2.3: Κατασκευή Sandwich με κυκλικό ένθεμα

Δύο ακόμα είδη ενθέματος που συναντώνται είναι το «πλήρες» ένθεμα (through-the-thickness insert) και το «μερικό» ένθεμα (fully potted insert) (Thomsen O. T., 1998). Τα δύο ενθέματα φαίνονται στα Σχήματα 1.2.4 και 1.2.5. Το «πλήρες» ένθεμα εκτείνεται κατά μήκος του συνολικού πάχους όλης της διατομής με ορθογώνια γεωμετρία, ενώ το «μερικό» ένθεμα εκτείνεται από το άνω περίβλημα μέχρι ένα μέρος του πυρήνα, πάλι με ορθογώνια γεωμετρία. Από τα παρακάτω σχήματα παρατηρείται ότι μετά το ένθεμα υπάρχει πολυμερής κολλά (potting).



Σχήμα 1.2.4: Κατασκευή Sandwich με «πλήρες» ένθεμα

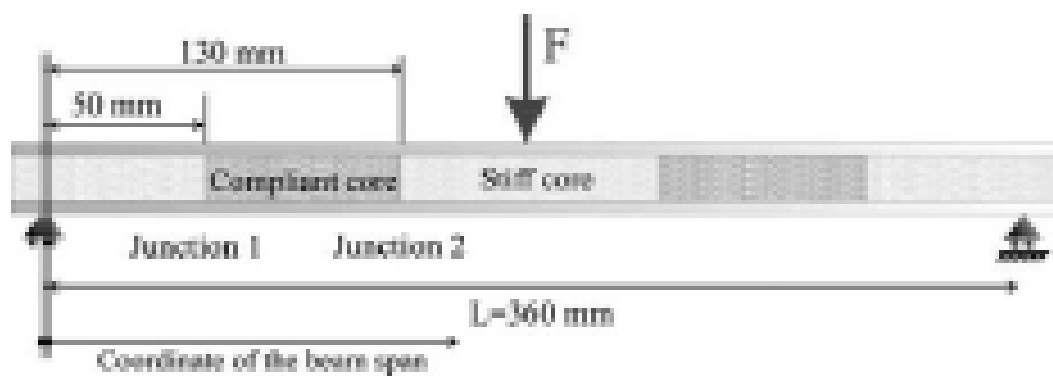


Σχήμα 1.2.5: Κατασκευή Sandwich με «μερικό» ένθεμα

1.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

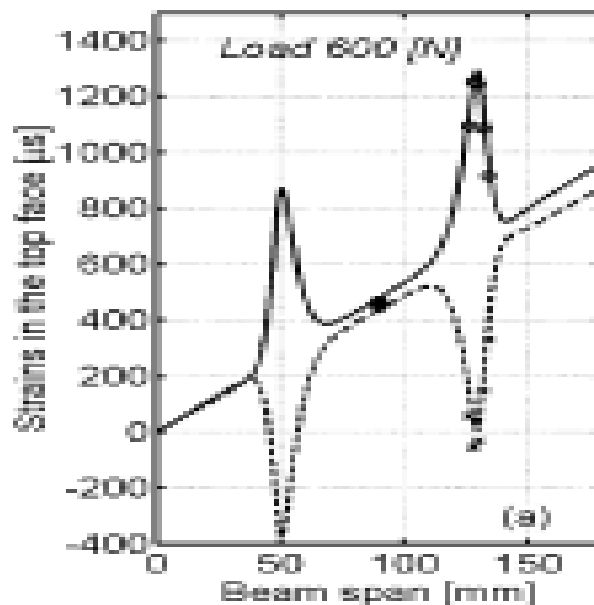
Σε αυτή την ενότητα θα αναφέρουμε κάποιες δημοσιεύσεις που έχουν γίνει, στις οποίες μελετάται η επίδραση που έχει η ύπαρξη σκληρών ενθεμάτων μέσα στον πυρήνα μιας κατασκευής sandwich. Σε γενικές γραμμές άλλωστε αυτό είναι και το θέμα της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Η πρώτη δημοσίευση (Bozhevolnaya E., 2003) που αναφέρουμε μελετά μία διατομή sandwich με δύο ορθογώνια ενθέματα. Τα περιβλήματα είναι από υλικό Αλουμίνιο, ο κανονικός πυρήνας από PVC H-60 (αφρός PVC πυκνότητας 60 kg/m^3) και το ένθεμα από PVC H-200 (αφρός PVC πυκνότητας 200 kg/m^3). Στο Σχήμα 1.3.1 φαίνεται η δοκός που μελετάται.



Σχήμα 1.3.1: Δοκός της δημοσίευσης

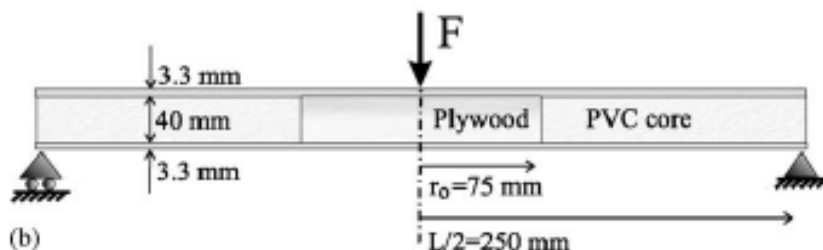
Στη δημοσίευση παρουσιάζονται οι αναλυτικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των τάσεων στα περιβλήματα και στον πυρήνα για ορθογώνιο ένθεμα και επιλύονται εφαρμογές. Εν συνεχεία γίνεται και η πειραματική μελέτη της διατομής και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων, των τάσεων και του βέλους κάμψης στη περιοχή των συνδέσεων των δύο ενθεμάτων με τον υπόλοιπο πυρήνα. Πρέπει να αναφερθεί, ότι οι τάσεις που υπολογίζονται αναφέρονται στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά των περιβλημάτων. Από τα αποτελέσματα της δημοσίευσης των αναλυτικών εξισώσεων και του πειράματος φαίνεται, ότι η συγκέντρωση τάσης στα δύο σημεία της σύνδεσης είναι μεγάλη. Η τιμή των τάσεων των περιβλημάτων στα σημεία αυτά αυξάνεται κατά 400% από τις τάσεις της υπόλοιπης δοκού. Στο Σχήμα 1.3.2 φαίνεται η συγκέντρωση τάσης στα σημεία της σύνδεσης για σημειακό φορτίο 600 N που ασκείται στο κέντρο της δοκού.



Σχήμα 1.3.2: Μεταβολή της τάσης κατά μήκος της δοκού της δημοσίευσης

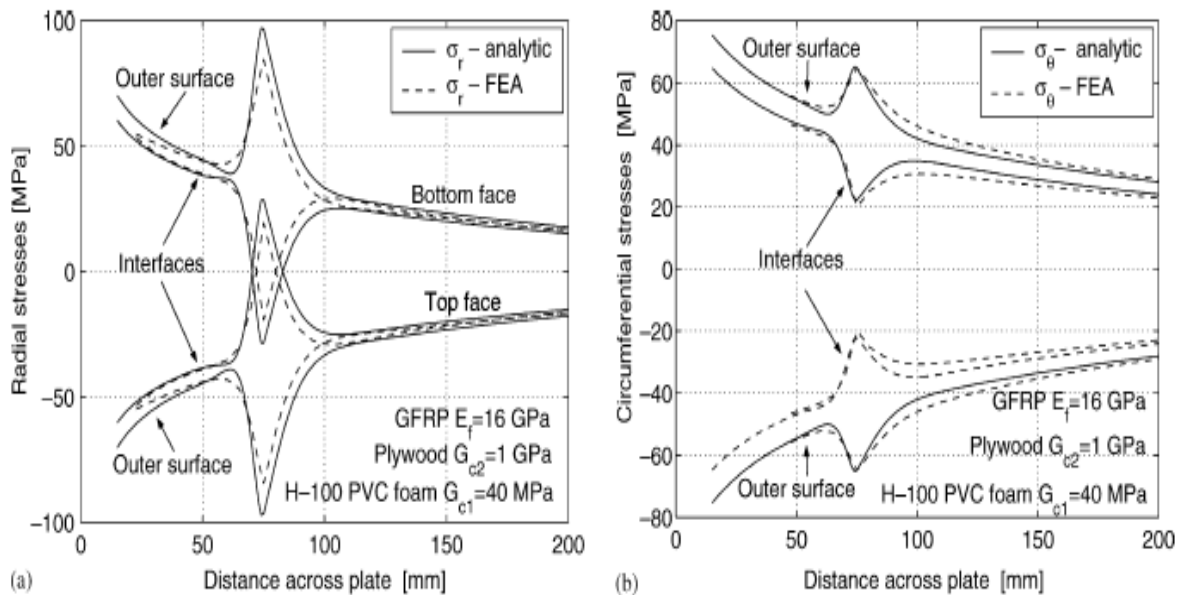
Στο παραπάνω σχήμα με συνεχή γραμμή είναι οι τάσεις της εξωτερικής επιφάνειας του άνω περιβλήματος και με διακεκομμένη γραμμή οι τάσεις της εσωτερικής επιφάνειας αντίστοιχα. Τα σημεία είναι τα πειραματικά αποτελέσματα. Προτεινόμενος τρόπος μείωσης της συγκέντρωσης τάσης είναι η τοποθέτηση ενός επιπλέον ενθέματος (patch core) ανάμεσα στους δύο πυρήνες με Μέτρο Ελαστικότητας μεγαλύτερο του κανονικού πυρήνα και μικρότερο του ενθέματος.

Η δεύτερη δημοσίευση (Bozhevolnaya E., 2004) αναφέρεται σε κατασκευή Sandwich με κυκλικό ένθεμα. Τα υλικά της διατομής είναι E-glass (σύνθετο υλικό με ίνες γυαλιού) για τα περιβλήματα, plywood (ξύλο κοντραπλακέ) για το ένθεμα και PVC H-100 (αφρός PVC πυκνότητας 100 kg/m^3) για τον πυρήνα. Στο Σχήμα 1.3.3 φαίνεται η δοκός που μελετάται. Το φορτίο που ασκείται στη δοκό είναι συγκεντρωμένο και ασκείται στο κέντρο της δοκού.



Σχήμα 1.3.3: Δοκός της δημοσίευσης

Αναλύονται οι υψηλής τάξης αναλυτικές εξισώσεις της συγκεκριμένης διατομής sandwich για τον υπολογισμό των ορθών και διατμητικών τάσεων των περιβλημάτων και του πυρήνα στο σημείο της σύνδεσης του ενθέματος με τον πυρήνα και στην ευρύτερη περιοχή της κατασκευής. Μετά γίνεται ανάλυση της ίδιας διατομής σε διδιάστατη μορφή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας τον κώδικα Odessa, ο οποίος δημιουργήθηκε στο πανεπιστήμιο Aalborg. Τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών εξισώσεων και των πεπερασμένων στοιχείων. Στο Σχήμα 1.3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ακτινικών και περιφερειακών τάσεων της δημοσίευσης που προέκυψαν από τα πεπερασμένα στοιχεία και από τις αναλυτικές εξισώσεις.



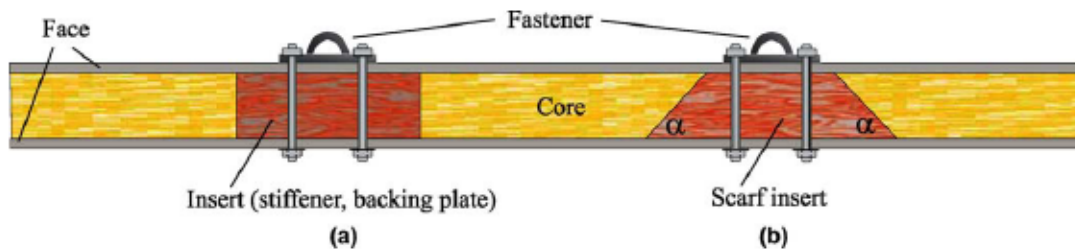
Σχήμα 1.3.4: a) Μεταβολή της ακτινικής τάσης κατά μήκος της δοκού της δημοσίευσης
b) Μεταβολή της περιφερειακής τάσης κατά μήκος της δοκού της δημοσίευσης

Στα παραπάνω σχήματα οι δύο άνω καμπύλες είναι οι τάσεις του κάτω περιβλήματος και οι δύο κάτω καμπύλες του άνω περιβλήματος αντίστοιχα. Επίσης, οι καμπύλες με τη συνεχή γραμμή είναι οι τάσεις που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και οι καμπύλες με τη διακεκομμένη γραμμή αφορούν τα αποτελέσματα των αναλυτικών εξισώσεων. Όπως φαίνεται από τα σχήματα η συγκέντρωση τάσης στο σημείο της σύνδεσης είναι έντονη. Υπάρχει αύξηση της τάσης κατά 150%.

Στα συμπεράσματα της δημοσίευσης παρουσιάζονται τρόποι μείωσης της συγκέντρωσης τάσης, όπως η τοποθέτηση ανάμεσα στο ένθεμα και στον κανονικό πυρήνα ενθεμάτων PVC H-200 (αφρός PVC πυκνότητας 200 kg/m^3) και από τις δύο

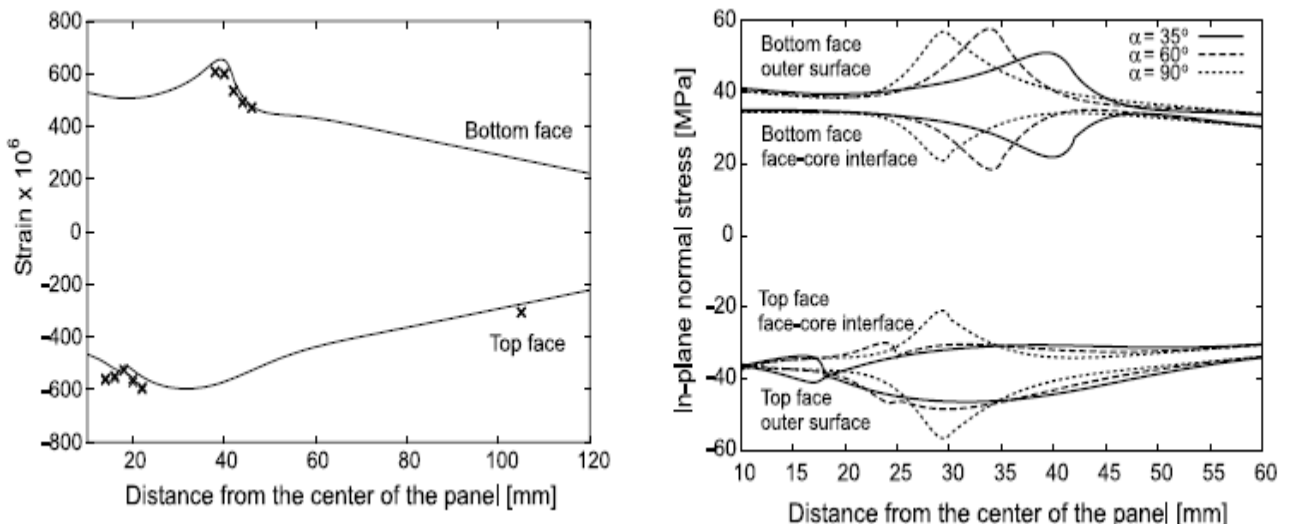
πλευρές, έτσι ώστε να γίνει ομαλότερη η μετάβαση των ελαστικών ιδιοτήτων και να αποφευχθούν οι έντονες συγκεντρώσεις τάσεων. Ένας άλλος τρόπος μείωσης των τάσεων είναι η τοποθέτηση επιθεμάτων από σύνθετο υλικό με ίνες γυαλιού (GFRP doublers) στο άνω και κάτω περίβλημα.

Στην επόμενη και τελευταία δημοσίευση που αναλύθηκε (Bozhevolnaya E., 2005), μοντελοποιούνται τρεις ίδιες διατομές Sandwich με διαφορετικές γεωμετρίες ενθεμάτων με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Η μία διατομή έχει ορθογώνιο ένθεμα μήκους 60 mm και οι άλλες δύο έχουν τραπέζιο ένθεμα γωνίας 60° και 35° με μέσο όρο πλευρών 60 mm. Τα περιβλήματα είναι από Αλουμίνιο, το ένθεμα είναι plywood και ο κανονικός πυρήνας από PVC H-130 (αφρός PVC πυκνότητας 130 kg/m³). Η γεωμετρία της δοκού φαίνεται στο Σχήμα 1.3.5. Το φορτίο που ασκείται στις δοκούς είναι επίσης σημειακό και ασκείται στο κέντρο τους.



Σχήμα 1.3.5: Δοκός της δημοσίευσης

Οι τρεις δοκοί μοντελοποιούνται με το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3.6.



Σχήμα 1.3.6: Μεταβολή της τάσης κατά μήκος της δοκού της δημοσίευσης και για τα τρία ενθέματα

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται, ότι στο ένθεμα γωνίας 0° (ορθογώνιο ένθεμα) η τάση είναι αυξημένη 50% στο σημείο της σύνδεσης. Για το ένθεμα γωνίας 60° , στο άνω περίβλημα δεν υπάρχουν έντονες συγκεντρώσεις τάσεις, ενώ στο κάτω περίβλημα στο σημείο της σύνδεσης οι τάσεις είναι αυξημένες κατά 50%. Ομοίως για το ένθεμα γωνίας 35° , στο άνω περίβλημα δεν υπάρχει συγκεντρωση τάσης, ενώ στο κάτω περίβλημα η αύξηση της τάσης στο σημείο της σύνδεσης αγγίζει το 25%.

Μετά τη μοντελοποίηση των τριών διατομών και τη σύγκριση μεταξύ τους συμπεραίνεται ότι διαμορφώνοντας τη γωνία του ενθέματος παρουσιάζεται αισθητή μείωση των τάσεων των περιβλημάτων. Τέλος γίνεται και η πειραματική μελέτη αυτών των διατομών και γίνεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων των τάσεων και των παραμορφώσεων της εξωτερικής επιφάνειας των περιβλημάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων.

1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν σκοπό να επεκτείνει την έρευνα που έγινε στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας της Μ. Κολλαρίνη. Εκεί, εκτός των άλλων, πραγματοποιήθηκε πείραμα κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια υλικού sandwich με ενσωματωμένο ένθεμα στον πυρήνα τους. Μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις στις εξωτερικές επιφάνειες των περιβλημάτων και κυρίως στην περιοχή ένωσης των δύο πυρήνων. Σκοπός του πειράματος ήταν να καταγράψει την συγκεντρωση τάσεων που εμφανίζουν τέτοιου είδους δοκίμια.

Η έρευνα στην παρούσα εργασία ξεκινάει με την μοντελοποίηση των δοκιμίων του πειράματος με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικός σκοπός είναι η επαλήθευση των πειραματικών μετρήσεων στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι κατασκευάστηκαν τόσο δυσδιάστατα όσο και τρισδιάστατα μοντέλα με τον παραπάνω στόχο.

Στη συνέχεια δεύτερος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετροποίηση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Βασιζόμενοι δηλαδή στα μοντέλα των δοκιμίων του πειράματος (γνωρίζοντας ότι αυτά δίνουν σωστά αποτελέσματα) σχεδιάσαμε όμοια μοντέλα με κάποιες διαφορές στην γεωμετρία των υλικών (π.χ. πάχη περιβλημάτων) και στις ιδιότητες αυτών. Σχεδιάσαμε για αυτό το σκοπό δυσδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα, των οποίων την συμπεριφορά μελετήσαμε και βγάλαμε κάποια συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ANSYS ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

2.1 Περιγραφή του Πειράματος

Στην διπλωματική εργασία της Μ. Κολαρινή πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια τύπου sandwich με εμφυτευμένο σκληρό ένθεμα στον πυρήνα τους. Μετρήθηκε η παραμόρφωση των εξωτερικών περιβλημάτων των δοκιμίων σε διάφορα σημεία τους και κυρίως στην περιοχή όπου εμφανιζόταν η συνένωση του σκληρού με τον μαλακό πυρήνα. Σκοπός του πειράματος ήταν η καταγραφή της συγκέντρωσης τάσεων που εμφανίζουν αυτού του είδους τα δοκίμια στην περιοχή συνένωσης των δύο πυρήνων. Αναφέρουμε ότι χρησιμοποιήθηκαν ενθέματα διαφόρων γεωμετριών προκειμένου να καταγραφεί η συμπεριφορά του φαινόμενου της συγκέντρωσης τάσεων σε σχέση με την γεωμετρία του σκληρού ενθέματος.

Τα υλικά από τα οποία κατασκευάστηκαν τα δοκίμια ήταν σύνθετα υλικά πολύ διαδεδομένα στις ναυπηγικές κατασκευές. Ο κυρίως πυρήνας αποτελείται από το υλικό Klegecell[®] R 45 της DIAB [11], που είναι αφρώδες υλικό (PVC) με πυκνότητα 45 kg/m^3 , ενώ το σκληρό ένθεμα φτιάχτηκε από Airex[®] C70.130, επίσης αφρώδες υλικό με πυκνότητα 130 kg/m^3 . Οι ονομαστικές ιδιότητες των υλικών του πυρήνα δίνονται αναλυτικά στον πίνακα 2.1.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1.1 Ονομαστικές Ιδιότητες Υλικών Πυρήνα

Property	Klegecell [®] R45	Airex [®] C70.130
Nominal Density (kg/m^3)	45	130
Compressive Strength (MPa)	0.54	2.6
Compressive Modulus (MPa)	25	160
Tensile Strength (MPa)	0.86	3.8
Tensile Modulus (MPa)	32	110
Shear Strength (MPa)	0.55	2.3
Shear Modulus (MPa)	19	47

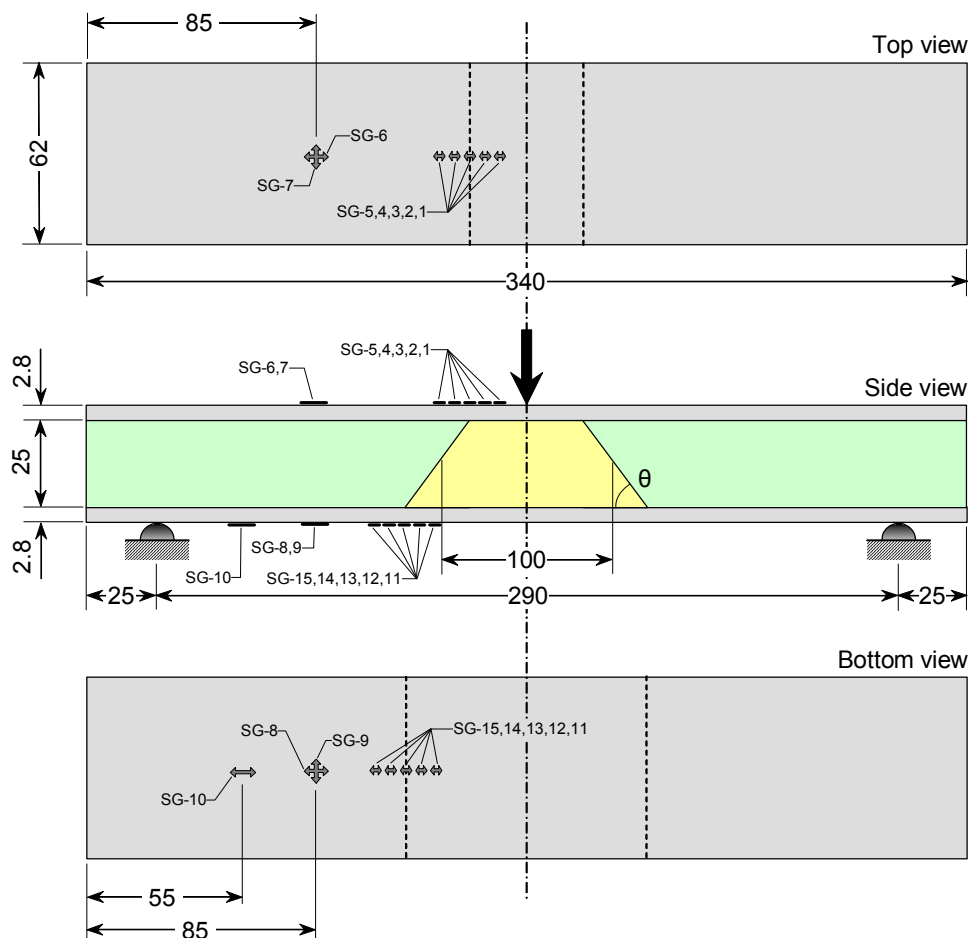
Όσον αναφορά τα υλικά των περιβλημάτων των δοκιμίων, αναφέρουμε ότι τα περιβλήματα (άνω και κάτω) είναι συμμετρικά μεταξύ τους. Έχουν κατασκευή σύνθετου υλικού το οποίο αποτελείται από 4 στρώσεις τυπικών ναυπηγικών υαλοϋφασμάτων εμποτισμένων με ρητίνη πολυεστέρα. Τα επιλεγμένα υφάσματα είναι τρία στρώματα Agimat 300/600 και ένα στρώμα MAT 450 [(300/600)3/450] ενώ η ρητίνη που τα περιβάλλει είναι χαμηλού ιξώδους πολυεστέρας NORSODYNE[®] G 703 (CRAY VALLEY). Οι ιδιότητες των υλικών των περιβλημάτων καθορίστηκαν με πειράματα κάμψης και εφελκυσμού που έγιναν

σε δοκίμια που κόπηκαν ειδικά για αυτό το σκοπό από τις πλάκες των περιβλημάτων όταν αυτές κατασκευάστηκαν. Εδώ χωρίς να περιγράψουμε την πειραματική διαδικασία παραθέτουμε στον πίνακα 2.1.2 τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων.

Πίνακας 2.1.2 Αποτελέσματα Πειραμάτων Προσδιορισμού Ιδιοτήτων Υλικών Περιβλημάτων.

Δοκίμιο	Εφελκυσμός		Κάμψη	
	E_T (MPa)	σ_{uT} (MPa)	E_F (MPa)	σ_{uF} (MPa)
1	–	–	15819	286.1
2	17445	334.5	12788	231.4
3	14098	–	16225	287.6
4	16721	326.2	15051	317.8
5	15680	309.3	15994	323.4
6	16246	346.3	14138	225.3
7	15716	347.7	12845	291.5
M.O.	15984	332.8	14694	280.4
Απόκλιση (%)	7.1	4.8	9.9	13.7

Παραθέτουμε στην συνέχεια το σχήμα 2.1.1 όπου παρουσιάζεται σχηματικά η γεωμετρία των δοκιμών sandwich που έλαβαν μέρος στο πείραμα.



Σχήμα 2.1.1 Γεωμετρία Δοκιμών Sandwich

Στο Σχήμα 2.1.1 ,εκτός των άλλων, φαίνεται το συνολικό μήκος του δοκιμίου και το πλάτος αυτού. Όλα τα υλικά , τόσο αυτά του πυρήνα όσο και των περιβλημάτων, εκτείνονται από άκρη σε άκρη κατά μήκος και κατά πλάτος του δοκιμίου. Στο σχήμα επίσης διακρίνουμε και τα πάχη των περιβλημάτων, όπως επίσης και το πάχος του πυρήνα. Εν συνεχεία, μπορούμε να δούμε το σημείο εφαρμογής της εξωτερικής δύναμης και τις θέσεις των αντιδράσεων στήριξης, καθώς και το συνολικό ελεύθερο μήκος του δοκιμίου. Τέλος ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να κάνουμε στην γεωμετρία του ενθέματος. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα, το ένθεμα είναι τοποθετημένο με γωνία κλίσης θ μέσα στο δοκίμιο και σχηματίζει ένα τραπεζοειδές σχήμα (κίτρινη επιφάνεια). Παρατηρώντας βλέπουμε ότι έχει οριστεί ως σταθερή παράμετρος η απόσταση των μέσων των μη παραλλήλων πλευρών του ισοσκελούς τραπέζιου που σχηματίζεται. Αυτό μας επιτρέπει να μεταβάλουμε κατά βούληση την γωνία θ χωρίς να μεταβάλουμε τον συνολικό όγκο που καταλαμβάνει το ένθεμα στο δοκίμιο.

Στο πείραμα έλαβαν μέρος συνολικά 8 δοκίμια. Δύο δοκίμια χωρίς ένθεμα, δύο με ορθογώνιο ένθεμα, δύο με τραπεζοειδές ένθεμα γωνίας 60 μοιρών και δύο με τραπεζοειδές ένθεμα γωνίας 45 μοιρών. Στον πίνακα 2.1.3, που ακολουθεί, ονομάζουμε τα δοκίμια :

Πίνακας 2.1.3: Ονοματολογία δοκιμίων

Δοκίμια χωρίς ένθεμα	Sp. 1,2
Δοκίμια με ορθογώνιο ένθεμα	Sp. 3,4
Δοκίμια με τραπεζοειδές ένθεμα γωνίας 60°	Sp. 5,6
Δοκίμια με τραπεζοειδές ένθεμα γωνίας 45°	Sp. 7,8

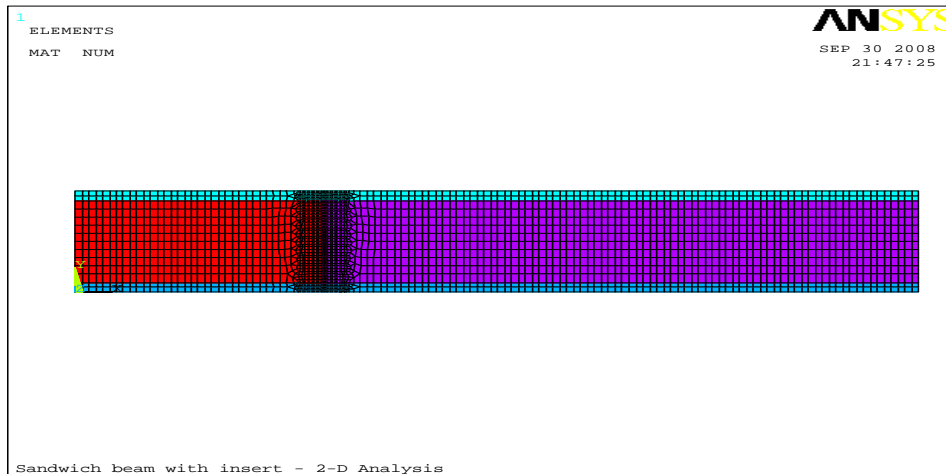
Επιστέφοντας τώρα στο σχήμα 2.1.1 παρατηρούμε κάποιους αισθητήρες μέτρησης παραμορφώσεων (strain gauges) SG 1-15. Στα δοκίμια χωρίς ένθεμα (Sp. 1,2) τοποθετούνται συνολικά επτά strain gauges. Τρία στην εξωτερική επιφάνεια του άνω περιβλήματος και τέσσερα στο κάτω περίβλημα. Πιο συγκεκριμένα, στο άνω περίβλημα τοποθετείται ένα επιμηκυνσιόμετρο μετρητής σε απόσταση 50 mm από το κέντρο, που μετράει τις παραμορφώσεις κατά τον διαμήκη άξονα και μία διπλή ροζέτα σε απόσταση 85 mm από την άκρη του δοκιμίου, ικανή να μετρήσει παραμορφώσεις τόσο κατά τον διαμήκη όσο και κατά τον εγκάρσιο άξονα του δοκιμίου. Στο κάτω περίβλημα τοποθετείται ένας μετρητής για διαμήκεις παραμορφώσεις σε απόσταση 50 mm από το κέντρο, ένας (επίσης για διαμήκεις) σε απόσταση 55 mm από την άκρη και μία διπλή ροζέτα σε απόσταση 85 mm από την άκρη επίσης. Στα δοκίμια με ένθεμα τοποθετούνται συνολικά 15 strain gauges. Επτά στην εξωτερική επιφάνεια του άνω περιβλήματος και οχτώ στο κάτω περίβλημα. Πιο συγκεκριμένα, στο άνω περίβλημα τοποθετούνται: ένας πενταπλός μετρητής που μετράει τις παραμορφώσεις κατά τον διαμήκη άξονα στο σημείο της σύνδεσης του σκληρού με τον μαλακό πυρήνα και μία διπλή ροζέτα σε απόσταση 85 mm από την άκρη του δοκιμίου. Στο κάτω περίβλημα τώρα τοποθετούνται: ένας πενταπλός (για παραμορφώσεις στον διαμήκη άξονα) στο σημείο της σύνδεσης σκληρού και μαλακού πυρήνα, ένας σε απόσταση 55 mm από την άκρη και μία διπλή ροζέτα σε απόσταση 85 mm από την άκρη.

2.2 Δισδιάστατη Ανάλυση

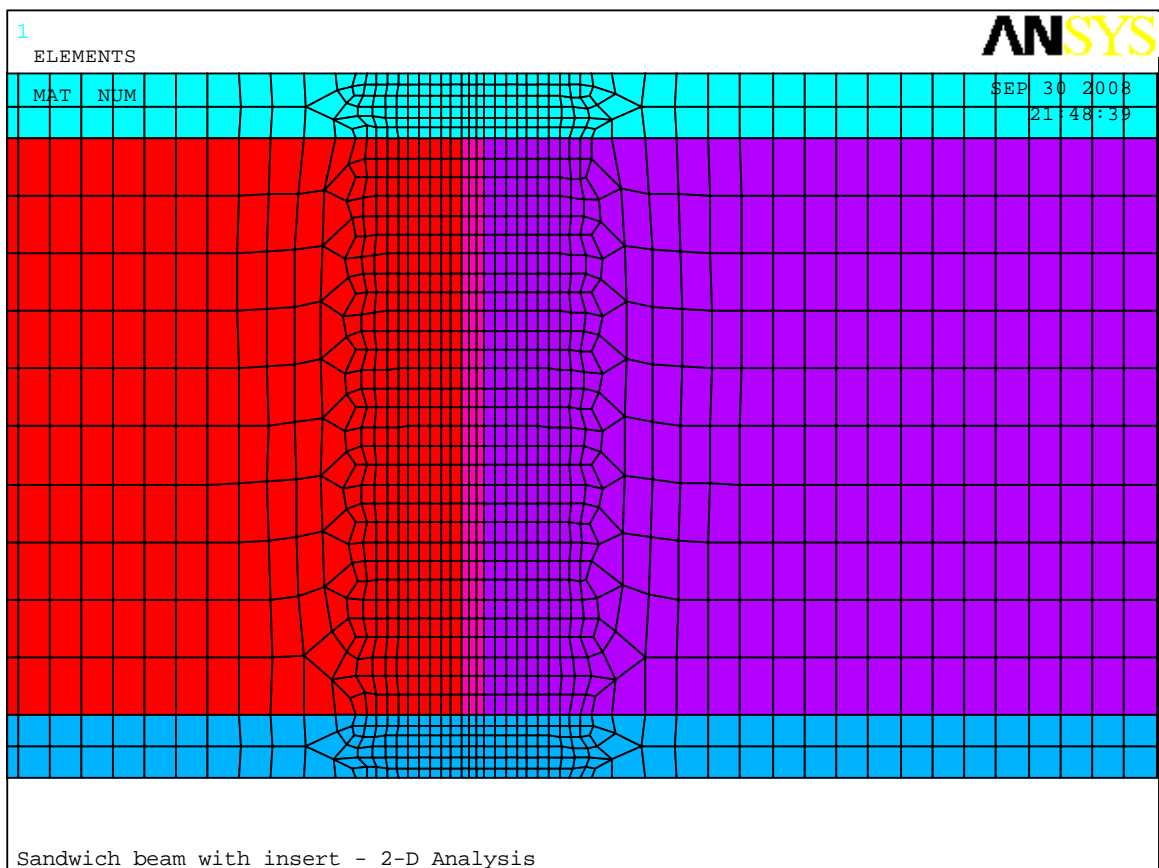
Πρώτος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων ικανό να περιγράψει την συμπεριφορά των δοκιμίων στο πείραμα που μόλις περιγράψαμε. Μετά από μία προσεκτική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων και εκτενή ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας καταφέραμε να σχεδιάσουμε το επιθυμητό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.), τόσο σε δισδιάστατη όσο και σε τρισδιάστατη μορφή.

Η παραπάνω μοντελοποίηση έγινε στο πρόγραμμα Π.Σ. ANSYS. Χρησιμοποιήσαμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων όπως αυτά φαίνονται στο σχήμα 2.1.1 καθώς επίσης και τις αντίστοιχες ιδιότητες των υλικών που παρουσιάζονται στους πίνακες 2.1.1 και 2.1.2. Επειδή τα δοκίμια είναι συμμετρικά ως προς επίπεδο που διέρχεται από το μέσο του συνολικού μήκους τους και είναι κάθετο στον διαμήκη άξονά τους, χωρίσαμε τα δοκίμια στο επίπεδο συμμετρίας τους και τα μοντελοποιήσαμε κατά το ήμισυ. Εφαρμόσαμε δε, κατάλληλες συνοριακές συνθήκες στο επίπεδο συμμετρίας των δοκιμίων, ώστε να λύσουμε ένα συμμετρικό πρόβλημα.

Για την κατασκευή του δισδιάστατου πλέγματος του μοντέλου Π.Σ. χρησιμοποιήσαμε δισδιάστατα 8-κομβά στοιχεία (PLANE 82, 8-node elements) ορθογώνιου σχήματος με τέσσερις κόμβους στις κορυφές του ορθογώνιου και άλλους τέσσερις στα μέσα των πλευρών του. Πιο συγκεκριμένα στα πάχη των περιβλημάτων παράγονται κατά ύψος 2 *στοιχεία*, ενώ στο πάχος του πυρήνα παράγονται κατά ύψος 10 *στοιχεία*. Στην κρίσιμη περιοχή συνένωσης των δύο πυρήνων λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα ώστε να έχουμε καλή απεικόνιση της αναμενόμενης συγκέντρωσης τάσεων. Έτσι στην περιοχή αυτή παράγουμε πολύ μικρού μεγέθους στοιχεία ώστε να γίνει καταγραφή όλων των ακραίων τιμών της τάσης. Η κρίσιμη περιοχή συνένωσης των δύο πυρήνων θεωρείται ότι εκτείνεται κατά ύψος από το άνω άκρο του δοκιμίου έως το κάτω άκρο (δηλαδή περιλαμβάνει και την εξωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων) και κατά μήκος περιβάλλει επαρκώς την περιοχή συνένωσης των δύο πυρήνων. Μέσα σε αυτή την περιοχή το μέγεθος των παραγόμενων στοιχείων φτάνει σε ελάχιστο έως και $\frac{1}{3} \text{ mm}$. Στο σχήμα 2.2.1 που ακολουθεί φαίνεται το μοντέλο Π.Σ. του δοκιμίου Sp. 3 (βλ. πιν. 2.1.3) μαζί με τα παραγόμενα 8-κομβά στοιχεία, ενώ στη συνέχεια στο σχήμα 2.2.2 φαίνεται σε μεγέθυνση η κρίσιμη περιοχή συνένωσης του κυρίως πυρήνα με το ένθεμα 90 μοιρών.



Σχήμα 2.2.1 Μοντέλο Π.Σ. του Sp.3



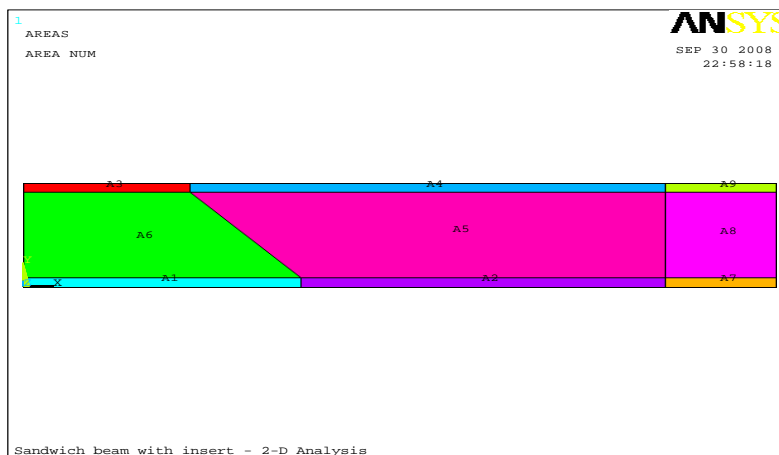
Σχήμα 2.2.2 Μεγέθυνση Μοντέλου Sp.3 στην περιοχή συνένωσης των δύο πυρήνων

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα κυριότερα μοντέλα που σχεδιάστηκαν στην πορεία αναζήτησης της σωστής μοντελοποίησης.

- Μοντέλο 1

Η πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης έγινε με την απλή και λογική σκέψη να σχεδιάσουμε στο περιβάλλον ANSYS το δοκίμιο αποτελούμενο από τα βασικά του υλικά και διαστάσεις, δηλαδή σχεδίαση των εξωτερικών περιβλημάτων, του εσωτερικού πυρήνα και στην περίπτωση που υπάρχει σκληρό ένθετο σχεδίαση και αυτού (γεωμετρία και ιδιότητες υλικού ενθέτου).

Το μοντέλο που προέκυψε παρουσιάζεται σχηματικά:

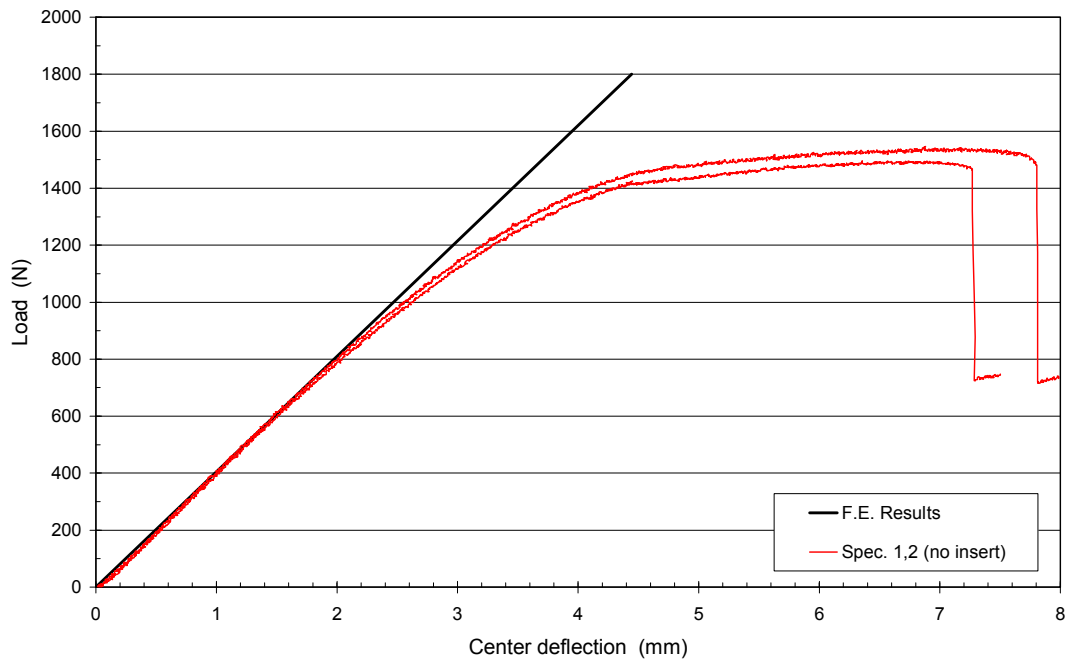


Σχήμα 2.2.3 : Τυπικό μοντέλο ANSYS για το δοκίμιο Sp.7

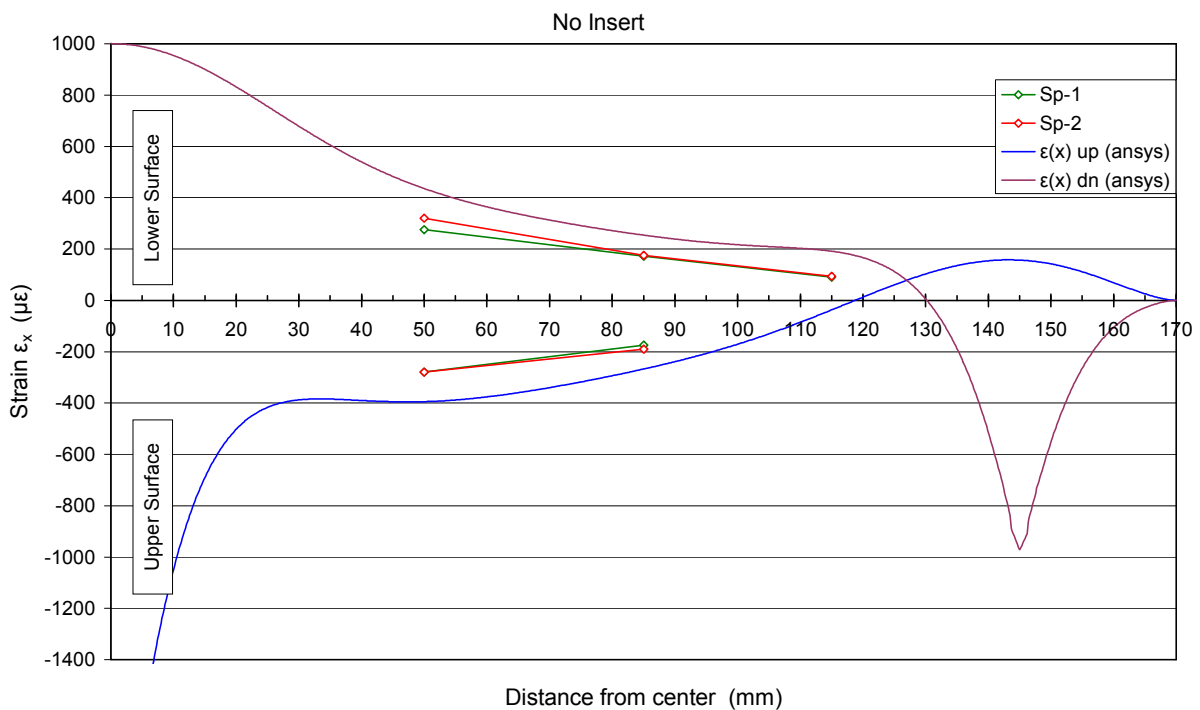
Στο σχήμα φαίνεται το δοκίμιο με σκληρό ένθετο 45^0 μοιρών. Ξεχωρίζουν οι πάνω και κάτω εξωτερικές επιφάνειες καθώς και το σκληρό ένθετο που έχει πράσινο χρώμα. Ο υπόλοιπος πυρήνας αποτελείται από το υλικό του μαλακού πυρήνα και γίνεται ένας διαχωρισμός στα δεξιά του μοντέλου (μοβ χρώμα) πάνω από το σημείο απλής στήριξης (κύλιση) αυτού.

Στον κώδικα αυτού του μοντέλου για να περιγραφεί η συνθήκη στήριξης του -η κύλιση-περιορίζεται το σημείο, όπου υπάρχει η κύλιση στο πείραμα (σχήμα 2.1.1), μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ αφήνεται ελεύθερο να κινηθεί στις υπόλοιπες διευθύνσεις. Τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών των περιβλημάτων έχουν σε αυτή τη φάση, τις τιμές που πήραμε από τους υπολογισμούς που έγιναν κατά την διάρκεια του πειράματος (πιν. 2.1.2) και σημειώνουμε εδώ ότι οι τιμές αυτές, στην πορεία αναζήτησης της σωστής σχεδίασης του μοντέλου Π.Σ. άλλαξαν. Διαπιστώσαμε ότι υπήρχαν κάποιοι λάθος υπολογισμοί στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας αυτών. Έτσι στην παρούσα φάση το μέτρο ελαστικότητας των περιβλημάτων είναι: $E = 15984 \text{ MPa}$, ενώ οι ιδιότητες των άλλων υλικών από τα οποία αποτελείται το δοκίμιο είναι αυτές που αναφέρονται στο πίνακα 2.1.1.

Στα σχήματα 2.2.4 και 2.2.5 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που δίνει αυτό το μοντέλο Π.Σ. για το δοκίμιο χωρίς ένθεμα, σε σύγκριση με αυτά των μετρήσεων του πειράματος.



Σχήμα 2.2.4 Κατακόρυφη μετατόπιση κέντρου των δοκιμίων Sp1,2 συναρτήσει του επιβαλλομένου εξωτερικού φορτίου

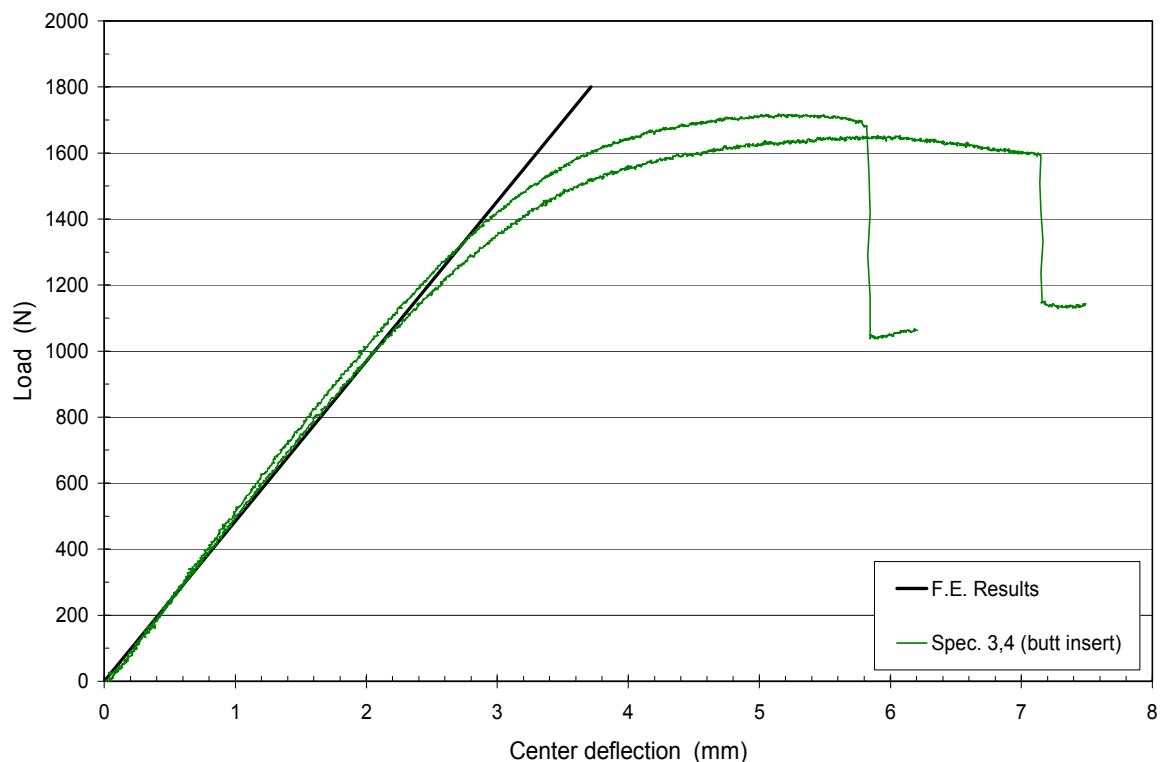


Σχήμα 2.2.5 Παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp1,2 για εξωτερικό φορτίο 600 N εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)

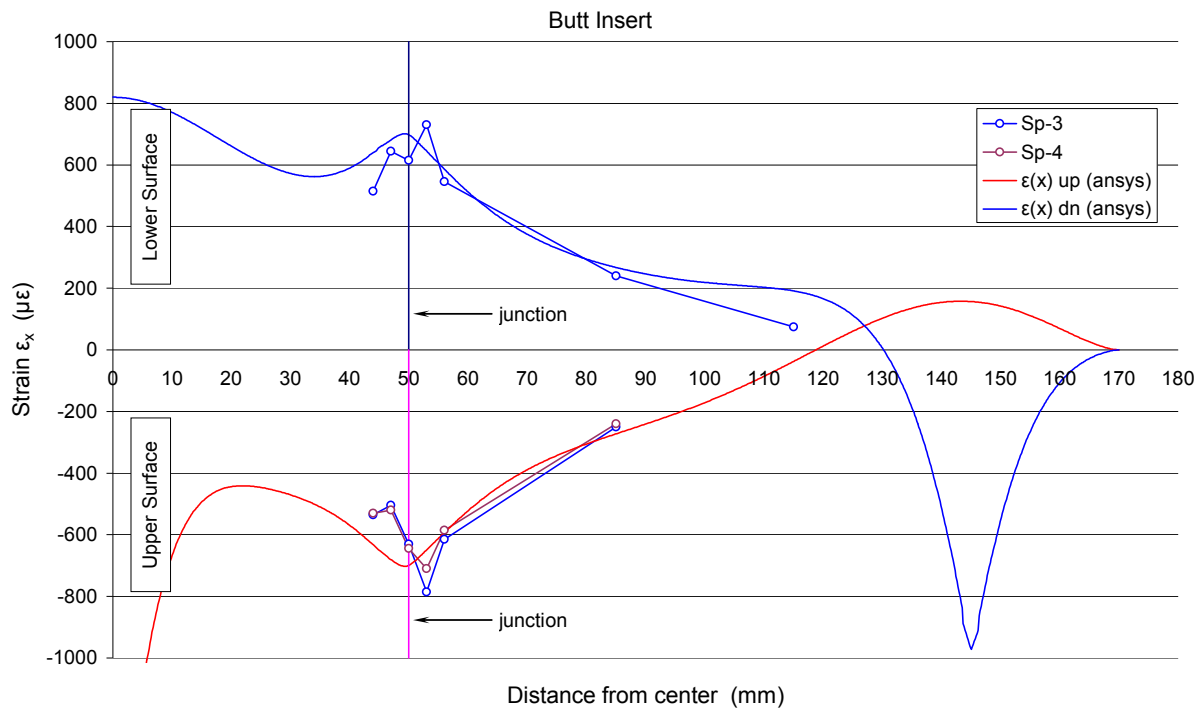
Σημείωση: Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι η όλη μοντελοποίηση που έγινε προσφέρει γραμμική λύση. Είναι λογικό λοιπόν, η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Π.Σ. με τα αποτελέσματα του πειράματος να γίνει στην γραμμικά ελαστική περιοχή του δοκιμίου. Έτσι στο μοντέλο Π.Σ. οι μετρήσεις παίρνονται για φορτίο επιβολής 600 N, όπου θεωρούμε ότι βρισκόμαστε στην γραμμικά ελαστική περιοχή του δοκιμίου

Παρατηρούμε για τα ‘Sp1,2’, δοκίμια χωρίς σκληρό ένθετο, ότι το συγκεκριμένο μοντέλο F.E., δίνει πολύ καλά αποτελέσματα όσο αναφορά την κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου του δοκιμίου, όπου ως την περιοχή των περίπου 600 N (γραμμικά ελαστική περιοχή του δοκιμίου), οι πειραματικές καμπύλες και η προκύπτουσα εκ του ANSYS καμπύλη σχεδόν ταυτίζονται. Όσον αναφορά τώρα την παραμόρφωση του δοκιμίου ως προς τον διαμήκη άξονα, παρατηρούμε μία καλή συμπεριφορά. Μπορεί να αποκλίνουν κάπως οι τιμές των πειραματικών μετρήσεων στις συγκεκριμένες θέσεις που πάρθηκαν από αυτές του ANSYS, αλλά όπως φαίνεται στο σχήμα οι καμπύλες του ANSYS, κινούνται παράλληλα με αυτές των πειραματικών μετρήσεων, πράγμα που σημαίνει ότι περιγράφουν σωστά την συμπεριφορά του δοκιμίου ως προς την παραμόρφωσή του σε φορτίο επιβολής 600 N.

Στα επόμενα σχήματα- 2.2.6, 2.2.7- παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δοκίμιο με ένθεμα 90^0 (Sp3,4), σε σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις.



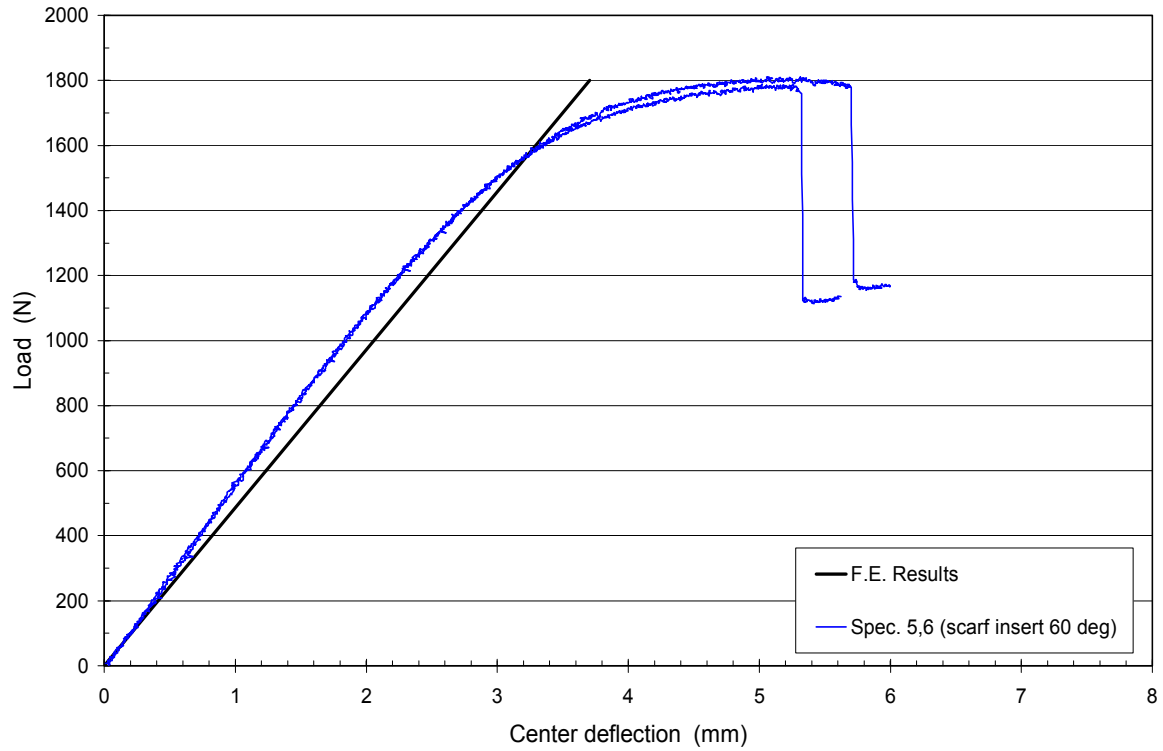
Σχήμα 2.2.6 Κατακόρυφη μετατόπιση κέντρου των δοκιμίων Sp3,4 συναρτήσει του επιβαλλομένου εξωτερικού φορτίου



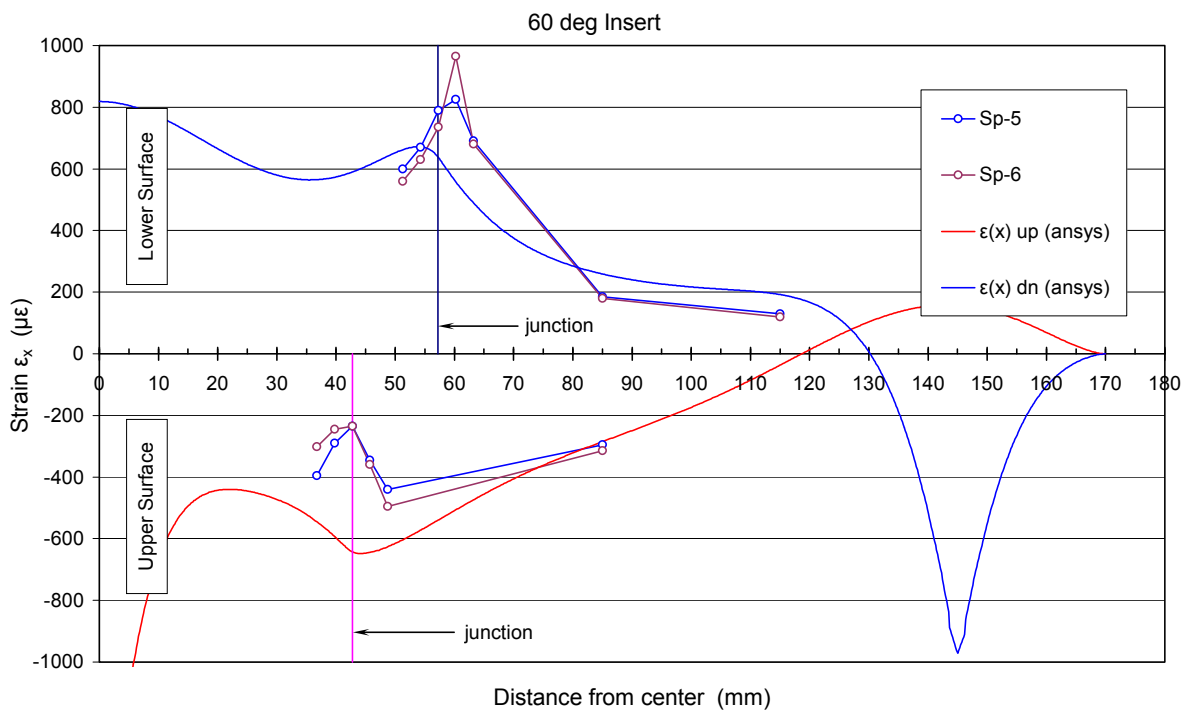
Σχήμα 2.2.7 Παραμόρφωση κατά των διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp3,4 για εξωτερικό φορτίο 600 Newton εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)

Και εδώ το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά την κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου του δοκιμίου στη γραμμική περιοχή. Όσον αφορά τις παραμορφώσεις θα μπορούσαμε και σε αυτή την περίπτωση να πούμε ότι το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του δοκιμίου, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση καθώς οι καμπύλες του ANSYS και εδώ παραλληλίζονται με αυτές των πειραμάτων. Όμως μπορούμε εδώ να παρατηρήσουμε μία ουσιώδη διαφορά. Γύρω από τα 50 mm, δηλαδή στην περιοχή μετάβασης από τον μαλακό στον σκληρό πυρήνα, υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ του ANSYS και των μετρήσεων του πειράματος. Οι μέγιστες παραμορφώσεις στο πείραμα, σε αυτή την περιοχή, είναι μετατοπισμένες δεξιά από την περιοχή μετάβασης (50 mm), ενώ το ANSYS δίνει μέγιστες παραμορφώσεις ακριβώς στην περιοχή μετάβασης. Ίσως σε αυτό το σημείο να μην φαίνεται τόσο σημαντική αυτή η διαφορά, αλλά στα επόμενα μοντέλα με το τραπεζοειδές ένθεμα, θα φανεί πόσο ουσιώδης είναι αυτή η διαφοροποίηση στις μετρήσεις. Ουσιαστικά, αν το αναλύσουμε κάπως, θα πρέπει να δούμε ότι κάτι λείπει από το μοντέλο Π.Σ., και παρουσιάζει αυτή την διαφορά

Συνεχίζουμε παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα για τα δοκίμια με ένθεμα 60° (Sp5,6).

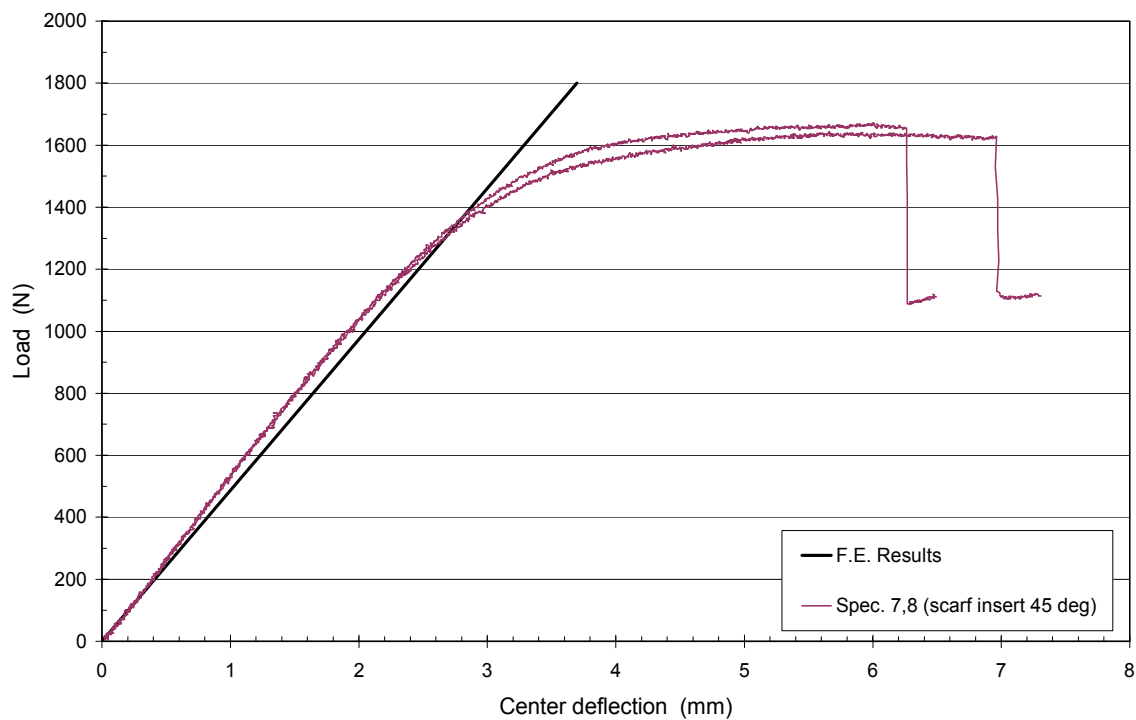


Σχήμα 2.2.8 Κατακόρυφη μετατόπιση κέντρου των δοκιμίων Sp5,6 συναρτήσει του επιβαλλομένου εξωτερικού φορτίου

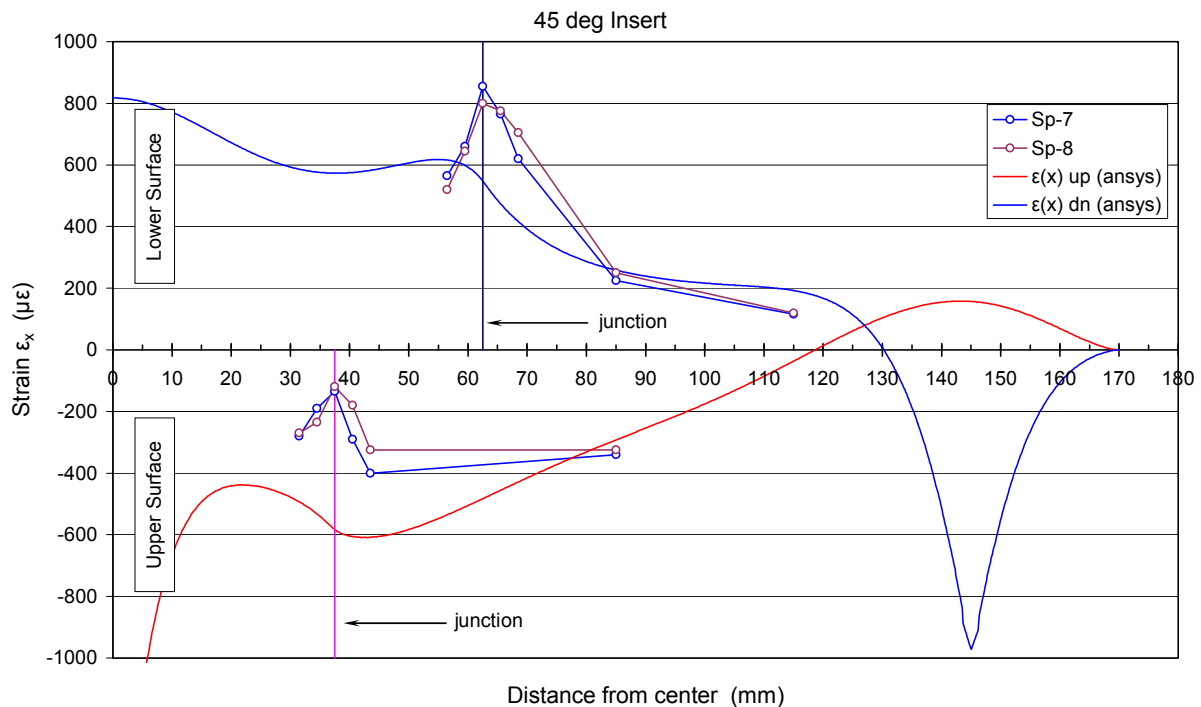


Σχήμα 2.2.9 Παραμόρφωση κατά των διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp5,6 για εξωτερικό φορτίο 600 Newton εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)

Εδώ πλέον, γίνεται αισθητό το πρόβλημα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μοντελοποίηση. Υπάρχει βέβαια και μία κάπως χειρότερη συμπεριφορά στην κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου από ότι είχαμε προηγουμένως, αλλά οι συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι καμπύλες του ANSYS στην μέτρηση των παραμορφώσεων είναι τελείως διαφορετική από ότι έχουμε στις πειραματικές μετρήσεις. Και στο επόμενο μοντέλο (σχ.2.2.10, 2.2.11) για ένθεμα 45^0 (Sp. 7,8), υπάρχει ακριβώς η ίδια κατάσταση, κάτι το οποίο μας οδηγεί στο να αλλάξουμε τρόπο μοντελοποίησης.



Σχήμα 2.2.10 Κατακόρυφη μετατόπιση κέντρου των δοκιμίων Sp7,8 συναρτήσει του επιβαλλομένου εξωτερικού φορτίου



Σχήμα 2.2.11 Παραμόρφωση κατά των διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp7,8 για εξωτερικό φορτίο 600 Newton εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)

- **Αλλαγή τρόπου μοντελοποίησης των σημείων στήριξης του δοκιμίου:**

Όπως ήδη αναφέρθηκε πιο πάνω, η κύλιση στην οποία εδράζεται το δοκίμιο κατά την διάρκεια του πειράματος μοντελοποιήθηκε περιορίζοντας το σημείο του μοντέλου, όπου υπάρχει η κύλιση στο δοκίμιο του πειράματος, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ αφήνεται ελεύθερο να κινηθεί στις υπόλοιπες διευθύνσεις. Αυτό γίνεται στο ANSYS με μία εντολή, μέσω της οποίας το πρόγραμμα κρατάει ένα σημείο του δοκιμίου εμποδίζοντας αυτό και μόνο αυτό να κινηθεί προς την κατακόρυφη διεύθυνση. Στην κύλιση όμως, δεν συμβαίνει ακριβώς αυτό το φαινόμενο, καθώς το δοκίμιο «κυλάει», κατά μία έννοια, πάνω στην στήριξη.

Σκεφτήκαμε ότι ίσως θα ήταν καλύτερο να προσπαθήσουμε να μοντελοποιήσουμε ακριβέστερα τις στήριξης του δοκιμίου. Δηλαδή να σχεδιάσουμε, κατά μία έννοια, σε περιβάλλον ANSYS, το φαινόμενο της κύλισης με τις ιδιότητές του.

Έτσι, βάσει αυτού του σκεπτικού, η μοντελοποίηση της κύλισης στο ANSYS έγινε με χρήση των contact elements. Τα contact elements χρησιμοποιούνται στο ANSYS για να περιγράψουν δύο διαφορετικά υλικά σώματα τα οποία κατά την διάρκεια της εξέλιξης ενός υπό μελέτη φυσικού φαινομένου έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Σε βαθύτερη ανάλυση υπάρχουν τα target elements τα οποία συνήθως θεωρούνται σκληρά και άκαμπτα και τα contact elements τα οποία είναι μαλακά και παραμορφώνονται. Στην παρούσα μοντελοποίηση της κύλισης, η εξωτερική στήριξη σχεδιάστηκε σαν ένα κυκλικό και άκαμπτο σώμα (target elements) το οποίο έρχεται σε επαφή με το μοντελοποιημένο δοκίμιο το οποίο

παραμορφώνεται (*contact elements*) στο σημείο που υπάρχει η πραγματική κύλιση στο πείραμα. Ουσιαστικά με αυτόν τον τρόπο μοντελοποίησης δεν υπάρχει κανένας περιορισμός σε κάποιο μέρος του δοκιμίου, αλλά ο περιορισμός κίνησης εφαρμόζεται στο εξωτερικό και άκαμπτο σώμα το οποίο έρχεται σε επαφή κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με το προς μελέτη δοκίμιο, στο σημείο στήριξης αυτού.

Μπορεί με αυτόν τον τρόπο, το προκύπτουν μοντέλο να περιγράφει πιο ολοκληρωμένα το πραγματικό πείραμα, αλλά παρόλα αυτά, η περιοχή η οποία ουσιαστικά επηρεάζεται από την συγκεκριμένη μοντελοποίηση είναι η κοντινή γειτονιά στην περιοχή που υπάρχει η στήριξη. Έτσι επειδή η περιοχή του δοκιμίου που εμείς μελετάμε είναι πολύ μακριά από την γειτονιά αυτή και συνεπώς δεν υπάρχει καμία επίδραση στα αποτελέσματα που παίρνουμε από τον τρόπο μοντελοποίησης της κύλισης, η προσέγγιση με *contact elements* εγκαταλείφθηκε. Ουσιαστικά υπάρχουν δύο αρνητικά στην σχεδίαση της κύλισης με *contact elements*. Το πρώτο είναι ο χρόνος που απαιτείται για αυτήν καθαυτή την σχεδίαση. Χρειάζεται να γραφούν πολλές εντολές προκειμένου να οριστεί η γεωμετρία της «κατασκευής» (κύλιση) και ακόμα περισσότερες για να οριστούν και να εισαχθούν τα *contact-target elements* στις επιλεγείσες περιοχές του δοκιμίου (πράγμα που δυσκολεύει και την παραμετροποίηση του δοκιμίου, καθώς εξειδικεύει το πρόβλημα). Το δεύτερο είναι ότι η χρήση των *contact-target elements* σημαίνει ότι το ANSYS θα εκτελέσει μη γραμμική λύση του προβλήματος, άρα έχουμε αύξηση του χρόνου επίλυσης της κάθε διαδικασίας, πρόβλημα το οποίο γίνεται πολύ έντονο σε περιπτώσεις τρισδιάστατης (**3-D**) μοντελοποίησης, όπου η εκτέλεση μίας διαδικασίας των μελετώμενων μοντέλων με μη γραμμική λύση υπερβαίνει τις 3 ώρες.

- **Έλεγχος μέτρου ελαστικότητας των περιβλημάτων.**

Θεωρήσαμε ότι ενδεχομένως μία αύξηση των μέτρων ελαστικότητας των εμπλεκόμενων υλικών θα άλλαζε την κατάσταση προς το καλύτερο. Ουσιαστικά όμως, τα υλικά του πυρήνα δύσκολα θα μπορούσαμε να τα ελέγξουμε αφού τις ιδιότητές τους τις λάβαμε από τους κατασκευαστές τους. Τα μόνα μέτρα ελαστικότητας που προσδιορίστηκαν στα εργαστήρια του Ε.Μ.Π. ήταν αυτά των εξωτερικών περιβλημάτων και τα οποία ελέγξαμε ως προς την ορθότητά τους.

Στο κεφάλαιο περιγραφής της πειραματικής διαδικασίας υπάρχει ο πίνακας 2.1.2 που αναφέρει τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών των περιβλημάτων, χωρίς να περιγράφεται ο τρόπος προσδιορισμού αυτών, καθώς αυτό αποτελεί κομμάτι της προγενέστερης εργασίας της Μ. Κολαρίνη. Εδώ ο έλεγχος που κάναμε αρχικά, ήταν αν η περιεκτικότητα γυαλιού στις πλάκες ήταν αυτή που αναφέρεται στην προγενέστερη διπλωματική εργασία. Κόψαμε ένα κομμάτι των περιβλημάτων των δοκιμίων και μετρήσαμε την περιεκτικότητα σε γυαλί. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν παρόμοια με αυτά της διπλωματικής εργασίας της Κολλαρίνη. Ο δεύτερος έλεγχος που κάναμε ήταν να εξετάσουμε τα διαγράμματα σ-ε (τάση-παραμόρφωση) που προέκυψαν από τα πειράματα που έγιναν στην προηγούμενη διπλωματική προκειμένου να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό των περιβλημάτων. Εδώ εντοπίστηκε μία λάθος προσέγγιση στην εκτίμηση των πειραματικών

μετρήσεων. Κάναμε εκ νέου λοιπόν την διαδικασία εκτίμησης του 'E' σε εφελκυσμό από τα διαγράμματα σ-ε και καταλήξαμε στο νέο (και τελικό) μέτρο ελαστικότητας των περιβλημάτων και παραθέτουμε τον αντίστοιχο πίνακα 2.2.1:

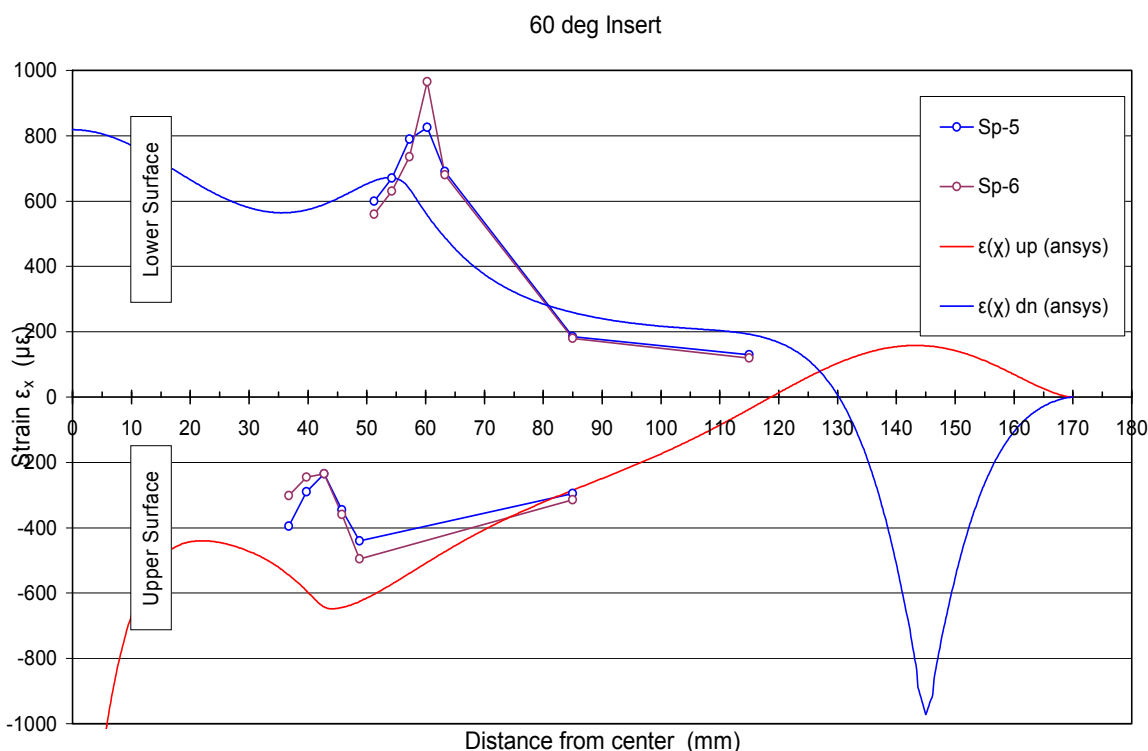
Πίνακας 2.2.1 Αποτελέσματα Ελέγχου Προσδιορισμού Ιδιοτήτων Υλικών Περιβλημάτων

Δοκίμιο	Εφελκυσμός	
	E_T (MPa)	σ_{uT} (MPa)
1	–	–
2	18894	334.5
3	-	-
4	17789	326.2
5	16116	309.3
6	18457	346.3
7	17556	347.7
M.O.	17210	332.8
Απόκλιση (%)	9.6	4.8

Έτσι, από εδώ και στο εξής, το μέτρο ελαστικότητας των περιβλημάτων είναι:

$$E = 17210 \text{ Mpa}$$

Παρότι αυξήσαμε το 'E' όμως, τα αποτελέσματα που έδινε το ANSYS δεν ήταν ικανοποιητικά και δεν διέφεραν πολύ από τα αποτελέσματα που πιο πάνω παρουσιάσαμε. Δηλαδή η εικόνα ήταν πάλι ίδια, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.2.12 που ακολουθεί :



Σχήμα 2.2.12 Παραμόρφωση κατά των διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp5,6 για εξωτερικό φορτίο 600 Newton εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)

- Άλλες απόπειρες

Ακολούθησε μια σειρά διάφορων προσεγγίσεων της μοντελοποίησης των δοκιμίων προκειμένου να επαληθεύσουμε τις πειραματικές μετρήσεις. Ελέγξαμε τα πάχη των περιβλημάτων, το πάχος του πυρήνα, το μήκος του σκληρού ένθετου μέσα στο δοκίμιο, το πλάτος του δοκιμίου. Αλλάξαμε και πειραματιστήκαμε με τις τιμές αυτών των παραγόντων στην μοντελοποίηση αλλά τα αποτελέσματα δεν ήταν ενθαρρυντικά.

Παρατηρήθηκαν επίσης στο δοκίμιο κάποια εγκάρσια και διαμήκη αυλάκια που ήταν χαραγμένα πάνω στον πυρήνα του από άκρη σε άκρη. Τα αυλάκια δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια παρασκευής του δοκιμίου προκειμένου να διευκολύνουν την έγχυση της ρητίνης και ήταν γεμάτα ρητίνη. Απέιχαν 20 mm το ένα από το άλλο τόσο κατά τον εγκάρσιο όσο και κατά τον διαμήκη άξονα και ήταν σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου με 2 mm βάθος και 1 mm μήκος. Έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης και αυτών χωρίς όμως να γίνει κατορθωτό να μοντελοποιηθεί η διασταύρωσή τους στο διάμηκες και το εγκάρσιο επίπεδο.

Μετά και από όλες αυτές τις προσπάθειες, η εικόνα των αποτελεσμάτων που παίρναμε από το ANSYS σε σύγκριση πάντα με τις πειραματικές μετρήσεις ήταν η ίδια εικόνα που παρουσιάσαμε πιο πάνω με κάποιες μικρές αλλαγές που συνέβαιναν τοπικά και

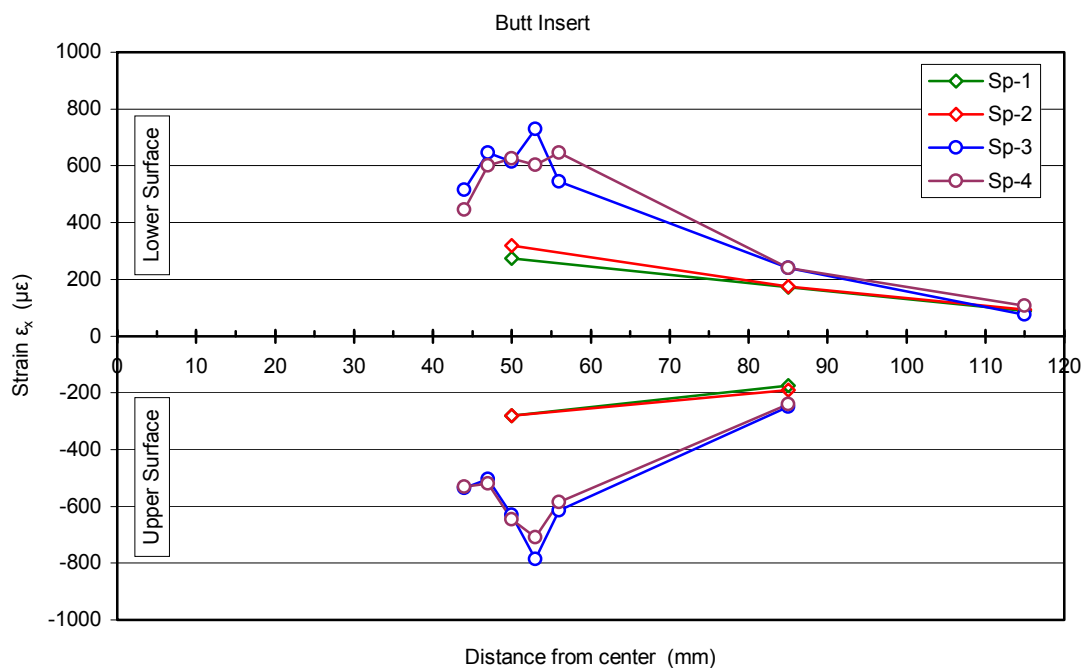
ανάλογα με την περίπτωση. Αλλά σε καμία περίπτωση κάποιο από τα μοντέλα δεν μπορούσε να περιγράψει την συμπεριφορά των δοκιμιών όπως αυτή καταγράφηκε στο πείραμα.

- **Τελική Απόπειρα: Μοντελοποίηση του στρώματος ρητίνης ανάμεσα στον «σκληρό» και «μαλακό» πυρήνα**

Ίσως αυτό το βήμα να μη συνέβαινε ποτέ, καθώς πραγματικά ήταν μία έσχατη ιδέα που θα αποτελούσε την τελευταία προσπάθεια που θα κάναμε προκειμένου να επαληθεύσουμε το πείραμα. Ένα πείραμα του οποίου οι μετρήσεις διαφέρουν ουσιαστικά από τα αποτελέσματα πολλών άλλων αντίστοιχων πειραμάτων που έχουν γίνει σε διάφορα ερευνητικά κέντρα, πειράματα τα οποία μελετηθήκαν και βοήθησαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας και αναφέρονται στην βιβλιογραφική έρευνα.

Το «παράδοξο» με τις μετρήσεις του δικού μας πειράματος. Βάση της βιβλιογραφίας, το αναμενόμενο αποτελέσματα των μετρήσεων θα ήταν η καταγραφή συγκέντρωσης τάσεων στη γειτονιά μετάβασης από τον σκληρό στον μαλακό πυρήνα.

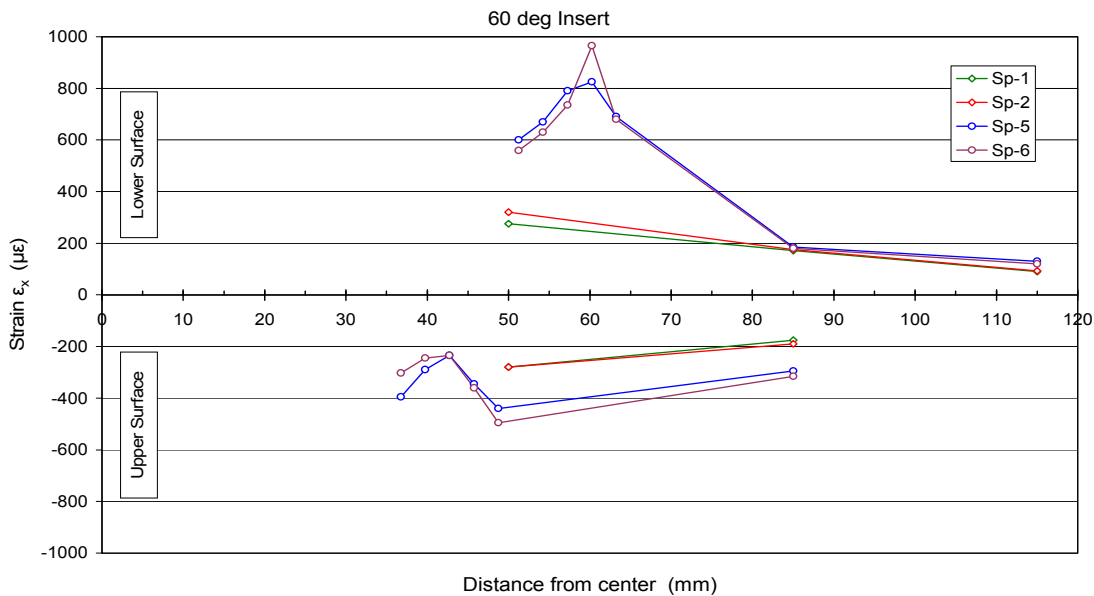
Αυτή η προσδοκία μας, όντως λαμβάνει χώρα στο πείραμα που έγινε για τα δοκίμια με σκληρό ένθετο γωνίας 90^0 μοιρών (*specimens 3,4*), το οποίο φαίνεται στο σχήμα 2.2.13 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.2.13 Διάγραμμα παραμόρφωσης πειραματικού δοκιμίου

Παρατηρείται αύξηση των μετρούμενων τιμών της τάσης καθώς πλησιάζουμε στην περιοχή μετάβασης από τον σκληρό στο μαλακό πυρήνα και μείωση αυτών καθώς απομακρυνόμαστε από την κρίσιμη αυτή περιοχή.

Αλλά στα δοκίμια με σκληρό ένθετο οξείας γωνίας (*scarf insert*), παρατηρείται μεν αύξηση των τάσεων στην εξωτερική επιφάνεια του κάτω περιβλήματος (*lower surface*) στην γειτονία μετάβασης από τον σκληρό στον μαλακό πυρήνα, αλλά παραδόξως μείωση των τιμών τους στην αντίστοιχη περιοχή κατά μήκος του δοκιμίου στην εξωτερική επιφάνεια του άνω περιβλήματος (*upper surface*) :



Σχήμα 2.2.14 Διάγραμμα παραμόρφωσης πειραματικού δοκιμίου

Παρόλα αυτά, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που σχεδιάσαμε κατέγραφε το αναμενόμενο, δηλαδή συγκέντρωση τάσεων στην εξωτερική επιφάνεια και του άνω και του κάτω περιβλήματος στην γειτονία μετάβασης.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 2.2.9 και 2.2.11, που παρουσιάσαμε πιο πάνω, το ANSYS στην κάτω επιφάνεια υπολογίζει αύξηση των τάσεων λίγο αριστερά της περιοχής μετάβασης, ενώ στο πείραμα η κορυφή στις τάσεις εμφανίζεται είτε στο κέντρο είτε λίγο δεξιά της περιοχής μετάβασης και οι μετρούμενες τιμές των συγκεντρώσεων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίζει το ANSYS. Στην άνω επιφάνεια δε, το ANSYS καταγράφει αύξηση των τάσεων στην περιοχή μετάβασης, ενώ στο πείραμα παρατηρείται μείωση των τιμών της τάσης.

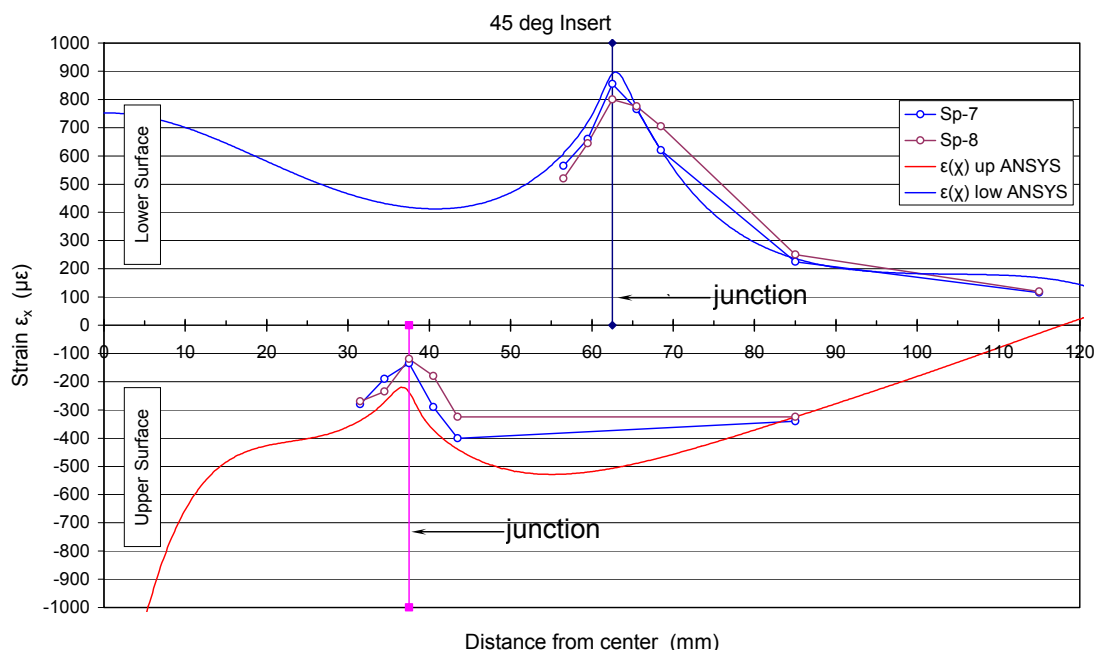
Είναι λογικό να σκεφτεί κανείς ότι η αναμενόμενη συγκέντρωση τάσεων, ορθώς υπολογίζεται από το ANSYS και οποιαδήποτε απόπειρα αλλαγής των ιδιοτήτων των υλικών από τα οποία αποτελείται το δοκίμιο ή αλλαγή του τρόπου σχεδίασης των αντιδράσεων στήριξης ή του τρόπου επιβολής του εξωτερικού φορτίου, δηλαδή συνέχιση των προσπαθειών που αναφέρθηκαν πιο πάνω, δεν θα είχε κάποιο ουσιώδες αποτέλεσμα. Καθώς το πρόβλημα δεν εντοπίζεται στην απόκλιση τιμών μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και αποτελεσμάτων ANSYS, αλλά στην διαφορά της εν γένει «συμπεριφοράς» του δοκιμίου στο πείραμα και στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων αντίστοιχα.

Μπορεί να ήταν δύσκολο να εντοπιστεί, αλλά ο ένοχος αυτού του σφάλματος ήταν ένα λεπτό στρώμα συνδετικής ρητίνης (κόλλα), που υπήρχε ανάμεσα στο σκληρό και τον μαλακό πυρήνα του δοκιμίου, έτσι ώστε να συγκρατούνται κολλημένοι οι δύο πυρήνες.

Από τα 340 mm συνολικού μήκους του δοκιμίου, δεξιά και αριστερά του εγκάρσιου επιπέδου συμμετρίας αυτού και στα όρια του τέλους του σκληρού πυρήνα και αρχής του μαλακού υπήρχε στρώμα πάχους 1 mm περίπου, μίας πολύ πιο σκληρής ρητίνης σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά του πυρήνα. Συγκριτικά αναφέρουμε ότι το σκληρό ένθετο είχε μέτρο ελαστικότητας $E = 110 \text{ MPa}$, ο μαλακός πυρήνας $E = 32 \text{ MPa}$, ενώ η ρητίνη μοντελοποιήθηκε προς $E = 3600 \text{ MPa}$. Η παρουσία της ρητίνης άλλαζε όλο το πρόβλημα. Δεν θα είχε μεγάλη επίδραση η ύπαρξη του στρώματος ρητίνης, αν το σκληρό ένθετο είχε μέτρο ελαστικότητας κοντά σε αυτό της ρητίνης ή μεγαλύτερο αυτού (στην βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί και ένθετα αλουμινίου με μέτρο ελαστικότητας μέχρι και 70000 MPa), αλλά στο δικό μας πείραμα με χρησιμοποιούμενα υλικά πυρήνα τόσο μαλακά, η επιρροή του στρώματος στα αποτελέσματα του πειράματος ήταν καταλυτική.

- Σωστή Μοντελοποίηση και Σύγκριση Πειραματικών Μετρήσεων και Αποτελεσμάτων ANSYS

Ήταν μια πολύ ευχάριστη στιγμή όταν τρέχοντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, προέκυψαν τα αποτελέσματα που ενδεικτικά φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα:

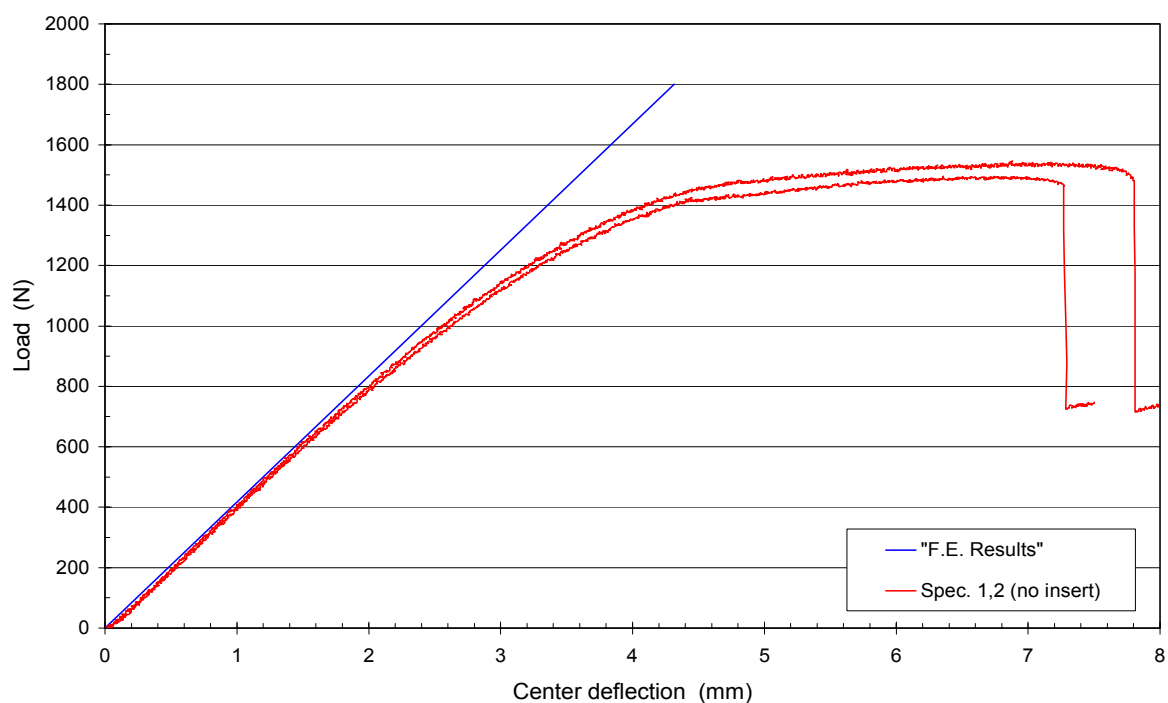


Σχήμα 2.2.15 Χαρακτηριστικό σχήμα σύγκρισης αποτελεσμάτων Π.Σ. με πειραματικές μετρήσεις, μετά την μοντελοποίηση της ρητίνης.

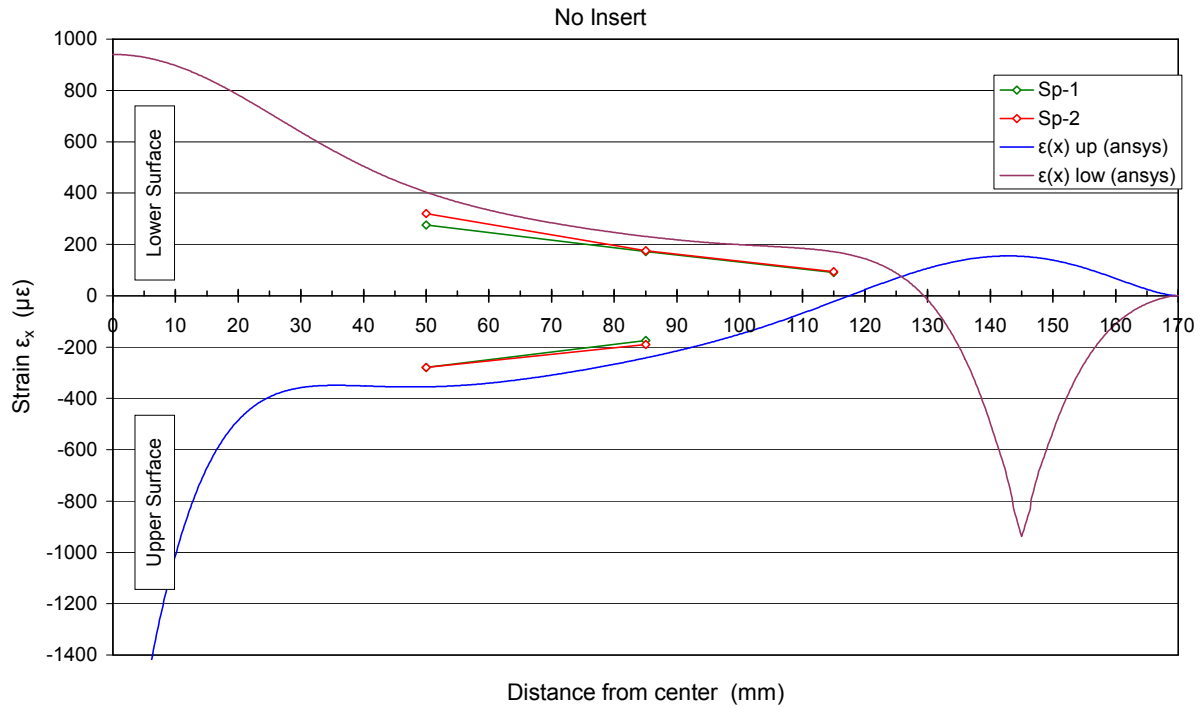
Όπως φαίνεται στο σχήμα, το πρόγραμμα πλέον όχι μόνο καταγράφει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του δοκιμίου του πειράματος στο πείραμα κάμψης τριών σημείων, αλλά οι μετρούμενες τιμές της παραμόρφωσης στις αντίστοιχες θέσεις που υπήρχαν τα *strain gauges* στο πραγματικό δοκίμιο είναι αρκετά έως πολύ ικανοποιητικές.

Έτσι λοιπόν αποδεχτήκαμε ότι αυτή η μοντελοποίηση είναι η σωστή. Ίσως σε αυτό το σημείο, μια επιπλέον έρευνα πάνω στα μέτρα ελαστικότητας ή έλεγχος στα πάχη και της γενικότερης γεωμετρίας καθώς και ιδιομορφίας των υλικών του δοκιμίου να απέφερε ακόμα καλύτερη προσέγγιση ανάμεσα στα αποτελέσματα του ANSYS και των μετρημένων τιμών παραμόρφωσης τοπικά πάνω στα strain gauges των δοκιμίων. Όμως παράγοντες που επηρεάζουν τοπικά την τιμή μίας τάσης ενδέχεται να είναι πολύ σχετικοί με το καθένα από αυτά και μόνο τα δοκίμια που έλαβαν μέρος στο πείραμα και να μην έχουν να κάνουν με την γενικότερη συμπεριφορά αυτού του είδους των δοκιμίων σε κάμψη τριών σημείων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι παράγοντες όπως τοπική αυξομείωση του πάχους των περιβλημάτων- σε άλλες περιοχές μετρήθηκε 2,9 mm ενώ αλλού 3 mm- αύξηση ίσως της πυκνότητας του υλικού πυρήνα τοπικά στο εσωτερικό του δοκιμίου ή η ύπαρξη κάποιου αυλακιού ρητίνης, σαν αυτά που αναφέρθηκαν πιο πάνω, επηρεάζουν τοπικά τις τιμές που παίρνει η τάση στις αντίστοιχες περιοχές. Παρόλα αυτά, αναζήτηση τέτοιων παραγόντων εξειδικεύει την έρευνα σε αυτά και μόνο τα δοκίμια του πειράματος, πράγμα που δεν αποτελεί σκοπό αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Για αυτό το λόγο, η έρευνα επαλήθευσης των πειραμάτων μέσω μοντελοποίησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σταματά εδώ.

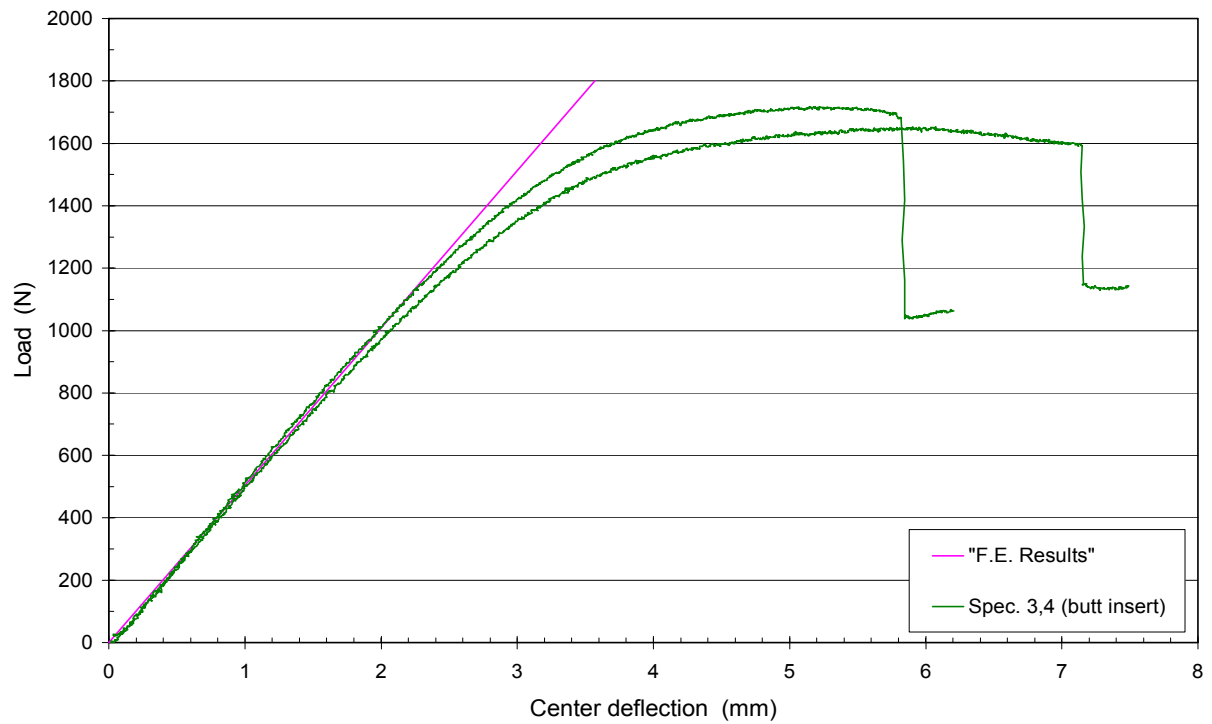
Τώρα θα ακολουθήσει μια σειρά διαγραμμάτων στα οποία θα παρουσιάζεται για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά του ANSYS, όσον αναφορά τις τιμές της παραμόρφωσης σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο του δοκιμίου κατά τον διαμήκη άξονα και την κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου του δοκιμίου.



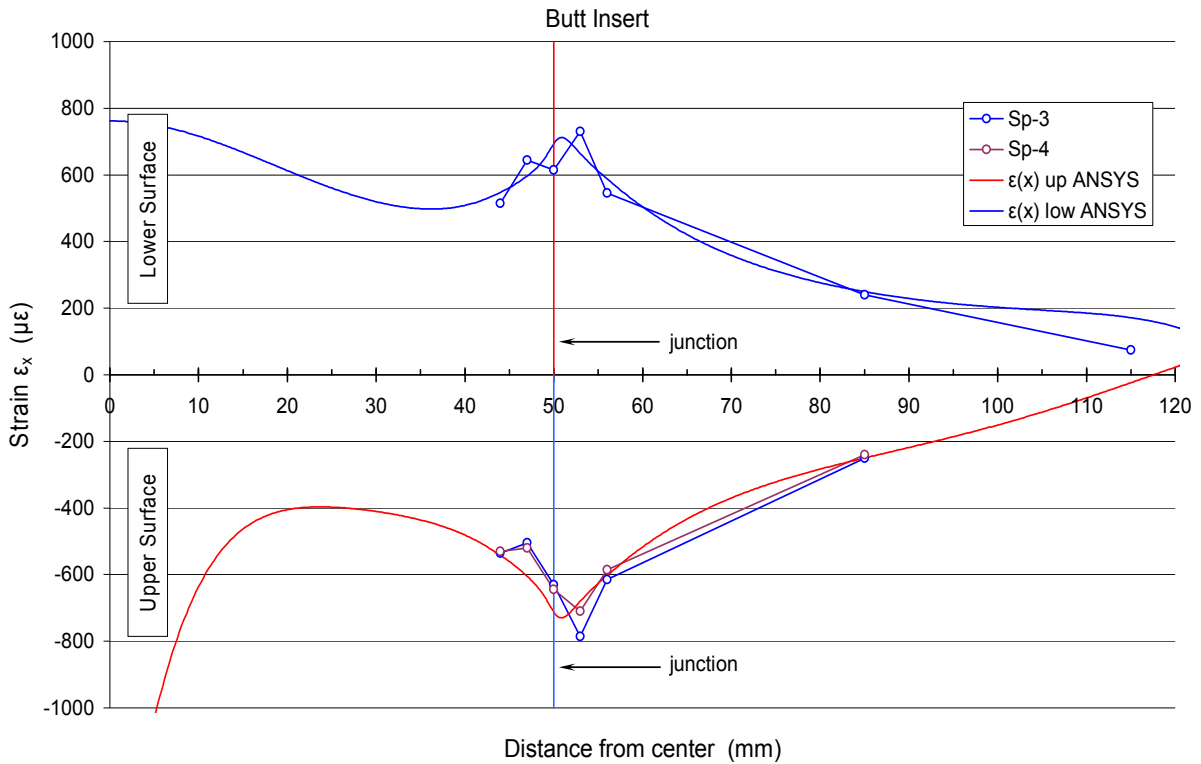
Σχήμα 2.2.16 Κατακόρυφη μετατόπιση κέντρου των δοκιμίων Sp1,2 συναρτήσει του επιβαλλομένου εξωτερικού φορτίου



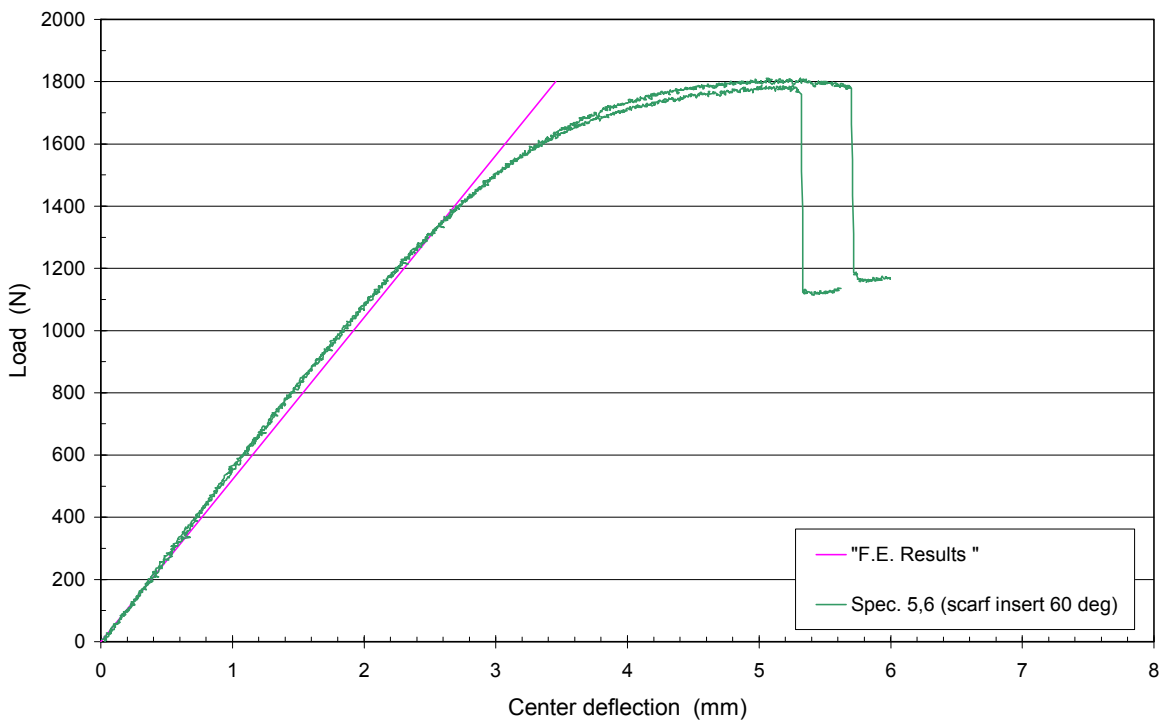
Σχήμα 2.2.17 Παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp1,2 για εξωτερικό φορτίο 600 N εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)



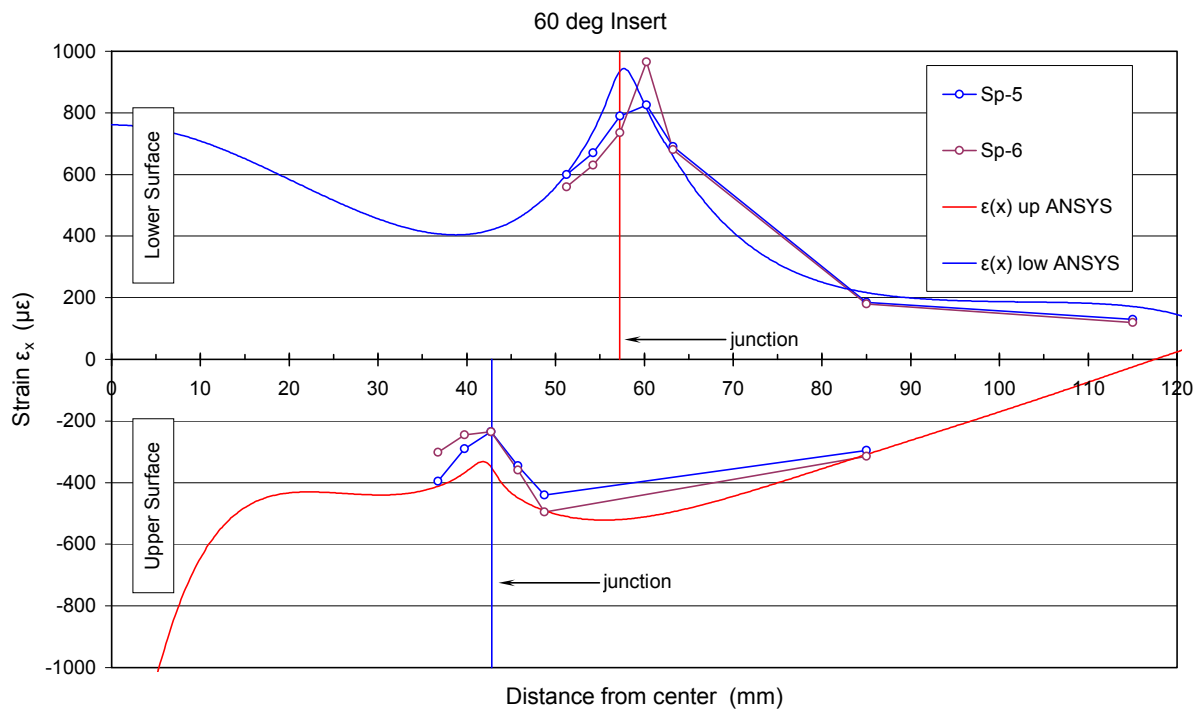
Σχήμα 2.2.18 Κατακόρυφη μετατόπιση κέντρου των δοκιμίων Sp3,4 συναρτήσει του επιβαλλομένου εξωτερικού φορτίου



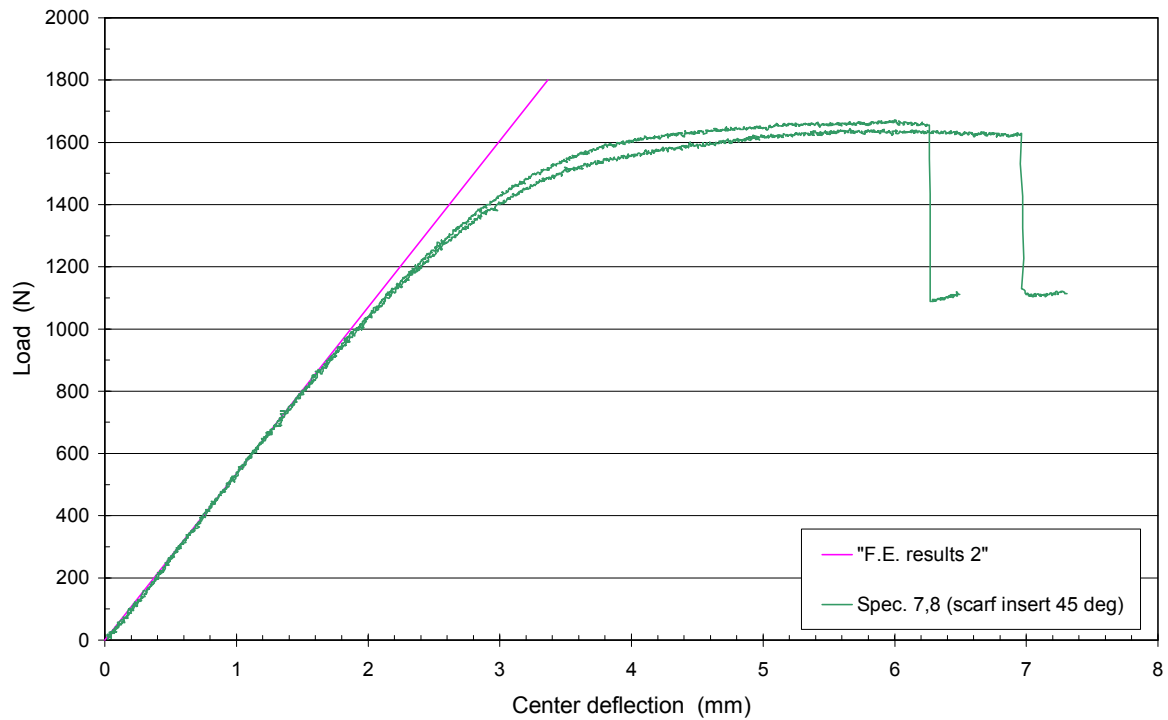
Σχήμα 2.2.19 Παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp3,4 για εξωτερικό φορτίο 600 N εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)



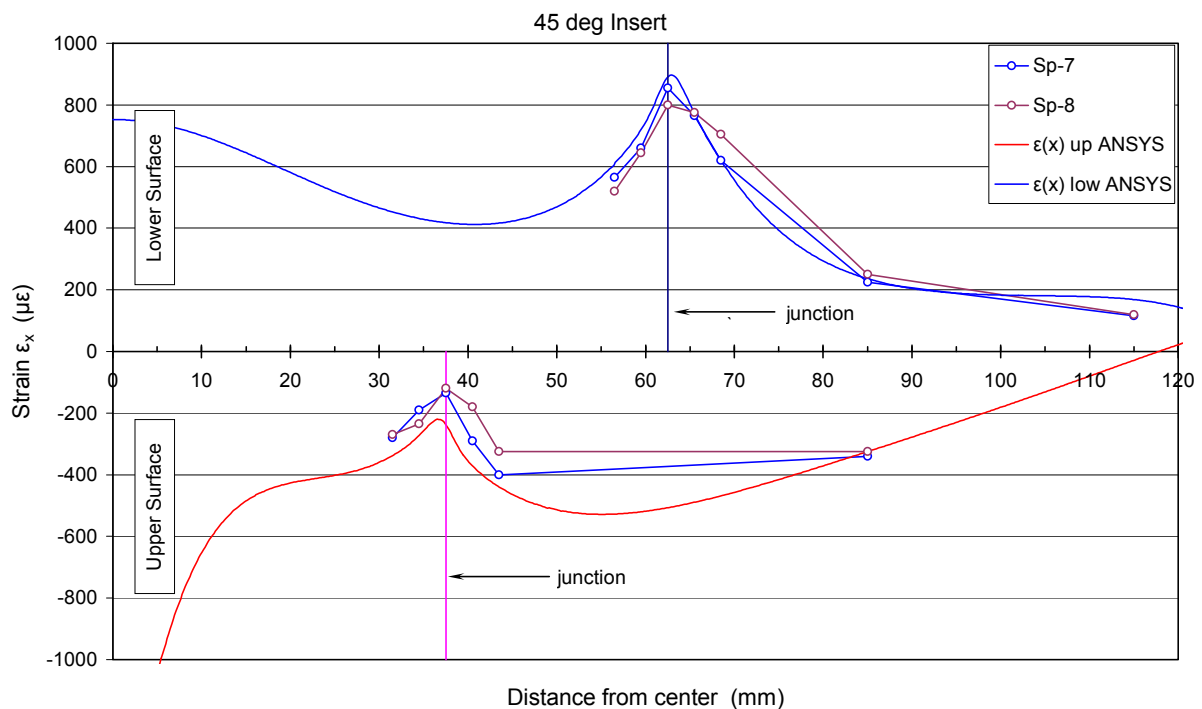
Σχήμα 2.2.20 Κατακόρυφη μετατόπιση κέντρου των δοκιμίων Sp5,6 συναρτήσει του επιβαλλομένου εξωτερικού φορτίου



Σχήμα 2.2.21 Παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp5,6 για εξωτερικό φορτίο 600 N εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)



Σχήμα 2.2.22 Κατακόρυφη μετατόπιση κέντρου των δοκιμίων Sp7,8 συναρτήσει του επιβαλλομένου εξωτερικού φορτίου



Σχήμα 2.2.23 Παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο των δοκιμίων Sp7,8 για εξωτερικό φορτίο 600 N εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)

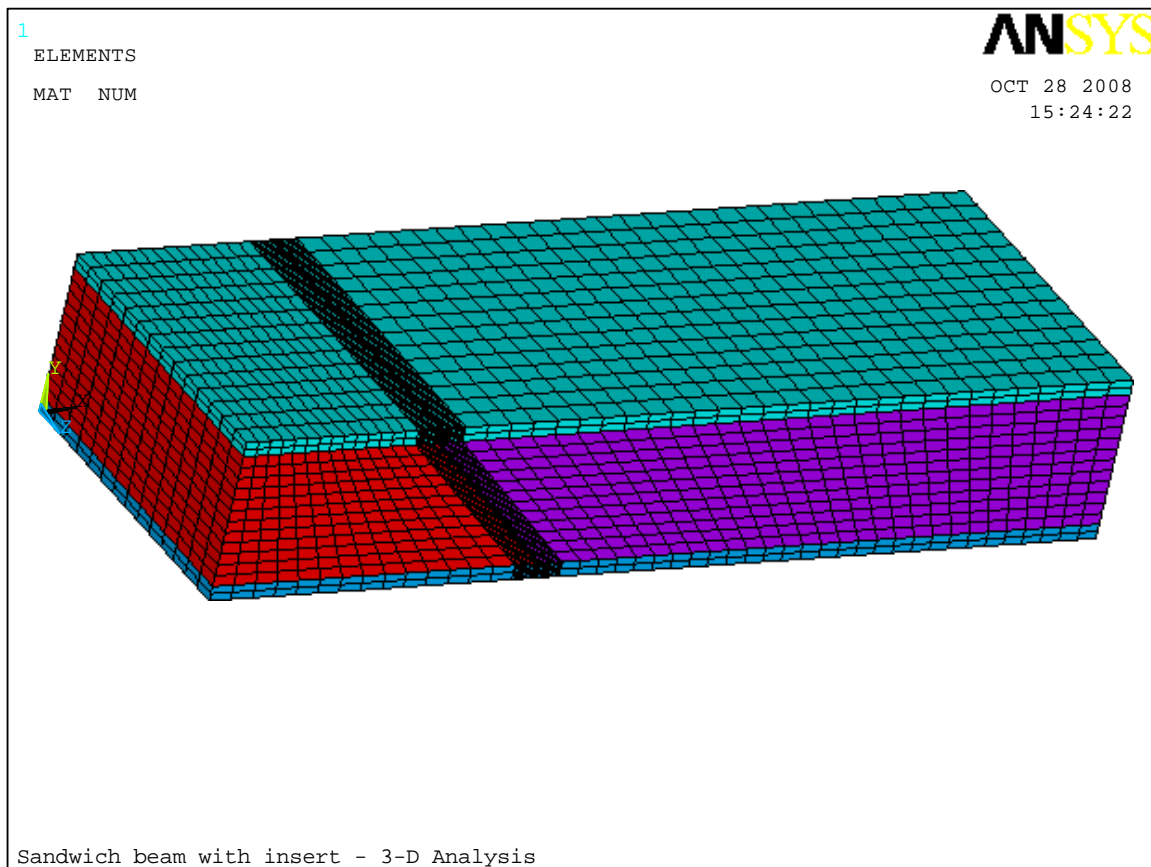
2.3 Τρισδιάστατη Ανάλυση

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω έγινε μοντελοποίηση τόσο σε 2-D, όσο και σε 3-D. Το τρισδιάστατο μοντέλο ακολουθεί την ίδια λογική με το αντίστοιχο των δύο διαστάσεων. Τα υλικά του πυρήνα και των περιβλημάτων είναι τα ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν στην δισδιάστατη ανάλυση. Μοντελοποιούνται και εδώ τα τέσσερα είδη δοκιμίων (χωρίς σκληρό ένθεμα(1), με σκληρό ένθεμα τοποθετημένο σε διάφορες γωνίες επαφής του σκληρού με τον μαλακό πυρήνα(3)).

Πρέπει πάντως να σημειώσουμε ότι όλη η έρευνα περί των στοιχείων του πειραματικού δοκιμίου που έπρεπε να μοντελοποιηθούν και η αναζήτηση του τρόπου της σωστής μοντελοποίησης αυτών, έγινε μόνο κατά την διάρκεια της δισδιάστατης σχεδίασης του μοντέλου. Λίγες φορές μόνο ανατρέξαμε στο τρισδιάστατο μοντέλο, μήπως αυτό μας δώσει πιο σωστά αποτελέσματα όταν το δισδιάστατο μοντέλο δεν ανταποκρίνοταν στις προσδοκίες μας. Όσες φορές έγινε αυτό όμως, τα αποτελέσματα ήταν σχεδόν πανομοιότυπα τόσο στο δισδιάστατο όσο και στο τρισδιάστατο μοντέλο. Αν επιπλέον σκεφτούμε ότι ένας κώδικας δυο διαστάσεων στο ANSYS, τρέχει σε χρόνους από 10 έως και 40 δευτερόλεπτα ενώ ένας αντίστοιχος σε τρεις διαστάσεις από 15 έως 120 λεπτά καταλαβαίνουμε ότι οποιαδήποτε ερευνητική διαδικασία είναι πολύ πιο εύκολο να συμβεί σε μοντέλα 2-D. Αν επιπλέον συγκρίνουμε τα αποτελέσματα 2-D και 3-D, όπως θα κάνουμε πιο κάτω, θα δούμε

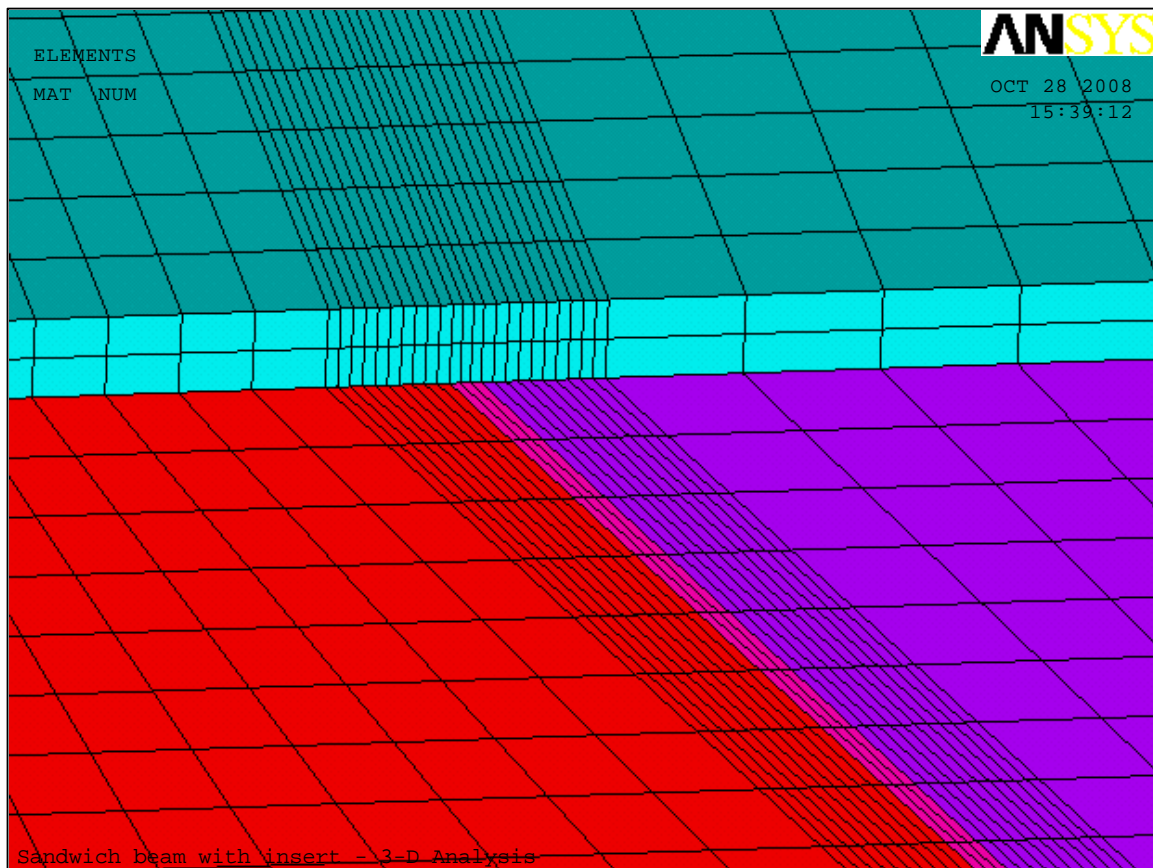
ότι οι λύσεις που δίνει το πρόγραμμα σε ένα ίδιο πρόβλημα, σχεδιασμένο τόσο σε 2-D όσο και σε 3-D, σχεδόν, αν όχι ολοκληρωτικά, ταυτίζονται. Θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε ίσως ότι η τρισδιάστατη σχεδίαση είναι χρήσιμη μόνο σε περιπτώσεις σχεδίασης μοντέλων που τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους δεν μπορούν να αποδοθούν τέλεια στις δύο διαστάσεις.

Τέλος ας αναφερθούμε και στα παραγόμενα στοιχεία (*elements*), του τρισδιάστατου κώδικα καθώς αυτά διαφέρουν ουσιαστικά από το αντίστοιχο δυοδιάστατο μοντέλο. Το τρισδιάστατο μοντέλο που σχεδιάσαμε λοιπόν αποτελείται από ένα πλέγμα με περίπου 14500 στοιχεία (*elements*). Το στοιχείο που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι ένα 3-D στοιχείο με 20 κόμβους (*SOLID 95 3-D, 20 node element, with Midnodes*). Η περιοχή σύνδεσης των δύο πυρήνων, όπου υπάρχει και ο ενδιάμεσος συνδετικός όγκος, που αντιστοιχεί ουσιαστικά στον όγκο που καταλαμβάνει η κόλα (ρητίνη) στο δοκίμιο, έχει προσεχθεί ιδιαίτερα ώστε η πυκνότητα των *στοιχείων* εκεί να είναι μεγάλη σε όλο τον όγκο της ρητίνης και γύρω από αυτόν. Συγκεκριμένα οι κόμβοι που υπάρχουν στις κορυφές των παραλληλεπίπεδων που ορίζουν τα *elements* σε αυτή την περιοχή απέχουν μεταξύ τους απόσταση της τάξεως των **0,4 mm**, ενώ στις ευθείες που υπάρχουν οι ενδιάμεσοι κόμβοι (*midnodes*) η απόσταση αυτή είναι της τάξεως των **0.2 mm**. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το τρισδιάστατο μοντέλο.



Σχήμα 2.3.1 Τρισδιάστατο μοντέλο Π.Σ. των sp. 7,8

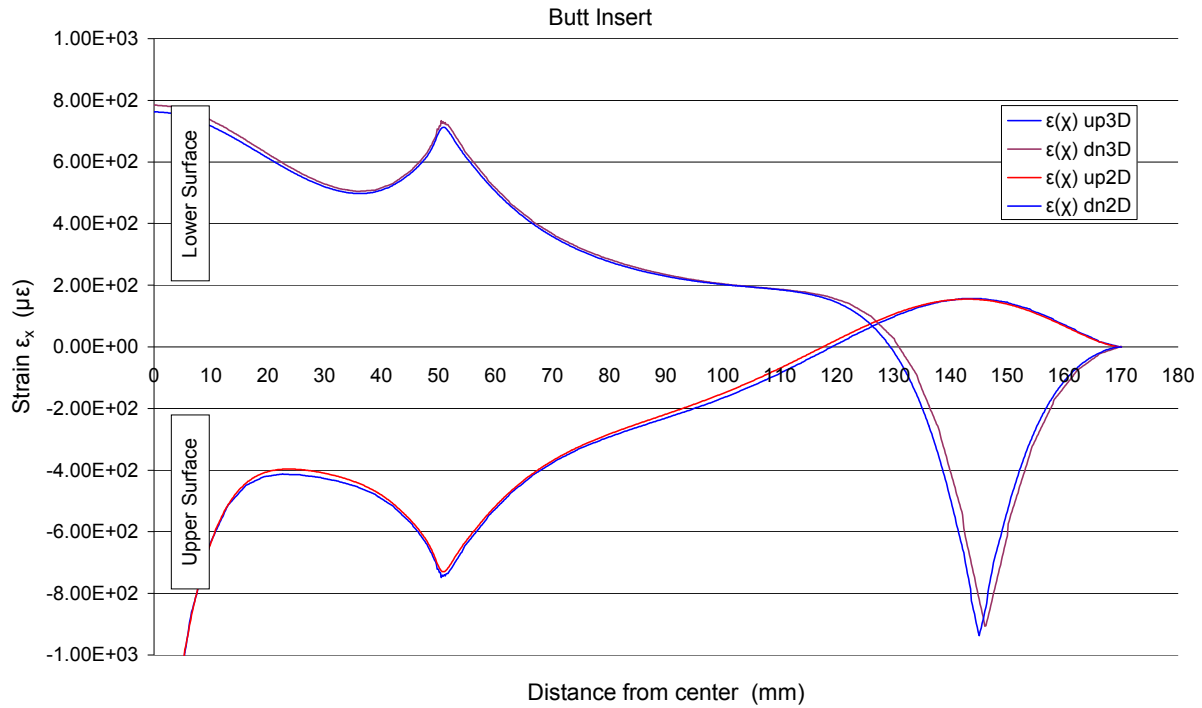
Στο σχήμα 2.3.2 φαίνεται σε μεγέθυνση η περιοχή σύνδεσης των δύο πυρήνων. Είναι φανερή η αύξηση της πυκνότητας των στοιχείων. Με λίγη παρατηρητικότητα, θα δούμε στο κέντρο αυτής της περιοχής, με ροζ χρώμα τον όγκο που καταλαμβάνει η ρητίνη. Δηλαδή, η περιοχή στην οποία κατασκευάζουμε μικρού μεγέθους στοιχεία, εκτείνεται επαρκώς δεξιά και αριστερά της περιοχής ύπαρξης της ρητίνης και αντίστοιχα εκτείνεται και πάνω στον όγκο των περιβλημάτων.



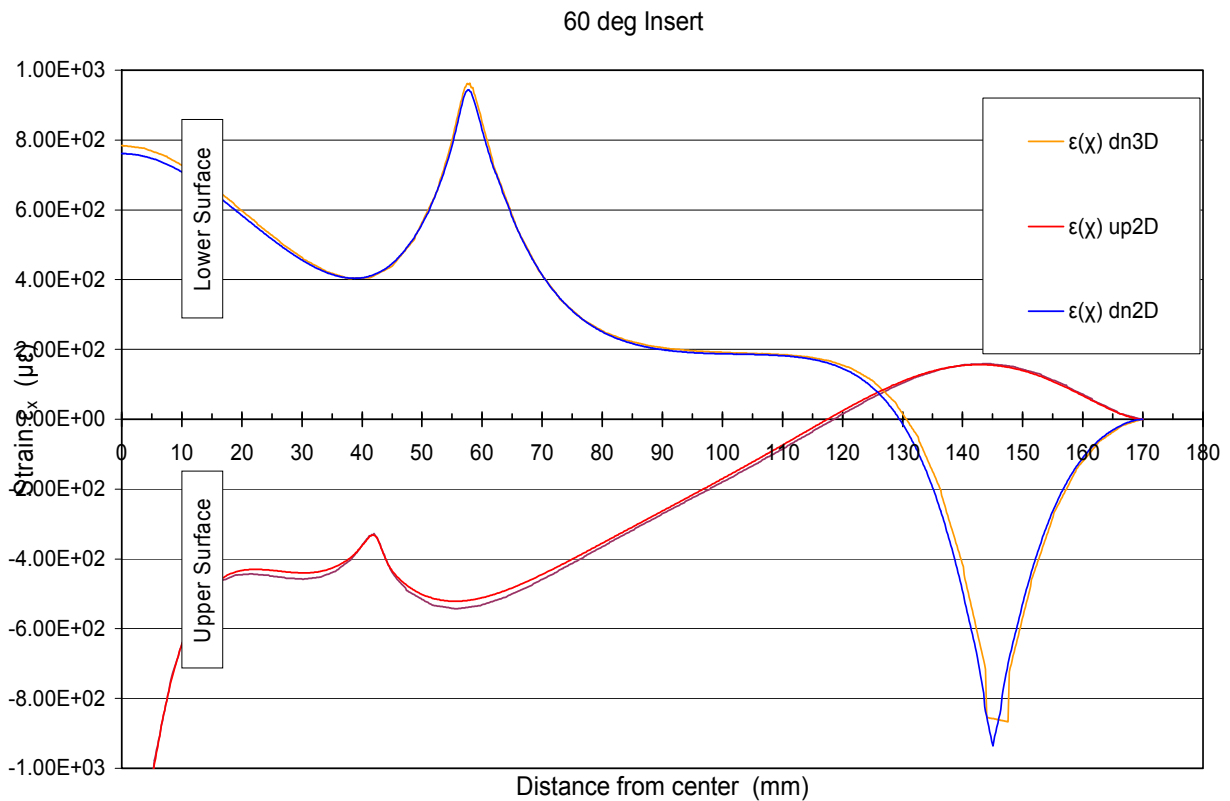
Σχήμα 2.3.2 Μεγέθυνση μοντέλου στην περιοχή συνένωσης των δύο πυρήνων

Ακολουθεί μια σειρά διαγραμμάτων που παρουσιάζει την σύγκριση των δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων F.E. για τα μελετώμενα δοκίμια, όπου και φαίνεται πόσο όμοια είναι τα αποτελέσματα των τρισδιάστατων μοντέλων σε σχέση με τα αντίστοιχα δισδιάστατα.

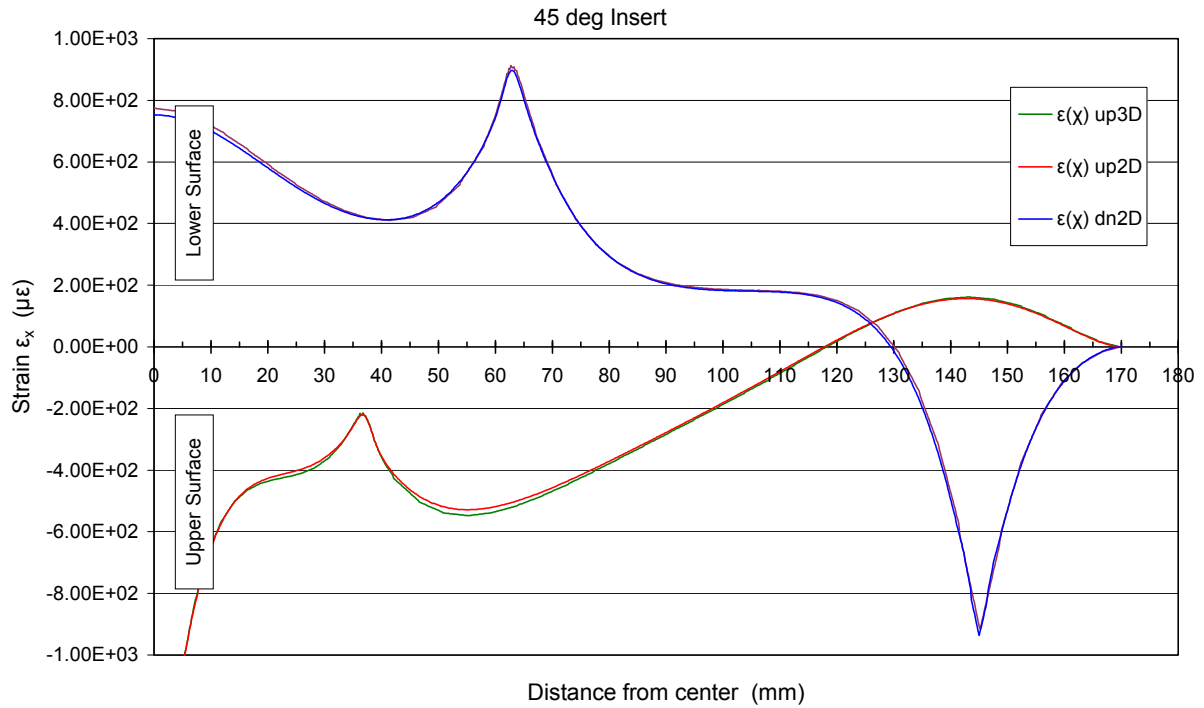
Σχόλιο: Από τα παρακάτω διαγράμματα λείπουν αυτά που παρουσιάζουν την κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου του δοκιμίου συναρτήσει του επιβαλλομένου φορτίου. Λόγω του ότι η διαφορά του αποτελέσματος της συγκεκριμένης μέτρησης είναι της τάξεως του δεύτερου ή του τρίτου δεκαδικού ψηφίου με αποτέλεσμα οι καμπύλες 2-D και 3-D να ταυτίζονται μεταξύ τους, θεωρήθηκε σκόπιμο αυτά τα διαγράμματα να παραληφθούν.



Σχήμα 2.3.3 Παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του δοκιμίου με ορθογώνιο ένθεμα, για εξωτερικό φορτίο 600 N εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)



Σχήμα 2.3.4 Παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του δοκιμίου με ένθεμα οξείας γωνίας 60°, για εξωτερικό φορτίο 600 N εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)



Σχήμα 2.3.5 Παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του δοκιμίου με ένθεμα οξείας γωνίας 45^0 , για εξωτερικό φορτίο $600 N$ εφαρμοζόμενο στο κέντρο (πάνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια)

Κεφάλαιο 3

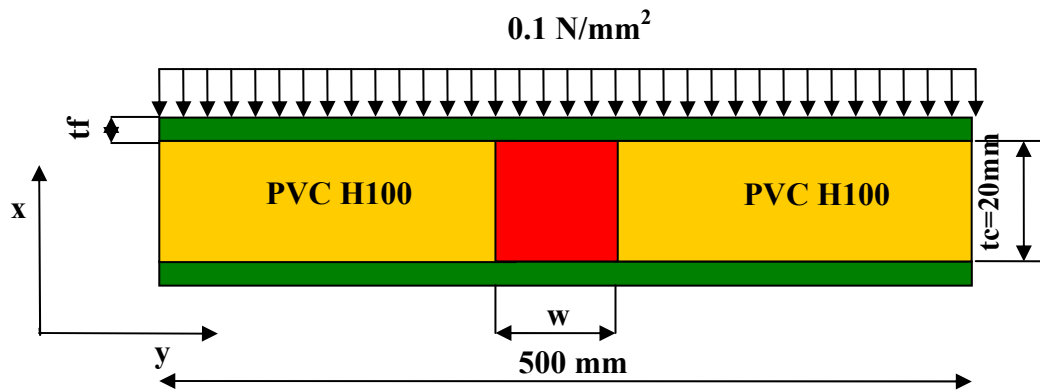
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

3.1 Εισαγωγή

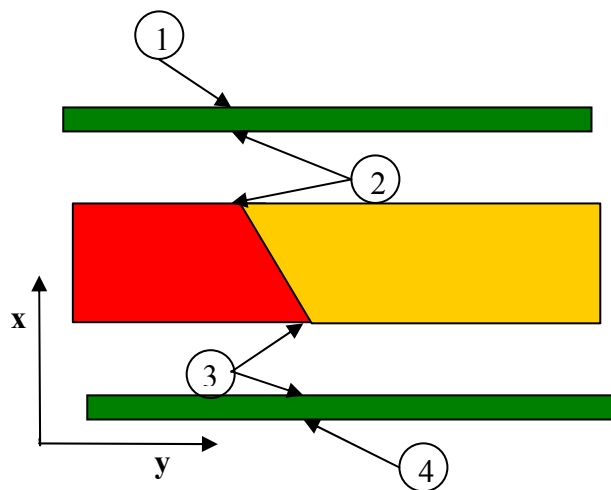
Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η καταγραφή και μελέτη της συμπεριφοράς μιας κατασκευής Sandwich με ένθεμα συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων που έχουν να κάνουν με την γεωμετρία της κατασκευής ή με τις ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν την κατασκευή. Η παραμετρική μελέτη που θα γίνει σε αυτό το κεφάλαιο είναι συνέχεια της μελέτης που παρουσιάσαμε έως τώρα. Δηλαδή, βασιζόμενοι στη σωστή μοντελοποίηση των δοκιμίων του πειράματος που περιγράψαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, θα επεκτείνουμε την έρευνα μέσω παραμετροποίησης της συγκεκριμένης διατομής που είχαν τα δοκίμια που μελετήσαμε. Όπως αναφέραμε έχουμε να κάνουμε με γεωμετρικές παραμέτρους και παραμέτρους που αφορούν τις ιδιότητες των υλικών. Οι γεωμετρικές παράμετροι αφορούν το μήκος και το σχήμα του ενθέματος καθώς και το πάχος των περιβλημάτων, ενώ οι παράμετροι μεταβολής υλικού αφορούν τις ιδιότητες των υλικών των περιβλημάτων και του ενθέματος.

Η μοντελοποίηση και εδώ έγινε με χρήση του προγράμματος ANSYS. Εκτός από τις διαφορές πάνω στη διατομή των δοκιμίων που μόλις αναφέραμε, σε αυτή την μελέτη αλλάζουμε ακόμα δύο παράγοντες. Πρώτον, την στήριξη από κύλιση την αλλάζουμε με πάκτωση της ακραίας πλευράς των δοκιμίων. Και δεύτερον, τον τρόπο φόρτισης, όπου εδώ δεν έχουμε άσκηση συγκεντρωμένου φορτίου, αλλά κατανεμημένη ομοιόμορφη φόρτιση. Το τελευταίο συμβαίνει και λόγω του ότι στις πραγματικές ναυπηγικές κατασκευές έχουμε κατανεμημένη φόρτιση.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα αφορούν γενικά την διαμήκη ορθή τάση σ_y και την διατμητική τάση τ_{xy} στη περιοχή σύνδεσης των δυο πυρήνων (βλ. σχήμα 3.1.1, 3.1.2). Οι περιοχές στις οποίες λαμβάνονται μετρήσεις τάσης είναι: Περιοχή 1 (εξωτερική επιφάνεια άνω περιβλήματος), Περιοχή 2 (εσωτερική επιφάνεια άνω περιβλήματος και άνω τέλος επιφάνειας του πυρήνα), Περιοχή 3 (εσωτερική επιφάνεια κάτω περιβλήματος και κάτω τέλος επιφάνειας του πυρήνα) και Περιοχή 4 (εξωτερική επιφάνεια κάτω περιβλήματος) (βλέπε σχήμα 3.1.1, 3.1.2).



Σχήμα 3.1.1 Μορφή δοκιμίων παραμετρικής μελέτης



Σχήμα 3.1.2 Περιοχές μέτρησης τάσεων

3.2 Γεωμετρία και Παράμετροι των δοκιμίων

Η παραμετρική ανάλυση γίνεται σε μια αμφίπακτη δοκό με ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο. Τα γεωμετρικά στοιχεία που παραμένουν σταθερά κατά την διάρκεια της μελέτης είναι το μήκος της δοκού (L) 500 mm, το πλάτος (B) 50 mm, και το πάχος του πυρήνα (t_c) 20 mm. Θεωρούμε επίσης ότι έχουμε συμμετρικά περιβλήματα. Από τα υλικά τώρα, αυτό που διατηρείται σταθερό, είναι το υλικό του κανονικού πυρήνα, ο οποίος μοντελοποιείται ως αφρός PVC H100 πυκνότητας 100 kg/m^3 . Στο σχήμα 3.1.1 φαίνεται η διατομή των δοκιμίων και τα στοιχεία που παραμένουν σταθερά σε αυτή, είτε γεωμετρικά, είτε ιδιοτήτων. Φαίνεται επίσης η ομοιόμορφη πίεση, η οποία ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια του άνω περιβλήματος και έχει τιμή ίση προς 0.1 N/mm^2 .

Στον πίνακα 3.2.1 που ακολουθεί, φαίνονται αναλυτικά οι τιμές των παραμέτρων που έχουν να κάνουν με την παραμετροποίηση της διατομής. Αναφέρουμε ότι στην παραμετρική μελέτη για λόγους ευκολίας σύνδεσης με την βιβλιογραφία χρησιμοποιήσαμε αγγλική ορολογία.

Σημείωση: Οι λόγοι που φαίνονται στον πίνακα 3.2.1 και έχουν να κάνουν με τις ιδιότητες των υλικών, προσπαθούν να περιγράψουν συγκεκριμένα υπαρκτά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά σε κατασκευές **sandwich**, είτε ως υλικά περιβλημάτων ή υλικά πυρήνα ή υλικά ενθέματος. Πιο αναλυτικά στον πίνακα 3.2.2 παρουσιάζονται τα υλικά που μοντελοποιήσαμε στα δοκίμια αυτής της μελέτης με τις μηχανικές τους ιδιότητες.

3.2.1 Πίνακας τιμών Παραμέτρων

Παράμετροι	Τιμές
t_f/t_c	1/20, 1/13
w/t_c	2, 4
θ	60°, 90°
E_{ch}/E_{cs}	3, 50, 500
E_f/E_{cs}	120, 500

- t_f/t_c : είναι ο λόγος του πάχους των περιβλημάτων (*thickness of faces- t_f*) προς το πάχος του πυρήνα (*thickness of core – t_c*). Στην μελέτη που κάναμε διατηρήσαμε σταθερό το πάχος του πυρήνα : $t_c = 20 \text{ mm}$. Έτσι μεταβάλλοντας τα πάχη των περιβλημάτων υπάρχουν δύο περιπτώσεις για τον λόγο αυτό: (α) $t_f/t_c = 1/13$, (β) $t_f/t_c = 1/20$.

Οι επιλεγθείσες τιμές για τους λόγους, έχουν να κάνουν με την επιλογή λεπτών (λόγος (β)) ή την επιλογή σχετικά παχιών (λόγος (α)) περιβλημάτων.

- w/t_c : είναι ο λόγος του μήκους του σκληρού ενθέματος μέσα στο πυρήνα προς το πάχος του πυρήνα. Υπάρχουν πάλι δύο περιπτώσεις : (α) $w/t_c = 2$, (β) $w/t_c = 4$. Εδώ ο λόγος (α) αντιστοιχεί κοντά ενθέματα, ενώ ο λόγος (β) σε μακριά.

- E_f/E_c : είναι ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας των περιβλημάτων προς το μέτρο ελαστικότητας του πυρήνα. Διατηρούμε σταθερό το μέτρο ελαστικότητας του πυρήνα προς $E_c = 125$ MPa. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε πυρήνα υλικού PVC H100 (βλ. πίνακα 3.2.2) Διακρίνουμε και εδώ δύο περιπτώσεις:

(α) $E_f/E_c = 120$, (β) $E_f/E_c = 500$

Ο λόγος (α) αντιστοιχεί σε σύνθετο υλικό περιβλημάτων (υαλοϋφασμα με πολυεστέρα) και ο λόγος (β) σε περιβλήματα αλουμινίου (βλ. πίνακα 3.2.2)

- E_{ch}/E_{cs} : είναι ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας του σκληρού ενθέματος προς το μέτρο ελαστικότητας του κανονικού πυρήνα. Εδώ διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

(α) $E_{ch}/E_{cs} = 3$, (β) $E_{ch}/E_{cs} = 50$, (γ) $E_{ch}/E_{cs} = 500$

Ο λόγος (α) αντιστοιχεί σε αφρώδες υλικό ενθέματος PVC H200, ο λόγος (β) σε ξύλο κοντραπλακέ, ενώ ο λόγος (γ) σε ένθεμα αλουμινίου (βλ πίνακα 3.2.2).

- θ : η γωνία 'θ' καθορίζει αν έχουμε ορθογώνιο ένθεμα, τότε $\theta = 90^\circ$, ή αν έχουμε τραπεζοειδές ένθεμα οπότε $\theta = 60^\circ$

3.2.2 Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων υλικών διατομής

	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	Μέτρο Διάτμησης G (MPa)	Λόγος Poisson's ν
PVC H100	125	40	0.32
E-glass	15000	3500	0.30
Al	70000	26316	0.32
PVC H200	310	116	0.32
Plywood	7000	1000	0.32

3.3. Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που σχεδιάσαμε σε αυτή την ενότητα, ομοιάζει πάρα πολύ με αυτό που σχεδιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην μελέτη που έγινε για την επιβεβαίωση του πειράματος. Ο σκοπός μας άλλωστε ήταν να βασιστούμε στο μοντέλο του πειράματος, αφού γνωρίζαμε ότι αυτό βγάζει σωστά αποτελέσματα. Οι διαφορές που υπάρχουν στη σχεδίαση αυτής της μελέτης, είναι όπως προαναφέραμε στην εξωτερική στήριξη του μοντέλου, όπου η κύλιση μετατράπηκε σε πάκτωση της ακραίας πλευράς και το συγκεντρωμένο φορτίο που το αλλάξαμε με κατανεμημένη φόρτιση της άνω πλευράς του δοκιμίου. Επιπλέον αλλάξαμε και τα στοιχεία του πλέγματος του μοντέλου. Χρησιμοποιήσαμε 4-κομβά δυσδιάστατα στοιχεία (Plane 42 , 4-node 2-D element), ώστε να έχουμε καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Δηλαδή στη θέση που το 8-κομβό στοιχείο έχει ενδιάμεσο κόμβο (midnode) το 4-κομβό έχει τον κόμβο της κορυφής του ορθογωνίου

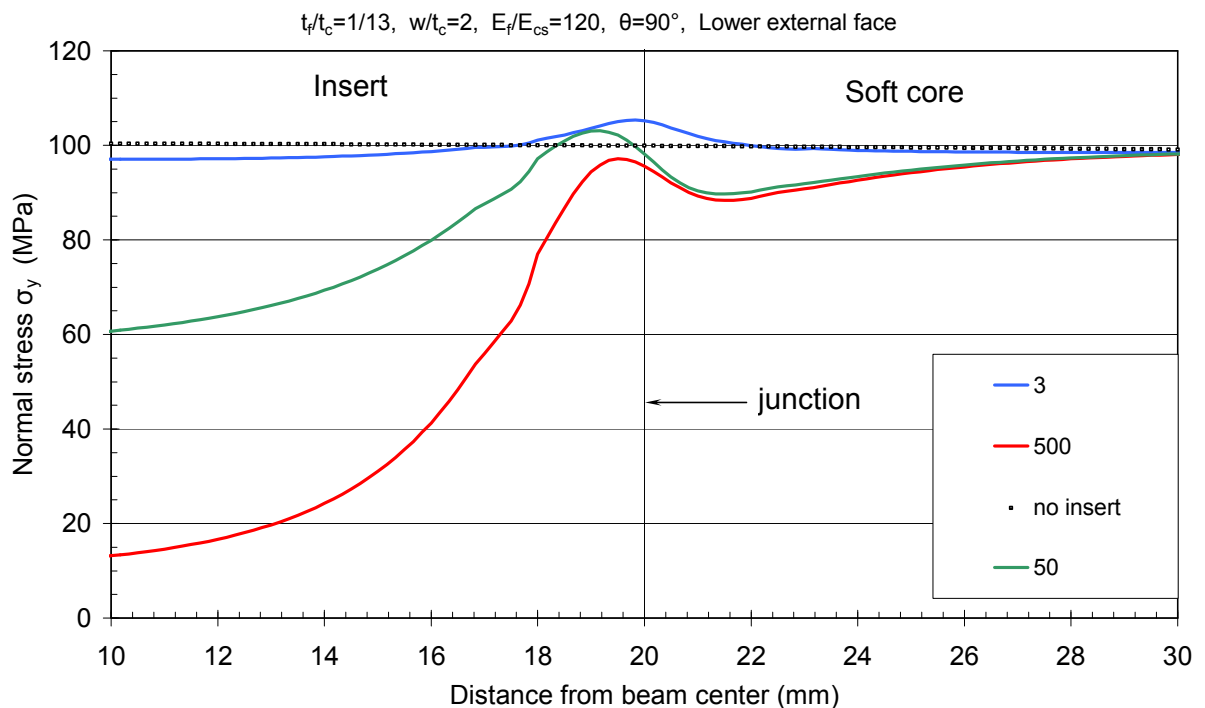
που αποτελείται. Αυτό με την προϋπόθεση ότι θα χρησιμοποιήσουμε διπλάσιο αριθμό 4-κομβων στοιχείων από τον αριθμό των 8-κομβων, όπως και κάναμε. Δηλαδή διπλασιάσαμε τον αριθμό των στοιχείων του πλέγματος του μοντέλου.

3.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται σε πέντε ενότητες (Α,Β,Γ,Δ,Ε) για λόγους ευκολίας:

- «Ενότητα Α» γίνεται υπολογισμός της ορθής τάσης σ_x , στην άνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων (Περιοχές 1,4)
- «Ενότητα Β» γίνεται υπολογισμός της ορθής τάσης σ_x , στην άνω και κάτω εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων (Περιοχές 2,3)
- «Ενότητα Γ» γίνεται υπολογισμός της διατμητικής τάσης τ_{xy} στην άνω και κάτω εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων (Περιοχές 2,3)
- «Ενότητα Δ» γίνεται υπολογισμός της ορθής τάσης σ_x του πυρήνα στην άνω και κάτω (εσωτερική) επιφάνεια επαφής του πυρήνα με τα περιβλήματα (Περιοχές 2,3)
- «Ενότητα Ε» γίνεται υπολογισμός διατμητικής τάσης τ_{xy} του πυρήνα στην άνω και κάτω (εσωτερική) επιφάνεια επαφής του πυρήνα με τα περιβλήματα (Περιοχές 2,3)

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με μορφή διαγραμμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί για παράδειγμα :



Σχήμα 3.4.1 Χαρακτηριστικό διάγραμμα παρουσίασης αποτελεσμάτων παραμετρικής μελέτης

Πριν περάσουμε στην ανάλυση του σχήματος 3.3.1, αναφέρουμε πάλι ότι έγινε χρήση αγγλικής ορολογίας για λόγους ευκολίας.

Έτσι λοιπόν, στο πάνω μέρος του διαγράμματος υπάρχει η λεζάντα που αναφέρει τις ιδιότητες του δοκιμίου:

- t_f/t_c , w/t_c , E_f/E_c , θ (βλ. Πίνακα 3.2.1)

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι οι παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιούνται και για την ονοματολογία των διαγραμμάτων και των δοκιμίων. Έτσι για παράδειγμα το διάγραμμα 13-4-120-90, είναι το διάγραμμα για τα δοκίμια με ορθογώνιο ένθεμα ($\theta = 90^\circ$) και: $t_f/t_c = 13$, $w/t_c = 4$, $E_f/E_c = 120$, ενώ το δοκίμιο 13-4-120-3-90 είναι το δοκίμιο με ορθογώνιο ένθεμα ($\theta = 90^\circ$) και: $t_f/t_c = 13$, $w/t_c = 4$, $E_f/E_c = 120$ και λόγο $E_{ch}/E_{cs} = 3$. Για ευκολία πολλές φορές το δοκίμιο 13-4-120-3-90, ονομάζεται και δοκίμιο 3 του διαγράμματος 13-4-120-90.

Στην ίδια λεζάντα πιο δεξιά υπάρχει ο όρος : *Lower External face* . Αυτό δηλώνει την περιοχή που γίνονται οι μετρήσεις τάσης (βλ. σχήμα 3.1.2). Υπάρχουν οι εξής περιπτώσεις :

- Lower external face : Εξωτερική επιφάνεια κάτω περιβλήματος (περιοχή 4)
- Upper external face : Εξωτερική επιφάνεια άνω περιβλήματος (περιοχή 1)
- Lower internal face : Εσωτερική επιφάνεια κάτω περιβλήματος (περιοχή 3)
- Upper internal face : Εσωτερική επιφάνεια άνω περιβλήματος (περιοχή 2)
- Lower face-core interface : Κάτω επιφάνεια σύνδεσης πυρήνα περιβλήματος (περιοχή 3). Οι μετρήσεις καταγράφουν τις τάσεις πάνω στα υλικά του πυρήνα.
- Upper face-core interface : Άνω επιφάνεια σύνδεσης πυρήνα περιβλήματος (περιοχή 2). Οι μετρήσεις καταγράφουν τις τάσεις πάνω στα υλικά του πυρήνα.

Αριστερά του διαγράμματος υπάρχει η λεζάντα : Normal stress σ_y (MPa), που δηλώνει το είδος της τάσης που μετράτε. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις :

- Normal stress σ_y (MPa) : Ορθή τάση κατά το διάμηκες επίπεδο.
- Shear stress σ_{xy} (MPa) : Διατμητική τάση κατά τον διάμηκες και κατακόρυφο άξονα..

Μέσα στο διάγραμμα στην περιοχή 20 mm από το κέντρο, υπάρχει μία ευθεία γραμμή που ορίζεται ως «*junction*». Αυτή η γραμμή ορίζει την περιοχή που βρίσκεται η συνδετική ρητίνη που συνδέει τον κανονικό πυρήνα με το σκληρό ένθεμα. Η θέση αυτής της γραμμής εξαρτάται από το μήκος του ενθέματος (w) και το είδος του ενθέματος (θ). Αριστερά της γραμμής «*junction*» υπάρχει ο όρος «*Insert*», που δηλώνει ότι σε αυτή την περιοχή υπάρχει το ένθεμα, ενώ δεξιά υπάρχει ο όρος «*Soft core*», που δηλώνει ότι περάσαμε στην περιοχή του κανονικού πυρήνα.

Τέλος, κάτω δεξιά στο διάγραμμα υπάρχει μία ετικέτα που ονοματίζει τις καμπύλες του διαγράμματος. Αναφέρουμε ότι καθένα διάγραμμα περιέχει τις μετρήσεις από τρία είδη δοκιμίων και επιπλέον το δοκίμιο «no insert» που είναι το δοκίμιο χωρίς ένθεμα.

«Μπλε καμπύλη 3»: Δηλώνει την μέτρηση τάσης για το δοκίμιο του αντίστοιχου διαγράμματος (εδώ13-2-120-90) με λόγο: $E_{ch}/E_{cs}=3$.

«Πράσινη καμπύλη 50»: Δηλώνει την μέτρηση τάσης για το δοκίμιο του αντίστοιχου διαγράμματος (εδώ13-2-120-90) με λόγο: $E_{ch}/E_{cs}=50$.

«Κόκκινη καμπύλη 500»: Δηλώνει την μέτρηση τάσης για το δοκίμιο του αντίστοιχου διαγράμματος (εδώ13-2-120-90) με λόγο: $E_{ch}/E_{cs}=500$.

Συντελεστής Συγκέντρωσης Τάσης: Για καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θεσπίσαμε έναν συντελεστή 'k'. Ο συντελεστής αυτός περιγράφει την συγκέντρωση τάσεων που εμφανίζουν τα δοκίμια με σκληρό ένθεμα. Προκύπτει από τον λόγο της μέγιστης τιμής της τάσης που παρουσιάζει ένα δοκίμιο με σκληρό ένθεμα στην περιοχή σύνδεσης των δύο πυρήνων, προς την τιμή της τάσης που θα είχε το δοκίμιο στην ίδια θέση αν δεν υπήρχε το σκληρό ένθεμα. Όπως θα φανεί πιο κάτω, έγινε χρήση του συντελεστή 'k', μόνο στις ενότητες «Α», «Β», καθώς στις υπόλοιπες ενότητες οι τιμές της τάσεις για τα δοκίμια χωρίς ένθεμα ήταν πολύ μικρές και αμελητέες σε σχέση με τις τάσεις που εμφανίζουν τα δοκίμια με ένθεμα. Θα ήταν δε, παράλογο να συγκρίνουμε τις τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα πολύ σκληρό υλικό, όπως αυτό του ενθέματος, με ένα πολύ μαλακό, όπως αυτό του κανονικού πυρήνα.

Το συντελεστή 'k', τον παρουσιάζουμε με μορφή πινάκων. Εδώ παραθέτουμε για παράδειγμα τον πίνακα 3.4.1.

Πίνακας 3.4.1.

σχ a4		13-2-90-120	
E_{ch}/E_{cs}	3	50	500
k	1.05	1.03	0.97

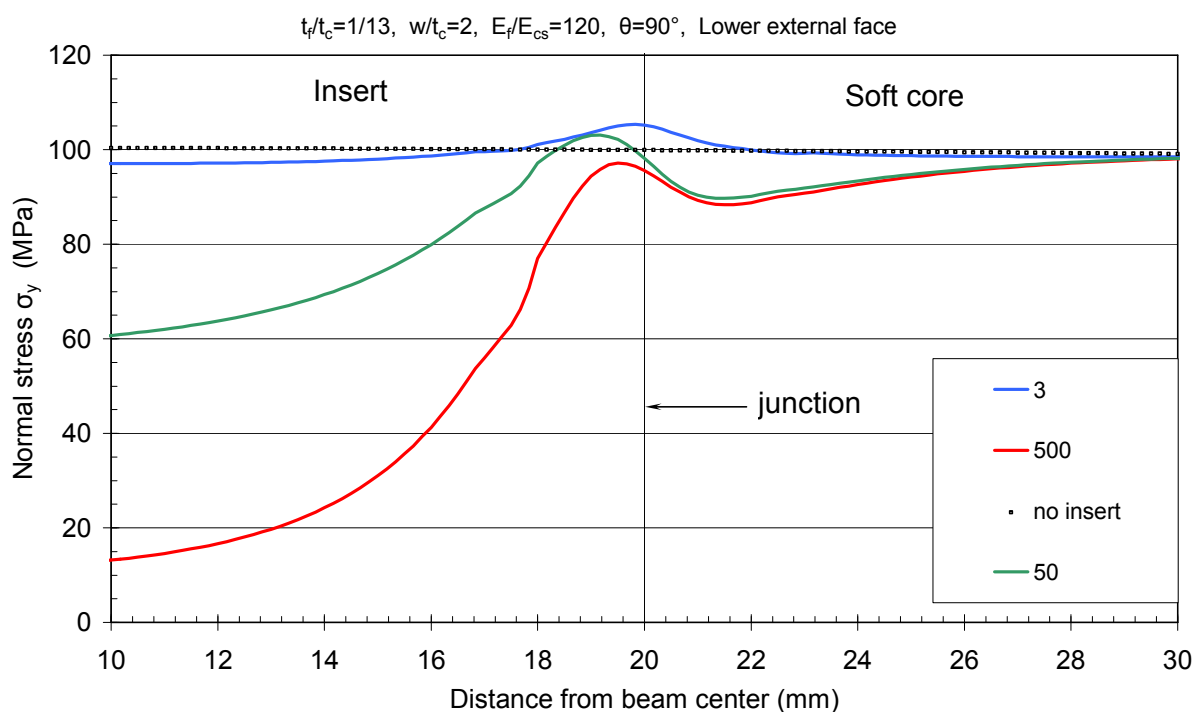
Στην πρώτη σειρά και πρώτη στήλη του πίνακα βλέπουμε να γράφει "σχ a4". Αυτό σημαίνει ότι αναφερόμαστε στα διαγράμματα μέτρησης ορθής τάσης (σχ) στην (area 4) «Περιοχή 4» (βλ. σχ. 3.1.2). Στην πρώτη σειρά δεύτερη στήλη υπάρχει το "13-2-90-120". Αυτό δηλώνει σε πιο διάγραμμα γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή (βλ. πιο πάνω ονοματολογία διαγραμμάτων). Στη δεύτερη σειρά του πίνακα υπάρχει ο λόγος " E_{ch}/E_{cs} " (βλ. ανάλυση πίνακα 3.2.1). Εδώ, σε συνδυασμό με το στοιχείο "13-2-90-120" καταλαβαίνουμε ότι αναφερόμαστε στο δοκίμιο 3 του διαγράμματος "13-2-90-120" ή στο δοκίμιο 50 του ίδιου διαγράμματος ή στο δοκίμιο 500 του ίδιου διαγράμματος. Τέλος, στην τρίτη σειρά του πίνακα υπάρχουν οι τιμές του συντελεστή 'k' για καθένα από τα τρία δοκίμια του διαγράμματος.

ΕΝΟΤΗΤΑ «Α»

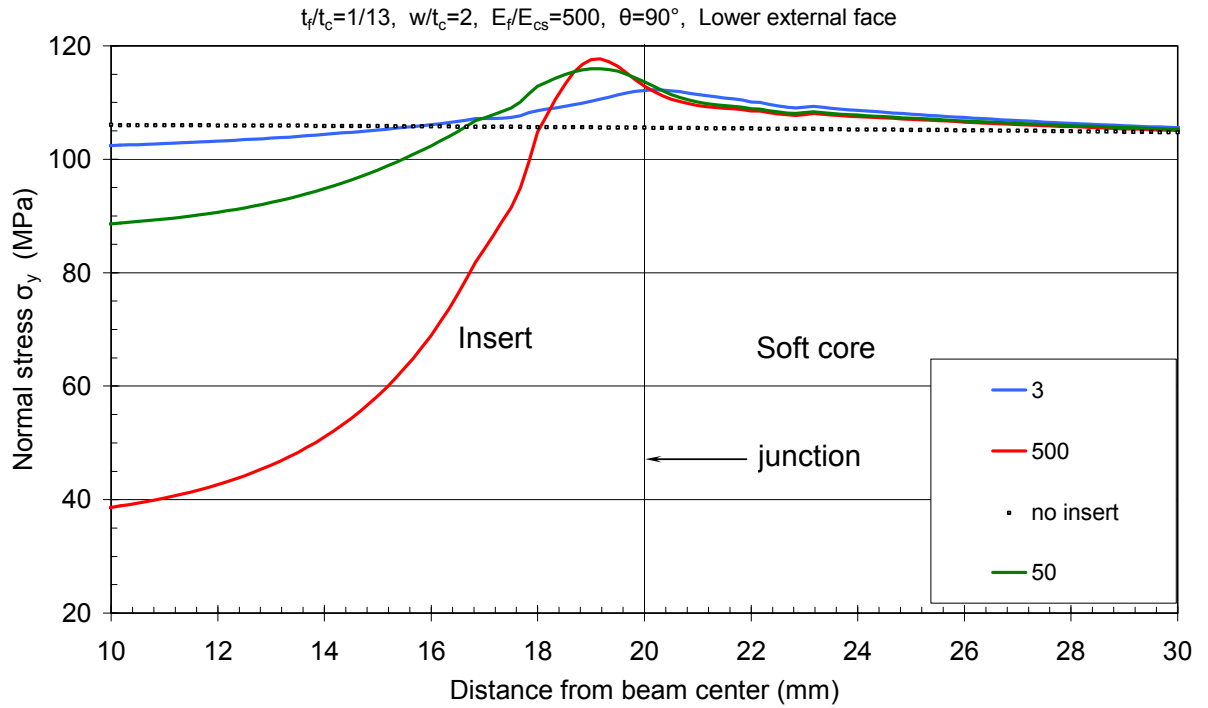
Παρουσίαση των διαγραμμάτων που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη, όσο αναφορά την μέτρηση ορθής τάσεως στην άνω και κάτω εξωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων των δοκιμίων.

Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο τα δοκίμια με ορθογώνιο ένθεμα (90^0), όσο και αυτά με τραπεζοειδές ένθεμα (60^0)

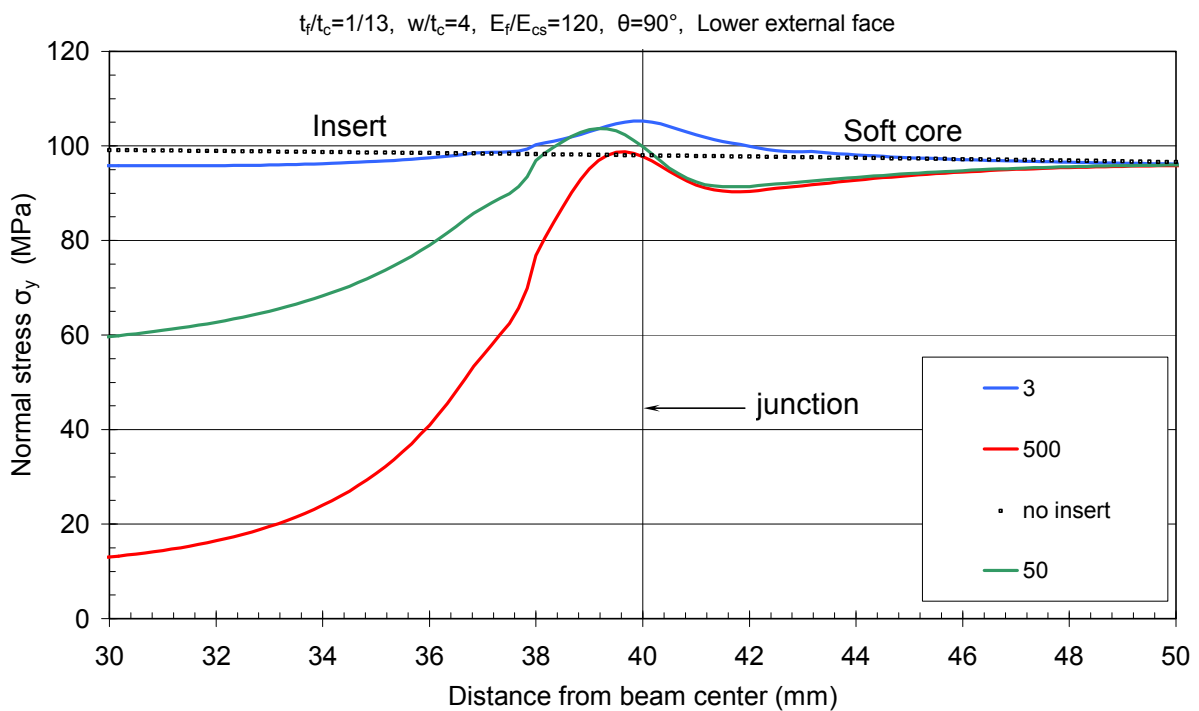
Στο τέλος της ενότητας υπάρχουν οι πίνακες 3.A.1 έως 3.A.24 με τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσης 'k'.



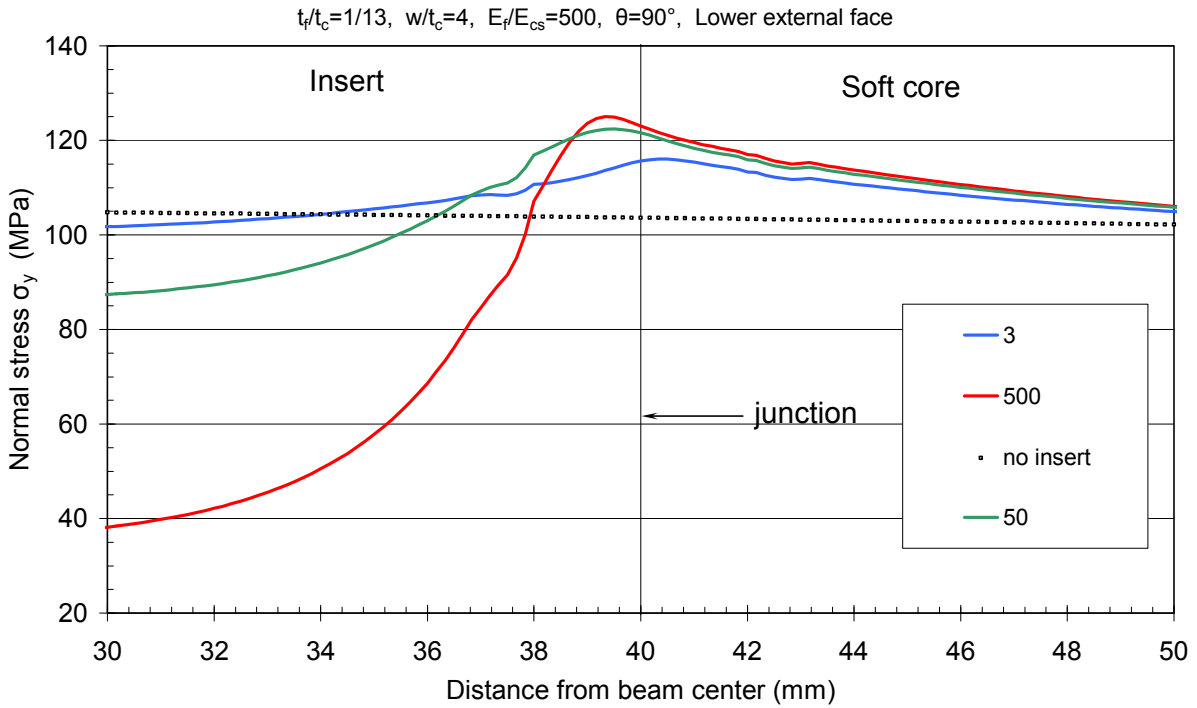
Σχήμα 3.A.1 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



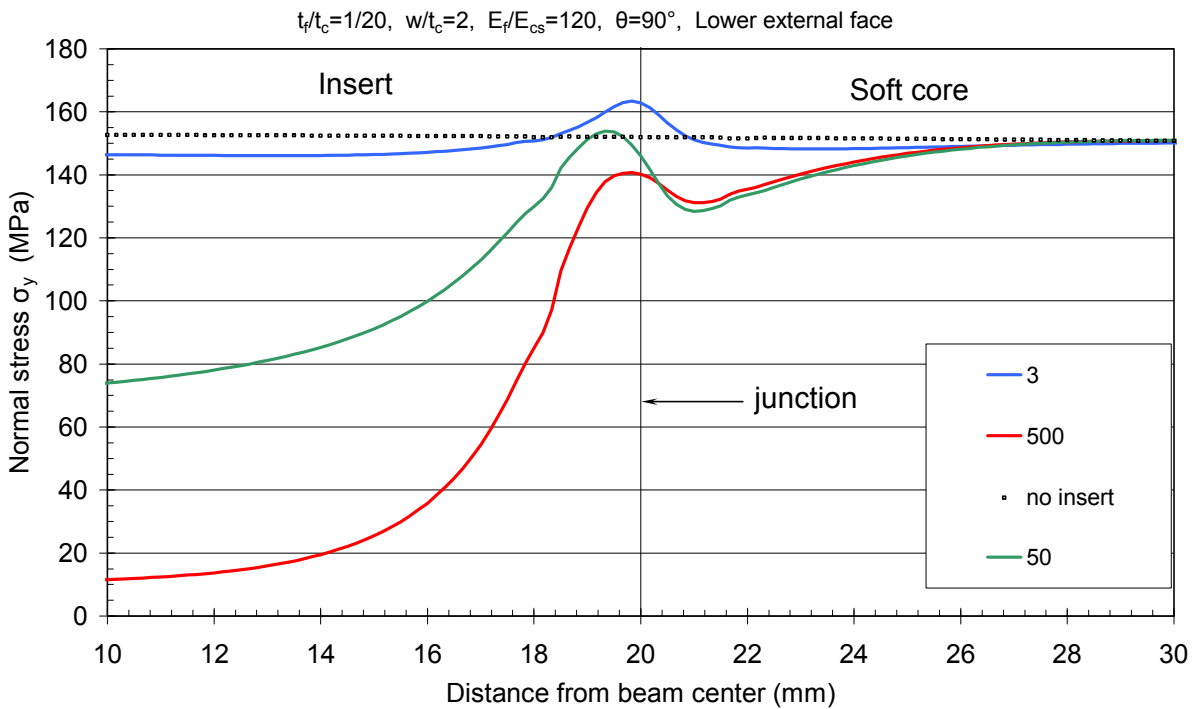
Σχήμα 3.A.2 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



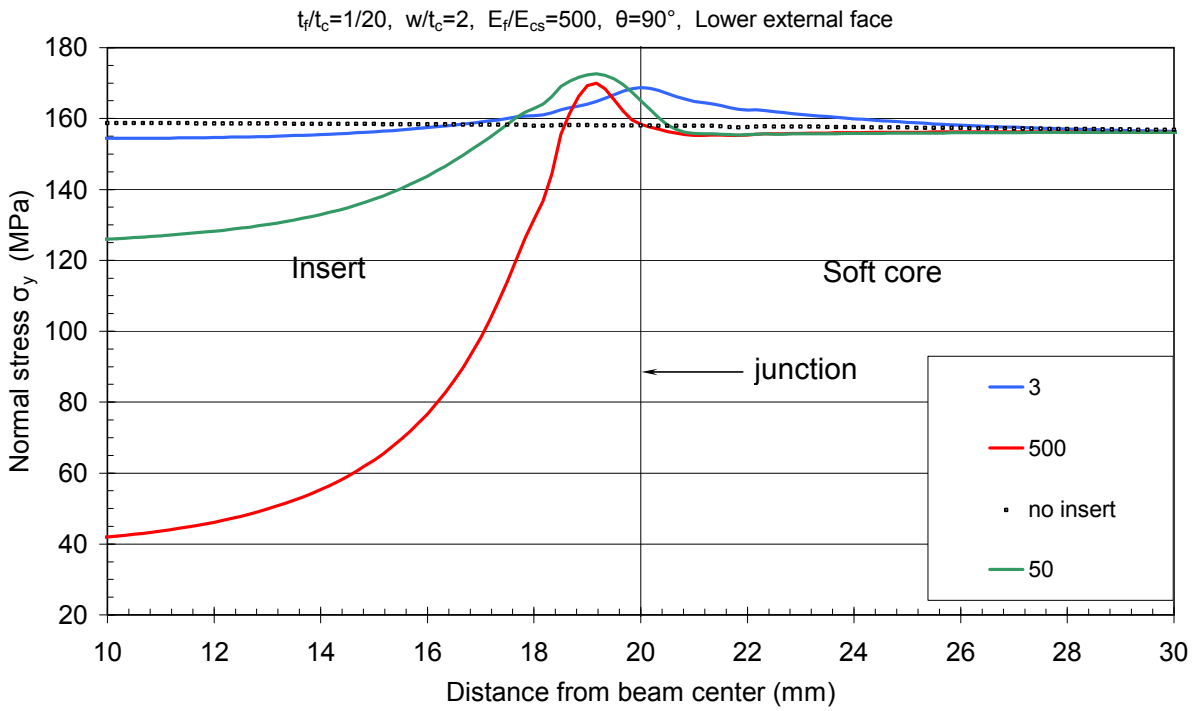
Σχήμα 3.A.3 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



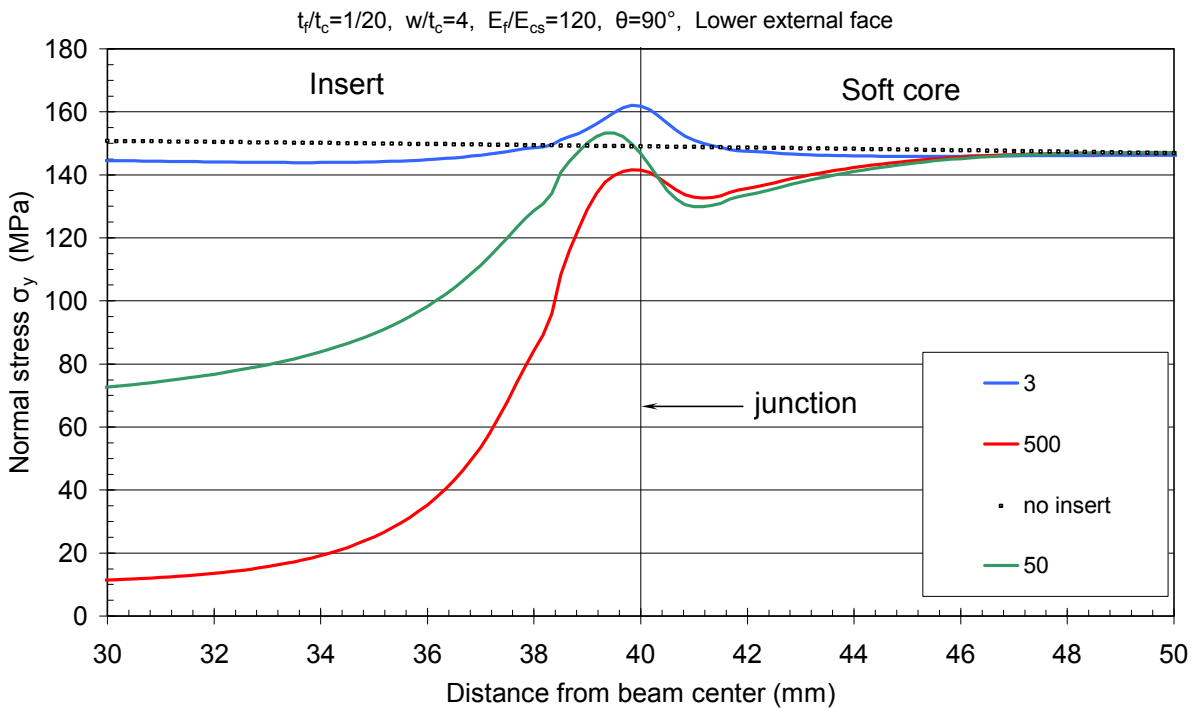
Σχήμα 3.A.4 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



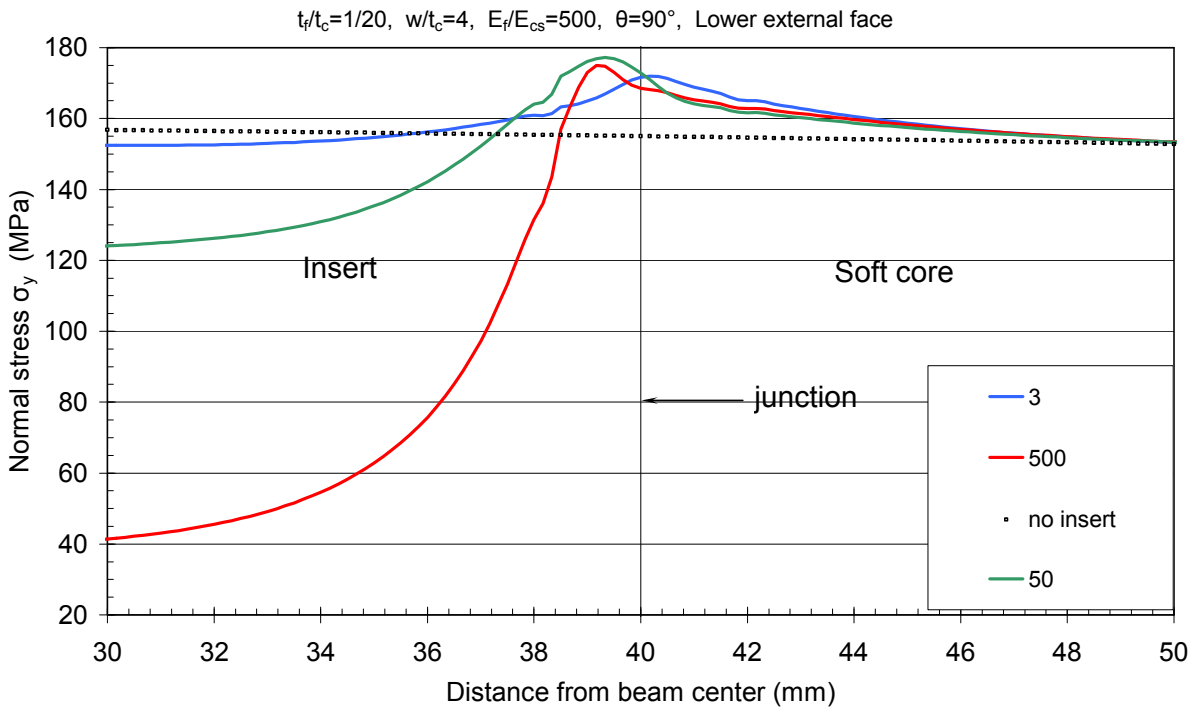
Σχήμα 3.A.5 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



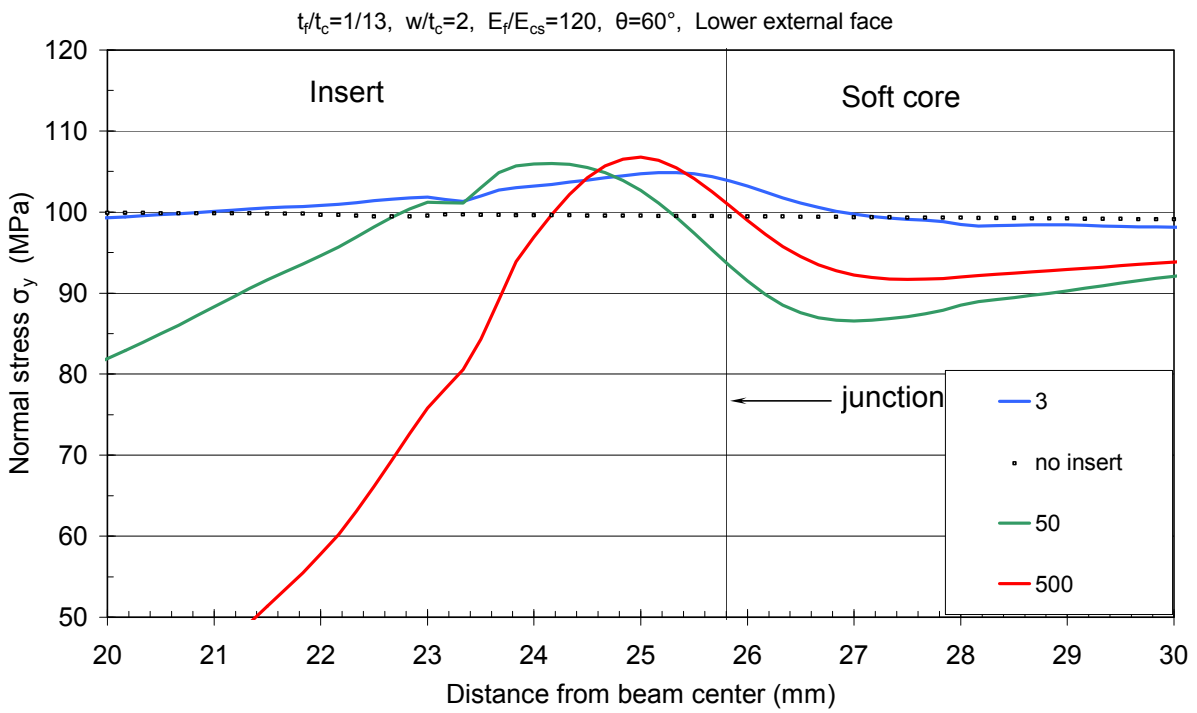
Σχήμα 3.A.6 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



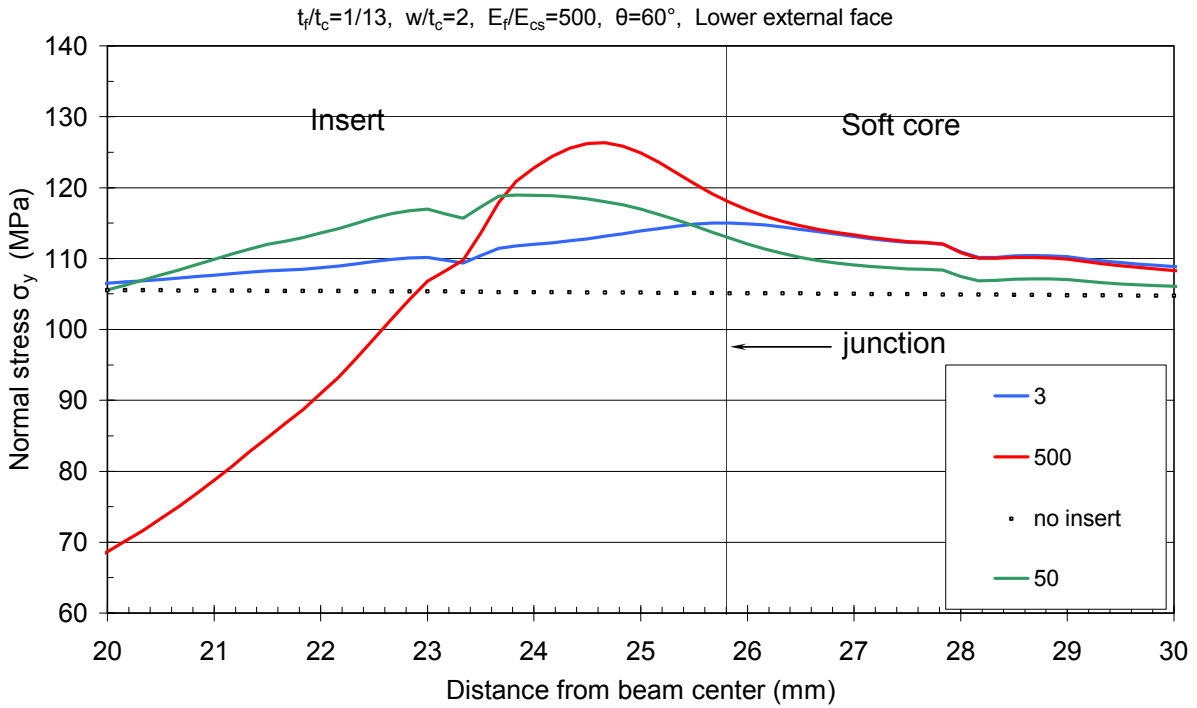
Σχήμα 3.A.7 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



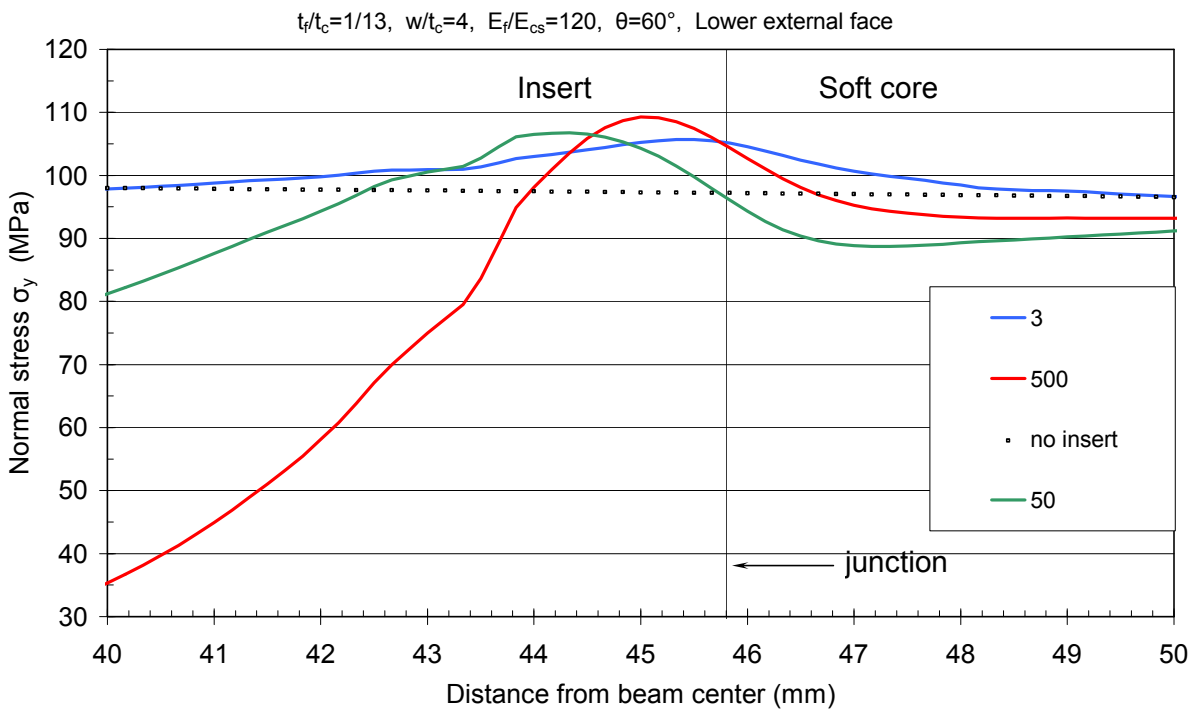
Σχήμα 3.A.8 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



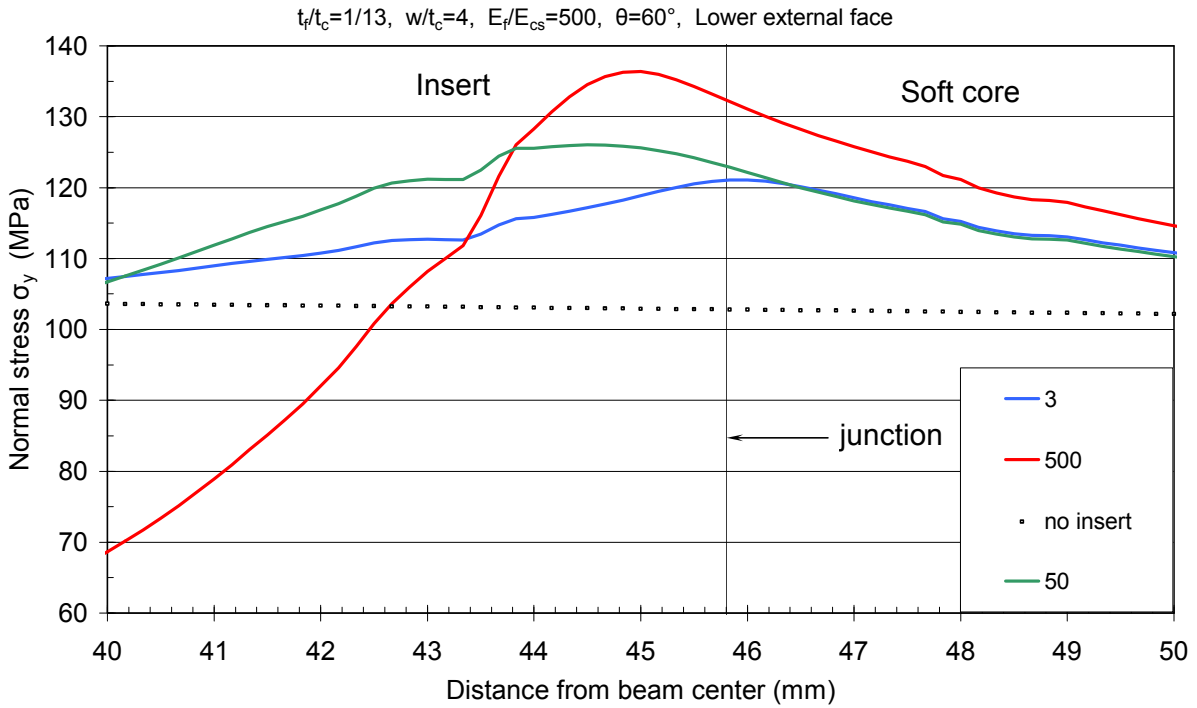
Σχήμα 3.A.9 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



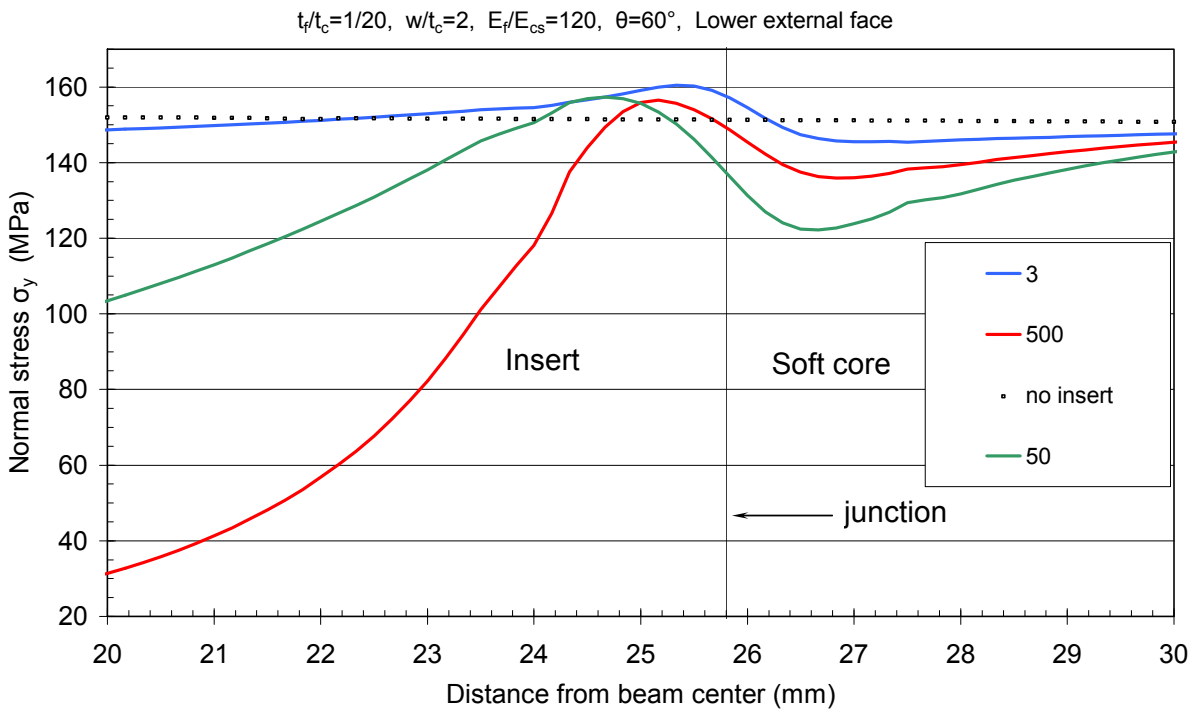
Σχήμα 3.A.10 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



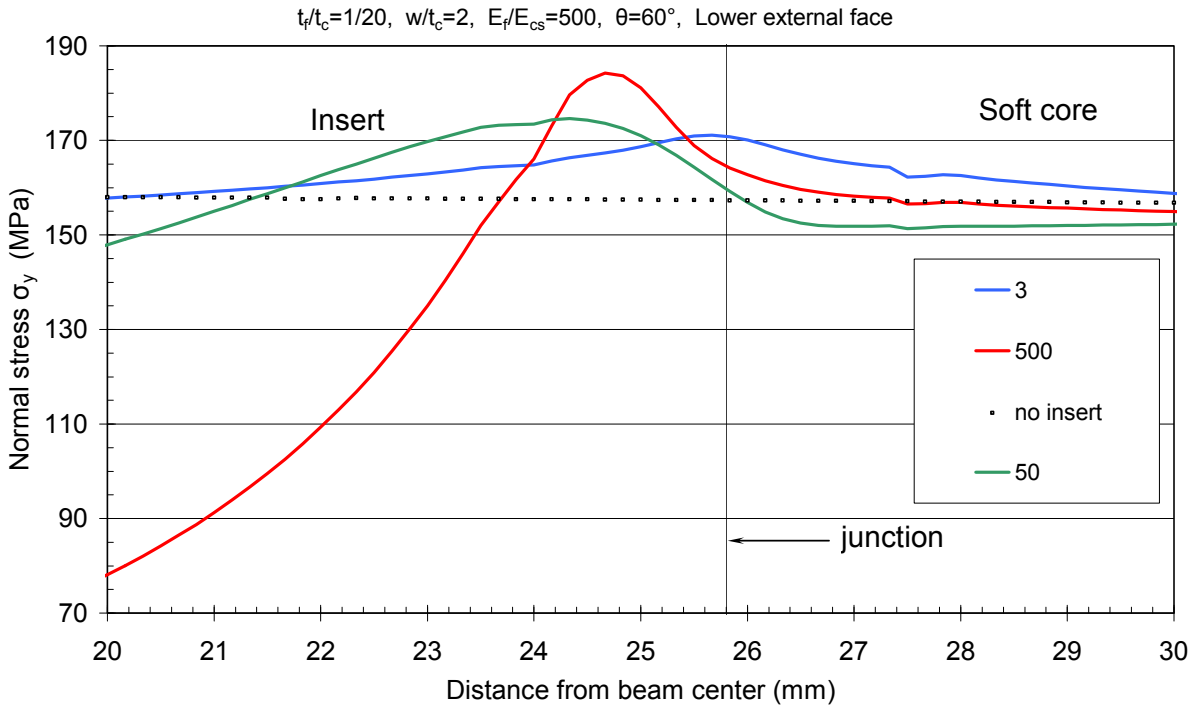
Σχήμα 3.A.11 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



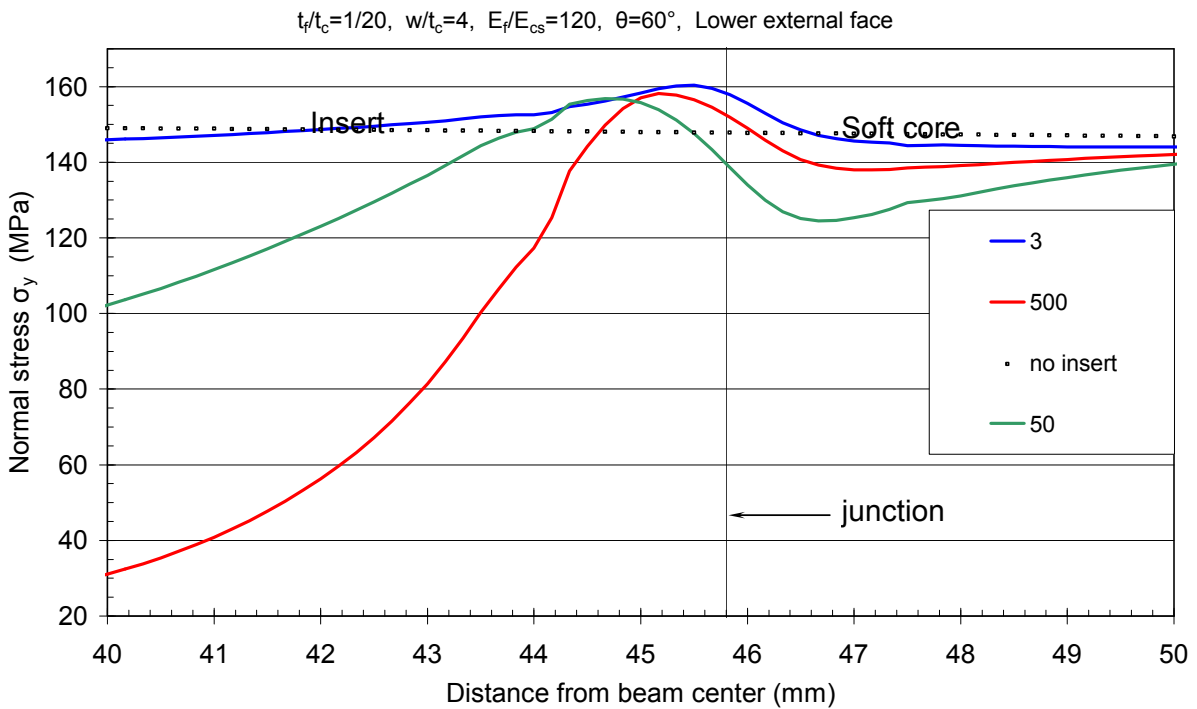
Σχήμα 3.A.12 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



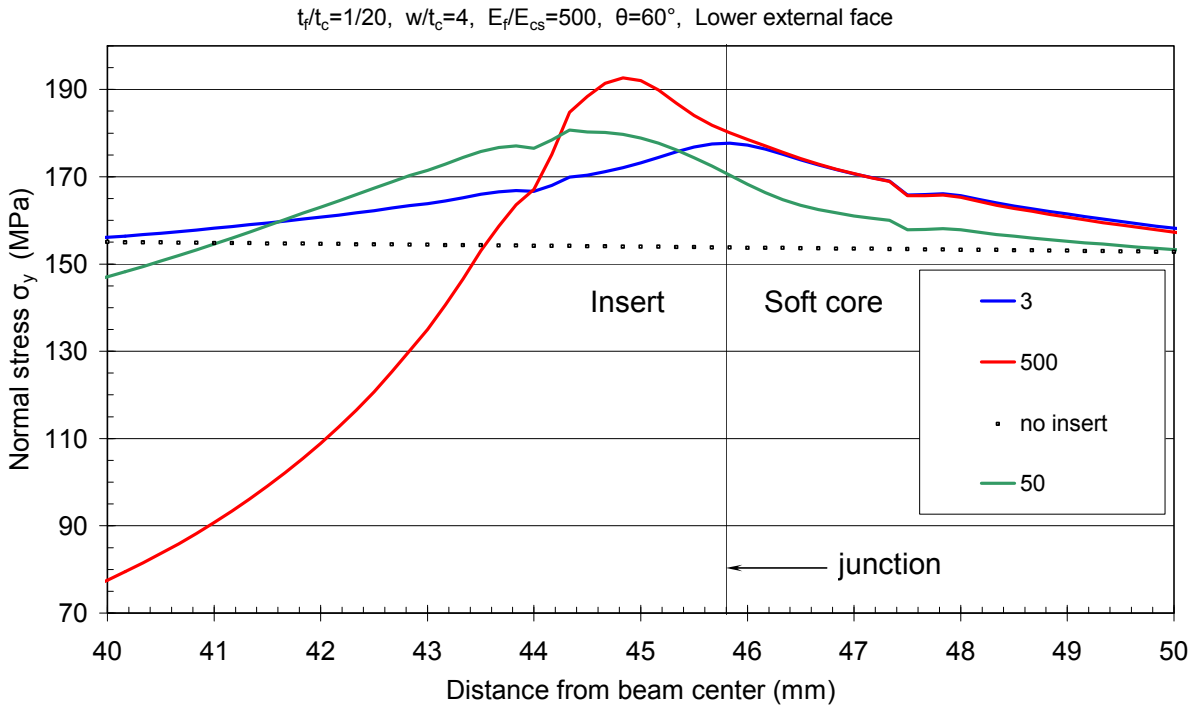
3.A.13 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



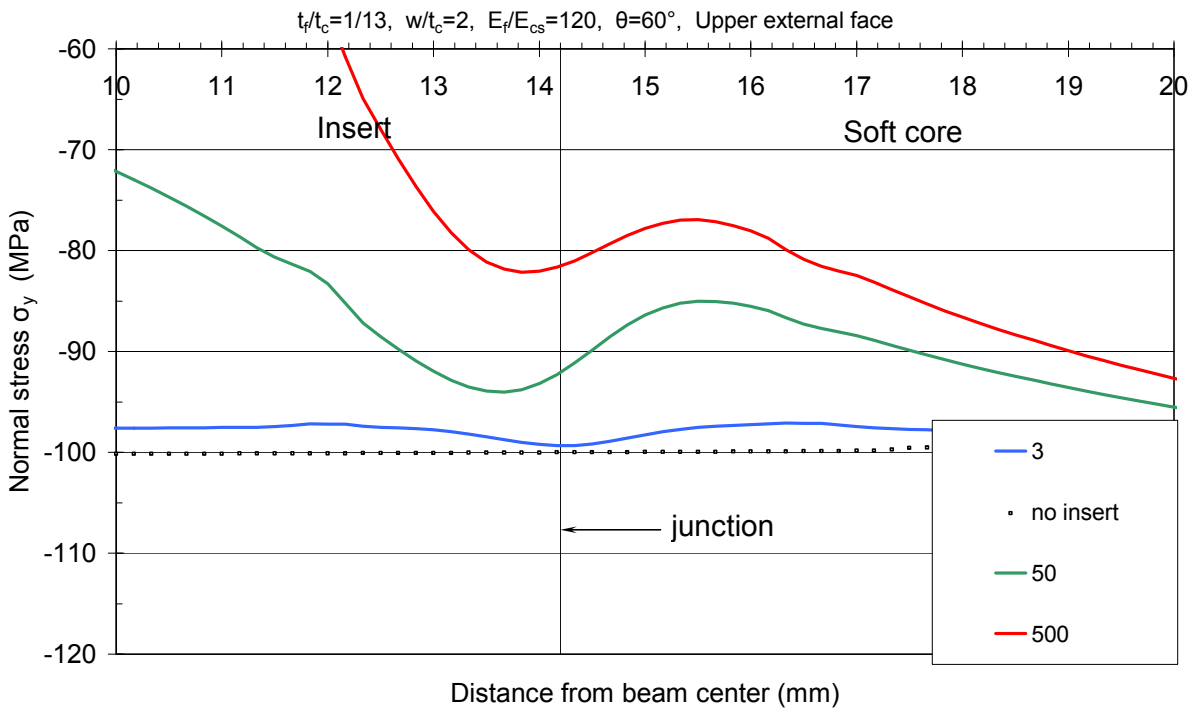
3.A.14 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



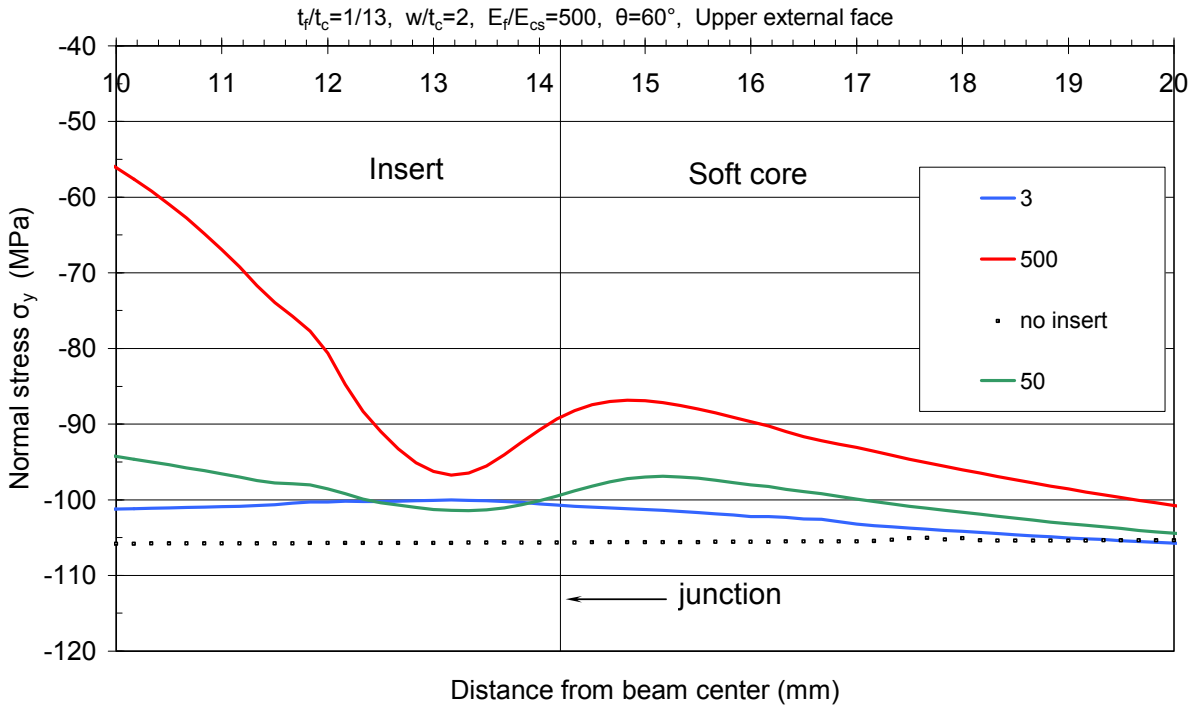
3.A.15 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



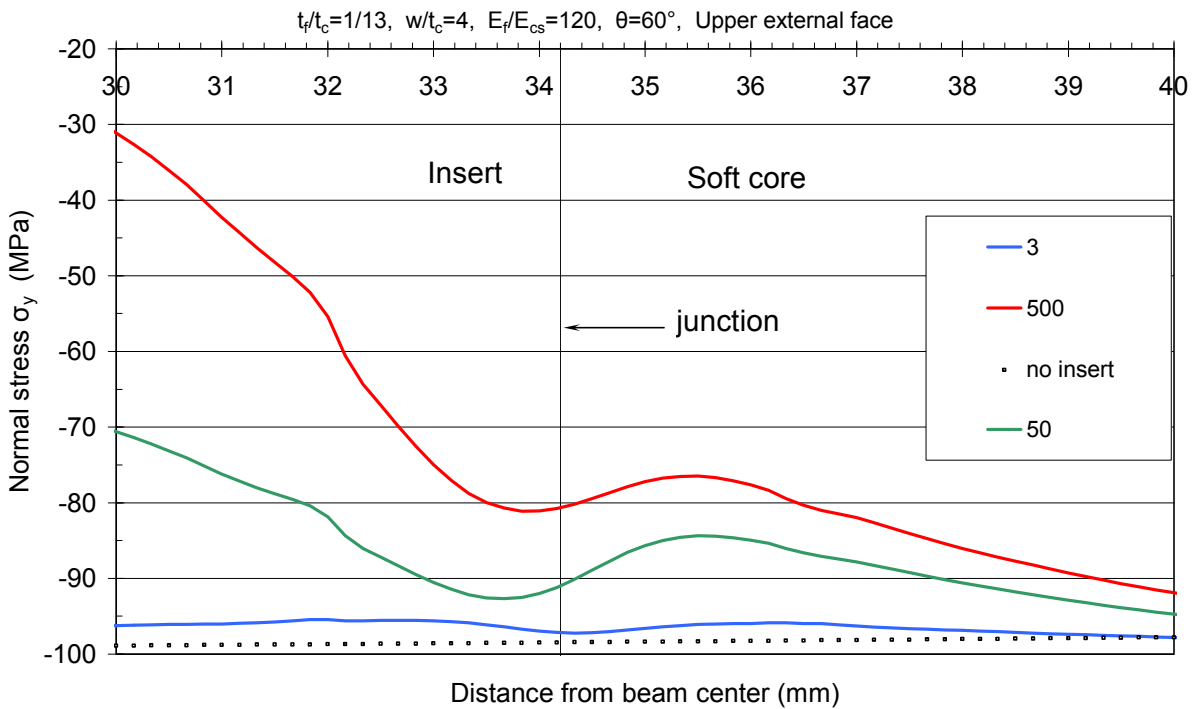
3.A.16 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



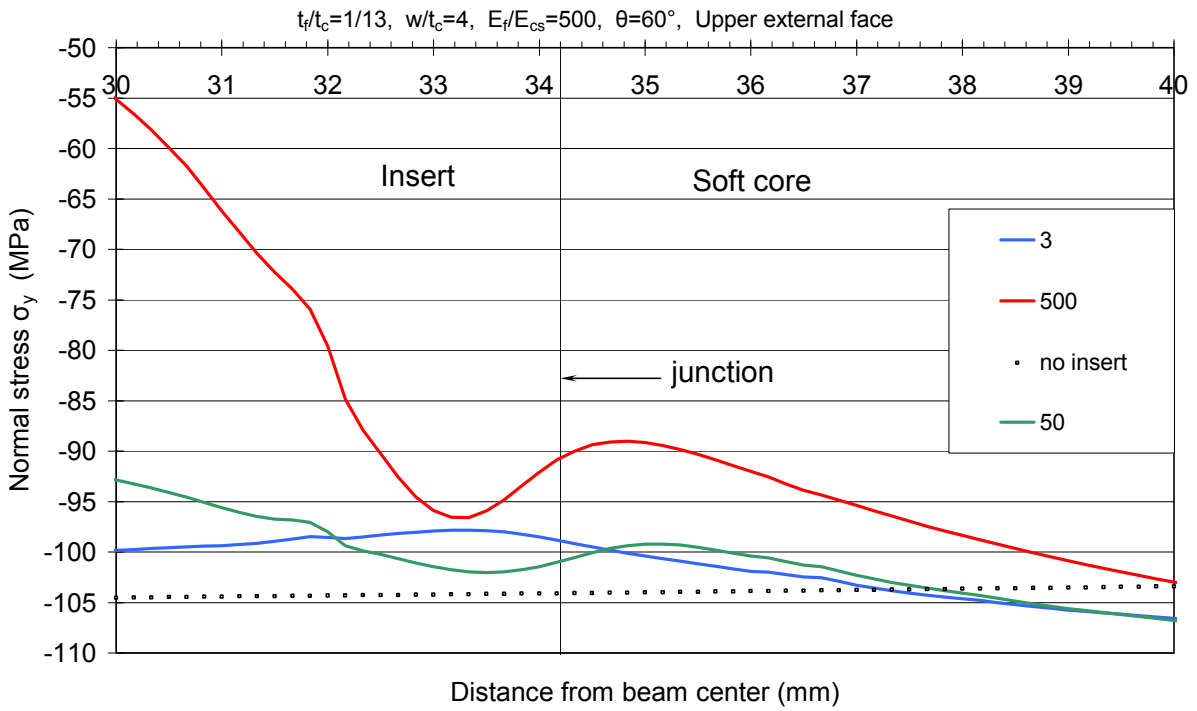
3.A.17 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



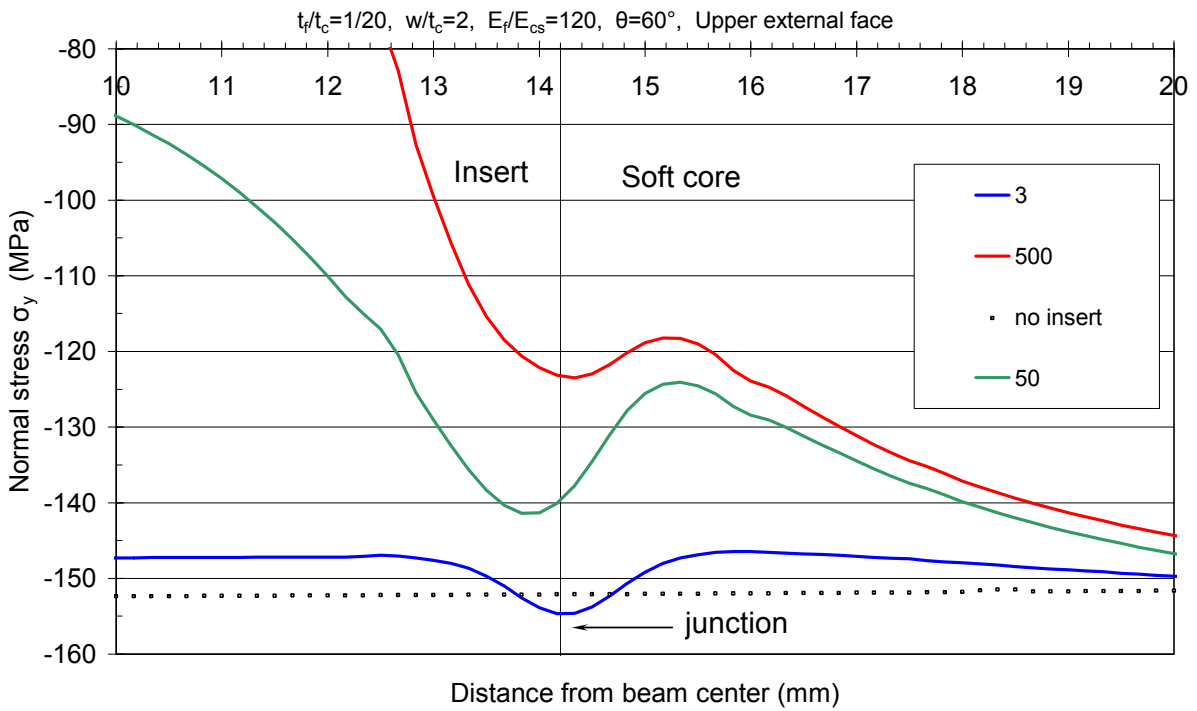
3.A.18 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



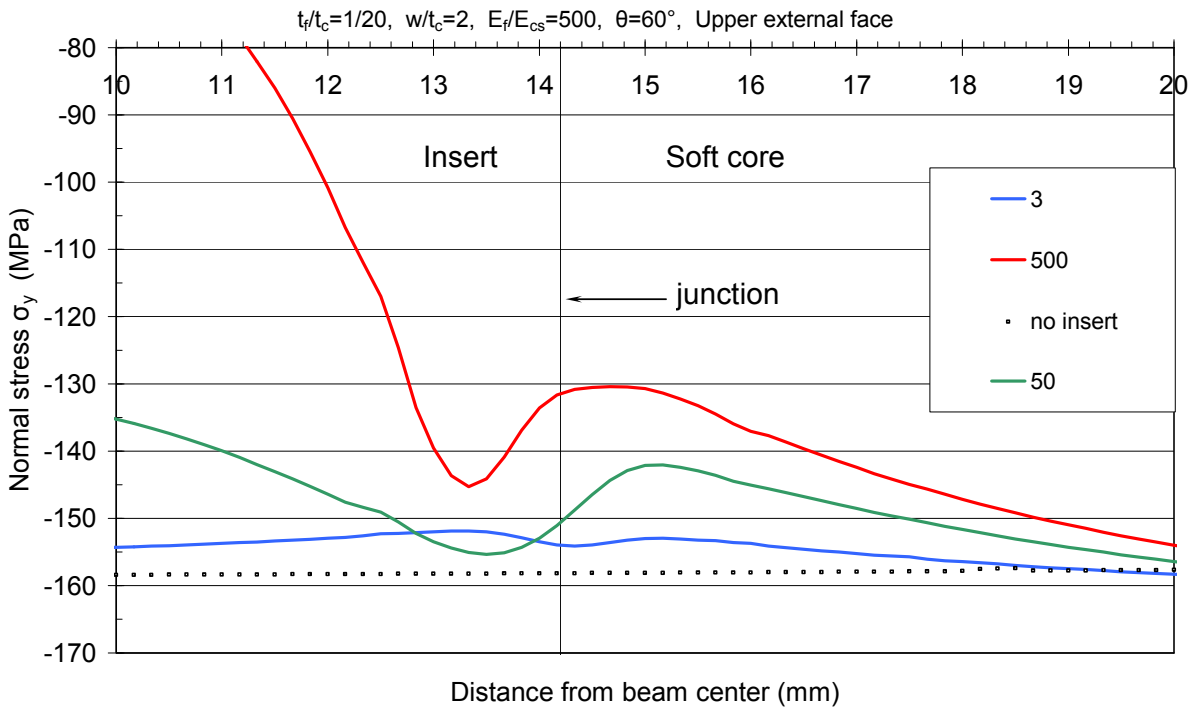
3.A.19 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



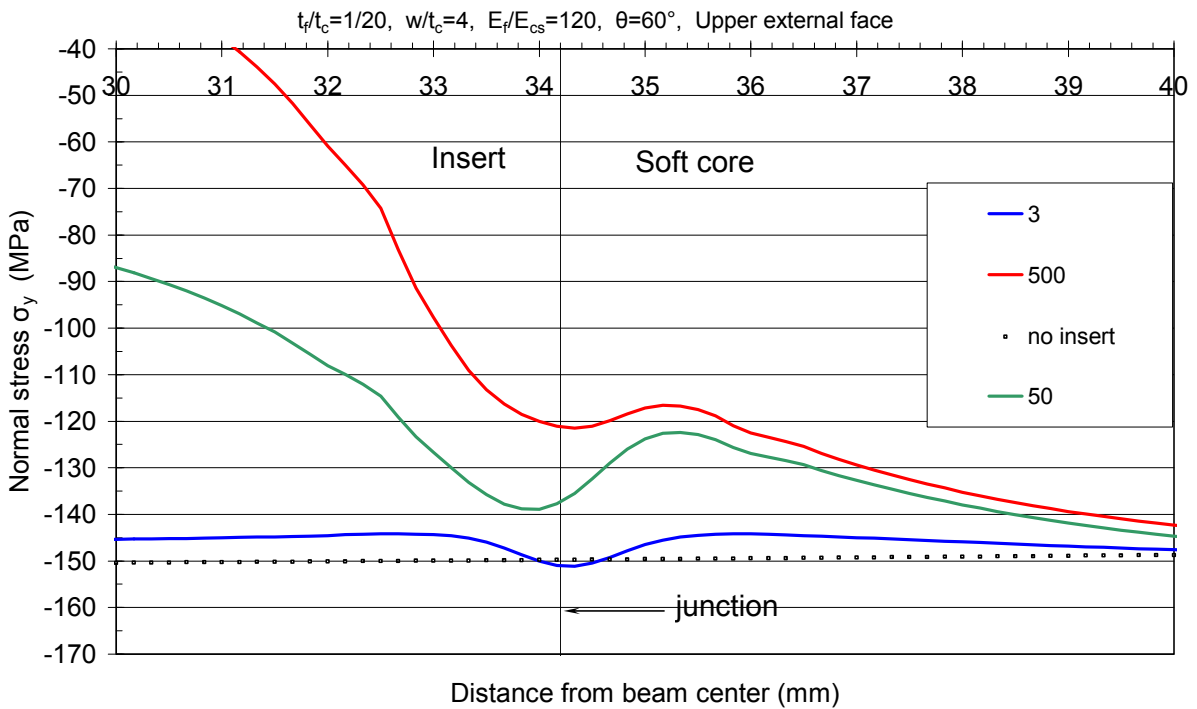
3.A.20 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



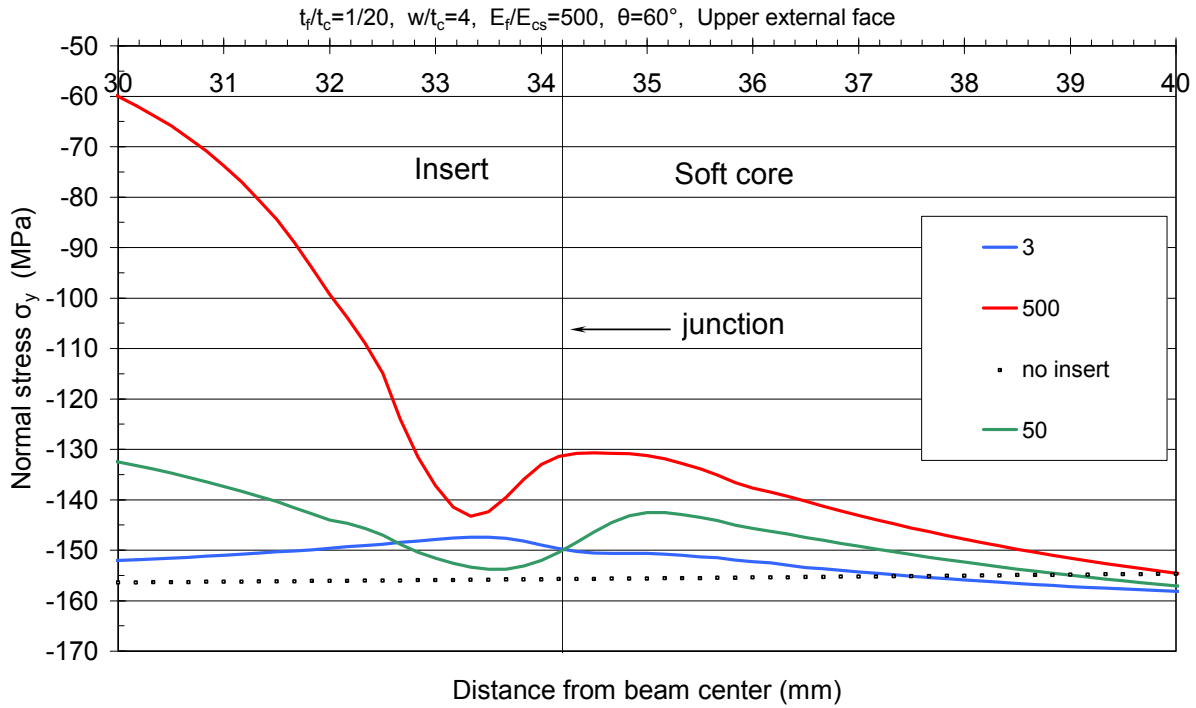
3.A.21 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



3.A.22 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



3.A.23 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



3.A.24 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου

Πίνακας 3.A.1.

σχ a4		13-2-90-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.05	1.03	0.97

Πίνακας 3.A.2.

σχ a4		20-2-90-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.075	1.01	0.92

Πίνακας 3.A.3.

σχ a4		13-2-90-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.06	1.098	1.11

Πίνακας 3.A.4.

σχ a4		20-2-90-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.067	1.09	1.07

Πίνακας 3.A.5.

σχ a4		13-4-90-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.07	1.057	1

Πίνακας 3.A.6.

σχ a4		20-4-90-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.087	1.027	0.95

Πίνακας 3.A.7.

σχ a4		13-4-90-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.12	1.18	1.2

Πίνακας 3.A.8.

σχ a4		20-4-90-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.11	1.14	1.13

Πίνακας 3.A.9.

σχ α4		13-2-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.054	1.064	1.073

Πίνακας 3.A.11.

σχ α4		13-2-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.09	1.13	1.2

Πίνακας 3.A.13.

σχ α4		13-4-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.087	1.096	1.123

Πίνακας 3.A.15.

σχ α4		13-4-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.18	1.224	1.325

Πίνακας 3.A.17.

σχ α1		13-2-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.99	0.94	0.82

Πίνακας 3.A.19.

σχ α1		13-2-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.97	0.96	0.915

Πίνακας 3.A.21.

σχ α1		13-4-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.987	0.941	0.82

Πίνακας 3.A.23.

σχ α1		13-4-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.98	0.979	0.927

Πίνακας 3.A.10.

σχ α4		20-2-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.06	1.04	1.03

Πίνακας 3.A.12.

σχ α4		20-2-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.08	1.107	1.17

Πίνακας 3.A.14.

σχ α4		20-4-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.084	1.06	1.07

Πίνακας 3.A.16.

σχ α4		20-4-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.155	1.17	1.25

Πίνακας 3.A.18.

σχ α1		20-2-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.017	0.93	0.81

Πίνακας 3.A.20.

σχ α1		20-2-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.97	0.982	0.92

Πίνακας 3.A.22.

σχ α1		20-4-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.01	0.927	0.81

Πίνακας 3.A.24.

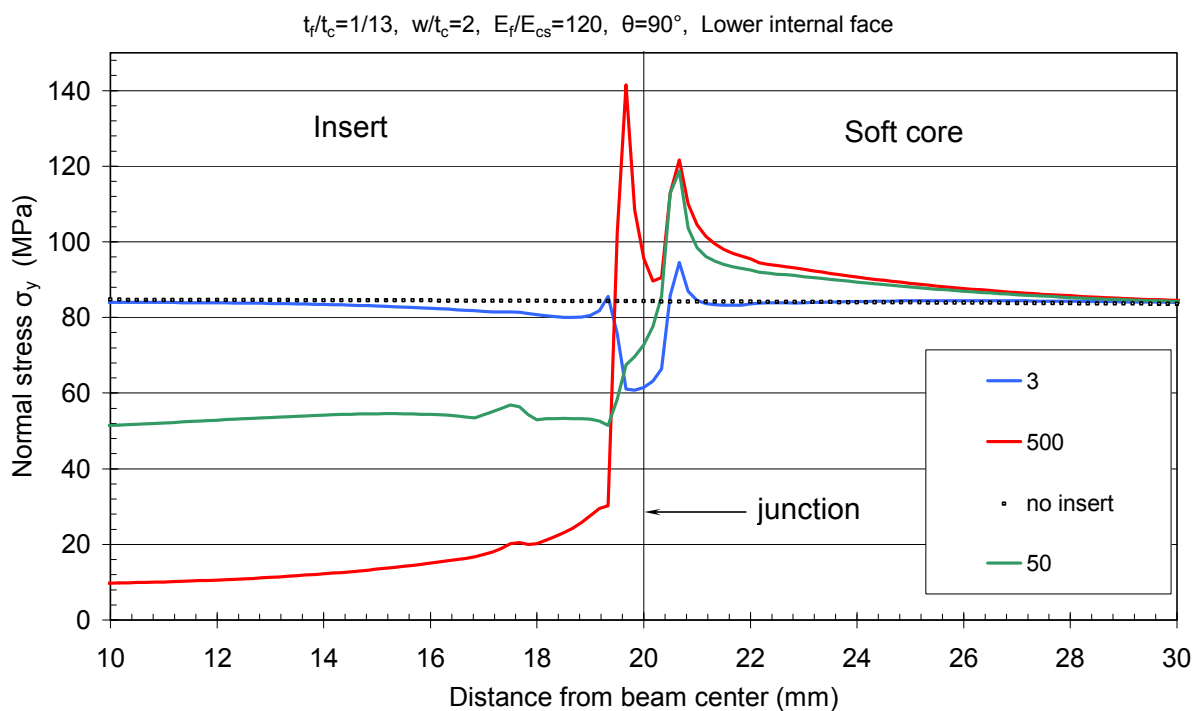
σχ α1		20-4-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.96	0.986	0.92

ΕΝΟΤΗΤΑ «B»

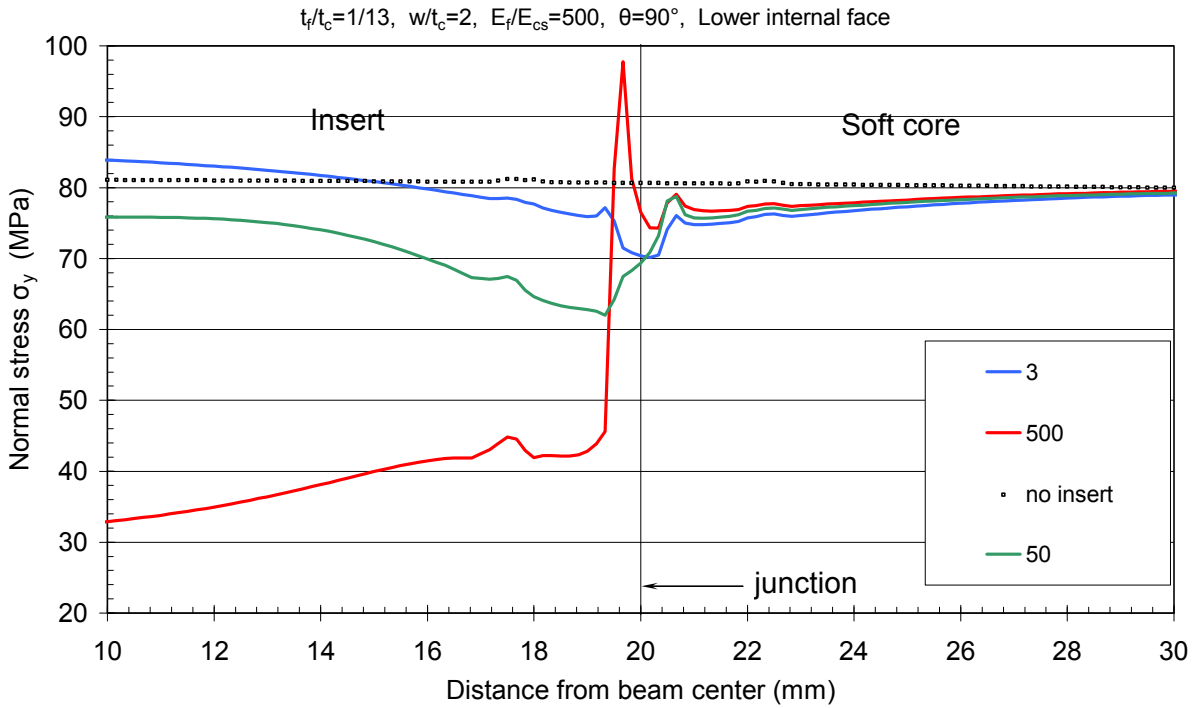
Παρουσίαση των διαγραμμάτων που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη, όσο αναφορά την μέτρηση ορθής τάσεως στην άνω και κάτω εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων των δοκιμίων.

Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο τα δοκίμια με ορθογώνιο ένθεμα (90^0), όσο και αυτά με τραπεζοειδές ένθεμα (60^0)

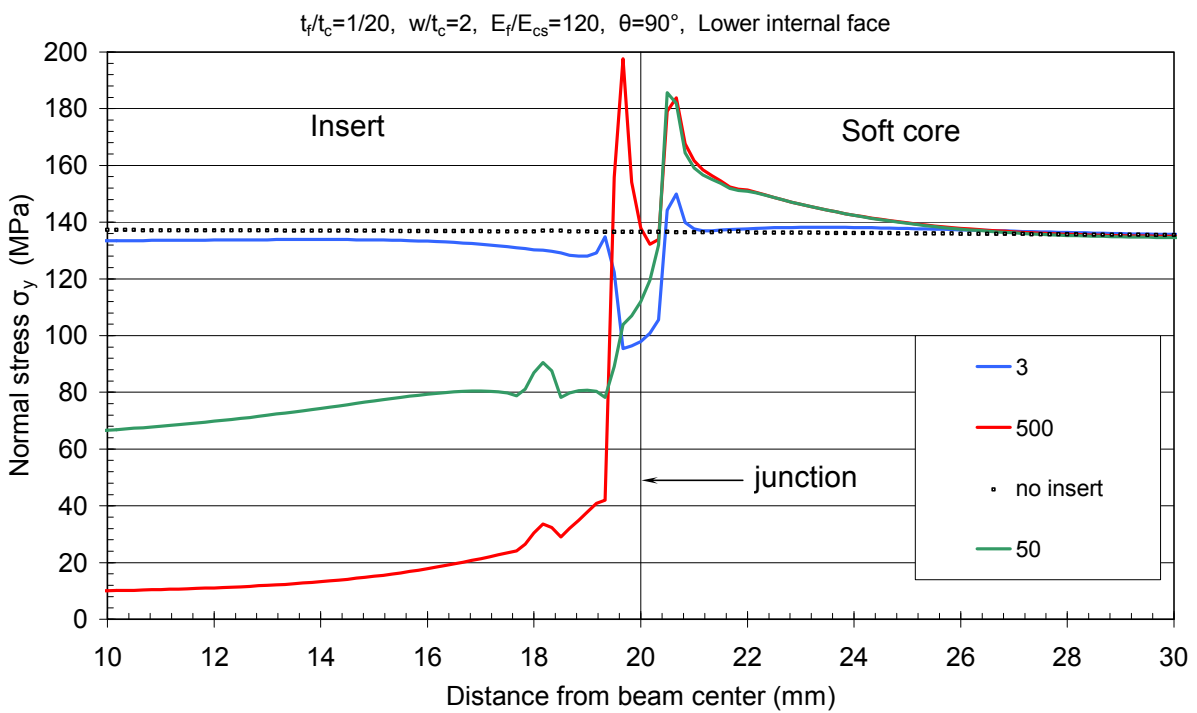
Στο τέλος της ενότητας υπάρχουν οι πίνακες 3.B.1 έως 3.B.24 με τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσης 'k'.



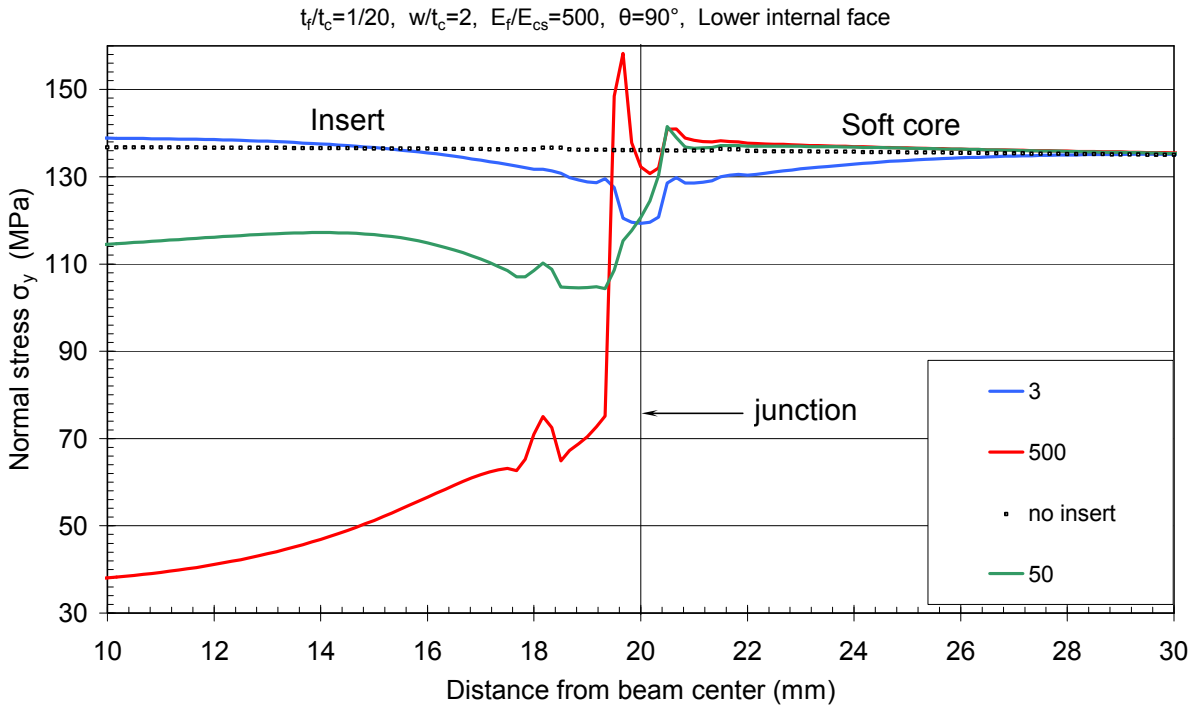
Σχήμα 3.B.1 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



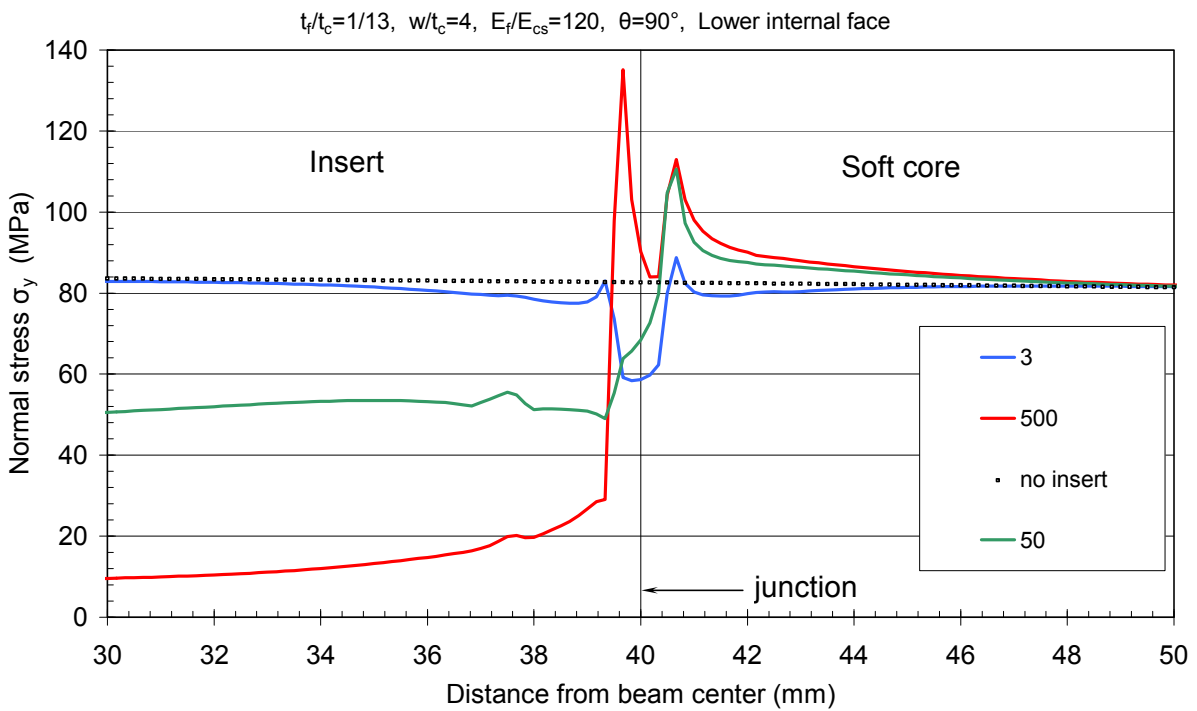
Σχήμα 3.B.2 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



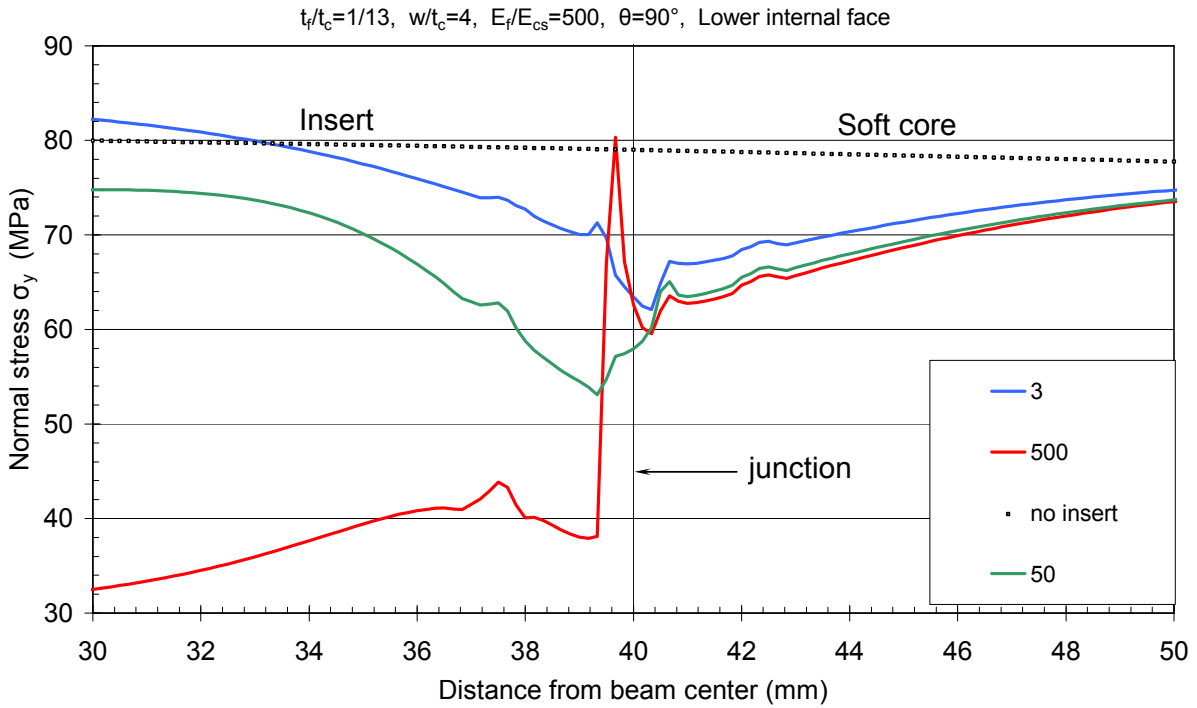
Σχήμα 3.B.3 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



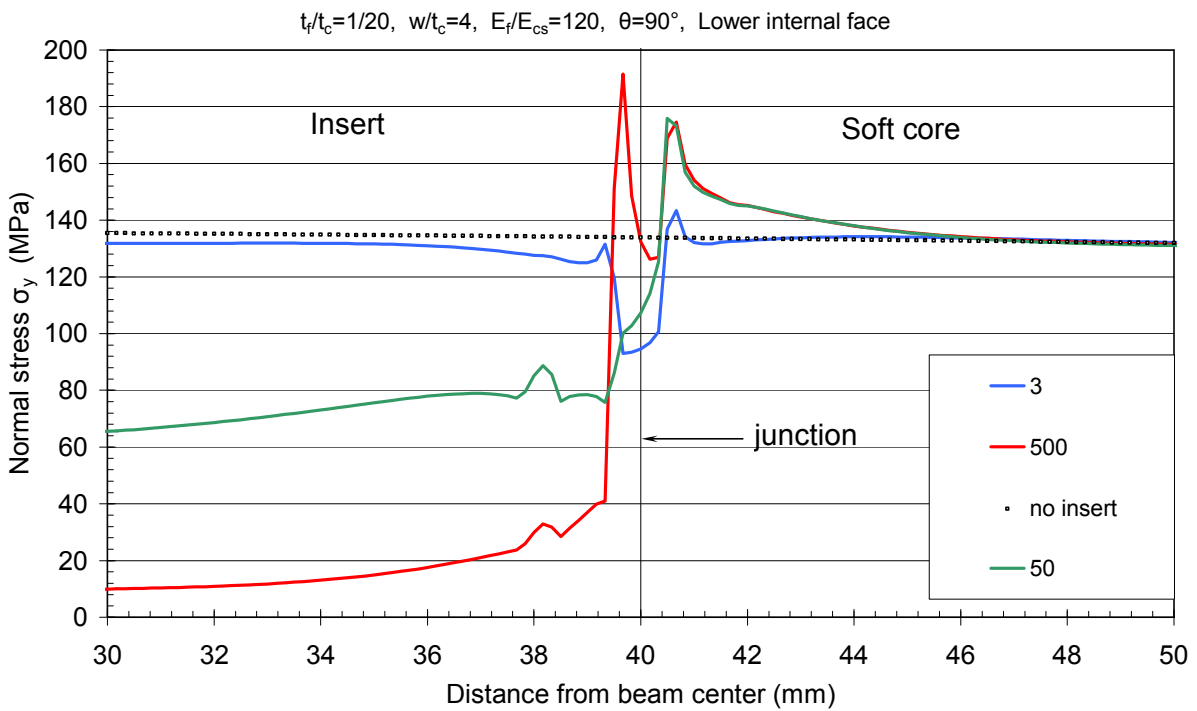
Σχήμα 3.B.4 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



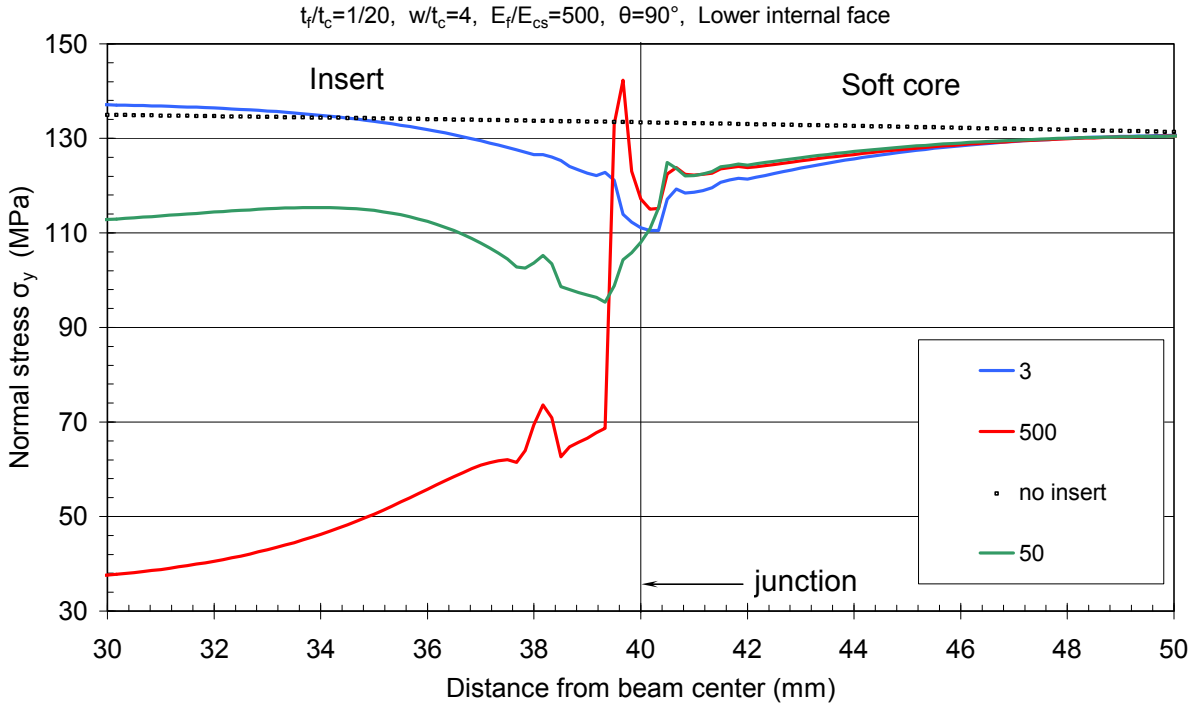
Σχήμα 3.B.5 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



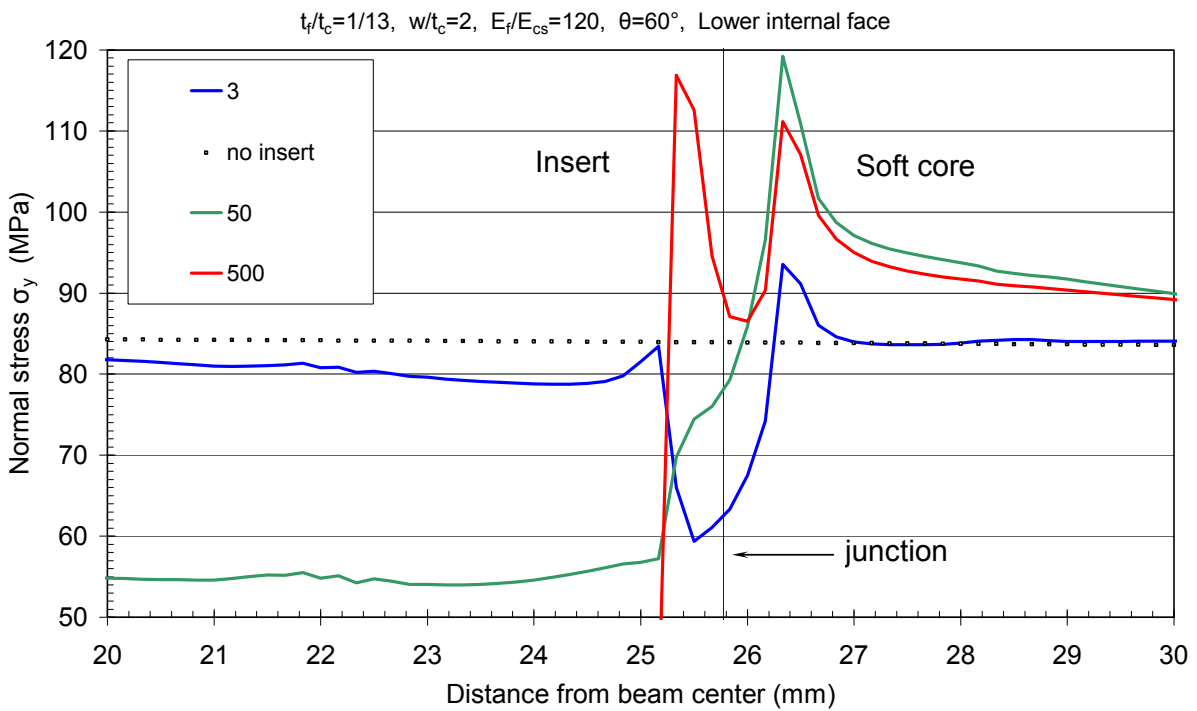
Σχήμα 3.B.6 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



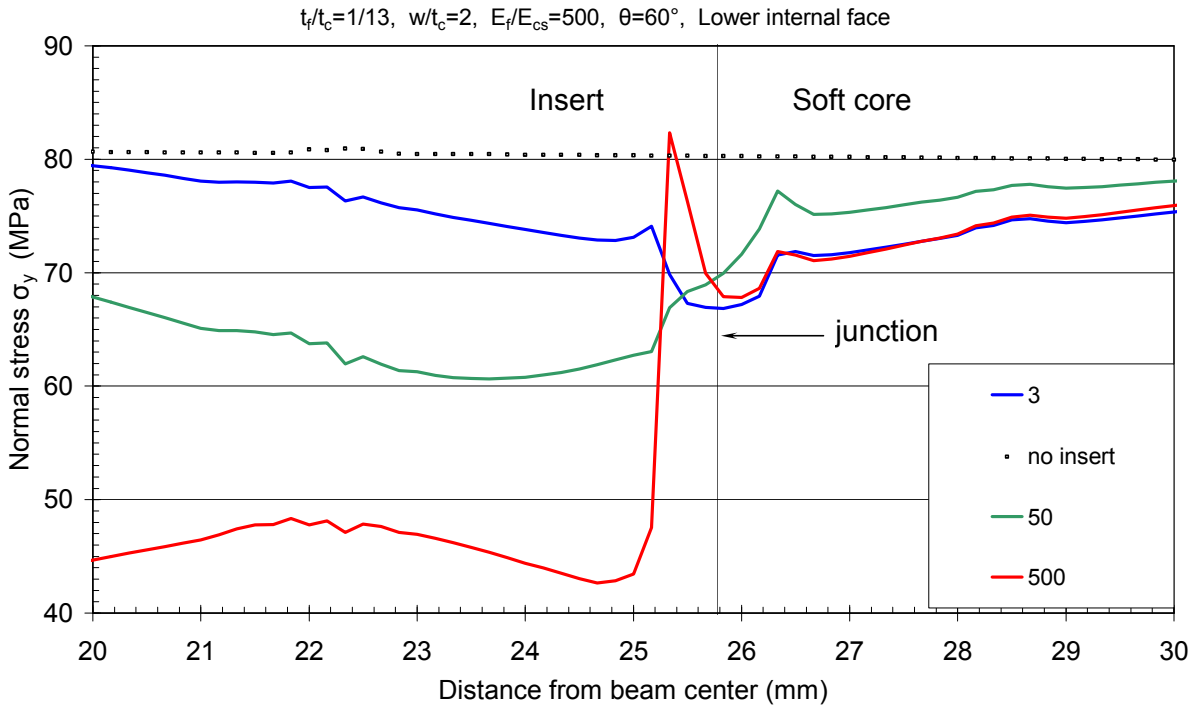
Σχήμα 3.B.7 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



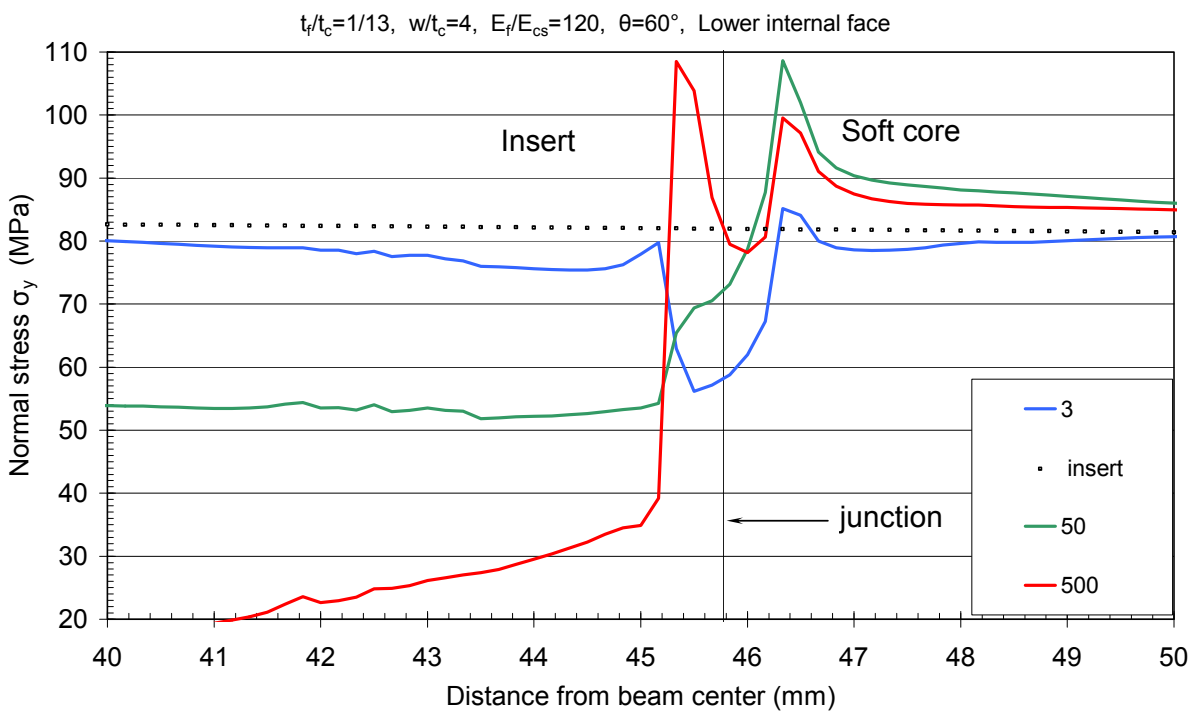
Σχήμα 3.B.8 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



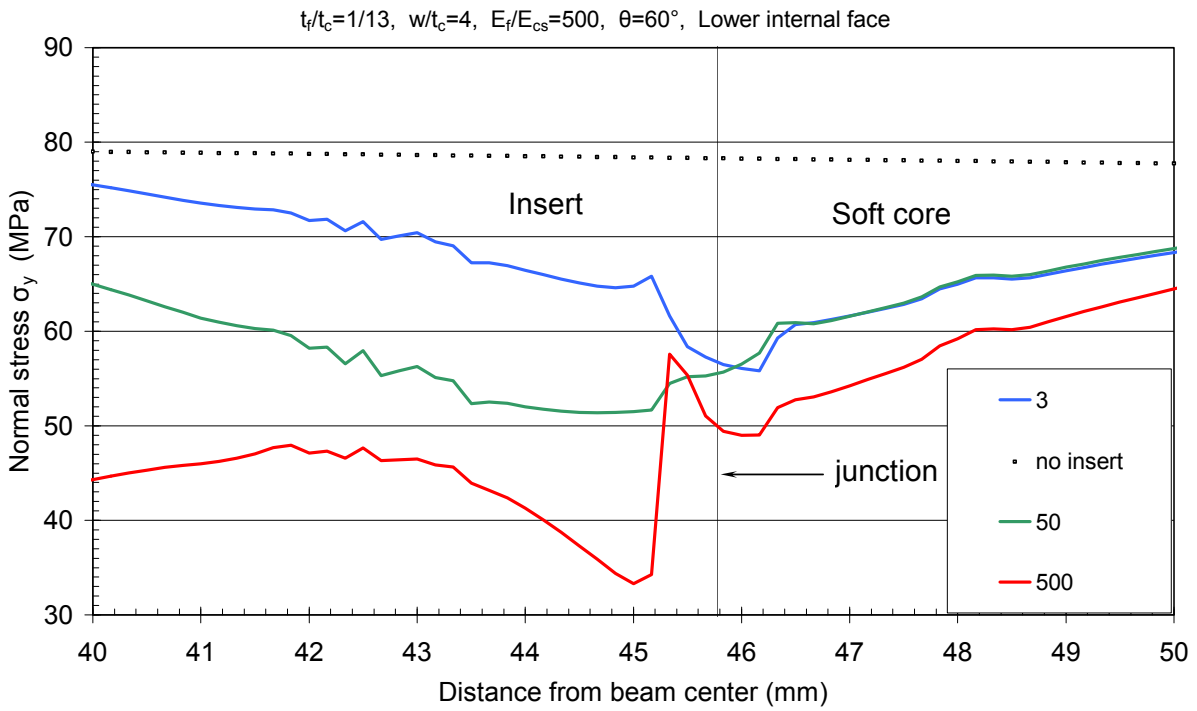
Σχήμα 3.B.9 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



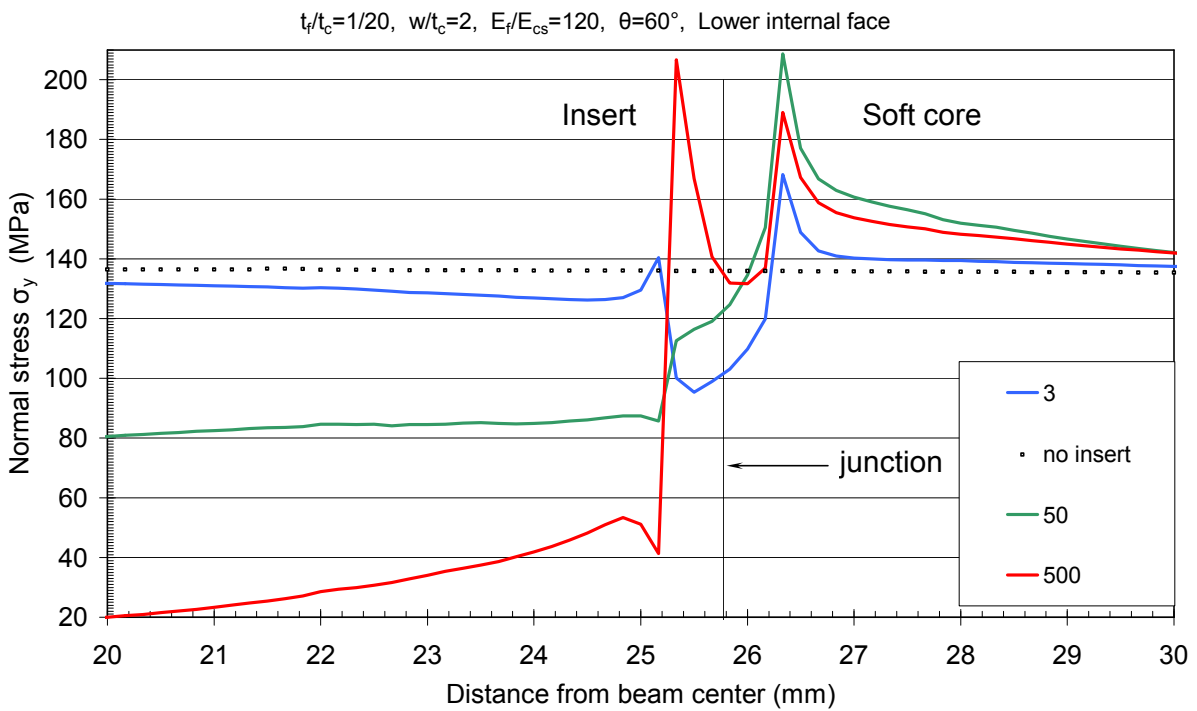
Σχήμα 3.B.10 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



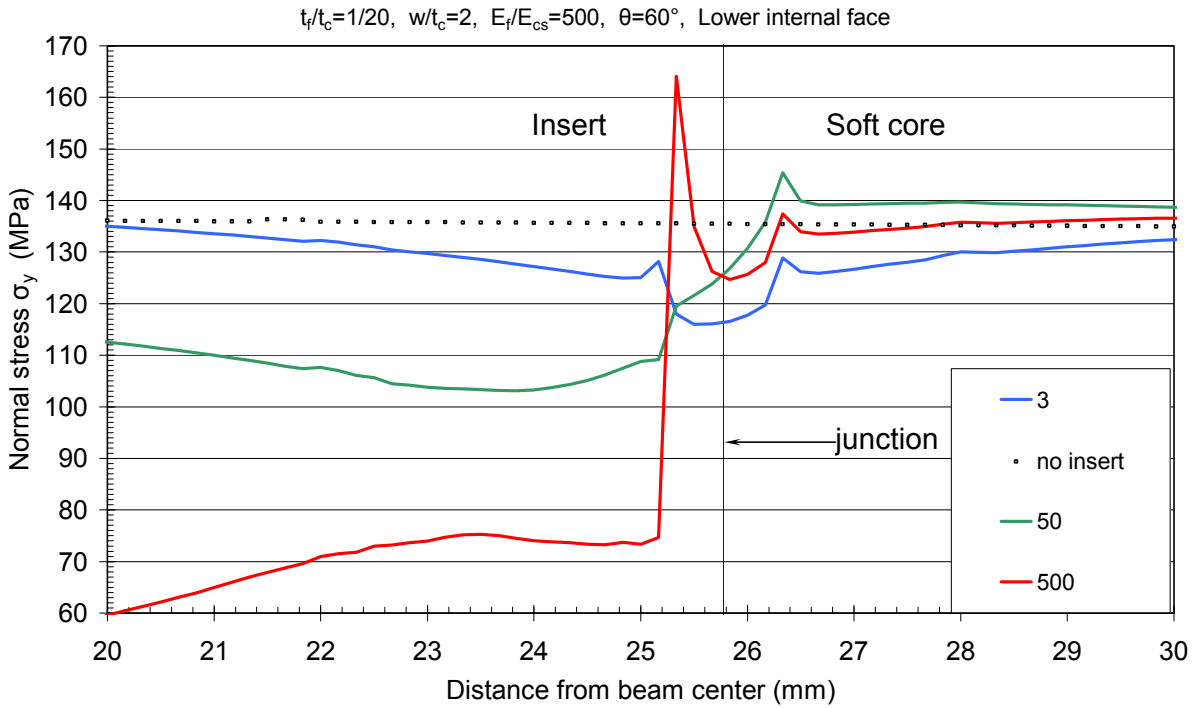
Σχήμα 3.B.11 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



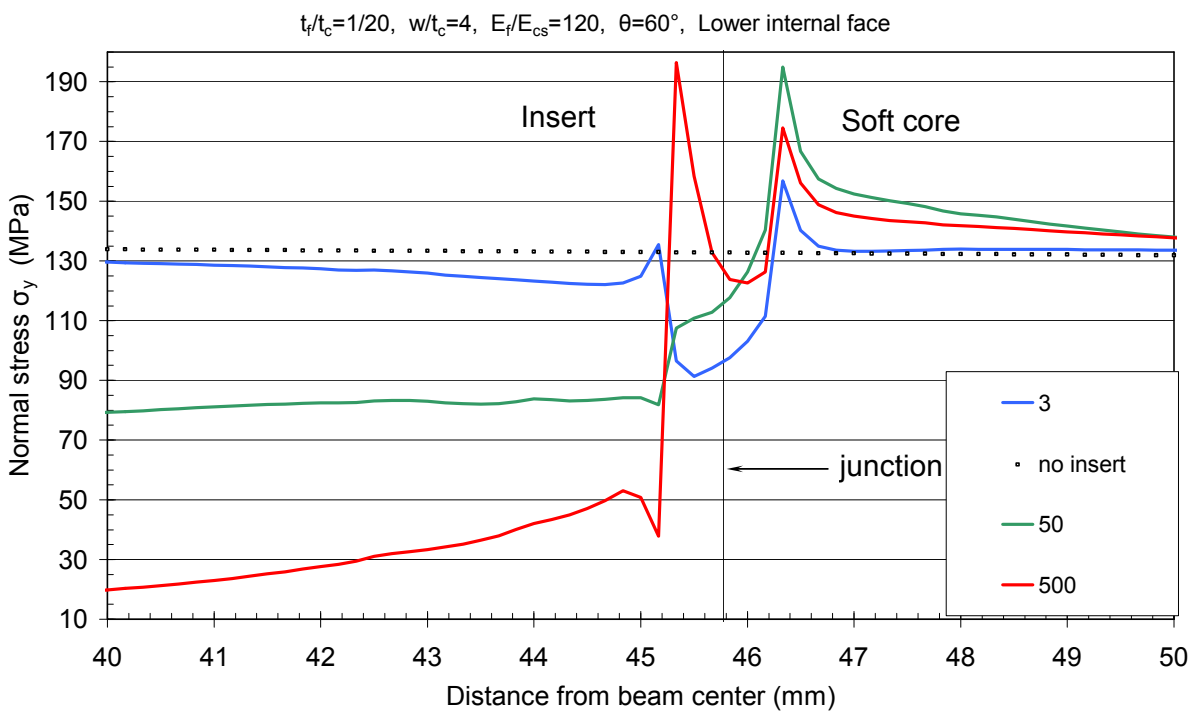
Σχήμα 3.B.12 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



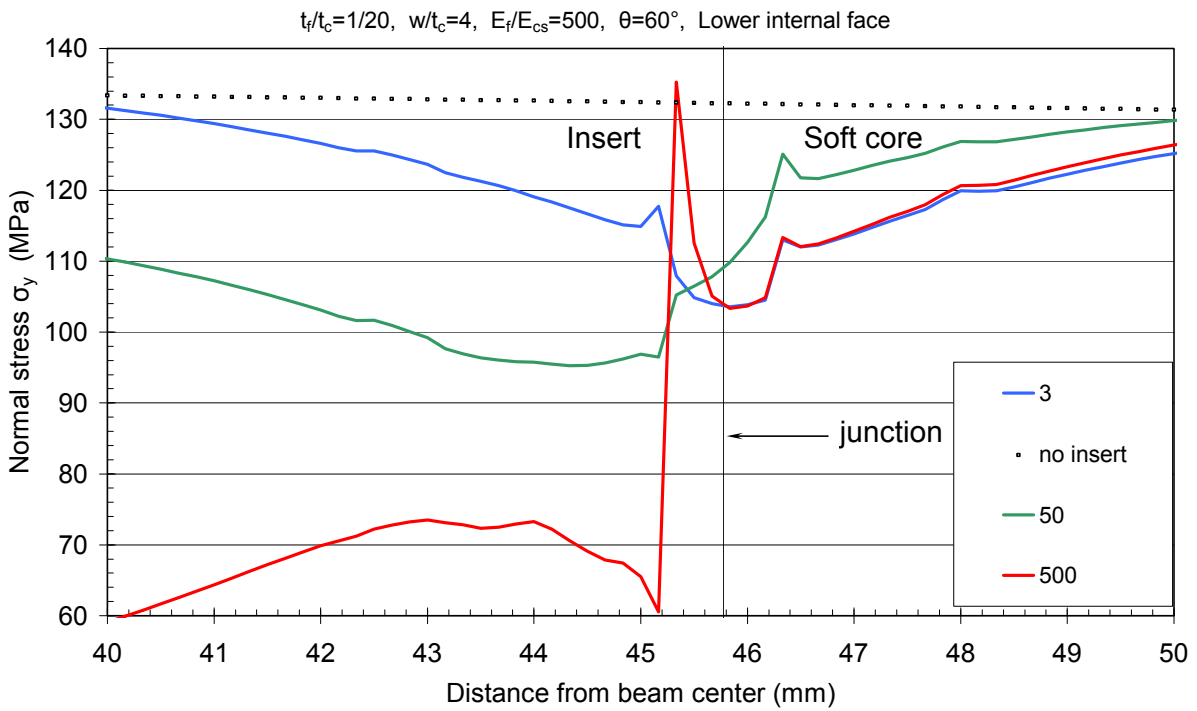
Σχήμα 3.B.13 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



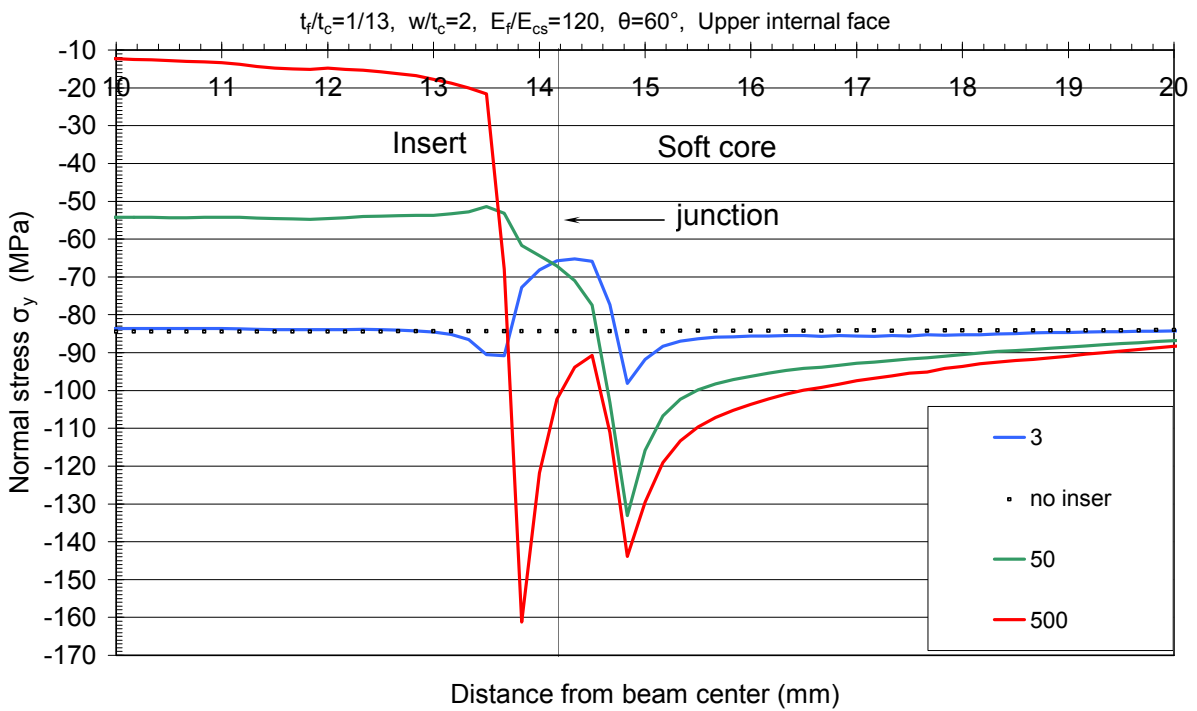
Σχήμα 3.B.14 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



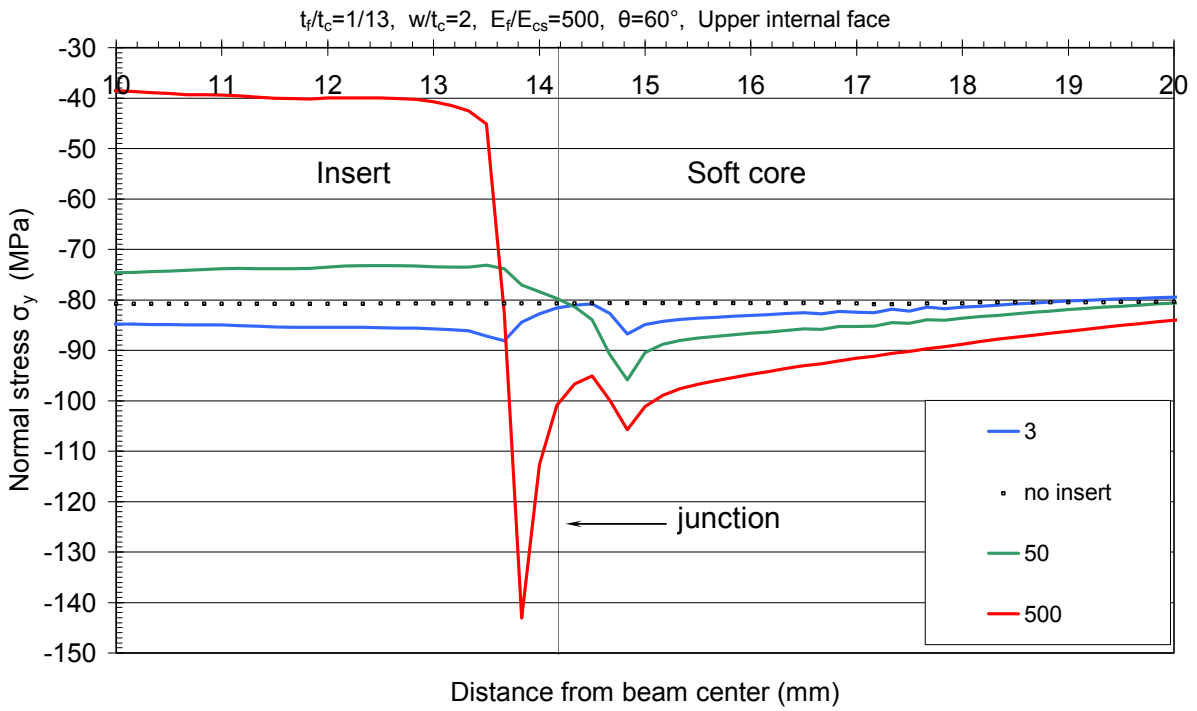
Σχήμα 3.B.15 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



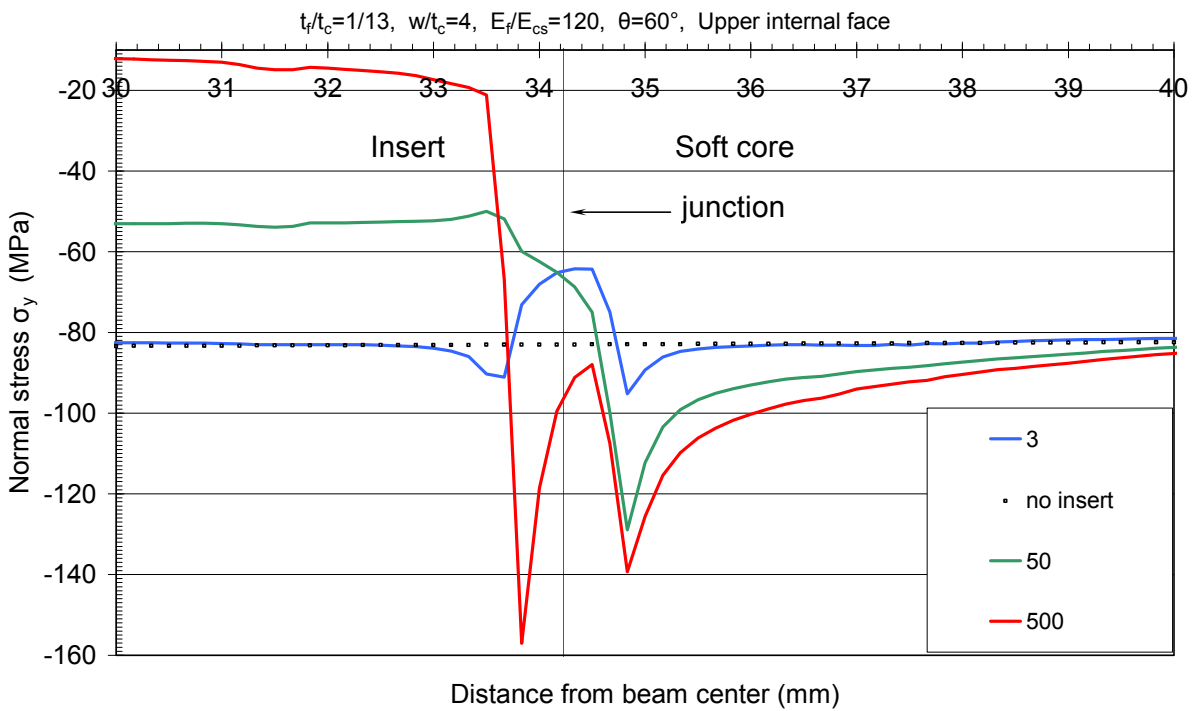
Σχήμα 3.B.16 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



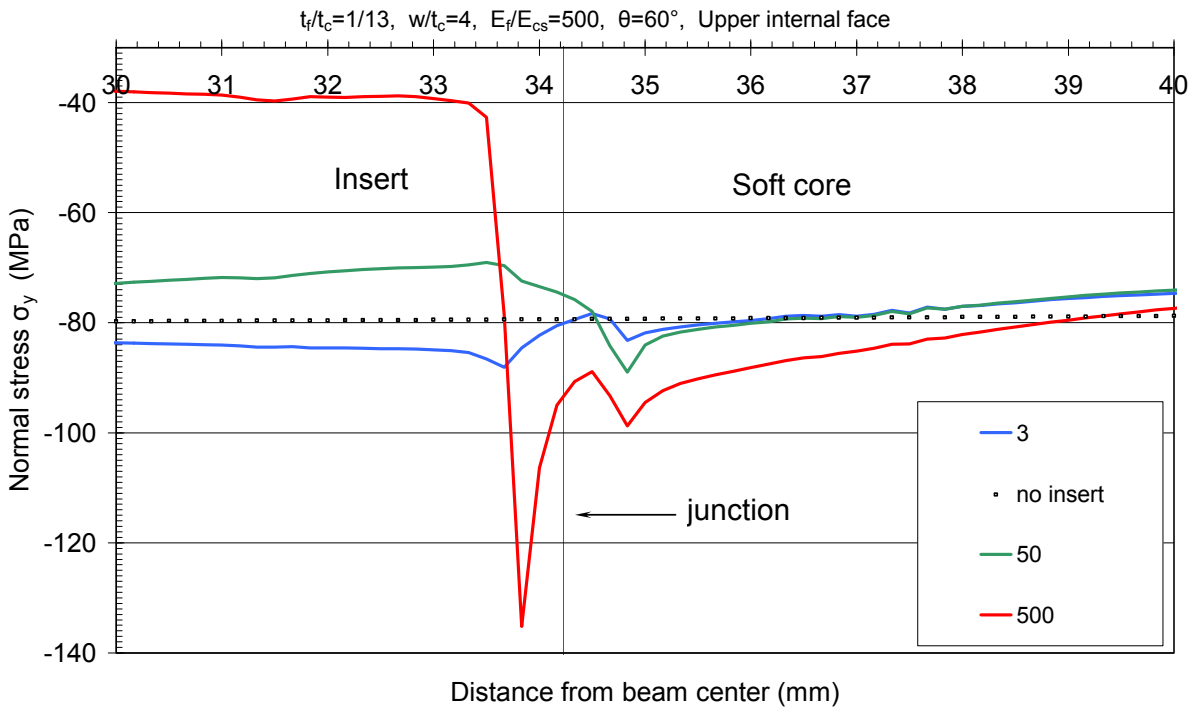
Σχήμα 3.B.17 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



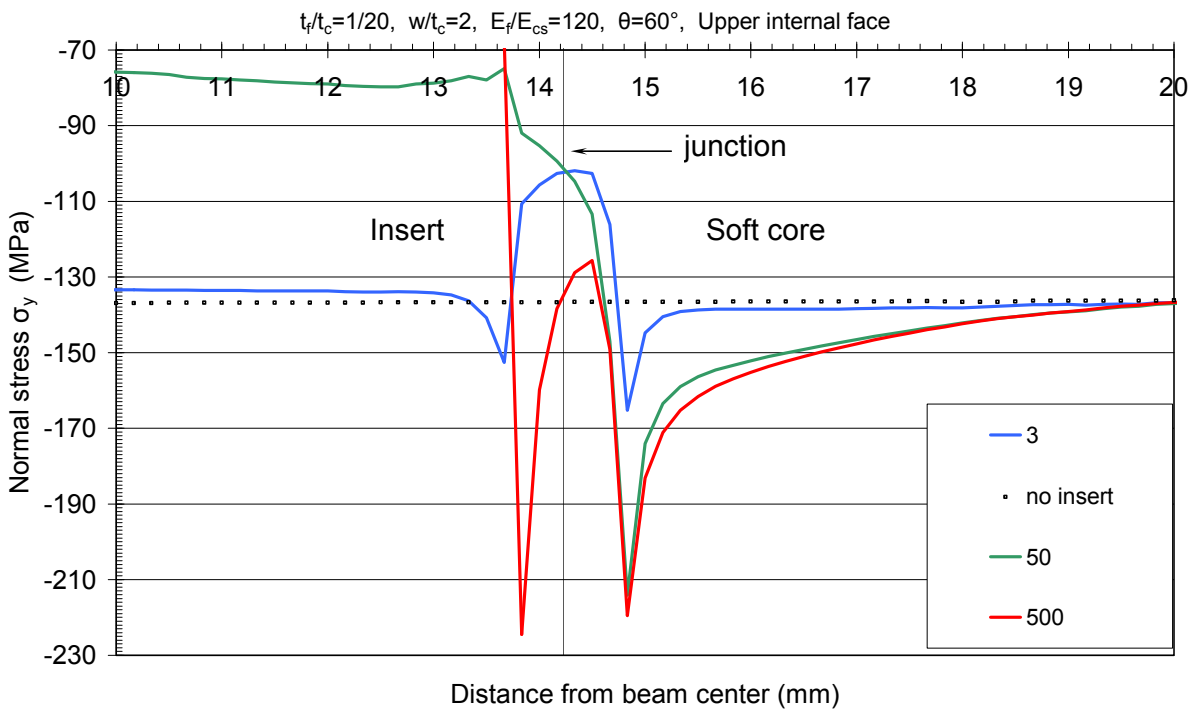
Σχήμα 3.B.18 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



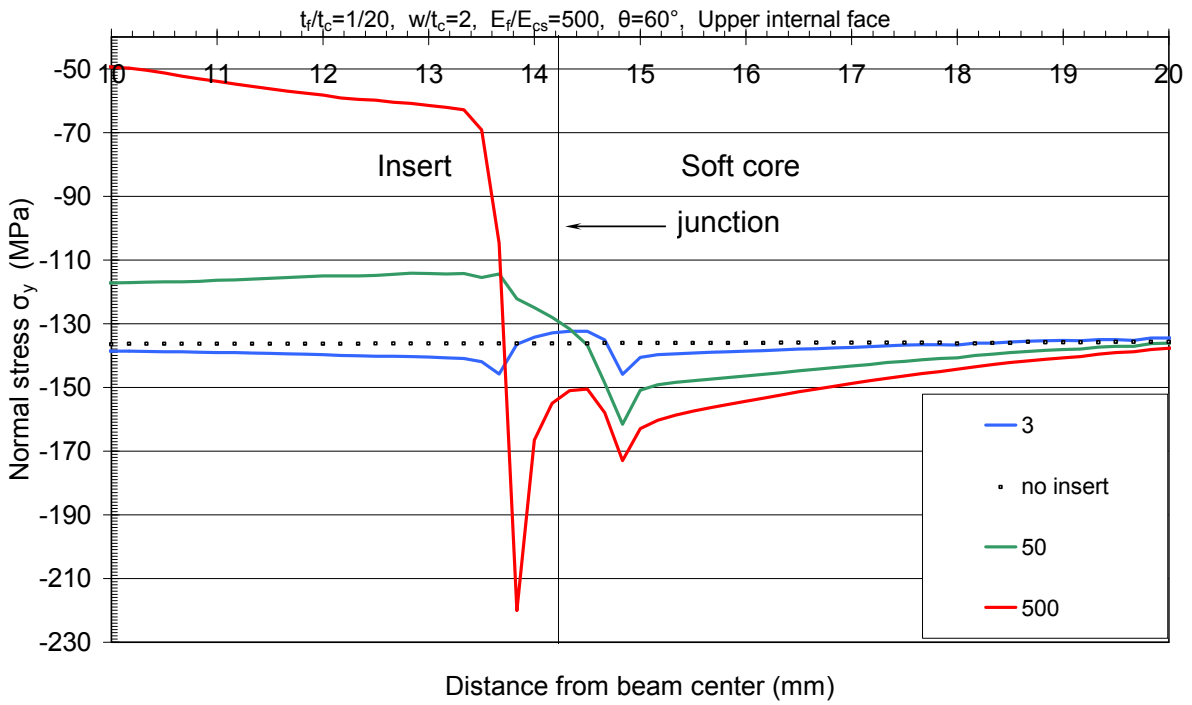
Σχήμα 3.B.19 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



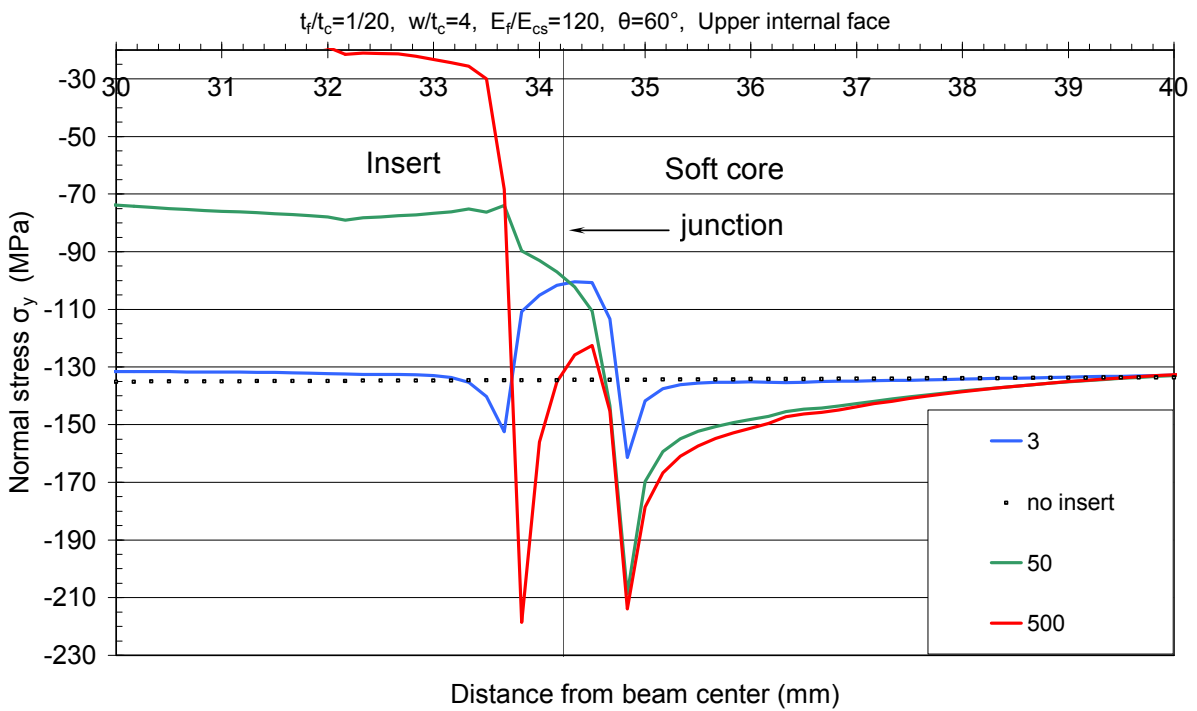
Σχήμα 3.B.20 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



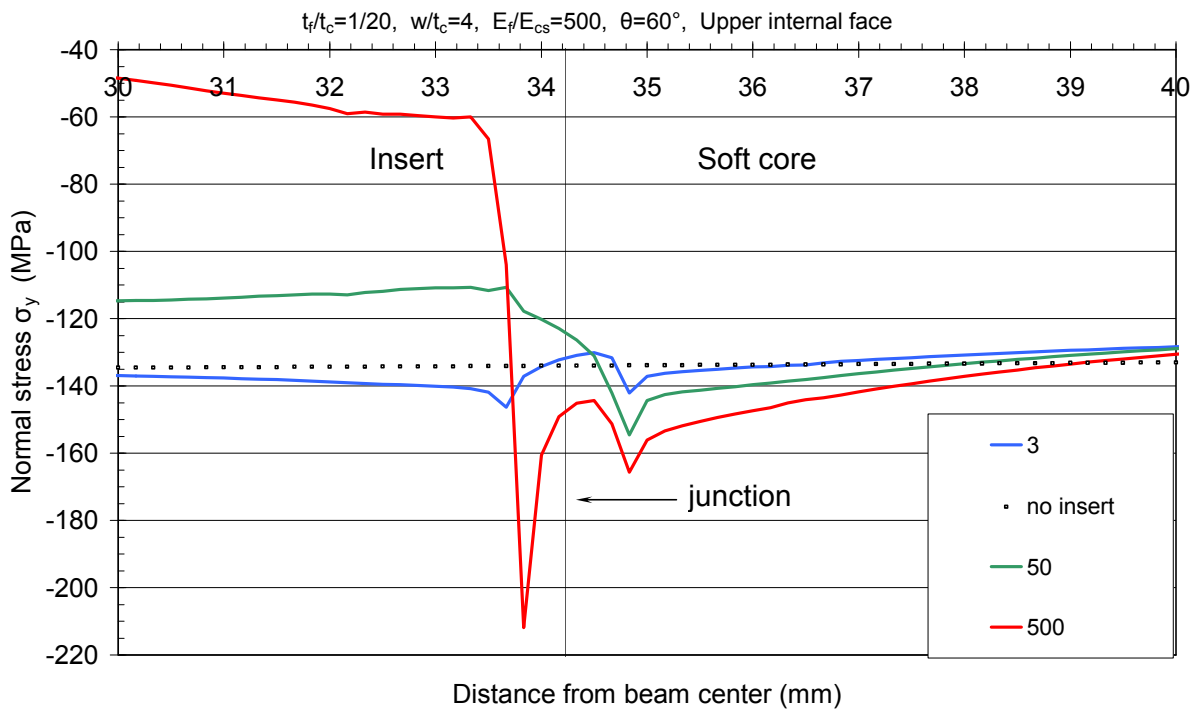
Σχήμα 3.B.21 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



Σχήμα 3.B.22 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



Σχήμα 3.B.23 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



Σχήμα 3.B.24 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου

Πίνακας 3.B.1.

σχ a3		13-2-90-120		
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500	
k	1.12	1.41	1.68	

Πίνακας 3.B.2.

σχ a3		20-2-90-120		
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500	
k	1.1	1.36	1.44	

Πίνακας 3.B.3.

σχ a3		13-2-90-500		
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500	
k	0.957	0.977	1.21	

Πίνακας 3.B.4.

σχ a3		20-2-90-500		
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500	
k	0.95	1.04	1.16	

Πίνακας 3.B.5.

σχ a3		13-4-90-120		
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500	
k	1.075	1.34	1.63	

Πίνακας 3.B.6.

σχ a3		20-4-90-120		
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500	
k	1.07	1.31	1.43	

Πίνακας 3.B.7.

σχ a3		13-4-90-500		
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500	
k	0.9	0.67	1.016	

Πίνακας 3.B.8.

σχ a3		20-4-90-500		
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500	
k	0.92	0.94	1.07	

Πίνακας 3.B.9.

σχ a3		13-2-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.11	1.42	1.4

Πίνακας 3.B.11.

σχ a3		13-2-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.92	0.96	1.02

Πίνακας 3.B.13.

σχ a3		13-4-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.04	1.33	1.33

Πίνακας 3.B.15.

σχ a3		13-4-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.84	0.77	0.73

Πίνακας 3.B.17.

σχ a2		13-2-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.16	1.577	1.9

Πίνακας 3.B.19.

σχ a2		13-2-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.076	1.19	1.77

Πίνακας 3.B.21.

σχ a2		13-4-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.147	1.55	1.89

Πίνακας 3.B.23.

σχ a2		13-4-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.11	1.12	1.7

Πίνακας 3.B.10.

σχ a3		20-2-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.23	1.53	1.53

Πίνακας 3.B.12.

σχ a3		20-2-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.95	1.07	1.21

Πίνακας 3.B.14.

σχ a3		20-4-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.18	1.47	1.475

Πίνακας 3.B.16.

σχ a3		20-4-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	0.89	0.94	1.02

Πίνακας 3.B.18.

σχ a2		20-2-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.2	1.57	1.65

Πίνακας 3.B.20.

σχ a2		20-2-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.07	1.18	1.615

Πίνακας 3.B.22.

σχ a2		20-4-60-120	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.2	1.55	1.63

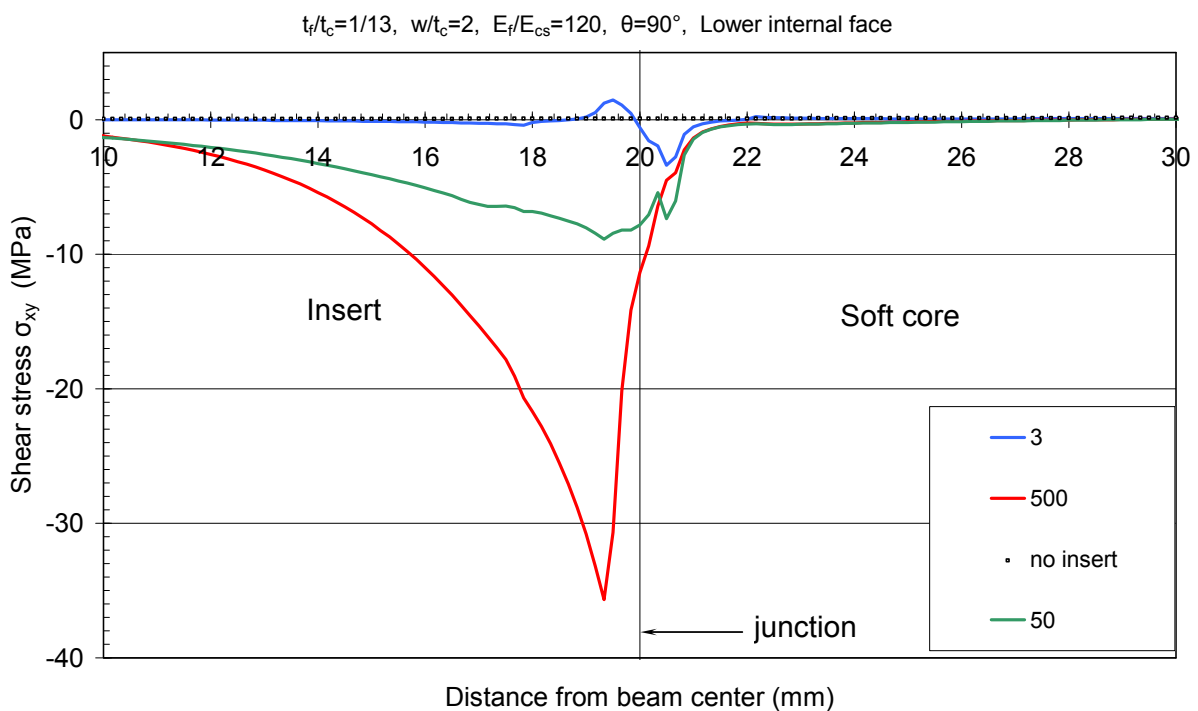
Πίνακας 3.B.25.

σχ a2		20-4-60-500	
E_{CH}/E_{CS}	3	50	500
k	1.06	1.15	1.58

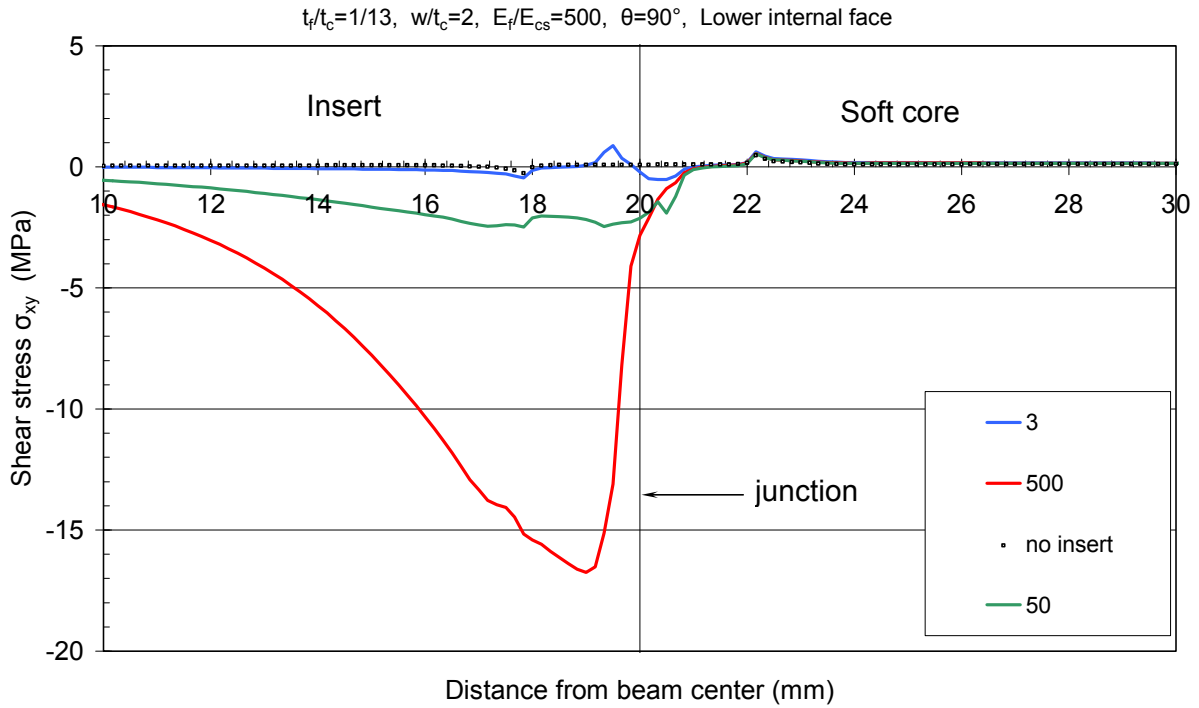
ΕΝΟΤΗΤΑ «Γ»

Παρουσίαση των διαγραμμάτων που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη, όσο αναφορά την μέτρηση διατμητικής τάσεως στην άνω και κάτω εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων των δοκιμίων.

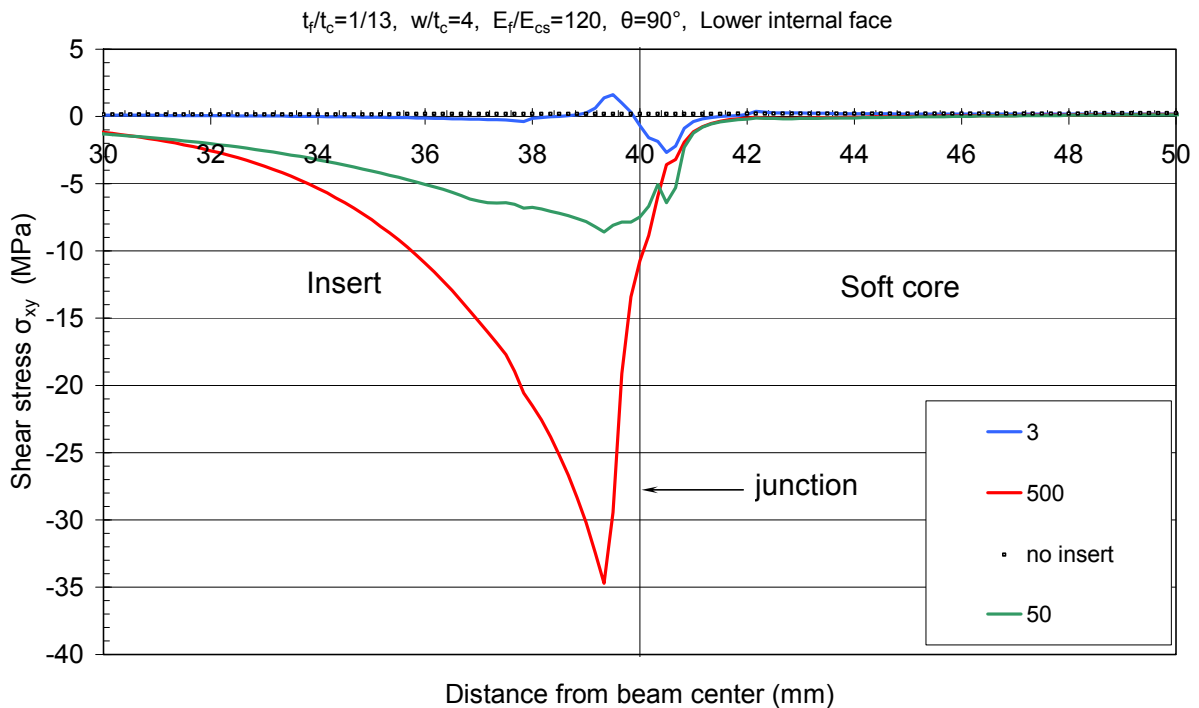
Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο τα δοκίμια με ορθογώνιο ένθεμα (90^0), όσο και αυτά με τραπεζοειδές ένθεμα (60^0)



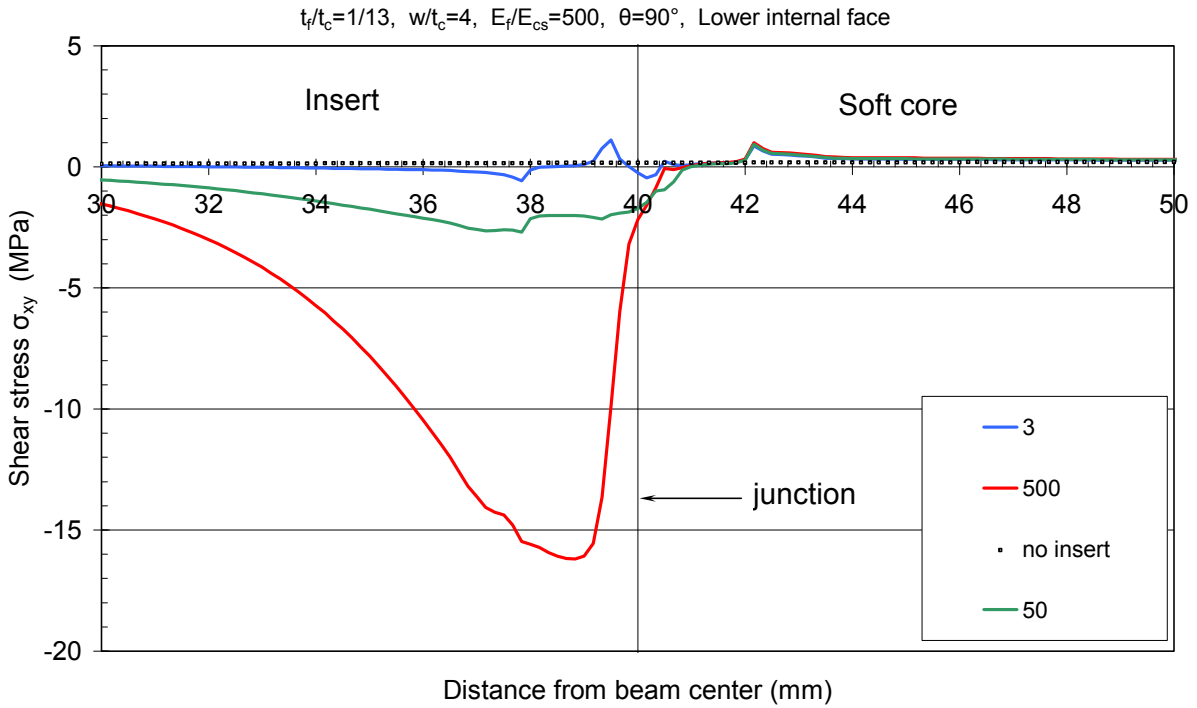
Σχήμα 3.Γ.1 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



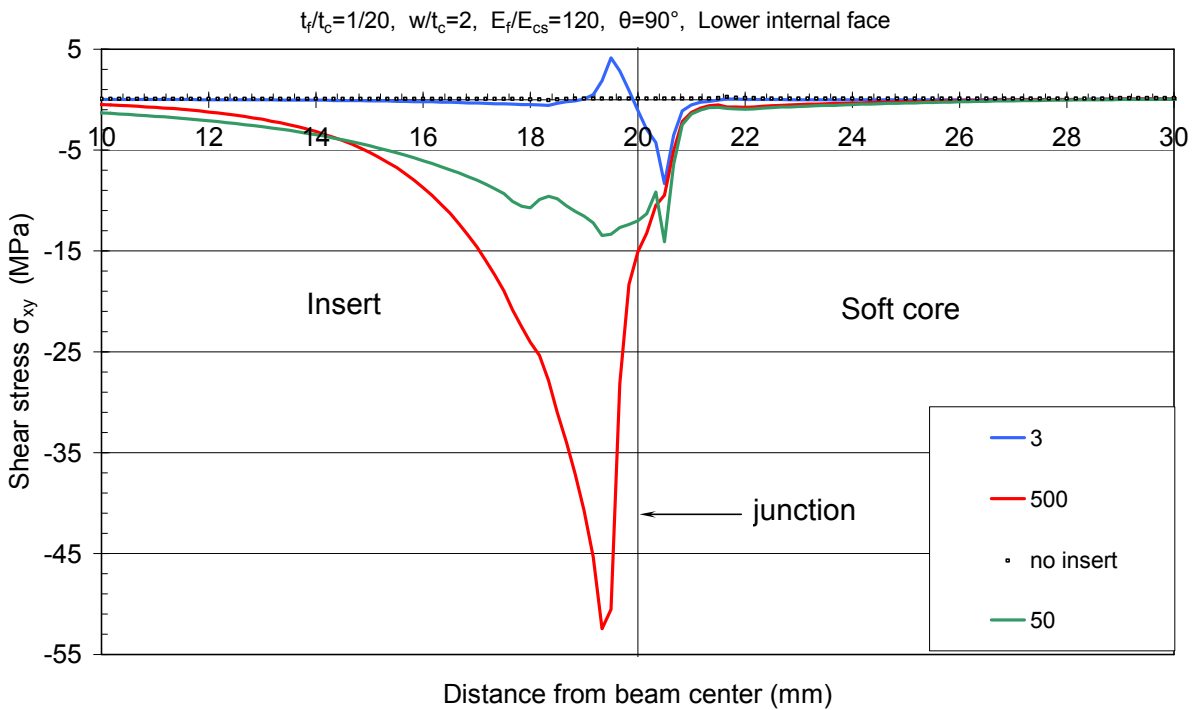
Σχήμα 3.Γ.2 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



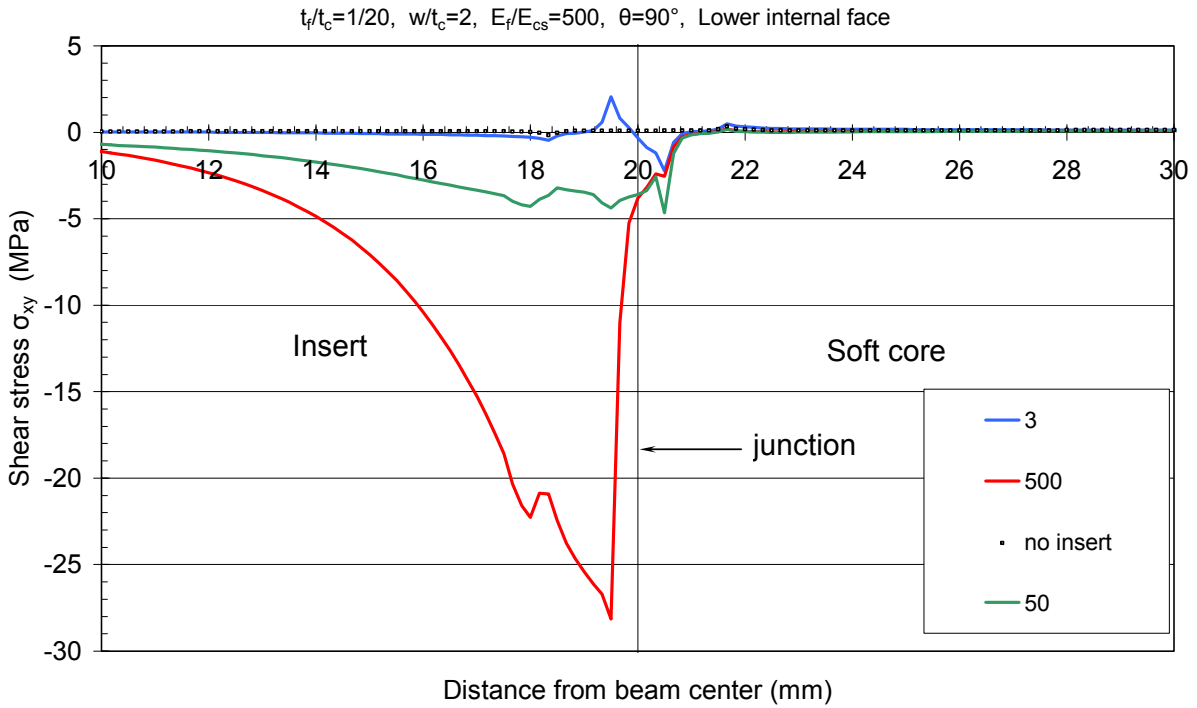
Σχήμα 3.Γ.3 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



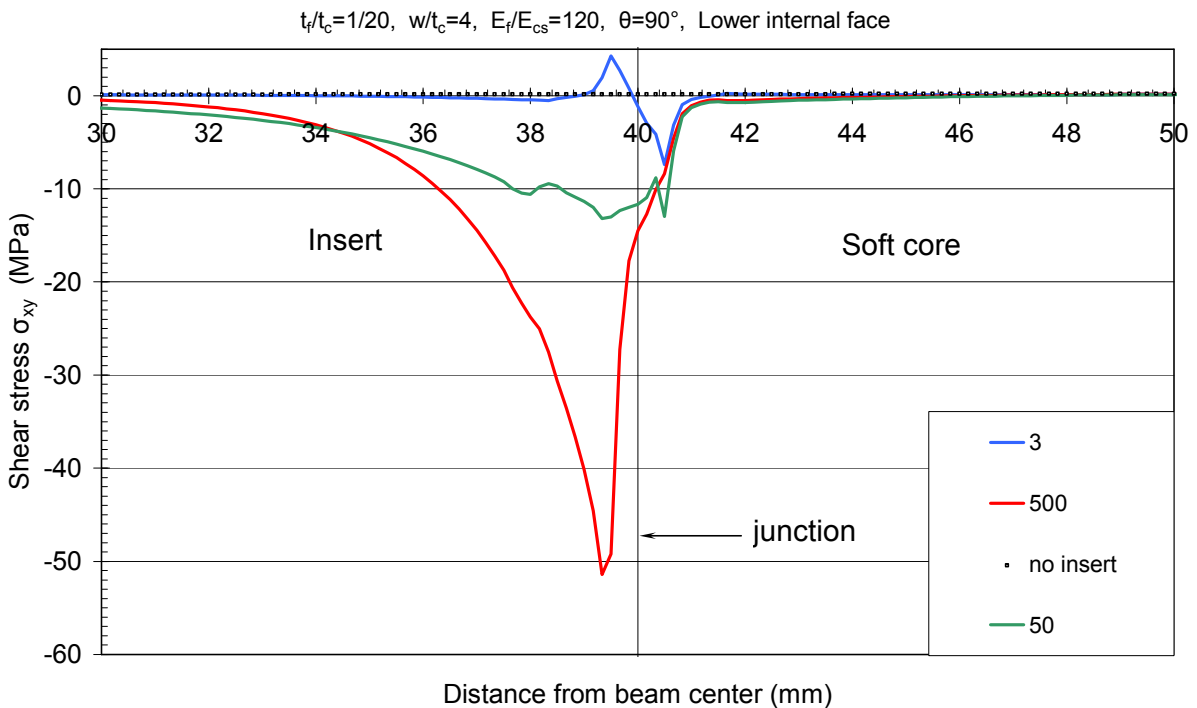
Σχήμα 3.Γ.4 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



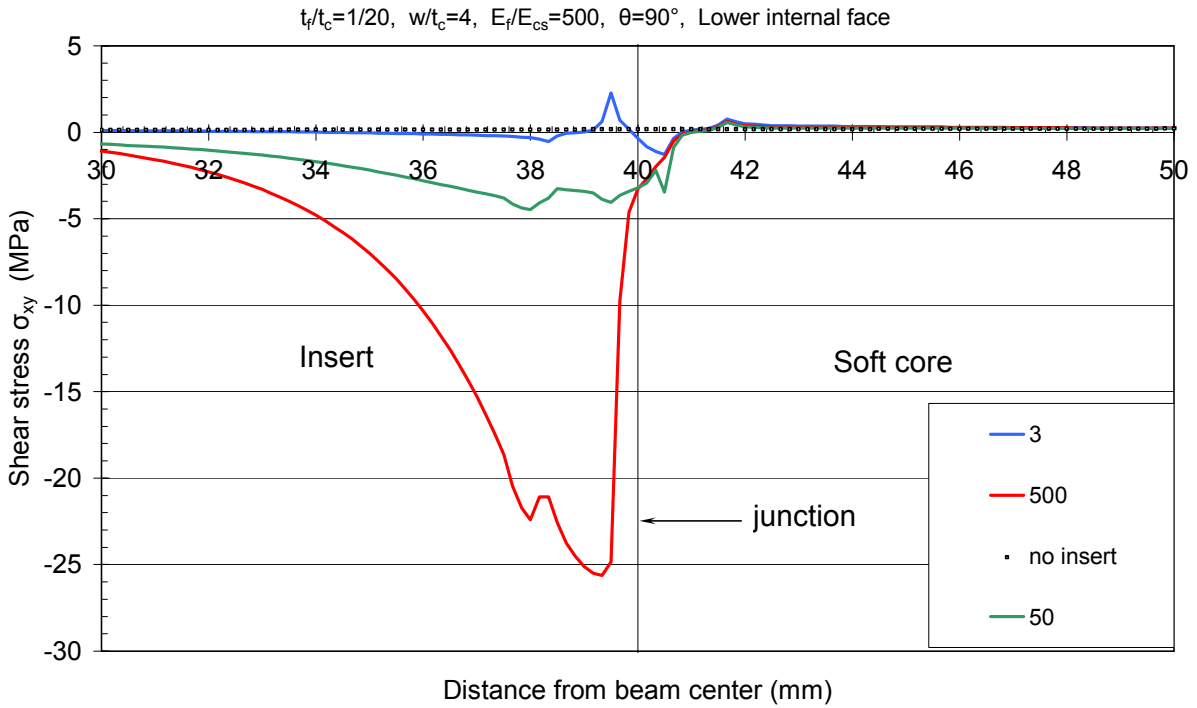
Σχήμα 3.Γ.5 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



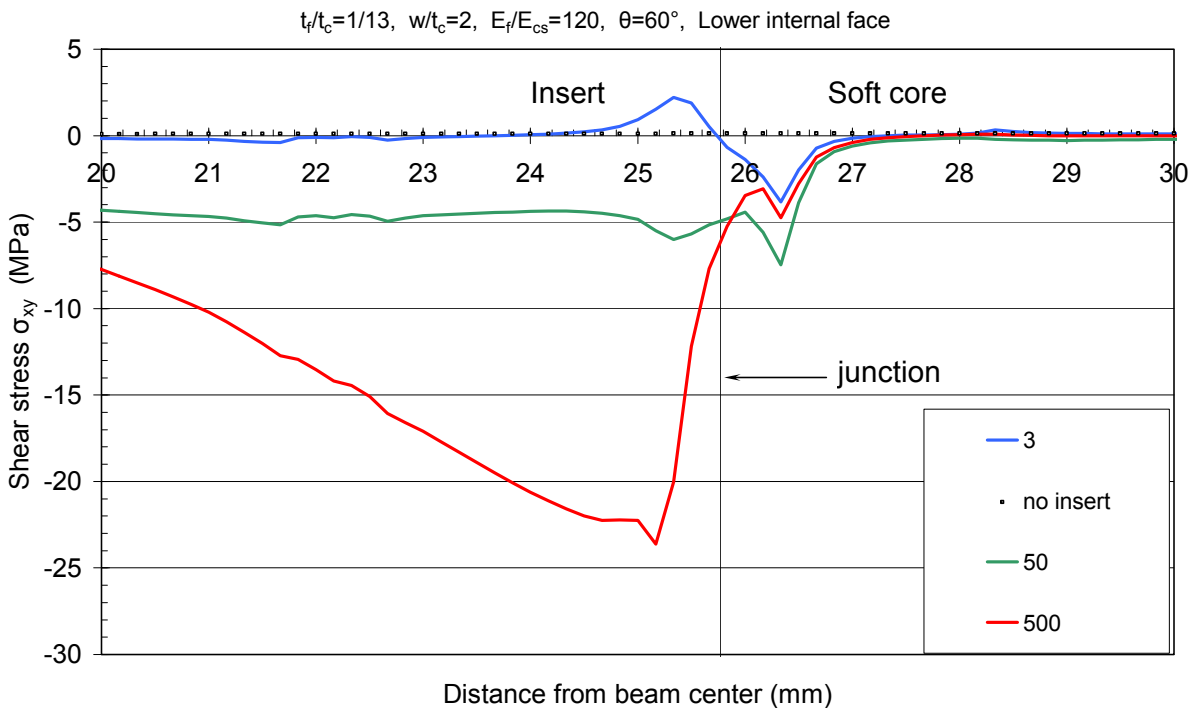
Σχήμα 3.Γ.6 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



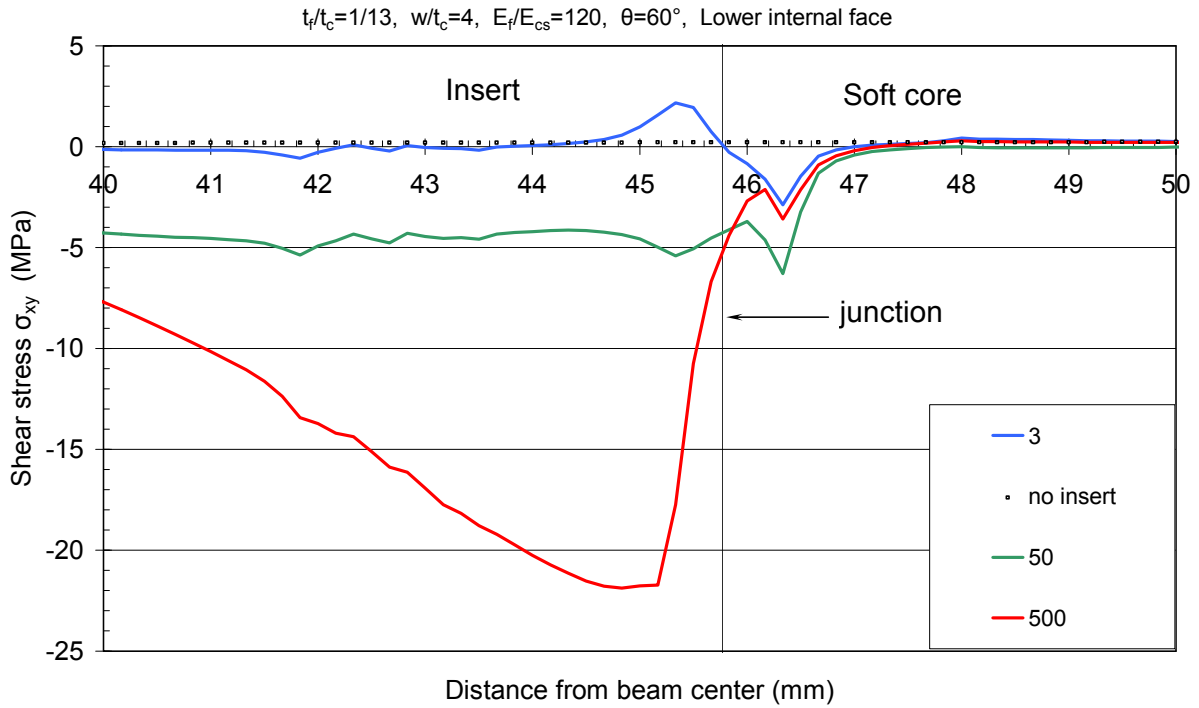
Σχήμα 3.Γ.7 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



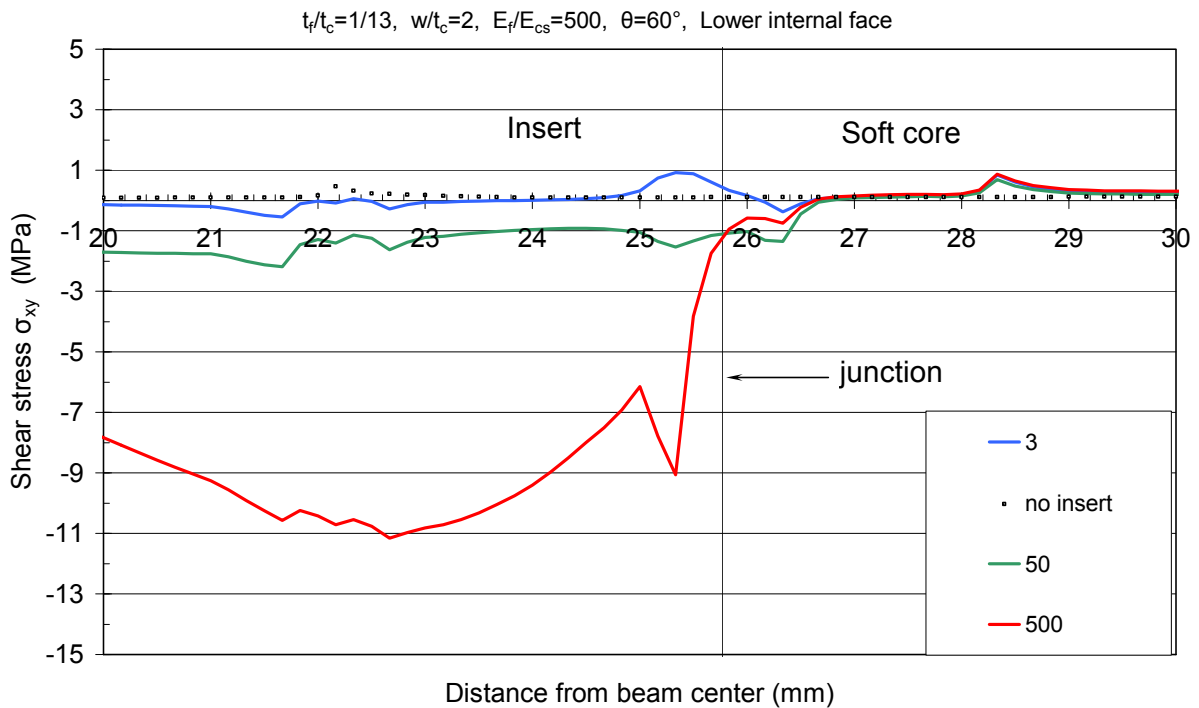
Σχήμα 3.Γ.8 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



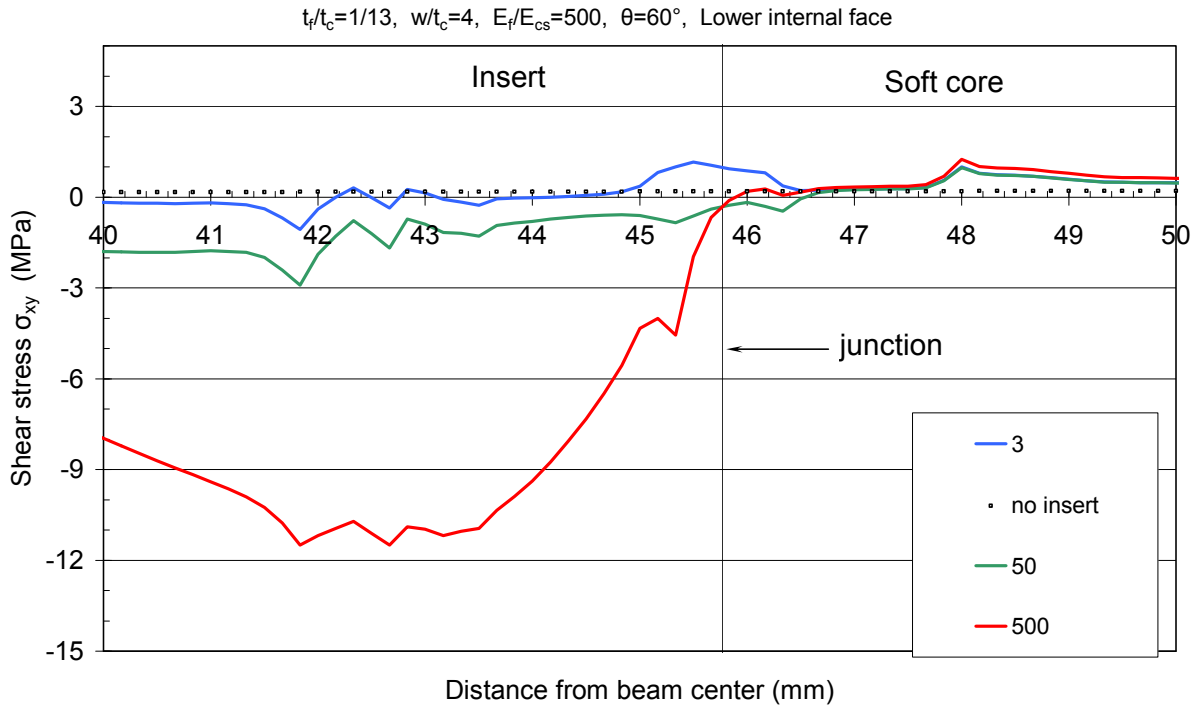
Σχήμα 3.Γ.9 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



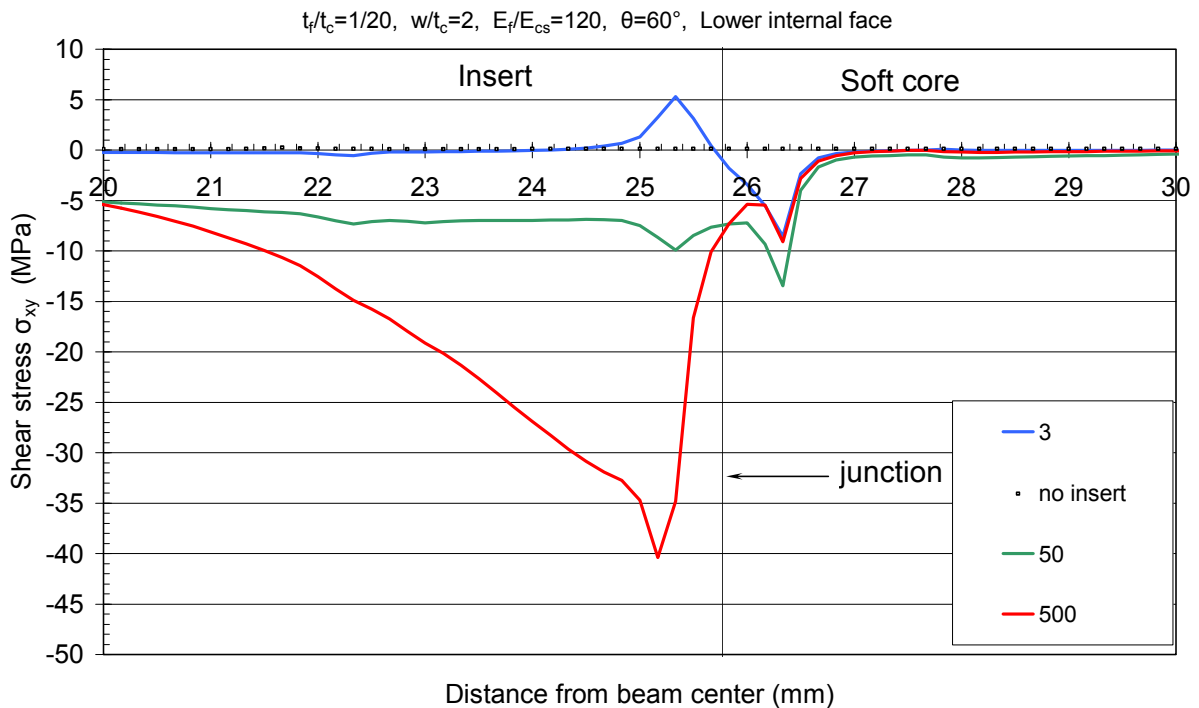
Σχήμα 3.Γ.10 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



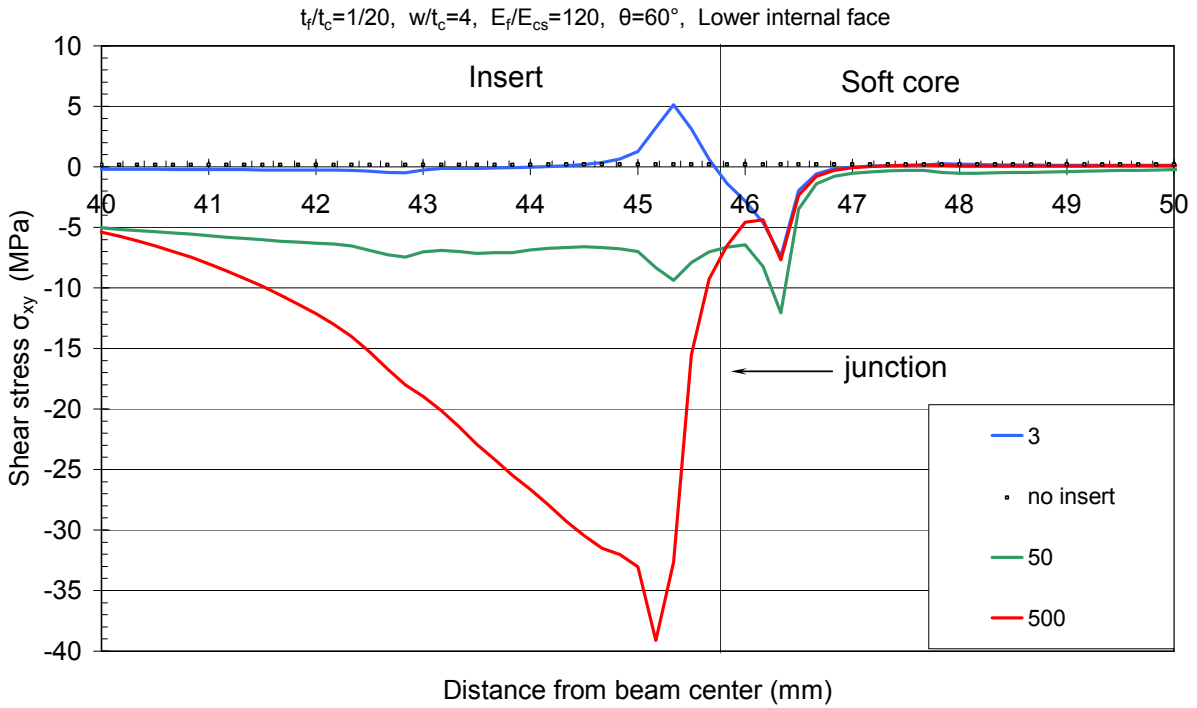
Σχήμα 3.Γ.11 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



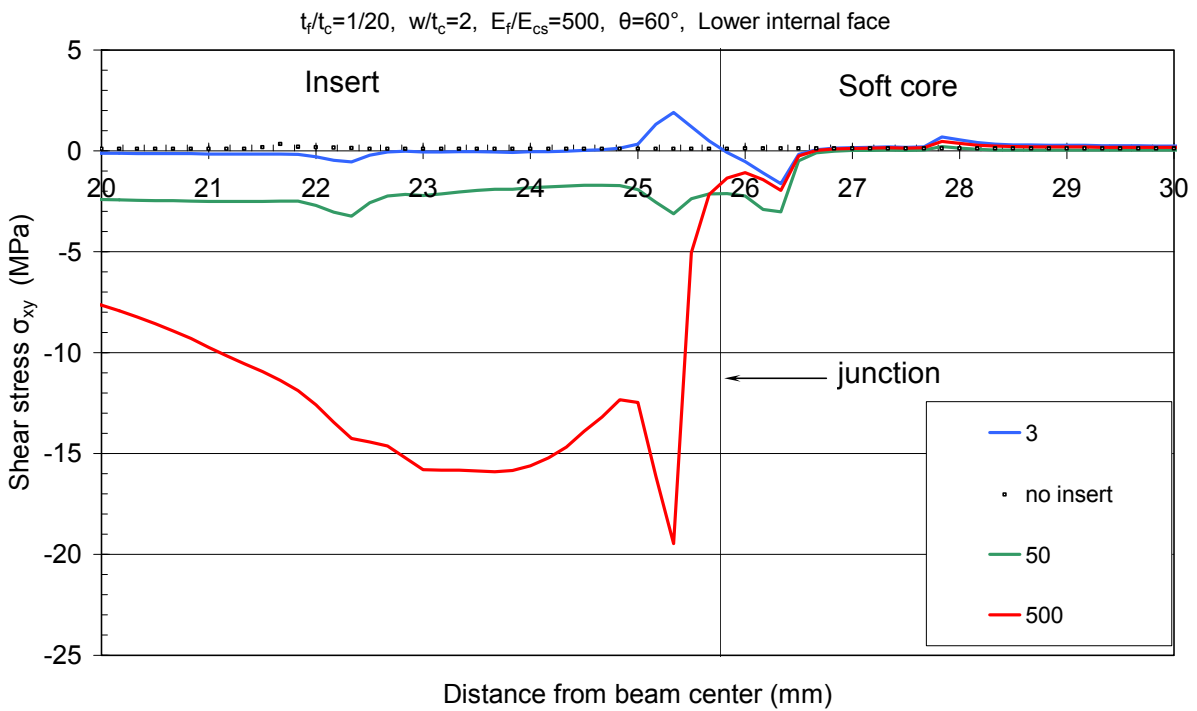
Σχήμα 3.Γ.12 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



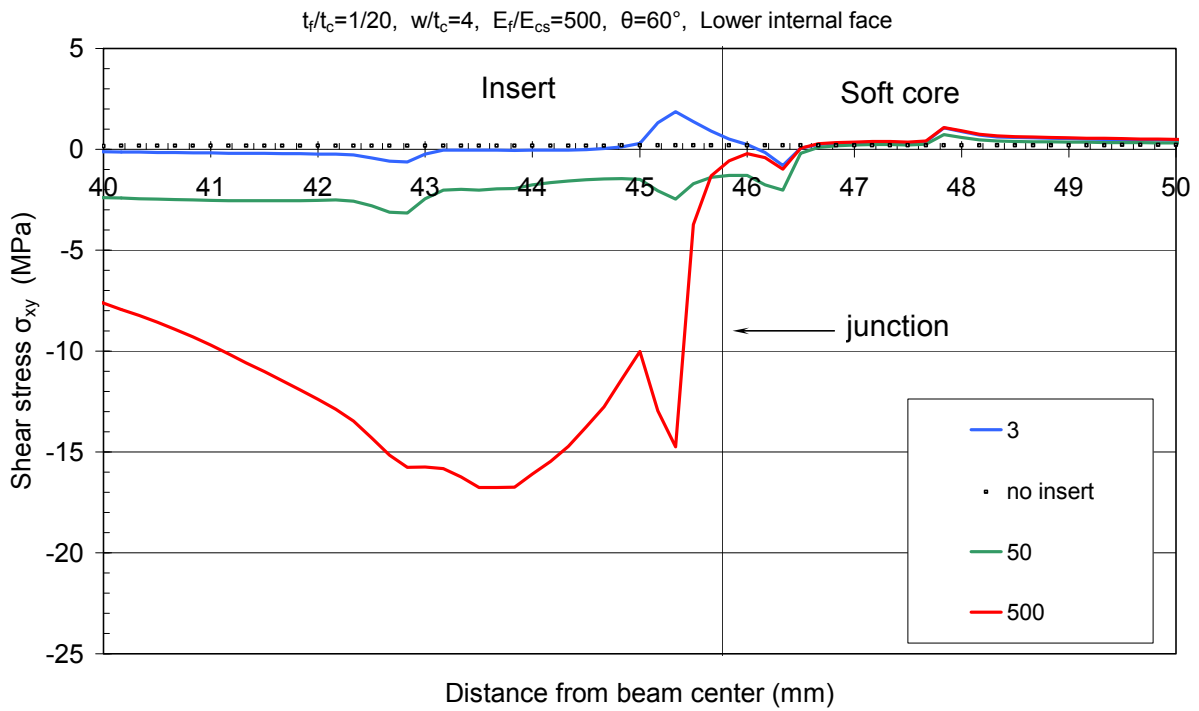
Σχήμα 3.Γ.13 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



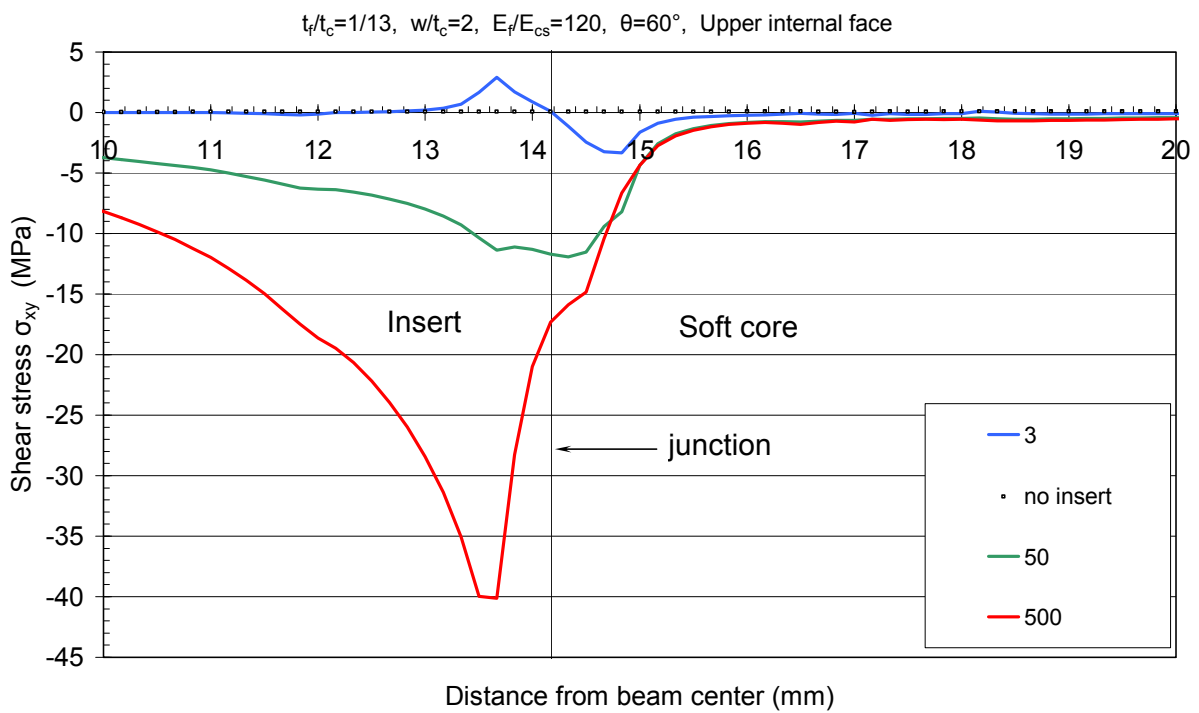
Σχήμα 3.Γ.14 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



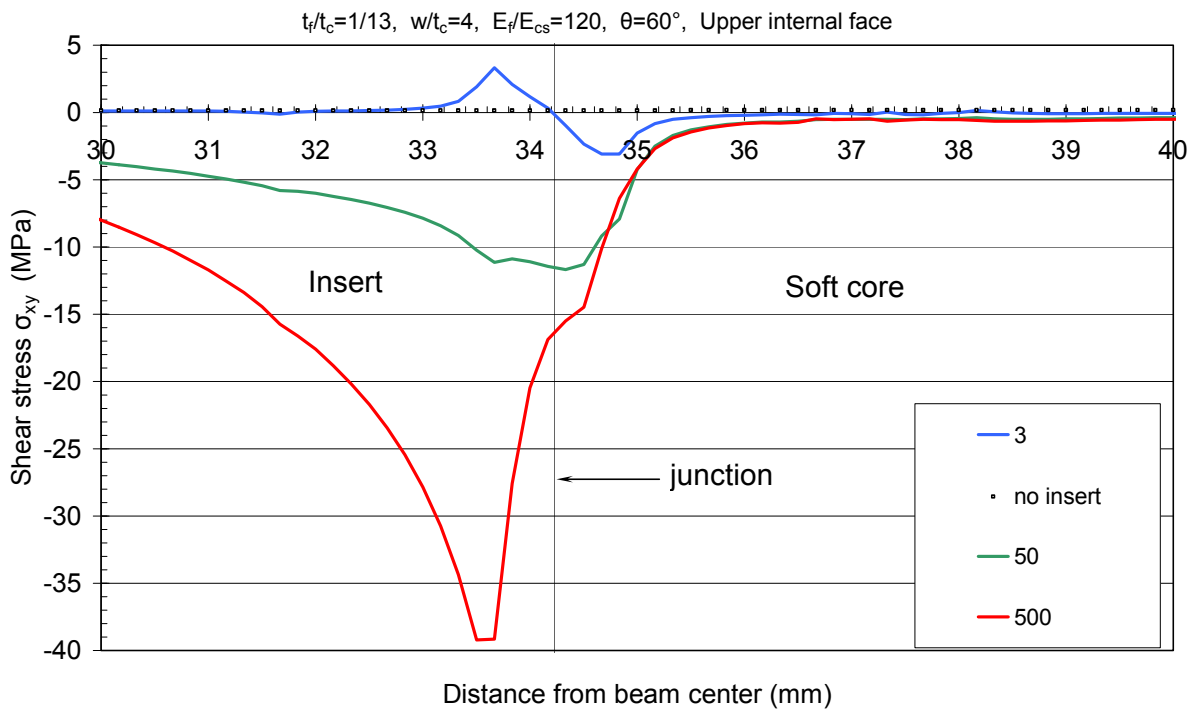
Σχήμα 3.Γ.15 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



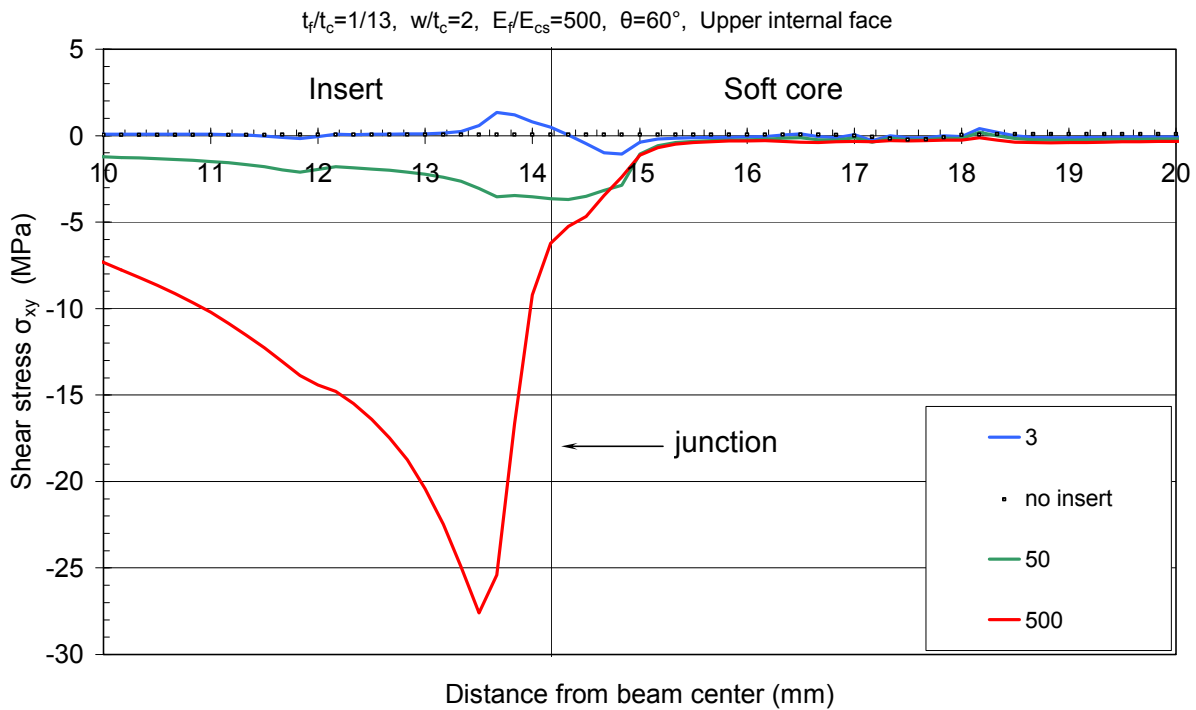
Σχήμα 3.Γ.16 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



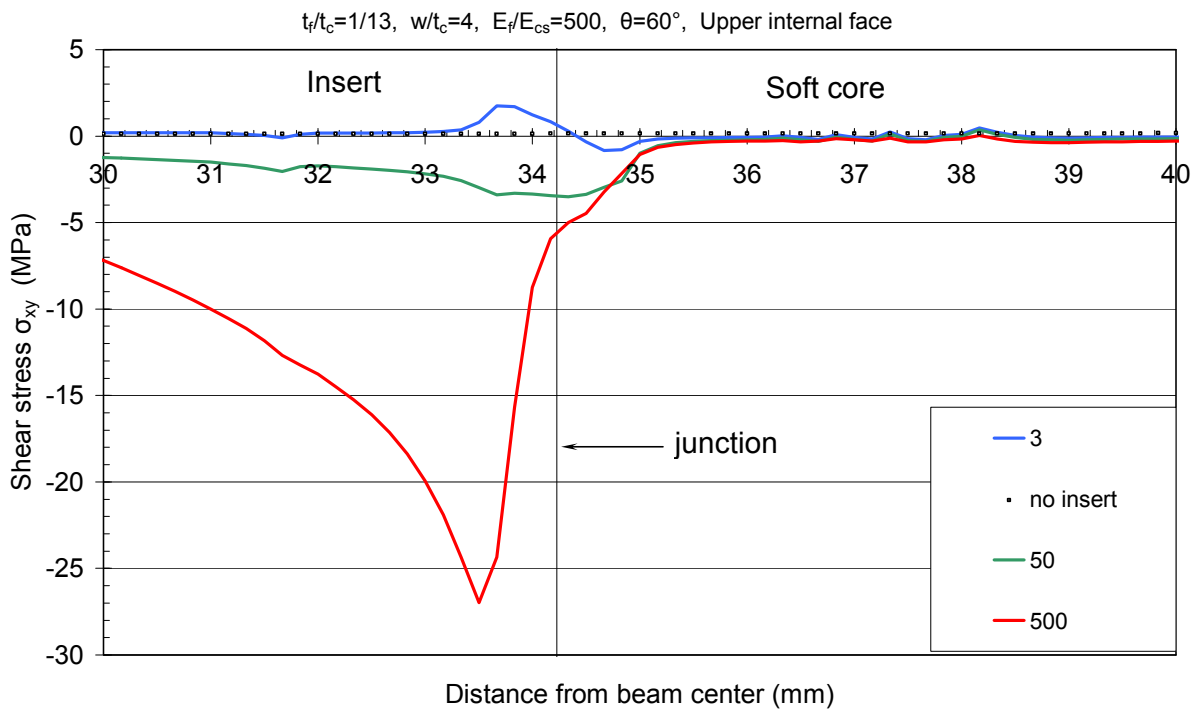
Σχήμα 3.Γ.17 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



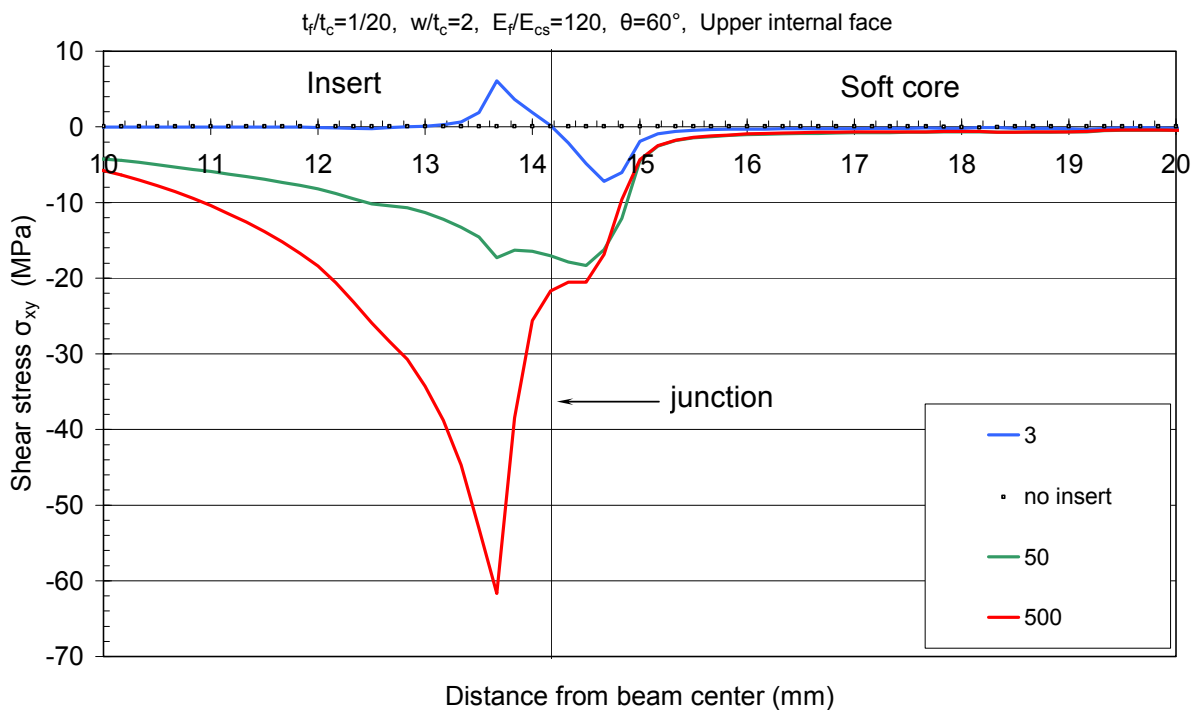
Σχήμα 3.Γ.18 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



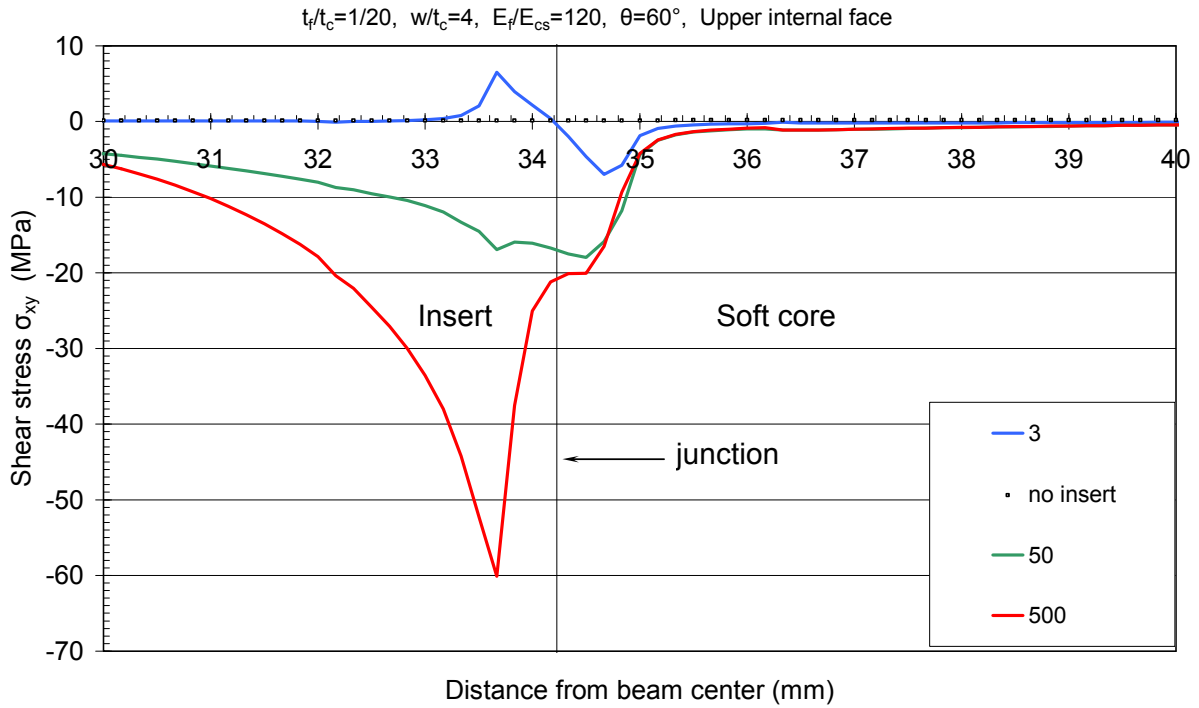
Σχήμα 3.Γ.19 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



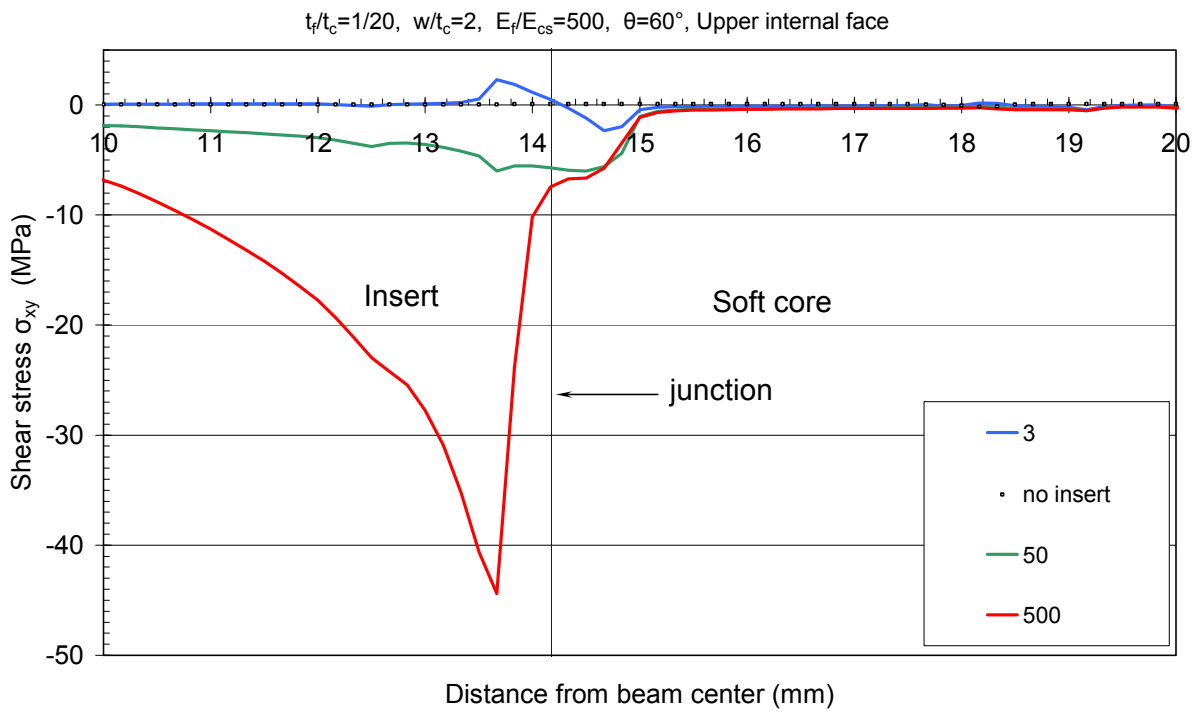
Σχήμα 3.Γ.20 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



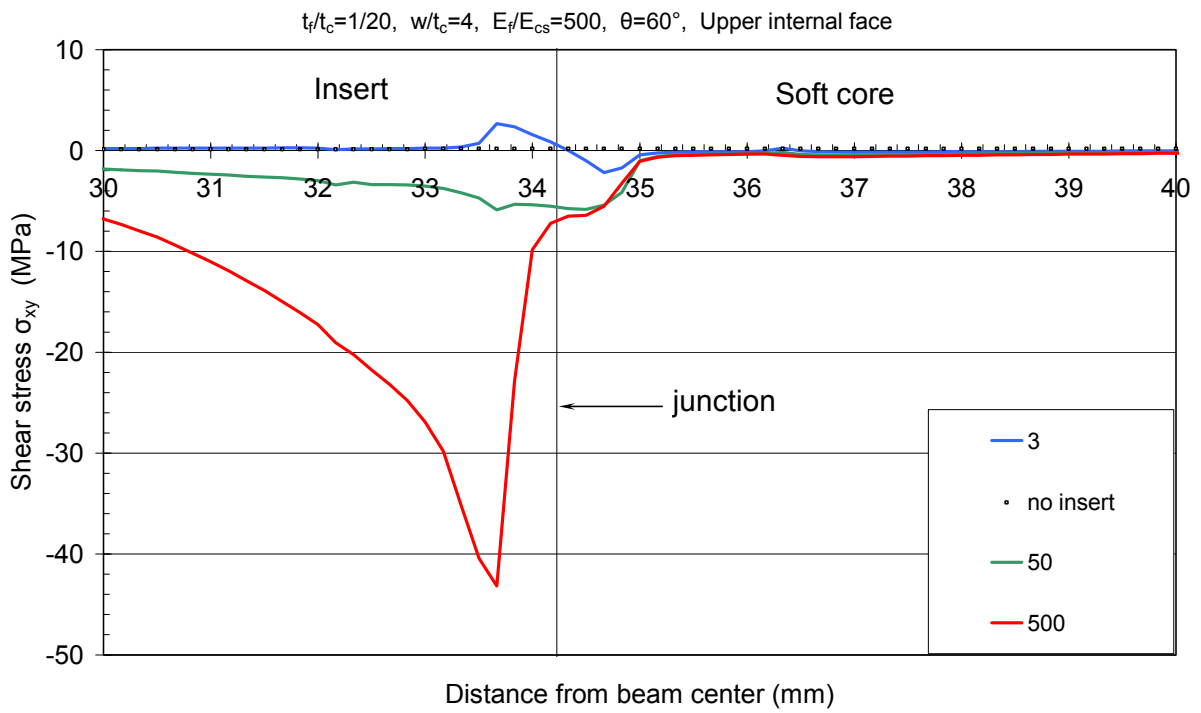
Σχήμα 3.Γ.21 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



Σχήμα 3.Γ.22 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



Σχήμα 3.Γ.23 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου

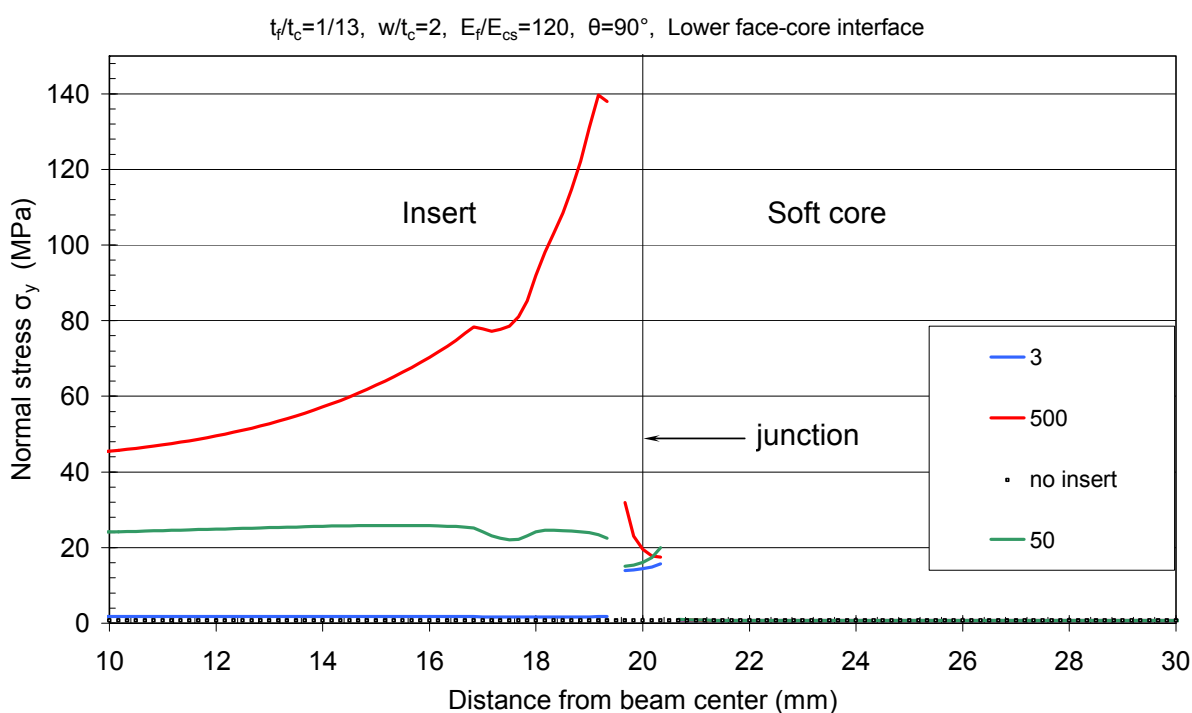


Σχήμα 3.Γ.24 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου

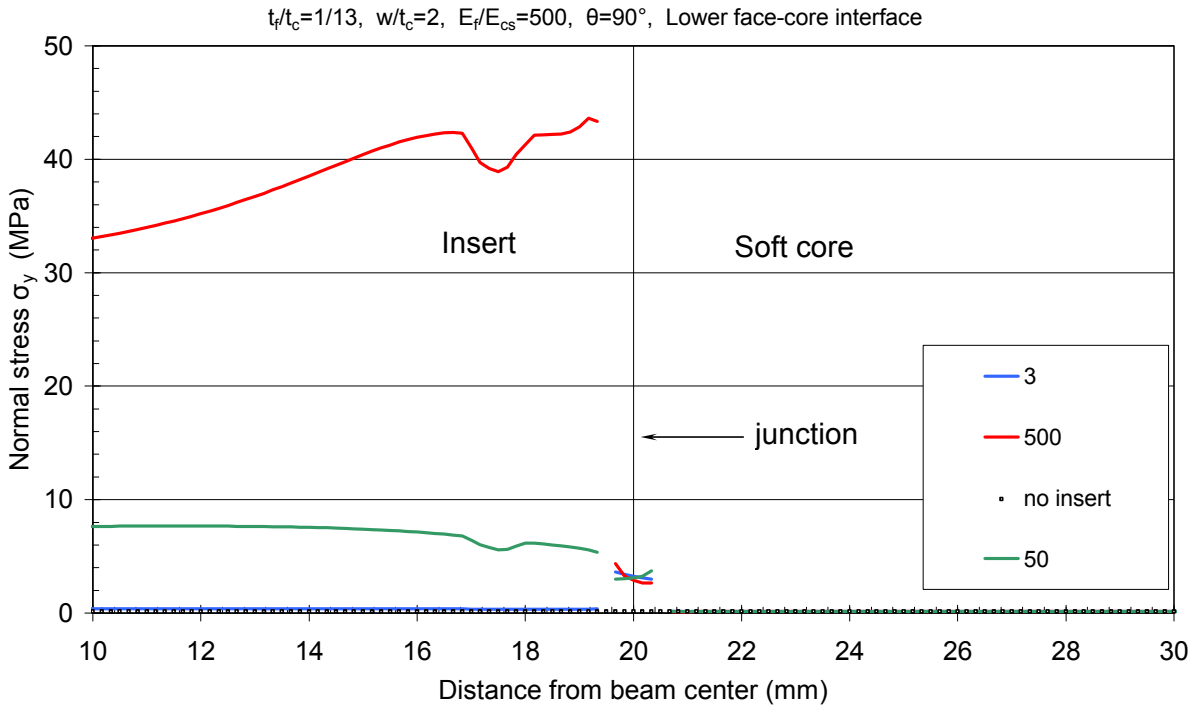
ΕΝΟΤΗΤΑ «Α»

Παρουσίαση των διαγραμμάτων που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη, όσο αναφορά την μέτρηση ορθής τάσεως πάνω στον πυρήνα στην άνω και κάτω (εσωτερική) επιφάνεια επαφής του πυρήνα με τα περιβλήματα.

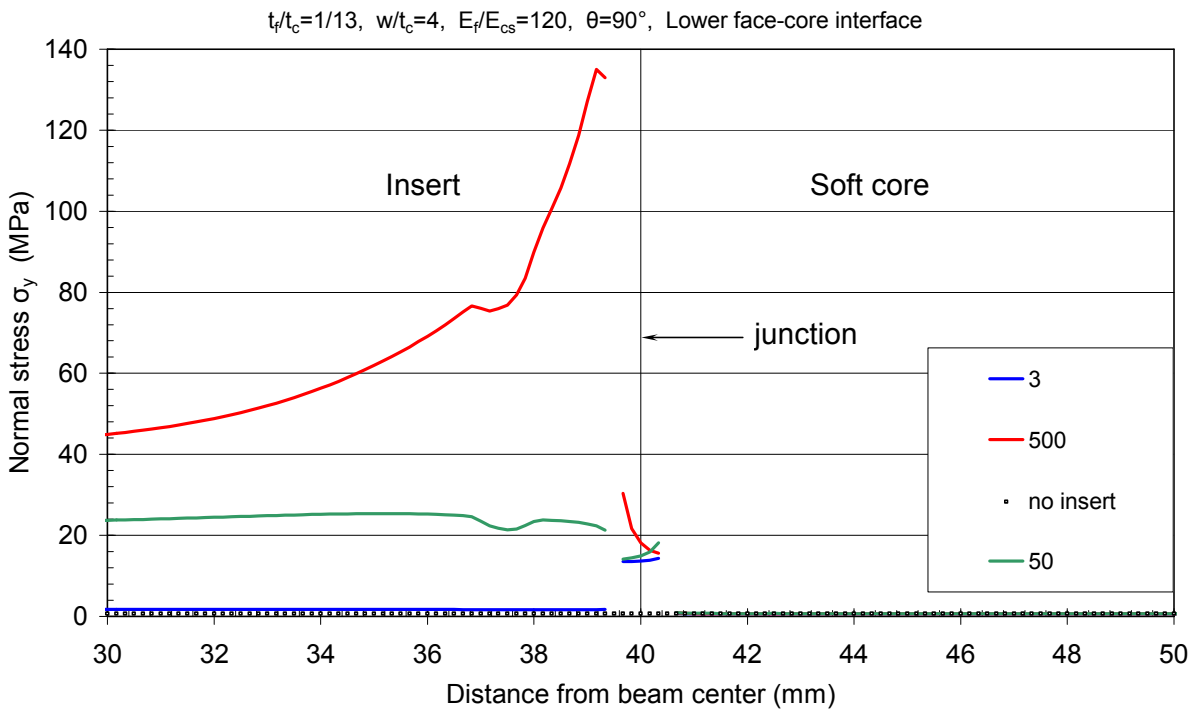
Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο τα δοκίμια με ορθογώνιο ένθεμα (90°), όσο και αυτά με τραπεζοειδές ένθεμα (60°)



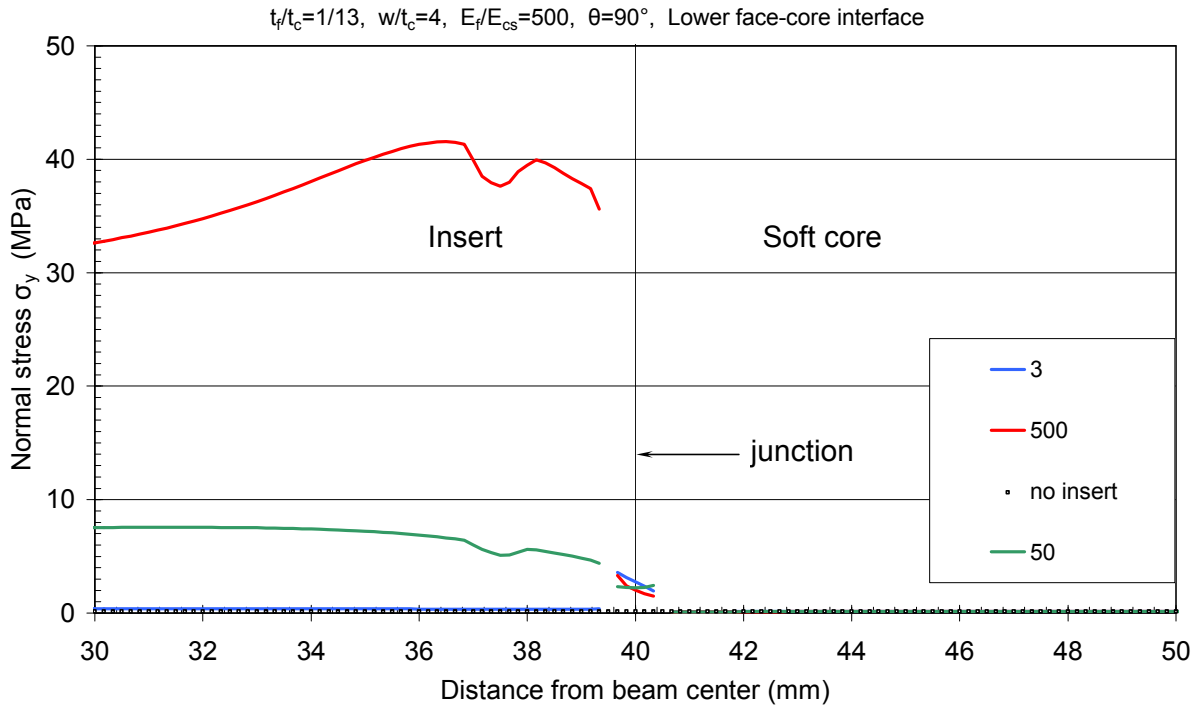
Σχήμα 3.Δ.1 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



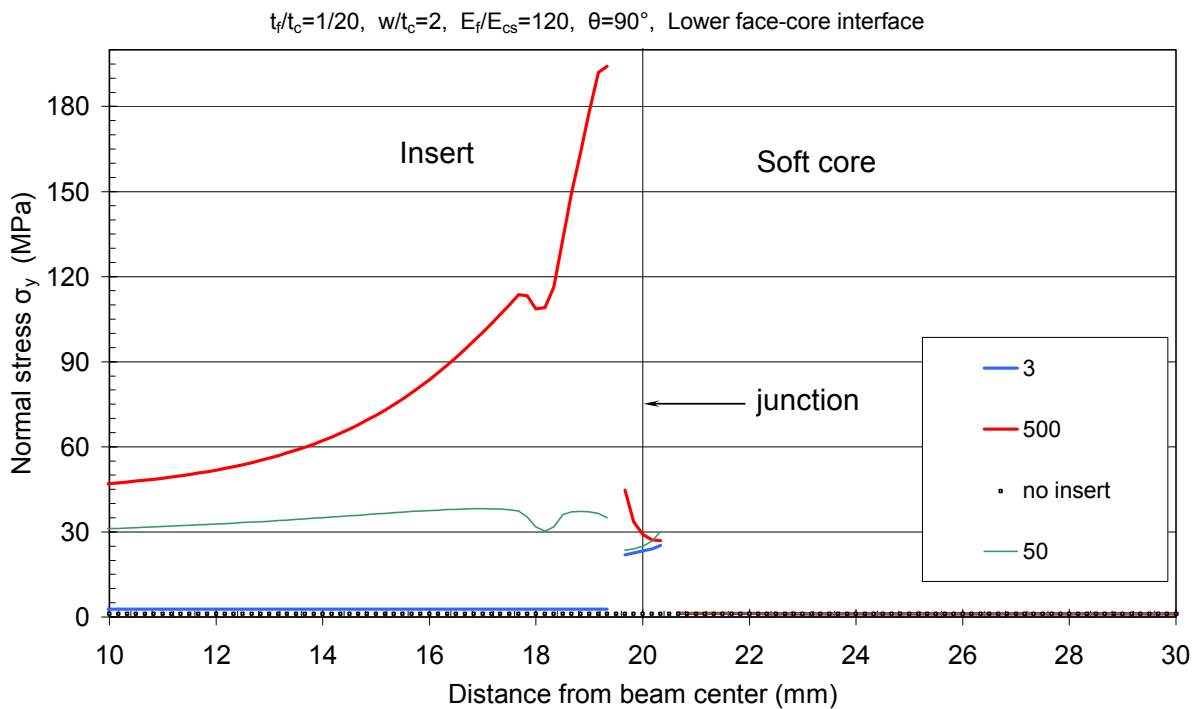
Σχήμα 3.Δ.2 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



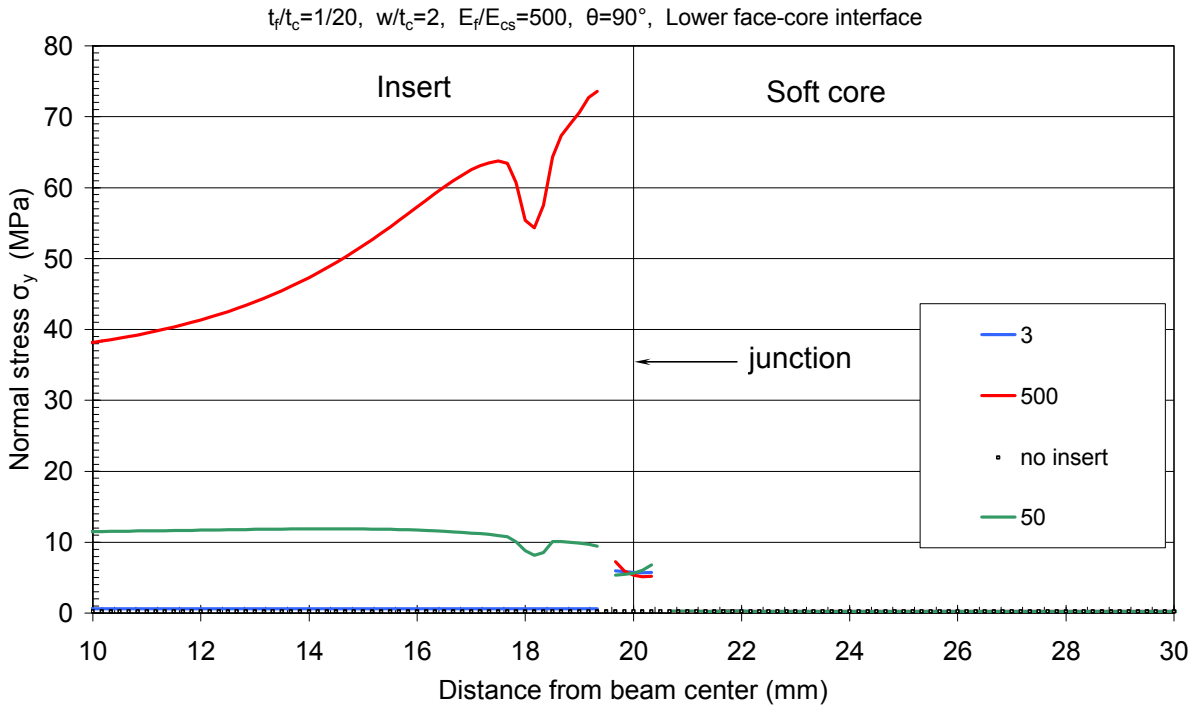
Σχήμα 3.Δ.3 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



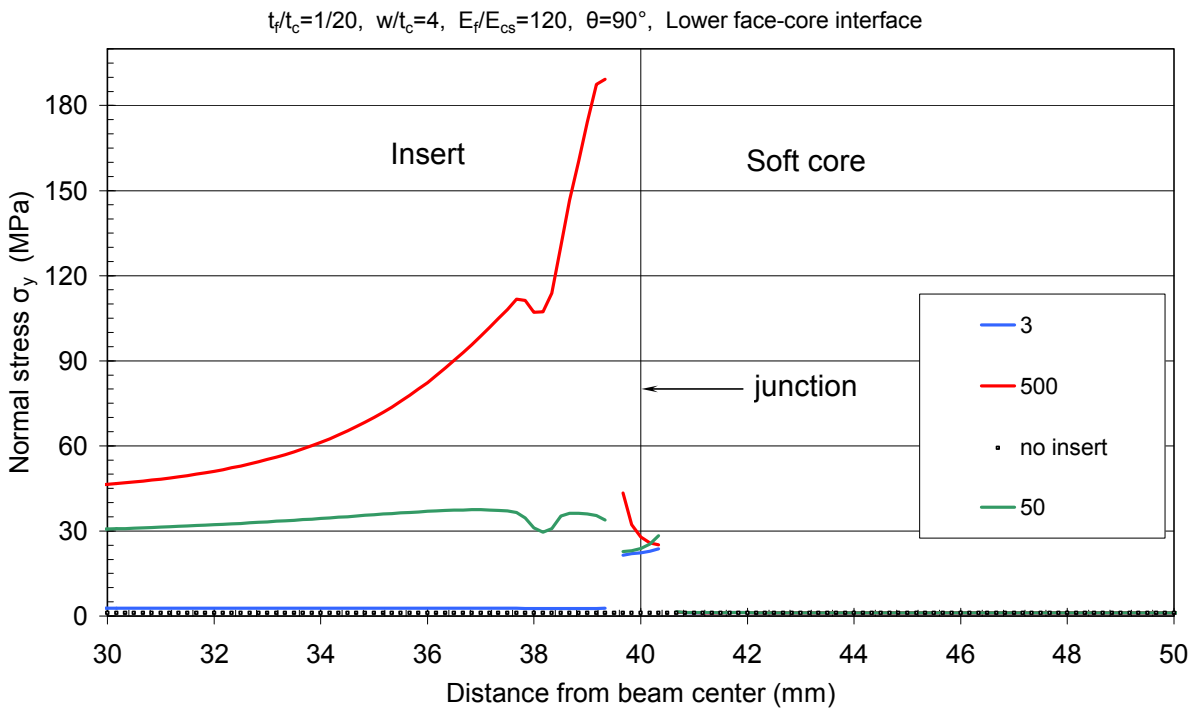
Σχήμα 3.Δ.4 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



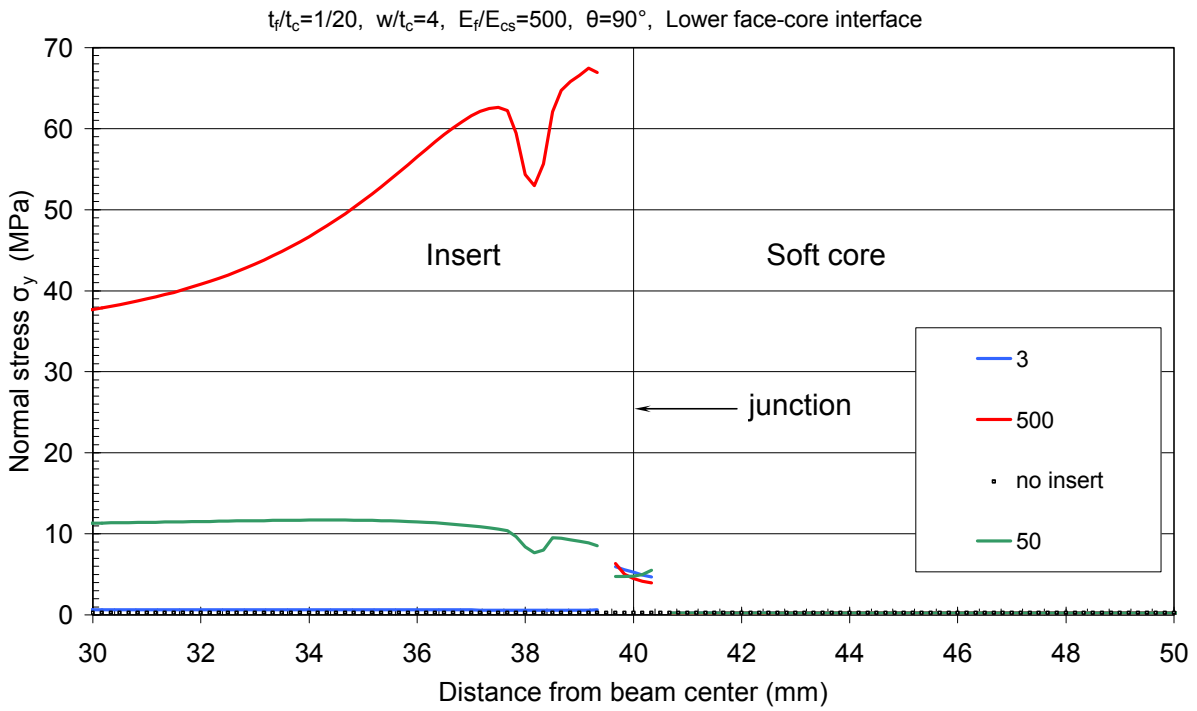
Σχήμα 3.Δ.5 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



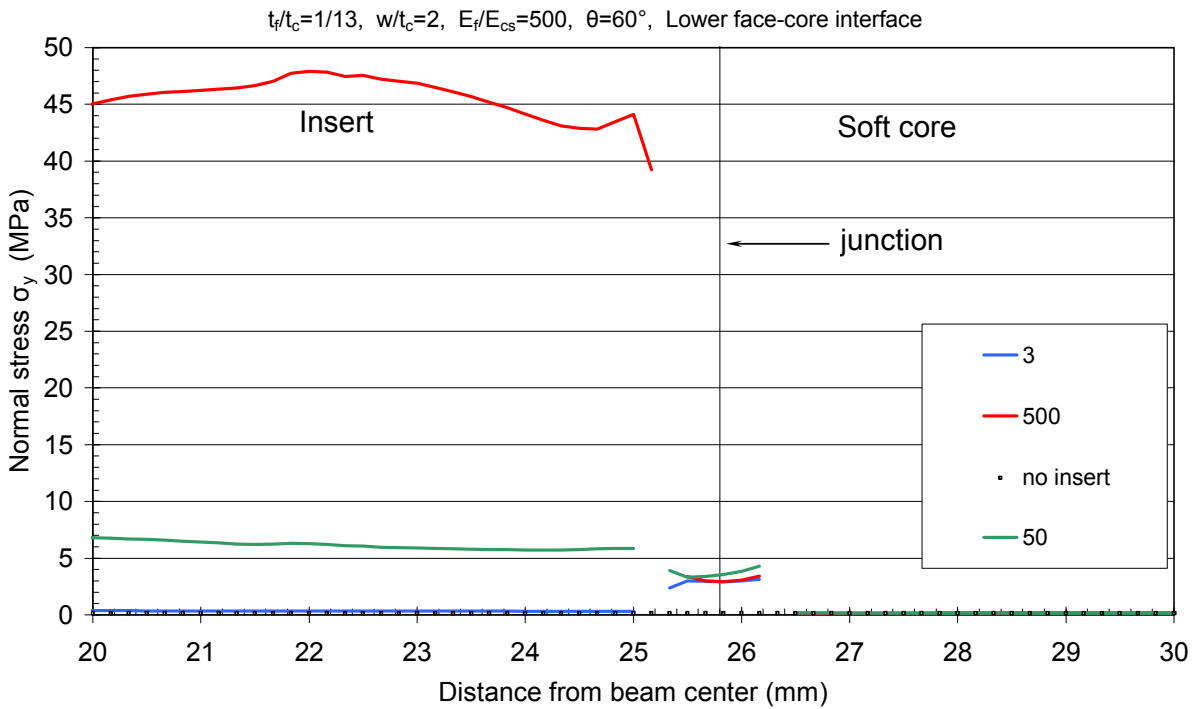
Σχήμα 3.Δ.6 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



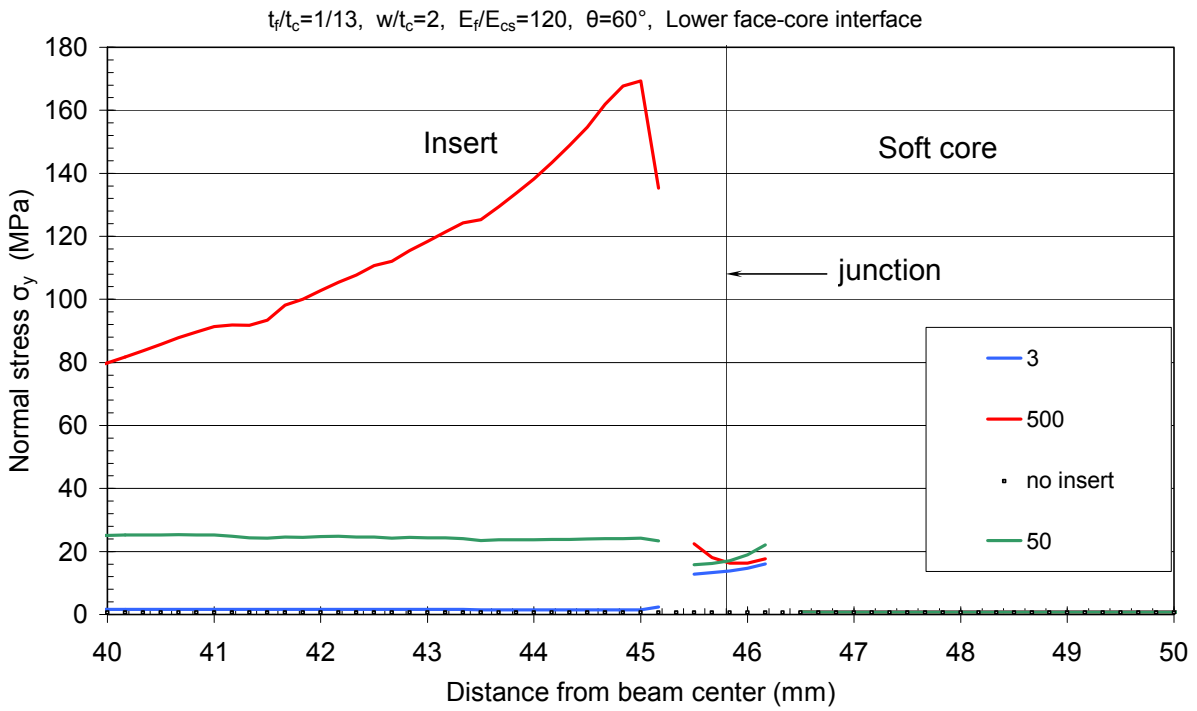
Σχήμα 3.Δ.7 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



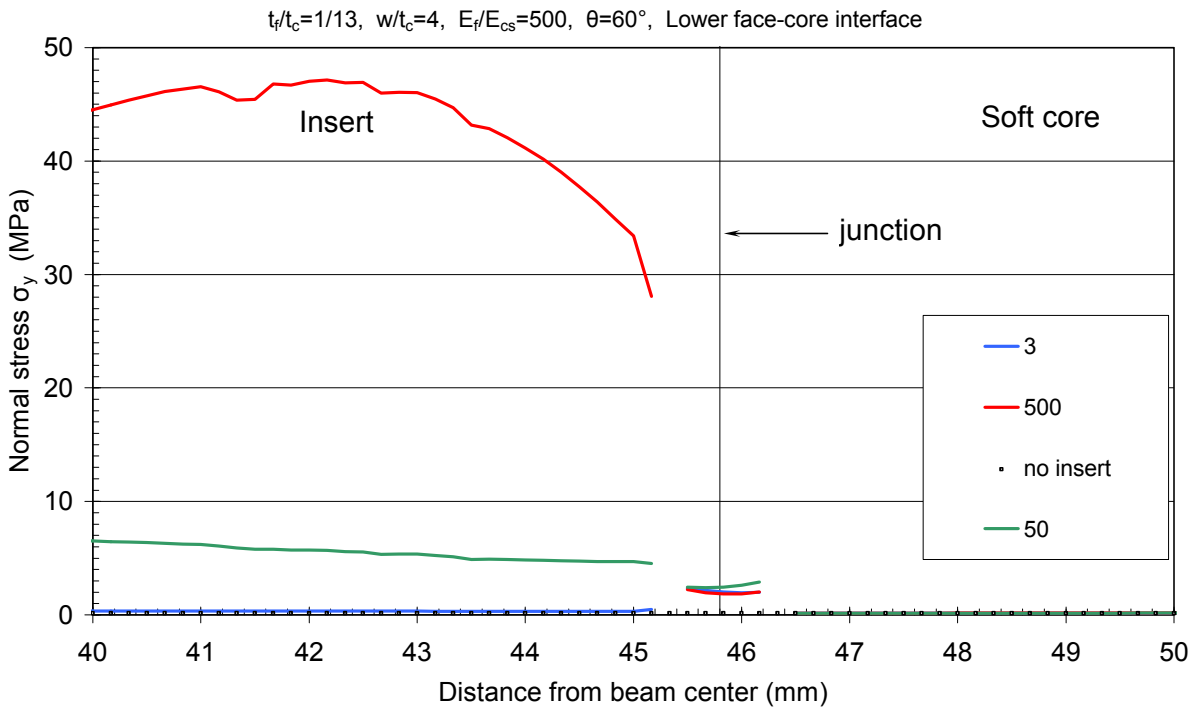
Σχήμα 3.Δ.8 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



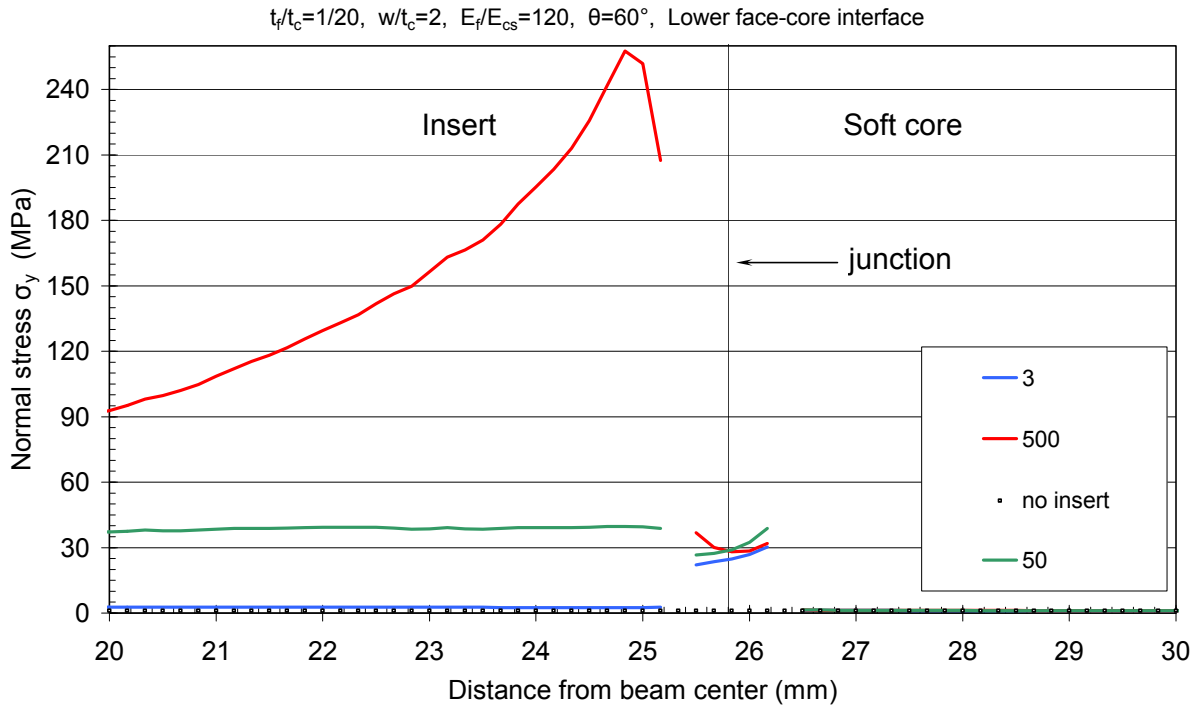
Σχήμα 3.Δ.10 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



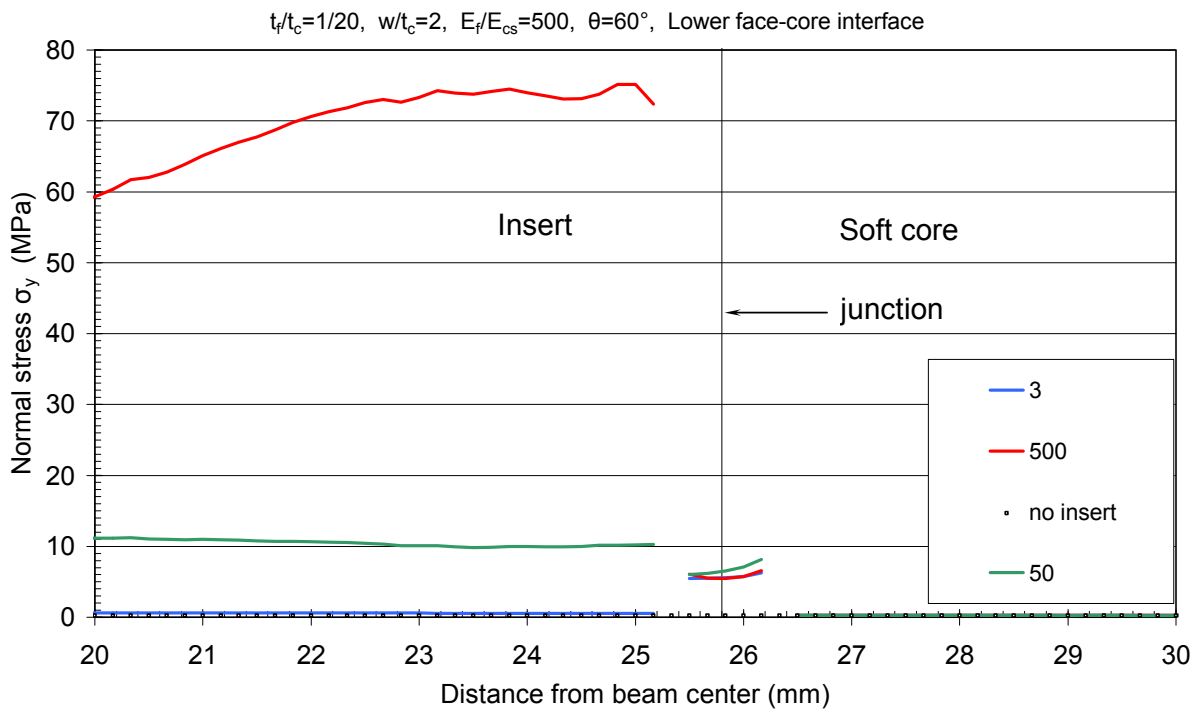
Σχήμα 3.Δ.11 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



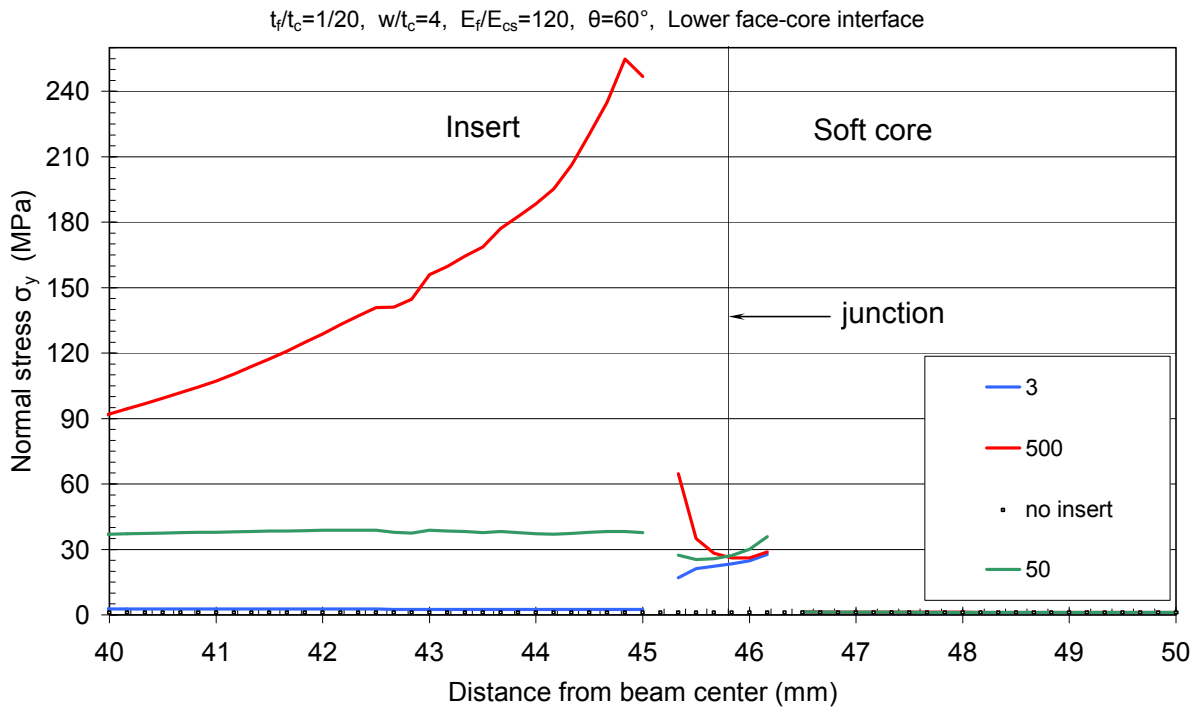
Σχήμα 3.Δ.12 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



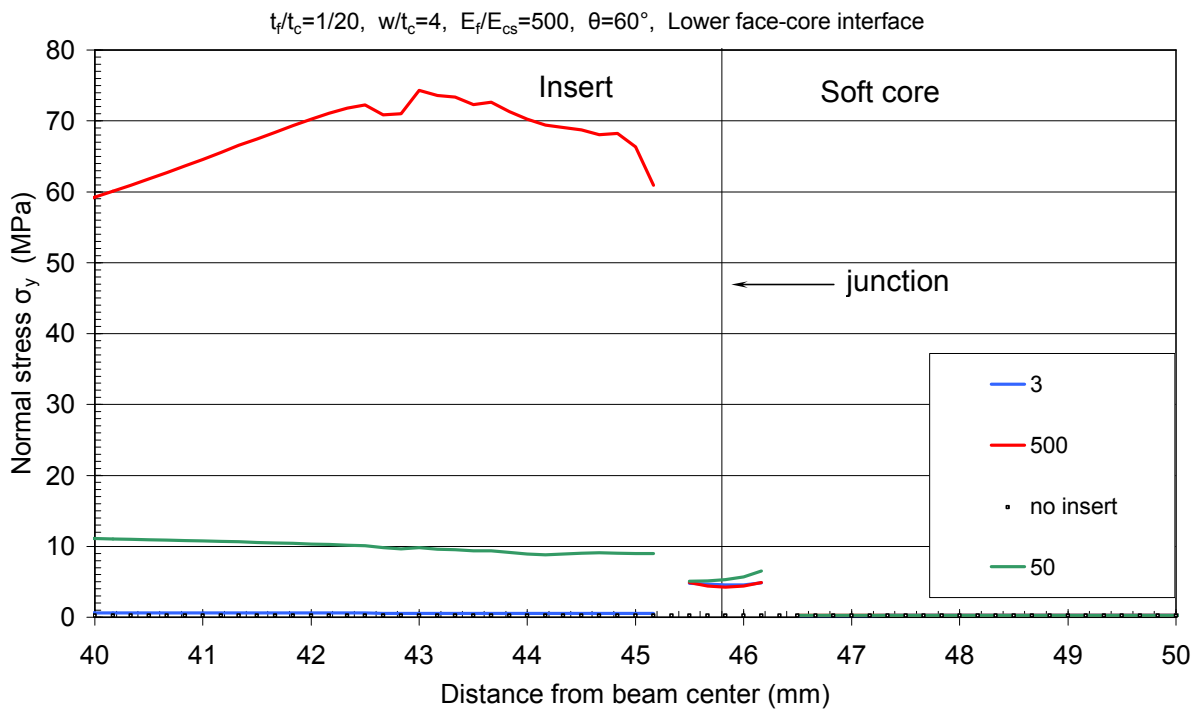
Σχήμα 3.Δ.13 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



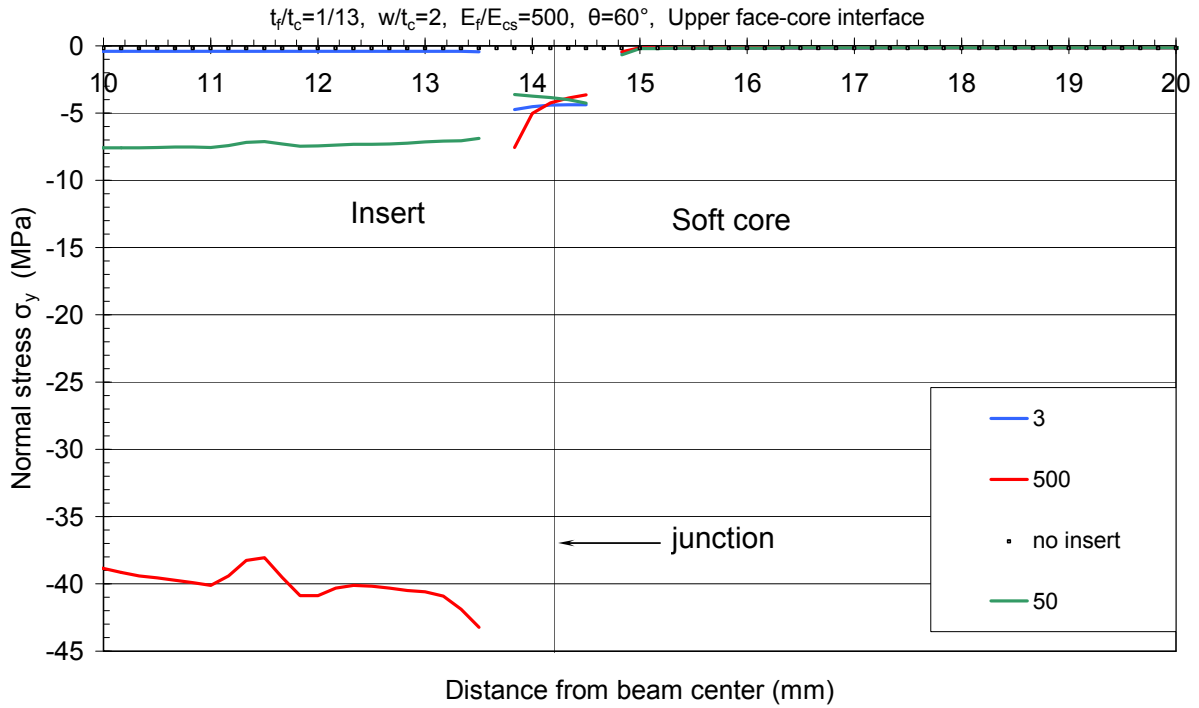
Σχήμα 3.Δ.14 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



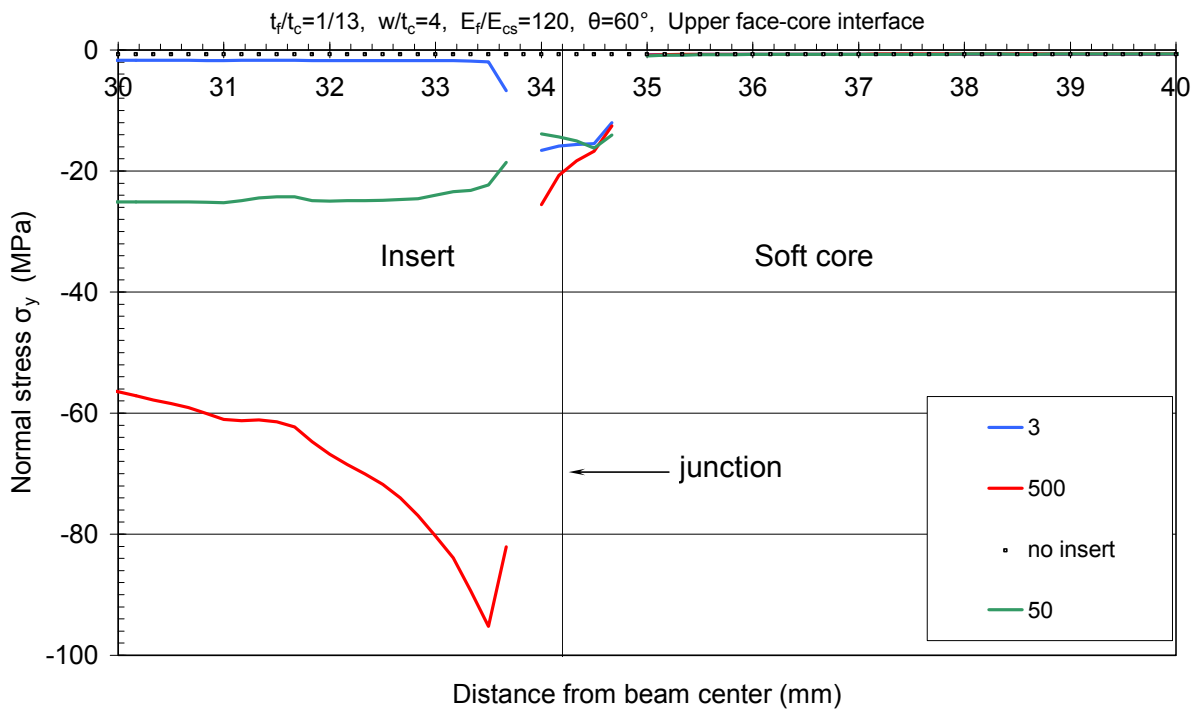
Σχήμα 3.Δ.15 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



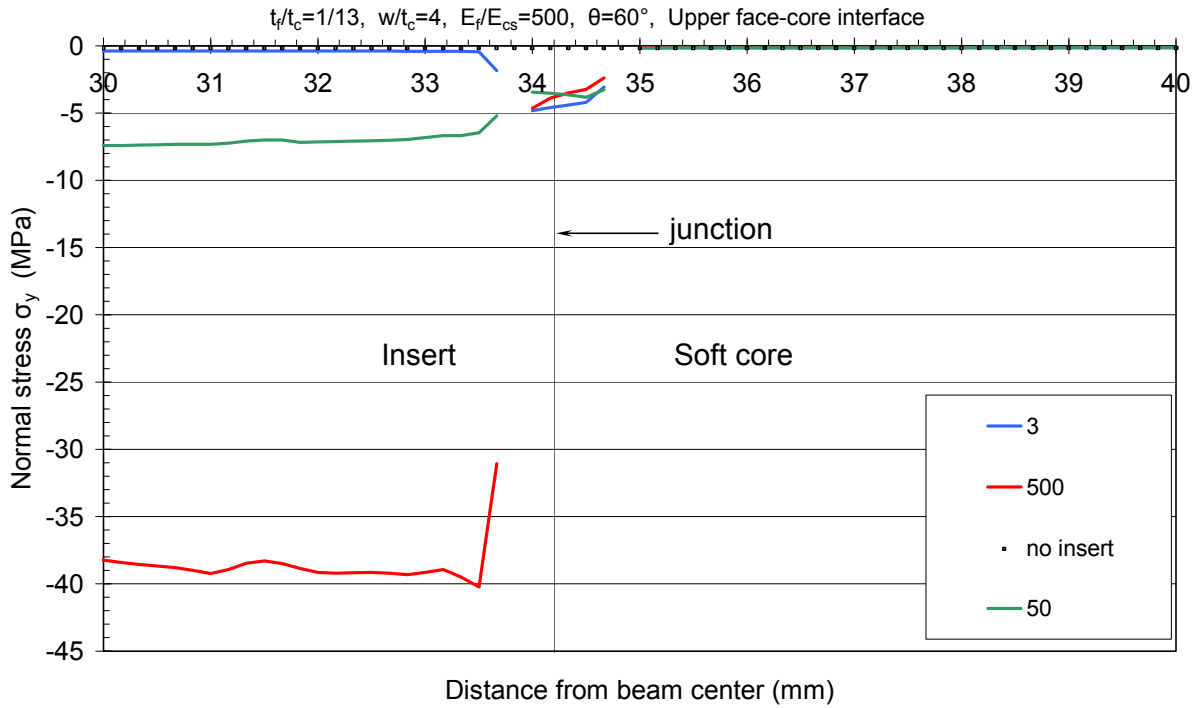
Σχήμα 3.Δ.16 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



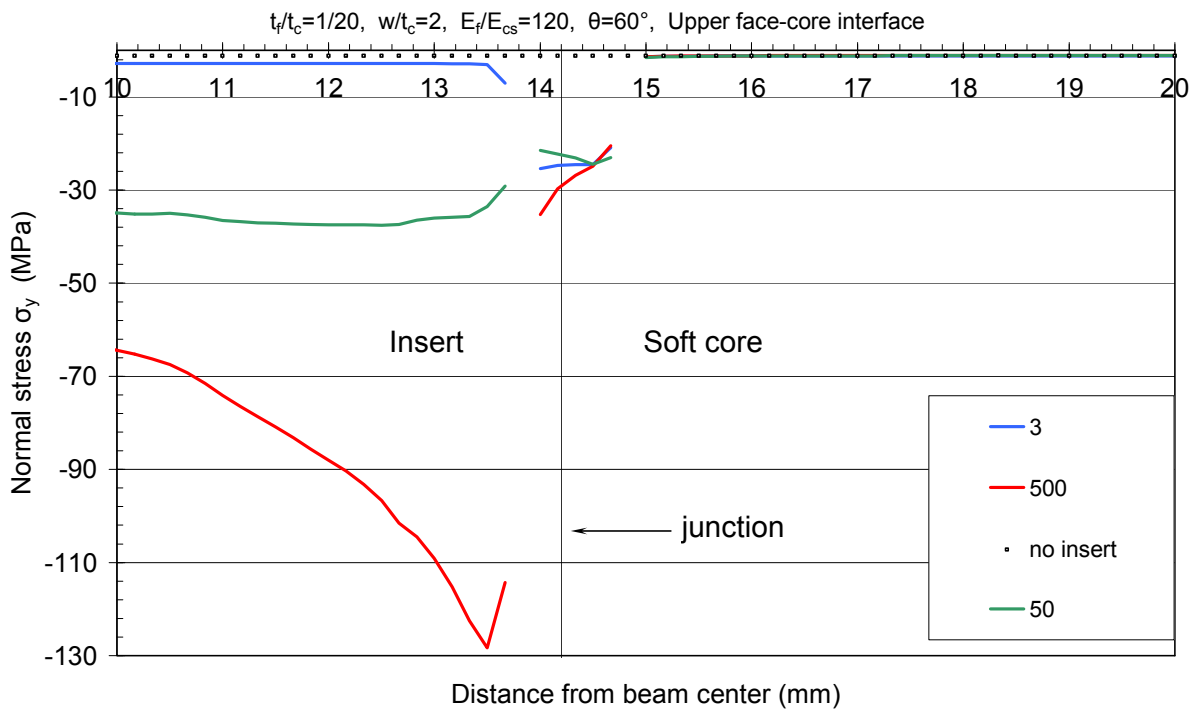
Σχήμα 3.Δ.18 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



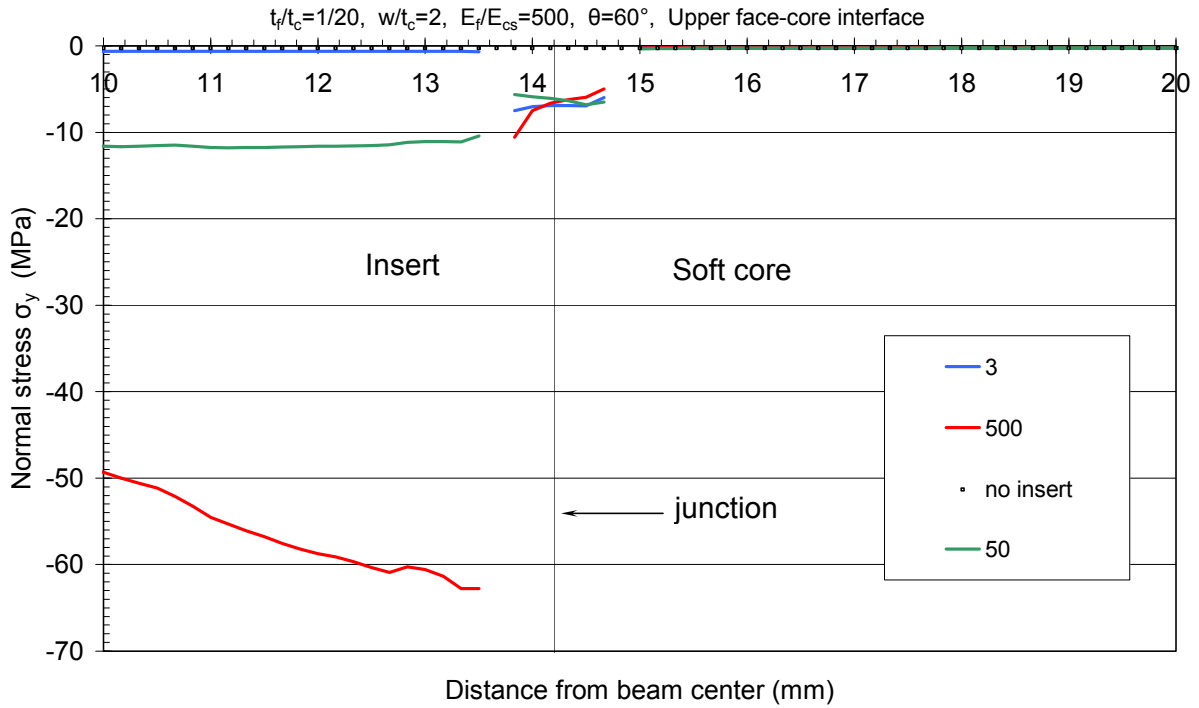
Σχήμα 3.Δ.19 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



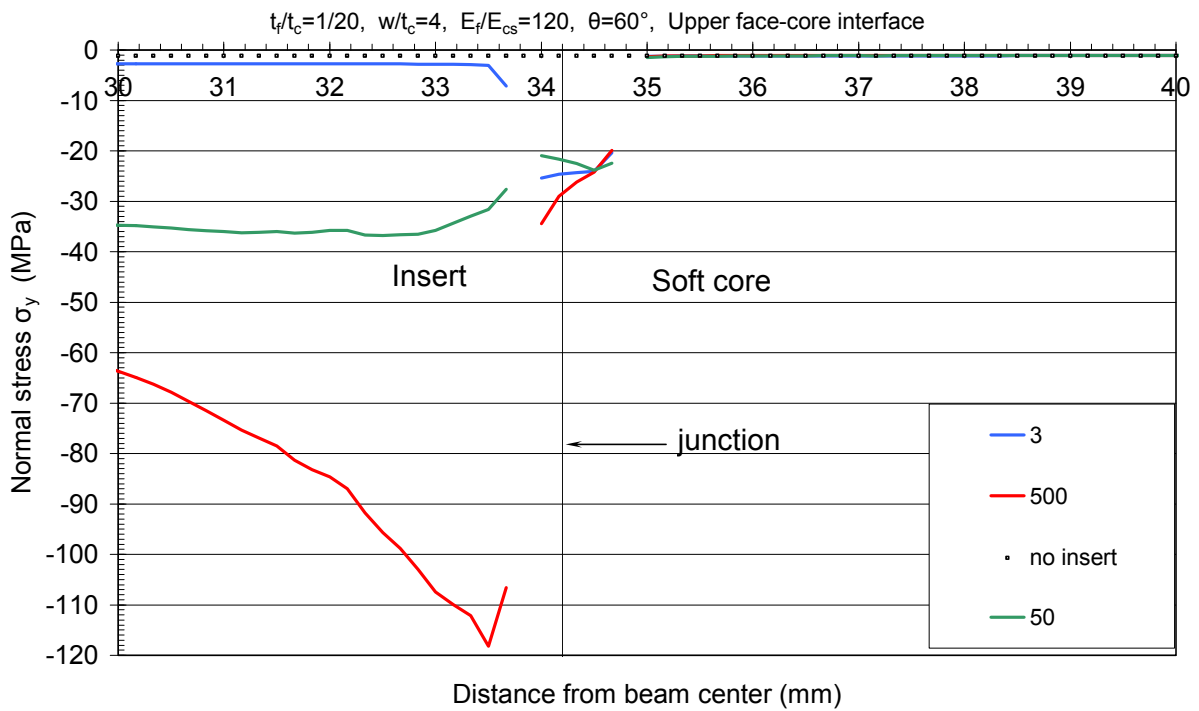
Σχήμα 3.Δ.20 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



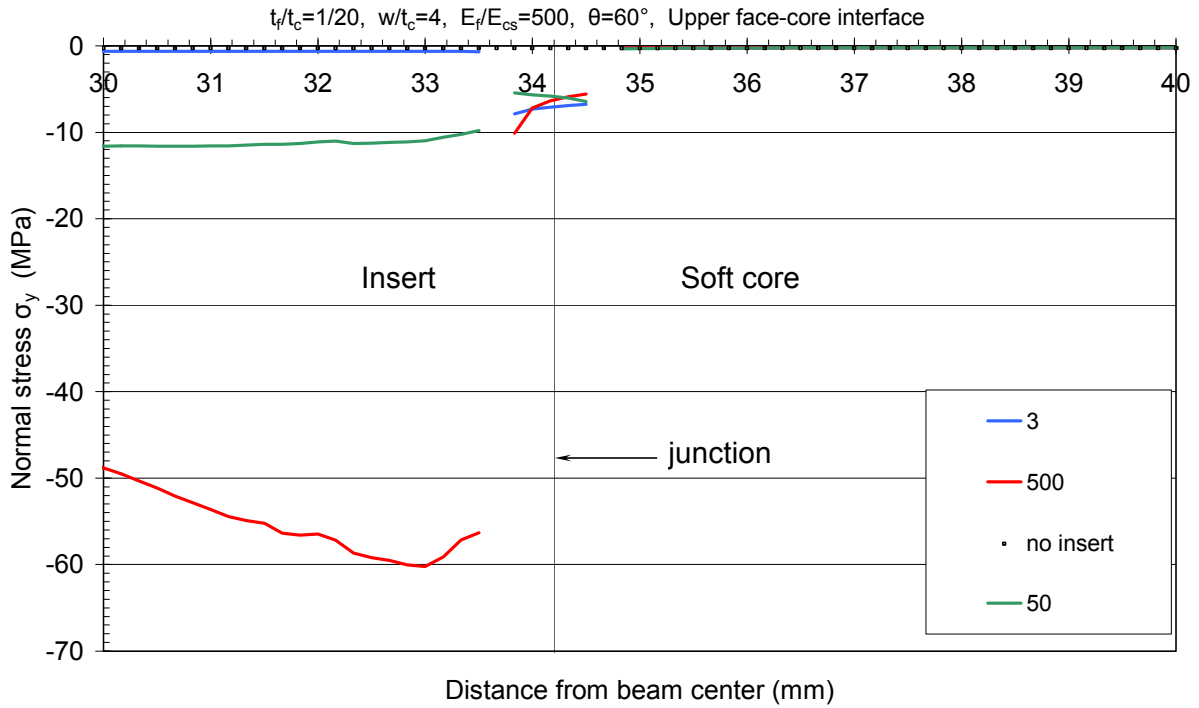
Σχήμα 3.Δ.21 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



Σχήμα 3.Δ.22 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



Σχήμα 3.Δ.23 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς

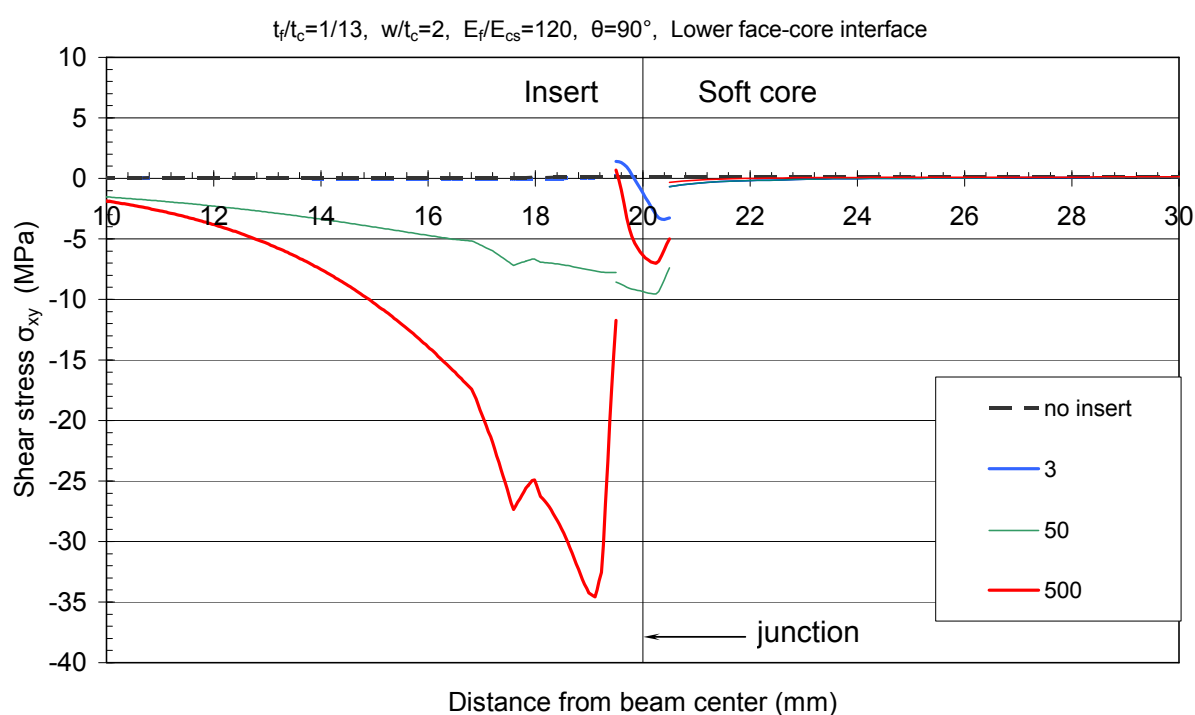


Σχήμα 3.Δ.24 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς

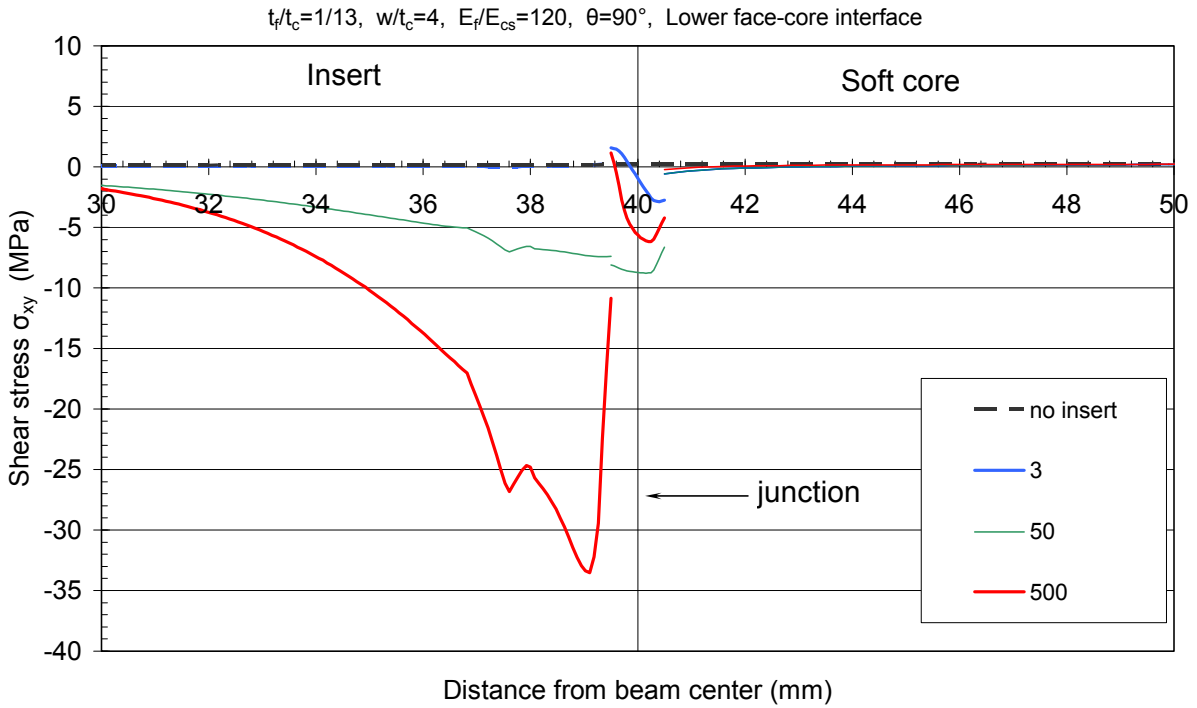
ΕΝΟΤΗΤΑ «Ε»

Παρουσίαση των διαγραμμάτων που προέκυψαν από την παραμετρική μελέτη, όσο αναφορά την μέτρηση διατμητικής τάσεως πάνω στον πυρήνα στην άνω και κάτω (εσωτερική) επιφάνεια επαφής του πυρήνα με τα περιβλήματα.

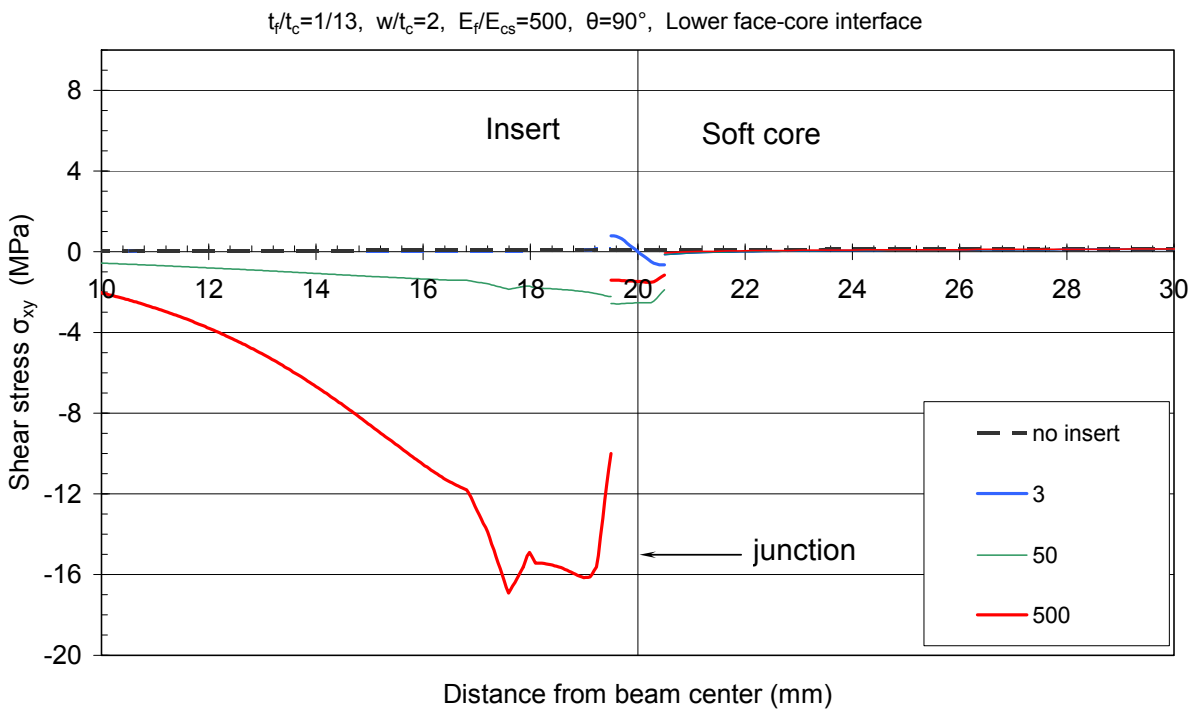
Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο τα δοκίμια με ορθογώνιο ένθεμα (90^0), όσο και αυτά με τραπεζοειδές ένθεμα (60^0)



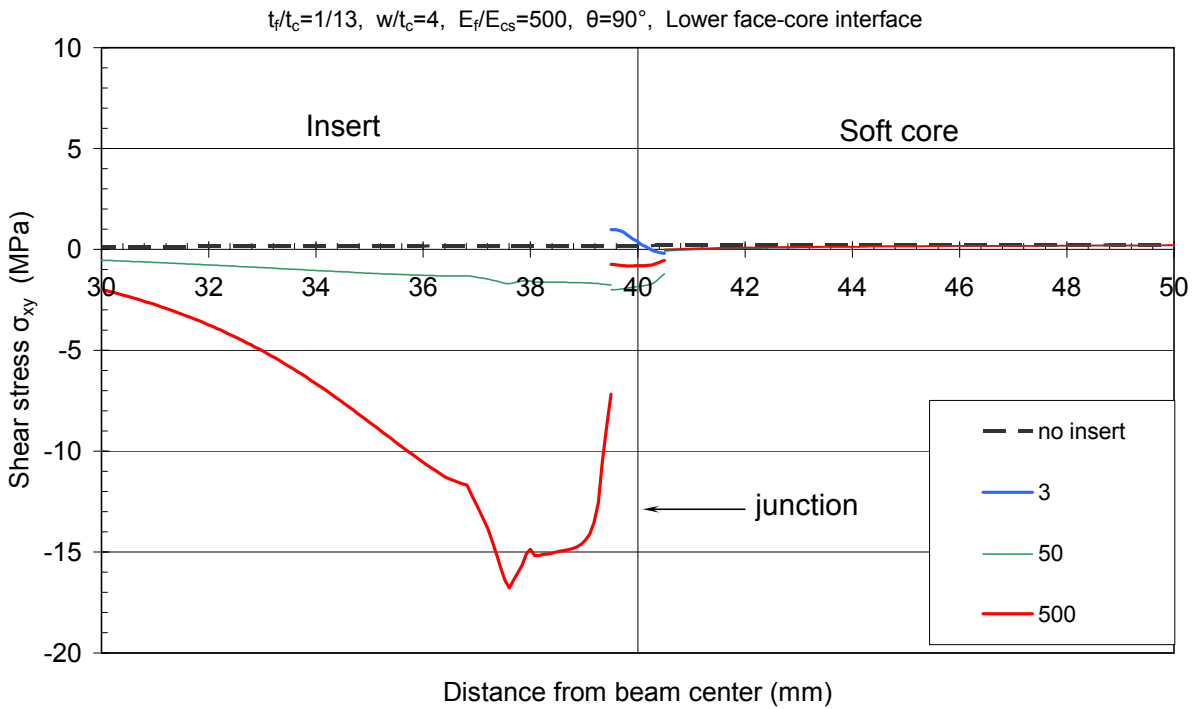
Σχήμα 3.Ε.1 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



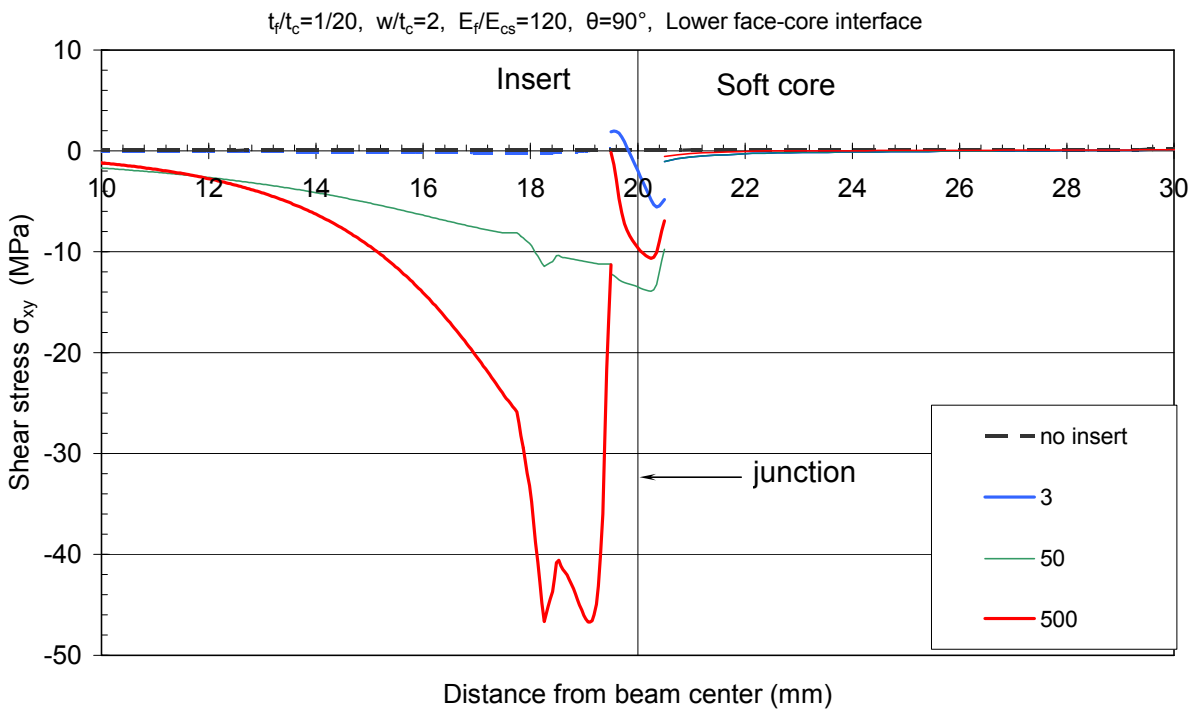
Σχήμα 3.E.2 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



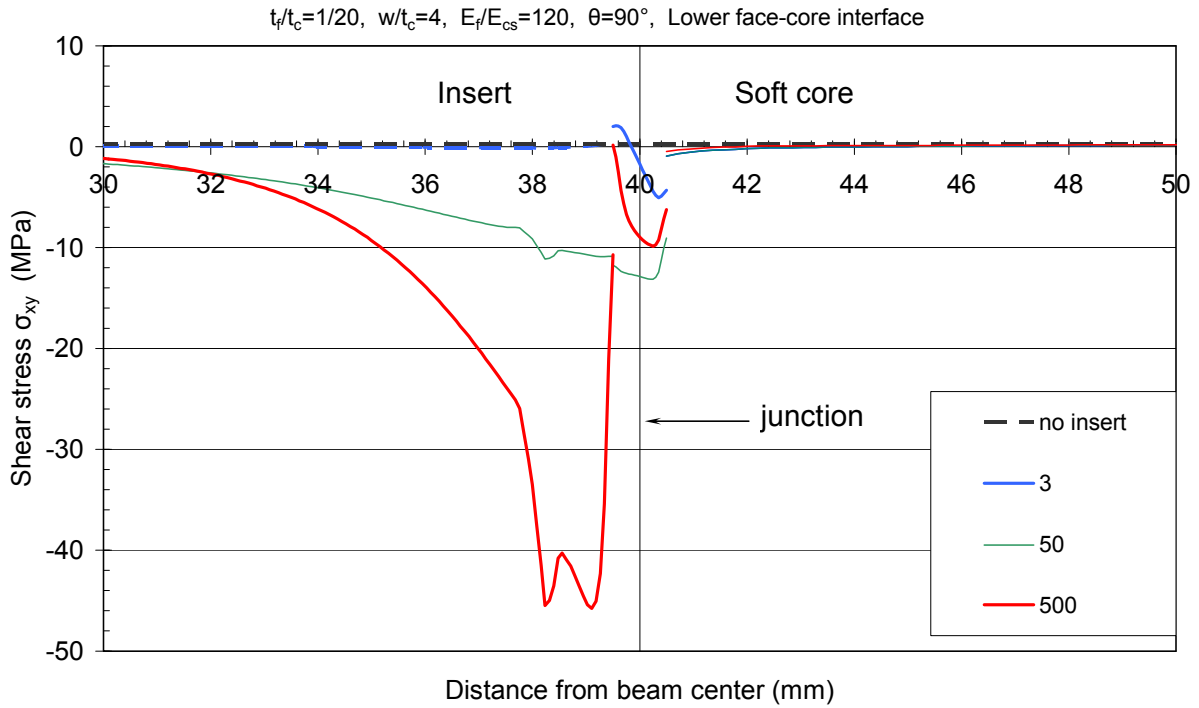
Σχήμα 3.E.3 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



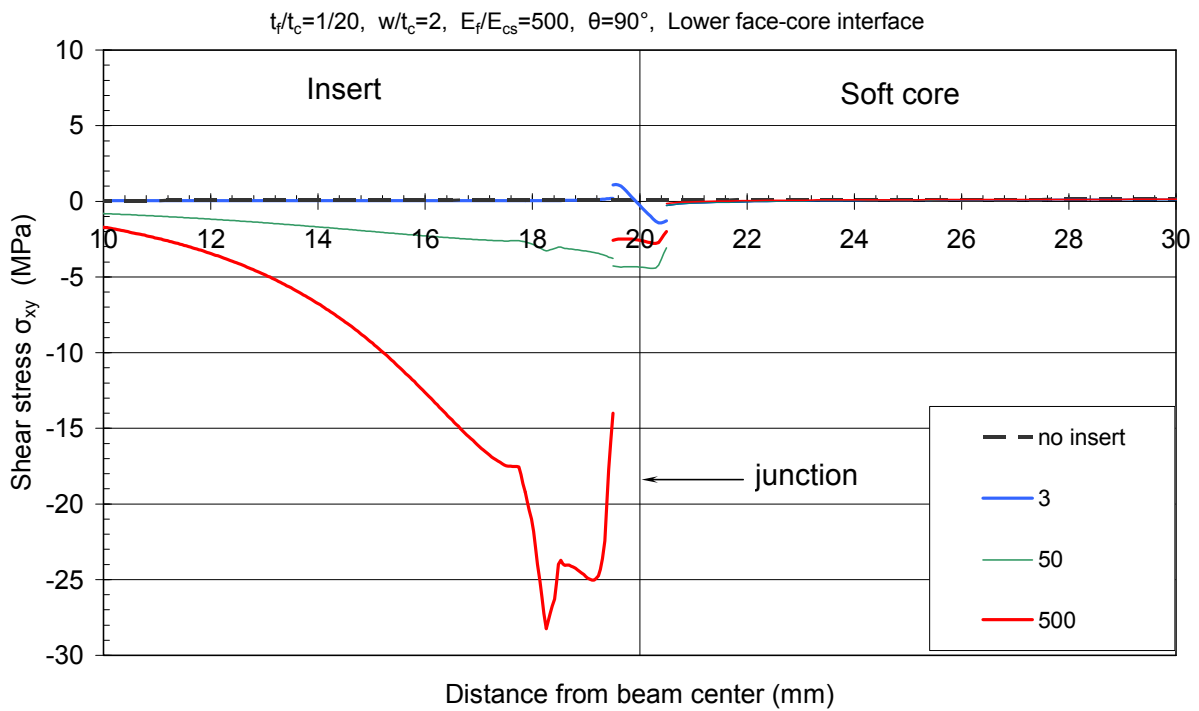
Σχήμα 3.E.4 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



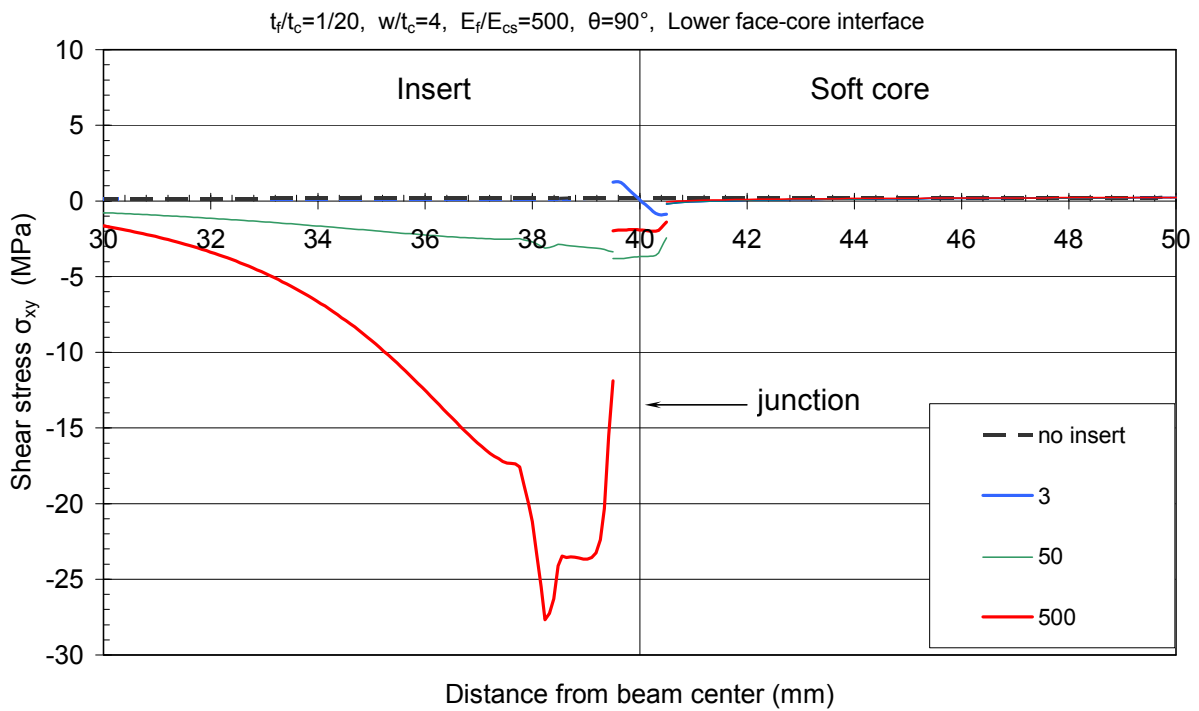
Σχήμα 3.E.5 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



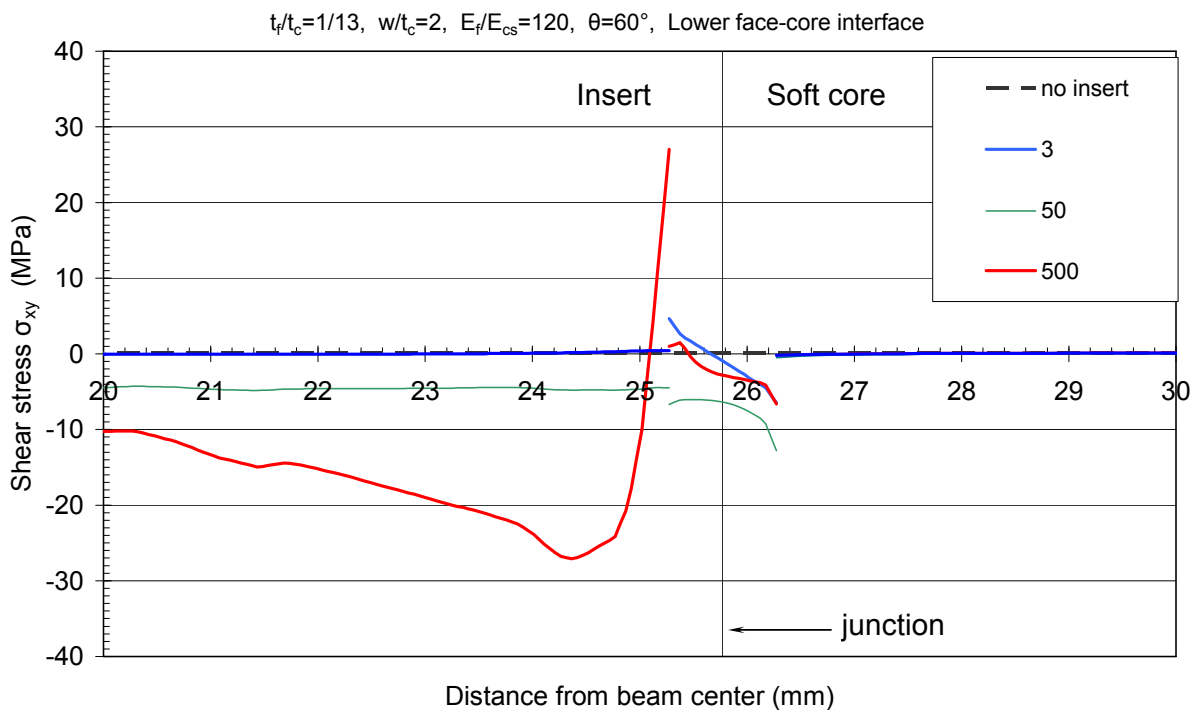
Σχήμα 3.E.6 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



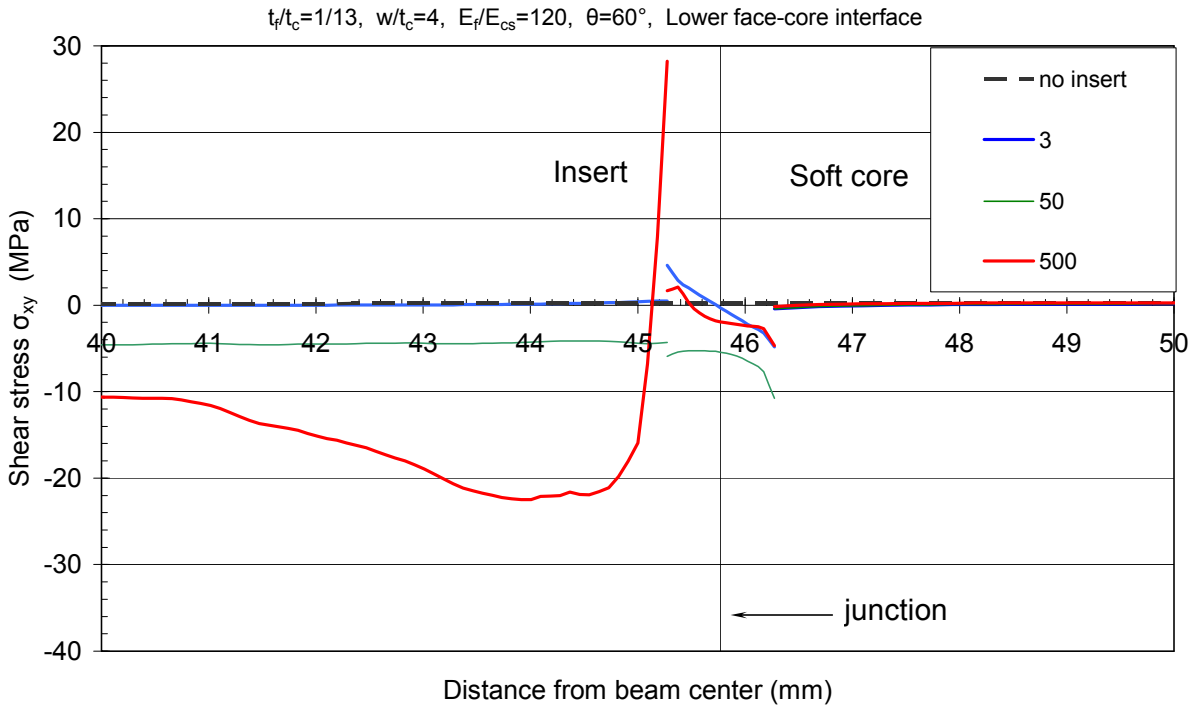
Σχήμα 3.E.7 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



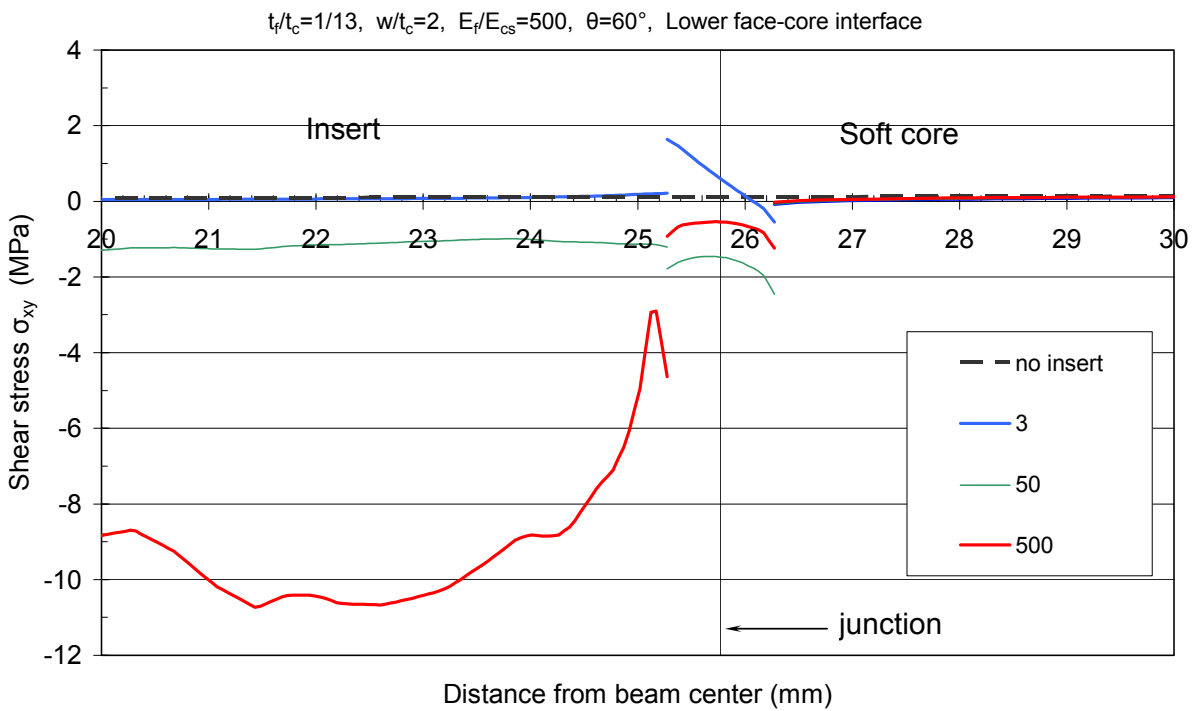
Σχήμα 3.E.8 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



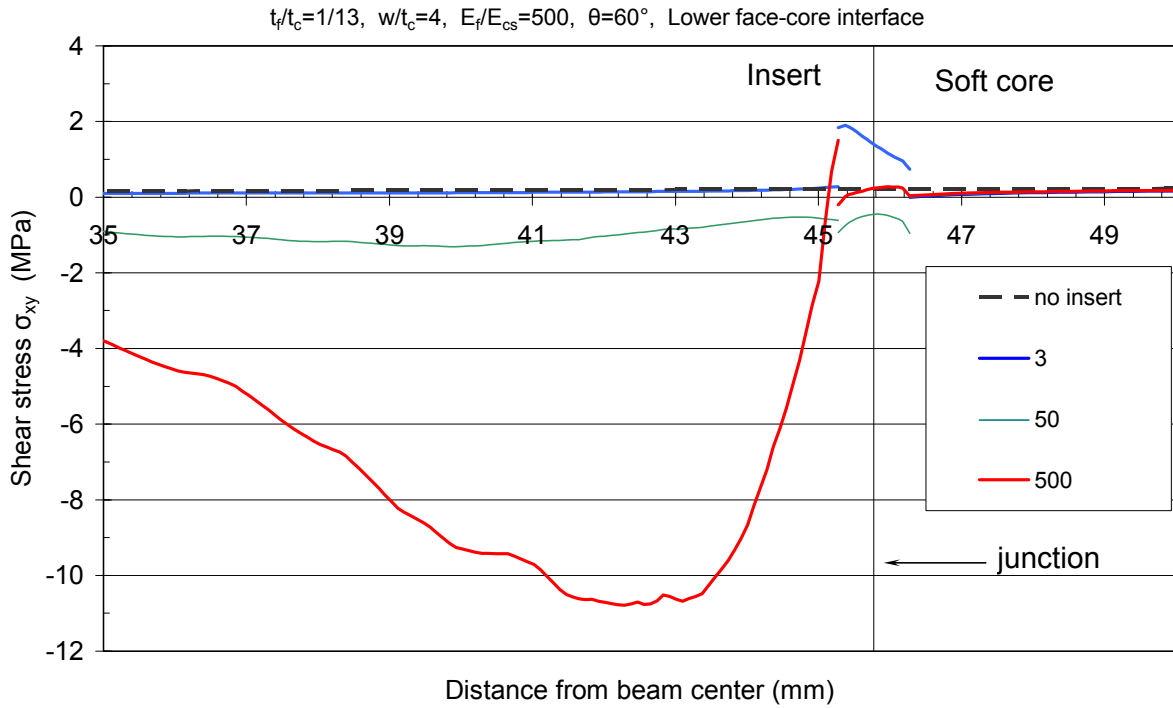
Σχήμα 3.E.9 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



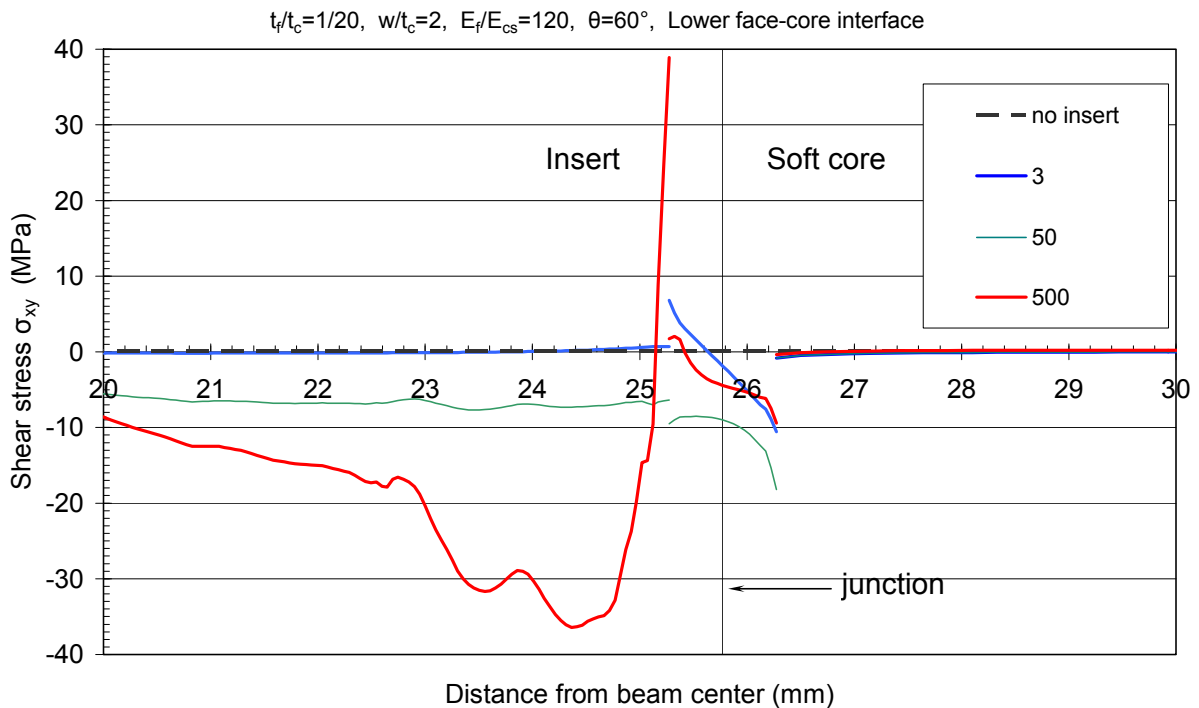
Σχήμα 3.E.10 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



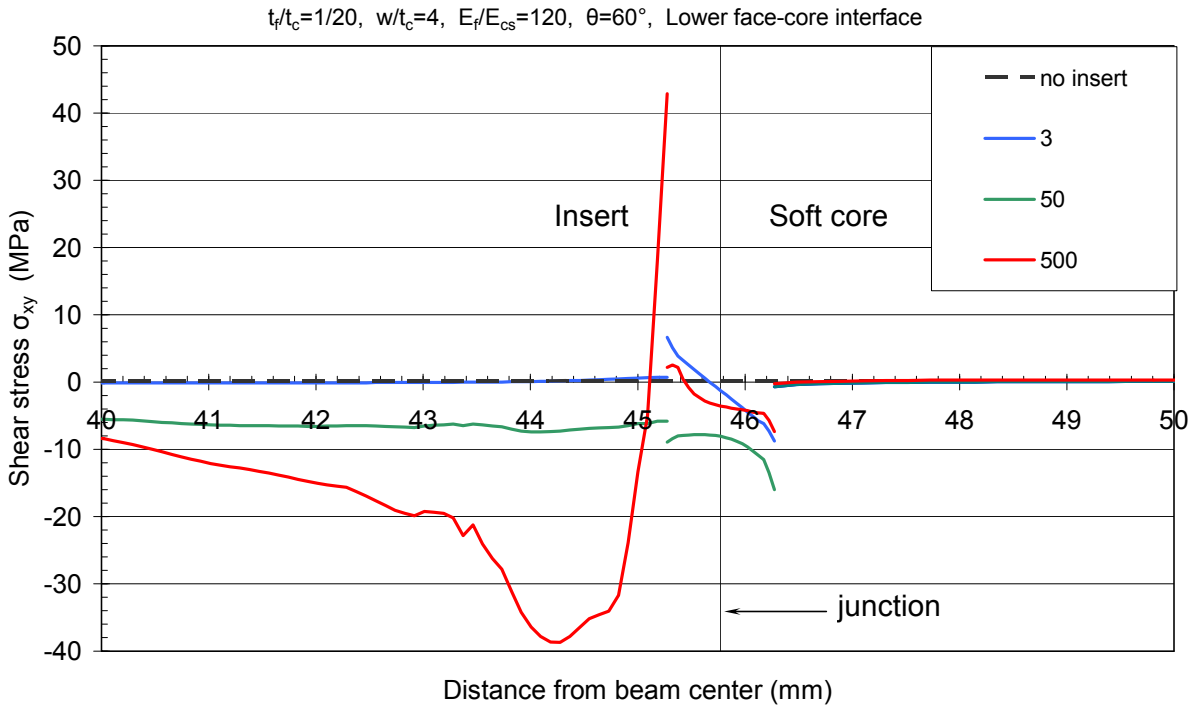
Σχήμα 3.E.11 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



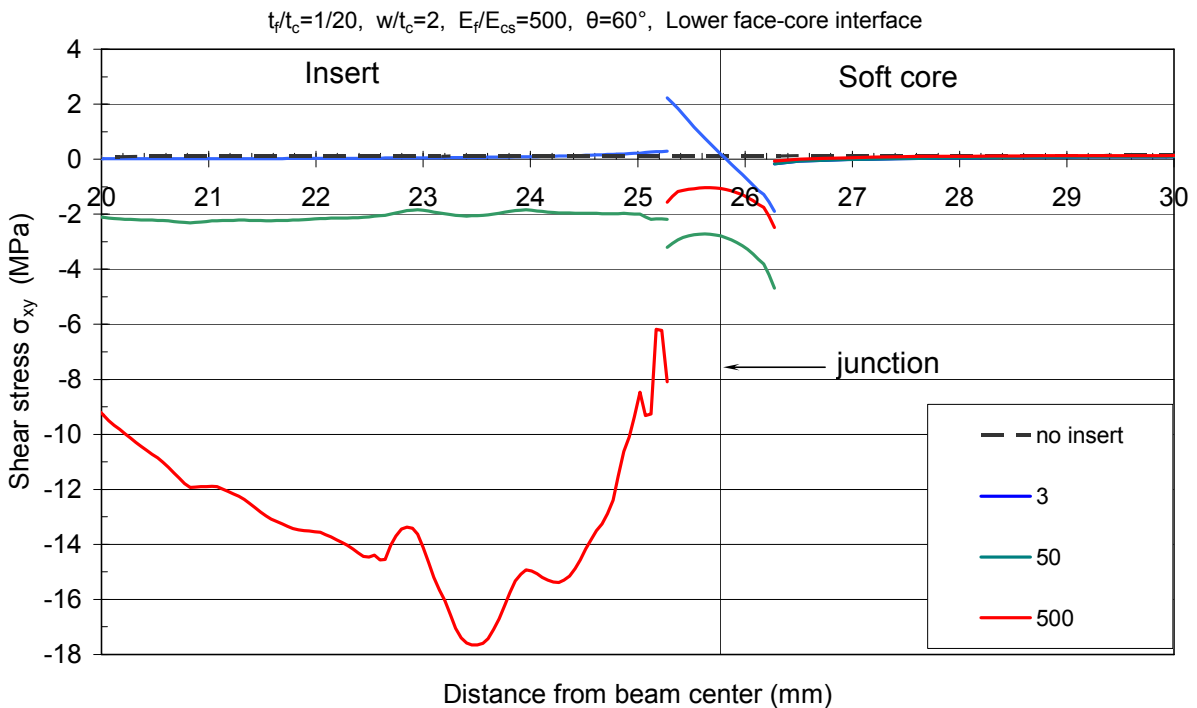
Σχήμα 3.Ε.12 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



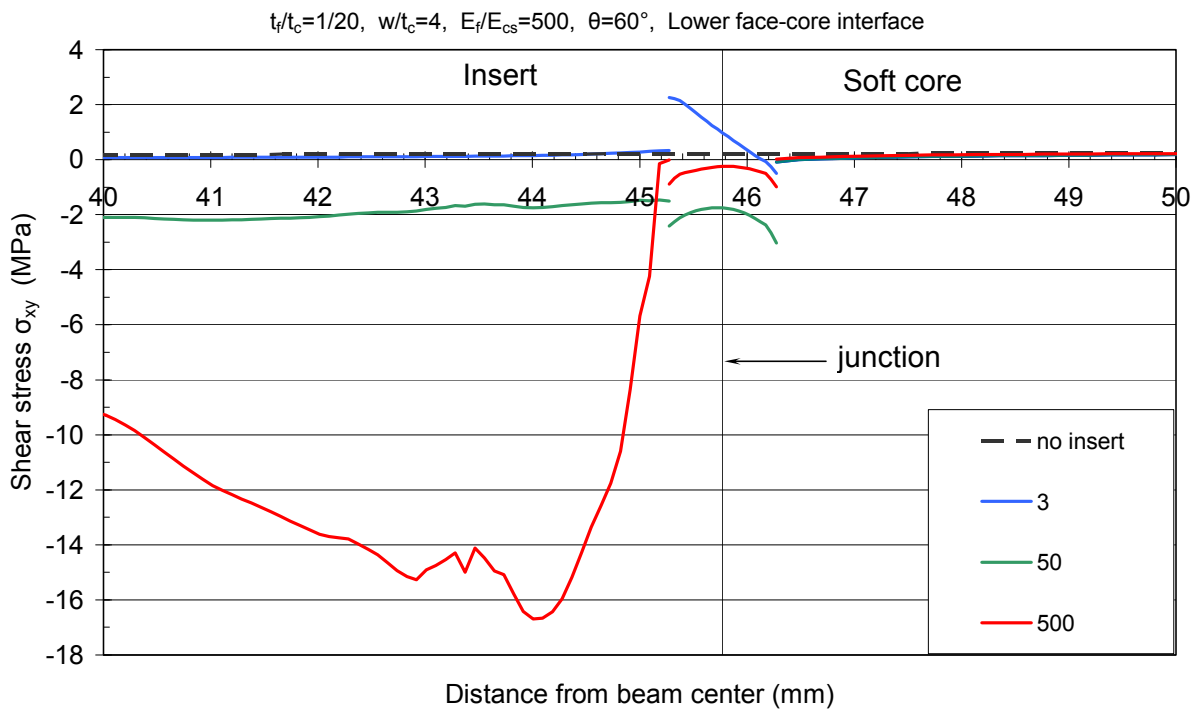
Σχήμα 3.Ε.13 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



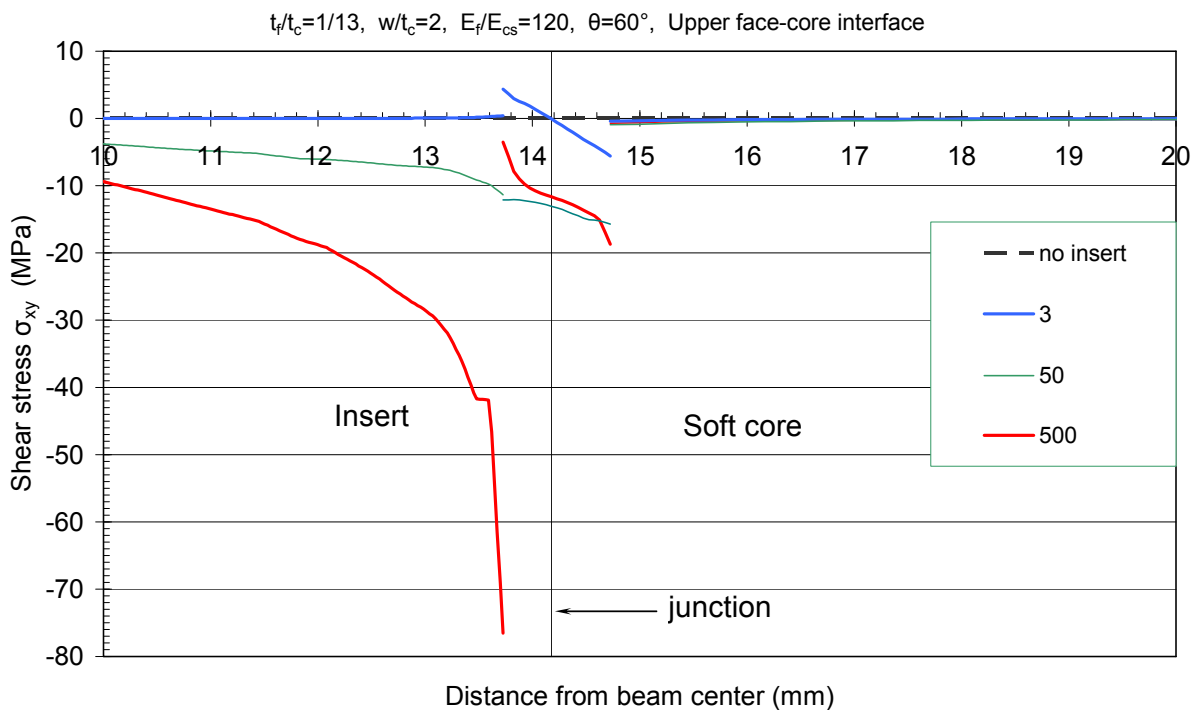
Σχήμα 3.Ε.14 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



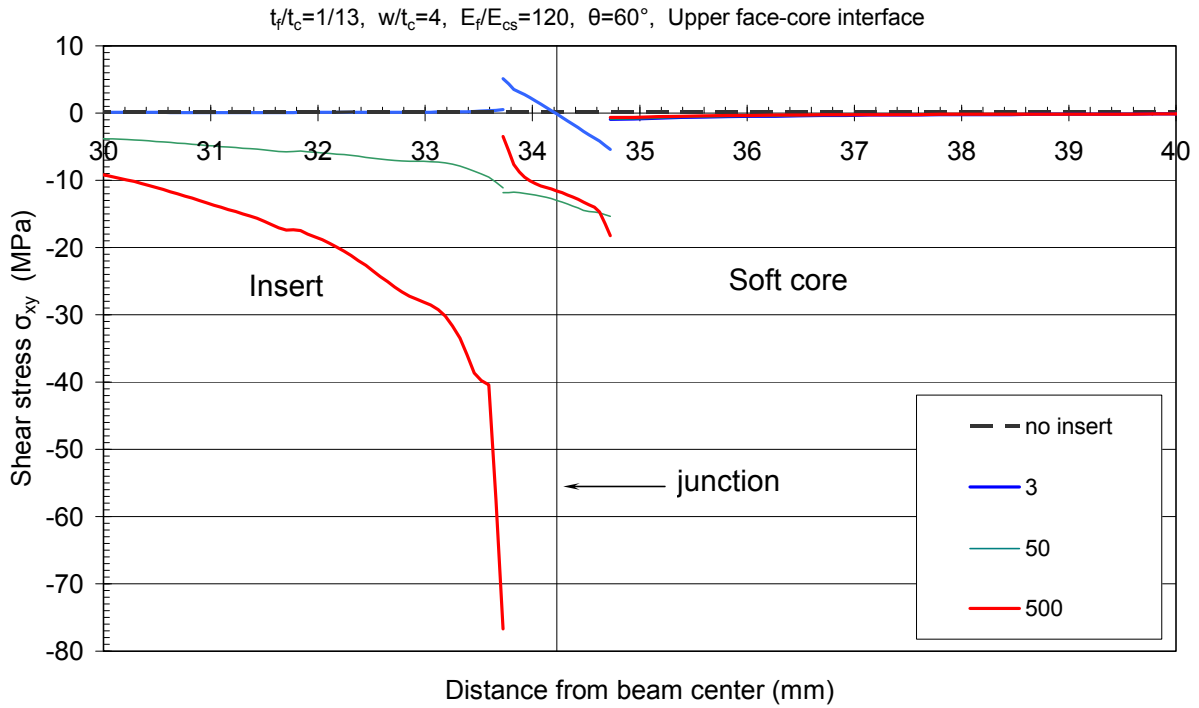
Σχήμα 3.Ε.15 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



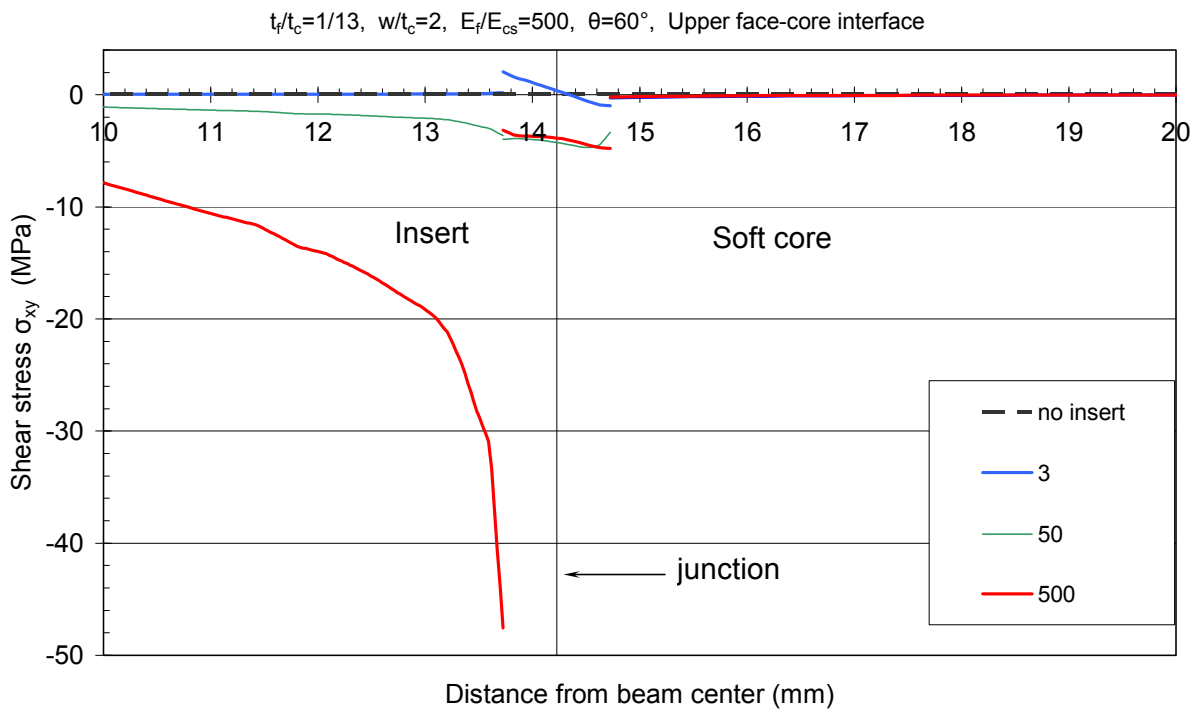
Σχήμα 3.Ε.16 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



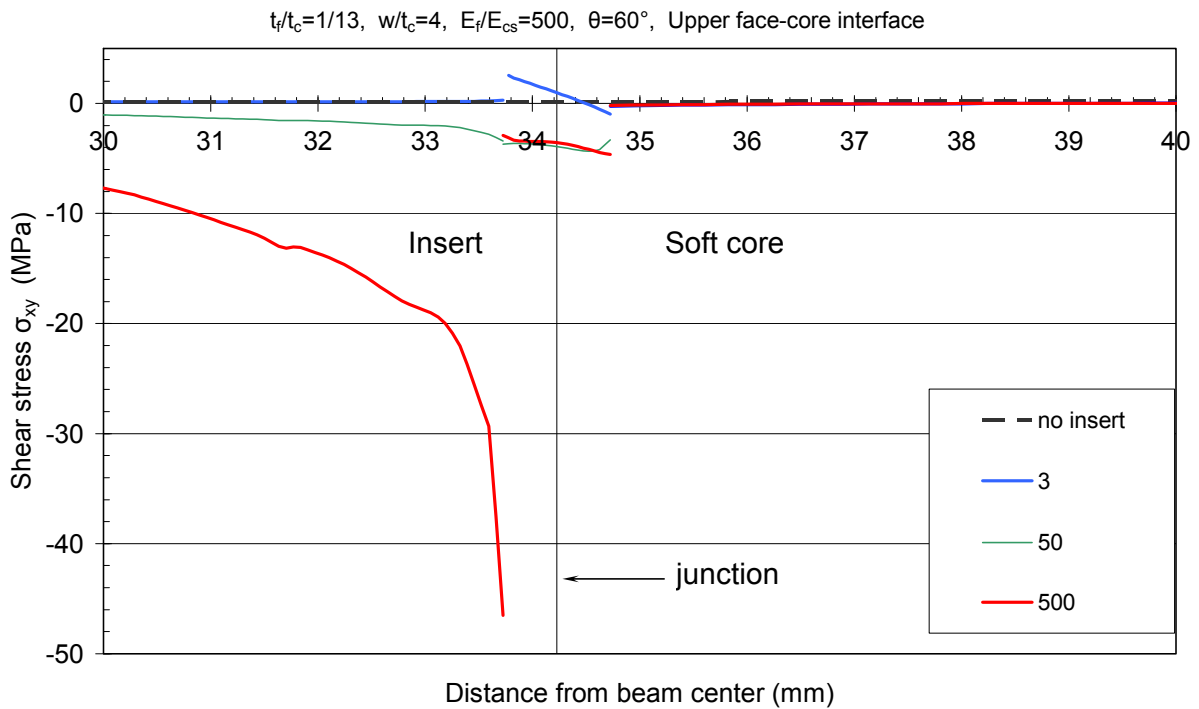
Σχήμα 3.Ε.17 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



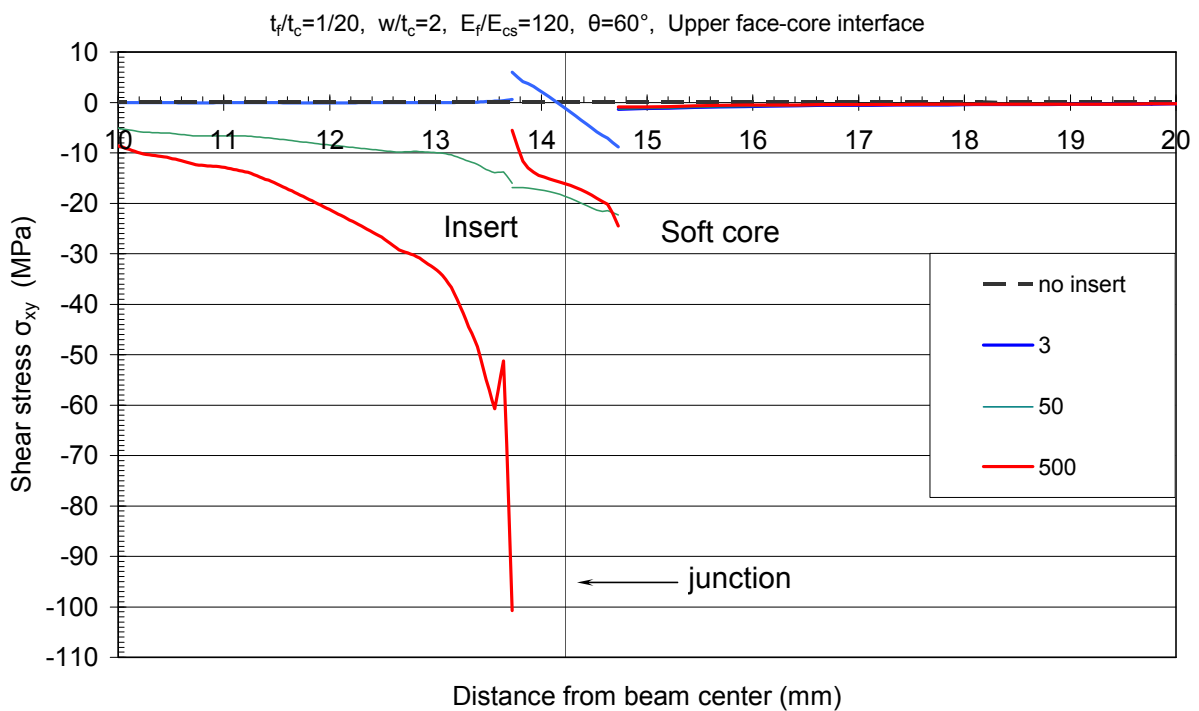
Σχήμα 3.E.18 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



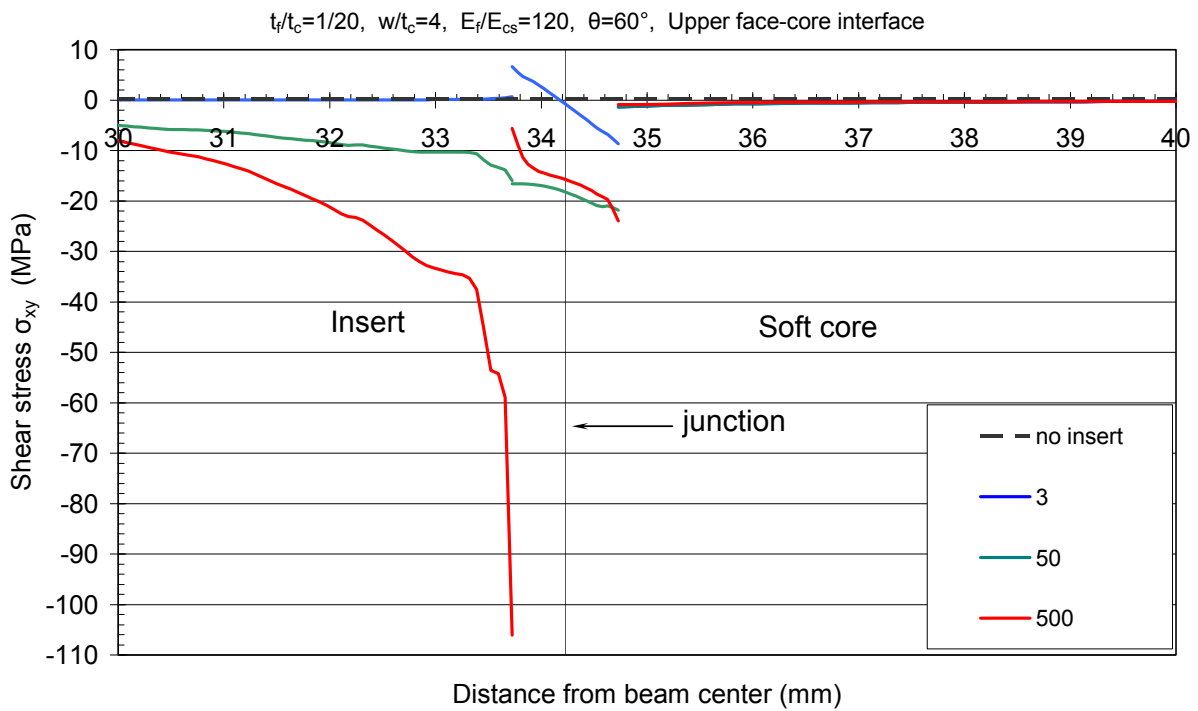
Σχήμα 3.E.19 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



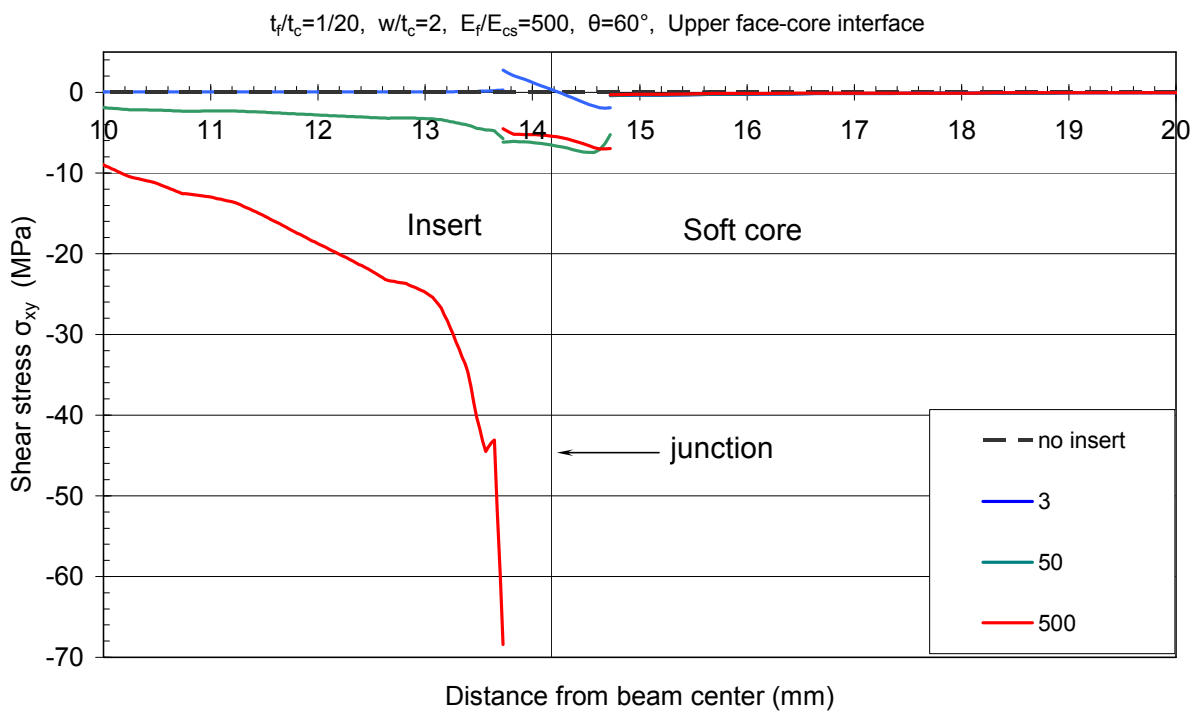
Σχήμα 3.E.20 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



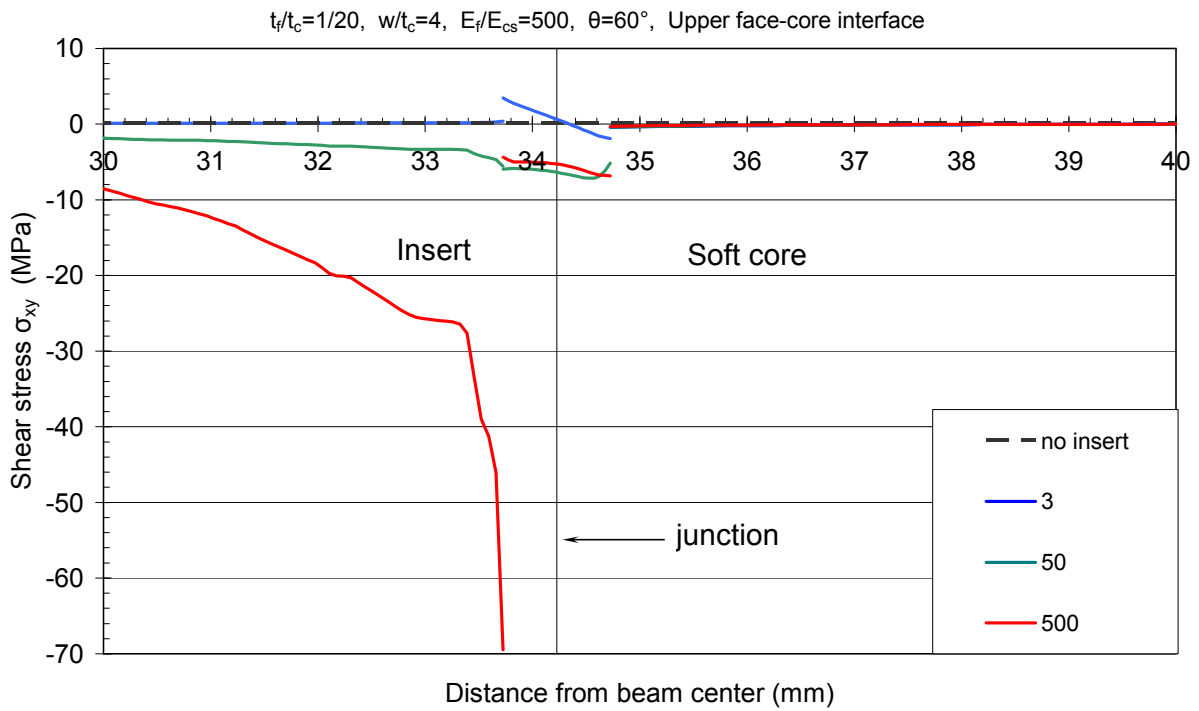
Σχήμα 3.E.21 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



Σχήμα 3.E.22 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



Σχήμα 3.E.23 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



Σχήμα 3.Ε.24 Μέτρηση της διατμητικής τάσης σ_{xy} στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς

3.5 Σχολιασμός και Συμπεράσματα

Σε αυτήν την παράγραφο θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης. Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο χωρίσαμε τα αποτελέσματα σε πέντε ενότητες. Ουσιαστικά, κάθε ενότητα ορίζει την περιοχή στην οποία μετράμε την τάση και το είδος της τάσης. Έτσι με αυτό τον τρόπο, θα εξετάσουμε ξεχωριστά πως επιδρούν οι διάφορες παράμετροι στα μεγέθη των τάσεων που αναπτύσσονται στις διάφορες περιοχές των δοκιμίων.

Κάθε διάγραμμα διατηρεί σταθερές τέσσερις παραμέτρους - t_f/t_c , w/t_c , E_f/E_{cs} , θ - και περιγράφει την συμπεριφορά τριών δοκιμίων (3,50,500) συν το δοκίμιο χωρίς ένθεμα (no insert), δηλαδή το κάθε δοκίμιο έχει τις τέσσερις παραμέτρους του διαγράμματος - t_f/t_c , w/t_c , E_f/E_{cs} , θ - συν την παράμετρο E_{ch}/E_{cs} (3,50,500). Έτσι η μελέτη της μεταβολής των τιμών των τεσσάρων παραμέτρων των διαγραμμάτων και η επίδραση που έχει αυτή η μεταβολή στην συμπεριφορά των δοκιμίων θα είναι η ανάλυση που θα ακολουθήσει.

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων «Ενότητας Α»

Σε αυτήν την ενότητα μετράμε την ορθή τάση στην εξωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων των δοκιμίων.

- Μεταβολή του E_f/E_{cs} : Σε όλα τα διαγράμματα, αύξηση αυτής της παραμέτρου (από 120 σε 500) οδηγεί σε αύξηση των τάσεων και στα τρία δοκίμια 3,50,500 καθώς και μικρή αύξηση στο δοκίμιο no insert. Στους πίνακες 3.A.1 έως 3.A.24 που παρουσιάζονται στο τέλος της ενότητας μπορούμε να δούμε ότι ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων 'k' παρουσιάζει αισθητή αύξηση για τις τάσεις στην κάτω εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων, τόσο για $\theta=90^0$ όσο και για $\theta=60^0$, αλλά μόνο για τα δοκίμια 50, 500. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του δοκιμίου 500 στα διαγράμματα 13-4-60-120 και 13-4-60-500, όπου ο συντελεστής 'k' από την τιμή 1,123 ανεβαίνει στην τιμή 1,325, η οποία τιμή του συντελεστή είναι και μέγιστη που καταγράφηκε σε αυτή την ενότητα. Για το δοκίμιο 3, έχουμε αισθητή αύξηση του 'k' μόνο στην περίπτωση $\theta=60^0$. Όσο αναφορά την πάνω εξωτερική επιφάνεια, που μόνο για την περίπτωση $\theta=60^0$ υπολογίζονται οι τάσεις, υπάρχει αύξηση των τάσεων και εδώ αλλά ο συντελεστής 'k' δεν αλλάζει σημαντικά.

- Μεταβολή του w/t_c : Για τα δοκίμια με $\theta=90^0$ αύξηση του λόγου w/t_c (από 2 σε 4) οδηγεί γενικά σε μικρή αύξηση των τάσεων. Εκτός από τα δοκίμια 50,500 του διαγράμματος 13-4-500-90 (σχήμα 3.A.4) που παρουσιάζουν αξιοσημείωτη αύξηση στις τάσεις. Γενικά ο συντελεστής 'k' έχει μικρές μεταβολές. Για τα δοκίμια με $\theta=60^0$ στην κάτω εξωτερική πλευρά του περιβλήματος ισχύουν σχεδόν τα ίδια με τα παραπάνω. Επίσης πάλι στο αντίστοιχο διάγραμμα 13-4-500-60 υπάρχει μεγάλη αύξηση στις τάσεις και κυρίως στο

δοκίμιο 500, στο οποίο έχουμε και αύξηση του συντελεστή 'k'. Μπορούμε να πούμε εδώ ότι η παράμετρος w/t_c έχει μεγαλύτερη επιρροή στις περιπτώσεις σκληρών περιβλημάτων και σκληρών ενθεμάτων. Όσον αφορά την άνω εξωτερική πλευρά για $\theta = 60^0$, η μεταβολή του w/t_c , δεν παίζει σπουδαίο ρόλο.

- Μεταβολή του t_f/t_c : Σε όλα τα διαγράμματα της ενότητας έχουμε παρόμοια συμπεριφορά. Αύξηση των τάσεων για μείωση του λόγου t_f/t_c (από 1/13 σε 1/20). Αυτή όμως η αύξηση δεν συνοδεύεται και από αύξηση του συντελεστή 'k', καθώς αυξάνονται και οι τάσεις για τα αντίστοιχα δοκίμια χωρίς ένθεμα.

- Μεταβολή της γωνίας θ : Τα δοκίμια με γωνία $\theta = 60^0$ παρουσιάζουν στην κάτω εξωτερική πλευρά των περιβλημάτων τους αύξηση των τάσεων σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια με $\theta = 90^0$, καθώς επίσης υπάρχει και αισθητή αύξηση του συντελεστή 'k'. Αντίθετα στην άνω πλευρά παρουσιάζουν ελάττωση των τάσεων που ακολουθείται από αισθητή πτώση του 'k'.

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων «Ενότητας B»

Σε αυτή την ενότητα μετράμε την ορθή τάση στην εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων των δοκιμίων.

- Μεταβολή του E_f/E_{cs} : Αύξηση του λόγου E_f/E_{cs} ακολουθείται από μεγάλη πτώση των τάσεων και σημαντική ελάττωση του συντελεστή 'k'. Αυτό σε όλα τα δοκίμια της ενότητας στην κάτω εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων. Στην άνω επιφάνεια τώρα, υπάρχει μεγάλη πτώση των τάσεων για τα δοκίμια 3,50, αλλά η πτώση για τα δοκίμια 500 είναι σχετικά μικρή. Αυτό φαίνεται και στους συντελεστές 'k' σε αυτή την περιοχή, όπου μειώνονται σημαντικά και κυρίως στην περίπτωση των 50, αλλά παρουσιάζουν αναλογικά μικρή πτώση για την περίπτωση των δοκιμίων 500.

- Μεταβολή του w/t_c : Για $\theta = 90^0$ και για $\theta = 60^0$ μόνο στην πάνω εσωτερική επιφάνεια, έχει μεγάλη επίδραση η αύξηση του w/t_c (από 2 σε 4) μόνο στην περίπτωση $E_f/E_{cs} = 500$, όπου υπάρχει μεγάλη πτώση των τάσεων και πτώση του συντελεστή 'k' επίσης. Πιο έντονο παρουσιάζεται το φαινόμενο όταν έχουμε παχιά περιβλήματα ($t_f/t_c = 1/13$). Στην κάτω εσωτερική επιφάνεια, για $\theta = 60^0$, έχει μικρή επίδραση η αλλαγή του w/t_c .

- Μεταβολή του t_f/t_c : Για $\theta = 90^0$ μείωση του λόγου t_f/t_c (από 1/13 σε 1/20) οδηγεί σε αύξηση των τάσεων αλλά μείωση του συντελεστή 'k' στις περισσότερες περιπτώσεις. Για $\theta = 60^0$ στην

κάτω εσωτερική επιφάνεια έχουμε αύξηση των τάσεων, αλλά και αύξηση του συντελεστή 'k'. Ενώ στην άνω εσωτερική επιφάνεια έχουμε μεγάλη αύξηση των τάσεων με μικρή σχετικά μεταβολή του συντελεστή 'k'.

- Μεταβολή της γωνίας θ : Εδώ η μεταβολή της γωνίας ' θ ', προκαλεί αντίθετες συνέπειες από αυτές που αναφέραμε στην «Ενότητα Α». Δηλαδή στην κάτω εσωτερική επιφάνεια υπάρχει πτώση των τάσεων για ' $\theta = 60^0$ ', ενώ στην άνω αύξηση. Ο συντελεστής 'k' αυξάνεται και κυρίως παρουσιάζει σημαντική άνοδο στην άνω εσωτερική επιφάνεια. Σε αυτή την ενότητα εμφανίζεται τόσο ο μέγιστος συντελεστής 'k' όσο και ο ελάχιστος. Δηλαδή για το δοκίμιο 500 στο διάγραμμα 13-2-60-120 ο συντελεστής γίνεται $k_{\max} = 1,9$ ενώ πάλι για το δοκίμιο 500 στο διάγραμμα 13-4-60-50 ο συντελεστής γίνεται $k_{\min} = 0,73$.

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων «Ενότητας Γ»

Σε αυτή την ενότητα μετράμε την διατμητική τάση στην εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων των δοκιμίων.

Σημείωση: Γενικά οι διατμητικές τάσεις για τα δοκίμια χωρίς ένθεμα είναι πολύ μικρές και θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται στα δοκίμια με ένθεμα. Για αυτό το λόγο δεν υπολογίσαμε συντελεστές συγκέντρωσης τάσης 'k' σε αυτή την ενότητα.

- Μεταβολή του E_f/E_{cs} : Αύξηση του λόγου E_f/E_{cs} ακολουθείται από σημαντική πτώση των τάσεων. Αυτό σε όλα τα δοκίμια της ενότητας τόσο στην κάτω όσο και στην άνω εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων.

- Μεταβολή του w/t_c : Γενικά η μεταβολή του λόγου δεν επηρεάζει τις τάσεις, σε όλα τα δοκίμια της ενότητας.

- Μεταβολή του t_f/t_c : Παρατηρείται αύξηση των τάσεων σε όλα τα δοκίμια με μείωση του λόγου t_f/t_c . Το φαινόμενο είναι κάπως πιο έντονο στην περίπτωση όπου $\theta = 60^0$ στην κάτω εσωτερική επιφάνεια.

- Μεταβολή της γωνίας θ : Στην κάτω εσωτερική επιφάνεια υπάρχει πτώση των τάσεων για ' $\theta = 60^0$ ', ενώ στην άνω αύξηση

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων «Ενότητας Δ»

Σε αυτή την ενότητα μετράμε την ορθή τάση πάνω στα υλικά του πυρήνα των δοκιμίων στην περιοχή σύνδεσης του πυρήνα με τα περιβλήματα.

Σημείωση: Γενικά οι ορθές τάσεις για τα δοκίμια χωρίς ένθεμα είναι πολύ μικρές και θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται στα δοκίμια με ένθεμα. Για αυτό το λόγο δεν υπολογίσαμε και σε αυτή την ενότητα συντελεστές συγκέντρωσης τάσης 'k'.

- Μεταβολή του E_f/E_{cs} : Αύξηση του λόγου E_f/E_{cs} ακολουθείται από σημαντική πτώση των τάσεων. Αυτό σε όλα τα δοκίμια της ενότητας τόσο στην κάτω όσο και στην άνω εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων.

- Μεταβολή του w/t_c : Γενικά η μεταβολή του λόγου δεν επηρεάζει τις τάσεις στα δοκίμια αυτής της ενότητας.

- Μεταβολή του t_f/t_c : Παρατηρείται αύξηση των τάσεων σε όλα τα δοκίμια με μείωση του λόγου t_f/t_c . Το φαινόμενο είναι κάπως πιο έντονο στην περίπτωση όπου $\theta = 60^\circ$ στην κάτω εσωτερική επιφάνεια.

- Μεταβολή της γωνίας θ : Για γωνία $\theta = 60^\circ$ στην κάτω μεριά του πυρήνα έχουμε αύξηση των τάσεων σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια με $\theta = 90^\circ$. Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση στην οποία έχουμε δοκίμια με μαλακά περιβλήματα, $E_f/E_{cs} = 120$, και σκληρό ένθετο $E_{ch}/E_{cs} = 500$. Αυτός ο συνδυασμός παρουσιάζει μεγάλη αύξηση τάσεων όταν η γωνία γίνεται 60° . Αντίθετα στην πάνω επιφάνεια επαφής για $\theta = 60^\circ$ έχουμε μείωση των τάσεων, όπου και εδώ η περίπτωση $E_f/E_{cs} = 120$, $E_{ch}/E_{cs} = 500$ εμφανίζει σημαντική πτώση τάσεων.

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων «Ενότητας Ε»

Σε αυτή την ενότητα μετράμε την διατμητική τάση πάνω στα υλικά του πυρήνα των δοκιμίων στην περιοχή σύνδεσης του πυρήνα με τα περιβλήματα.

Σημείωση: Γενικά οι διατμητικές τάσεις για τα δοκίμια χωρίς ένθεμα είναι πολύ μικρές και θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται στα δοκίμια με ένθεμα. Για αυτό το λόγο δεν υπολογίσαμε και σε αυτή την ενότητα συντελεστές συγκέντρωσης τάσης 'k'. Θα

πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι και οι τάσεις για το δοκίμιο 3 σε αυτή την ενότητα, σε όλα τα διαγράμματα, είναι σχεδόν μηδενικές.

- Μεταβολή του E_f/E_{cs} : Αύξηση του λόγου E_f/E_{cs} ακολουθείται από σημαντική πτώση των τάσεων. Αυτό σε όλα τα δοκίμια της ενότητας τόσο στην κάτω όσο και στην άνω εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων.

- Μεταβολή του w/t_c : Γενικά η μεταβολή του λόγου επιφέρει ελάχιστη επίδραση στις τάσεις σε όλα τα δοκίμια αυτής της ενότητας. Μόνο σε μία περίπτωση υπάρχει πιο αισθητή πτώση των τάσεων. Στην κάτω επιφάνεια για $\theta = 60^\circ$, για μεταβολή του λόγου w/t_c από το διάγραμμα 13-2-120-60 στο 13-4-120-60, και για το δοκίμιο 500. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει πτώση τάσεων και στην περιοχή της ρητίνης.

- Μεταβολή του t_f/t_c : Με μείωση του λόγου (από 1/13 σε 1/20) παρατηρείται αύξηση των τάσεων σε όλα τα διαγράμματα. Κυρίως η αύξηση είναι πιο αισθητή στο δοκίμιο 500.

- Μεταβολή της γωνίας θ : Για $\theta = 60^\circ$ στην κάτω επιφάνεια του πυρήνα υπάρχει γενικά πτώση των τάσεων (σε σχέση με $\theta = 90^\circ$). Αξιοσημείωτο σε αυτή την περίπτωση είναι ότι καθώς πλησιάζουμε στην γειτονιά σύνδεσης των πυρήνων οι τάσεις, στο δοκίμιο 500, μετατρέπονται από αρνητικές σε θετικές. Όσο αναφορά τώρα την άνω πλευρά του πυρήνα, σε αυτή παρατηρείται αύξηση των τάσεων.

Γενικά Συμπεράσματα

Σε όλες τις περιπτώσεις αύξηση του λόγου E_f/E_{cs} ακολουθείται από σημαντική πτώση των τάσεων, πλην των περιπτώσεων που παρουσιάζονται στην «Ενότητα Α». Αυτό είναι λογικό, δεδομένου ότι το δοκίμιο δρα ως ενιαίο υλικό, οπότε δέχεται ίδιες επιμηκύνσεις σε όλο του το μήκος. Άρα αυξάνοντας την σκληρότητα των περιβλημάτων αυξάνονται και οι τάσεις πάνω στα περιβλήματα (μετρήσεις «Ενότητας Α»). Από την άλλη δε, παρατηρούμε πως όταν έχουμε μεγάλες τάσεις στην εξωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων, έχουμε μικρές τάσεις στην εσωτερική τους επιφάνεια («Ενότητα Β») και αντίστροφα. Για αυτό το λόγο, αύξηση του E_f/E_{cs} , εφόσον αυξάνει τις τάσεις στην εξωτερική επιφάνεια, οδηγεί σε μείωση των τιμών της τάσης στην εσωτερική επιφάνεια, όπως καταγράφεται στην «Ενότητα Β». Επιπλέον εδώ, μπορούμε να αναφέρουμε σαν ενίσχυση του παραπάνω ισχυρισμού, ότι το δοκίμιο 500 στο διάγραμμα 13-4-60-500, ενώ στην ενότητα «Α» παρουσιάζει τον μέγιστο συντελεστή 'k' (1,325) στην ενότητα «Β» παρουσιάζει τον ελάχιστο (0,73).

Ο ρόλος τώρα του λόγου w/t_c δείχνει να αποκτά μεγαλύτερη αξία όσο αυξάνει η σκληρότητα των περιβλημάτων και παράλληλα η σκληρότητα των ενθεμάτων. Για αυτό το γεγονός ίσως, η μεγαλύτερη επιρροή του w/t_c εμφανίζεται στα πιο παχιά δοκίμια ($t_f/t_c = 1/13$) σε συνδυασμό με τα πιο σκληρά περιβλήματα ($E_f/E_{cs} = 500$) και τα πιο σκληρά ενθέματα.

Η μείωση του λόγου t_f/t_c (από 1/13 σε 1/20) έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων στα δοκίμια όλων των ενοτήτων. Παράλληλα όμως, οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσης («Ενότητες A, B») δεν παρουσιάζουν σημαντική αλλαγή στις τιμές τους. Οι αυξανόμενες τάσεις στα δοκίμια λόγω της μείωσης του λόγου t_f/t_c , μπορεί να συνδέονται και με μεγάλες αυξήσεις του βέλους κάμψης των δοκιμίων, αλλά δεν έγινε μελέτη αυτού του φαινομένου σε αυτή την διπλωματική.

Τέλος, αν δούμε τα διαγράμματα των ενοτήτων A, B λίγο πιο μακριά από την περιοχή σύνδεσης των δύο πυρήνων θα παρατηρήσουμε ότι η χρήση ενθεμάτων βοηθάει τα περιβλήματα καθώς ρίχνουν σημαντικά τις τάσεις σε αυτά τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική επιφάνειά τους. Ίσως η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στον πυρήνα, που δεν θα υπήρχαν χωρίς το ένθεμα, να απαιτεί πιο ισχυρό δεσμό ανάμεσα στα περιβλήματα και των πυρήνα.

Κεφάλαιο 4

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΑΚΑΣ SANDWICH ΜΕ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΕΝΘΕΜΑ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο επεκτείναμε την παραμετρική μελέτη στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση μιας πλάκας. Παρότι, η τρισδιάστατη σχεδίαση αυξάνει τις δυνατότητες παραμετροποίησης εν γένει, δεν κάναμε τόσο εις βάθος ανάλυση των παραμέτρων σε αυτό το κεφάλαιο. Ο λόγος που έγινε αυτό, είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων να εξάγει αποτελέσματα, αλλά και ο χρόνος σχεδίασης του, που είναι εξίσου αυξημένος.

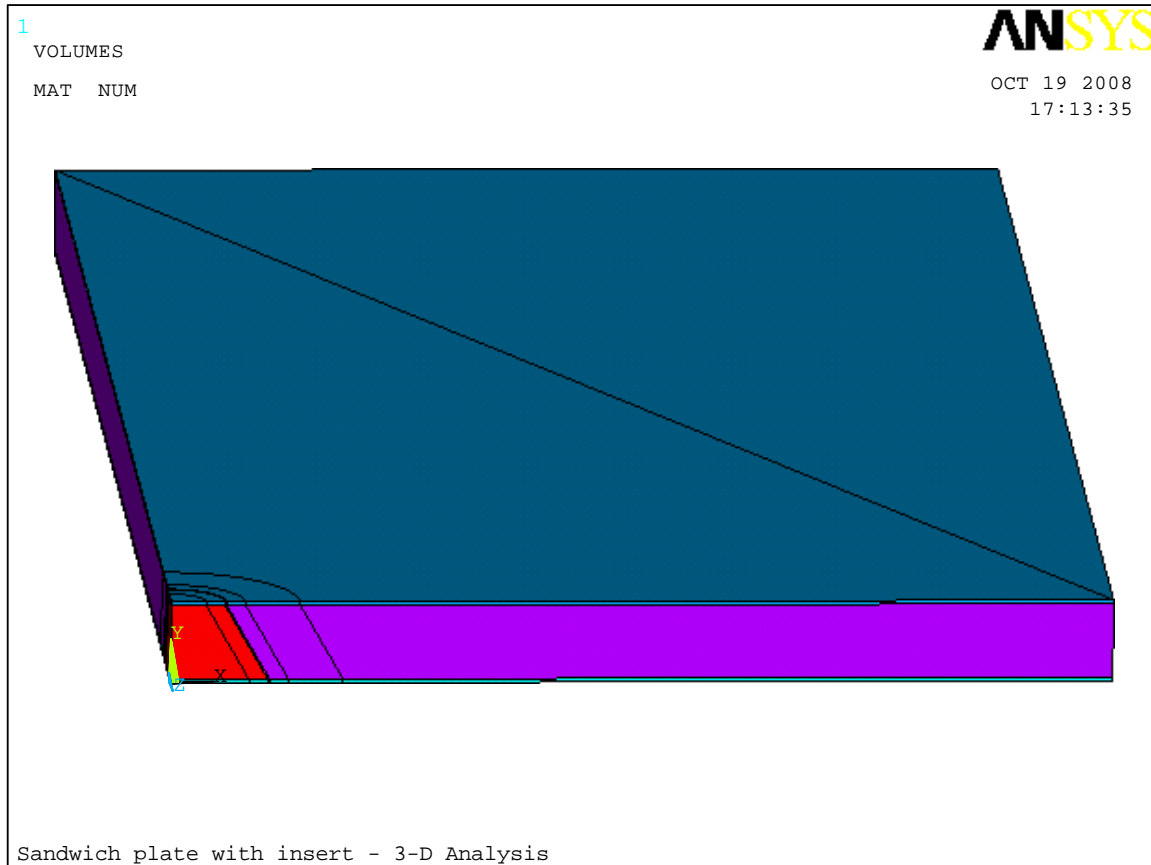
4.2 Περιγραφή των Πλακών στη Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση

Όπως έχουμε εξηγήσει και σε άλλο κεφάλαιο, η τρισδιάστατη μοντελοποίηση ενός προβλήματος, πρέπει να γίνεται μόνο όταν το πρόβλημα αυτό δεν μπορεί να αναλυθεί πλήρως σε δύο διαστάσεις. Έτσι, ένα τέτοιο πρόβλημα αντιμετωπίσαμε στην μελέτη αυτού του κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα αναλύσαμε την περίπτωση τετράγωνης πλάκας sandwich, πακτωμένης στις τέσσερις πλευρές της, θεωρώντας ομοιόμορφα κατανομημένη φόρτωση στην πάνω επιφάνεια της. Επιπλέον εξετάσαμε την ύπαρξη σκληρού ενθέματος στο κέντρο της πλάκας. Το ένθεμα είχε δύο σχήματα: (α) ένθεμα κυλινδρικού σχήματος, (β) ένθεμα σχήματος κόλουρου κώνου.

Τα υλικά των περιβλημάτων της πλάκας και τα υλικά του πυρήνα είναι κάποια από τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε στην παραμετρική μελέτη δύο διαστάσεων που έγινε στο «Κεφάλαιο 3» του παρόντος συγγράμματος. Έτσι παραπέμποντας στους πίνακες 3.2.1 και 3.2.2, για τον κανονικό πυρήνα χρησιμοποιήσαμε και πάλι τον αφρό PVC H100, για τον λόγο E_f/E_c , κάναμε χρήση της τιμής $E_f/E_c = 120$, που αντιστοιχεί σε περιβλήματα από το σύνθετο υλικό γυαλιού-πολυεστέρα με και για το ένθεμα πήραμε τον λόγο $E_{ch}/E_{cs} = 50$, που αντιστοιχεί σε ξύλο κοντραπλακέ (*plywood*).

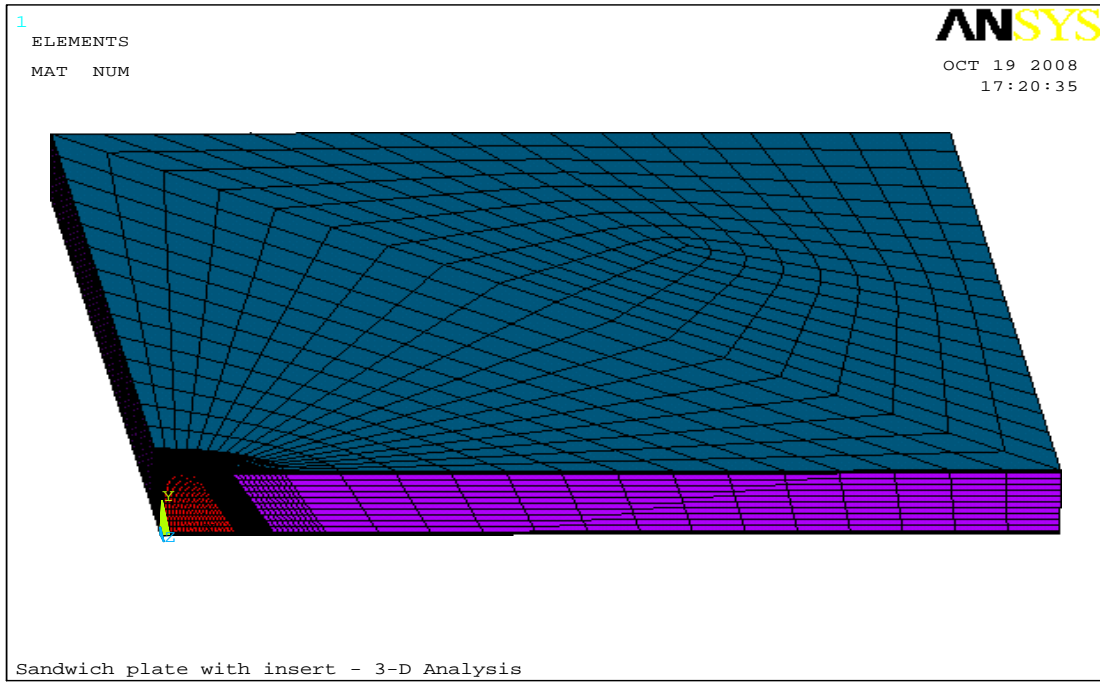
Οι διαστάσεις και το σχήμα των πλακών είναι ίδιο με αυτό που φαίνεται στο σχήμα 3.1.1 με τη διαφορά ότι έχουμε πλάτος 500 mm ίσο με το μήκος. Κατά τα άλλα από τον πίνακα 3.2.1 επιλέχθηκαν οι λόγοι $t_f/t_c = 1/20$, $w/t_c = 2$, $\theta = 60^\circ$ (κώλουρος κώνος), $\theta = 90^\circ$ (κύλινδρος).

Η μοντελοποίηση έγινε στο ANSYS και το μοντέλο που σχεδιάστηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.1 που ακολουθεί.

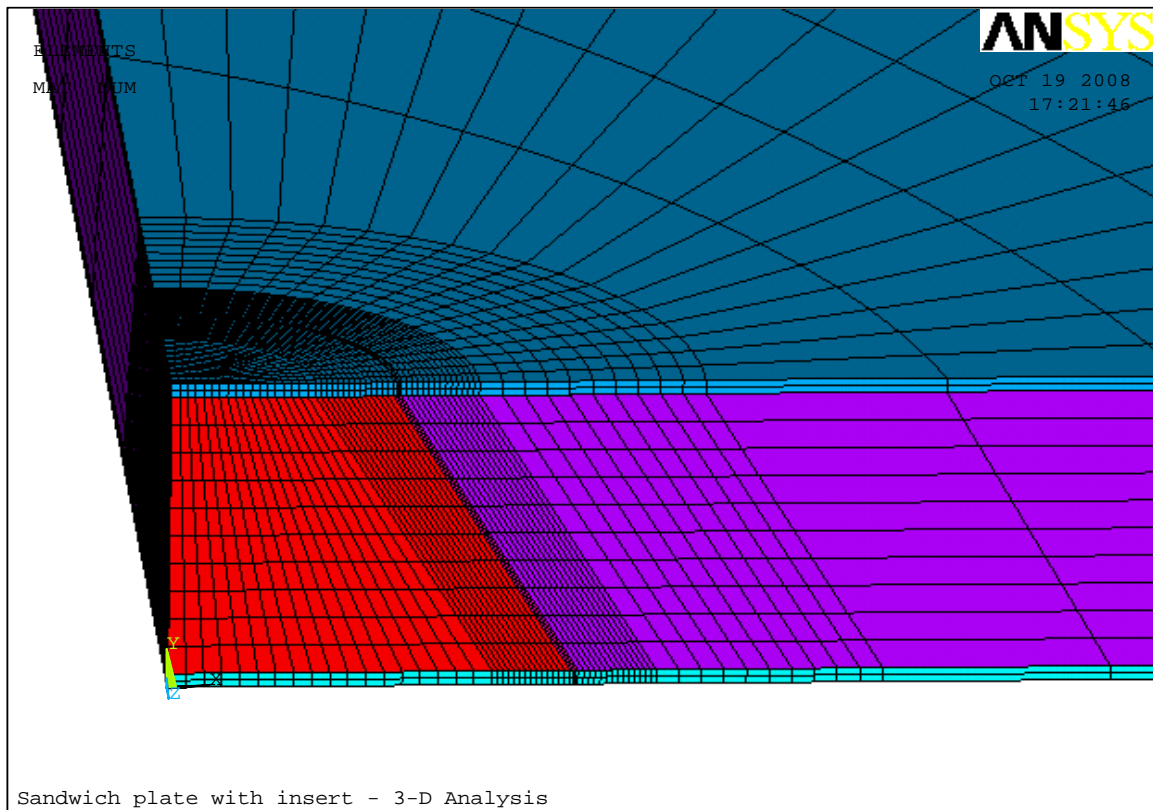


Σχήμα 4.2.1 Πλάκα sandwich με ένθεμα κόλουρου κώνου.

Επειδή η πλάκα παρουσιάζει συμμετρία τόσο κατά τον διαμήκη, όσο και κατά τον εγκάρσιο άξονα, μοντελοποιήθηκε μόνο το $\frac{1}{4}$ αυτής. Αυτό μας διασφαλίζει μικρότερο αριθμό στοιχείων κατά την κατασκευή του πλέγματος, άρα και πιο γρήγορη επίλυση του προβλήματος. Στα επόμενα δύο σχήματα που ακολουθούν, φαίνεται η παραπάνω πλάκα με το παραγόμενο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Στο σχήμα 4.2.3 μάλιστα, φαίνεται σε μεγέθυνση η περιοχή σύνδεσης των δύο πυρήνων.



Σχήμα 4.2.2 Πλέγμα πλάκας sandwich με ένθεμα κόλουρου κώνου.



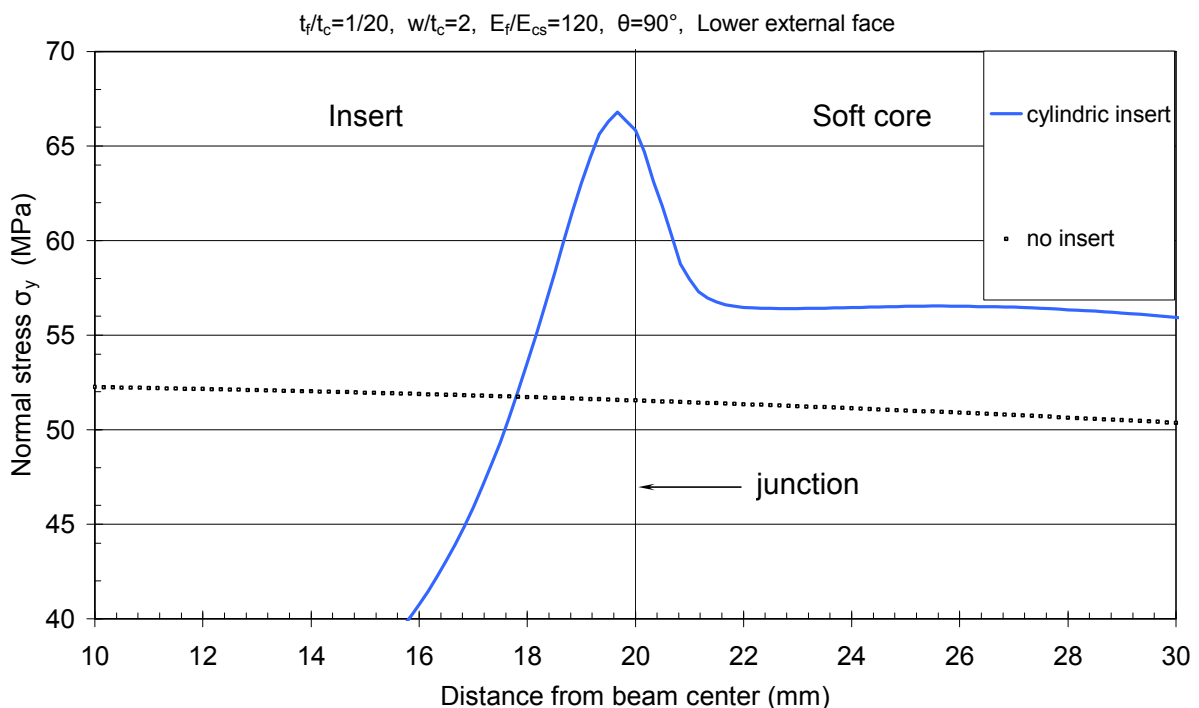
Σχήμα 4.2.3 Μεγέθυνση πλέγματος πλάκας sandwich στην περιοχή σύνδεσης μαλακού-σκληρού πυρήνα.

Τα στοιχεία (elements) που επιλέχθηκαν για το πλέγμα είναι 20-κομβά 3-D στοιχεία (SOLID 95, 3-D, 20-node element) και συνολικά χρησιμοποιήθηκαν περίπου 20700 στοιχεία. Στα σχήματα 4.2.2, 4.2.3 φαίνεται ότι υπάρχει μία περιοχή στην οποία τα στοιχεία μικραίνουν πολύ σε μέγεθος. Εκτός δηλαδή της περιοχής σύνδεσης των δύο πυρήνων, όπου και στα μοντέλα των προηγούμενων κεφαλαίων, αυξάνεται η πυκνότητα των στοιχείων ώστε να έχουμε καλύτερη καταγραφή της συμπεριφοράς σε αυτή την κρίσιμη περιοχή, εδώ υπάρχει μια περιοχή, που εκτείνεται αρκετά μακριά από την γειτονία των δύο πυρήνων, οι οποία έχει πλέγμα με μικρά στοιχεία. Μετά την διέλευση του κυκλικού συνόρου της περιοχής αυτής, παρατηρούμε τα στοιχεία του πλέγματος του μοντέλου να μεγαλώνουν απότομα. Αυτό το κυκλικό σύνορο, ουσιαστικά περιγράφει την περιοχή στην οποία θα μελετήσουμε τις τάσεις που αναπτύσσονται στο μοντέλο και για αυτό το λόγο αυξάνεται η πυκνότητα των στοιχείων, ώστε να έχουμε καλή απεικόνιση εκεί. Πέραν αυτής της περιοχής, εσκεμμένα αυξάνουμε το μέγεθος των στοιχείων, ώστε να ελαττώσουμε τον συνολικό αριθμό τους. Μικρότερος αριθμός στοιχείων σημαίνει, ταχύτερη λύση.

4.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Τα μοντέλα τα οποία μελετήθηκαν ήταν τρία : (α) μοντέλο χωρίς ένθεμα , (β) μοντέλο με ένθεμα σχήματος κυλίνδρου , (γ) μοντέλο με ένθεμα σχήματος κόλουρου κώνου. Μετρήσαμε τις ορθές τάσεις σ_x , στις ίδιες περιοχές που μετρήσαμε και στα μοντέλα του «Κεφαλαίου 3» (βλ. σχήμα 3.1.1, 3.1.2) και κατασκευάσαμε αντίστοιχα διαγράμματα.

Τα διαγράμματα τα οποία κατασκευάσαμε έχουν την μορφή του σχήματος 4.3.1 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.3.1 Χαρακτηριστικό Διάγραμμα

Οι λεζάντες που υπάρχουν στο διάγραμμα είναι ίδιες με τις αντίστοιχες του «Κεφαλαίου 3», όπου και παραπέμπουμε για περισσότερες πληροφορίες. Ωστόσο διευκρινίζουμε ότι γωνία $\theta = 90^0$ σημαίνει κυλινδρικό ένθεμα, ενώ $\theta = 60^0$ σημαίνει ένθεμα σχήματος κόλουρου κώνου.

Αμέσως πιο κάτω ακολουθούν οι πίνακες με τους συντελεστές συγκέντρωσης τάσης 'k'. Οι συντελεστές και σε αυτό το κεφάλαιο προέκυψαν με την ίδια λογική του προηγούμενου κεφαλαίου. Κάνουμε πάλι παραπομπή στο «Κεφάλαιο 3» για περισσότερες διευκρινήσεις.

Πίνακας 4.3.1 Συντελεστές Συγκέντρωσης Τάσεων

CONE INSERT				
Area	L.E.F	L.I.F	U.E.F.	U.I.F.
k	1.3	1.315	1.086	1.45

Πίνακας 4.3.2 Συντελεστές Συγκέντρωσης Τάσεων

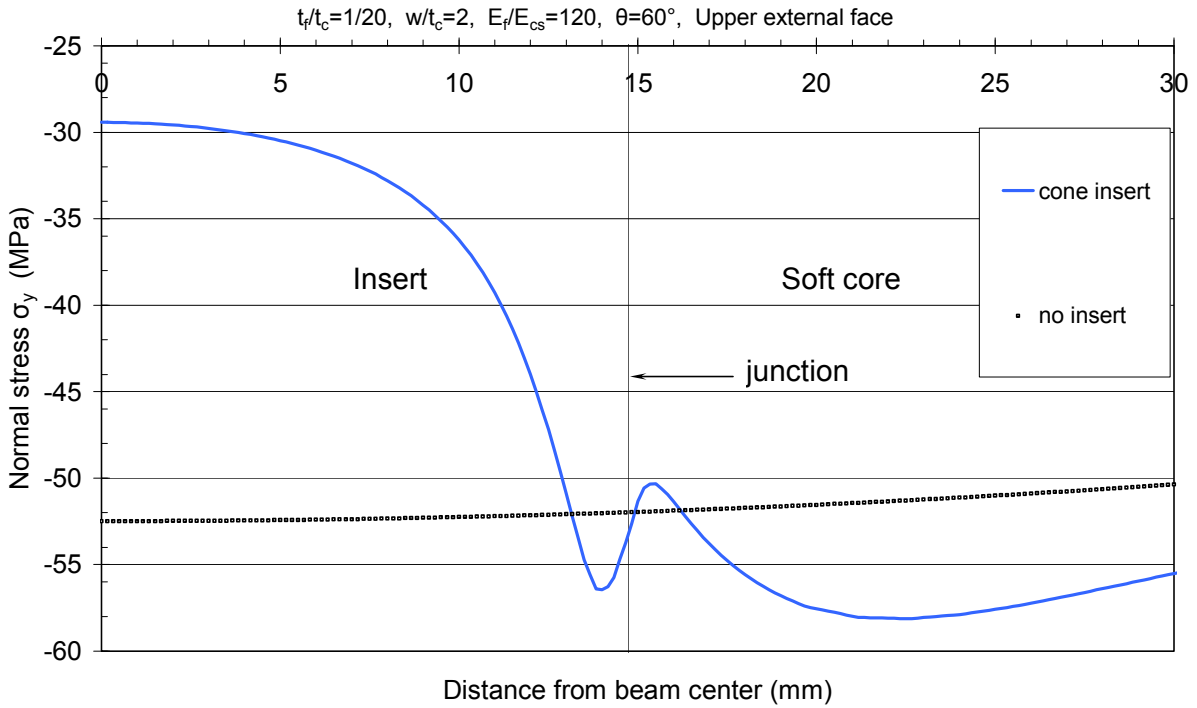
CYLINDRICAL INSERT		
Area	L.E.F.	L.I.F.
k	1.295	1.284

Και σε αυτό το κεφάλαιο υπολογίστηκαν οι συντελεστές 'k' μόνο για τις περιπτώσεις μέτρησης τάσεων πάνω στα περιβλήματα των πλακών, καθώς δεν αναπτύσσονται αξιόλογες τάσεις πάνω στον κανονικό πυρήνα (οπότε δεν έχει νόημα υπολογισμός συγκέντρωσης τάσης)

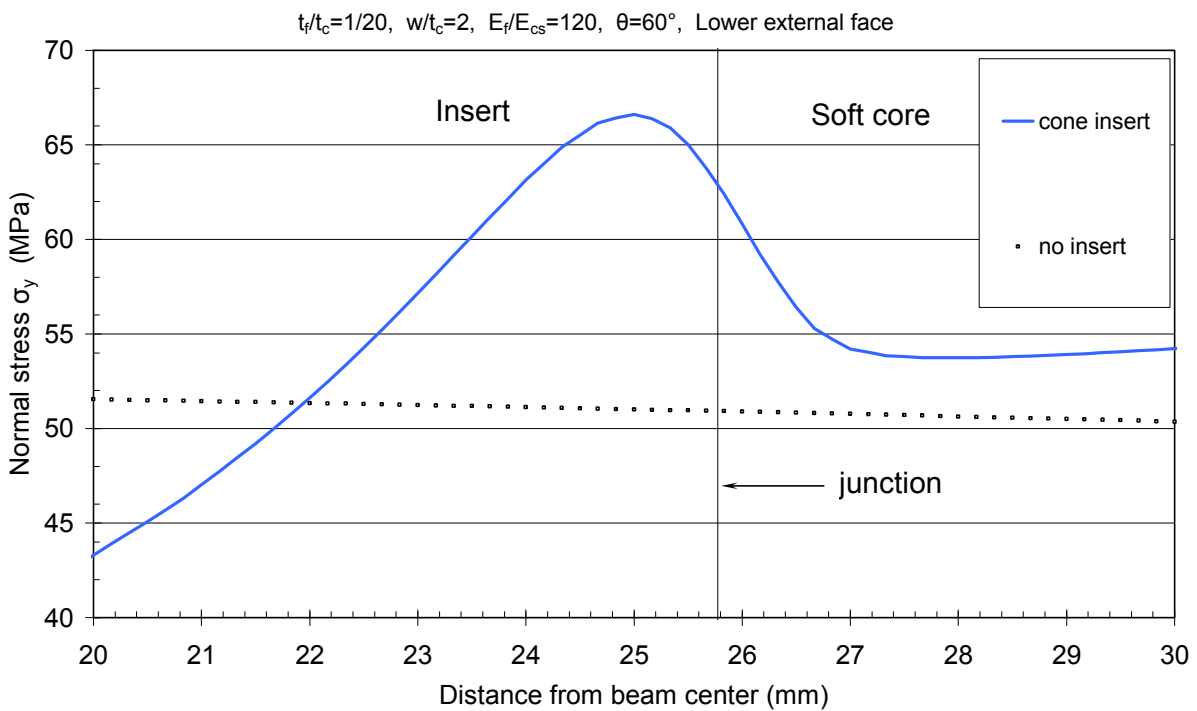
Τώρα όσο αναφορά τις λεζάντες των πινάκων. Στην κορυφή του πίνακα οι φράσεις – CONE INSERT- και -CYLINDRICAL INSERT- έχουν να κάνουν με το ένθεμα «κόλουρου κώνου» και «κυλίνδρου» αντίστοιχα. Στην δεύτερη σειρά διευκρινίζονται οι περιοχές (Area) στις οποίες λαμβάνεται η μέτρηση:

- L.E.F : (lower external face) κάτω εξωτερική επιφάνεια περιβλήματος
- L.I.F : (lower internal face) κάτω εσωτερική επιφάνεια περιβλήματος
- U.E.F : (upper external face) άνω εξωτερική επιφάνεια περιβλήματος
- U.I.F : (upper internal face) άνω εσωτερική επιφάνεια περιβλήματος

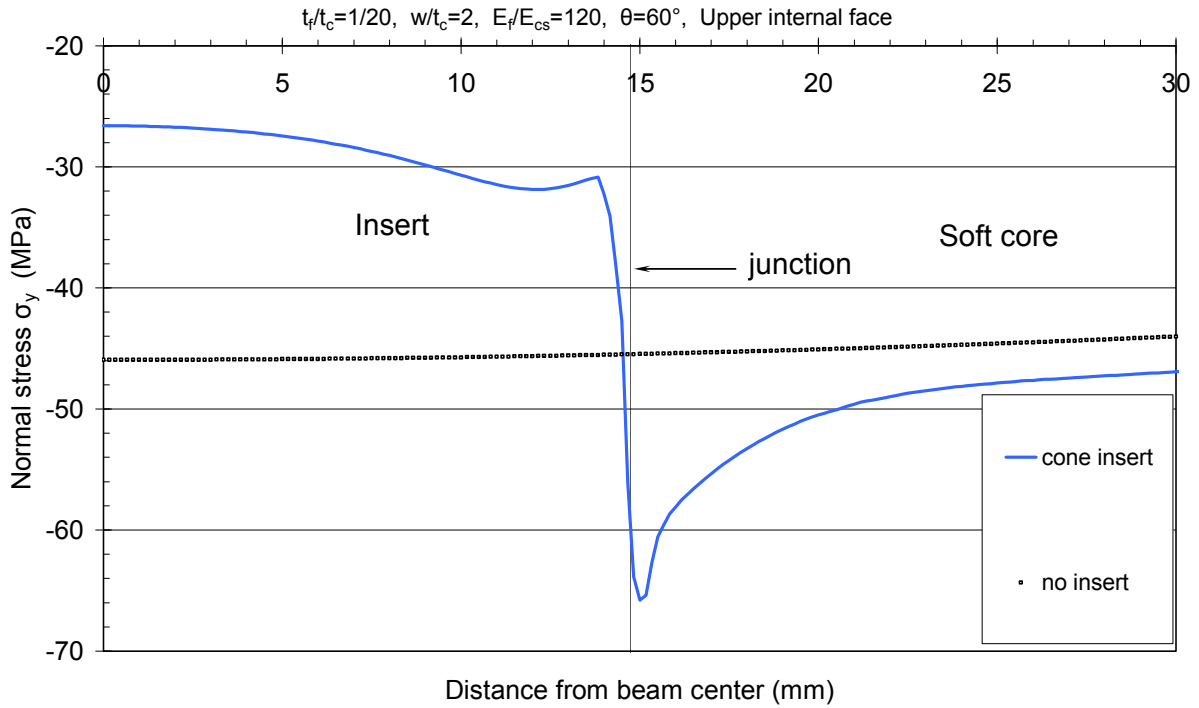
Πριν περάσουμε στην παρουσίαση των διαγραμμάτων, αναφέρουμε ότι για την περίπτωση του κυλινδρικού ενθέματος λάβαμε μετρήσεις μόνο στην κάτω επιφάνεια, επειδή το μοντέλο παρουσιάζει συμμετρία. Έτσι έχουμε έξι διαγράμματα (Σχήματα 4.3.2 έως 4.3.7) για την περίπτωση του ενθέματος κόλουρου κώνου και τρία διαγράμματα (Σχήματα 4.3.8 έως 4.3.10) για το κυλινδρικό ένθεμα.



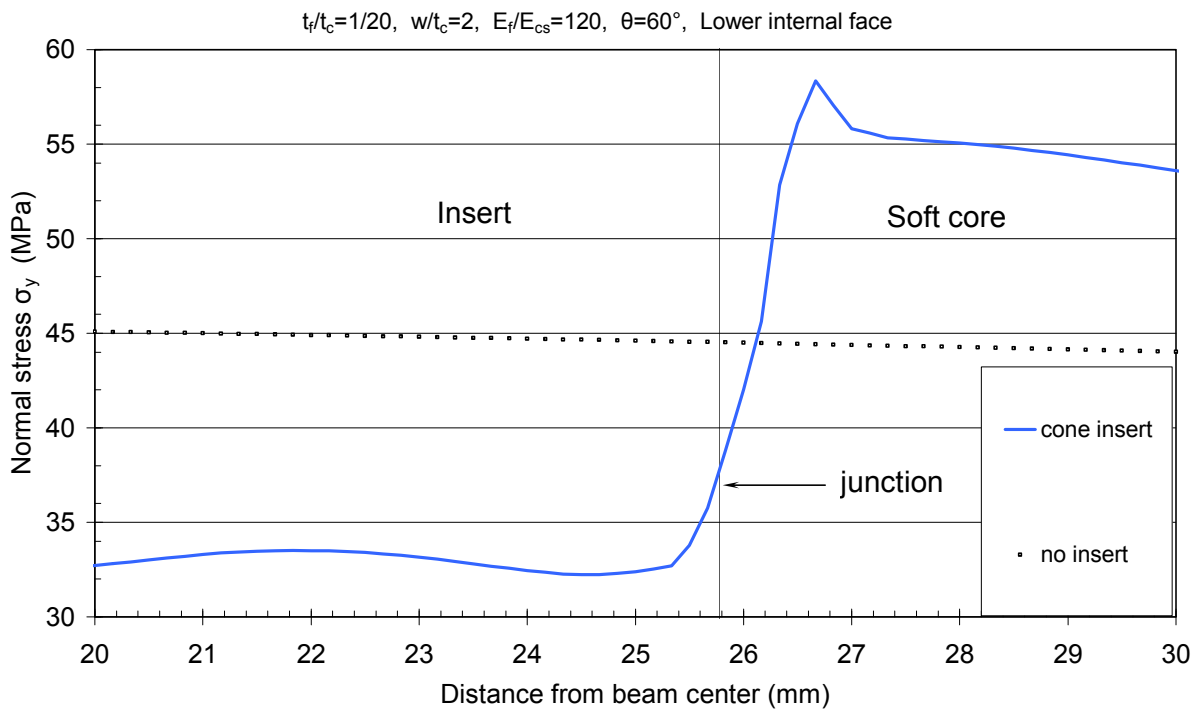
Σχήμα 4.3.2 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην άνω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



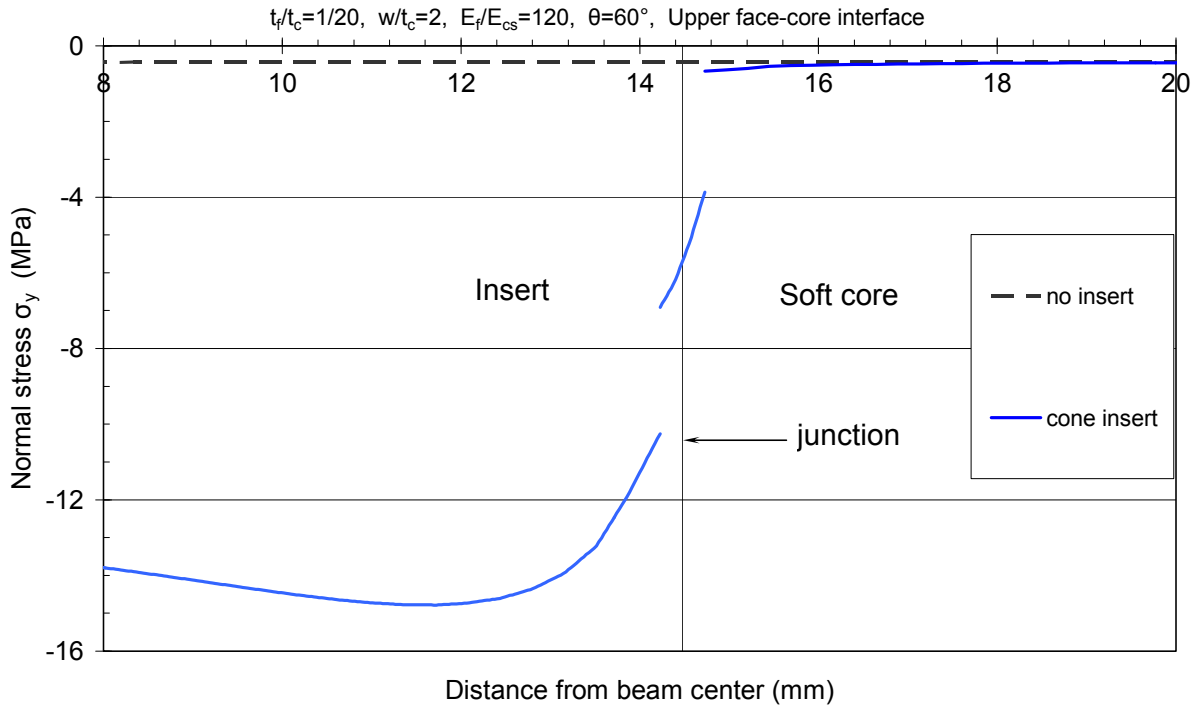
4.3.3 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



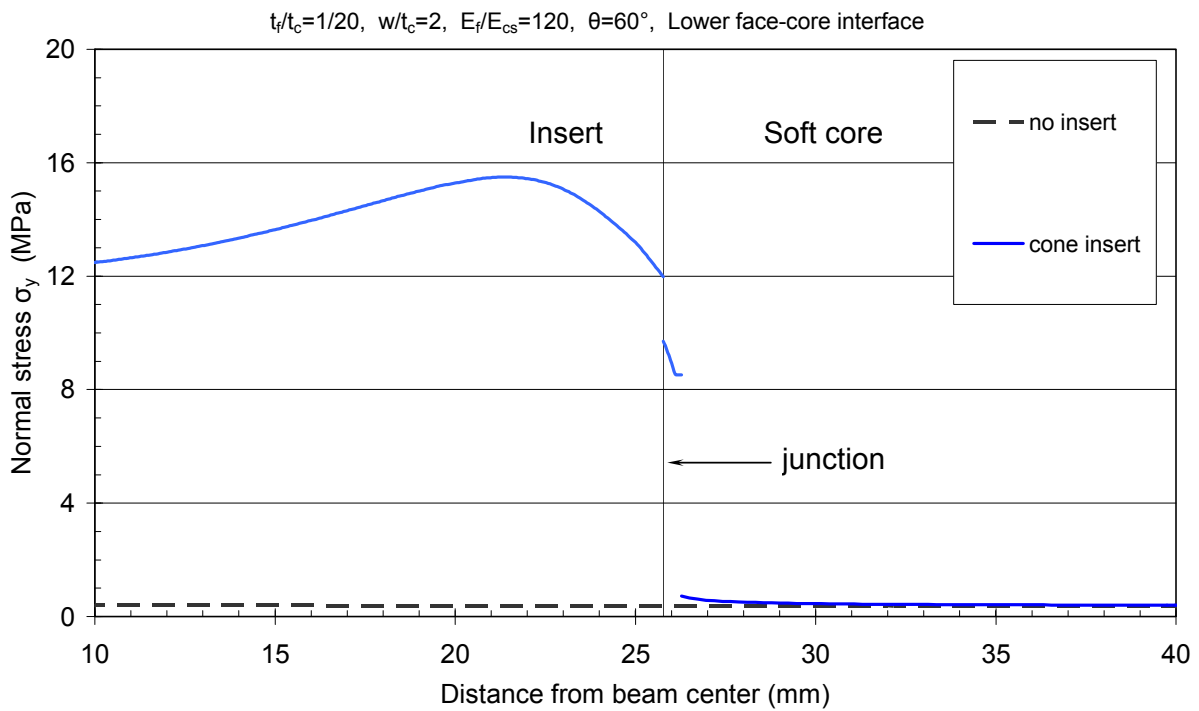
Σχήμα 4.3.4 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της άνω πλευράς του δοκιμίου



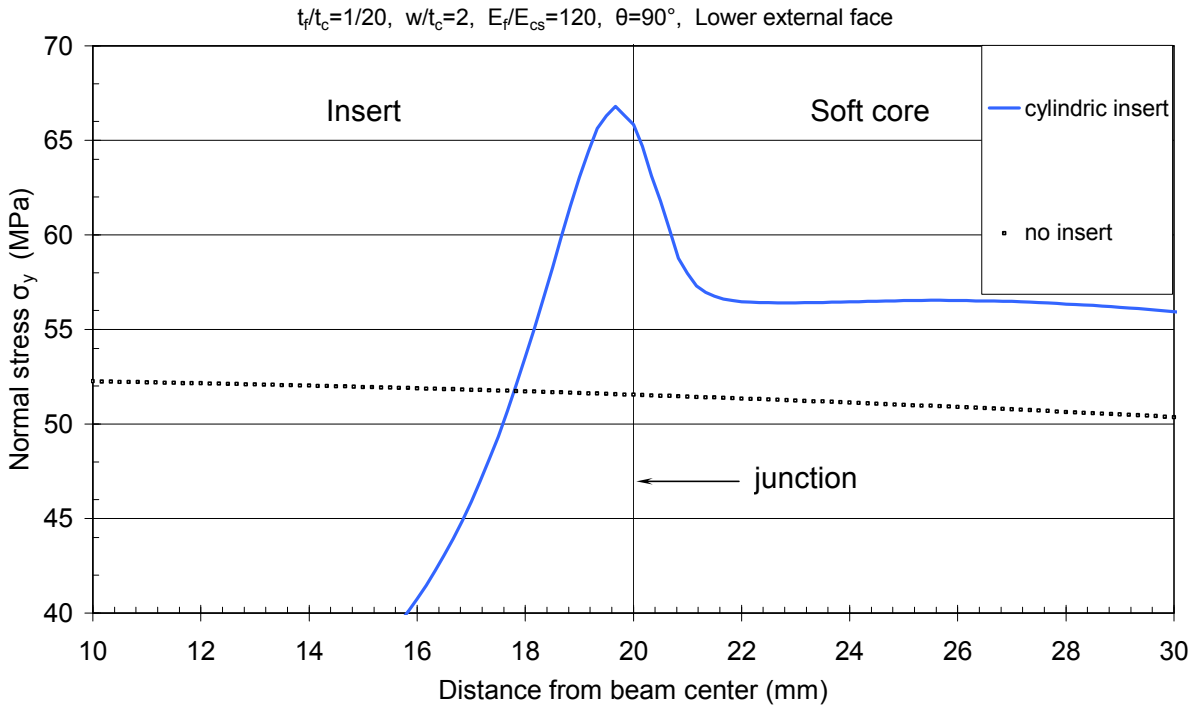
Σχήμα 4.3.5 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



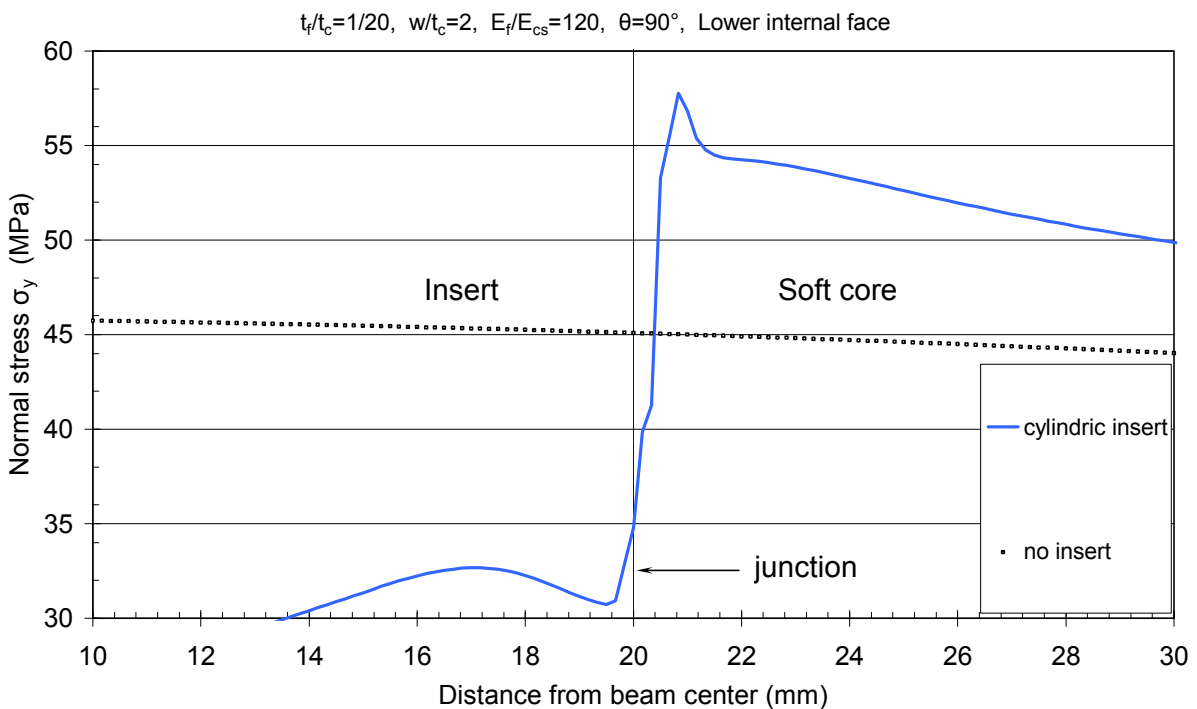
Σχήμα 4.3.6 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της άνω πλευράς



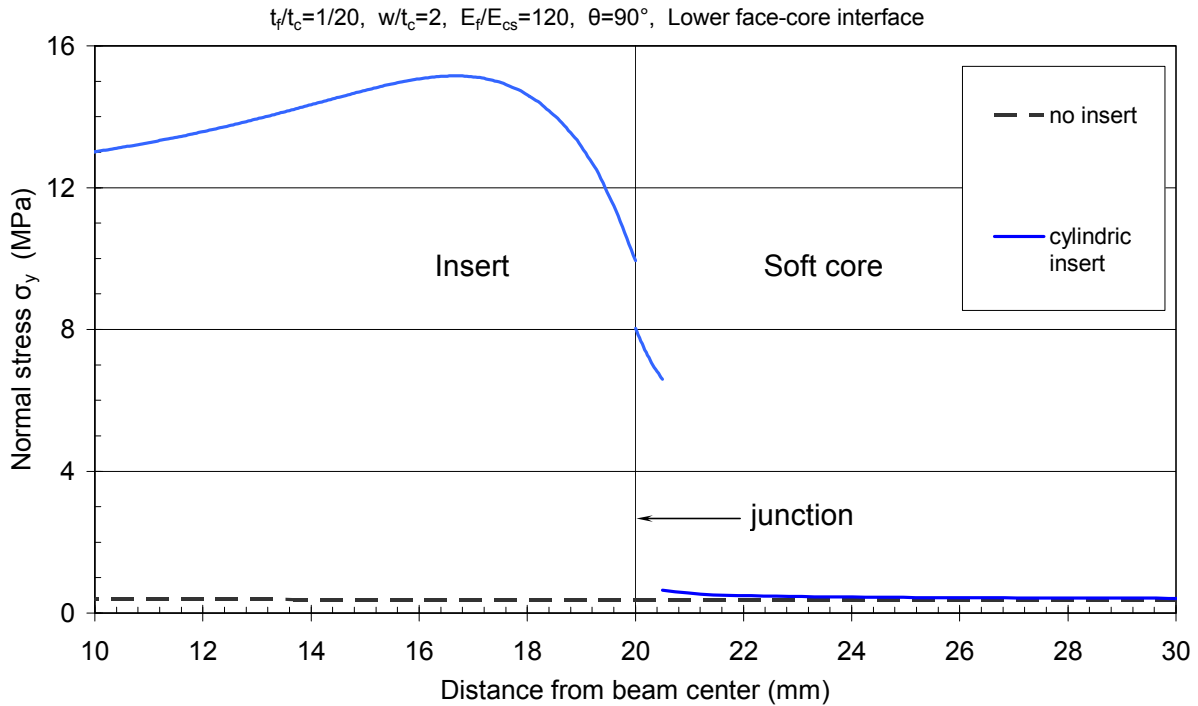
Σχήμα 4.3.7 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς



Σχήμα 4.3.8 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην κάτω εξωτερική πλευρά του δοκιμίου



Σχήμα 4.3.9 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_y στην εσωτερική επιφάνεια της κάτω πλευράς του δοκιμίου



Σχήμα 4.3.10 Μέτρηση της ορθής τάσης σ_x στον πυρήνα του δοκιμίου στην περιοχή επαφής πυρήνα-περιβλήματος της κάτω πλευράς

4.4 Σχολιασμός και Συμπεράσματα

Όπως ήταν αναμενόμενο άλλωστε, το φαινόμενο συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή σύνδεσης του ενθέματος με τον κανονικό πυρήνα εμφανίζεται και σε αυτή την περίπτωση. Από τα αποτελέσματα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν πιο πάνω, βγάζουμε τα παρακάτω συμπεράσματα.

Από τους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων «k», που φαίνονται στους πίνακες 4.3.1 και 4.3.2 και από τα αντίστοιχα διαγράμματα μπορούμε να δούμε ότι για την περίπτωση του κυλινδρικού ενθέματος ($\theta=90^\circ$) εμφανίζεται σημαντική συγκέντρωση τάσεων στην εξωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων, πάνω από την περιοχή σύνδεσης των δύο πυρήνων. Ο συντελεστής «k» προσεγγίζει την τιμή 1,3. Τα ίδια ισχύουν και για την εξωτερική επιφάνεια του κάτω περιβλήματος στην περίπτωση ενθέματος κόλουρου κώνου ($\theta=60^\circ$), όπου και εδώ ο συντελεστής «k» είναι περίπου 1,3. Επίσης και για τις δύο περιπτώσεις, εμφανίζεται αντίστοιχη συγκέντρωση τάσεων και στην εσωτερική επιφάνεια των περιβλημάτων με τον συντελεστή «k» να κινείται πάλι γύρω από την τιμή 1,3.

Σε αυτό το σημείο, θα μπορούσαμε να πούμε δύο λόγια για την επίδραση που φαίνεται να έχει η ρητίνη στα μοντέλα. Αν παρατηρήσουμε τα σχήματα 4.3.2 έως 4.3.5 και 4.3.8 έως 4.3.9 θα δούμε ότι στα περιβλήματα (άνω και κάτω) εμφανίζεται στην εξωτερική πλευρά τους, συγκέντρωση τάσεων ακριβώς πάνω από την περιοχή επαφής του ενθέματος με την ρητίνη ενώ ακολουθεί πτώση των τάσεων αμέσως μετά. Αντίθετα στην εσωτερική

πλευρά τους, εμφανίζεται το αντίστροφο φαινόμενο. Δηλαδή έχουμε χαμηλές τάσεις μέχρι την περιοχή επαφής του ενθέματος με την ρητίνη και απότομη αύξηση των τάσεων αμέσως μετά έως περίπου την περιοχή σύνδεσης του μαλακού πυρήνα με την ρητίνη, όπου σε αυτή την περιοχή παρουσιάζονται και οι μέγιστες συγκεντρώσεις τάσεων.

Όσο αναφορά το άνω περίβλημα για την περίπτωση ενθέματος κόλουρου κόνου, παρατηρούμε ότι στην εξωτερική επιφάνεια υπάρχει πολύ μικρή αύξηση των τάσεων στην κρίσιμη περιοχή σύνδεσης των δύο πυρήνων, όπου άλλωστε και ο συντελεστής «k» σε αυτή την περίπτωση έχει την ελάχιστη τιμή του 1,086. Ενώ αντίθετα, υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων, πάνω από την κρίσιμη περιοχή, στην εσωτερική πλευρά του περιβλήματος. Εδώ ο συντελεστής «k» παίρνει την μέγιστη τιμή του 1,45. Επίσης, με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε πιο πάνω, φαίνεται η επίδραση της ρητίνης στο μοντέλο.

Περνώντας στην ανάλυση των τάσεων που αναπτύσσονται πάνω στον πυρήνα, κάνουμε την παρατήρηση ότι πάνω στον κανονικό πυρήνα δεν αναπτύσσονται σημαντικές τάσεις. Ωστόσο αξιόλογες τάσεις εμφανίζονται πάνω στο ένθεμα. Πάντως, είναι παρόμοιες οι τάσεις που αναπτύσσονται, τόσο στην κάτω όσο και στην άνω πλευρά του ενθέματος και για τα δύο είδη ενθέματος.

Τέλος, λίγα λόγια για την γωνία «θ», δηλαδή για την μορφή του ενθέματος. Δεν φαίνεται να έχει καθόλου επίδραση το είδος του ενθέματος, στις τάσεις που αναπτύσσονται πάνω στον πυρήνα. Επιπλέον, στο κάτω περίβλημα η γωνία «θ» παίζει μικρό ρόλο. Σημαντική επίδραση ωστόσο, φαίνεται να έχει στο πάνω περίβλημα, όπου η αλλαγή της μορφής του ενθέματος, αλλάζει κατά πολύ την συμπεριφορά των τάσεων σε αυτή περίπτωση, όπως άλλωστε περιγράψαμε και πιο πάνω.

Κεφάλαιο 5

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την Διπλωματική Εργασία ασχοληθήκαμε με της κατασκευές sandwich που έχουν ενσωματωμένο ένθεμα στην περιοχή του πυρήνα τους. Αυτού του είδους οι κατασκευές παρουσιάζουν συγκέντρωση τάσεων, γύρω από την περιοχή συνένωσης του ενθέματος με τον κανονικό πυρήνα. Σκοπός ήταν, η σωστή μοντελοποίηση μιας τέτοιας κατασκευής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και εν συνεχεία η διερεύνηση για το πως επιδρούν στο φαινόμενο συγκέντρωσης τάσεων διάφοροι παράμετροι της κατασκευής .

Η μοντελοποίηση της κατασκευής έγινε στο πρόγραμμα Π.Σ. ANSYS. Κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης διαπιστώσαμε, ότι εκτός από τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται η κατασκευή (τα περιβλήματα, τον κανονικό πυρήνα και το ένθεμα), πολλές φορές χρειάζεται να μοντελοποιήσουμε και την συνδετική ρητίνη που υπάρχει στον πυρήνα, και έχει σαν ρόλο να συγκρατεί κολλημένα τον κανονικό πυρήνα με το ένθεμα. Η συνδετική ρητίνη, λόγω του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας που έχει σε σχέση με τα μαλακά υλικά πυρήνα που συνήθως χρησιμοποιούνται, παίζει σημαντικό ρόλο στις τάσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή συνένωσης των δύο πυρήνων, παρά τον μικρό όγκο που καταλαμβάνει.

Αφού μοντελοποιήσαμε μία τυπική διατομή κατασκευής sandwich, προχωρήσαμε στην παραμετροποίηση αυτής. Έτσι μεταβάλλοντας διάφορες γεωμετρικές παραμέτρους σχεδιάσαμε στο ANSYS, δοκίμια με λεπτά περιβλήματα ή με παχιά και δοκίμια με κοντά ενθέματα ή μακριά. Επίσης, μαζί με τις παραπάνω περιπτώσεις, αλλάξαμε και τα υλικά των περιβλημάτων και τα υλικά του ενθέματος. Χρησιμοποιήσαμε άλλοτε μαλακά και άλλοτε σκληρά υλικά και μελετήσαμε το πως επηρεάζουν όλες οι παραπάνω αλλαγές το φαινόμενο συγκέντρωσης τάσεων, που αναπτύσσεται στην περιοχή σύνδεσης του ενθέματος με τον κανονικό πυρήνα.

Τέλος, επεκτείνοντας την παραπάνω μοντελοποίηση στις τρεις διαστάσεις, σχεδιάσαμε στο ANSYS, μία πλάκα sandwich με ενσωματωμένο ένθεμα στο κέντρο της. Η πλάκα θεωρήθηκε πακτωμένη στις τέσσερις πλευρές της και ασκήθηκε σε αυτή ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στην πάνω εξωτερική επιφάνειά της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Thomsen, O.T., Bozhevolnaya E. and Lyckegaard A., 2005, Structurally Graded Core Junctions in Sandwich Elements. Composites: Part A 36 1397-1411

Bozhevolnaya E. and Lyckegaard A., 2005, Structurally Graded Core Junctions in Sandwich Panels. Composites Structures 68 23-29

Bozhevolnaya E., Lyckegaaard A., Thomsen O.T., Skvortsov V., 2004, “Local effects in the vicinity of inserts in sandwich panels”, Composites: Part B 35 619-627

Bozhevolnaya E., Thomsen O.T., Kildegaard A., Skvortsov V., 2003, “Local effects across core junctions in sandwich panels”, Composites: Part B 34 509-517

Thomsen O.T., 1998, «Sandwich plates with ‘through-the-thickness’ and ‘fully potted’ inserts: evaluation of differences in structural performance» Composite Structures 40 159-174

Τσούβαλης Ν. , 1998, «Ανάλυση και σχεδίαση σκαφών από σύνθετα υλικά»

Κολλαρίνη Μ. , 2006, «Μελέτη συγκέντρωσης τάσεων που προκαλούνται από ενθέματα σε κατασκευές Sandwich»