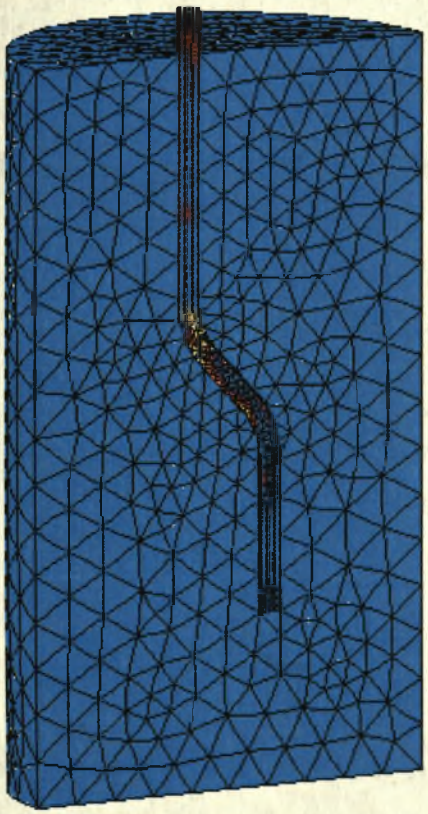
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΤΜΗΜΑ:
'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ'

Διπλωματική εργασία με θέμα:

«Προσομοίωση της Δοκιμής Εξόλκευσης Ινών με Αγκιστροειδή Άκρα από Μήτρα Σκυροδέματος Υψηλής Αντοχής»



Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Μυστακίδης

Μεταπτυχιακές Φοιτήτριες: Γεωργιάδη-Στεφανίδη Κυριακή

Παντούσα Δάφνη

ΒΟΛΟΣ 2006

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.:	4831/1
Ημερ. Εισ.:	08-10-2007
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	Δ
	620.136
	ΓΕΩ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σκοπός της εργασίας..... 1

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Εισαγωγή..... 2
Δοκιμή εξόλκευσης..... 3
Περιγραφή του φαινομένου της δοκιμής εξόλκευσης..... 4
Η δοκιμή εξόλκευσης πειραματικά..... 5
Μη-γραμμικότητα..... 8
Μέθοδος μη-γραμμικής ανάλυσης..... 9

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2.1 Περιγραφή του μοντέλου της βιβλιογραφίας..... 11
2.2 Περιγραφή δισδιάστατου συγκριτικού μοντέλου..... 12
2.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων..... 14
2.4 Περιγραφή τρισδιάστατου συγκριτικού μοντέλου και σύγκριση αποτελεσμάτων..... 19

3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3.1 Περιγραφή αναλυτικού μοντέλου..... 22
3.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων..... 25

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4.1 Γενικά..... 30
4.2 Περιγραφή τρισδιάστατου αναλυτικού μοντέλου..... 31
4.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά..... 31
4.2.2 Συνοριακές συνθήκες..... 32
4.2.3 Ιδιότητες υλικών..... 32
4.2.4 Διακριτοποίηση του μοντέλου – Πεπερασμένα στοιχεία..... 32
4.2.5 Συνθήκες επαφής..... 37
4.2.6 Μη-γραμμικά φαινόμενα του προβλήματος..... 37
4.3 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης..... 38
4.4 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης παραμετρικής ανάλυσης σχετικά με την ποιότητα χάλυβα..... 49

5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5.1 Παραμετρική ανάλυση τρισδιάστατου μοντέλου σχετικά με τη γεωμετρία της ίνας..... 57
5.2 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης για τη δεύτερη γεωμετρία..... 59
5.3 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης για την τρίτη γεωμετρία..... 67
5.4 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης παραμετρικής ανάλυσης σχετικά με την ποιότητα του χάλυβα..... 73

6ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

6.1 Περιγραφή δισδιάστατου αναλυτικού μοντέλου..... 76
6.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά..... 76
6.1.2 Συνοριακές συνθήκες..... 77
6.1.3 Ιδιότητες υλικών..... 78
6.1.4 Διακριτοποίηση του μοντέλου – Πεπερασμένα στοιχεία..... 78
6.1.5 Συνθήκες επαφής..... 80
6.2 Αποτελέσματα της δισδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης..... 81
6.3 Παραμετρική ανάλυση δισδιάστατου μοντέλου σχετικά με τη γεωμετρία της ίνας..... 83
6.4 Αποτελέσματα της δισδιάστατης παραμετρικής ανάλυσης σχετικά με τη γεωμετρία της ίνας και την ποιότητα του χάλυβα..... 85

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

7ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

7.1 Περιγραφή βελτιωμένου δισδιάστατου μοντέλου..... 88
7.2 Αποτελέσματα των αναλύσεων για το βελτιωμένο δισδιάστατο μοντέλο..... 90
7.2.1 $1^{η}$ γεωμετρία της ίνας..... 90
7.2.2 $2^{η}$ γεωμετρία της ίνας..... 92
7.2.3 $3^{η}$ γεωμετρία της ίνας..... 94
7.3 Παραμετρική ανάλυση σχετικά μεν επιρροή του πάχους των στοιχείων σκυροδέματος 96
7.3 Χρόνοι ανάλυσης - CPU time 97

8ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συμπεράσματα..... 98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην αναλυτική προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης χαλύβδινων ινών με αγκιστροειδή άκρα από μήτρα σκυροδέματος υψηλής αντοχής.

Ξεκινώντας, θεωρείται αναγκαίο να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του τρόπου προσομοίωσης στο πρόγραμμα μη γραμμικής ανάλυσης Marc. Έτσι, επιλέχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων από άρθρο της βιβλιογραφίας, το οποίο, στη συνέχεια, προσομοιώνεται με τα ίδια δεδομένα στο Marc. Εφόσον ο τρόπος προσομοίωσης κρίνεται ικανοποιητικός, προχωρούμε στην προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης μιας ευθύγραμμης ράβδου από μήτρα σκυροδέματος, με χαρακτηριστικές τιμές των δύο υλικών που αναφέρονται στον Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος.

Ακολουθεί το κύριο μέρος της εργασίας που αφορά τη μελέτη της δοκιμής εξόλκευσης ινών με αγκιστροειδές άκρο. Για την μελέτη του φαινομένου αυτού, δημιουργείται αρχικά ένα ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, προτείνεται ένα απλουστευμένο δισδιάστατο μοντέλο, το οποίο έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει σωστά το πραγματικό φαινόμενο της εξόλκευσης, ενώ ταυτόχρονα, έχει το πλεονέκτημα του σημαντικά μικρότερου χρόνου ανάλυσης. Τόσο για το τρισδιάστατο μοντέλο, όσο και για το δισδιάστατο, γίνονται παραμετρικές αναλύσεις σχετικά με τη γεωμετρία της ίνας, το θεωρούμενο συντελεστή τριβής, την ποιότητα του χάλυβα, το βάθος έμπηξης της ίνας στη μήτρα σκυροδέματος, με σκοπό την κατανόηση της επιρροής των παραμέτρων αυτών στο προς μελέτη φαινόμενο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα είναι θραυστό υλικό με μικρή εφελκυστική αντοχή. Όπως είναι γνωστό, ρηγματώνεται υπό την επίδραση, ακόμη και χαμηλών εφελκυστικών τάσεων. Έχει αναγνωριστεί πως αυτή η συμπεριφορά μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την προσθήκη χαλύβδινων ινών. Οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται σε μήτρες σκυροδέματος με σκοπό τη μείωση της θραυστότητας του υλικού και τη μερική αντιμετώπιση των προβλημάτων που εμφανίζονται λόγω του μηχανισμού ρηγμάτωσης. Η θετική επιρροή των ινών στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος πριν τη ρηγμάτωση δεν είναι σημαντική, αλλά τα οφέλη γίνονται προφανή όταν παρατηρήσουμε την συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση. Η βελτίωση των ιδιοτήτων του σύνθετου πλέον υλικού οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη συνάφειας μεταξύ της ίνας και του σκυροδέματος.

Πιο συγκεκριμένα, η συνάφεια που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών είναι ο παράγοντας που περιορίζει την εξάπλωση των ρωγμών στο σκυρόδεμα. Όταν μια ρωγμή δημιουργείται σε δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος, παρατηρούνται δύο φαινόμενα: η σταδιακή απώλεια συνάφειας στη διεπιφάνεια και η ολίσθηση της ίνας εγκάρσια στη ρωγμή. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν ως αποτέλεσμα την απορρόφηση μέρους της ενέργειας διάδοσης των ρωγμών. Η αντίσταση στην εξάπλωση των ρωγμών εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και της διεπιφάνειας, καθώς και από το μήκος, τον προσανατολισμό, την πυκνότητα κατ' όγκο και τη γεωμετρία των ινών [10].

Οι πρώτες χαλύβδινες ίνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία ινοπλισμένου σκυροδέματος ήταν ευθύγραμμες. Αναλυτικά μοντέλα αναπτύχθηκαν με σκοπό να εξηγηθεί η ευεργετική δράση τους. Η συμπεριφορά μιας ίνας κάθετης σε ρωγμή αποδείχτηκε πολύπλοκη. Μια ευθύγραμμη ίνα παράλληλη στη διεύθυνση της φόρτισης αναπτύσσει δυνάμεις συνάφειας στη διεπιφάνειά της με το σκυρόδεμα, ενώ κατά τη διάρκεια της εξόλκευσής της, εμφανίζεται και το φαινόμενο της τριβής .

Αργότερα, άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι χαλύβδινες ίνες με βελτιωμένο σχήμα. Οι ίνες αυτές θεωρείται πως έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με τις ευθύγραμμες. Τέτοιου είδους ίνες είναι οι ημικυκλικές, οι κυματοειδείς και οι ίνες με αγκιστροειδές άκρο (*Σχήμα 1.1*). Είναι προφανές ότι αυτές οι ίνες συμπεριφέρονται διαφορετικά από τις ευθύγραμμες λόγω του μηχανισμού αγκύρωσης που αναπτύσσεται, γεγονός που όμως κάνει το φαινόμενο ακόμη πιο περίπλοκο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Σχήμα 1.1: α) ημικυκλική ίνα, β) κυματοειδής ίνα, γ) ίνα με αγκιστροειδές άκρο

Δοκιμή εξόλκευσης

Το σκυρόδεμα και ο χάλυβας οπλισμού συχνά θεωρείται πως έχουν ξεχωριστή συνεισφορά στη συνολική δυσκαμψία και αντοχή μιας κατασκευής από σκυρόδεμα. Συνήθως, στις πρακτικές εφαρμογές γίνεται για λόγους απλοποίησης, η παραδοχή της συνέχειας των δύο υλικών. Παρ' όλα αυτά, στην πραγματικότητα, η συμπεριφορά τους είναι ανόμοια. Αυτή η έλλειψη συμβατότητας μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της συνάφειας, σε ολίσθηση των ράβδων χάλυβα, σε τοπικές παραμορφώσεις και ρηγματώσεις. Αν και στο παρελθόν έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τη μελέτη της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας σκυροδέματος – χάλυβα, δεν υπάρχει συμφωνία ως προς τη μέθοδο και το μοντέλο προσομοίωσης της συμπεριφοράς αυτής. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι οι μηχανισμοί της συνάφειας αλλά και της απώλειας συνάφειας που αναφέρονται τόσο στο χάλυβα όσο και στο σκυρόδεμα, δεν έχουν γίνει απόλυτα κατανοητοί. Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν έως τώρα επικεντρώθηκαν κυρίως στην αναγνώριση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Οι Lutz και Gergely [2] βρήκαν ότι η συνάφεια καθορίζεται από τρεις βασικές παραμέτρους: τη χημική σύμφυση, την τριβή και τη μηχανική αλληλεπίδραση. Η επιρροή των παραπάνω παραγόντων επιβεβαιώθηκε και από τις μελέτες των Rehm [3], Ferguson [1] και Stoker [4].

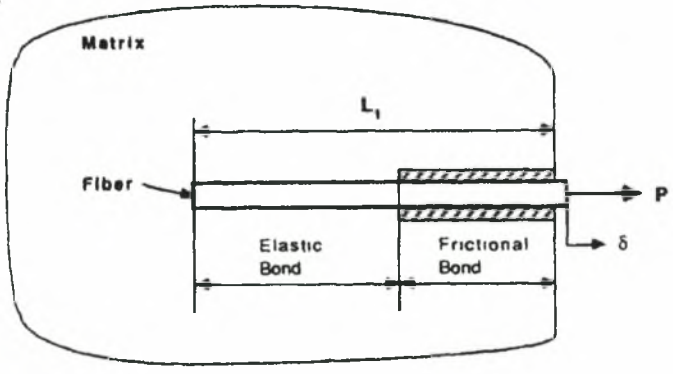
Για την πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας διεξάγονται δοκιμές γνωστές ως δοκιμές εξόλκευσης (pull-out tests). Σε αναλυτικές μελέτες έχουν χρησιμοποιηθεί ελαστικοί νόμοι συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, της μορφής $d\tau = G d\xi_\tau$, όπου το G συνδέει την τάση συνάφειας $d\tau$ με την αντίστοιχη ολίσθηση $d\xi_\tau$. Για μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση προτάθηκαν μη-γραμμικοί νόμοι με κλάδους που περιγράφουν διαφορετικά στάδια της συνολικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας κατά την εξέλιξη της εξόλκευσης [8].

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Περιγραφή του φαινομένου της δοκιμής εξόλκευσης

Στη δοκιμή εξόλκευσης μια χαλύβδινη ίνα τοποθετείται μέσα σε μια μήτρα σκυροδέματος και στη συνέχεια της επιβάλλεται εφελκυστική δύναμη μέχρι αυτή να ολισθήσει και να απομακρυνθεί από τη μήτρα (*Σχήμα 1.2*). Όπως έχει προαναφερθεί, η δοκιμή εξόλκευσης μιας ίνας από ένα δοκίμιο σκυροδέματος έχει σαν σκοπό το χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας των δύο σωμάτων. Επιπλέον, η δοκιμή αυτή είναι σημαντική γιατί μπορεί να προσομοιώσει το φαινόμενο της ΄΄γεφύρωσης΄΄ μιας ρωγμής καθώς η ίνα ολισθαίνει εγκάρσια σ' αυτή (bridging-pull-out phenomenon).

Για την προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης, αρχικά υιοθετείται ένας ελαστικός νόμος για την περιγραφή της συνάφειας μεταξύ της ίνας και του σκυροδέματος και προκύπτει ένα ελαστικό πεδίο διατμητικών τάσεων. Η απώλεια συνάφειας (ολίσθηση) συμβαίνει όταν η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται εξισωθεί με την τιμή της τάσης συνάφειας τ_s. Η διατμητική τάση στην περιοχή ολίσθησης προσδιορίζεται από την τάση τριβής τ_f. Τόσο η τ_s όσο και η τ_f θεωρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας της εξόλκευσης [6].

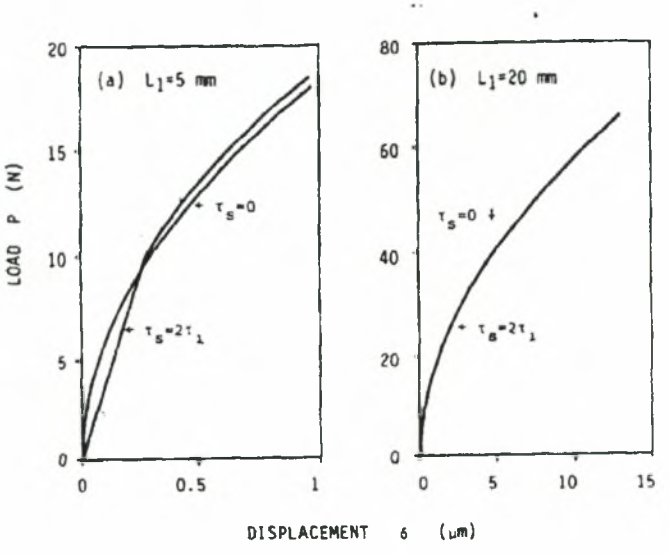


Σχήμα 1.2: σχηματική απεικόνιση της σταδιακής απώλειας συνάφειας κατά τη διάρκεια της δοκιμής εξόλκευσης μιας ίνας [6].

Έχει αποδειχθεί ότι και οι δύο προαναφερθείσες τάσεις τ_s και τ_f αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για την περιγραφή του φαινομένου [5, 9]. Παρ' όλα αυτά, η επιρροή της τάσης συνάφειας τ_s στη συνολική απόκριση θεωρείται πολλές φορές ασήμαντη. Κατά τη διάρκεια της απώλειας συνάφειας, η διατμητική τάση στην περιοχή που οι τάσεις διέπονται από ελαστικό νόμο, μειώνεται περίπου εκθετικά με την απόσταση, με μέγιστη τιμή ίση με την τ_s. Το μήκος του τμήματος της ίνας που επηρεάζεται από το ελαστικό πεδίο των τάσεων εξαρτάται, εκτός των άλλων και από το λόγο των μέτρων ελαστικότητας της ίνας και του σκυροδέματος E_f/E_m καθώς και από τη διατομή της ίνας. Για ίνες με μικρό μέτρο ελαστικότητας, ή ακόμα και για ίνες με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας αλλά με μεγάλο λόγο μήκους προς διάμετρο, το ελαστικό πεδίο τάσεων έχει μικρή επιρροή στη συνολική καμπύλη δύναμης – μετακίνησης. Το *Σχήμα 1.3* απεικονίζει ένα αριθμητικό παράδειγμα στο οποίο συγκρίνονται οι καμπύλες δύναμης – μετακίνησης για $\tau_s=2\tau_f$ και για $\tau_s=0$. Και στις δύο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

περιπτώσεις ισχύει E_f/E_m=10 ενώ το μήκος της ίνας διαφέρει. Μετά την ολοκληρωτική απώλεια συνάφειας, το πεδίο των ελαστικών τάσεων δεν έχει καμία επίδραση.



Σχήμα 1.3: επιρροή των ελαστικών τάσεων συνάφειας τ_s στο διάγραμμα δύναμης – μετακίνησης πριν την ολοκληρωτική απώλεια συνάφειας α) L_1=5mm, β) L_1=20mm (τ_f=2MPa, διάμετρος ίνας d_f=0.5mm, E_f=270GPa, E_m=27GPa, μέτρο διάτμησης σκυροδέματος G_m=11.3GPa, διατομή μήτρας A_m=200m^2)[6]

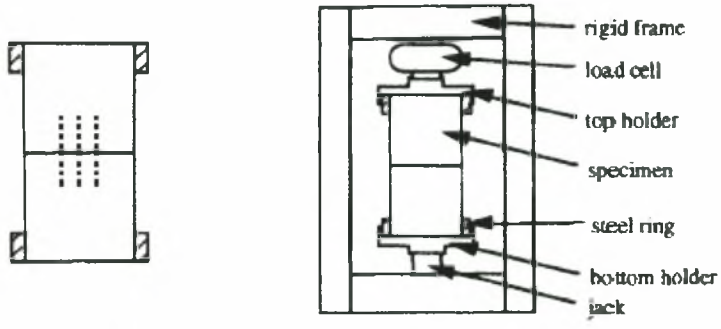
Η δοκιμή εξόλκευσης πειραματικά

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου της εξόλκευσης μιας χαλύβδινης ίνας από μια μήτρα σκυροδέματος, η μελέτη του μέσω αναλυτικών μεθόδων καθίσταται αρκετά δύσκολη. Έτσι, είναι λίγα τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης, ειδικά για τις μη ευθύγραμμες ίνες, που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα και που μπορούν να μας δώσουν επαρκείς πληροφορίες για την εις βάθος κατανόηση του φαινομένου. Αντίθετα, η πειραματική προσέγγιση του φαινομένου της εξόλκευσης με σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς κυρίως της διεπιφάνειας σκυροδέματος και χάλυβα, είναι πιο διαδεδομένη. Στη βιβλιογραφία υπάρχει ένας αρκετά μεγάλος αριθμός πειραματικών τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό, καθώς και τα αποτελέσματα των αντίστοιχων δοκιμών εξόλκευσης. Στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη αναφορά σε κάποια αντιπροσωπευτικά πειραματικά αποτελέσματα.

Οι Chanvillard και Aïtcint [7] παρουσίασαν ένα εκτενές πειραματικό πρόγραμμα για την επιρροή του μήκους της ίνας, του προσανατολισμού της σε σχέση με τη διεύθυνση της ρωγμής και του λόγου w/c (water/cement) της μήτρας, στη περίπτωση εξόλκευσης μιας κυματοειδούς ίνας. Στο *Σχήμα 1.4* φαίνεται το δείγμα και η πειραματική συσκευή που χρησιμοποίησαν. Κάθε δείγμα περιείχε τρεις ίνες με το ίδιο μήκος και τον ίδιο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

προσανατολισμό. Για κάθε δείγμα έγινε αυτόματη καταγραφή του φορτίου και της μέσης τιμής των μετακινήσεων των τριών ινών.



Σχήμα 1.4: a) δείγμα δοκιμής εξόλκευσης, b) πειραματική συσκευή [7]

Η επιρροή του παράγοντα του μήκους της ίνας μελετήθηκε μέσω της χρήσης ινών ενός, δύο και τριών κυμάτων. Η δεύτερη προς εξέταση παράμετρος ήταν ο λόγος w/c που πήρε τις τιμές: 0.30, 0.50 και 0.70. Μάλιστα, όσο πιο μεγάλος είναι ο λόγος αυτός, τόσο ασθενέστερο είναι το σκυρόδεμα. Τέλος, θεωρήθηκαν δύο προσανατολισμοί για τις ίνες: κάθετα στο επίπεδο ρηγμάτωσης και σε γωνία 45° ως προς αυτό.

Δύο τύποι αστοχίας παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων: είτε έγινε αστοχία της διεπιφάνειας με αποτέλεσμα την απώλεια συνάφειας και την ολίσθηση των ινών μέχρι την πλήρη εξόλκευσή τους, είτε αστόχησαν οι ίδιες οι ίνες σπάζοντας πριν εξολκευθούν. Ο πίνακας 1.1 δείχνει συγκεντρωτικά τα ποσοστά των ινών που εξολκεύτηκαν πλήρως από τη μήτρα σκυροδέματος.

Πίνακας 1.1: Ποσοστά ινών που εξολκεύονται από τη μήτρα σκυροδέματος

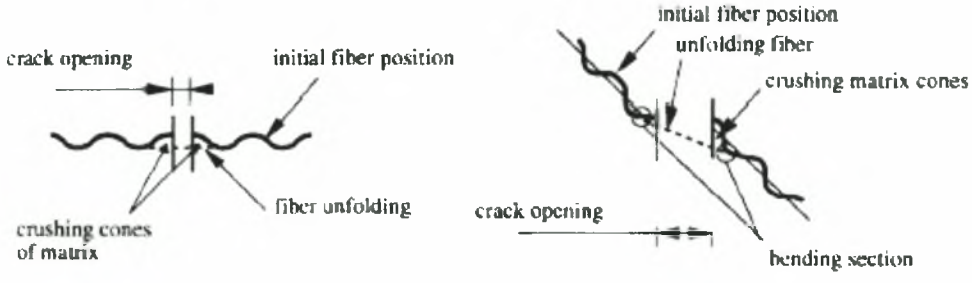
	γωνία 45°			γωνία 90°		
w/c	ένας κυματισμός	δύο κυματισμοί	τρεις κυματισμοί	ένας κυματισμός	δύο κυματισμοί	τρεις κυματισμοί
0.3	100%	100%	50%	100%	83%	8%
0.5	100%	100%	75%	100%	100%	8%
0.7	100%	100%	83%	100%	100%	25%

Όταν οι ίνες είχαν έναν ή δύο κυματισμούς εκατέρωθεν της ρωγμής, εξολκεύθηκαν πλήρως σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα από το λόγο w/c. Αντιθέτως, όταν οι ίνες είχαν τρεις κυματισμούς, το μεγαλύτερο ποσοστό τους αστόχησε πριν την εξόλκευση και ιδιαίτερα όταν είχαν προσανατολισμό 90°. Οι περισσότερες ίνες με προσανατολισμό 45° εξολκεύτηκαν πλήρως, κυρίως από τη μήτρα με το ασθενέστερο σκυρόδεμα, ενώ μόνο οι μισές από αυτές εξολκεύτηκαν από το ισχυρό σκυρόδεμα.

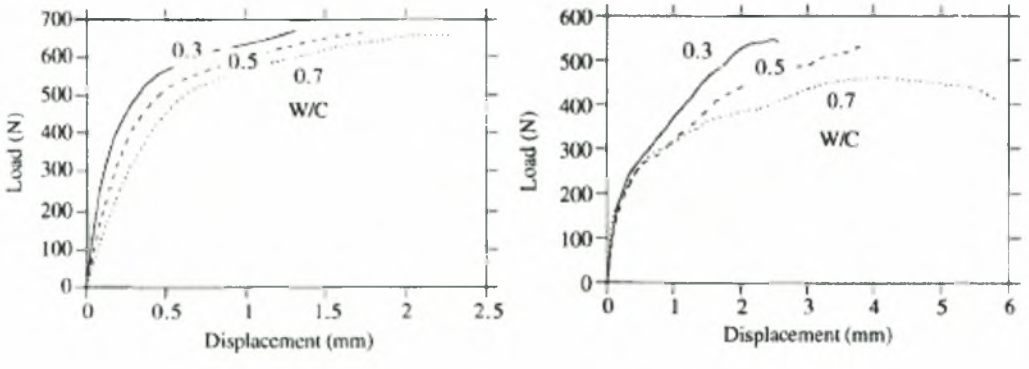
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Η μετακίνηση που μετρήθηκε στο σημείο αστοχίας της ίνας (*Σχήμα 1.6*) αυξάνεται με την αύξηση του λόγου w/c. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το μέγεθος του κώνου του σκυροδέματος που καταστρέφεται εκατέρωθεν της ρωγμής τη στιγμή της αστοχίας (*Σχήμα 1.5*). Όσο ασθενέστερο είναι το σκυρόδεμα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του κώνου σκυροδέματος κι έτσι η τοπική ευθυγράμμιση της ίνας είναι μεγαλύτερη. Η μετακινήσεις που μετρήθηκαν στο σημείο αστοχίας αντιστοιχούν στο άθροισμα της ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης της ίνας και της τοπικής επιμήκυνσής της.

Τέλος στο *Σχήμα 1.7a* φαίνονται οι καμπύλες δύναμης μετακίνησης για ίνες με προσανατολισμό 90° και σκυρόδεμα με w/c=0.7, στο *Σχήμα 1.7b* οι αντίστοιχες καμπύλες για ίνες με προσανατολισμό 90° και τρεις κυματισμούς και στο *Σχήμα 1.7c* για ίνες με δύο κυματισμούς και μήτρα σκυροδέματος με w/c=0.5.

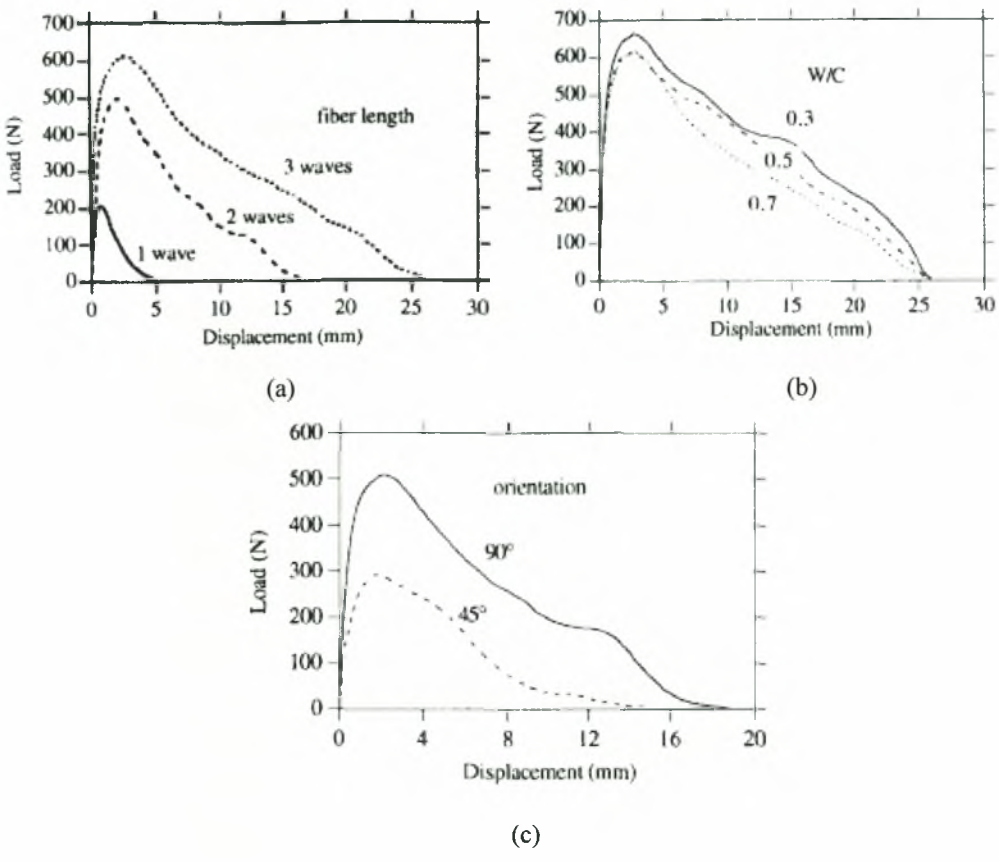


Σχήμα 1.5: a) προσανατολισμός ίνας 90° , b) προσανατολισμός ίνας 45°



Σχήμα 1.6: Καμπύλες Δύναμης – Μετακίνησης για περίπτωση αστοχίας της ίνας a) προσανατολισμός 90°, ίνα με τρεις κυματισμούς, b) προσανατολισμός 45°, ίνα με τρεις κυματισμούς

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 1.7: Καμπύλες Δύναμης – Μετακίνησης για αστοχία της διεπιφάνειας

Μη-γραμμικότητα

Όλες οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας βασίστηκαν στη μέθοδο της μη-γραμμικής ανάλυσης, στο πρόγραμμα λογισμικού Marc. Η χρήση ενός προγράμματος μη-γραμμικής ανάλυσης κρίθηκε απαραίτητη για την αντιμετώπιση της μη-γραμμικότητας του προβλήματος.

Ο όρος μη γραμμικότητα υποδηλώνει την κατάσταση εκείνη κατά την οποία οι σχέσεις μεταξύ της εξωτερικής φόρτισης και των μετακινήσεων ενός φορέα παύουν να είναι γραμμικές. Τα αίτια στα οποία οφείλεται η μη γραμμική συμπεριφορά ενός φορέα μπορούν να καταταχθούν στις παρακάτω κύριες κατηγορίες:

- *Καταστατικές εξισώσεις.* Η μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού, δηλαδή η μη γραμμική σχέση τάσεων – παραμορφώσεων είναι μια συνήθης αιτία μη γραμμικής συμπεριφοράς ενός φορέα. Και τούτο συμβαίνει γιατί στην πραγματικότητα, για τα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

περισσότερα υλικά, μετά από ένα μικρό διάστημα γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς επέρχεται πλαστικοποίηση ή ακόμα και θραύση.

- *Συνοριακές συνθήκες.* Στις περιπτώσεις εκείνες που οι συνοριακές συνθήκες μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης του φορέα έχουμε μη γραμμική συμπεριφορά. Αυτή η μη γραμμικότητα έγκειται στο γεγονός ότι κάποια επαφή του φορέα με άλλα στοιχεία επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του. Το ίδιο ισχύει και όταν συμβαίνει απώλεια της επαφής που μπορεί αρχικά να έχει ο φορέας με κάποιο άλλο στοιχείο.
- *Εξισώσεις ισορροπίας και εξισώσεις συμβιβαστού.* Όταν θεωρήσουμε πως οι μετακινήσεις, δηλαδή οι μετατοπίσεις και οι στροφές του φορέα είναι μεγάλες τότε οδηγούμαστε σε μη γραμμικές εξισώσεις ισορροπίας και άρα σε μη γραμμικότητα του προβλήματος. Μη γραμμική συμπεριφορά εμφανίζεται επίσης, όταν για τον φορέα η σχέση μεταξύ των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων είναι και αυτή μη γραμμική. Στις παραπάνω δύο περιπτώσεις μιλάμε για γεωμετρική μη γραμμικότητα. Τα γεωμετρικά μη γραμμικά προβλήματα μπορούν να διαχωριστούν στα εξής:

a) Μεγάλες μετακινήσεις – μικρές στροφές – μικρές παραμορφώσεις,
b) Μεγάλες μετακινήσεις – μεγάλες στροφές – μικρές παραμορφώσεις και
c) Μεγάλες μετακινήσεις – μεγάλες στροφές – μεγάλες παραμορφώσεις.

Στο πρόβλημα που μελετήθηκε η μη-γραμμικότητα έγκειται στη μη-γραμμική συμπεριφορά των υλικών, αφού έχει θεωρηθεί ελαστοπλαστική συμπεριφορά τόσο στο χάλυβα όσο και στο σκυρόδεμα. Ένας ακόμη λόγος ύπαρξης μη-γραμμικότητας είναι η σχετική μετακίνηση των δύο σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή (ίνα και μήτρα σκυροδέματος), γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά τους. Επομένως, το πρόβλημα εντάσσεται στις εξής κατηγορίες μη-γραμμικότητας: *Καταστατικές εξισώσεις* και *Συνοριακές συνθήκες.*

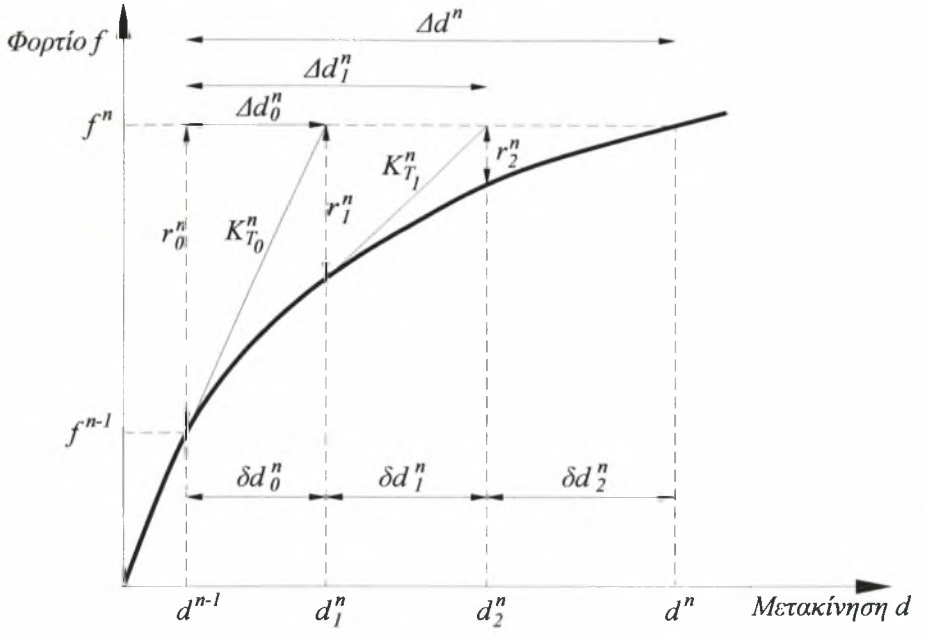
Μέθοδος μη-γραμμικής ανάλυσης

Λόγω της μη-γραμμικότητας των εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα χρησιμοποιείται μια διαδικασία επαυξητικής μορφής για την επίλυσή τους. Η εξωτερική φόρτιση επιβάλλεται με τη μορφή ‘επαυξήσεων του φορτίου’ οι οποίες είναι αρκετά μικρές, έτσι ώστε η συμπεριφορά του μοντέλου να θεωρείται γραμμική μέσα σε κάθε βήμα επαύξησης. Επιπλέον, για να βελτιωθεί η ακρίβεια της μεθόδου ανάλυσης, συνδυάζεται με μια επαναληπτική διαδικασία. Έτσι, εκτελούνται επαναλήψεις τύπου Newton – Raphson σε κάθε επαύξηση (*Σχήμα 1.4*), ώστε να απαλειφθούν οι παρασιτικές δυνάμεις. Χρησιμοποιείται λοιπόν, μια επαυξητική – επαναληπτική μέθοδος.

Προκειμένου να εξακριβωθεί το κατά πόσο η τρέχουσα λύση βρίσκεται κοντά στην ακριβή λύση του προβλήματος, κάθε επαναληπτικό σχήμα πρέπει να εφαρμοστεί σε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

συνδυασμό με κάποιο τύπο κριτηρίου σύγκλισης. Γενικά στη μη-γραμμική ανάλυση, τα κριτήρια σύγκλισης αφορούν μετακινήσεις, παρασιτικές δυνάμεις ή συνδυασμό των δύο. Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε το κριτήριο των παρασιτικών δυνάμεων, καθώς είναι πιο αξιόπιστο αφού ελέγχει το κατά πόσο ικανοποιείται η ισορροπία στο τρέχον βήμα επαύξησης του φορτίου.



Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου Newton – Raphson

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Εισαγωγή

Πριν ξεκινήσει το κύριο μέρος της παρούσας εργασίας, θεωρήθηκε αναγκαίο να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του τρόπου προσομοίωσης που θα ακολουθούσαμε στο πρόγραμμα μη γραμμικής ανάλυσης Marc. Έτσι, επιλέχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων από άρθρο της βιβλιογραφίας [8] το οποίο, στη συνέχεια, προσομοιώσαμε στο Marc με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του άρθρου.

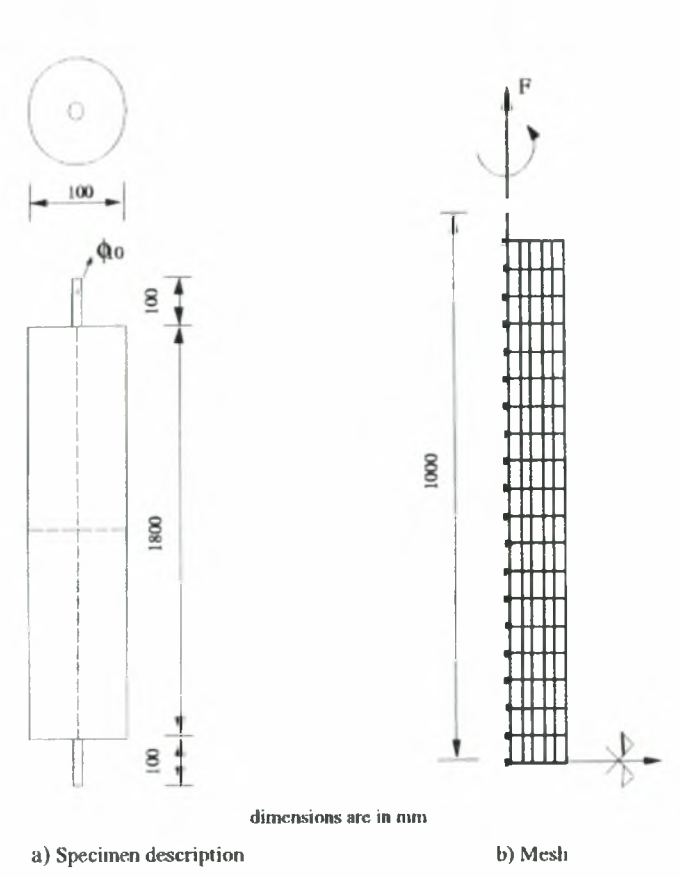
2.1 Περιγραφή του μοντέλου της βιβλιογραφίας

Το μοντέλο, όπως περιγράφεται στο άρθρο της βιβλιογραφίας [8], αποτελείται από μία κεντρική ράβδο η οποία προεξέχει από μία κυλινδρική μήτρα σκυροδέματος. Η διάμετρος του δοκιμίου και της ράβδου είναι 100 και 10mm αντίστοιχα. Στο *Σχήμα 2.1.1* φαίνεται η διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία μαζί με τις συνοριακές συνθήκες (έχει ληφθεί υπ' όψιν η συμμετρία ως προς τους άξονες x και y). Το σκυρόδεμα έχει προσομοιωθεί από το συγγραφέα του άρθρου, με ορθογωνικά πεπερασμένα στοιχεία οχτώ κόμβων ενώ αντίστοιχα για την κοινή προσομοίωση του χάλυβα και της διεπιφάνειας έχουν χρησιμοποιηθεί στοιχεία πλαισίου (truss elements) τριών κόμβων με μη-παγιωμένους μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας. Στο ελεύθερο άκρο της ράβδου έχει εφαρμοστεί επιβεβλημένη μετακίνηση ίση με 0.01m. Η μετακίνηση αυτή επιβάλλεται σταδιακά σε 50 βήματα φόρτισης. Για την ανάλυση έχει χρησιμοποιηθεί ελαστικός νόμος για το σκυρόδεμα και ελαστοπλαστικός νόμος για τη διεπιφάνεια, του οποίου ο πλαστικός κλάδος είναι ανιών, φθίνων ή απόλυτα οριζόντιος. Στον *Πίνακα 2.1.1* αναφέρονται όλες οι ιδιότητες των υλικών.

Πίνακας 2.1.1: Ιδιότητες υλικών

Χαρακτηριστικά υλικών	**Τιμές**
Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (f_{cc})	25 MPa
Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (f_{ct})	2.25 MPa
Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος E_c	36.5 GPa
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα E_s	210 GPa
Λόγος Poisson	0.2
Αντοχή διεπιφάνειας	2.6 MPa
Μέτρο ελαστικότητας διεπιφάνειας G	2100 MPa/m
Κλίση πλαστικού κλάδου διεπιφάνειας H	500 MPa/m

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 2.1.1: περιγραφή μοντέλου του άρθρου της βιβλιογραφίας [8]

2.2 Περιγραφή δισδιάστατου συγκριτικού μοντέλου

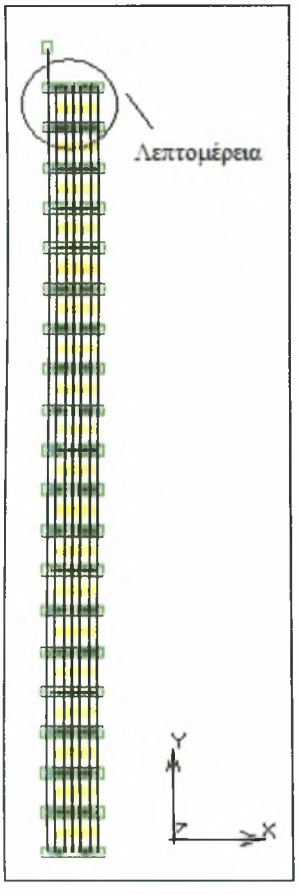
Για το δισδιάστατο μοντέλο που αναπτύχθηκε με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, διατηρήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου της βιβλιογραφίας. Και αυτή τη φορά, για απλοποίηση, λήφθηκε υπ' όψιν η συμμετρία ως προς τους άξονες x και y. Μετά τη διακριτοποίηση το μοντέλο έχει τη μορφή του *Σχήματος 2.2.1α*. Για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν αξονοσυμμετρικά πεπερασμένα στοιχεία με γεωμετρικές ιδιότητες στερεού, τεσσάρων κόμβων ενώ για τη ράβδο χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία ευθύγραμμης δοκού, δύο κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, για το σκυρόδεμα επιλέχθηκε ο τύπος 10 (*Σχήμα 2.2.2α*) της βιβλιοθήκης των πεπερασμένων στοιχείων του Marc. Τα στοιχεία αυτά είναι ισοπαραμετρικά, τυχαίας γεωμετρίας τετράπλευρα, κατάλληλα για αξονοσυμμετρικές εφαρμογές. Οι παραμορφώσεις τείνουν να είναι σταθερές σε όλο το στοιχείο, καθώς αυτό χρησιμοποιεί διγραμμικές εξισώσεις παρεμβολής. Η δυσκαμψία του υπολογίζεται από ολοκλήρωση κατά Gauss τεσσάρων σημείων. Το στοιχείο έχει δύο βαθμούς ελευθερίας: 1=u (μετατόπιση κατά τον καθολικό άξονα συντεταγμένων z), 2=v (μετατόπιση κατά τον καθολικό άξονα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

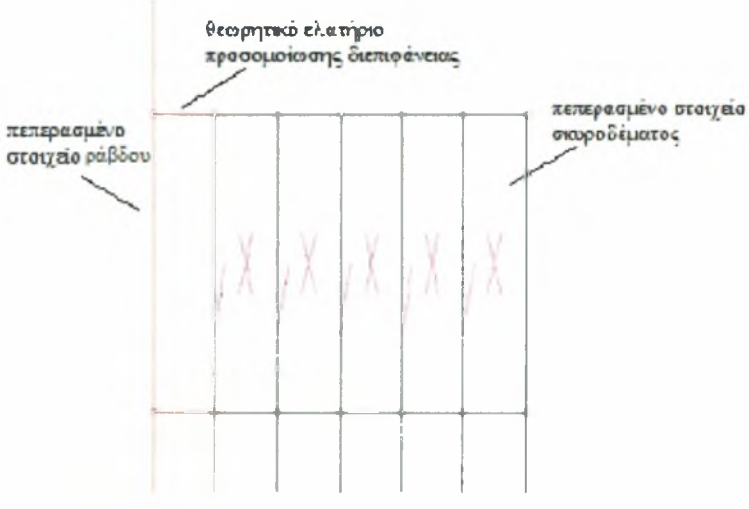
συντεταγμένων r). Αντίστοιχα, για το χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν τα πεπερασμένα στοιχεία τύπου 5 (*Σχήμα 2.2.2b*) που είναι ευθύγραμμα, ορθογωνικής διατομής και χρησιμοποιούν εξισώσεις γραμμικής παρεμβολής κατά το μήκος τους και κυβικής παρεμβολής στη διεύθυνση κάθετα στον άξονά τους. Τα στοιχεία έχουν, σε καθέναν από τους δύο κόμβους, τρεις βαθμούς ελευθερίας: 1=u (μετατόπιση κατά τον καθολικό άξονα συντεταγμένων z), 2=v (μετατόπιση κατά τον καθολικό άξονα συντεταγμένων r), 3=στροφή περί τον άξονα. Η δυσκαμψία τους μορφώνεται μέσω ολοκλήρωσης τριών σημείων κατά Gauss, κατά μήκος του άξονα τους. Τέλος, όλες οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν στα στοιχεία αυτού του τύπου.

Η προσομοίωση της διεπιφάνειας έγινε με την τοποθέτηση ελατηρίων μεταξύ των κόμβων της ράβδου και των αντίστοιχων κόμβων του σκυροδέματος και τα οποία δεσμεύουν τους εκάστοτε κατακόρυφους βαθμούς ελευθερίας (*Σχήμα 2.2.1b*). Το μήκος των ελατηρίων και κατά συνέπεια και η απόσταση μεταξύ των σωμάτων είναι θεωρητική και υφίσταται μόνο για λόγους εισαγωγής του μοντέλου στο πρόγραμμα. Οι ιδιότητες της διεπιφάνειας προσομοιώνονται μέσω του νόμου των ελατηρίων. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ελαστοπλαστικός νόμος με πλαστικό κλάδο, είτε σταθερό, είτε ανιόντα, είτε φθίνοντα. Τόσο ο χάλυβας όσο και το σκυρόδεμα θεωρούνται ελαστικά υλικά και μάλιστα με τιμές ίσες με εκείνες του παραδείγματος της βιβλιογραφίας.

Στη συνέχεια, δεσμεύτηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας των κάτω κόμβων των δύο σωμάτων και ασκήθηκε στο προεξέχον τμήμα της ράβδου επιβεβλημένη μετακίνηση με φορά προς τα πάνω, ίση με αυτή του παραδείγματος. Η επιβολή αυτή έγινε σταδιακά σε 50 βήματα φόρτισης.

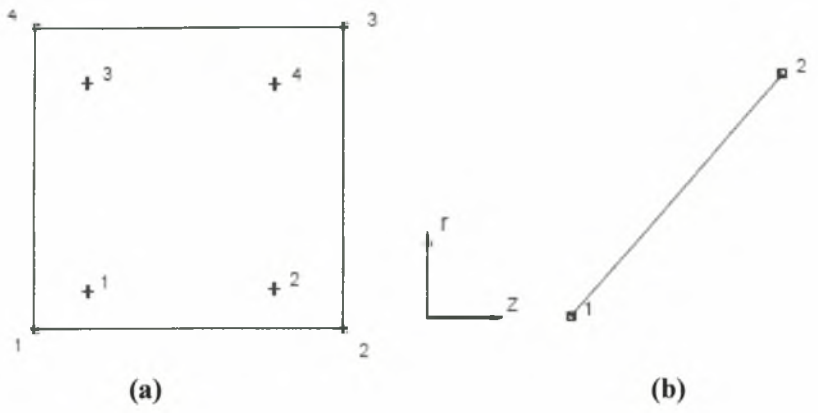


Σχήμα 2.2.1 (a): το δισδιάστατο μοντέλο μετά τη διακριτοποίηση



Σχήμα 2.2.1 (b): Λεπτομέρεια των ελατηρίων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 2.2.2: a) πεπερασμένο στοιχείο τύπου 10, b) πεπερασμένο στοιχείο τύπου 5

2.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

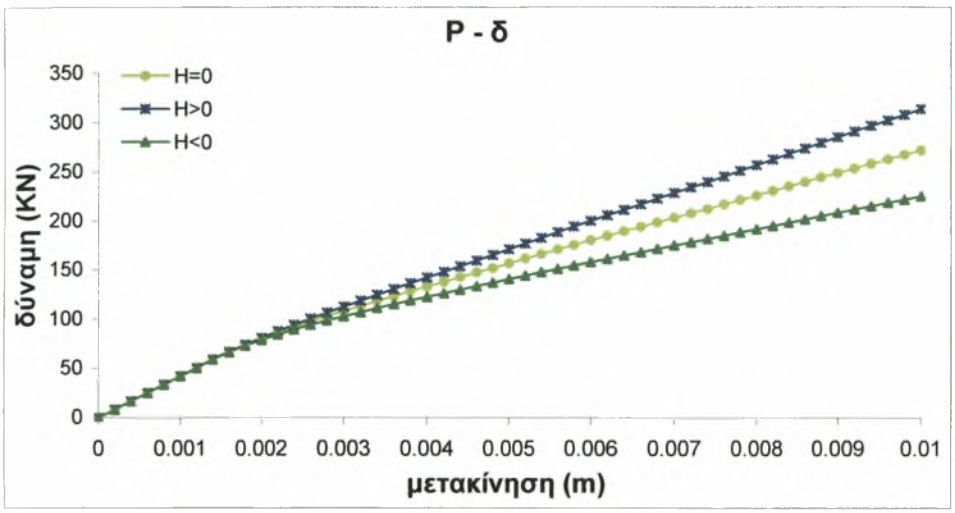
Με στόχο την σύγκριση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων της ανάλυσής μας δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα του *Σχήματος 2.3.2*. Στα διαγράμματα αυτά, εμφανίζεται η αντίδραση του ελατηρίου κάθε κόμβου της ράβδου σε σχέση με τη θέση του κατά μήκος αυτής, για συγκεκριμένα βήματα φόρτισης. Καθώς τα ελατήρια προσομοιώνουν τη διεπιφάνεια χάλυβα – σκυροδέματος, ανάγοντας τις αντιδράσεις των ελατηρίων σε τάσεις, προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές της τάσης συνάφειας κατά μήκος της ράβδου (*Σχήμα 2.3.3*). Κάθε φορά, η τιμή μηδέν του άξονα x αντιπροσωπεύει το σημείο πακτωσης της ράβδου ενώ η τιμή 0.9 αντιστοιχεί στη θέση του πρώτου ελατηρίου, πολύ κοντά στο σημείο που ασκείται η επιβεβλημένη μετακίνηση. Η διαφοροποίηση των διαγραμμάτων του *Σχήματος 2.3.2* έγκειται στο γεγονός ότι υιοθετήθηκαν τρεις διαφορετικοί νόμοι συμπεριφοράς για τη διεπιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 2.3.2a έχει θεωρηθεί ελαστοπλαστικός νόμος για τα ελατήρια, στο 2.3.2b ο νόμος που χρησιμοποιείται είναι ελαστοπλαστικός με ανιόντα πλαστικό κλάδο, ενώ στο 2.3.2c ο πλαστικός κλάδος είναι φθίνων. Τα αντίστοιχα ισχύουν για τα διαγράμματα 2.3.3a, b, c.

Ο νόμος που διέπει τη συμπεριφορά των ελατηρίων είναι καθοριστικός για τη μορφή της κατανομής των τάσεων συνάφειας κατά μήκος της ράβδου, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα. Η ύπαρξη οριζόντιου κλάδου (ή αντίστοιχα ανιόντα και φθίνοντα) στα διαγράμματα αποδεικνύει την πλαστικοποίηση της διεπιφάνειας. Παρατηρώντας τα διαγράμματα προκύπτει πως η πλαστικοποίηση ξεκινάει από το σημείο επιβολής της μετακίνησης και εξελίσσεται κατά μήκος της ράβδου προς το σημείο πάκτωσης, με την αύξηση των βημάτων φόρτισης. Επίσης, το γεγονός ότι εμφανίζονται μεγάλες τιμές της τάσης συνάφειας σε σημαντικό ποσοστό του μήκους της ράβδου, δείχνει πως μεταφέρεται μέσω της διεπιφάνειας, αρκετά μεγάλη δύναμη από το χάλυβα στο σκυρόδεμα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

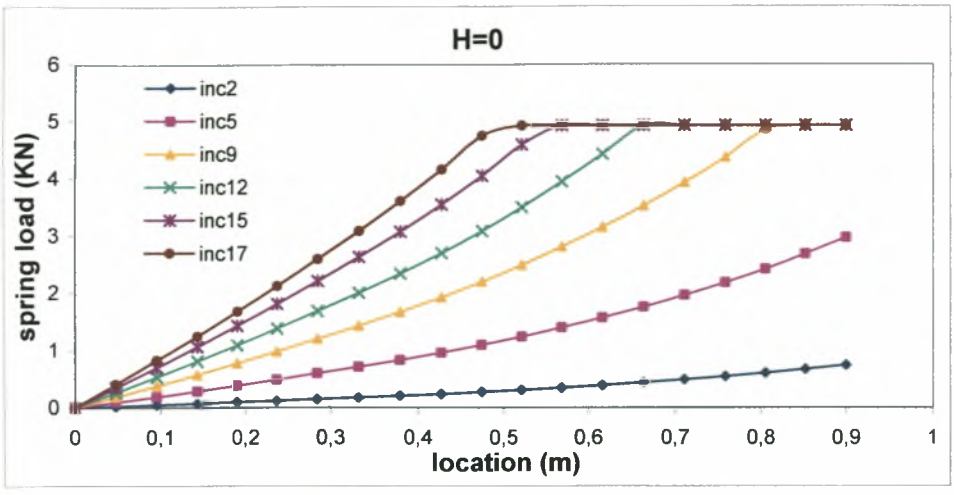
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 2.3.3a, b, c με τα αντίστοιχα 2.3.4a, b, c του παραδείγματος της βιβλιογραφίας βρέθηκε απόλυτη ταύτιση τόσο στη μορφή των διαγραμμάτων όσο και στις τιμές τους, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα των αποτελεσμάτων και άρα του μοντέλου προσομοίωσης.

Στη συνέχεια, παρατίθενται και τα συνολικά διαγράμματα δύναμης – μετακίνησης για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, όπως προέκυψαν από την ανάλυση (*Σχήμα 2.3.1*).

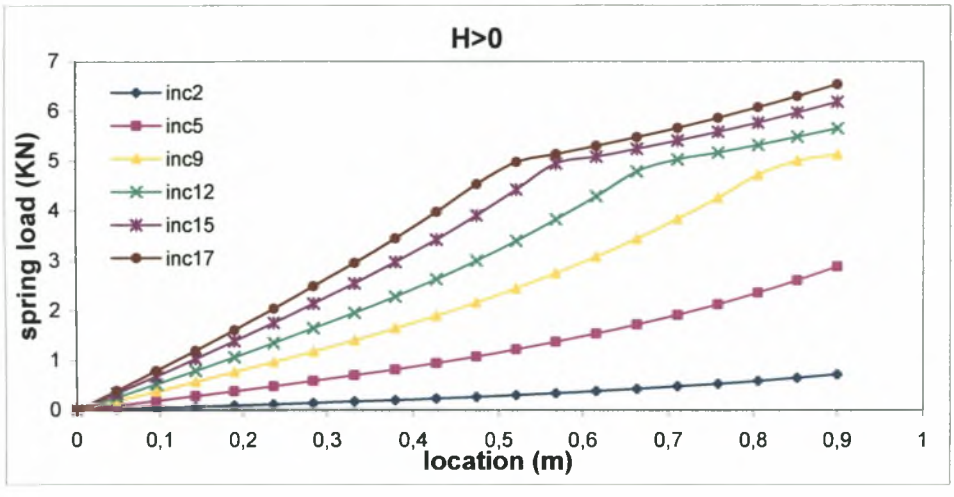


Σχήμα 2.3.1: Καμπύλες δύναμης - μετακίνησης

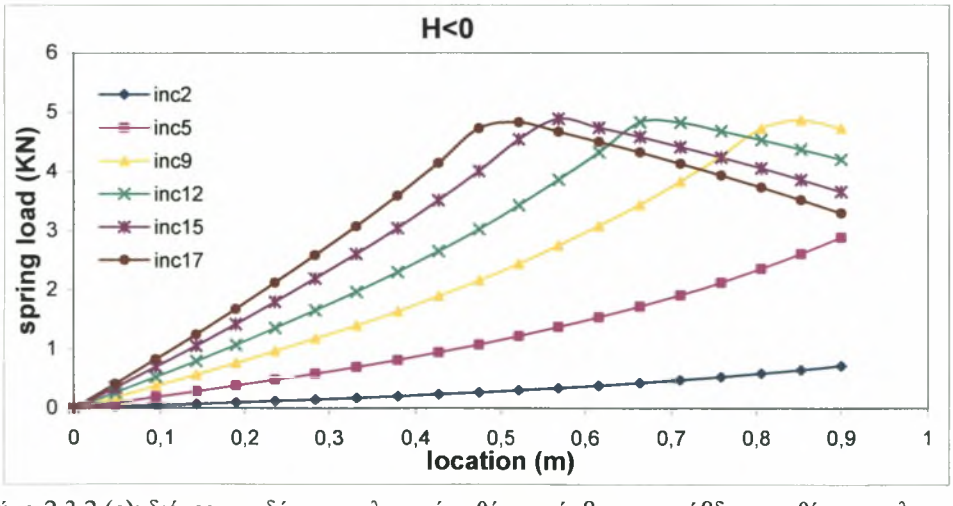
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 2.3.2 (a): διάγραμμα δύναμης ελατηρίου-θέσης κόμβου στη ράβδο για οριζόντιο πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων

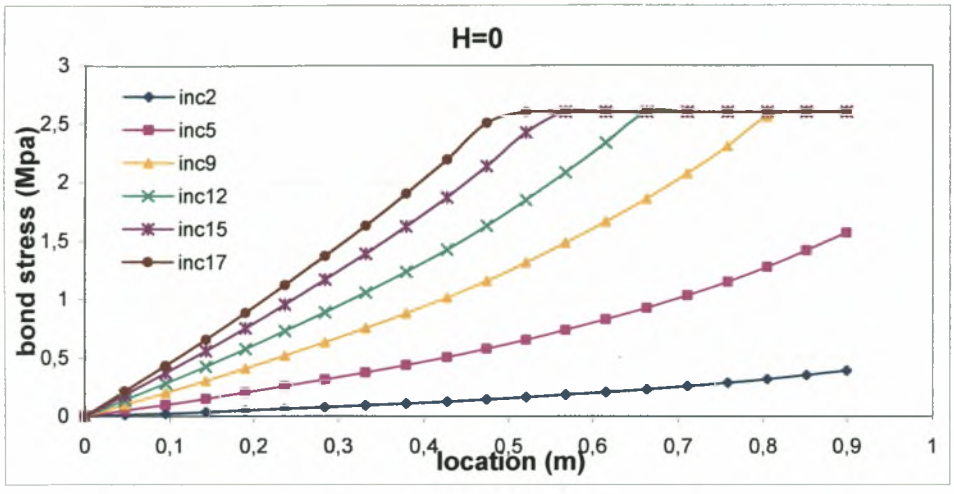


Σχήμα 2.3.2 (b): διάγραμμα δύναμης ελατηρίου-θέσης κόμβου στη ράβδο για ανιόντα πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων

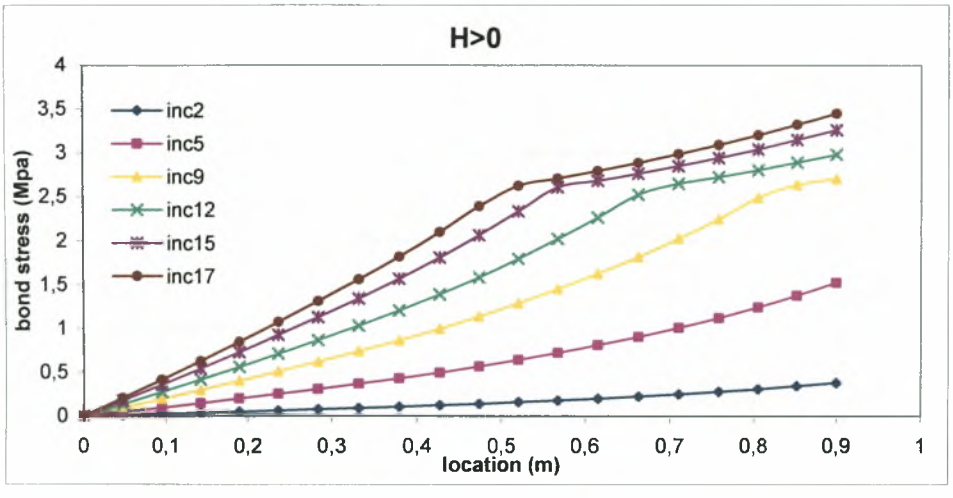


Σχήμα 2.3.2 (c): διάγραμμα δύναμης ελατηρίου-θέσης κόμβου στη ράβδο για φθίνοντα πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων

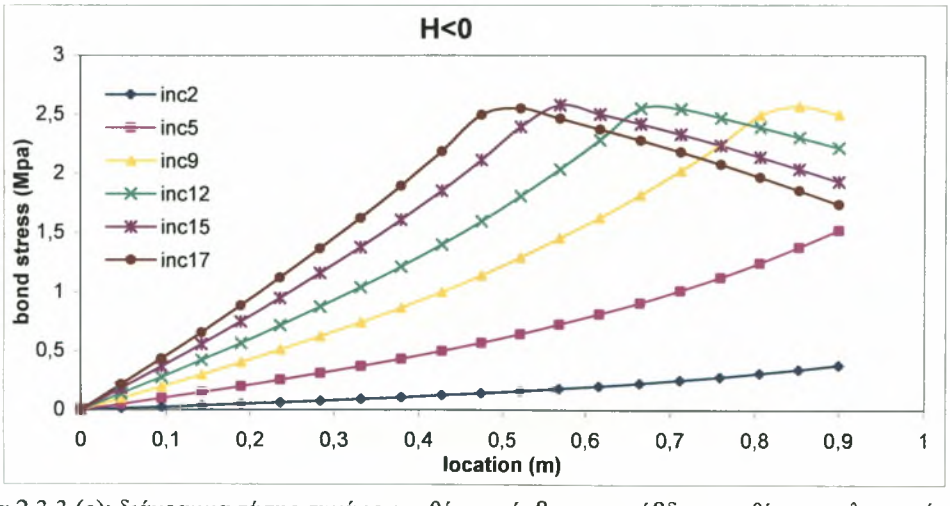
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 2.3.3 (a): διάγραμμα τάσης συνάφειας -θέσης κόμβου στη ράβδο για οριζόντιο πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων

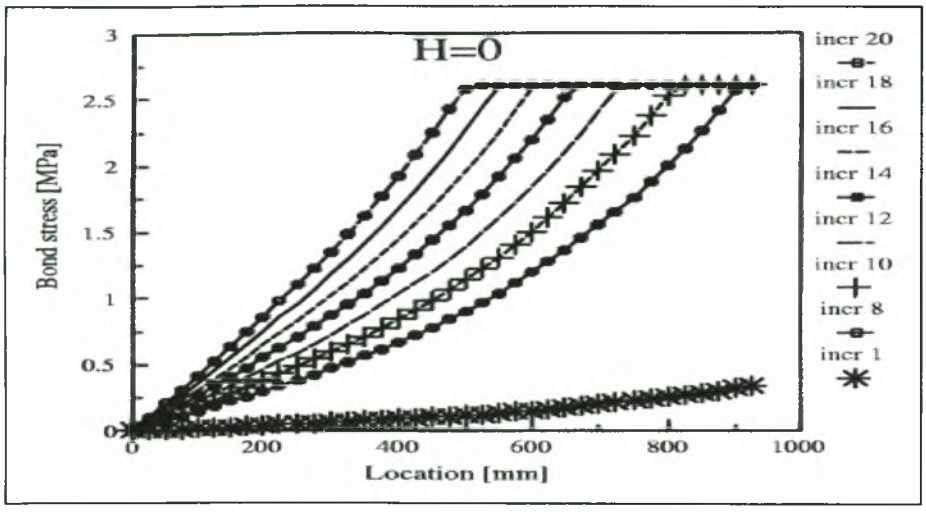


Σχήμα 2.3.3 (b): διάγραμμα τάσης συνάφειας -θέσης κόμβου στη ράβδο για ανιόντα πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων

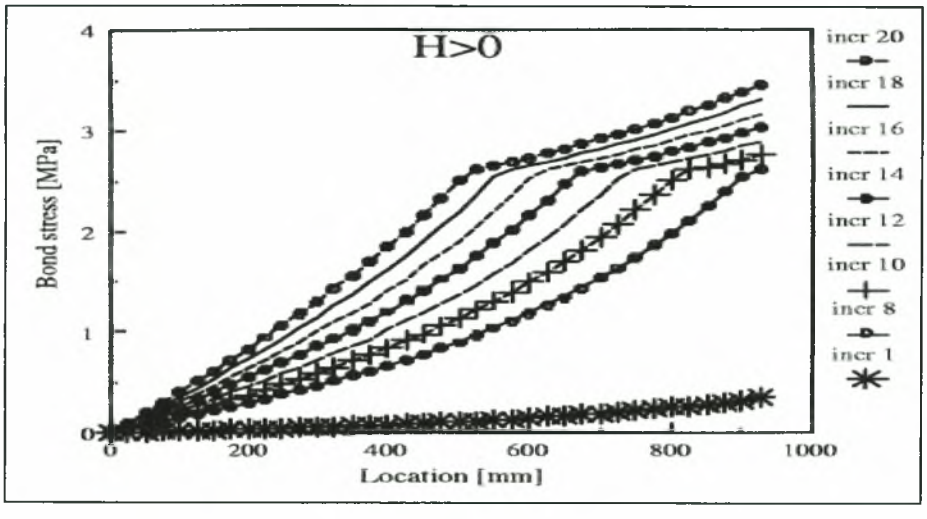


Σχήμα 2.3.3 (c): διάγραμμα τάσης συνάφειας -θέσης κόμβου στη ράβδο για φθίνοντα πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων

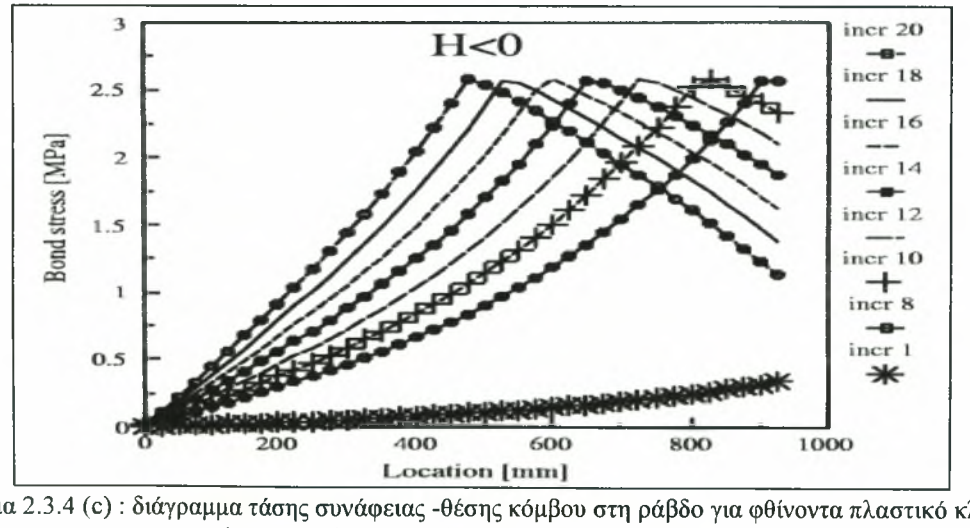
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 2.3.4 (a): διάγραμμα τάσης συνάφειας -θέσης κόμβου στη ράβδο για οριζόντιο πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων (αποτελέσματα βιβλιογραφίας [8])



Σχήμα 2.3.4 (b) : διάγραμμα τάσης συνάφειας -θέσης κόμβου στη ράβδο για ανιόντα πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων (αποτελέσματα βιβλιογραφίας [8])

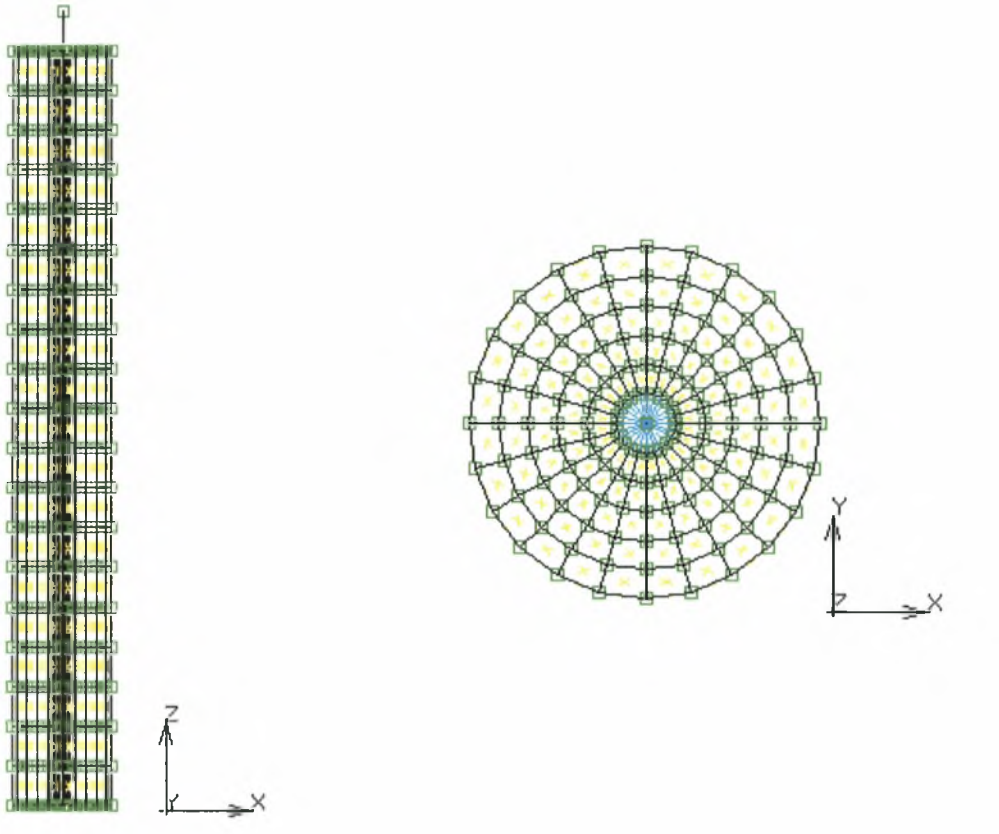


Σχήμα 2.3.4 (c) : διάγραμμα τάσης συνάφειας -θέσης κόμβου στη ράβδο για φθίνοντα πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων (αποτελέσματα βιβλιογραφίας [8])

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

2.4 Περιγραφή τρισδιάστατου συγκριτικού μοντέλου και σύγκριση αποτελεσμάτων

Με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθότητας της τρισδιάστατης μοντελοποίησης στο πρόγραμμα μη-γραμμικής ανάλυσης Marc, δημιουργήθηκε και ένα τρισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο με τα γενικότερα χαρακτηριστικά του μοντέλου του παραδείγματος της βιβλιογραφίας. Μετά τη διακριτοποίηση το τρισδιάστατο μοντέλο έχει τη μορφή του *Σχήματος 2.4.1*.



Σχήμα 2.4.1: Τρισδιάστατο μοντέλο σε όψη και κάτοψη

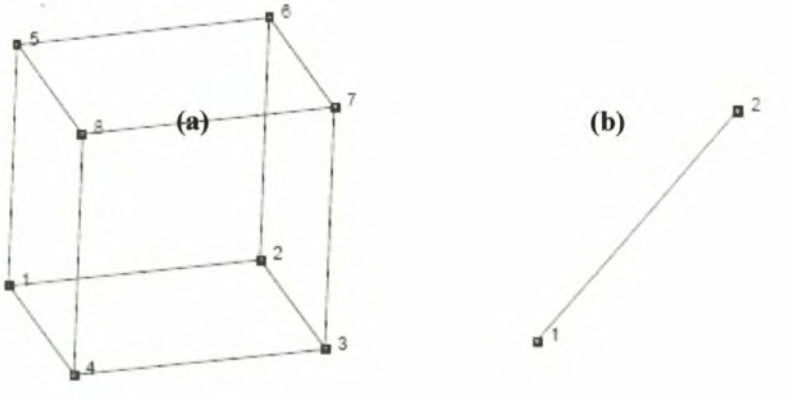
Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου αυτού μοντέλου παρέμειναν ίδια μ' εκείνα του δισδιάστατου, ενώ αυτή τη φορά θεωρήθηκε συμμετρία μόνο ως προς το επίπεδο x-y. Για την απόδοση των συνθηκών συμμετρίας δεσμεύτηκαν όλες οι μετακινήσεις και οι στροφές των κάτω κόμβων. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του σκυροδέματος είναι τρισδιάστατα εξάεδρα στοιχεία στερεού, οχτώ κόμβων και για την προσομοίωση της χαλύβδινης ράβδου, τρισδιάστατα γραμμικά στοιχεία πλαισίου δύο κόμβων στα οποία δόθηκε τιμή εμβαδού ίση με 7.85e-5 m^2. Η διακριτοποίηση τόσο του χάλυβα όσο και του σκυροδέματος έγινε ανά 0.05m περίπου, καθ' ύψος. Πιο αναλυτικά, για την προσομοίωση του σκυροδέματος επιλέχθηκαν τα πεπερασμένα στοιχεία τύπου 7 (*Σχήμα 2.4.2α*), τα οποία είναι ισοπαραμετρικά, τυχαίας γεωμετρίας εξάεδρα. Καθώς το στοιχείο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

τύπου 7 χρησιμοποιεί τριγραμμικές συναρτήσεις παρεμβολής, οι παραμορφώσεις είναι σταθερές σε όλο το στοιχείο. Η δυσκαμψία σε αυτή την περίπτωση, προκύπτει με ολοκλήρωση οχτώ σημείων κατά Gauss. Όλες οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σ' αυτό το στοιχείο. Επίσης, κάθε κόμβος του στοιχείου διαθέτει τρεις βαθμούς ελευθερίας u, v καιw (μετατόπιση και κατά τις τρεις διευθύνσεις x, y, z). Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 2.4.2a,* η γεωμετρία του στοιχείου προκύπτει ως εξής: οι κόμβοι 1, 2, 3 και 4 αποτελούν τις κορυφές μιας έδρας, δοσμένοι με αντι-ωρολογιακή φορά όταν τους βλέπουμε μέσα από το στοιχείο. Ο κόμβος 5 ανήκει στην ίδια ακμή με τον 1, ο κόμβος 6 ανήκει στην ίδια ακμή με τον 2 και αντίστοιχα, ο κόμβος 7 με τον 3 και ο κόμβος 8 με τον κόμβο 4. Για την προσομοίωση της ράβδου επιλέχθηκαν τα πεπερασμένα στοιχεία τύπου 9 (*Σχήμα 2.4.2b*) που είναι γραμμικά στοιχεία με σταθερή διατομή. Όλες οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν στα στοιχεία αυτά. Χαρακτηριστικό τους είναι η καταλληλότητά τους για ανάλυση μεγάλων παραμορφώσεων, μεγάλων μετακινήσεων. Επίσης, δεν έχουν καμπτική δυσκαμψία. Όταν χρησιμοποιούνται μόνα τους ή σε συνδυασμό με άλλα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, διαθέτουν τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο u, v και w (μετατόπιση και κατά τις τρεις διευθύνσεις x, y, z). Σε κάθε άλλη περίπτωση οι βαθμοί ελευθερίας τους ανά κόμβο είναι δύο.

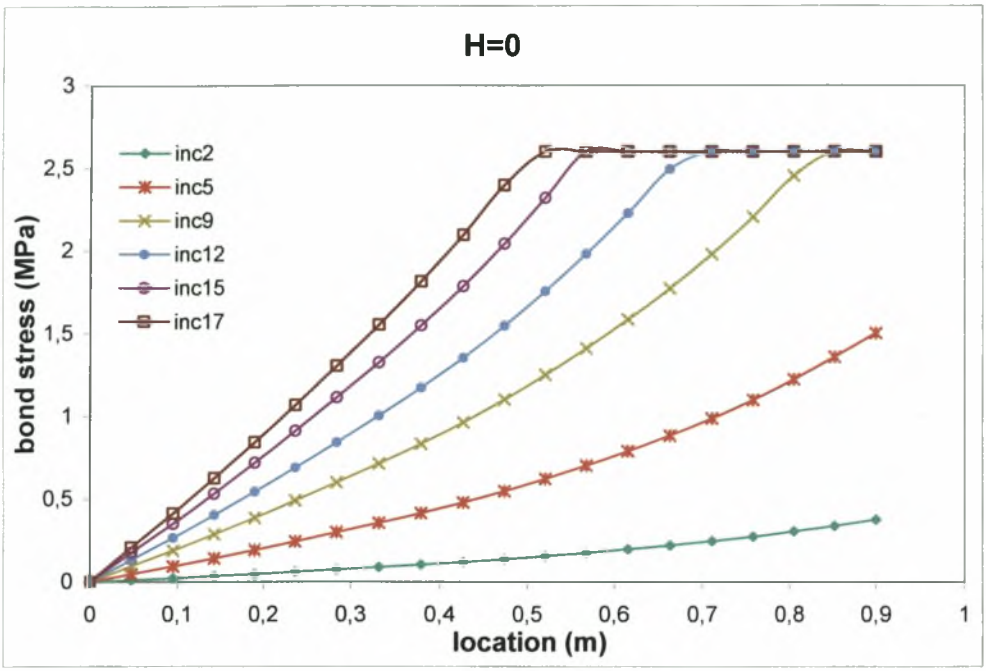
Για την προσομοίωση της διεπιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν ελατήρια με ελαστοπλαστικό νόμο συμπεριφοράς τα οποία δεσμεύουν τους κατακόρυφους (z-άξονας) βαθμούς ελευθερίας των κόμβων του χάλυβα και του σκυροδέματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 480 ελατήρια, δηλαδή κάθε κόμβος χάλυβα ενώθηκε με 24 κόμβους σκυροδέματος. Οι ιδιότητες των δύο υλικών είναι αυτές του *Πίνακα 2.1.1.* Στο προεξέχον τμήμα της ίνας ασκήθηκε επιβεβλημένη μετακίνηση ίση με 0.01m, μέσα από 50 βήματα φόρτισης.

Το διάγραμμα του *Σχήματος 2.4.3* δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης, τα οποία, συγκρινόμενα με αυτά της δισδιάστατης ανάλυσης, βρίσκονται σε απόλυτη ταύτιση στη μορφή και τις τιμές τους. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την ορθότητα του τρισδιάστατου μοντέλου.



Σχήμα 2.4.2: a) πεπερασμένα στοιχεία τύπου 7, b) πεπερασμένα στοιχεία τύπου 9

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 2.4.3: διάγραμμα τάσης συνάφειας -θέσης κόμβου στη ράβδο για οριζόντιο πλαστικό κλάδο του νόμου των ελατηρίων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

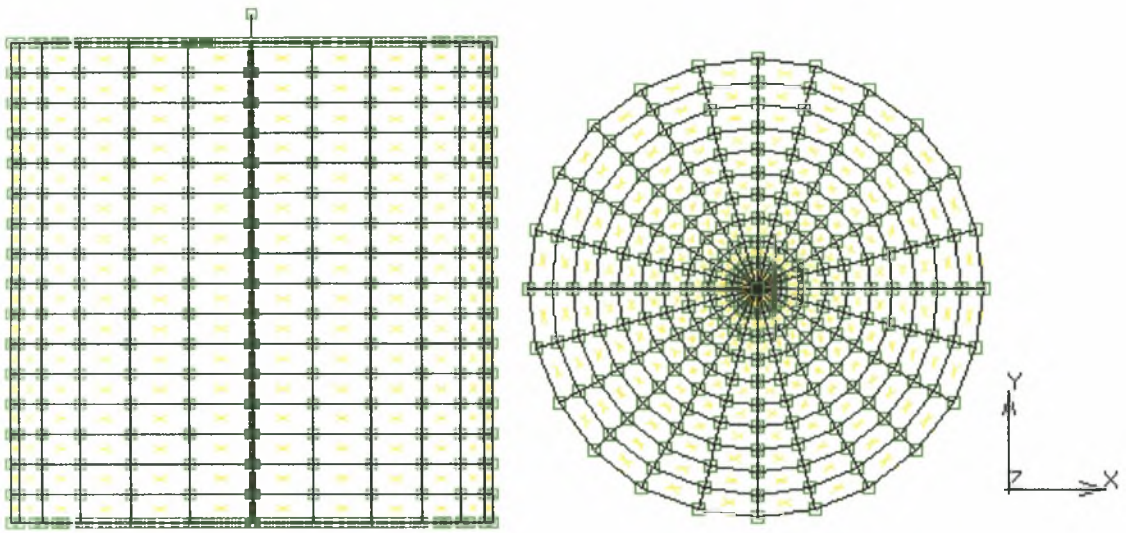
3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Προσομοίωση δοκιμής εξόλκευσης μιας ευθύγραμμης ράβδου από μήτρα σκυροδέματος

3.1 Περιγραφή αναλυτικού μοντέλου

Έχοντας επιβεβαιώσει την ορθότητα της τρισδιάστατης μοντελοποίησης στο πρόγραμμα μη-γραμμικής ανάλυσης Marc, προχωρήσαμε στην αναλυτική προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης μιας ευθύγραμμης ράβδου από μήτρα σκυροδέματος, με χαρακτηριστικές τιμές των δύο υλικών που αναφέρονται στον Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος.

Βάσει της φιλοσοφίας μοντελοποίησης του παραδείγματος που μελετήσαμε προηγούμενα, επιλέχθηκε μια κυλινδρικού σχήματος μήτρα σκυροδέματος, με διάμετρο D=0.8m και ύψος H=0.8m, ενώ η ράβδος προσομοιώθηκε με διάμετρο d=0.012m και για διάφορα μήκη αυτής. Μετά τη διακριτοποίηση το τρισδιάστατο μοντέλο έχει τη μορφή του *Σχήματος 3.1.1.* Η ράβδος είναι τοποθετημένη στο κέντρο της μήτρας σκυροδέματος και προεξέχει από αυτή 0.05m.



Σχήμα 3.1.1: Τρισδιάστατο μοντέλο σε όψη και κάτοψη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα C20/25, με μέτρο ελαστικότητας E_c=29GPa, λόγο Poisson ν=0.3, εφελκυστική αντοχή f_t=2.2MPa και θλιπτική αντοχή f_c=20MPa. Αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε χάλυβας S500, με μέτρο ελαστικότητας E_c=210GPa, λόγο Poisson ν=0.2 και εφελκυστική αντοχή f_t=500MPa. Σε κάποιες από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν το σκυρόδεμα θεωρήθηκε ελαστικό και σε άλλες θεωρήθηκε δυνατότητα ρηγμάτωσης. Η συμπεριφορά του χάλυβα διέπεται από ελαστοπλαστικό νόμο με ανιόντα πλαστικό κλάδο (*Σχήμα 3.1.3a*).

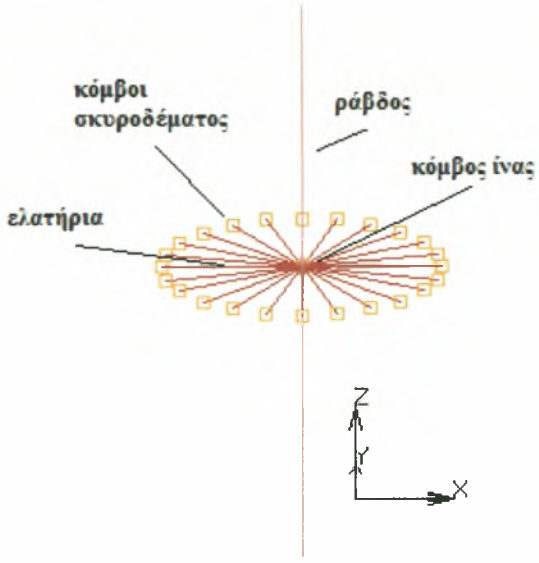
Το μήκος του τμήματος της ράβδου που βρίσκεται μέσα στη μήτρα σκυροδέματος τέθηκε αρχικά ίσο με το μήκος αγκύρωσης l_b που υπολογίζεται σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ από τον τύπο:

$$l_b = \frac{\phi}{4}\frac{f_{yd}}{f_{bd}} \approx 0.60m$$

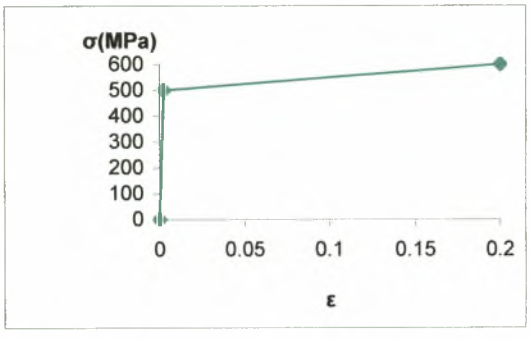
Στο προεξέχον τμήμα της ράβδου ασκείται επιβεβλημένη μετακίνηση κατά τον άξονα z ίση με 0.005m σε 50 βήματα φόρτισης. Επίσης, δεσμεύτηκε η μετακίνηση στους άξονες x, y και z όλων των κόμβων του σκυροδέματος στη στάθμη z=0.

Η διεπιφάνεια χάλυβα – σκυροδέματος προσομοιώνεται με ελατήρια που ενώνουν τους κόμβους κατά μήκος της ράβδου με τους αντίστοιχους κόμβους του σκυροδέματος και δεσμεύουν τους z-βαθμούς ελευθερίας των κόμβων αυτών (*Σχήμα 3.1.2*). Η συμπεριφορά της διεπιφάνειας θεωρείται ελαστοπλαστική, συνεπώς και τα ελατήρια θα πρέπει να έχουν ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό υιοθετείται ο νόμος του σχήματος 3.1.3b. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές που εμφανίζονται στο διάγραμμα, προκύπτουν μετά από υπολογισμούς για την τάση συνάφειας και το εμβαδόν επιρροής του κάθε ελατηρίου. Η τάση συνάφειας σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ για τύπο σκυροδέματος C20 είναι f_{bd}=2.3MPa, η οποία αναγόμενη στο εμβαδό επιρροής του κάθε ελατηρίου μας δίνει την τιμή τ=0.181KN. Τέλος, θεωρώντας πολύ δύσκαμπτα τα ελατήρια υιοθετούμε μια πολύ μεγάλη κλίση του ελαστικού κλάδου, ενώ ο πλαστικός κλάδος θεωρείται απόλυτα οριζόντιος.

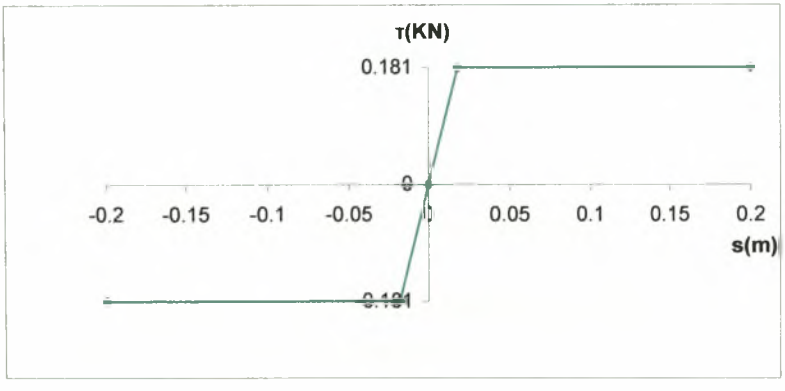
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 3.1.2: σχηματική απεικόνιση ελατηρίων προσομοίωσης διεπιφάνειας



Σχήμα 3.1.3a): ελαστοπλαστικός νόμος χάλυβα



Σχήμα 3.1.3 b): ελαστοπλαστικός νόμος ελατηρίου

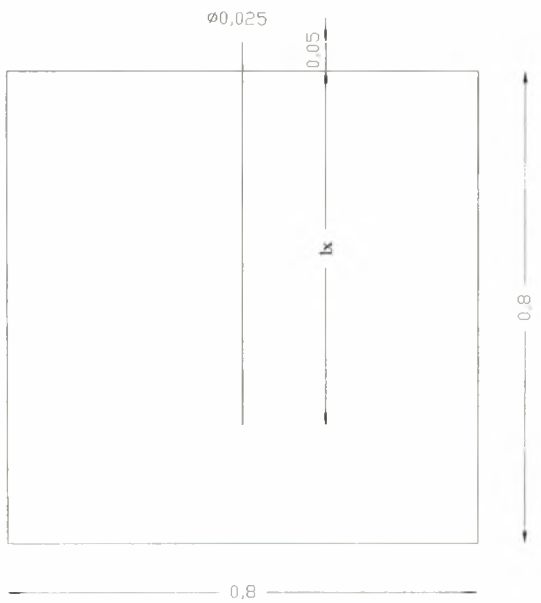
Η διακριτοποίηση τόσο του χάλυβα όσο και του σκυροδέματος έγινε ανά 0.05m περίπου, καθ' ύψος. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθούν περίπου 3840 πεπερασμένα στοιχεία. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του σκυροδέματος είναι τρισδιάστατα εξάεδρα στοιχεία στερεού, οχτώ κόμβων και πιο

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

συγκεκριμένα, τα πεπερασμένα στοιχεία τύπου 7 τα οποία είναι ισοπαραμετρικά, τυχαίας γεωμετρίας. Για την προσομοίωση της χαλύβδινης ράβδου επιλέχθηκαν τα στοιχεία τύπου 9, τα οποία είναι τρισδιάστατα γραμμικά στοιχεία πλαισίου δύο κόμβων με σταθερή διατομή, στα οποία δόθηκε τιμή εμβαδού ίση με 1.13e-4 m^2. Αναλυτικότερη περιγραφή αυτών των δύο τύπων πεπερασμένων στοιχείων υπάρχει στο 2° Κεφάλαιο (Παράγραφος 2.4).

3.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

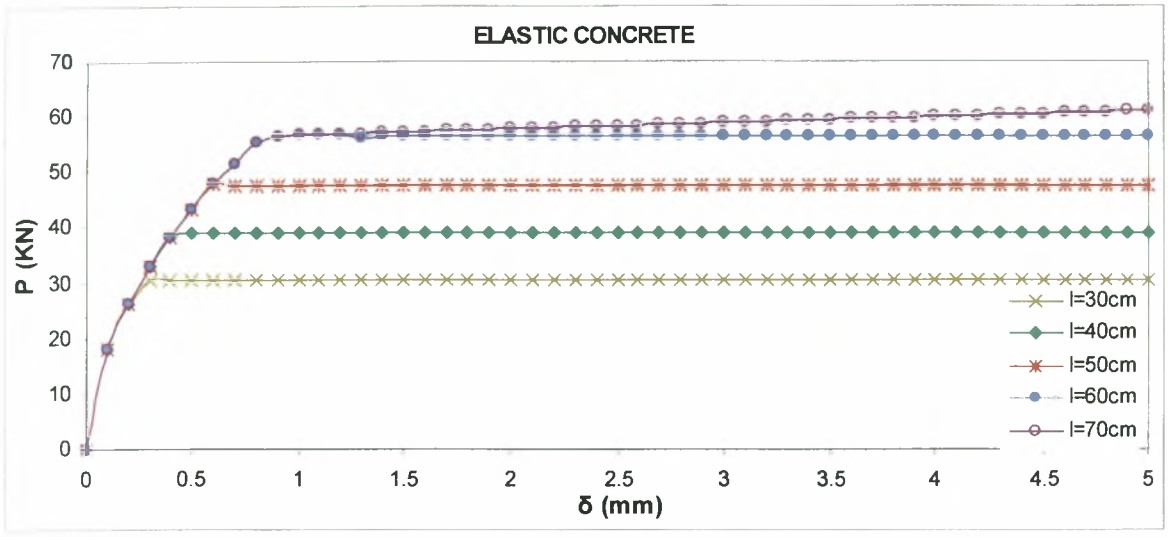
Για καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του μοντέλου έγιναν κάποιες παραμετρικές αναλύσεις σχετικά με τις ιδιότητες του σκυροδέματος και με το μήκος του τμήματος της ράβδου που βρίσκεται μέσα στη μήτρα σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, το σκυρόδεμα θεωρήθηκε αρχικά ελαστικό και στη συνέχεια με δυνατότητα ρηγμάτωσης. Επίσης, έγιναν αναλύσεις και για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, για μήκος ράβδου l_1=0.30m, l_2=0.40m, l_3=0.50m, l_4=0.60m και l_5=0.70m (*Σχήμα 3.2.1*)



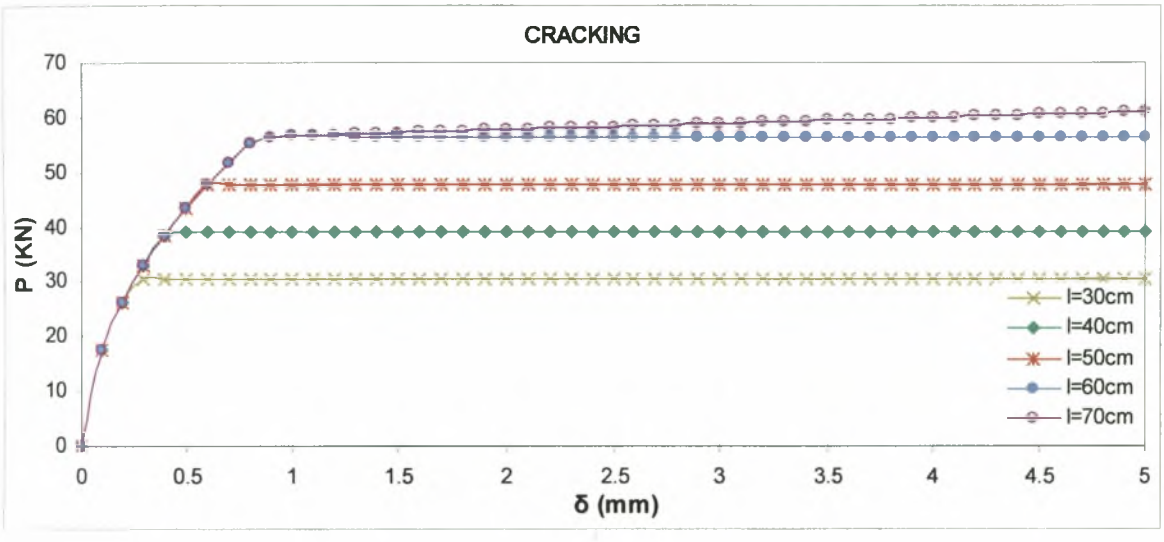
Σχήμα 3.2.1: Σχηματική απεικόνιση του μήκους l_x

Στη συνέχεια παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης που προέκυψαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.

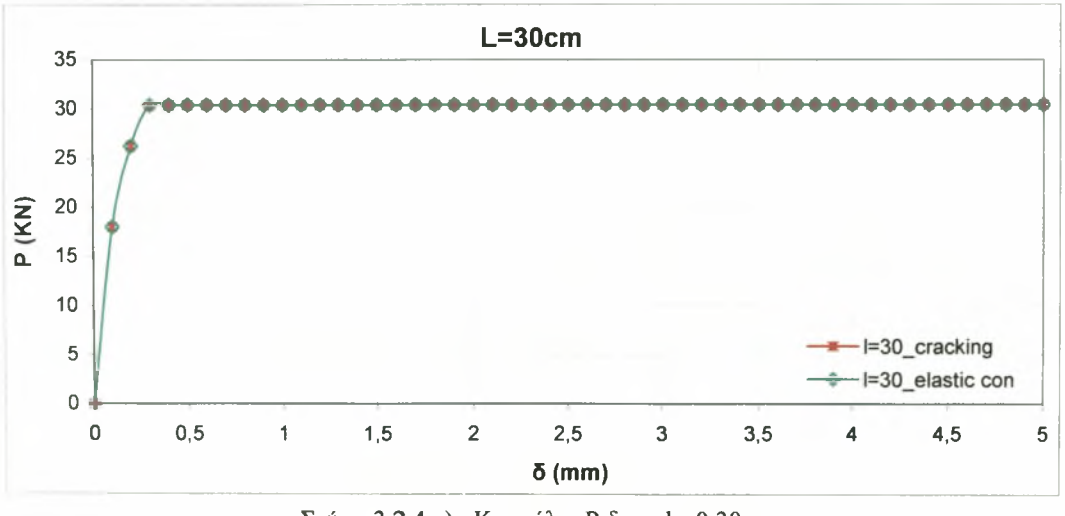
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 3.2.2: διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για την παραδοχή ελαστικού σκυροδέματος

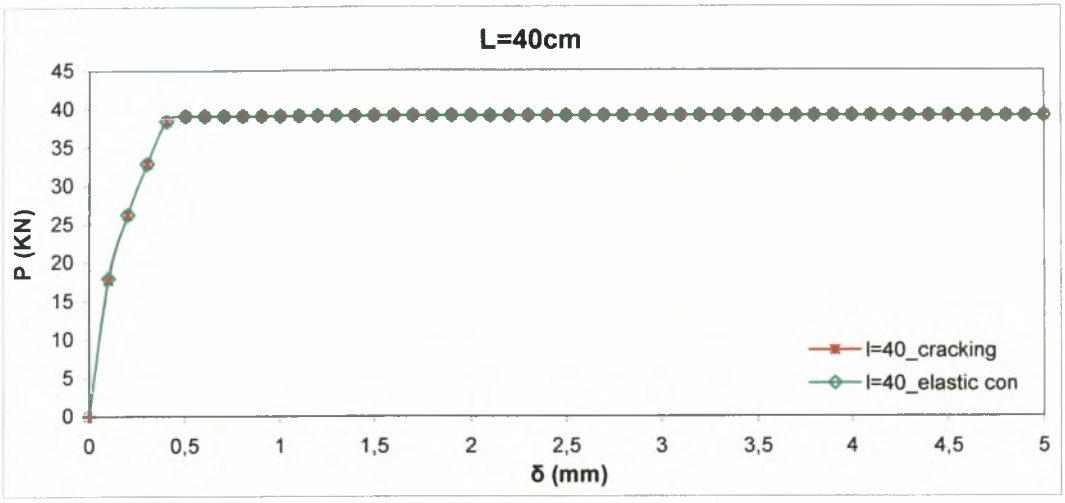


Σχήμα 3.2.3: διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για την παραδοχή δυνατότητας ρηγμάτωσης του σκυροδέματος

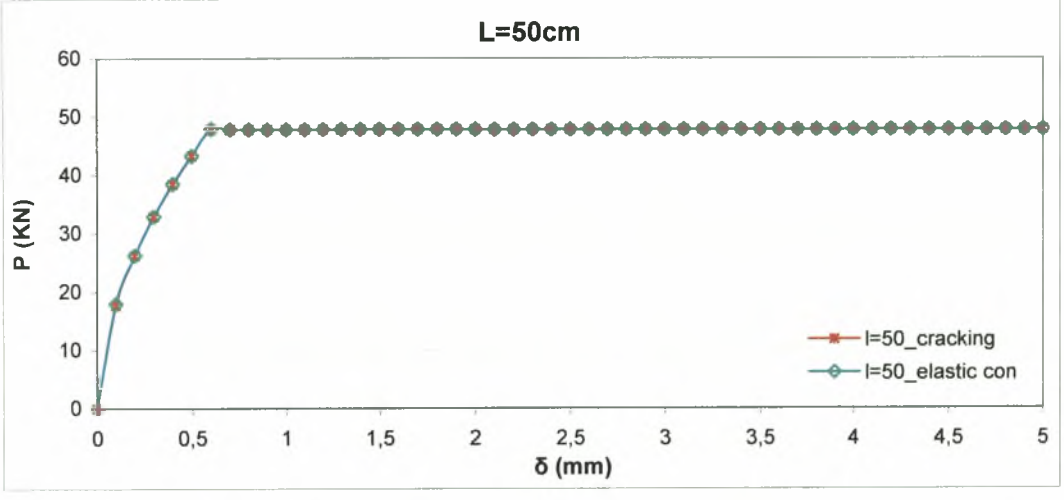


Σχήμα 3.2.4 a): Καμπύλες P-δ για l_l=0.30m

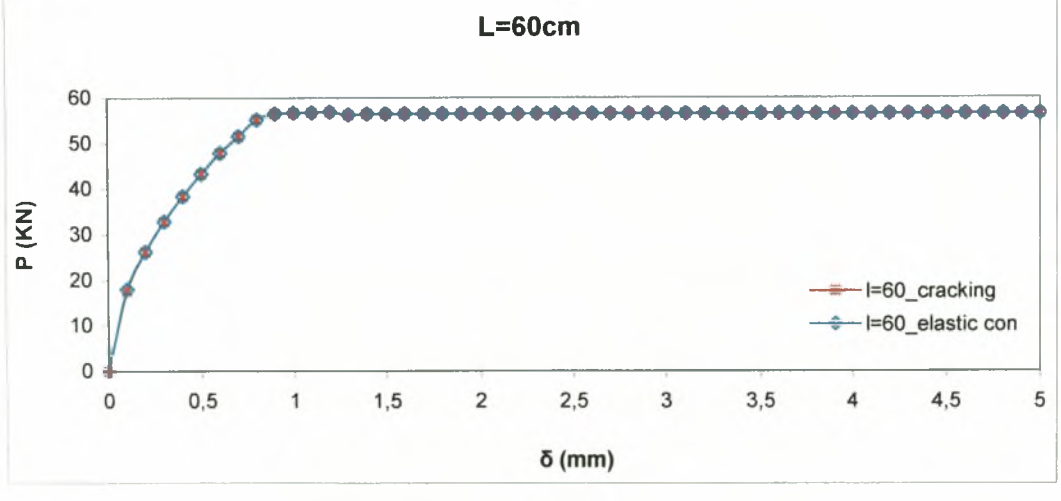
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 3.2.4 b): Καμπύλες P-δ για l_2=0.40m

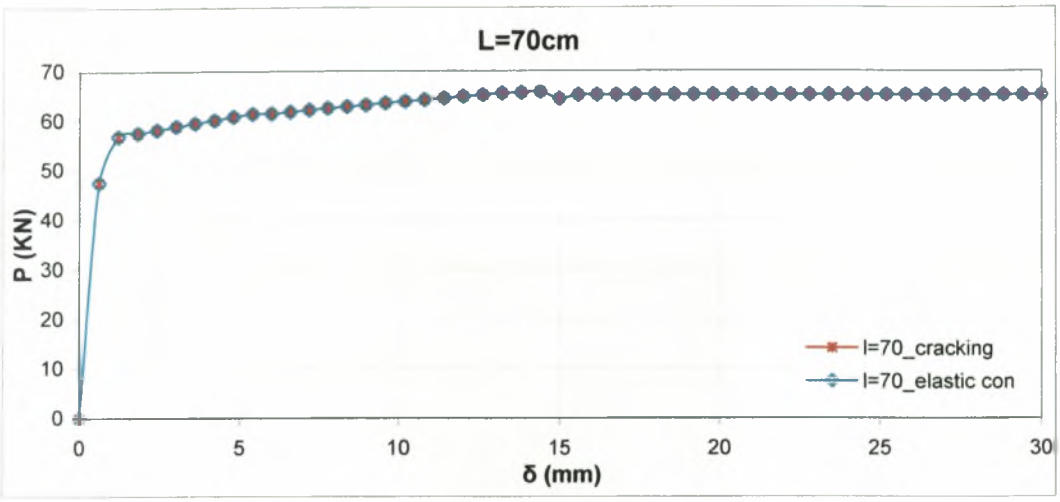


Σχήμα 3.2.4 c): Καμπύλες P-δ για l_3=0.50m



Σχήμα 3.2.4 d): Καμπύλες P-δ για l_4=0.60m

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



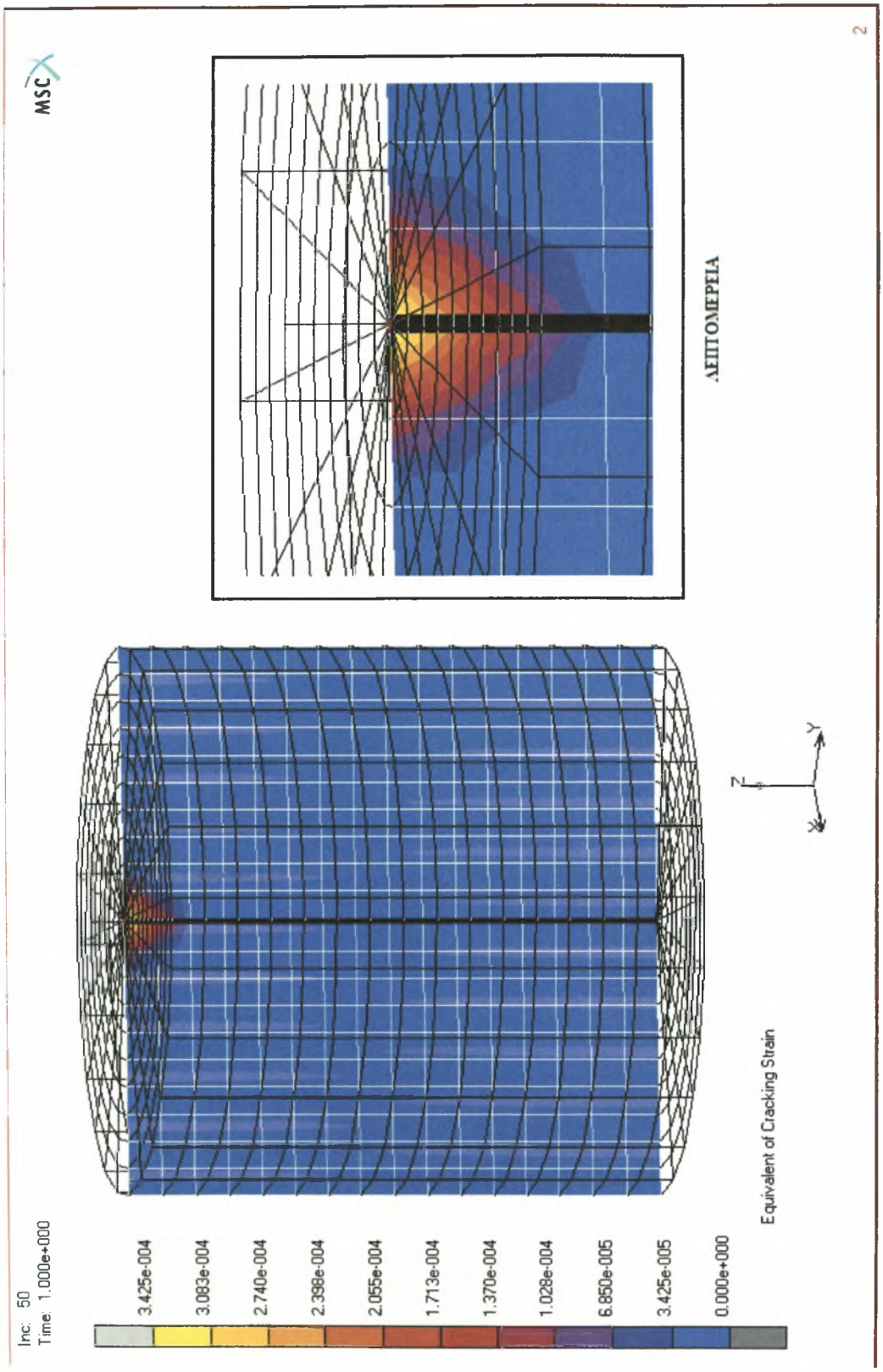
Σχήμα 3.2.4e): Καμπύλες P-δ για l_5=0.70m

Σε όλες τις παραπάνω καμπύλες παρατηρείται μια καμπυλότητα στον αρχικό κλάδο, η οποία οφείλεται στη σταδιακή διαρροή των ελατηρίων που προσομοιώνουν τη διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος, καθώς η ράβδος μετατοπίζεται. Στη συνέχεια, εμφανίζεται ένας οριζόντιος πλαστικός κλάδος, ο οποίος δείχνει πως όλα τα ελατήρια έχουν περάσει πια από την ελαστική συμπεριφορά στην πλαστική. Άρα η διεπιφάνεια αστοχεί και η ράβδος εξολκεύται. Η μοναδική περίπτωση στην οποία εμφανίζεται διαφορά στη μορφή της καμπύλης είναι για l_x=70cm, μήκος το οποίο υπερβαίνει το μήκος αγκύρωσης l_b=60cm. Πιο συγκεκριμένα, στην καμπύλη αυτή παρατηρείται και η ύπαρξη ανιόντα πλαστικού κλάδου που οφείλεται στην πλαστικοποίηση του χάλυβα. Η διαρροή του χάλυβα δεν συμβαίνει στις άλλες περιπτώσεις διότι το μήκος αγκύρωσης της ράβδου δεν επαρκεί και η συμπεριφορά του μοντέλου διέπεται μόνο από την αστοχία της διεπιφάνειας. Η ράβδος τότε εξολκεύεται πριν ο χάλυβας φτάσει το όριο διαρροής του.

Από τα δύο πρώτα διαγράμματα (*Σχήμα 3.2.2 και Σχήμα 3.2.3*) παρατηρούμε πως όσο μικρότερο είναι το μήκος του τμήματος της ράβδου (l_x) που βρίσκεται μέσα στη μήτρα σκυροδέματος, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της δύναμης που απαιτείται για την εξόλκευση της ράβδου αυτής.

Συγκρίνοντας τις καμπύλες για σκυρόδεμα με δυνατότητα ρηγμάτωσης με τις αντίστοιχες για ελαστικό σκυρόδεμα παρατηρούμε ταύτιση τόσο στη μορφή όσο και στις αριθμητικές τιμές τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα λόγω της εξόλκευσης της ράβδου δεν ξεπερνούν κατά πολύ την τιμή της εφελκυστικής του αντοχής. Όπως φαίνεται και από το *Σχήμα 3.2.5*, στα τελευταία βήματα της ανάλυσης, εμφανίζεται γύρω από το σημείο εξόδου της ράβδου μια περιοχή με μικρορηγματώσεις σε σχήμα κώνου. Παρά την ύπαρξη αυτής της περιοχής, οι παραμορφώσεις λόγω ρηγμάτωσης του σκυροδέματος είναι τόσο μικρές ώστε δεν επηρεάζουν καθόλου τη συνολική συμπεριφορά του μοντέλου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 3.2.5: Γραφική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης του σκυροδέματος

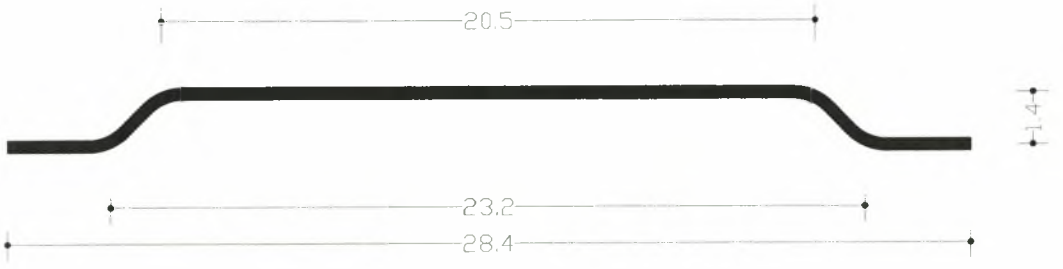
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Τρισδιάστατη ανάλυση της δοκιμής εξόλκευσης ινών με αγκιστροειδές άκρο

4.1 Γενικά

Το κύριο μέρος της παρούσας εργασίας αφορά τη μελέτη της δοκιμής εξόλκευσης ινών με αγκιστροειδές άκρο. Οι συγκεκριμένες ίνες που μελετήθηκαν κυκλοφορούν στο εμπόριο. Τα μηχανικά και χημικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1.1 και 4.1.2 αντίστοιχα. Πρόκειται για ίνες κυκλικής διατομής διαμέτρου D=0.4mm και με μήκος αναπτύγματος $L_{αν}$=30mm. Η εφελκυστική αντοχή του χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους είναι μεγαλύτερη από 1400MPa. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών αυτών φαίνονται με λεπτομέρεια στο *Σχήμα 4.1.1.* Η κατασκευαστική εταιρεία δίνει κάποια όρια απόκλισης για τις τιμές των επιμέρους τμημάτων που τις αποτελούν (*Πίνακας 4.1.3*).



Σχήμα 4.1.1 : Σχηματική απεικόνιση της ίνας με αγκιστροειδές άκρο

Τύπος	**Σχήμα**	**Διάμετρος (mm)**	**Μήκος (mm)**	**Εφελκυστική Αντοχή (N/mm2)**
Αγκιστροειδές άκρο	Κυκλική διατομή	0.4	30	> 1400

Πίνακας 4.1.1: Μηχανικές ιδιότητες των ινών

Similar to AISI	**% C**	**% Mn**	**% Si**	**% Cr**	**% Ni**	**% P**	**% S**
310	< 0.25	< 2	< 1.5	24 - 26	19 - 22	< 0.045	< 0.030

Πίνακας 4.1.2: Χημικές ιδιότητες των ινών

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

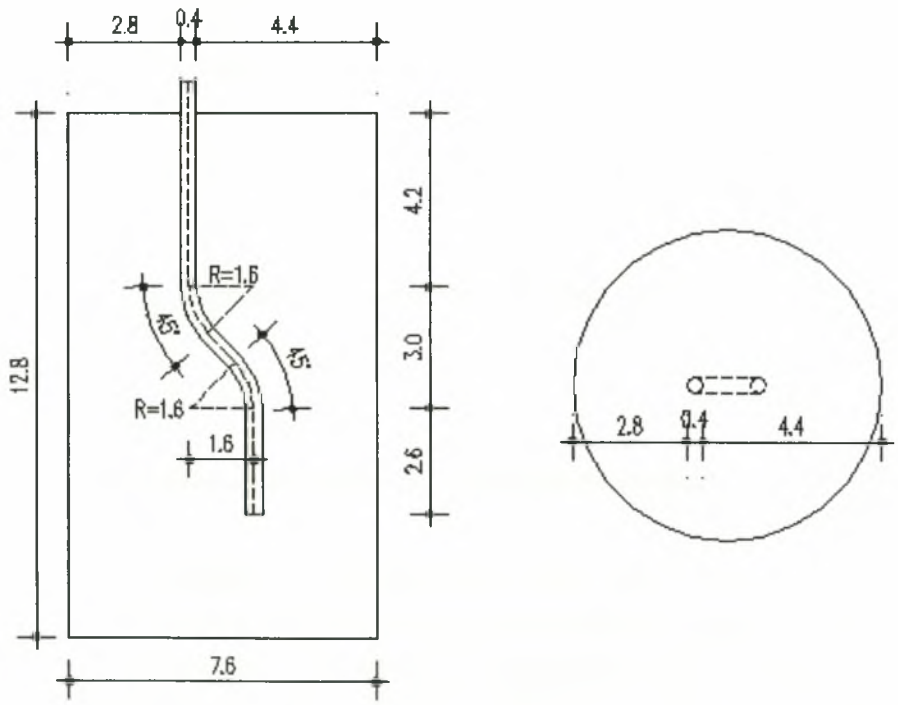
Μέση τιμή	28.4	23.2	20.5	1.4	**mm**
Τυπική απόκλιση	0.3	0.5	0.3	0.2	**mm**

Πίνακας 4.1.3: Αριθμητικές τιμές και όρια απόκλισης της γεωμετρίας των ινών

4.2 Περιγραφή τρισδιάστατου αναλυτικού μοντέλου

4.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Για την προσομοίωση της δοκιμής εξόλκευσης μιας ίνας με αγκιστροειδές άκρο από μήτρα σκυροδέματος δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο βάσει της δεδομένης γεωμετρίας της ίνας και μέσα στα όρια της τυπικής απόκλισης. Λόγω του συμμετρικού σχήματός της, η ίνα προσομοιώθηκε μόνο με το ένα αγκιστροειδές άκρο της. Για τη μήτρα σκυροδέματος, κυλινδρικού σχήματος, θεωρήθηκε επαρκής μια διάμετρος περίπου ίση με δεκαεννιά διαμέτρους της ίνας. Η ίνα τοποθετήθηκε συμμετρικά μέσα στη μήτρα και έτσι ώστε ένα τμήμα της να προεξέχει από αυτή. Με σκοπό την μείωση στο μισό του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων, επομένως και τον περιορισμό του υπολογιστικού χρόνου, εκμεταλλευτήκαμε τη συμμετρία που υπάρχει στο τρισδιάστατο μοντέλο ως προς το επίπεδο xy. Μεταξύ της ίνας και του σκυροδέματος υπάρχει απόσταση ίση με 0.008mm, μόνο για πρακτικούς λόγους μοντελοποίησης. Οι διαστάσεις τόσο της ίνας, όσο και της μήτρας σκυροδέματος φαίνονται στο *Σχήμα 4.2.1.1*



Σχήμα 4.2.1.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου

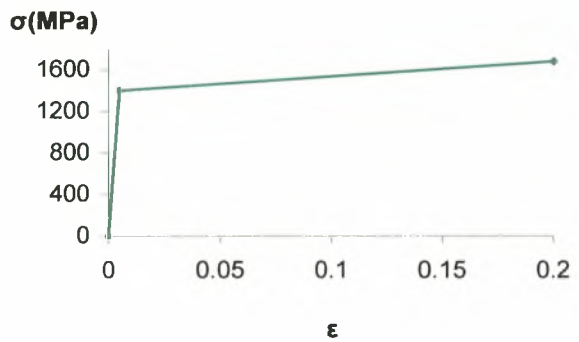
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

4.2.2 Συνοριακές συνθήκες

Αρχικά, δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις των κόμβων της κάτω στάθμης του σκυροδέματος ως προς τους άξονες x, y και z. Για την απόδοση της συμμετρίας δεσμεύτηκαν οι κόμβοι της ίνας και του σκυροδέματος που βρίσκονται στο επίπεδο συμμετρίας, για μετακίνηση στον άξονα z και για στροφή ως προς τους άξονες x και y. Στους άνω κόμβους του προεξέχοντος τμήματος της ίνας ασκήθηκε επιβεβλημένη μετακίνηση κατά y ίση με 1.6mm σταδιακά, μέσα από 50 βήματα φόρτισης, με ταυτόχρονη δέσμευση των μετακινήσεων κατά τους άξονες x και z.

4.2.3 Ιδιότητες υλικών

Σε όλες τις αναλύσεις το σκυρόδεμα θεωρήθηκε ελαστικό, τύπου C100 με μέτρο ελαστικότητας E_c=39GPa και λόγο Poisson ν=0.3. Ο χάλυβας θεωρήθηκε ελαστοπλαστικός, με μέτρο ελαστικότητας E_s=210GPa, λόγο Poisson ν=0.2 και εφελκυστική αντοχή f_t=1400MPa, ενώ για λόγους σύγκρισης, πραγματοποιήθηκαν και αναλύσεις με χάλυβα τύπου S500. Στο *Σχήμα 4.2.3.1* παρουσιάζεται σχηματικά ο ελαστοπλαστικός νόμος με ανιόντα πλαστικό κλάδο, που διέπει τη συμπεριφορά του χάλυβα S1400.



Σχήμα 4.2.3.1: ελαστοπλαστικός νόμος χάλυβα

4.2.4 Διακριτοποίηση του μοντέλου – Πεπερασμένα στοιχεία

Το πρώτο πρόβλημα που παρουσιάστηκε στην προσπάθεια της τρισδιάστατης μοντελοποίησης και ειδικότερα στο στάδιο της διακριτοποίησης, ήταν η ακριβής απόδοση της γεωμετρίας σε συνδυασμό με την χρήση των κατάλληλων τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων. Ζητούμενο ήταν η επαρκώς πυκνή διακριτοποίηση της ίνας με σκοπό την εξαγωγή ρεαλιστικότερων αποτελεσμάτων ενώ οι αντίστοιχες απαιτήσεις για τη μήτρα σκυροδέματος

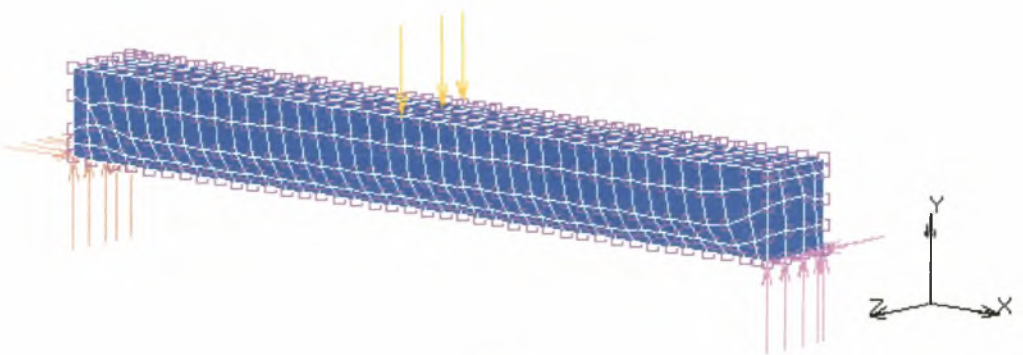
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

δεν ήταν τόσο μεγάλες. Η απαίτηση αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι το προς μελέτη φαινόμενο χαρακτηρίζεται στο σύνολό του, κυρίως από την συμπεριφορά της χαλύβδινης ίνας.

Αρχικά τα πεπερασμένα στοιχεία που επιλέχθηκαν για την διακριτοποίηση ήταν τα εξάεδρα στοιχεία οχτώ κόμβων (hex8) που είχαν χρησιμοποιηθεί για προηγούμενες τρισδιάστατες μοντελοποιήσεις και έχουν ήδη περιγραφεί στα Κεφάλαια 2 & 3, και για τις οποίες είχαν δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Με τη χρήση όμως, αυτών των στοιχείων ήταν αδύνατη η απόλυτα σωστή απόδοση της γεωμετρίας, παρά μόνο με υπερβολικά πυκνή διακριτοποίηση του μοντέλου. Κάτι τέτοιο κρίθηκε ασύμφορο καθώς ήταν πολύ μεγάλο το κόστος σε υπολογιστικό χρόνο. Για το λόγο αυτό έπρεπε να προχωρήσουμε στην επιλογή άλλων κατάλληλων τρισδιάστατων στοιχείων.

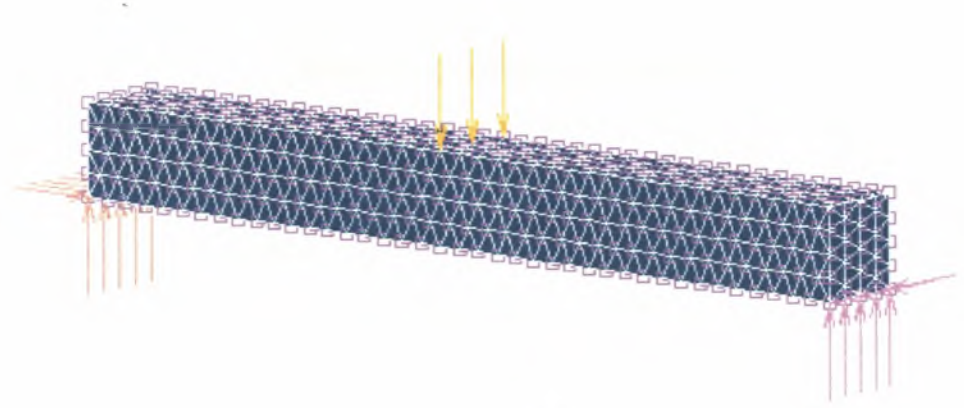
Έπειτα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, τα στοιχεία που κρίθηκαν καταλληλότερα για την ακριβή γεωμετρική προσομοίωση του μοντέλου, χωρίς ταυτόχρονα να απαιτείται ιδιαίτερα πυκνή διακριτοποίηση του σκυροδέματος, ήταν τα τρισδιάστατα τετράεδρα πεπερασμένα στοιχεία. Το πρόγραμμα Marc δίνει την δυνατότητα επιλογής δύο διαφορετικών τύπων τετράεδρων στοιχείων, με τέσσερις (tetra4) και δέκα κόμβους (tetra10). Με σκοπό να διαπιστωθεί ποιο από τα δυο αυτά στοιχεία έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει σωστά το φαινόμενο της κάμψης που εμφανίζεται κατά την επιβολή φόρτισης στην ίνα, προσομοιώθηκε αναλυτικά η δοκιμή κάμψης.

Δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο μιας αμφιέριστης δοκού ανοίγματος 2m και ορθογωνικής διατομής 0.2m x 0.2m. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χάλυβας S500, ελαστοπλαστικός με ανιόντα πλαστικό κλάδο. Επιβλήθηκε κατακόρυφη δύναμη στο μέσο της δοκού και στη συνέχεια έγινε η διακριτοποίησή της και με τους τρεις τύπους πεπερασμένων στοιχείων, hex8, tetra4 και tetra10, με την ίδια πυκνότητα διακριτοποίησης, με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων (*Σχήμα 4.2.4.1a, b, c*).

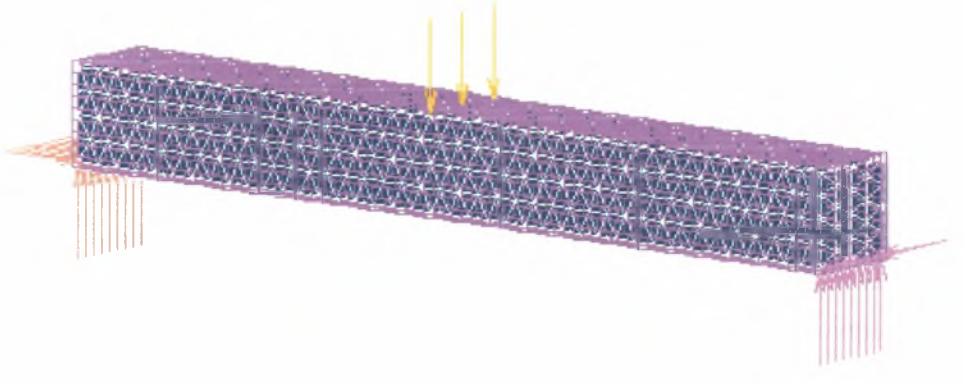


(a)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



(b)

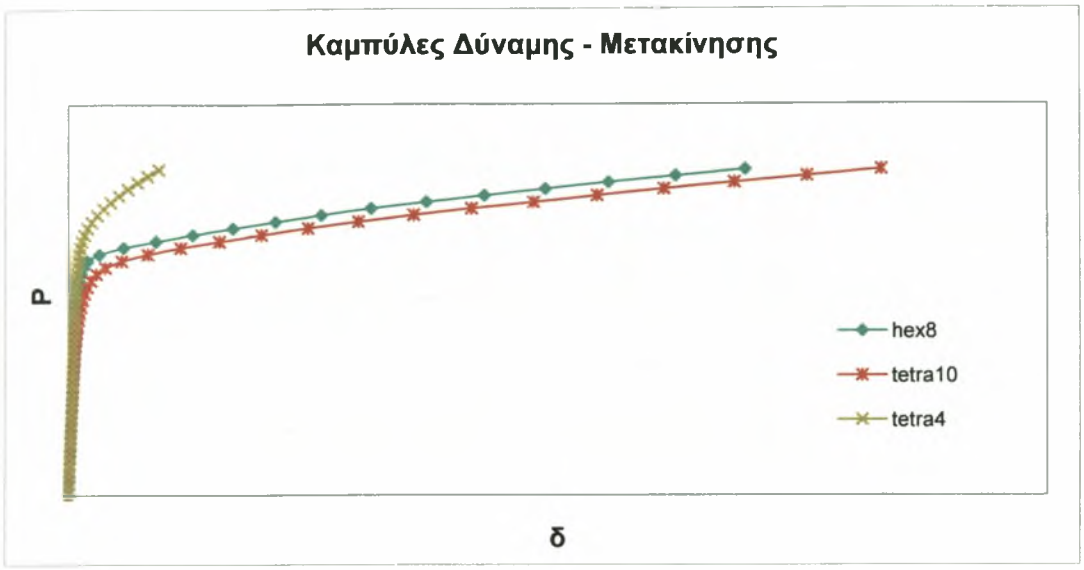


(c)

Σχήμα 4.2.4.1: πεπερασμένα στοιχεία τύπου a) hex8, b) tetra4, c) tetra10

Τα αποτελέσματα των τριών αναλύσεων απεικονίζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (*Σχήμα 4.2.4.2*). Όπως είναι προφανές, οι καμπύλες δύναμης-μετακίνησης που περιγράφουν τη συμπεριφορά των μοντέλων με πεπερασμένα στοιχεία hex8 και tetra10, έχουν την ίδια μορφή και πολύ μικρή απόκλιση στις αριθμητικές τιμές τους. Αντίθετα, η αντίστοιχη καμπύλη που αφορά τα στοιχεία tetra4, εμφανίζει μεγάλη απόκλιση από τις δυο πρώτες, αποδεικνύοντας ότι τα στοιχεία αυτά δεν μπορούν να προσομοιώσουν σωστά το φαινόμενο της κάμψης στην τρισδιάστατη ανάλυση. Έτσι, η χρησιμοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων tetra10 θεωρήθηκε η ιδανικότερη λύση για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



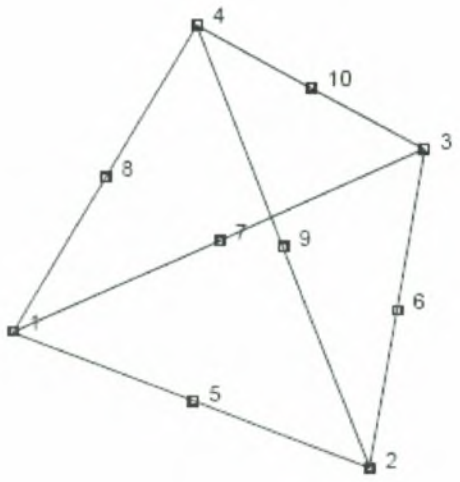
Σχήμα 4.2.4.2: Συγκριτικές καμπύλες για τους τρεις τύπους πεπερασμένων στοιχείων

Αναλυτικότερα, τόσο για την διακριτοποιήση της χαλύβδινης ίνας όσο και της μήτρας σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν τα τρισδιάστατα στερεά τετράεδρα πεπερασμένα στοιχεία δέκα κόμβων (tetra10) και ειδικότερα τα στοιχεία τύπου 127 της βιβλιοθήκης του Marc. Το στοιχείο τύπου 127 είναι ένα δεύτερης τάξης ισοπαραμετρικό τετράεδρο τυχαίας γεωμετρίας. Η δυσκαμψία του υπολογίζεται με ολοκλήρωση τεσσάρων σημείων. Το στοιχείο ολοκληρώνεται αριθμητικά σε τέσσερα σημεία κατά Gauss. Όλες οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν στο στοιχείο αυτό. Διαθέτει τρεις καθολικούς βαθμούς ελευθερίας: 1=u (μετατόπιση στη x διεύθυνση), 2=v (μετατόπιση στην y διεύθυνση) και 3=w (μετατόπιση στην z διεύθυνση).

Η γεωμετρία του στοιχείου φαίνεται στο *Σχήμα 4.2.4.3* και περιγράφεται ως εξής: οι τέσσερις πρώτοι κόμβοι ορίζουν τις κορυφές του τετράεδρου και οι υπόλοιποι έξι βρίσκονται στο μέσο της κάθε ακμής του. Πιο αναλυτικά, οι κόμβοι 1,2 και 3 αποτελούν τις κορυφές της πρώτης έδρας του στοιχείου, δοσμένοι με την αντι-ωρολογιακή φορά όταν τους βλέπουμε μέσα από το στοιχείο. Ο κόμβος 4 τοποθετείται στην απέναντι κορυφή. Οι κόμβοι 5,6,7 βρίσκονται στην πρώτη έδρα, μεταξύ των κόμβων 1 και 2, 2 και 3, 3 και 1 αντίστοιχα. Οι κόμβοι 8,9,10 βρίσκονται κατά μήκος των ακμών ανάμεσα στην πρώτη έδρα και τον κόμβο 4, μεταξύ των κόμβων 1 και 4, 2 και 4, 3 και 4 αντίστοιχα. Αυτός είναι και ο κανόνας της ορθής σύνδεσης των κόμβων.

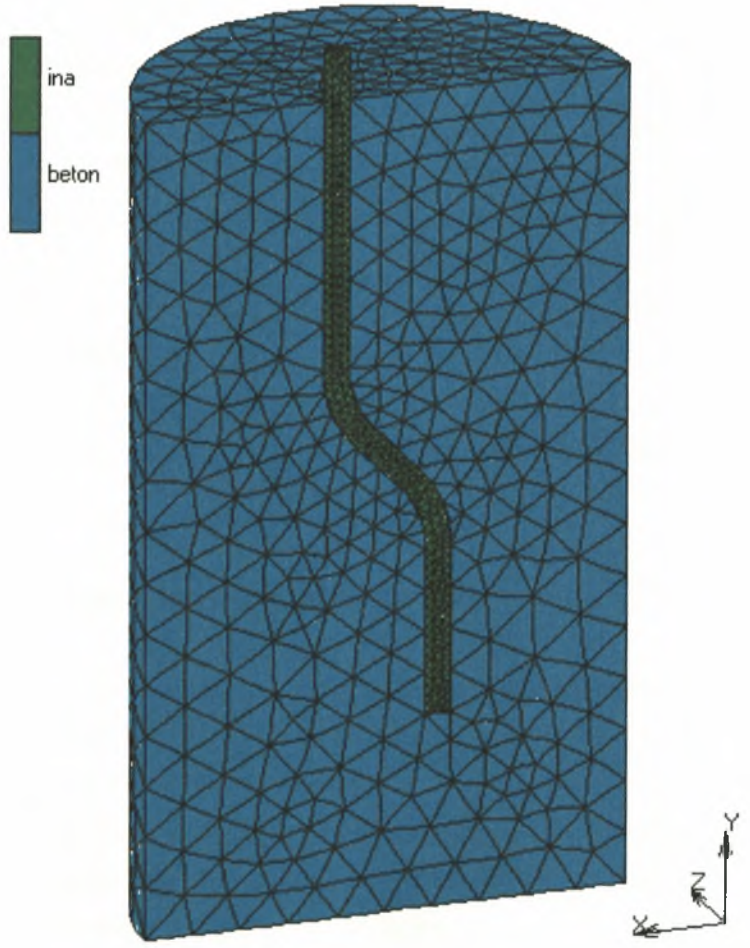
Για τη διακριτοποίηση του τρισδιάστατου αυτού μοντέλου δημιουργήθηκαν συνολικά 6691 πεπερασμένα στοιχεία για τη μήτρα του σκυροδέματος και 2418 στοιχεία για τη χαλύβδινη ίνα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 4.2.4.3: σχηματική απεικόνιση πεπερασμένου στοιχείου τύπου 127

Στο *Σχήμα 4.2.4.4* παρουσιάζεται το μοντέλο στην τελική του μορφή, μετά τη διακριτοποίηση.



Σχήμα 4.2.4.4: Το τρισδιάστατο μοντέλο μετά τη διακριτοποίηση

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

4.2.5 Συνθήκες επαφής

Για τη σωστή προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής εξόλκευσης, τίθεται ένας νόμος επαφής που συνδέει τα δύο σώματα. Για να τεθεί αυτός ο νόμος επαφής πρέπει αρχικά να οριστούν ο χάλυβας και το σκυρόδεμα σαν δύο διαφορετικά και ανεξάρτητα παραμορφώσιμα σώματα. Σύμφωνα με τον τύπο της επαφής που επιλέχθηκε, σε κάθε βήμα της ανάλυσης εκτελείται έλεγχος για το αν τα δυο σώματα βρίσκονται σε επαφή. Πιο συγκεκριμένα, εάν κάποιος κόμβος του ενός σώματος έρθει σε επαφή με οποιοδήποτε σημείο του άλλου σώματος, αυτόματα περιορίζεται η δυνατότητα μετακίνησης του κόμβου αυτού στη διεύθυνση κάθετα στο εφαπτόμενο σώμα. Στη συνέχεια, ορίζεται ο τύπος της τριβής που χαρακτηρίζει την επαφή των δυο σωμάτων καθώς επίσης και η τιμή του συντελεστή τριβής. Για τις αναλύσεις που έγιναν επιλέχθηκε ο διγραμμικός νόμος τριβής του Coulomb *(Σχήμα 4.2.5.1)* και ο συντελεστής τριβής τέθηκε ίσος με 0.3. Για να διερευνηθεί ο ρόλος της τριβής στο φαινόμενο που μελετάται, έγιναν και αναλύσεις με μηδενικό συντελεστή τριβής.

Το μοντέλο τριβής του Coulomb μπορεί να χαρακτηριστεί από τις παρακάτω σχέσεις:

$\|f_t\| < \mu f_{n(stick)}$ και $\|f_t\| = -\mu f_n \cdot t_{(slip)}$

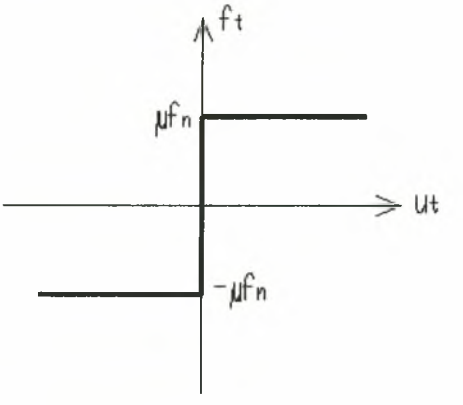
όπου f_t η εφαπτομενική δύναμη τριβής

f_n η κάθετη δύναμη

μ ο συντελεστής τριβής

t το εφαπτομενικό διάνυσμα στη διεύθυνση της σχετικής μετακίνησης: $t = \frac{u_r}{\|u_r\|}$,

όπου u_r η σχετική μετακίνηση.



Σχήμα 4.2.5.1: Διγραμμικός νόμος τριβής του Coulomb

4.2.6 Μη-γραμμικά φαινόμενα του προβλήματος

Η ανάλυση του συγκεκριμένου προβλήματος παρουσιάζει πολλές αριθμητικές δυσκολίες λόγω των παρακάτω μη-γραμμικών φαινομένων που επικρατούν και αλληλεπιδρούν κατά τη διαδικασία εξόλκευσης.

- Η αμφίπλευρη επαφή μεταξύ ίνας και μήτρας σκυροδέματος
- Η ύπαρξη τριβής στις περιοχές επαφής των δύο σωμάτων
- Η πλαστικοποίηση της χαλύβδινης ίνας
- Η πιθανότητα ρηγμάτωσης και θραύσης του σκυροδέματος στις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων

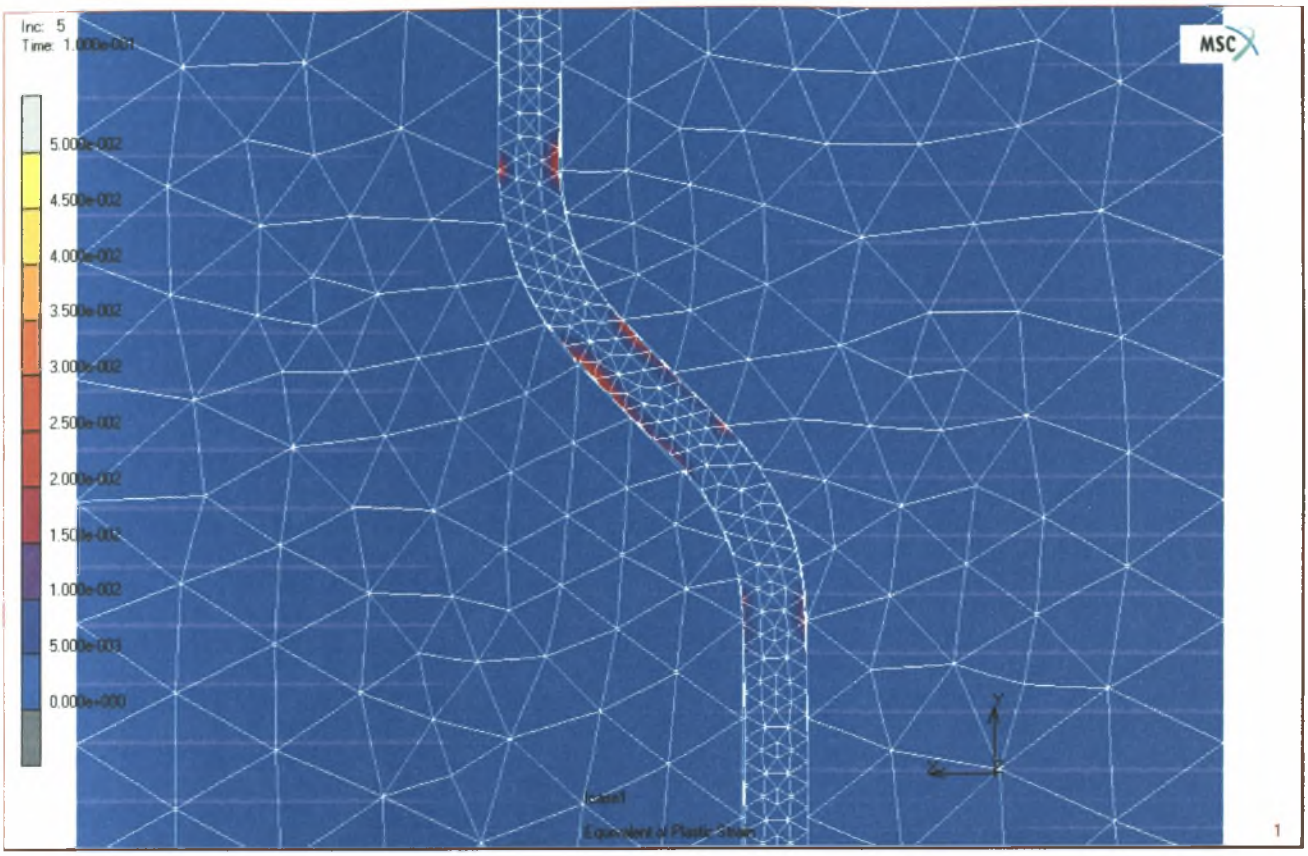
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

4.3 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης

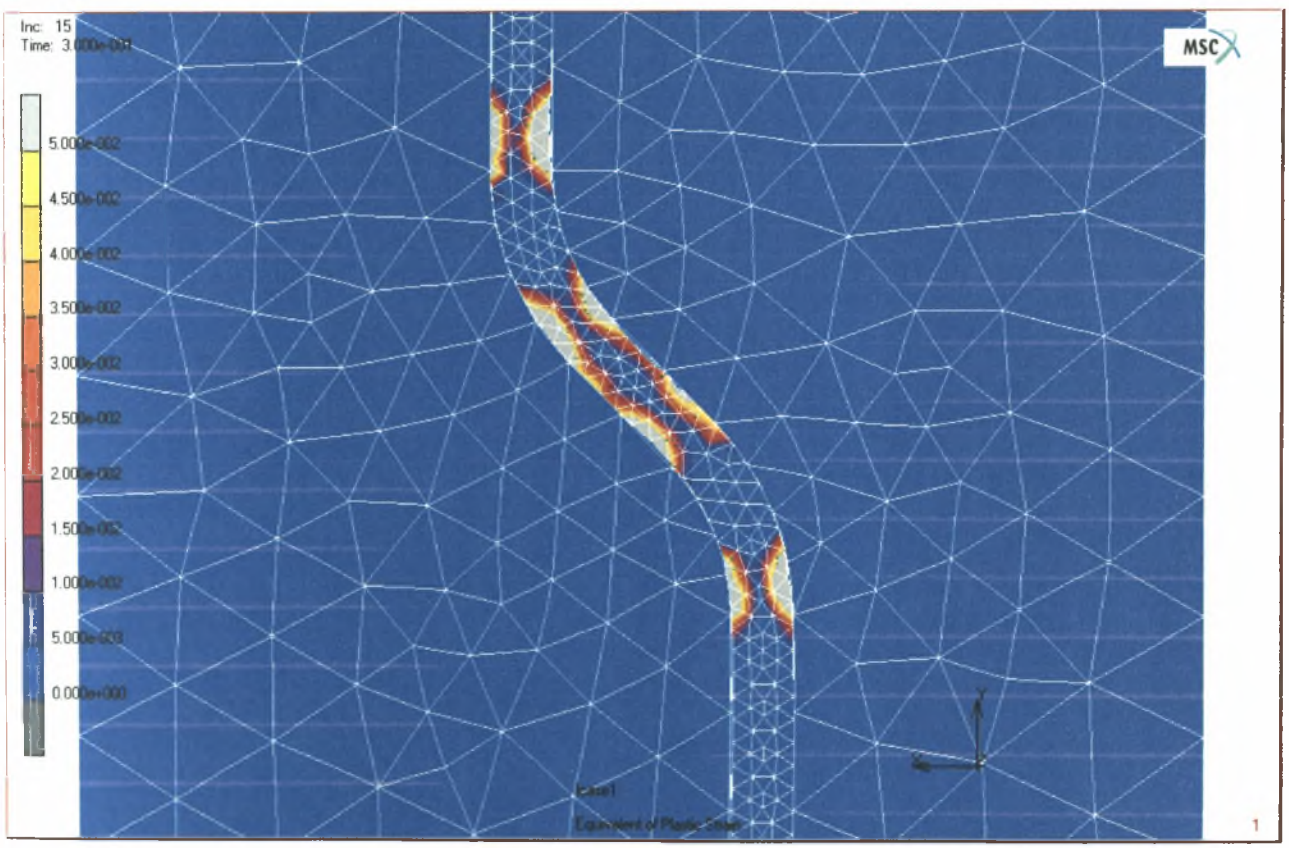
Ως τύπος ανάλυσης επιλέχθηκε η τρισδιάστατη ανάλυση. Το κριτήριο σύγκλισης είναι αυτό των παρασιτικών δυνάμεων και ορίστηκε ως απαιτούμενη ακρίβεια σε κάθε βήμα της ανάλυσης η τιμή 0.05. Το πρώτο μοντέλο που μελετήθηκε ήταν εκείνο με χάλυβα S1400 και μηδενικό συντελεστή τριβής.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης απεικονίζονται στα σχήματα που ακολουθούν. Στο *Σχήμα 4.3.1* φαίνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας λόγω επιβεβλημένης μετακίνησης στο 5° βήμα της φόρτισης. Στο συγκεκριμένο βήμα εμφανίζονται οι πρώτες πλαστικές παραμορφώσεις, επομένως ο χάλυβας περνάει από την ελαστική συμπεριφορά στη πλαστική. Πιο συγκεκριμένα αυτές εμφανίζονται γύρω από τα άκρα των δύο καμπύλων τμημάτων της ίνας. Καθώς η ίνα μετατοπίζεται σταδιακά, τα τμήματα αυτά κάμπτονται με αποτέλεσμα να πλαστικοποιούνται. Τα άνω άκρα των καμπυλών τείνουν να ευθυγραμμιστούν, ενώ αντίστοιχα, τα άνω άκρα των ευθύγραμμων τμημάτων τείνουν να καμπυλωθούν. Με την αύξηση των βημάτων φόρτισης το φαινόμενο της πλαστικοποίησης επεκτείνεται και είναι πλέον εμφανείς οι πλαστικές αρθρώσεις *(Σχήμα 4.3.2)*. Παρατηρούμε πως το μεσαίο τμήμα της κάθε καμπύλης δεν έχει πλαστικοποιηθεί καθώς, κατά τη μετατόπισή του, δεν κάμπτεται. Στο 24° βήμα της φόρτισης *(Σχήμα 4.3.2)* οι μετατοπίσεις των κόμβων του πρώτου καμπύλου τμήματος είναι αρκετά μεγάλες ώστε αυτό να εισέλθει εξ' ολοκλήρου στην ευθύγραμμη περιοχή και να πλαστικοποιηθεί. Αντίστοιχα, για το δεύτερο καμπύλο τμήμα η πλαστικοποίησή του είναι εμφανής στο 32° βήμα της ανάλυσης, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.3.3*. Η ίνα συνεχίζει να ολισθαίνει με την αύξηση της επιβεβλημένης μετακίνησης και στο τελευταίο βήμα η πλαστικοποιημένη περιοχή φαίνεται στο *Σχήμα 4.3.4*. Εάν τα βήματα φόρτισης συνεχιστούν, η πλαστικοποίηση θα εξελιχθεί μόνο στο κάτω ευθύγραμμο τμήμα της ίνας λόγω κάμψης και τελικά η ίνα θα εξέλθει από τη μήτρα σκυροδέματος. Από το *Σχήμα 4.3.4* παρατηρούμε επίσης, πως οι ανώτεροι κόμβοι, στους οποίους επιβάλλεται η φόρτιση, έχουν μετατοπιστεί κατά τη διεύθυνση y περισσότερο από τους κατώτερους κόμβους της ίνας, γεγονός που αποδεικνύει πως η ίνα επιμηκύνεται κατά την εξόλκευσή της.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

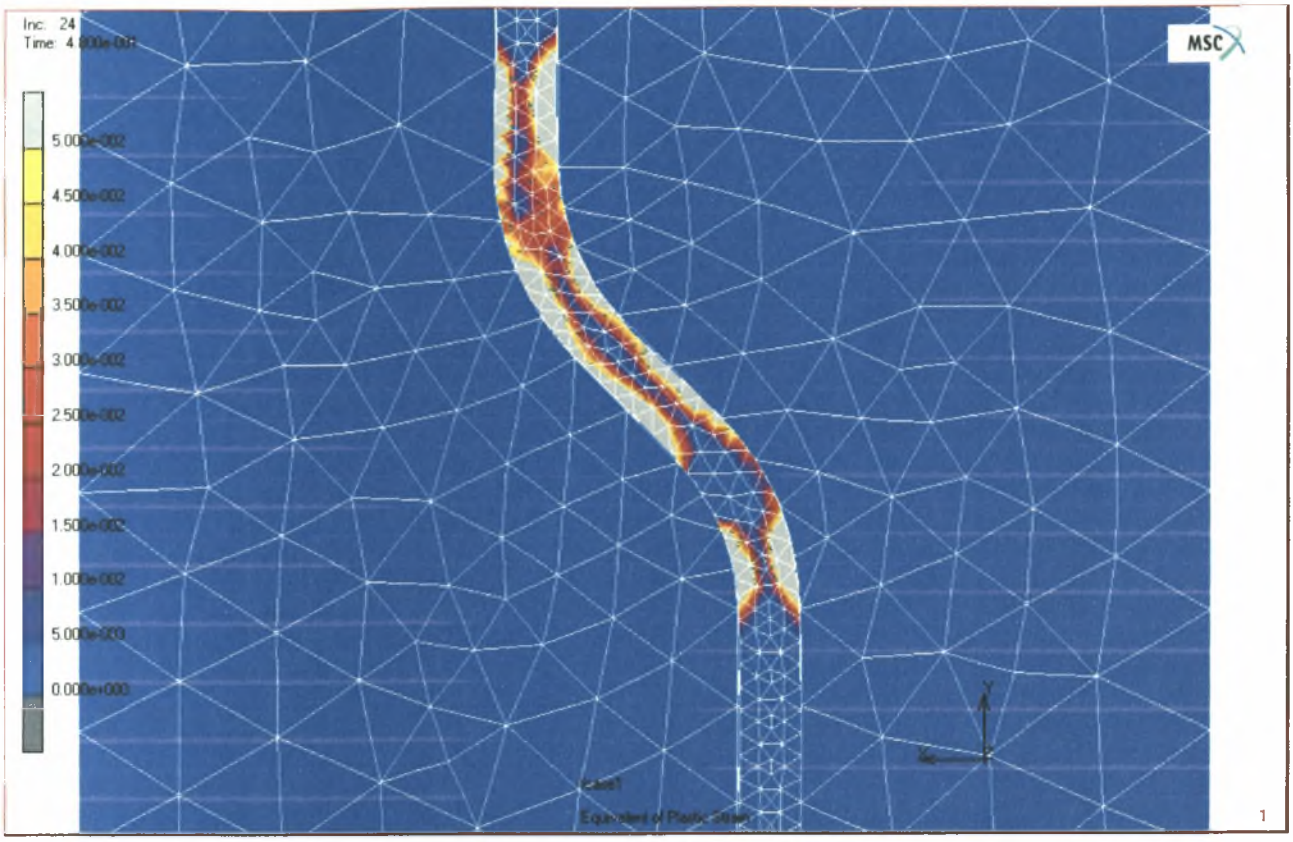


Σχήμα 4.3.1: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 5^{ο} βήμα ανάλυσης

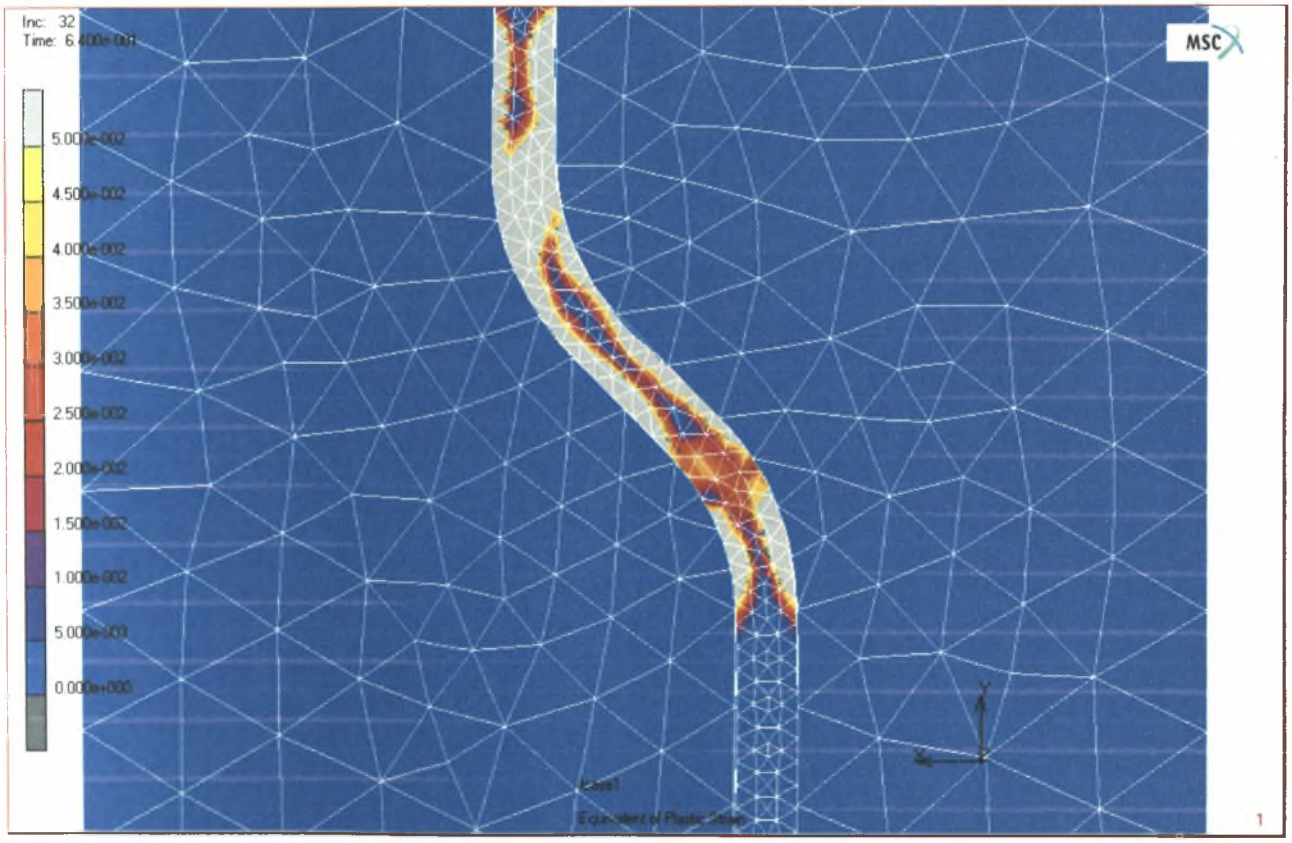


Σχήμα 4.3.21: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 15^{ο} βήμα ανάλυσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

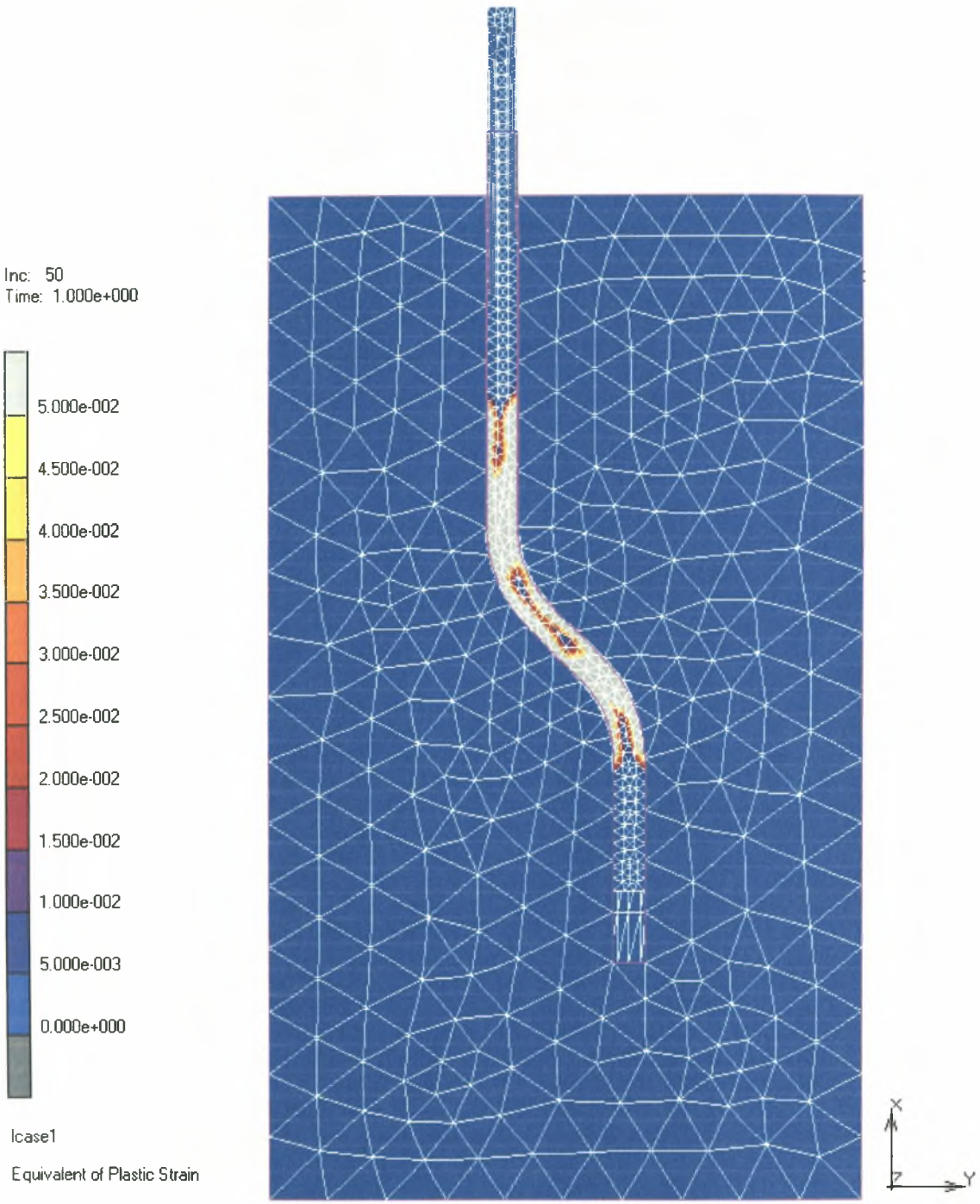


Σχήμα 4.3.3: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 24ο βήμα ανάλυσης



Σχήμα 4.3.4: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 32ο βήμα ανάλυσης

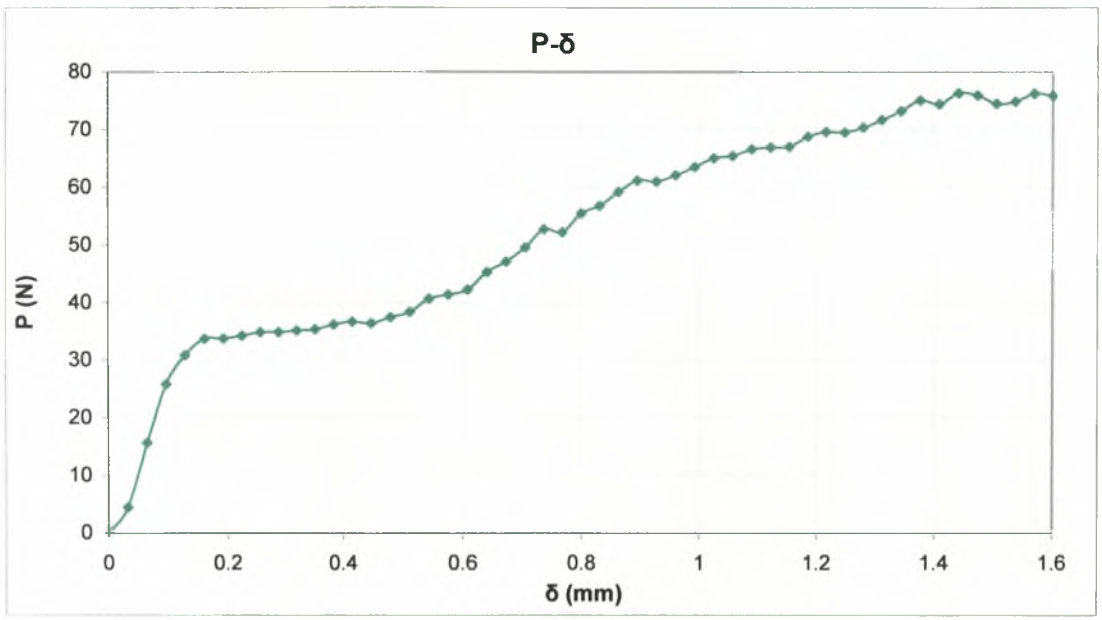
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 4.3.5: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 50° βήμα ανάλυσης

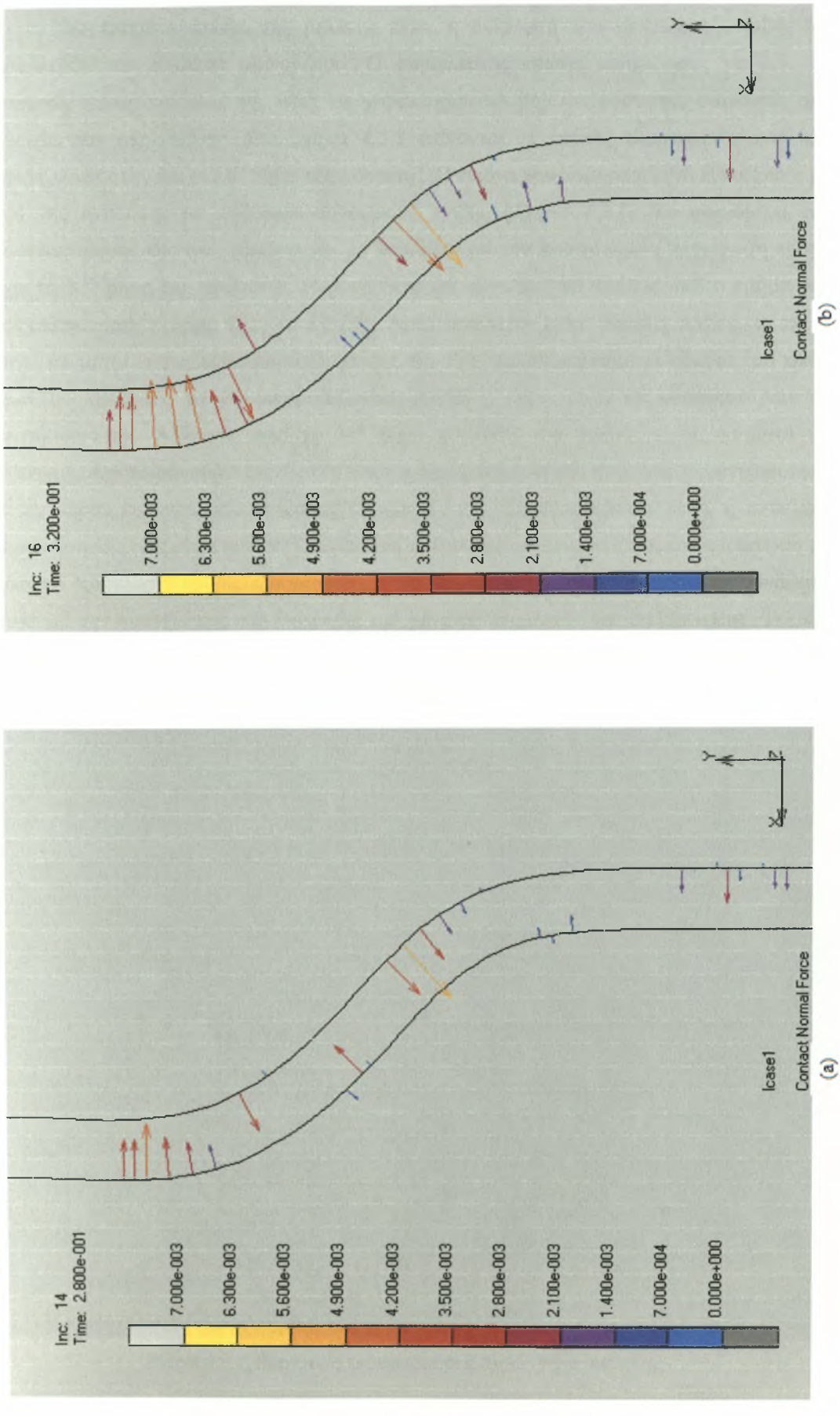
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψε η καμπύλη δύναμης-μετακίνησης του *Σχήματος 4.3.6.* Ο πρώτος κλάδος που φαίνεται στο διάγραμμα είναι ο ελαστικός, μέχρι το 5° βήμα φόρτισης στο οποίο και εμφανίζονται οι πρώτες πλαστικοποιήσεις. Αυτό επιβεβαιώνει και την σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων που εξάγεται από το πρόγραμμα *(Σχήμα 4.3.1)*. Τον ελαστικό κλάδο διαδέχεται ο πλαστικός που ακολουθεί την συμπεριφορά που υιοθετήθηκε για τον χάλυβα και περιγράφει τις πλαστικοποιήσεις της ίνας που συνεχίζονται μέχρι το τελευταίο βήμα της φόρτισης. Επιπλέον, από το 16° βήμα και μετά παρατηρείται μια αλλαγή κλίσης του πλαστικού κλάδου, ενδεικτική της αύξησης της δυσκαμψίας της ίνας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αύξηση των δυνάμεων επαφής της ίνας με το σκυρόδεμα, που συμβαίνει σε αυτό ακριβώς το βήμα. Τα σχήματα 4.3.7a και b συγκρινόμενα, δείχνουν την αύξηση στο 16° βήμα, των δυνάμεων επαφής, τόσο ως προς τις τιμές τους, όσο και ως προς το πλήθος τους.



Σχήμα 4.3.6: Καμπύλη δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400 και μηδενικό συντελεστή τριβής

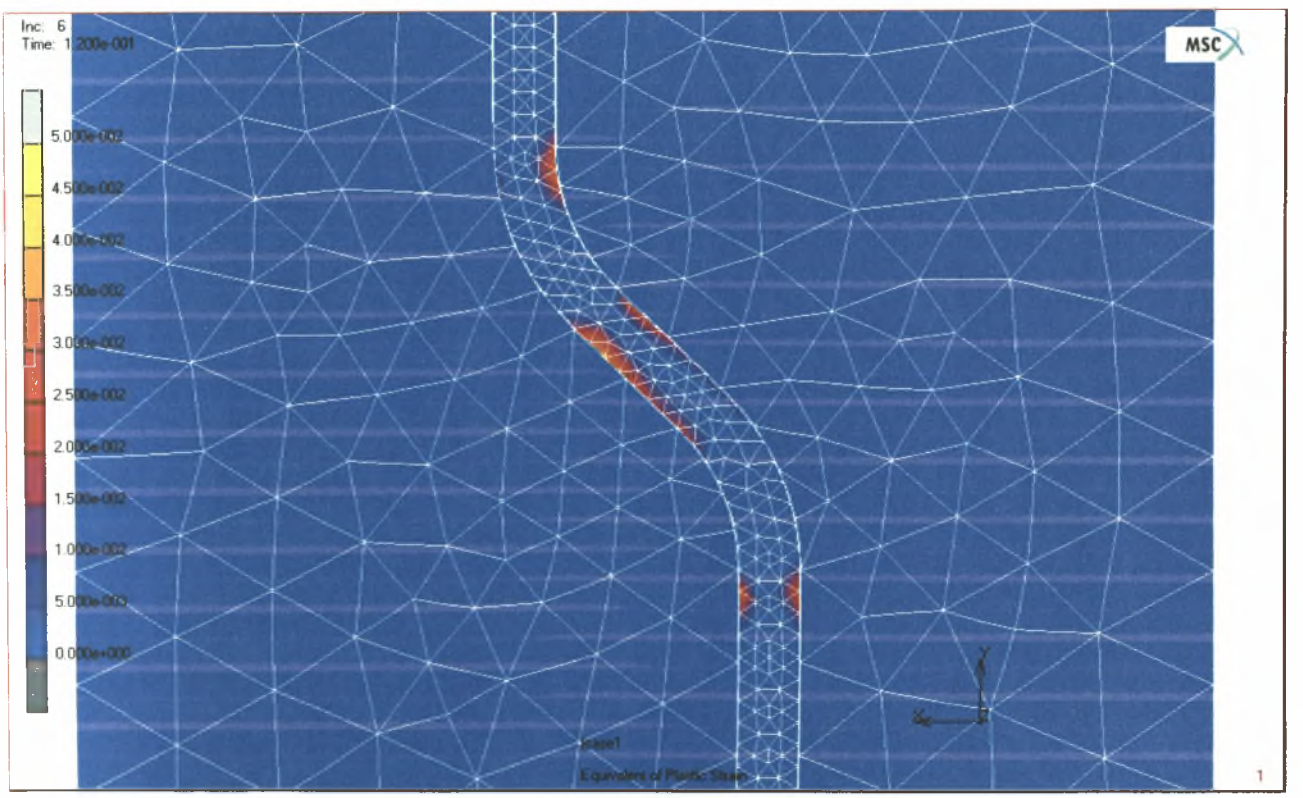
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 4.3.7 : Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων επαφής (a) στο 14ο βήμα φόρτισης, (b) στο 16ο βήμα φόρτισης

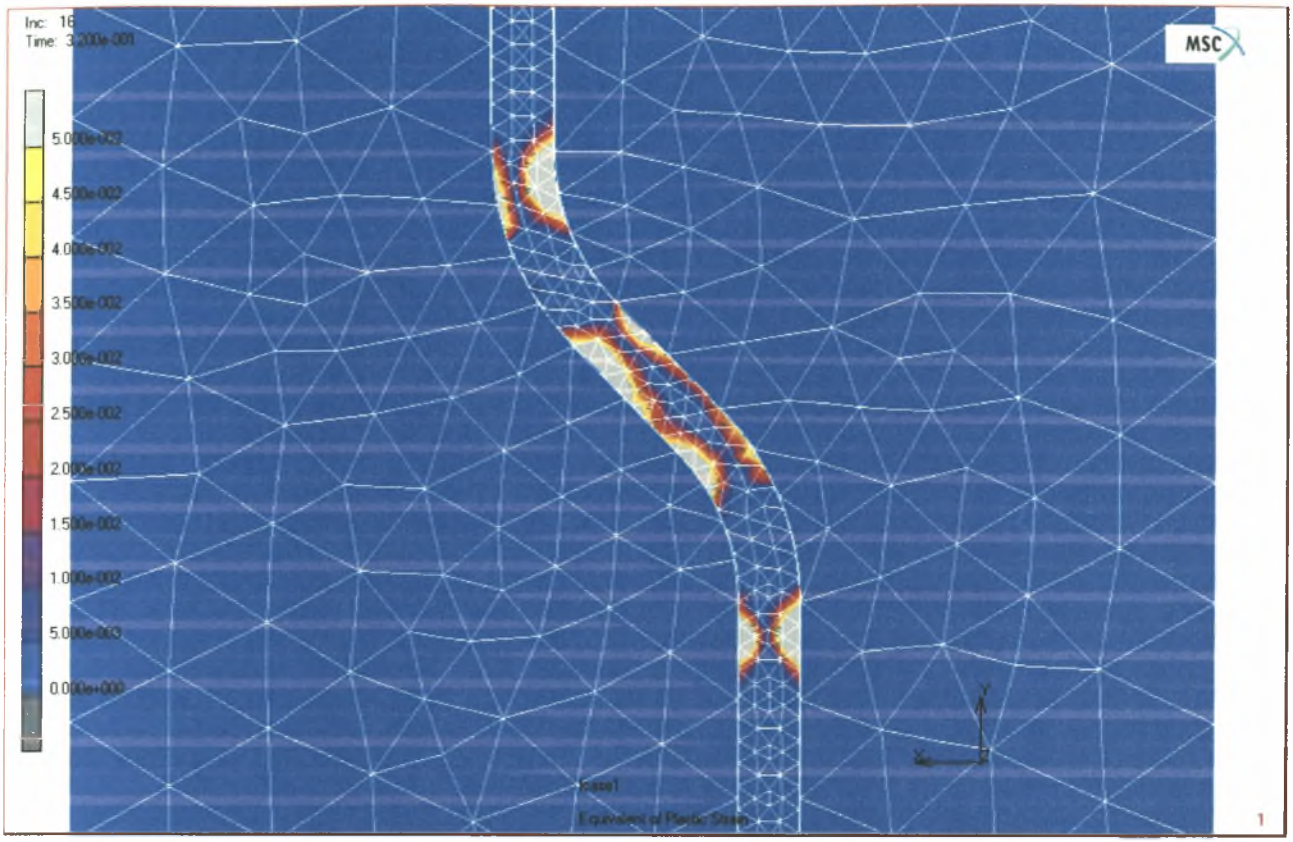
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης έγινε η εισαγωγή του συντελεστή τριβής ως παραμέτρου του φυσικού φαινομένου. Ο συντελεστής τριβής τέθηκε ίσος με 0,3. Οι πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας, σε χαρακτηριστικά βήματα φόρτισης, φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν. Στο *Σχήμα 4.3.8* φαίνονται οι πρώτες πλαστικοποιήσεις που εμφανίζονται στην ίνα στο 6^{ο} βήμα της φόρτισης. Η εικόνα που παρουσιάζεται είναι όμοια με αυτή της ανάλυσης με μηδενικό συντελεστή τριβής (*Σχήμα 4.3.1*). Το φαινόμενο της πλαστικοποίησης της ίνας εξελίσσεται με παρόμοιο με την προηγούμενη περίπτωση τρόπο μέχρι το 33^{ο} βήμα της ανάλυσης. Η μόνη διαφορά είναι πως το κάτω καμπύλο τμήμα δεν πλαστικοποιείται πλήρως (*Σχήμα 4.3.10*). Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη τριβής, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης της ίνας, με αποτέλεσμα οι κόμβοι του κάτω καμπύλου τμήματος να μη μετατοπίζονται επαρκώς, ώστε αυτό να κάμπτεται και να πλαστικοποιείται. Άλλωστε, από το 33^{ο} βήμα φόρτισης και έπειτα, η ίνα σταματά να ολισθαίνει, ενώ το μοναδικό φαινόμενο είναι η παραμόρφωση και η πλήρης πλαστικοποίηση του ανώτερου ευθύγραμμου τμήματος (*Σχήμα 4.3.11*). Στην περίπτωση αυτή, η συνολική επιμήκυνση της ίνας είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη που εμφανίζεται την περίπτωση με μηδενικό συντελεστή τριβής. Ουσιαστικά, η εκτεταμένη πλαστικοποίηση της ίνας συνδέεται άμεσα με την αστοχία της εάν θεωρηθεί μια μέγιστη αποδεκτή τιμή επιμήκυνσης. Τελικά, μετά το 33^{ο} βήμα φόρτισης, η ίνα θα κοπεί και μόνο ένα τμήμα της θα εξολκευθεί, ενώ το υπόλοιπο θα παραμείνει μέσα στη μήτρα σκυροδέματος.

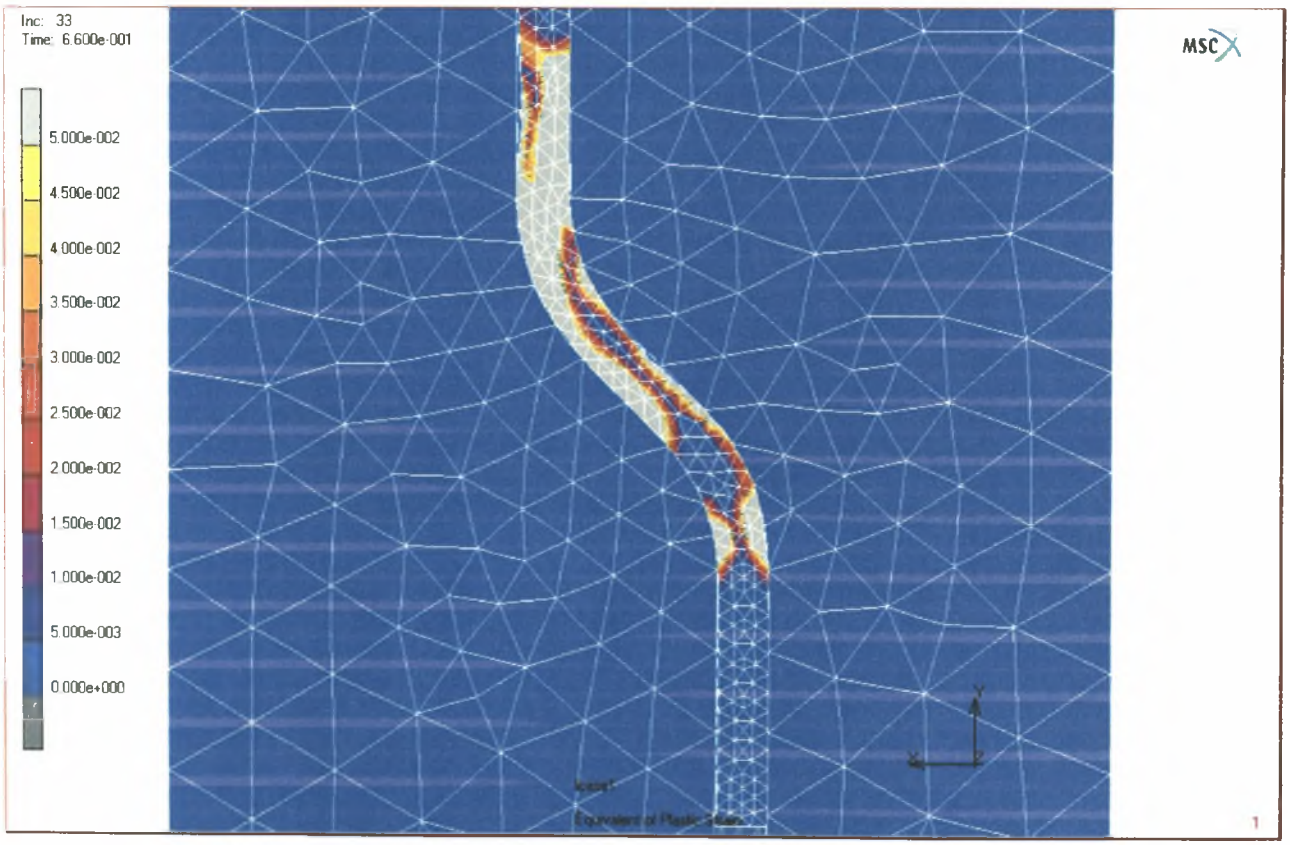


Σχήμα 4.3.8: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 6^{ο} βήμα ανάλυσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

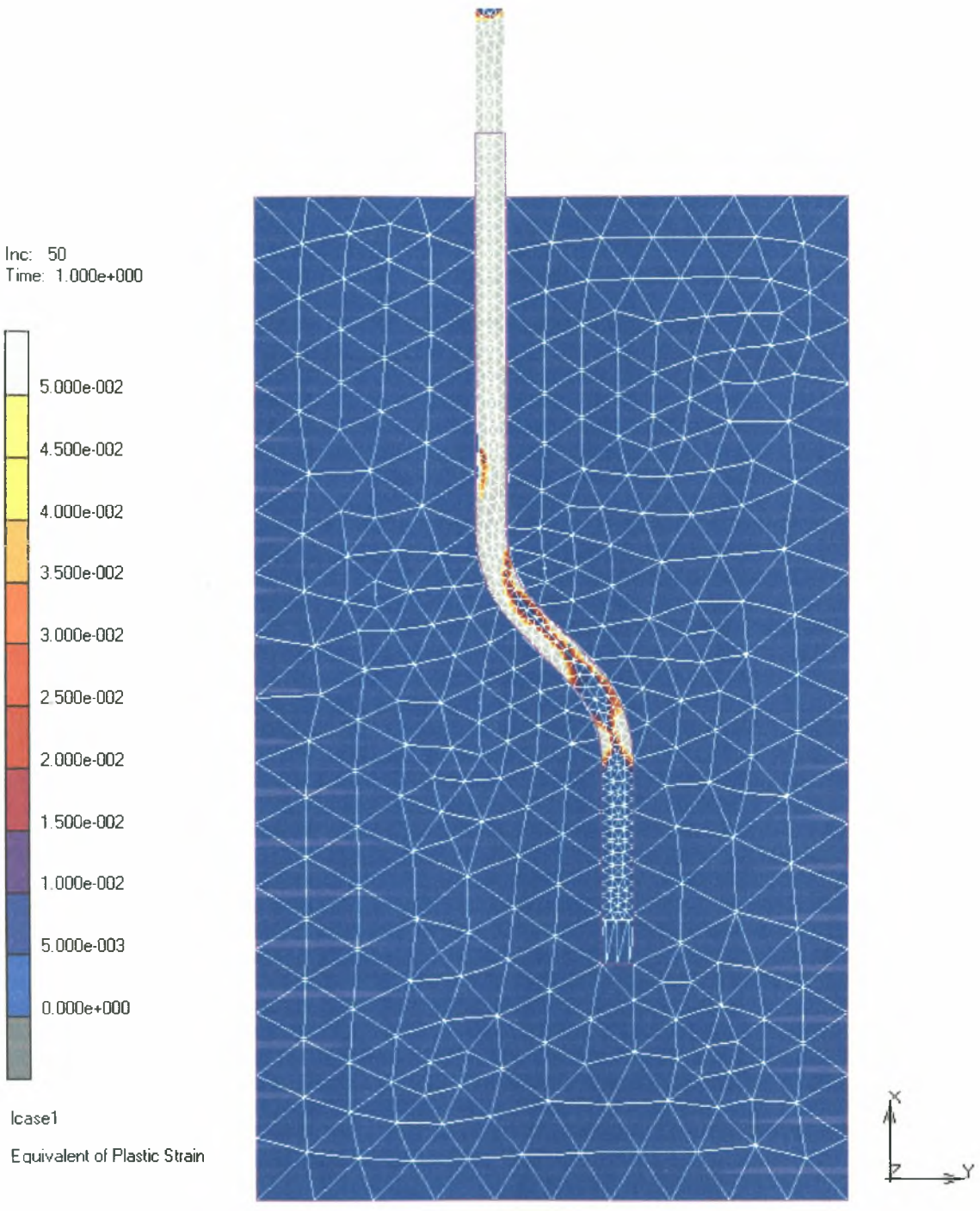


Σχήμα 4.3.9: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 16ο βήμα ανάλυσης



Σχήμα 4.3.10: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 33ο βήμα ανάλυσης

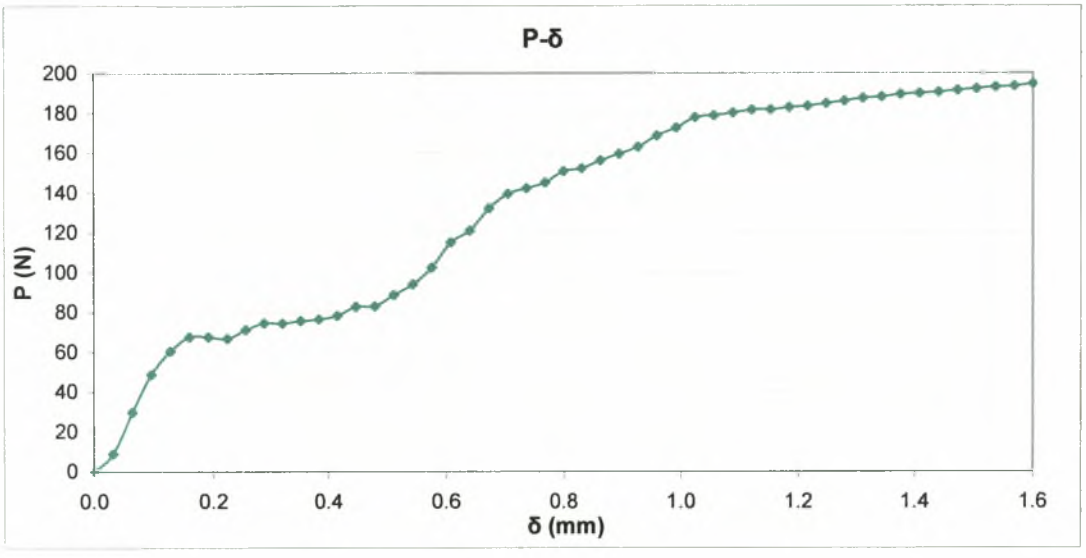
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 4.3.11: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 50° βήμα ανάλυσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Στο *Σχήμα 4.3.12* παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης- μετακίνησης για την περίπτωση συντελεστή τριβής f=0,3. Ο πρώτος κλάδος είναι ο ελαστικός, τον οποίο ακολουθεί ο πλαστικός κλάδος στο 6° βήμα φόρτισης, όπου εμφανίζονται οι πρώτες οι πρώτες πλαστικές παραμορφώσεις. Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, εμφανίζεται μια αύξηση της κλίσης του πλαστικού κλάδου στο 16° βήμα, που οφείλεται στην αύξηση των δυνάμεων επαφής μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος στο βήμα αυτό. Στο 33° βήμα παρατηρείται μια μείωση στην κλίση του διαγράμματος, ενδεικτική της σημαντικής απώλειας της αντοχής του χάλυβα. Η αλλαγή αυτή σχετίζεται με την έναρξη της σταδιακής παραμόρφωσης και πλήρους πλαστικοποίησης του άνω ευθύγραμμου τμήματος της ίνας, που περιγράφθηκε παραπάνω.



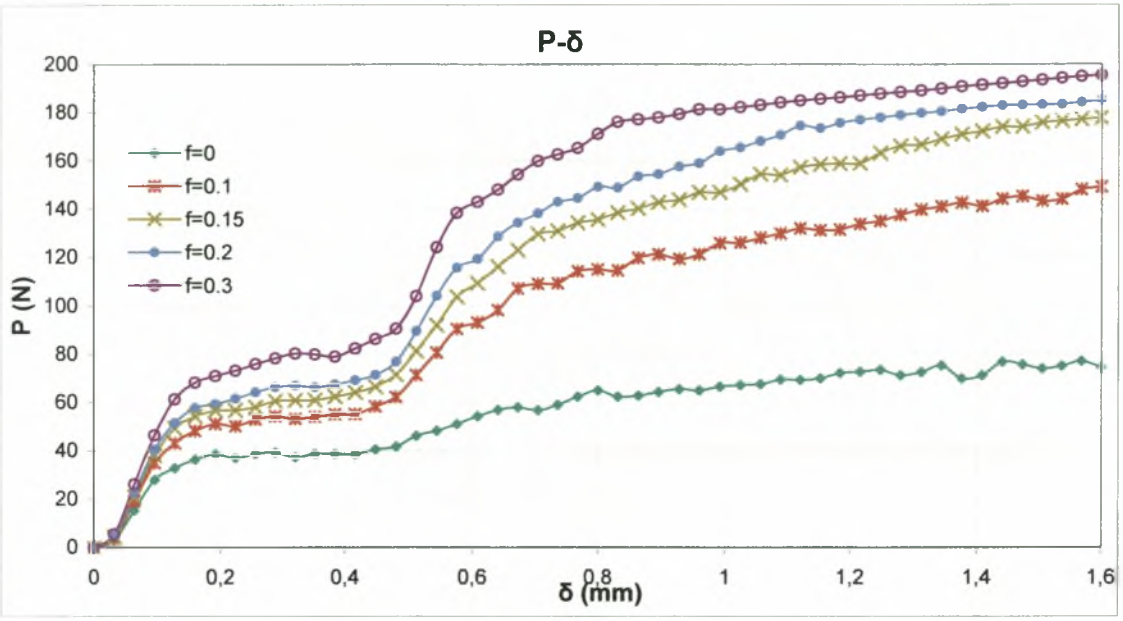
Σχήμα 4.3.12: Καμπύλη δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.3

Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινισθεί ο λόγος για τον οποίο δεν λήφθηκε υπ' όψιν στις αναλύσεις αυτές, η συνάφεια μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος. Έπειτα από υπολογισμούς βρέθηκε πως η τιμή της δύναμης αστοχίας της διεπιφάνειας είναι μόλις το 5% της δύναμης για την οποία αστοχεί η ίνα. Επομένως, η διεπιφάνεια θα αστοχούσε πολύ νωρίς και δεν θα επηρέαζε τη συνολική συμπεριφορά της ίνας κατά την εξόλκευση. Για απλοποιητικούς λοιπόν λόγους, δεν έγινε η προσομοίωση της διεπιφάνειας χάλυβα – σκυροδέματος.

Στη συνέχεια έγινε διερεύνηση σχετικά με το θεωρούμενο συντελεστή τριβής. Πραγματοποιήθηκαν δηλαδή αναλύσεις για συντελεστή τριβής f=0.1 , f=0.15 και f=0.2. Στο συγκριτικό διάγραμμα του *Σχήματος 4.3.13* παρουσιάζονται οι καμπύλες P-δ που προέκυψαν από τις αναλύσεις για τους διάφορους συντελεστές τριβής. Παρατηρούμε πως για f=0.1 και για f=0.15 η ίνα εξολκεύεται από τη μήτρα σκυροδέματος όπως συμβαίνει και για μηδενικό

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

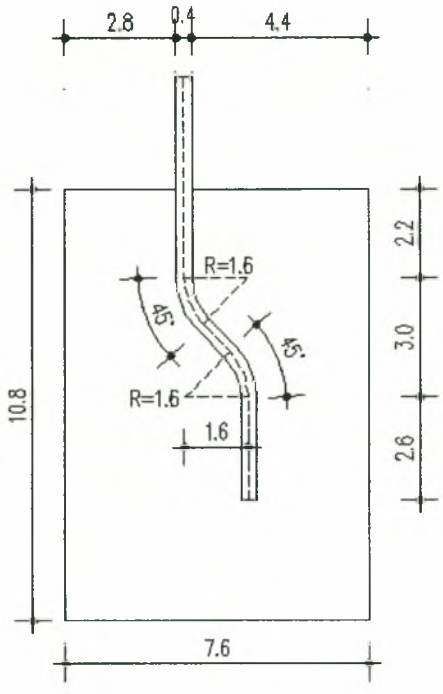
συντελεστή τριβής, αλλά οι απαιτούμενες τιμές της δύναμης P είναι μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής τριβής. Για f=0.2 η ίνα αστοχεί λόγω μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων, όπως και στην περίπτωση που ο συντελεστής τριβής είναι ίσος με 0.3. Επομένως, η τιμή του συντελεστή τριβής που κάθε φορά υιοθετείται, παίζει σημαντικό ρόλο στον τύπο της αστοχίας της ίνας.



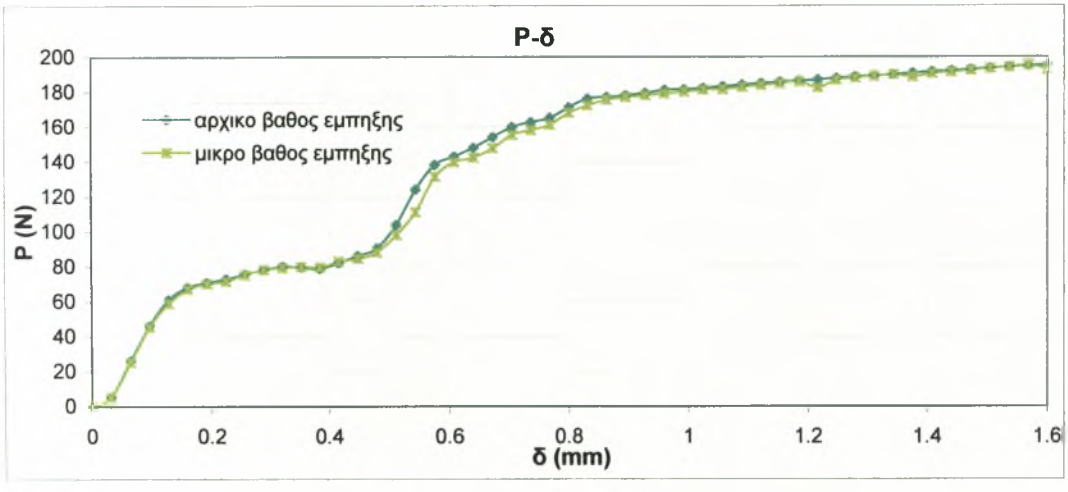
Σχήμα 4.3.13: Συγκριτικές καμπύλες P-δ για τις διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής

Κρίθηκε απαραίτητη η διερεύνηση της επιρροής του βάθους έμπηξης της ίνας στη γενικότερη συμπεριφορά της κατά τη δοκιμή εξόλκευσης. Για τον σκοπό αυτό, μειώθηκε το ύψος της μήτρας σκυροδέματος κατά 2mm, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.3.14* . Η καμπύλη δύναμης μετακίνησης (*Σχήμα 4.3.15)*που προέκυψε από την ανάλυση αυτή, ταυτίζεται απόλυτα με την αντίστοιχη καμπύλη της ανάλυσης με το μεγαλύτερο βάθος έμπηξης. Γίνεται έτσι προφανές πως η διαφοροποίηση του βάθους έμπηξης της συγκεκριμένης ίνας δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά της.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 4.3.14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου με μειωμένο βάθος έμπηξης της ίνας



Σχήμα 4.3.15: Καμπύλες δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400, συντελεστή τριβής f=0.3 και δύο διαφορετικά βάθη έμπηξης

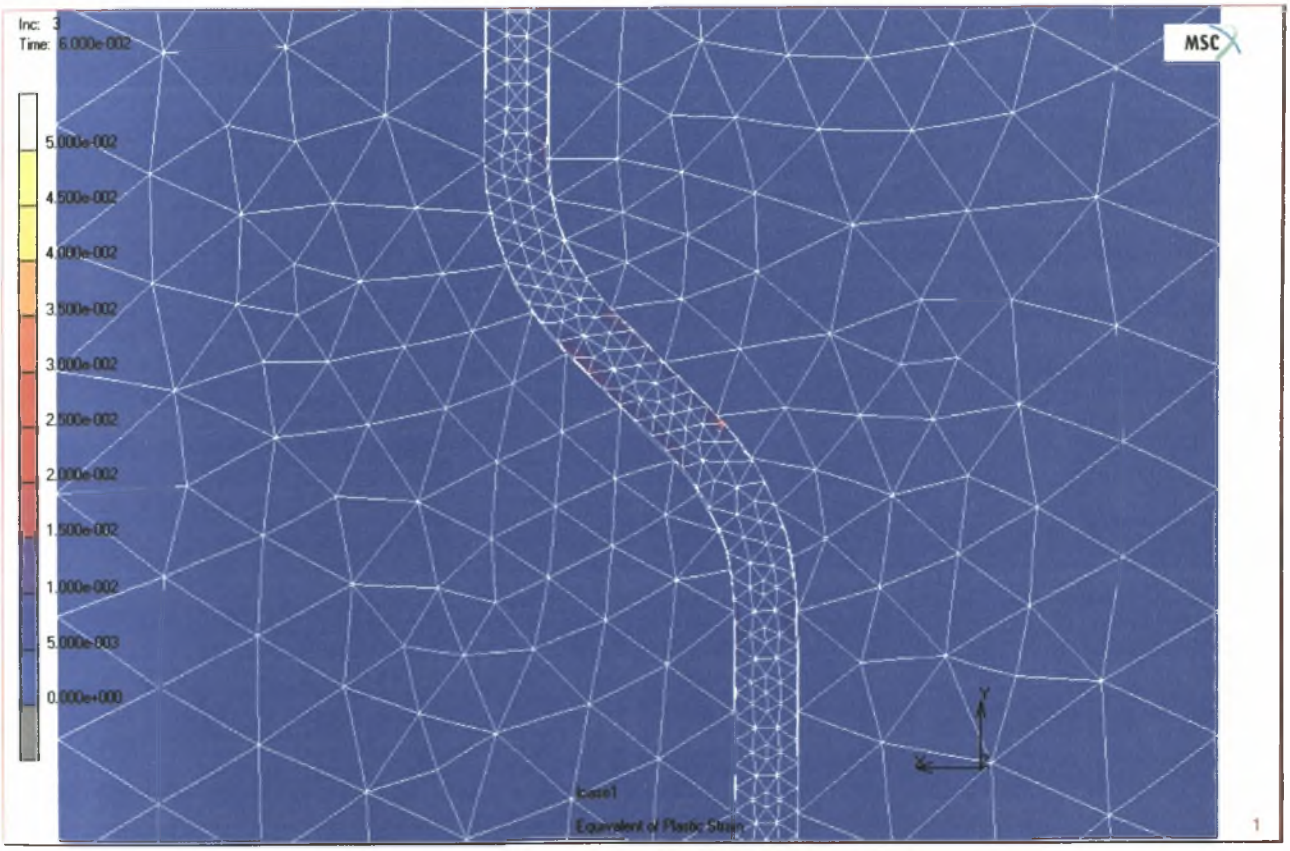
4.4 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης παραμετρικής ανάλυσης σχετικά με την ποιότητα του χάλυβα

Με σκοπό τη σύγκριση πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις οποίες ο χάλυβας τύπου S1400 αντικαταστάθηκε από χάλυβα τύπου S500. Έγιναν αναλύσεις τόσο για μηδενικό συντελεστή τριβής, όσο και για συντελεστή τριβής ίσο με 0,3.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

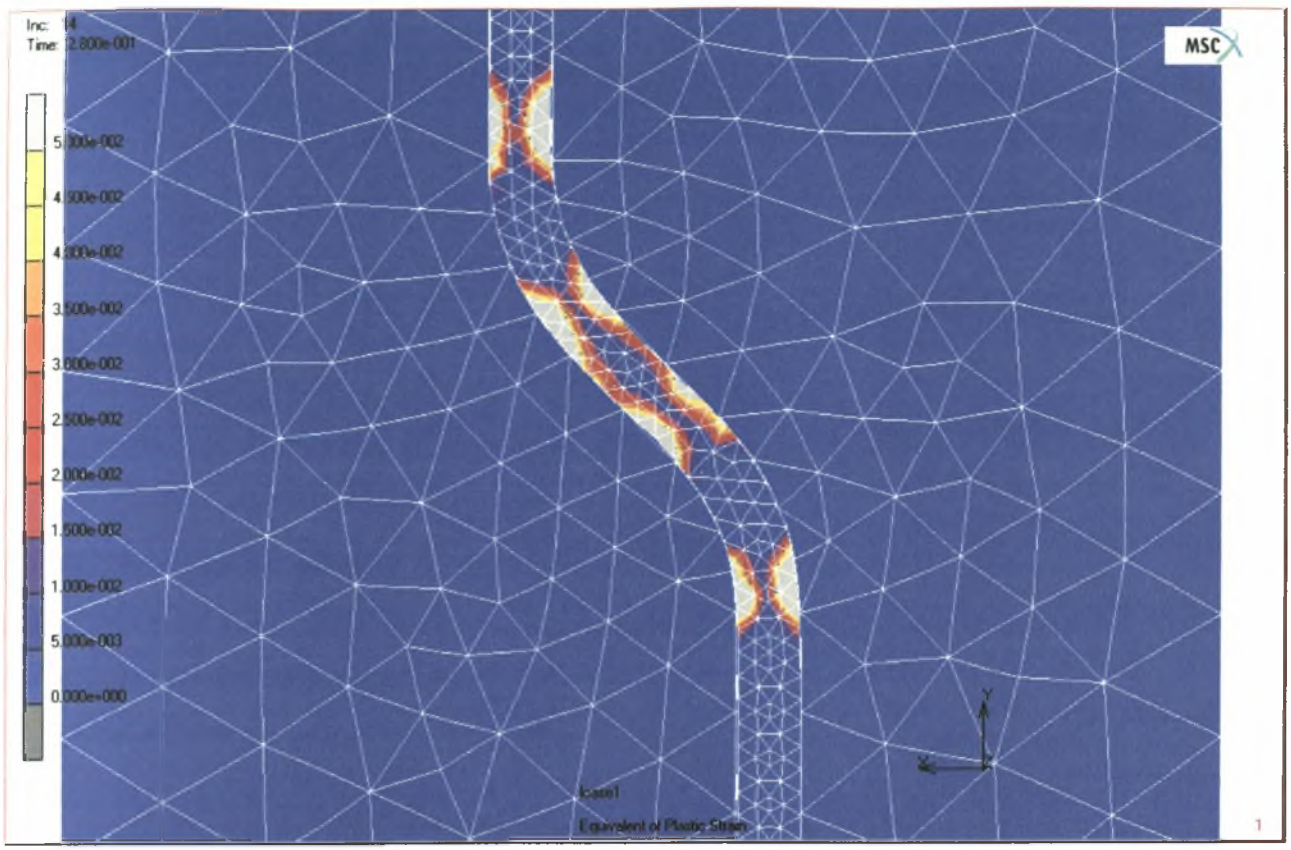
Παρατηρώντας τις εικόνες που ακολουθούν, για ανάλυση με μηδενικό συντελεστή τριβής, συμπεραίνουμε πως η εξέλιξη του φαινομένου είναι όμοια με εκείνη για χάλυβα S1400. Συγκεκριμένα, στο 3° βήμα φόρτισης εμφανίζονται οι πρώτες πλαστικοποιήσεις (*Σχήμα 4.4.1*), που αντιστοιχούν στην μετάβαση από τον ελαστικό στον πλαστικό κλάδο του διαγράμματος (*Σχήμα 4.4.4*). Στο 14° βήμα έχουν ήδη δημιουργηθεί οι πρώτες πλαστικές αρθρώσεις στα τμήματα που αλλάζουν καμπυλότητα (*Σχήμα 4.4.2*). Ακόμη, στο βήμα αυτό εμφανίζεται και η αύξηση της κλίσης του πλαστικού κλάδου της καμπύλης P- δ, που οφείλεται στην αύξηση των τιμών και του πλήθους των δυνάμεων επαφής (*Σχήμα 4.4.6a,b*). Η πλαστικοποίηση της ίνας συνεχίζεται μέχρι το 50° βήμα της φόρτισης (*Σχήμα 4.4.3*) και τελικά η ίνα στην περίπτωση αυτή εξολκεύεται από τη μήτρα σκυροδέματος.

Παρ' όλο που η γενικότερη συμπεριφορά της ίνας κατά τη δοκιμή εξόλκευσης είναι ίδια και για τους δύο τύπους του χάλυβα, S1400 και S500, παρουσιάζονται κάποιες διαφορές που φαίνονται στο συγκριτικό διάγραμμα του *Σχήματος 4.4.5*. Είναι προφανής η διαφορά στις τιμές της δύναμης P, οι οποίες είναι πολύ μεγαλύτερες για χάλυβα S1400. Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο, ο χάλυβας S500 διαρρέει πολύ νωρίτερα από τον χάλυβα S1400 και μάλιστα, για πολύ μικρότερη τιμή της δύναμης.

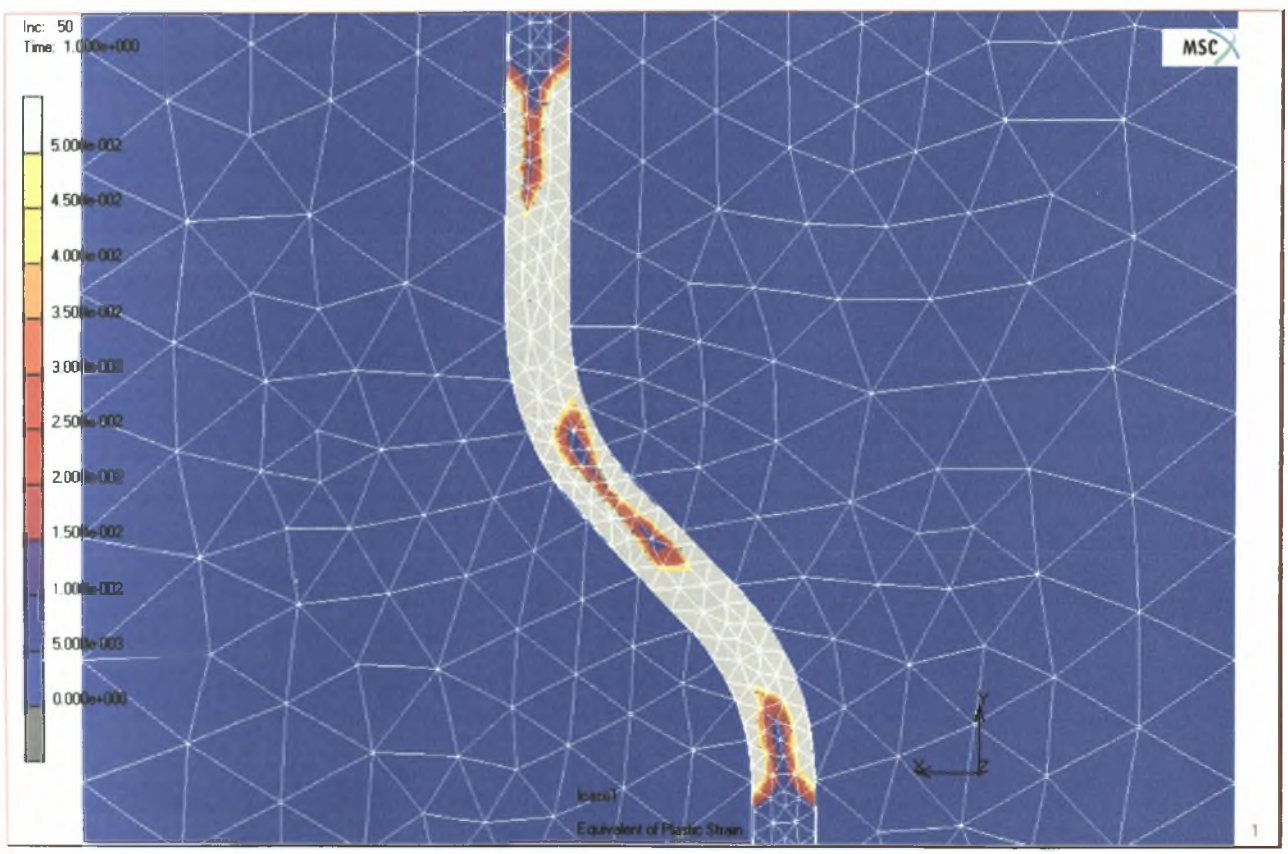


Σχήμα 4.4.1: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 3° βήμα ανάλυσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

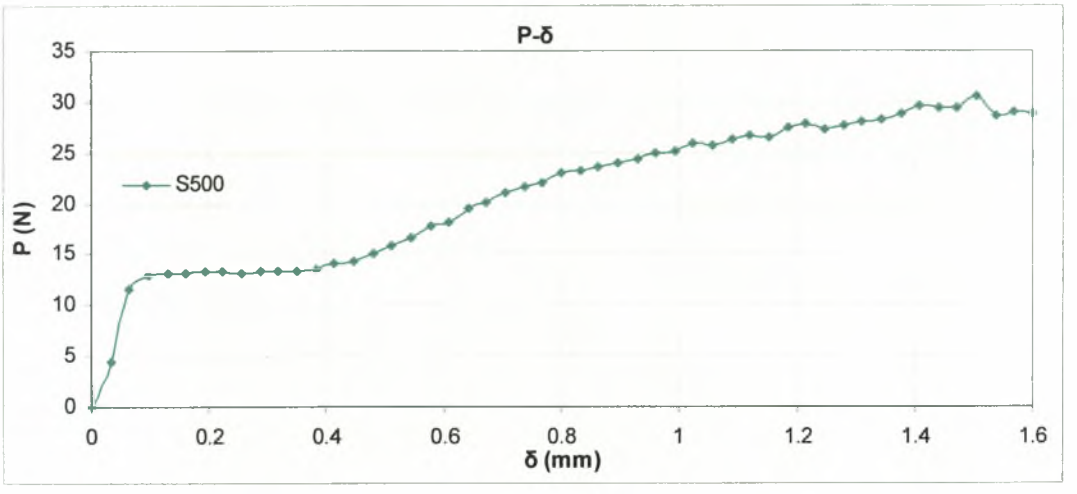


Σχήμα 4.4.2: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 14° βήμα ανάλυσης

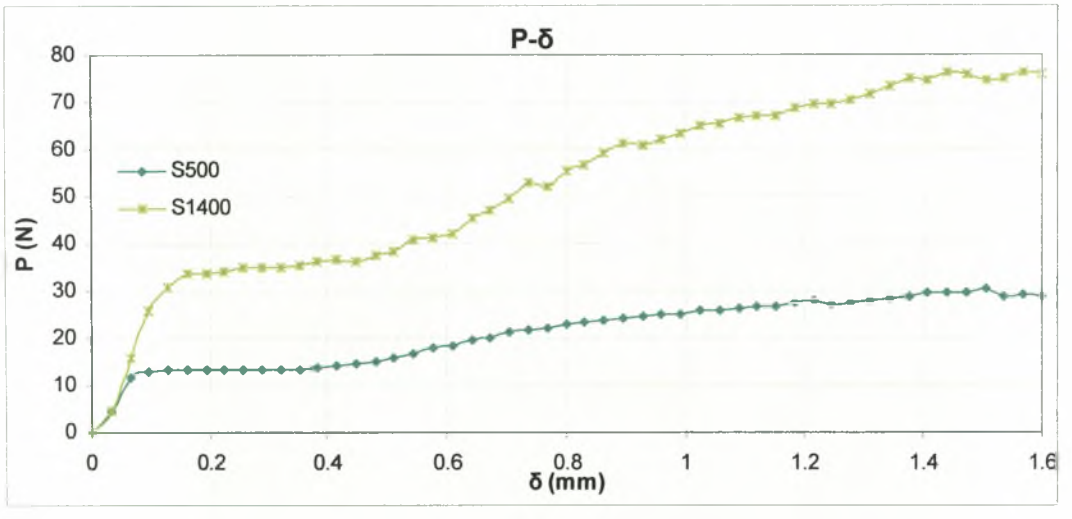


Σχήμα 4.4.3: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 50° βήμα ανάλυσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

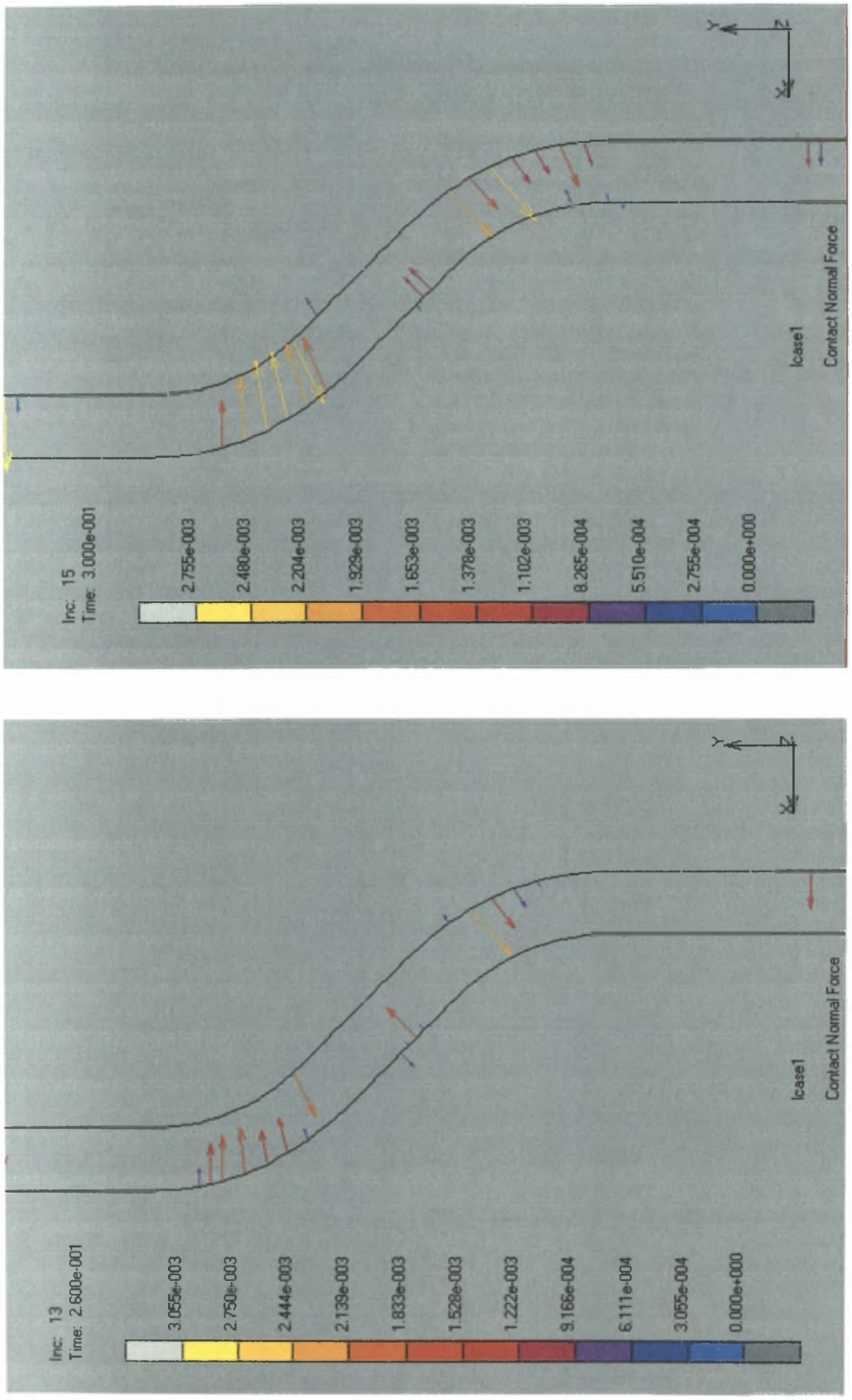


Σχήμα 4.4.4: Καμπύλη δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S500 και μηδενικό συντελεστή τριβής



Σχήμα 4.4.5: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400 και S500, με μηδενικό συντελεστή τριβής

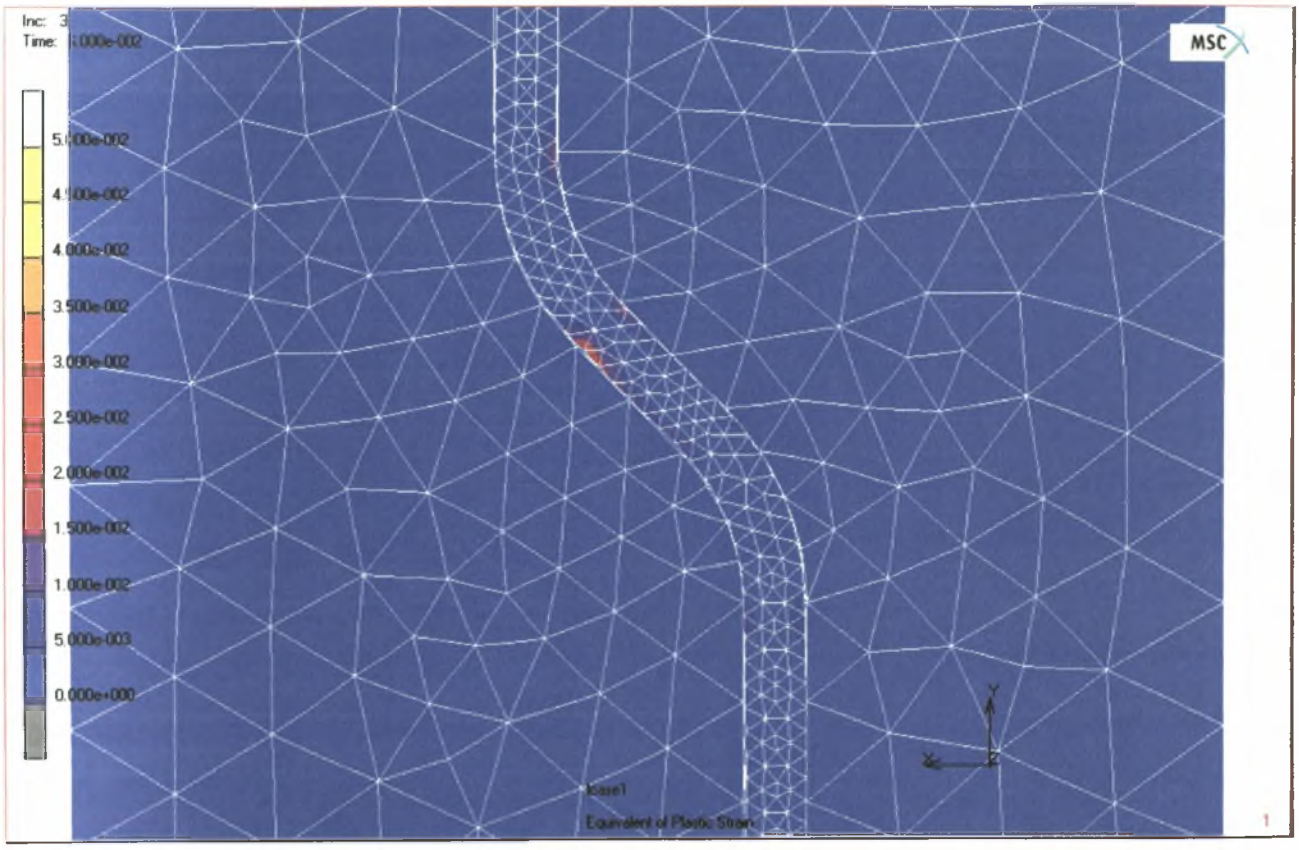
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 4.4.6: Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων επαφής a)στο 13ο βήμα φόρτισης, b)στο 15ο βήμα φόρτισης

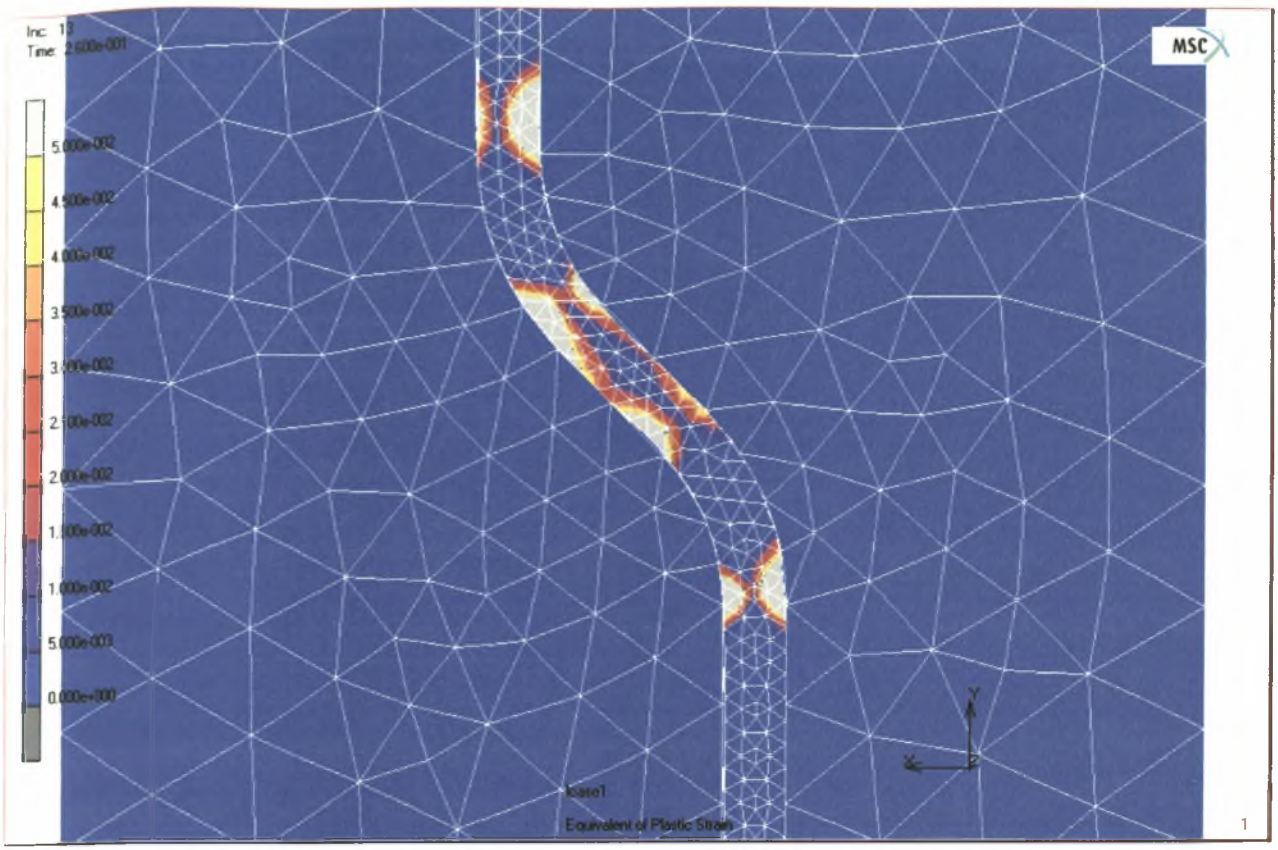
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Όπως στην περίπτωση της ανάλυσης με μηδενικό συντελεστή τριβής, έτσι και για συντελεστή τριβής f=0.3, η ίνα από χάλυβα S500 εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά με αυτή της ίνας από χάλυβα S1400. Η εξέλιξη των πλαστικοποιήσεων παρουσιάζεται διαδοχικά στα σχήματα που ακολουθούν. Από το 29^{ο} βήμα της φόρτισης και έπειτα, η ίνα σταματά να ολισθαίνει, πλαστικοποιείται πλήρως το άνω ευθύγραμμο τμήμα της και τελικά αστοχεί πριν προλάβει να εξολκευθεί από τη μήτρα σκυροδέματος. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης του *Σχήματος 4.4.10* , το οποίο έχει την ίδια μορφή με το αντίστοιχο διάγραμμα για χάλυβα S1400. Στο συγκριτικό διάγραμμα (*Σχήμα 4.4.11*) φαίνεται πως απαιτείται πολύ μικρότερη δύναμη για την πλαστικοποίηση αλλά και για την αστοχία της ίνας από χάλυβα S500.

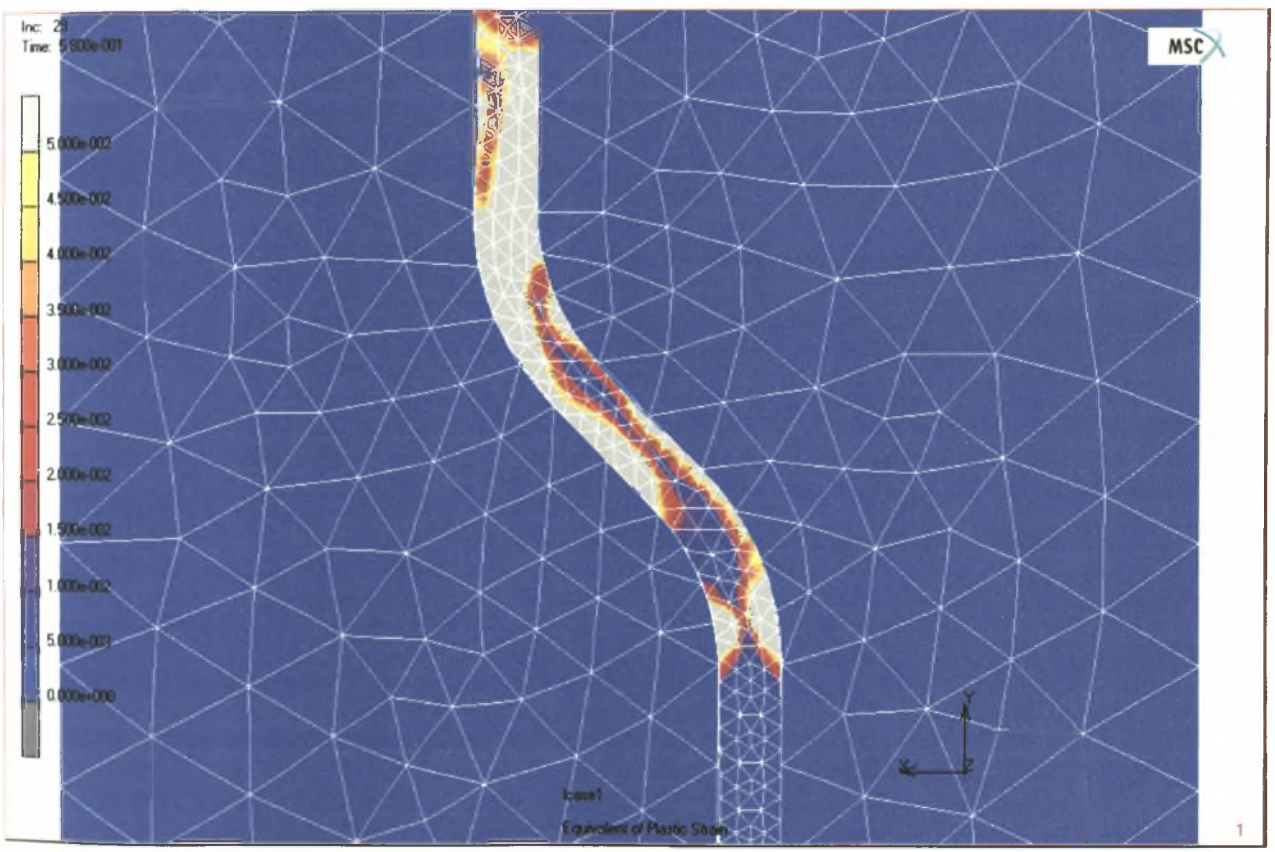


Σχήμα 4.4.7: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 3^{ο} βήμα ανάλυσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

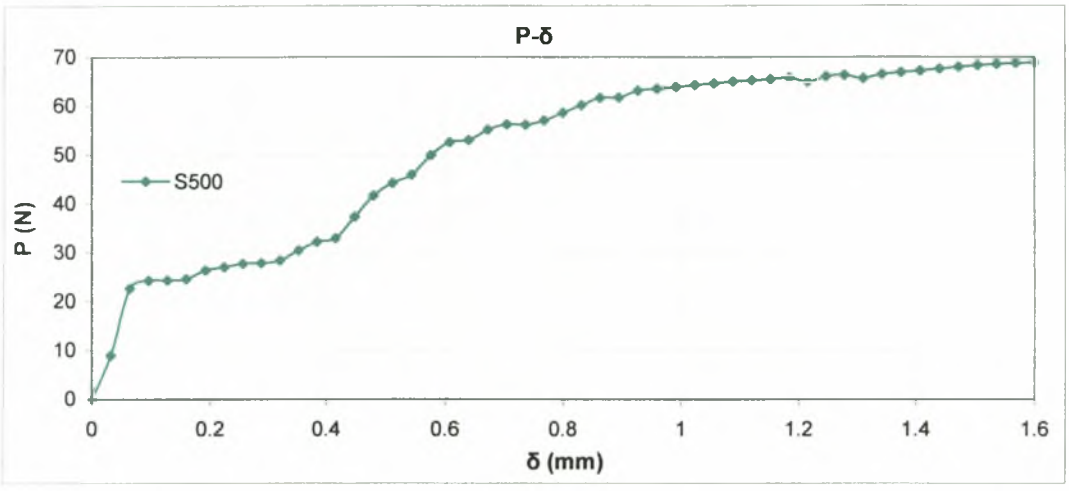


Σχήμα 4.4.8: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 13ο βήμα ανάλυσης

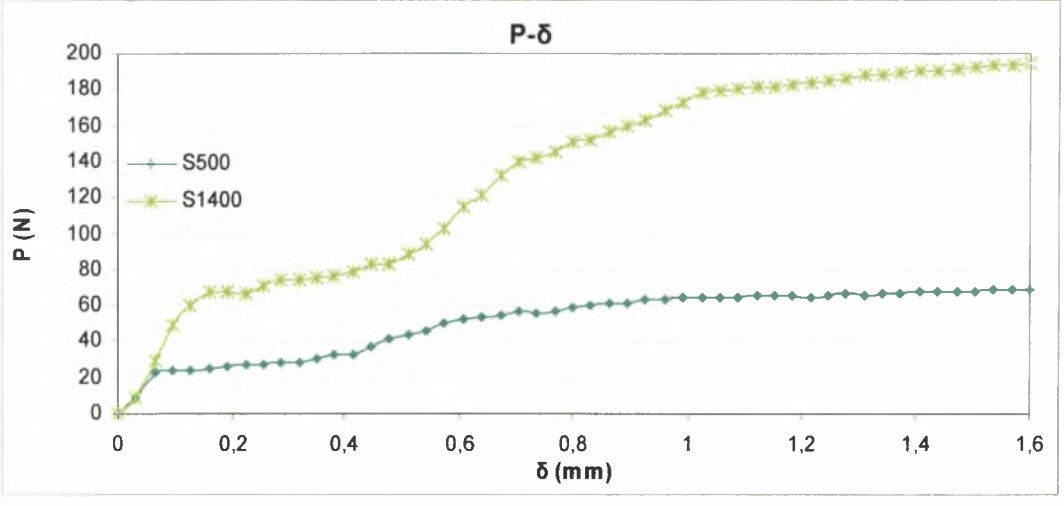


Σχήμα 4.4.9: Πλαστικές παραμορφώσεις στο 29ο βήμα ανάλυσης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 4.4.10: Καμπύλη δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S500 και συντελεστή τριβής f=0.3



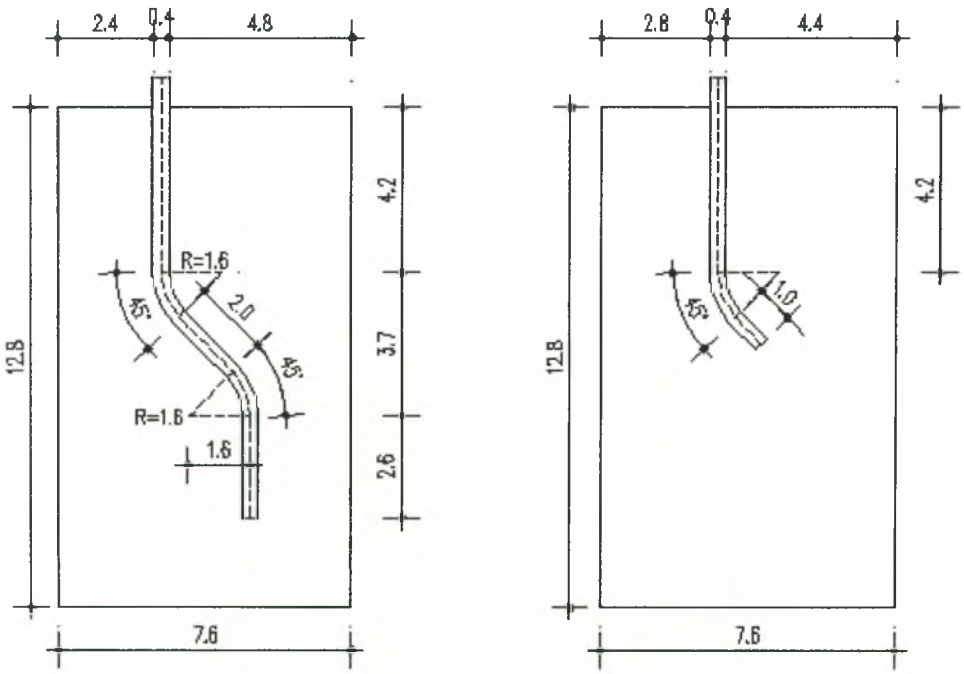
Σχήμα 4.4.11: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400 και S500, με συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5.1 Παραμετρική ανάλυση τρισδιάστατου μοντέλου σχετικά με τη γεωμετρία της ίνας

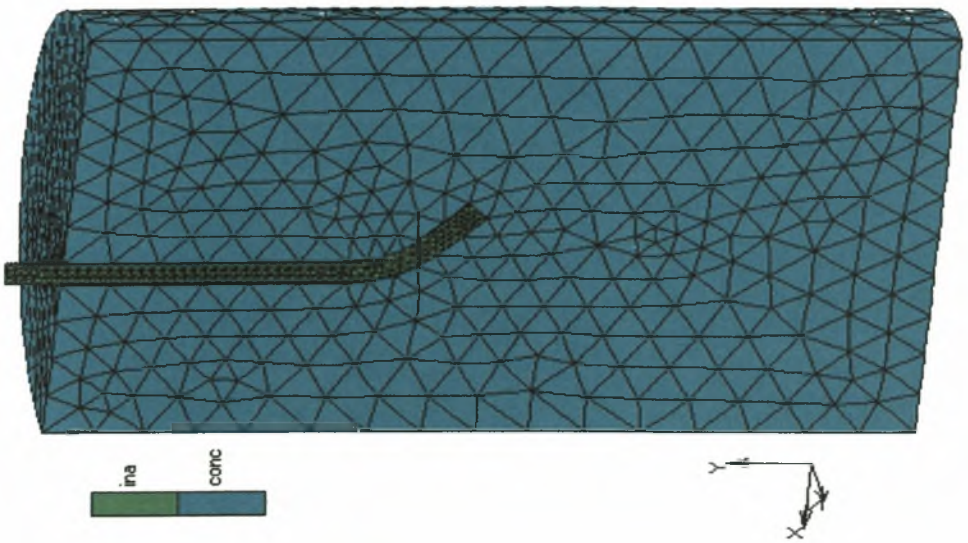
Με σκοπό τη διερεύνηση της σημασίας που έχει στη διαδικασία εξόλκευσης η γεωμετρία της ίνας και ειδικότερα ο μηχανισμός αγκύρωσής της, έγιναν δύο επιπλέον παραμετρικές αναλύσεις. Στην πρώτη διπλασιάστηκε το μήκος του κεκλιμένου ευθύγραμμου τμήματος, ενώ στη δεύτερη αφαιρέθηκε σχεδόν ολόκληρος ο μηχανισμός αγκύρωσης. Οι διαστάσεις της μήτρας σκυροδέματος παρέμειναν οι ίδιες. Τα μοντέλα αυτά απεικονίζονται στο *Σχήμα 5.1.1.*



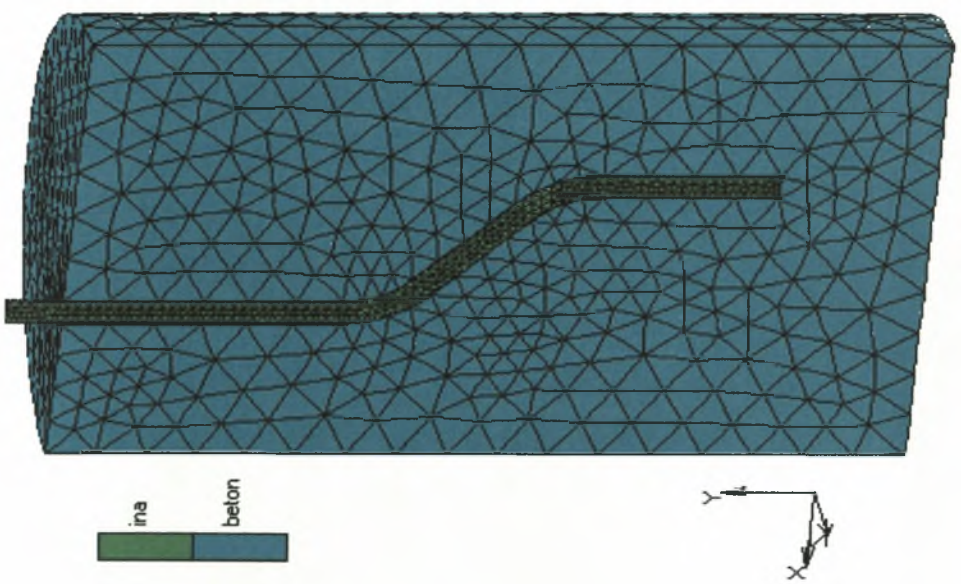
Σχήμα 5.1.1: α) Δεύτερη γεωμετρία, b) Τρίτη γεωμετρία

Οι συνοριακές συνθήκες, η συνθήκη φόρτισης, οι ιδιότητες των υλικών και οι συνθήκες επαφής παρέμειναν ίδιες με τις αντίστοιχες της πρώτης γεωμετρίας. Ο τρόπος διακριτοποίησης καθώς και ο τύπος των πεπερασμένων στοιχείων παρέμεινε επίσης ο ίδιος. Μετά τη διακριτοποίηση, για τη δεύτερη γεωμετρία δημιουργήθηκαν συνολικά 2665 πεπερασμένα στοιχεία με ιδιότητες χάλυβα και 6932 στοιχεία με ιδιότητες σκυροδέματος. Αντίστοιχα, για την τρίτη γεωμετρία δημιουργήθηκαν συνολικά 1717 πεπερασμένα στοιχεία για την ίνα και 6020 στοιχεία για την προσομοίωση της μήτρας σκυροδέματος. Η μορφή των μοντέλων μετά τη διακριτοποίηση παρουσιάζεται στα *Σχήματα 5.1.2και 5.1.3.*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 5.1.3 : Τρίτη γεωμετρία

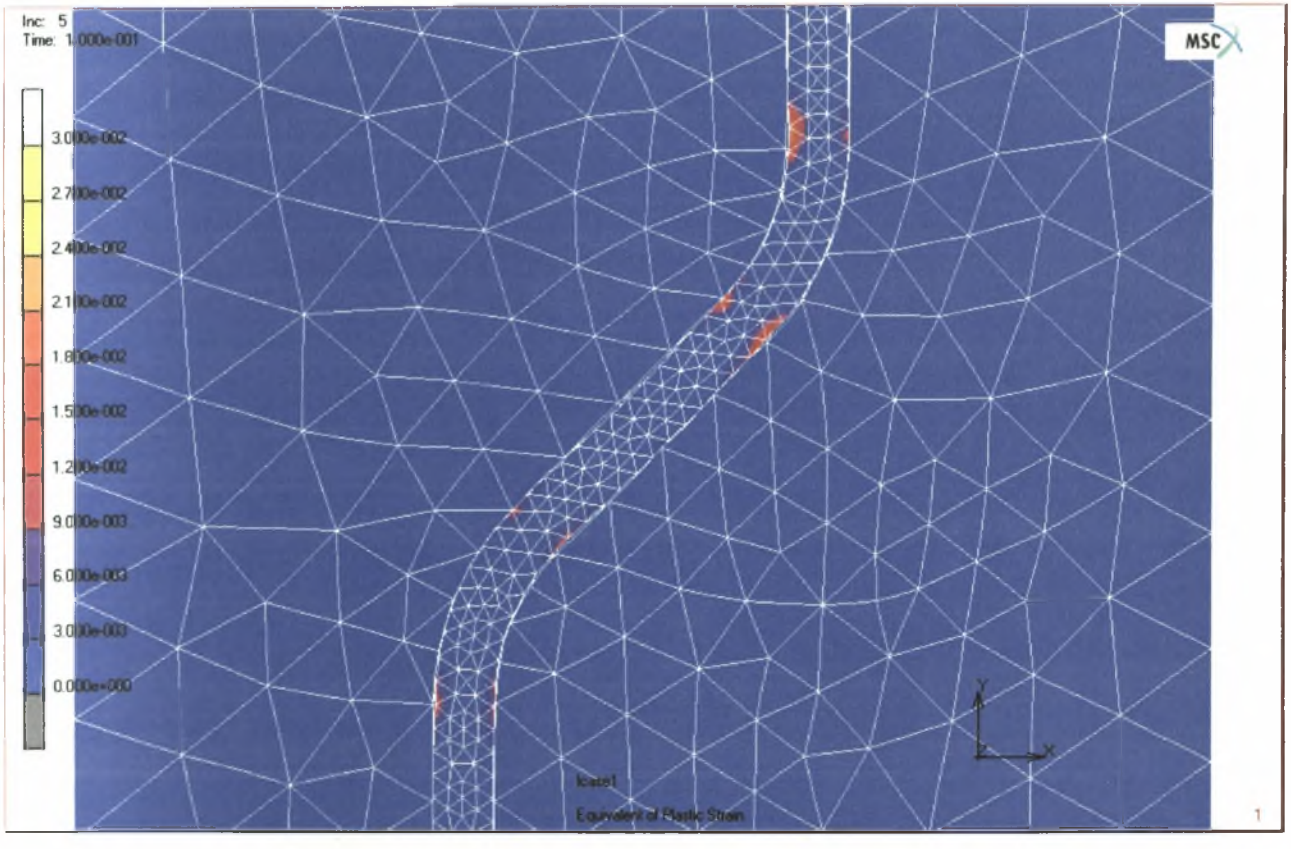


Σχήμα 5.1.2 : Δεύτερη γεωμετρία

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

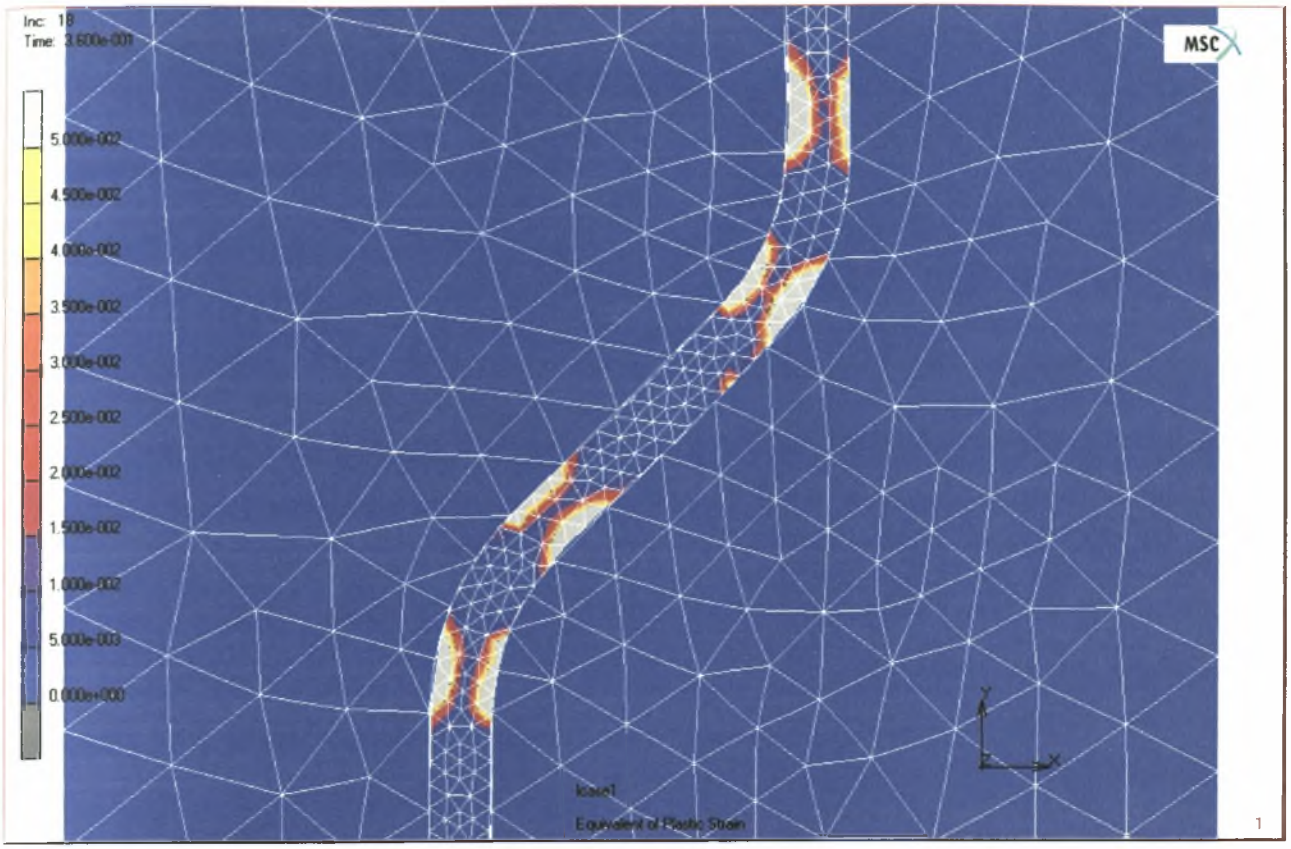
5.2 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης για τη δεύτερη γεωμετρία

Όπως για την αρχική γεωμετρία της ίνας, έτσι και για τη δεύτερη αυτή γεωμετρία, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για χάλυβα S1400 και για τις περιπτώσεις με μηδενικό συντελεστή τριβής και με συντελεστή f=0.3. Στα παρακάτω σχήματα εμφανίζεται η εξέλιξη των πλαστικοποιήσεων, η οποία είναι ίδια με εκείνη της αρχικής γεωμετρίας της ίνας. Και αυτή τη φορά η ίνα τελικά εξολκεύεται από τη μήτρα σκυροδέματος. Η καμπύλη συμπεριφοράς της ίνας (*Σχήμα 5.2.5*) δείχνει πως στο 5° βήμα φόρτισης περνάμε από την ελαστική στην πλαστική κατάσταση, ενώ στο 18° βήμα αυξάνεται η δυσκαμψία της ίνας που οφείλεται στην αύξηση των δυνάμεων επαφής. Στο συγκριτικό διάγραμμα (*Σχήμα 5.2.6*) παρατηρούμε πως οι καμπύλες δύναμης-μετακίνησης για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες της ίνας συμπίπτουν απόλυτα. Οι πλαστικές αρθρώσεις αρχίζουν να δημιουργούνται για την ίδια τιμή της δύναμης και το ίδιο συμβαίνει για την αλλαγή κλίσης του διαγράμματος. Από την ταύτιση αυτή των καμπυλών εξάγουμε το συμπέρασμα πως η διαφοροποίηση στο μήκος του κεκλιμένου ευθύγραμμου τμήματος της ίνας δεν επηρεάζει το μηχανισμό αγκύρωσης και τη συνολική συμπεριφορά της κατά την εξόλκευση.

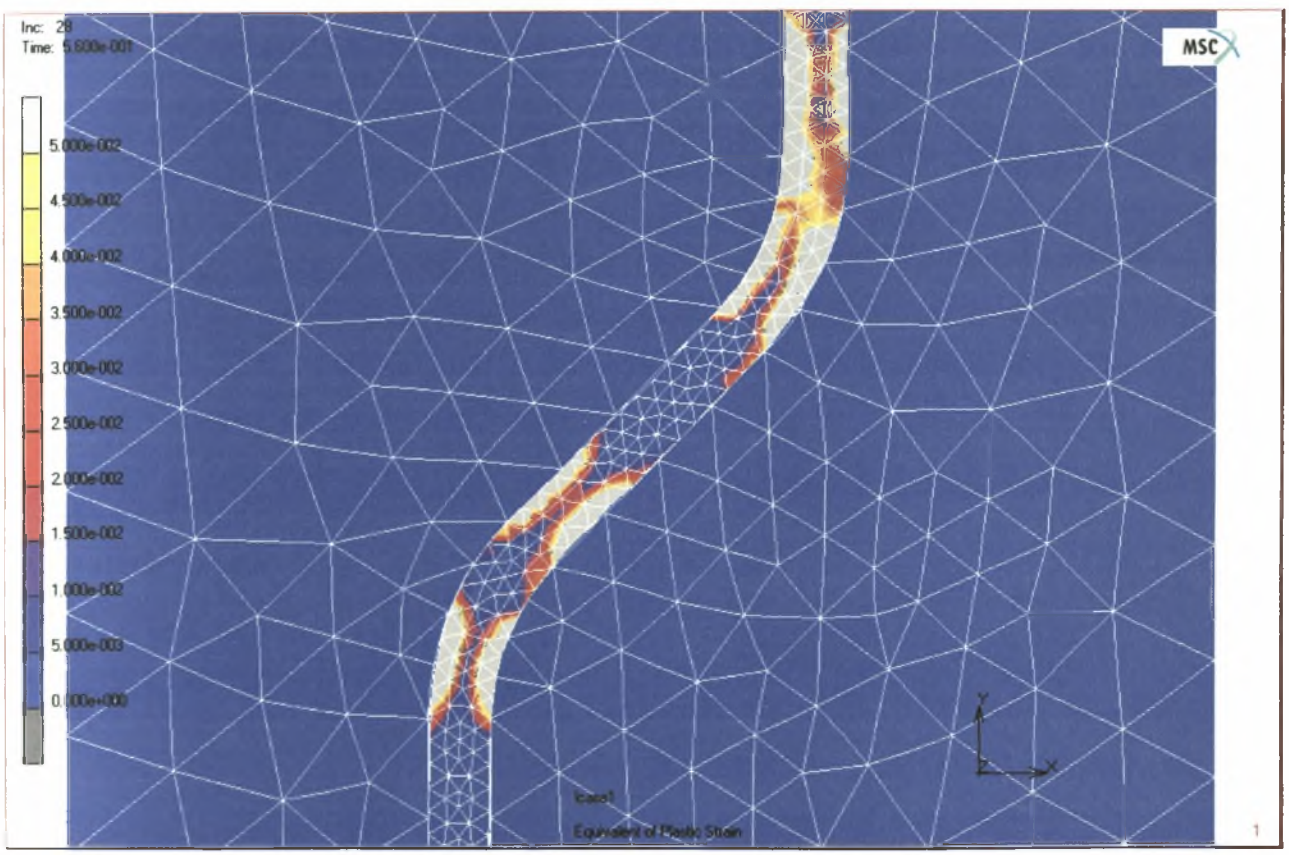


Σχήμα 5.2.1: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 5° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

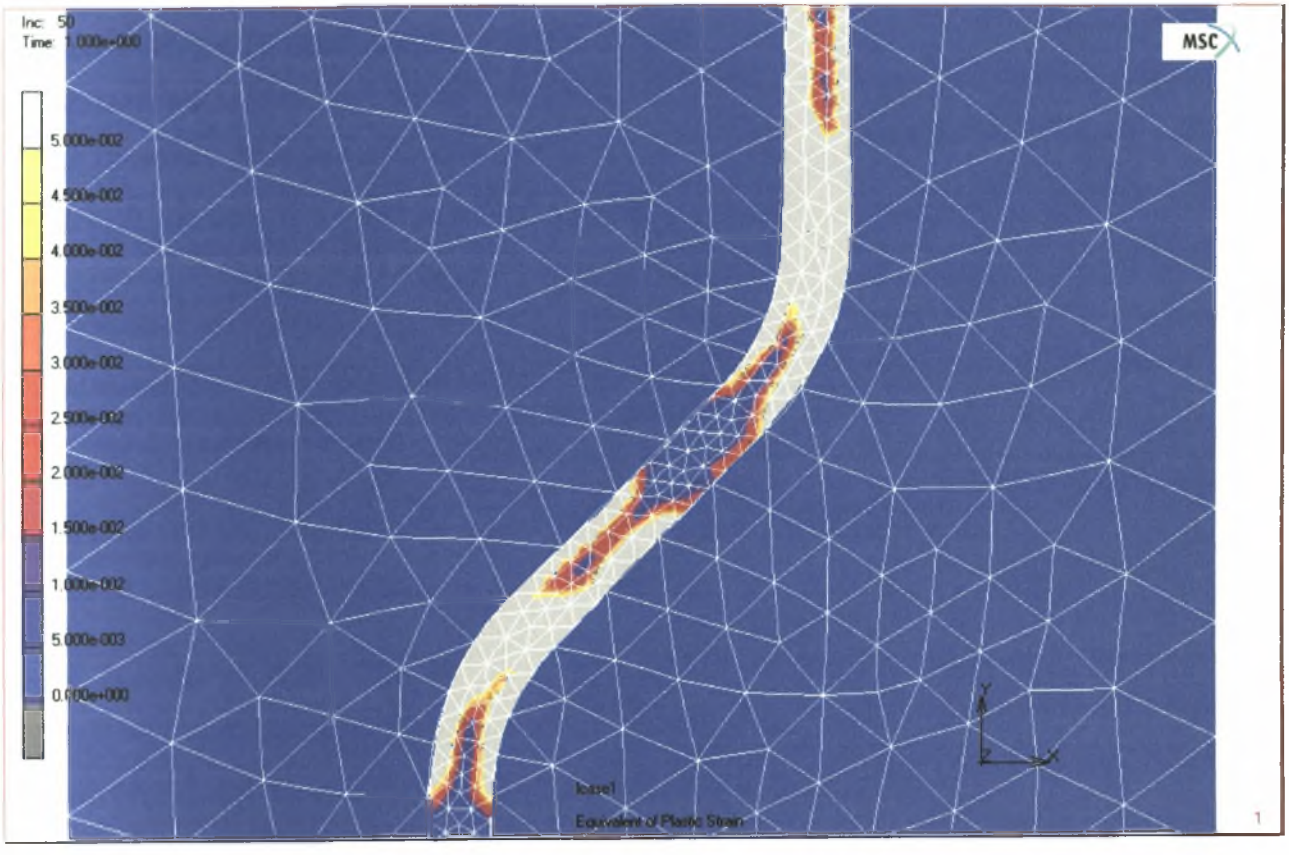


Σχήμα 5.2.2: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 18° βήμα φόρτισης



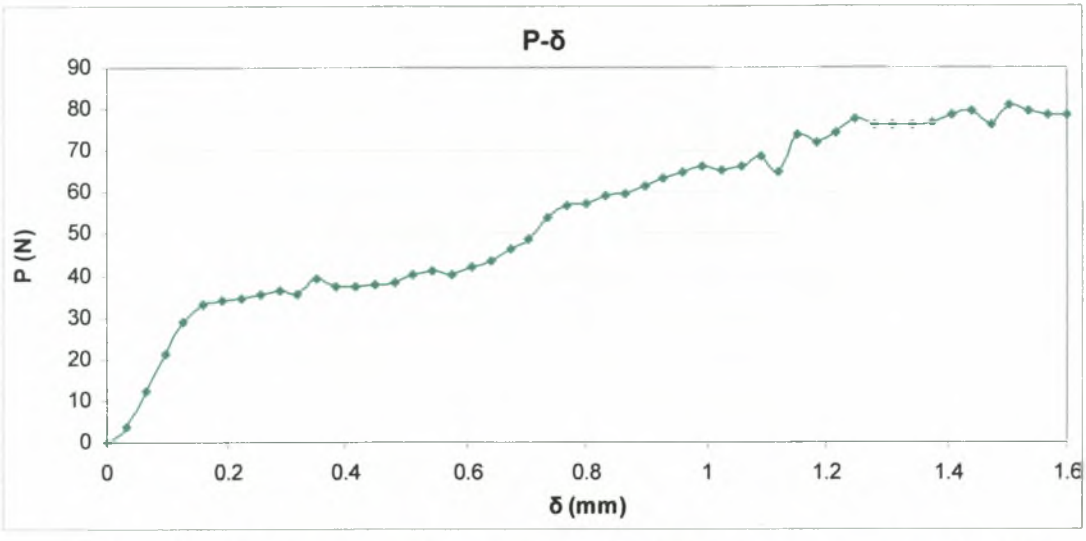
Σχήμα 5.2.3: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 28° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

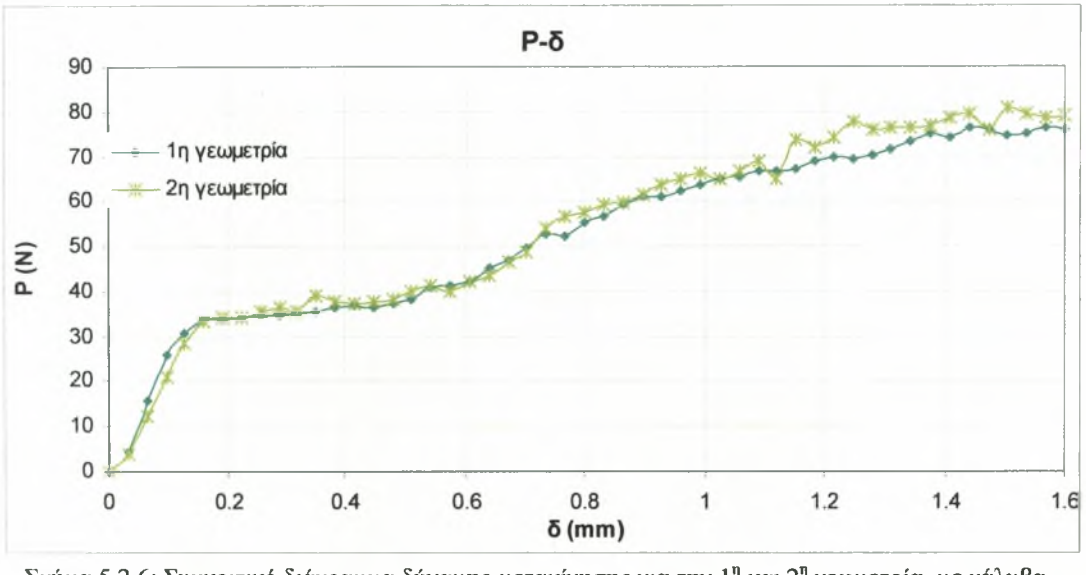


Σχήμα 5.2.4: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



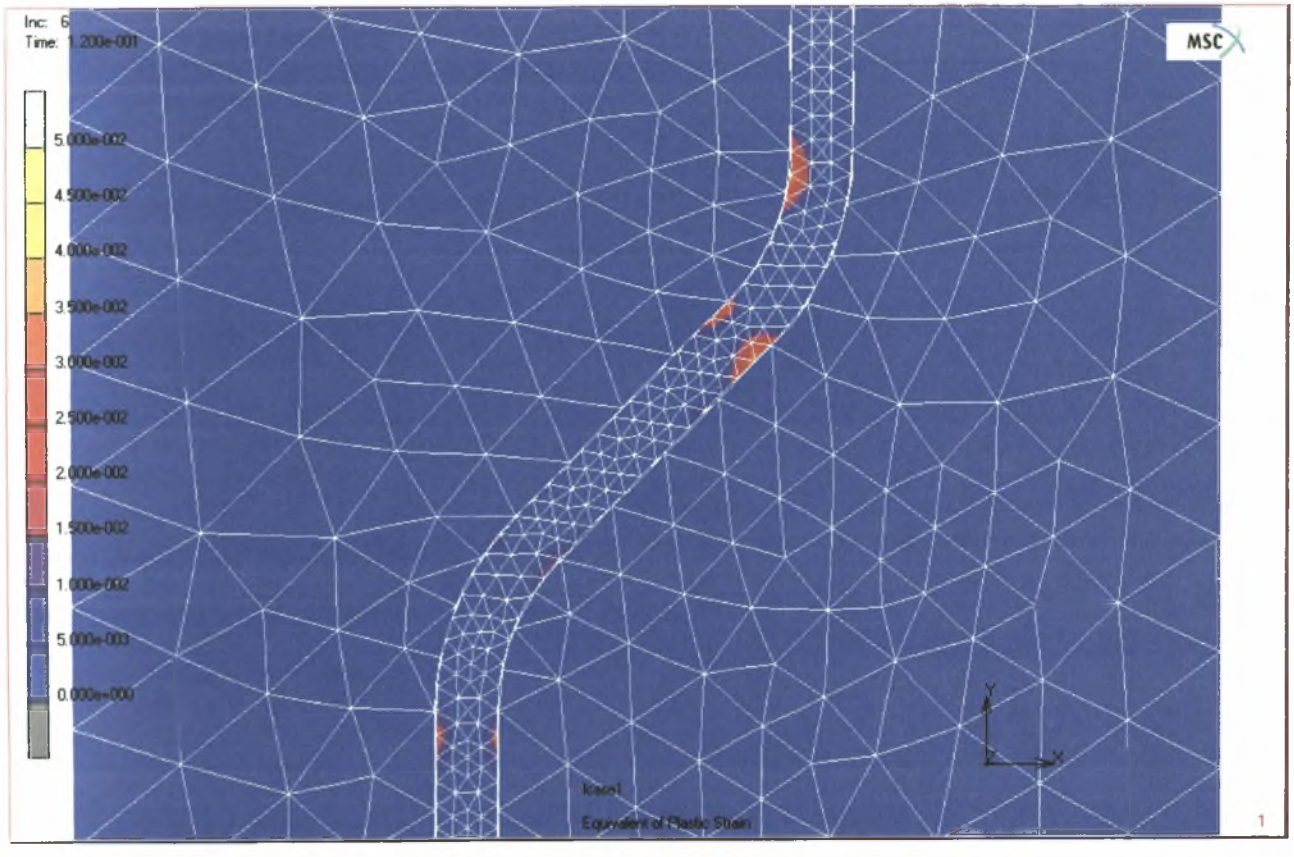
Σχήμα 5.2.5: Καμπύλη δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400, με μηδενικό συντελεστή τριβής



Σχήμα 5.2.6: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για την 1η και 2η γεωμετρία, με χάλυβα S1400 και μηδενικό συντελεστή τριβής

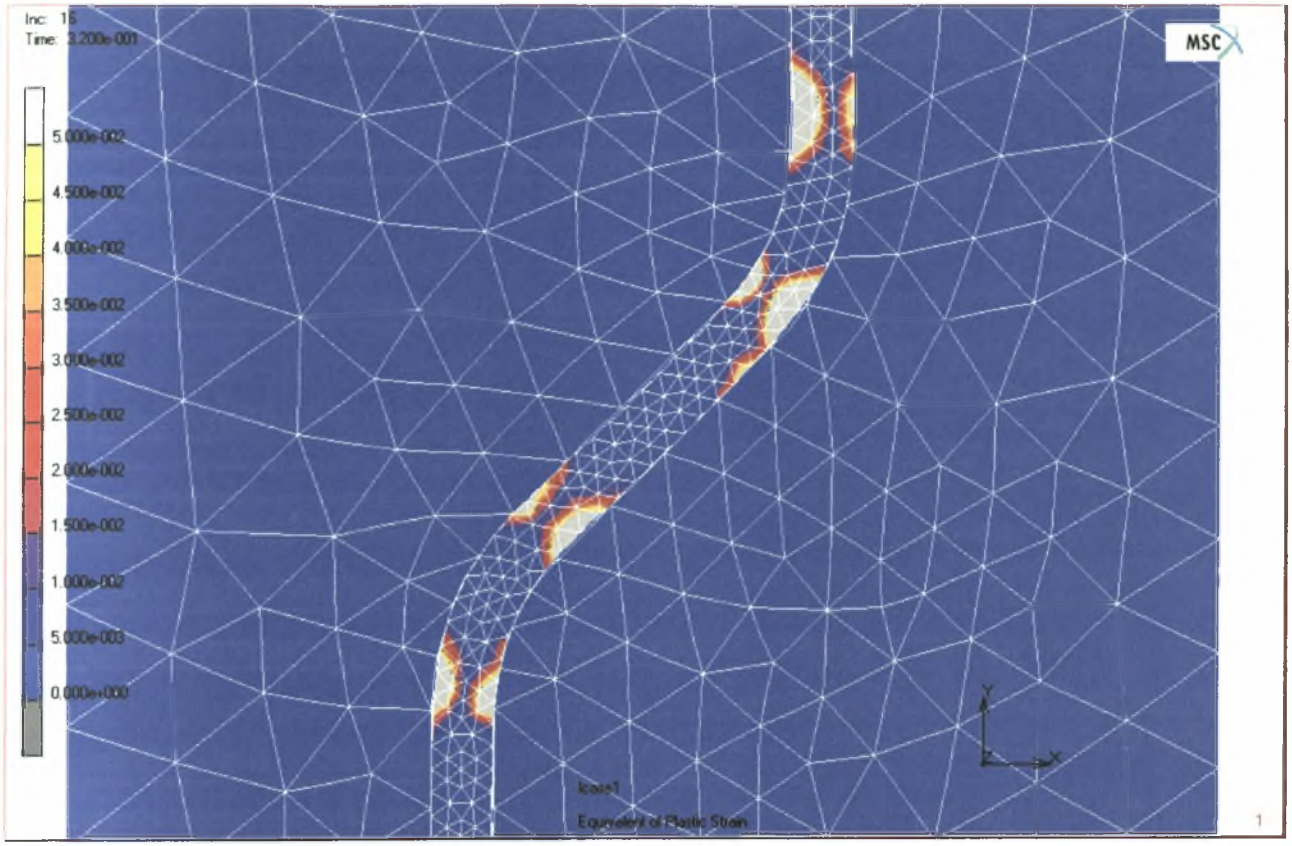
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης για συντελεστή τριβής f=0.3 προκύπτει πως η συμπεριφορά της ίνας με διπλάσιο ευθύγραμμο κεκλιμένο τμήμα είναι όμοια με αυτή της αρχικής γεωμετρίας (*Σχήμα 5.2.11*). Η καμπύλη P-δ που προκύπτει από την ανάλυση φαίνεται στο *Σχήμα 5.2.10* . Συγκρίνοντας τις καμπύλες συμπεριφοράς για τις δύο γεωμετρίες της ίνας παρατηρούμε πως η μορφή τους είναι η ίδια. Η μόνη διαφορά που εμφανίζεται είναι η τιμή της δύναμης για την οποία εμφανίζονται πλαστικές παραμορφώσεις, που στην περίπτωση της δεύτερης γεωμετρίας είναι ελάχιστα μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στις αυξημένες, λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας, δυνάμεις τριβής. Τελικά η τιμή της δύναμης για την οποία αρχίζει η πλήρης πλαστικοποίηση του άνω ευθύγραμμου τμήματος και η ίνα αστοχεί, είναι ακριβώς η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις.

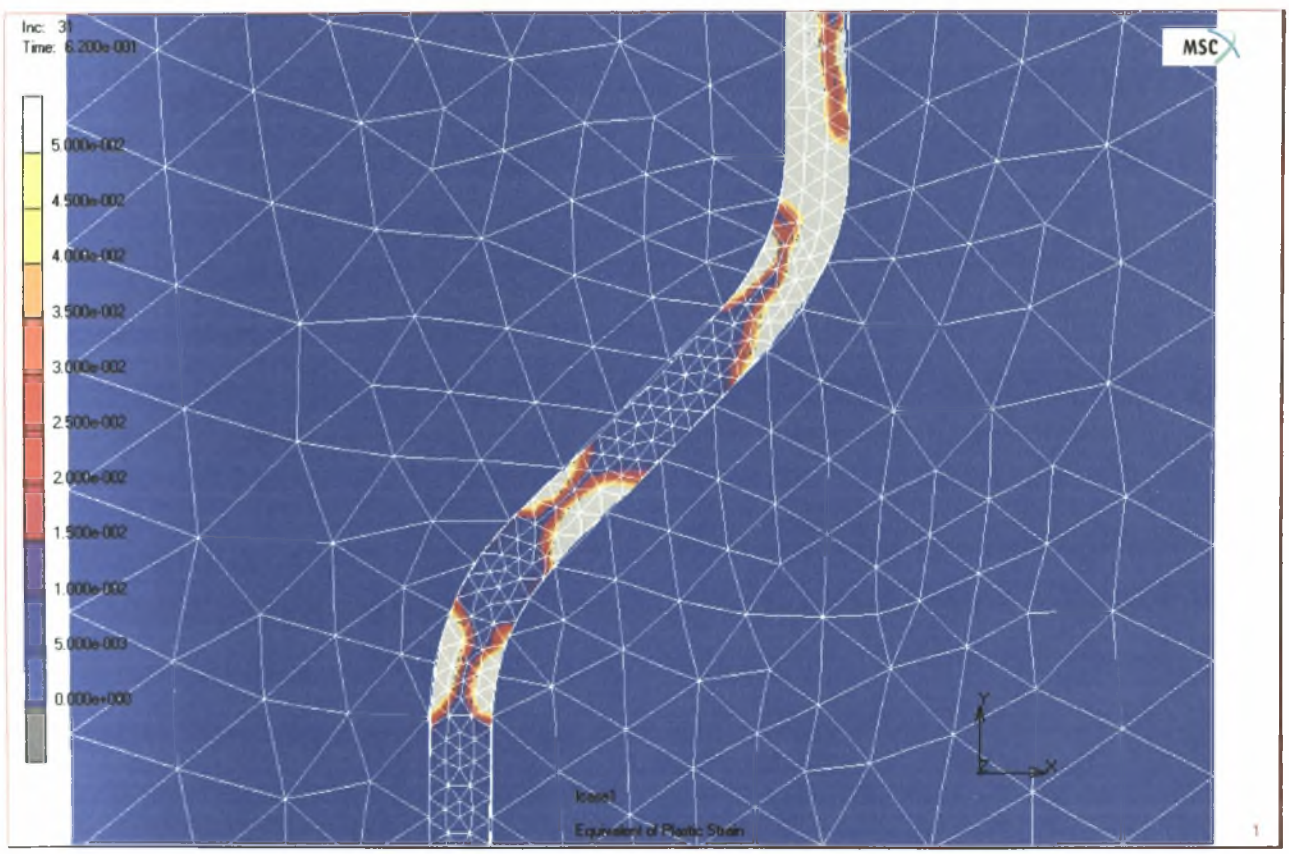


Σχήμα 5.2.6: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 6^{ο} βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

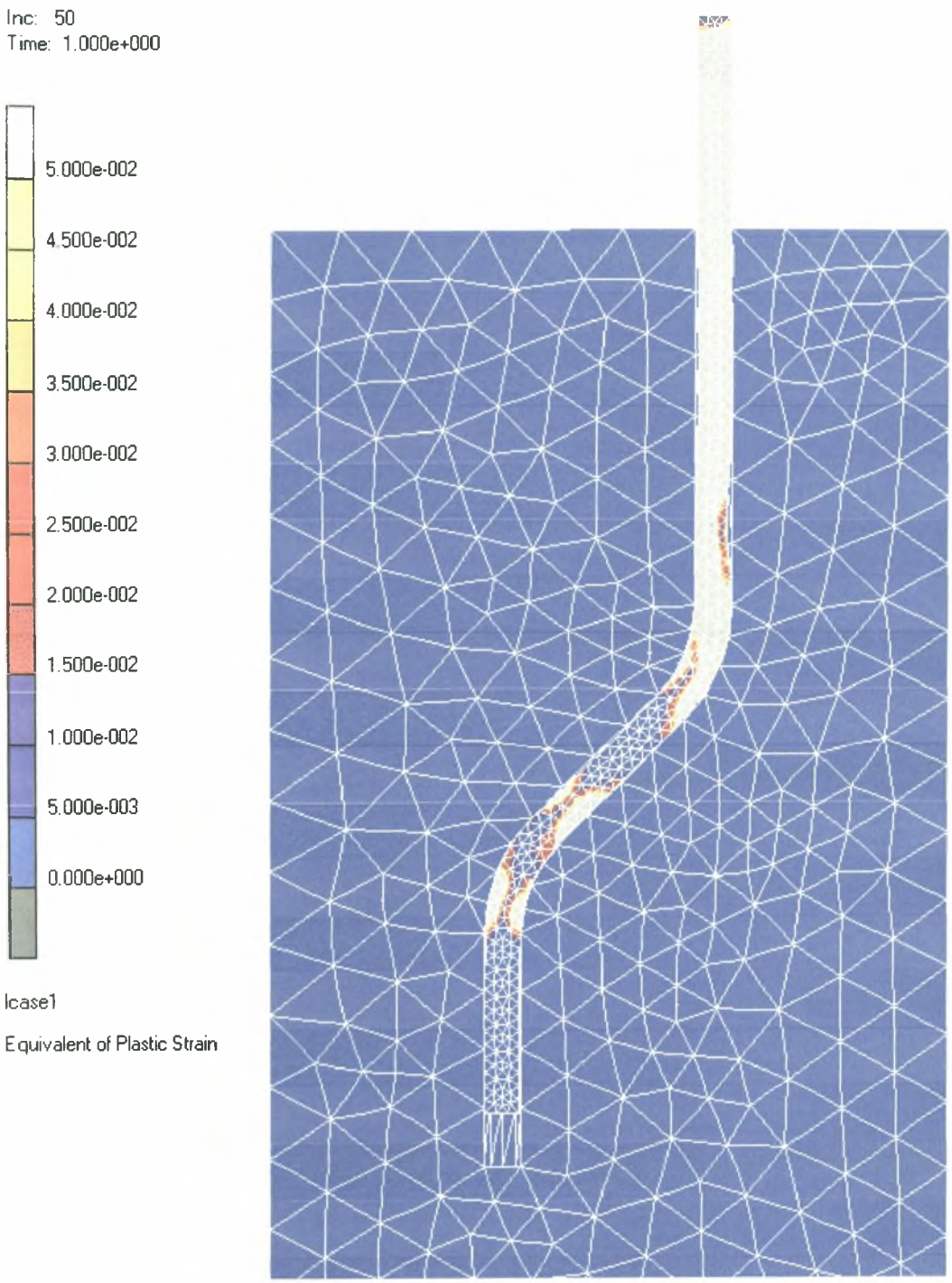


Σχήμα 5.2.7: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 16° βήμα φόρτισης



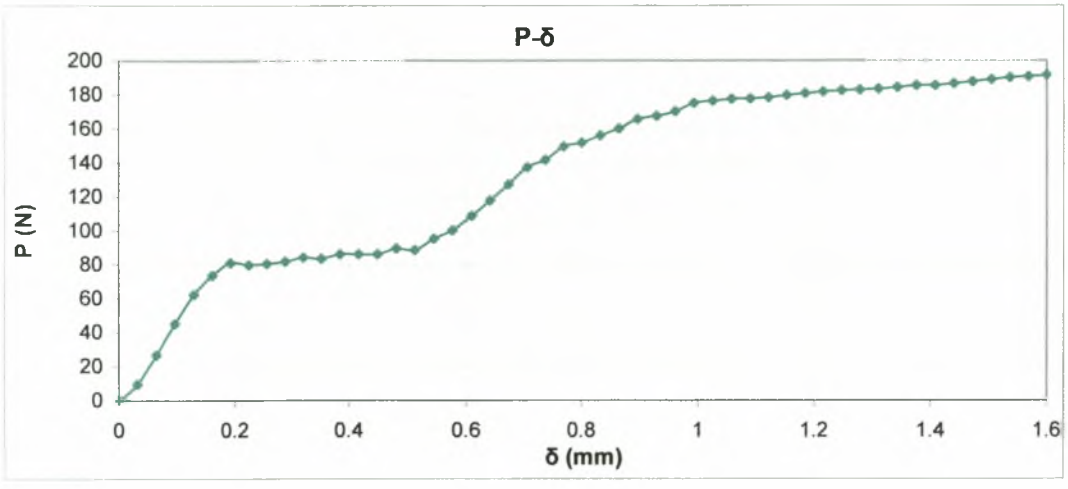
Σχήμα 5.2.8: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 31° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

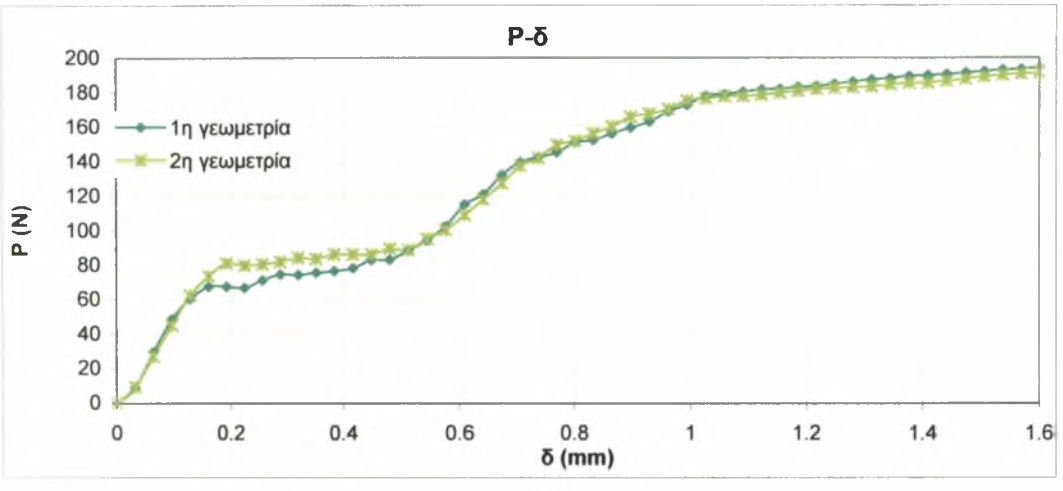


Σχήμα 5.2.9: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 5.2.10: Καμπύλη δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.3



Σχήμα 5.2.11: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για την $1^{η}$ και $2^{η}$ γεωμετρία, με χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

5.3 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης για την τρίτη γεωμετρία

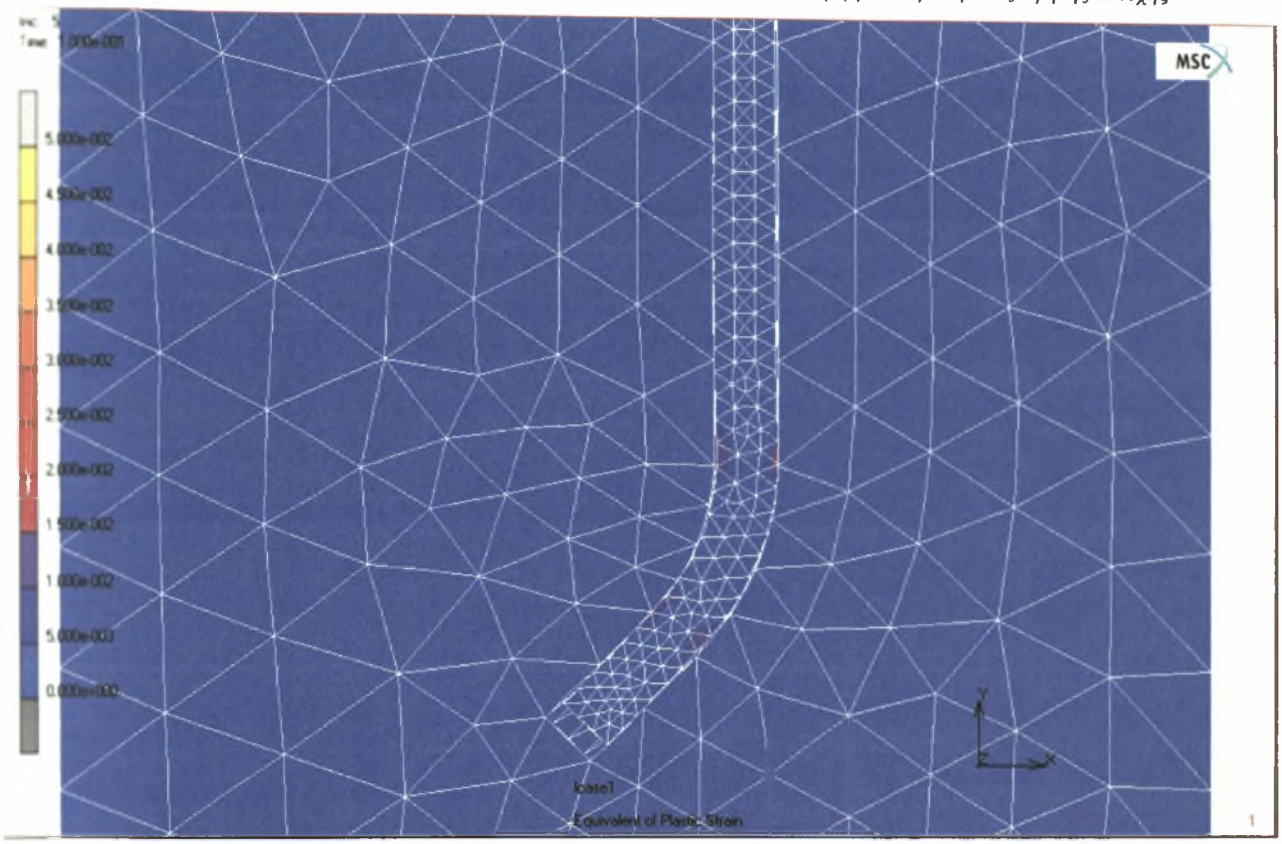
Οι ίδιες αναλύσεις έγιναν και για τη γεωμετρία της ίνας με τον ανεπαρκή μηχανισμό αγκύρωσης. Οι εικόνες των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας που προέκυψαν από τις αναλύσεις αυτές (*Σχήμα 5.3.1-5.3.7*) αποδεικνύουν πως η γενική συμπεριφορά είναι αντίστοιχη με αυτές της πρώτης και της δεύτερης γεωμετρίας. Στην περίπτωση του μηδενικού συντελεστή τριβής η ίνα, όπως ήταν αναμενόμενο, εξολκεύεται από τη μήτρα σκυροδέματος, ενώ για την περίπτωση της τριβής αστοχεί λόγω μεγάλων παραμορφώσεων.

Από τα συγκριτικά διαγράμματα για την περίπτωση του μηδενικού συντελεστή τριβής, παρατηρούμε ότι η μορφή των καμπυλών είναι όμοια (*Σχήμα 5.3.8)*. Σημαντική όμως διαφορά υπάρχει στις τιμές της δύναμης, οι οποίες είναι πολύ χαμηλότερες στην περίπτωση της τρίτης γεωμετρίας. Έτσι, η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική κατάσταση συμβαίνει για την ίδια τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης με τις δύο πρώτες γεωμετρίες, αλλά για χαμηλότερη τιμή της δύναμης. Τελικά, και η απαιτούμενη δύναμη εξόλκευσης είναι πολύ μικρότερη. Από τα παραπάνω επιβεβαιώνεται και η σημασία του μηχανισμού αγκύρωσης της ίνας στο φαινόμενο της εξόλκευσης.

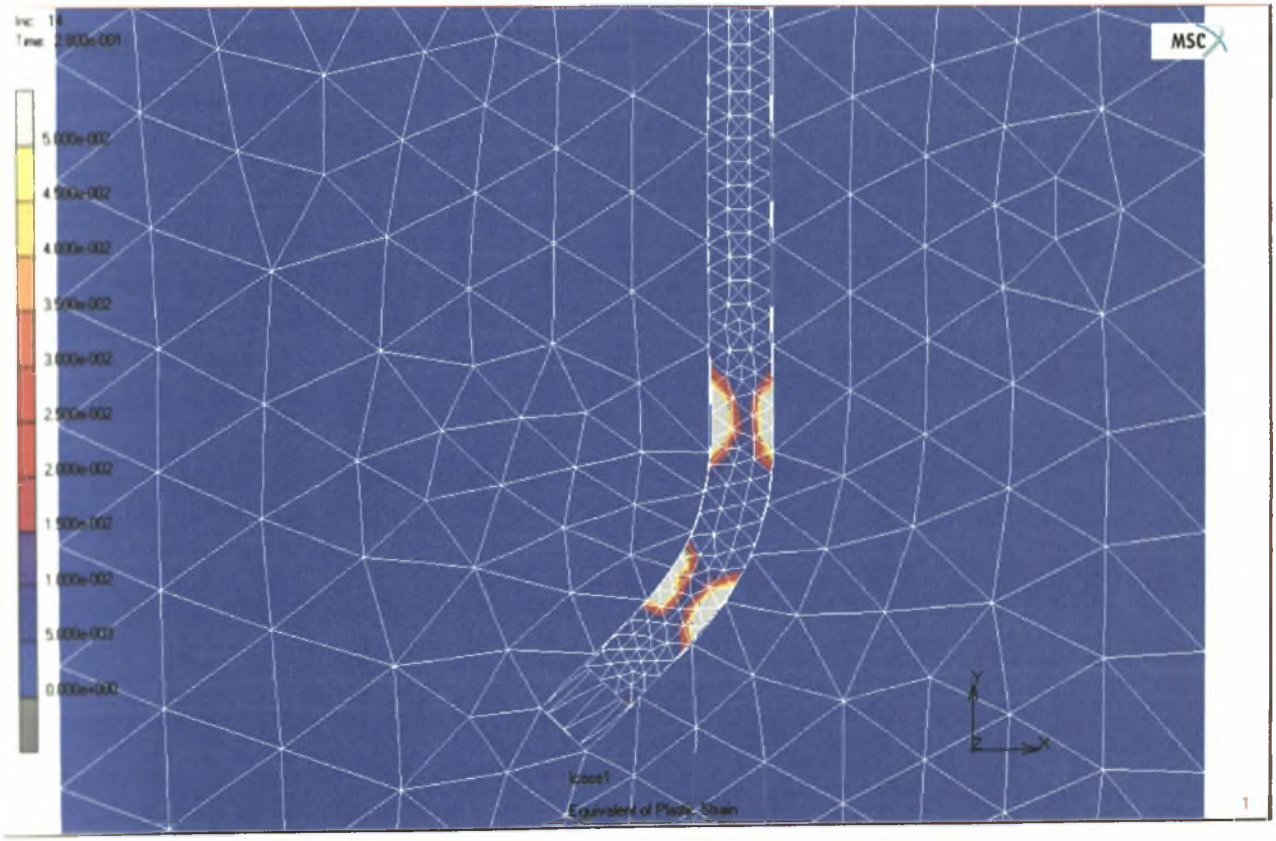
Οι καμπύλες που προκύπτουν από τις αναλύσεις για συντελεστή τριβής f=0.3 δείχνουν όμοια συμπεριφορά και για τις τρεις γεωμετρίες της ίνας *(Σχήμα 5.3.9)*. Οι τιμές της δύναμης για την τρίτη γεωμετρία είναι μικρότερες αλλά η δύναμη στην οποία τελικά αστοχεί λόγω μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων, είναι η σχεδόν η ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις.

Στο σημείο αυτό θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνει μια σύντομη διερεύνηση σχετικά με τον θεωρούμενο συντελεστή τριβής, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί η σημασία του μηχανισμού αγκύρωσης της ίνας στην περίπτωση ύπαρξης τριβής. Για το σκοπό αυτό έγιναν αναλύσεις και για τις τρεις γεωμετρίες της ίνας, θεωρώντας αυτή τη φορά μικρότερο συντελεστή f=0.2. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων εμφανίζονται στο συγκριτικό διάγραμμα (*Σχήμα 5.3.10*). Διαπιστώνουμε πως η ίνα με επαρκή μηχανισμό αγκύρωσης σε κάποιο βήμα φόρτισης σταματά να ολισθαίνει, οπότε και ξεκινά η αστοχία λόγω μεγάλων παραμορφώσεων. Αντίθετα, η ίνα με μη-επαρκή μηχανισμό αγκύρωσης εξολκεύεται από τη μήτρα σκυροδέματος χωρίς να αστοχήσει. Γίνεται, μετά από αυτή τη σύγκριση, εμφανής η σπουδαιότητα του μηχανισμού αγκύρωσης της ίνας στη δοκιμή εξόλκευσης. Ο λόγος για τον οποίο δεν έγινε πλήρως αντιληπτός ο ρόλος του μηχανισμού αγκύρωσης στη περίπτωση των αναλύσεων με συντελεστή τριβής 0.3, ήταν ότι οι μεγάλες δυνάμεις τριβής που αναπτύχθηκαν εμπόδισαν την ολίσθηση και εξόλκευση της ίνας της τρίτης γεωμετρίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

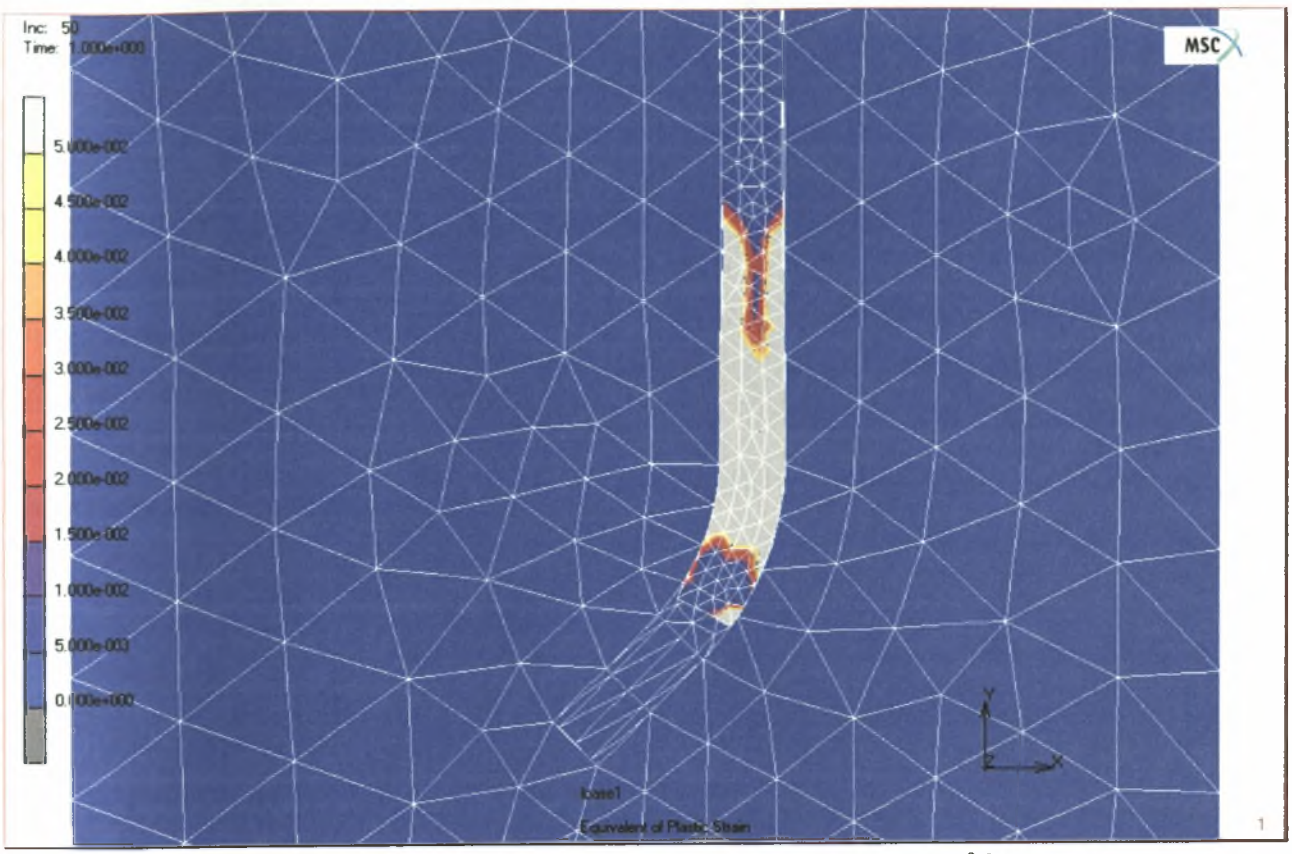


Σχήμα 5.3.1: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 5° βήμα φόρτισης

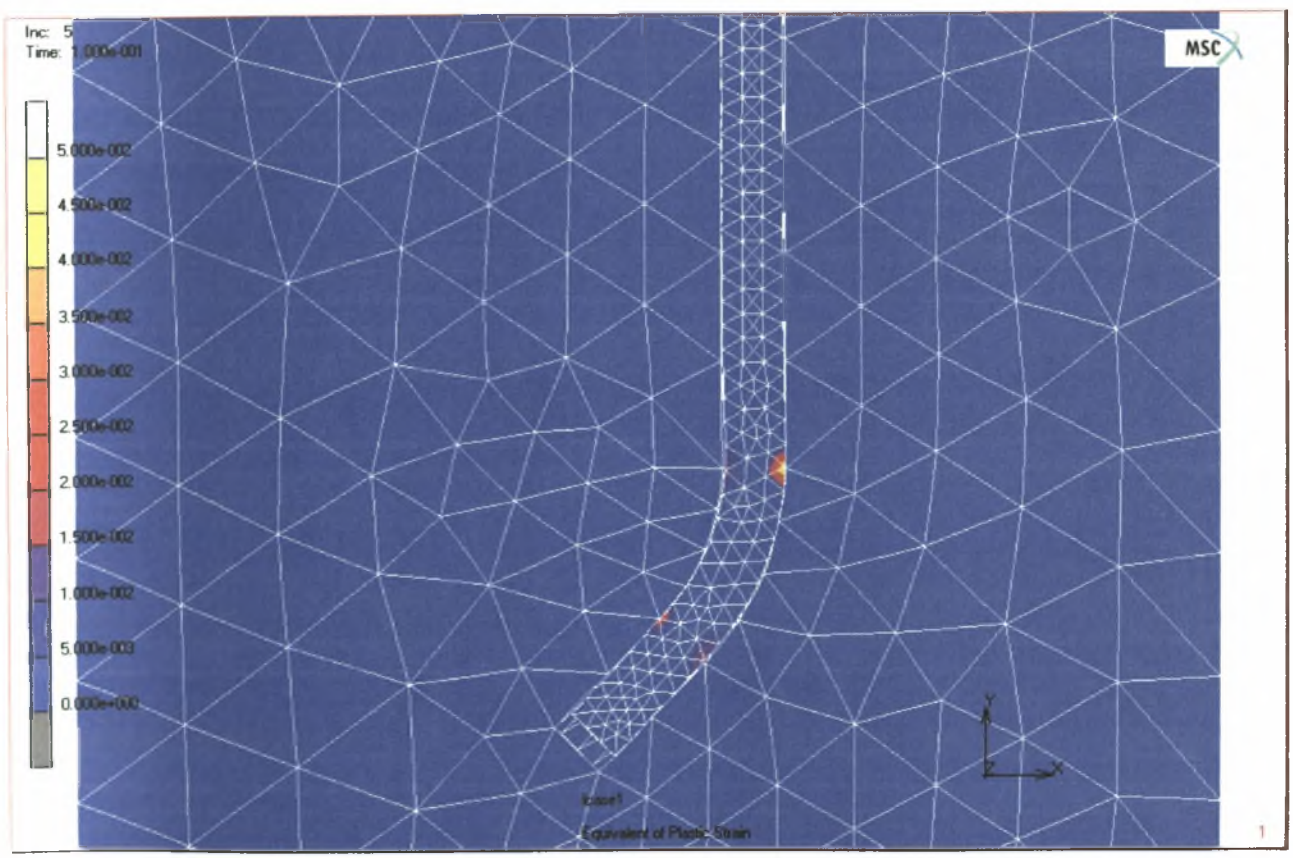


Σχήμα 5.3.2: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 14° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

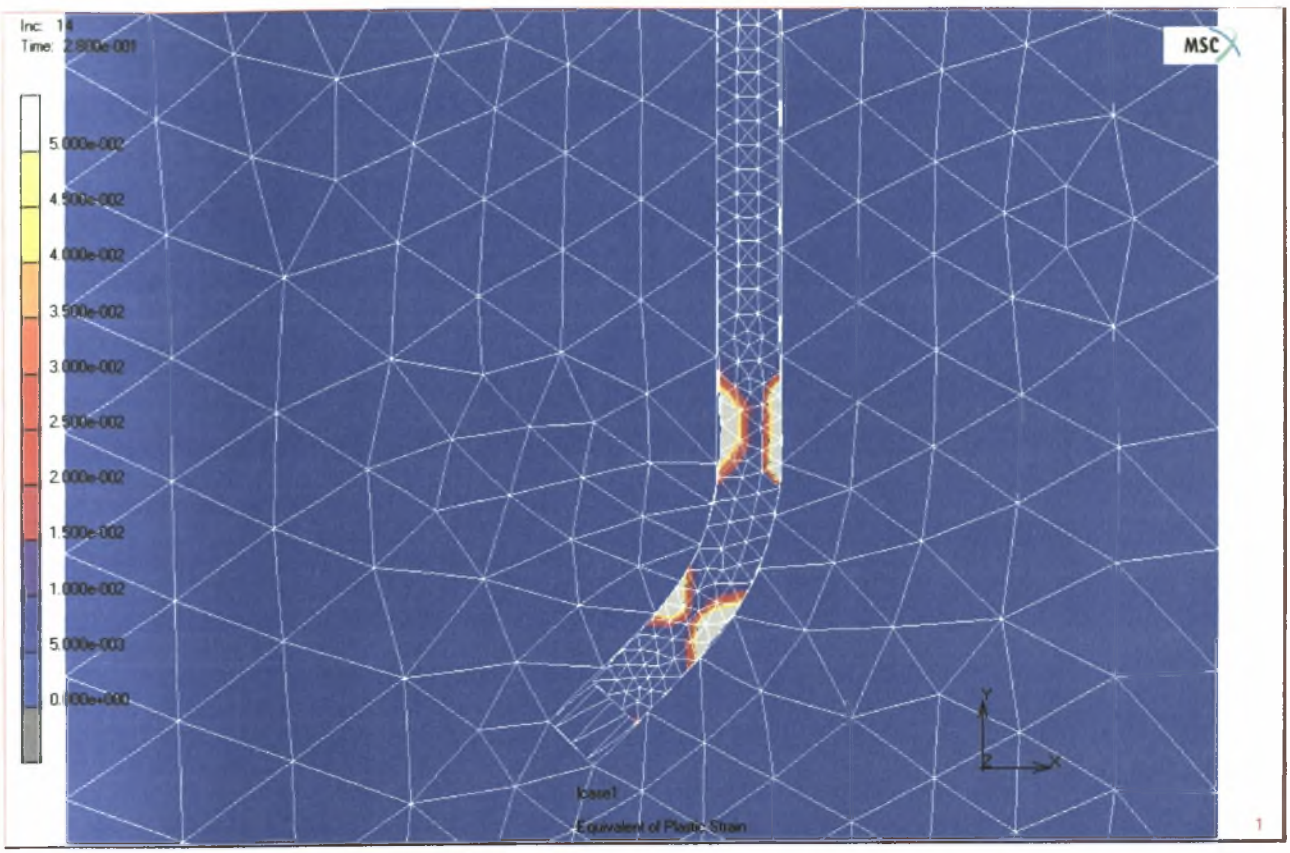


Σχήμα 5.3.3: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

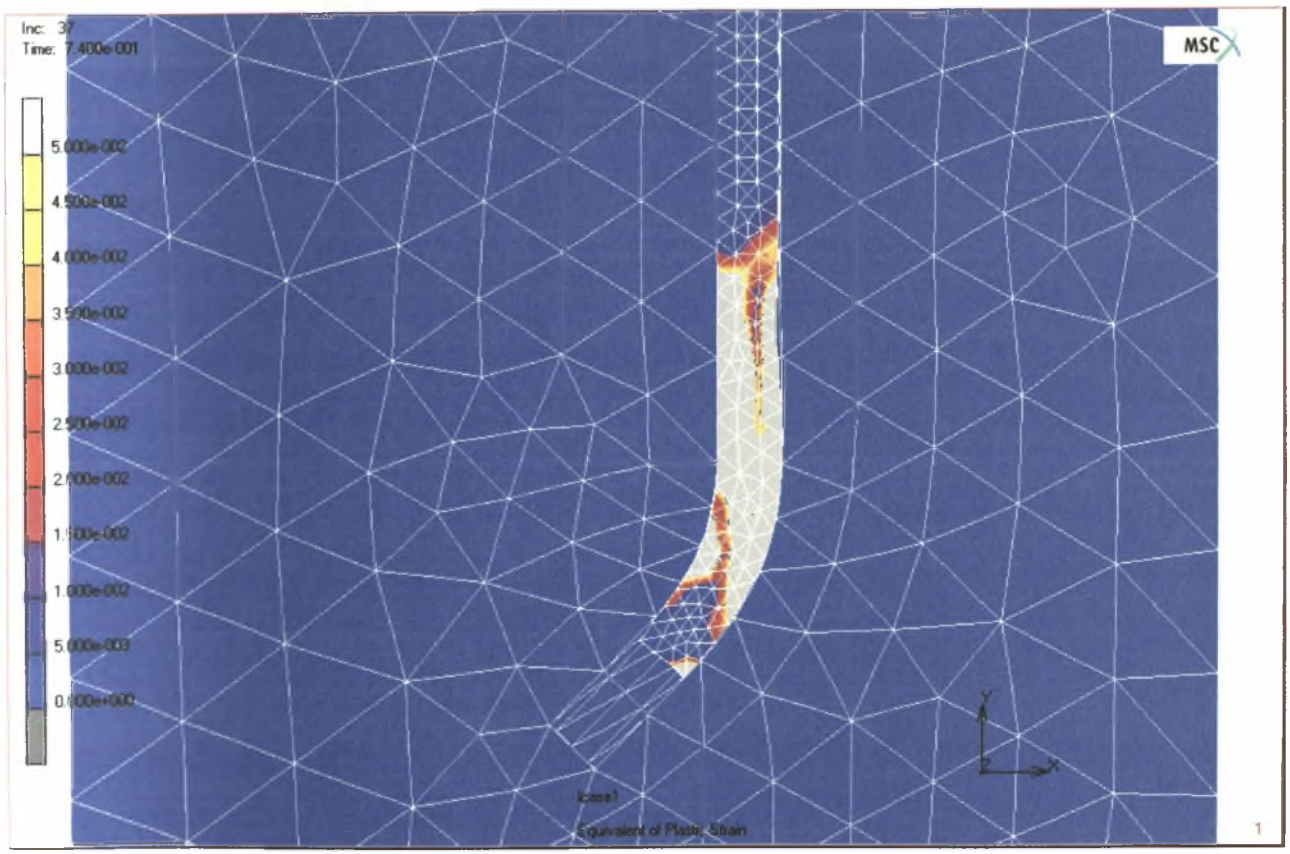


Σχήμα 5.3.4: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 5° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

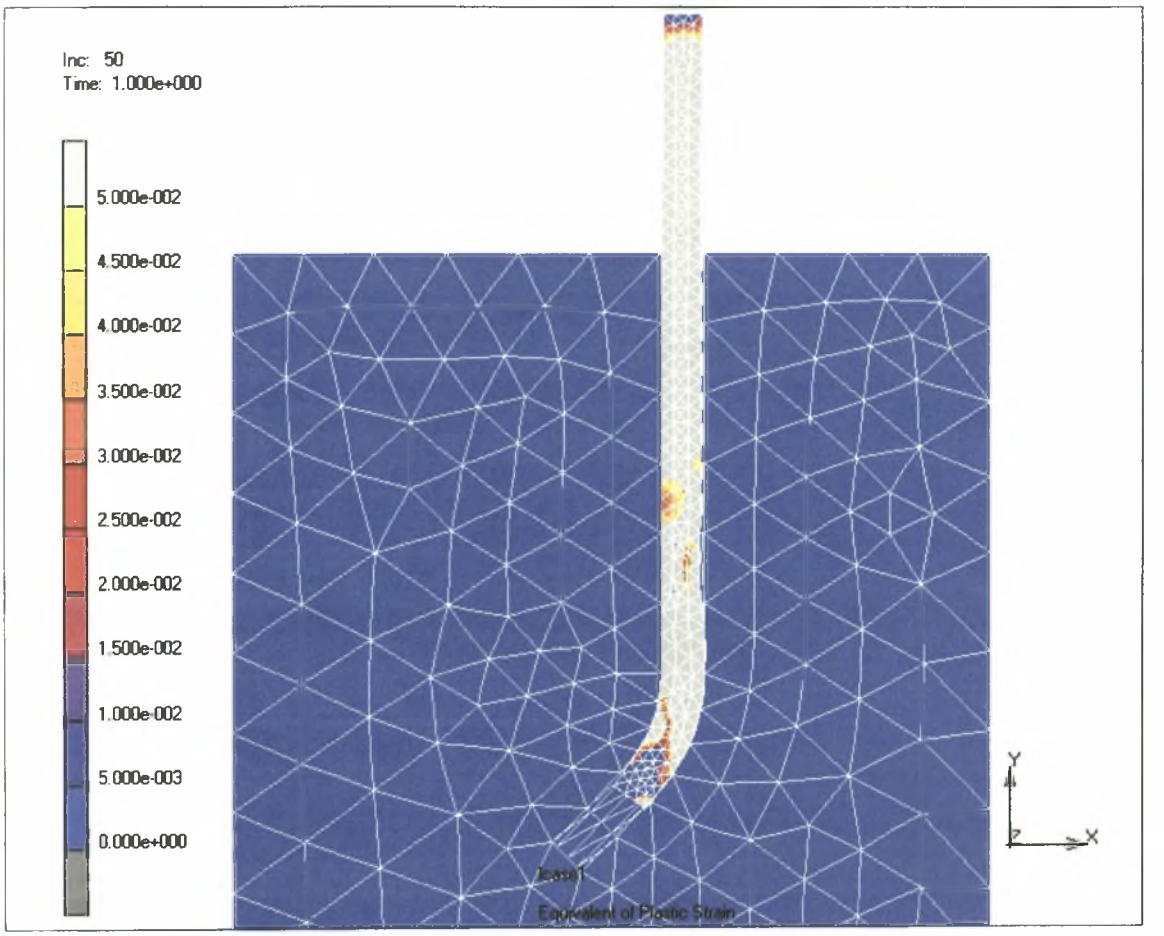


Σχήμα 5.3.5: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 14° βήμα φόρτισης



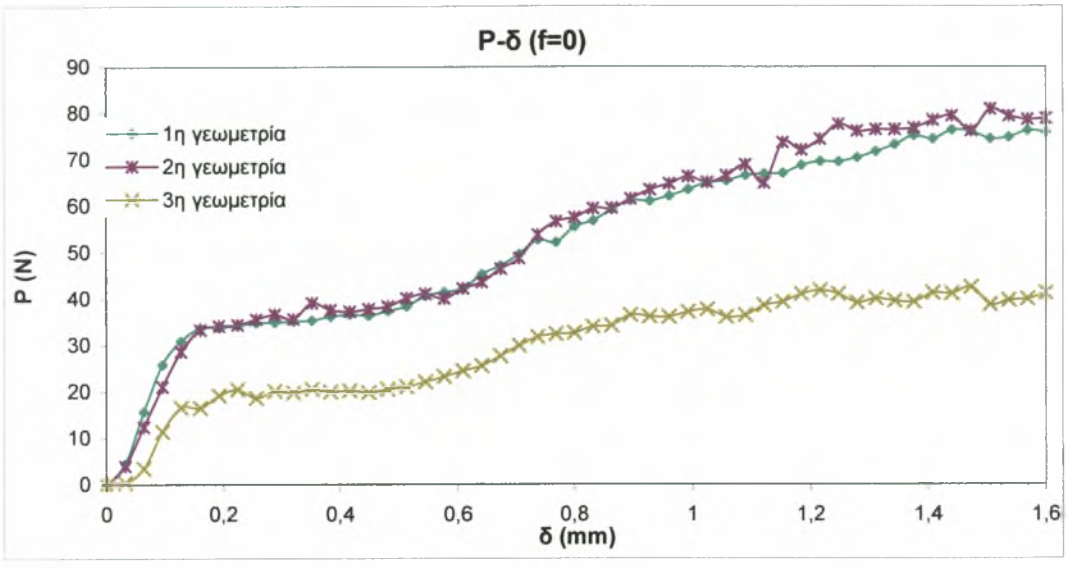
Σχήμα 5.3.6: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 37° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

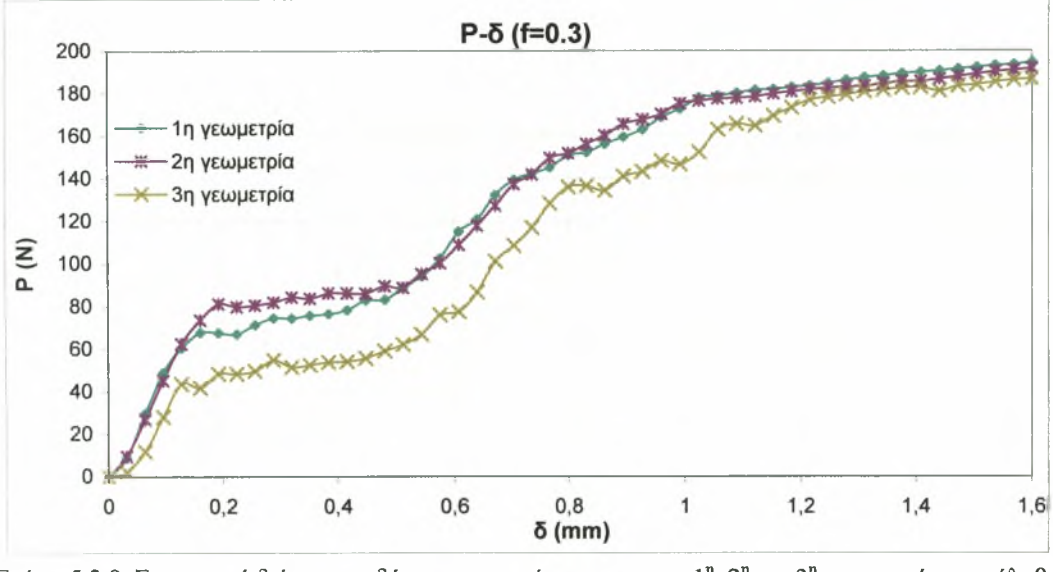


Σχήμα 5.3.7: Σχηματική απεικόνιση των πλαστικών παραμορφώσεων της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

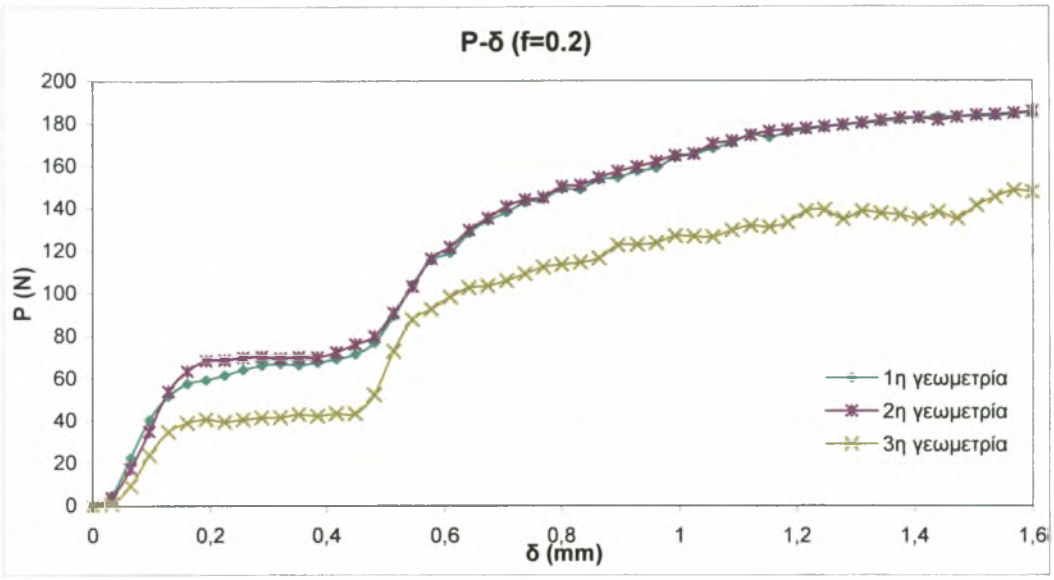


Σχήμα 5.3.8: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για την $1^{η}$,$2^{η}$ και $3^{η}$ γεωμετρία, με χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0



Σχήμα 5.3.9: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για την $1^{η}$,$2^{η}$ και $3^{η}$ γεωμετρία, με χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

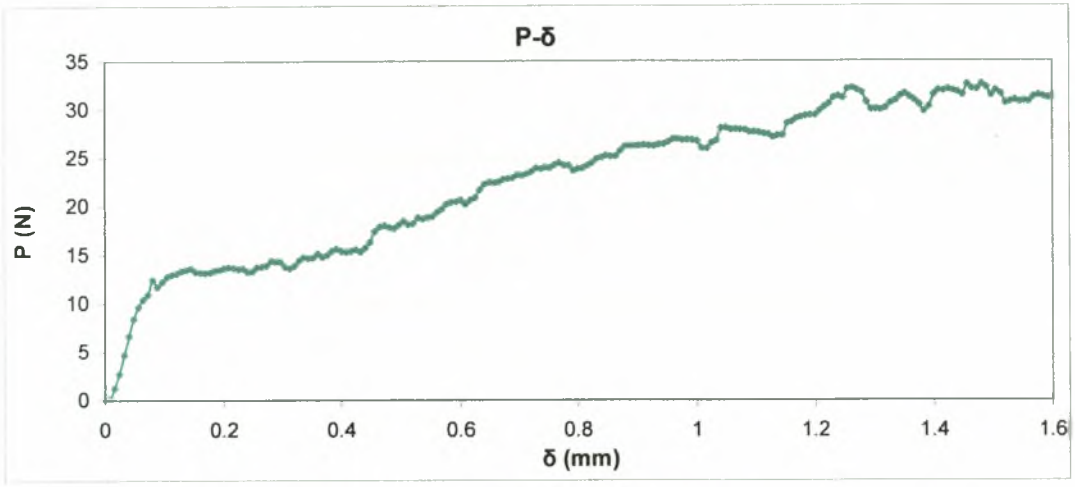


Σχήμα 5.3.10: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για την $1^{η}$,$2^{η}$ και $3^{η}$ γεωμετρία, με χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.2

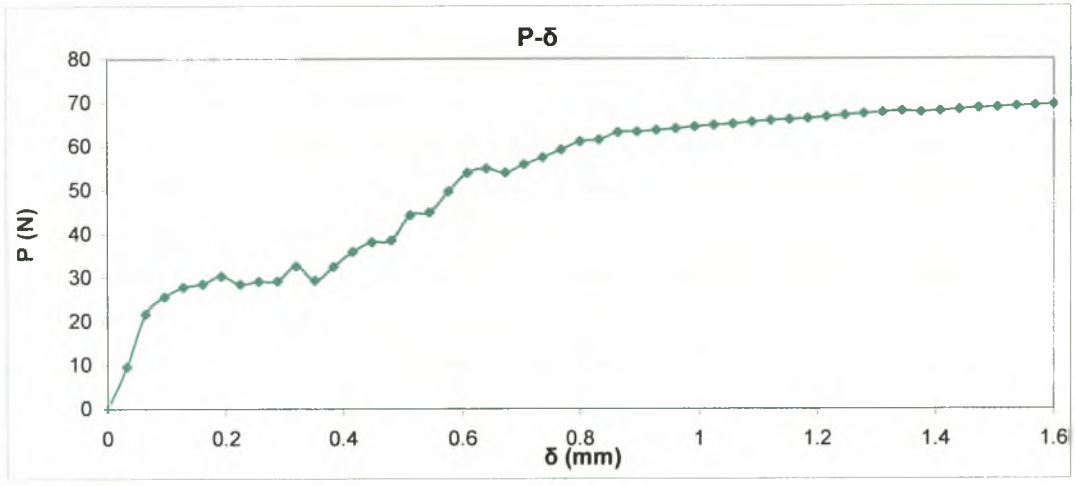
5.4 Αποτελέσματα της τρισδιάστατης παραμετρικής ανάλυσης σχετικά με την ποιότητα του χάλυβα

Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις οποίες ο χάλυβας τύπου S1400 αντικαταστάθηκε από χάλυβα τύπου S500, τόσο για μηδενικό συντελεστή τριβής, όσο και για συντελεστή τριβής ίσο με 0,3. Τα διαγράμματα και για τις δυο γεωμετρίες παρουσιάζουν την ίδια μορφή με τα αντίστοιχα της ίνας από χάλυβα τύπου S1400, αλλά με μικρότερες τιμές της δύναμης. Στις περιπτώσεις με μηδενικό συντελεστή τριβής οι ίνες ολισθαίνουν και εξολκεύονται από τη μήτρα σκυροδέματος, ενώ για συντελεστή τριβής f=0.3, οι ίνες αστοχούν λόγω μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων.

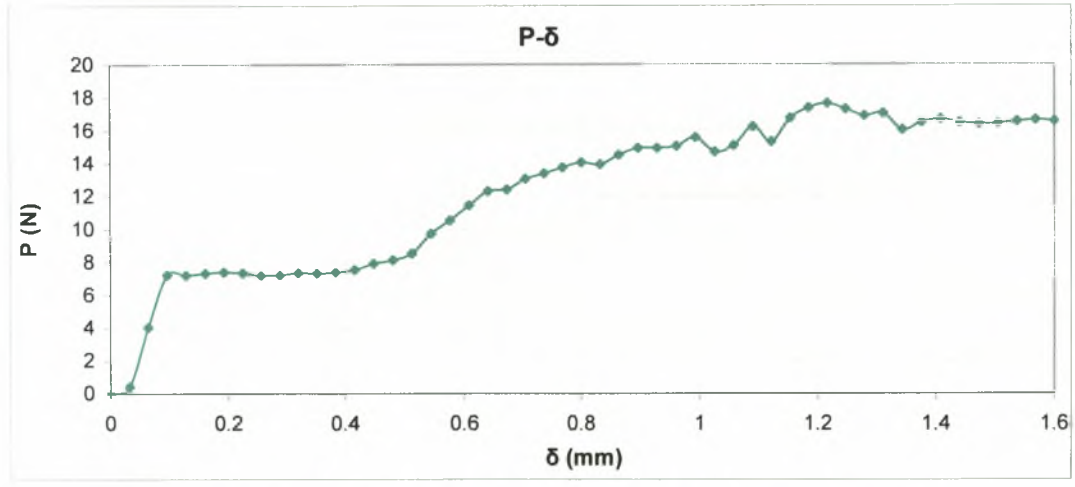
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 5.4.1: καμπύλη P-δ για τη 2η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S500 και f=0

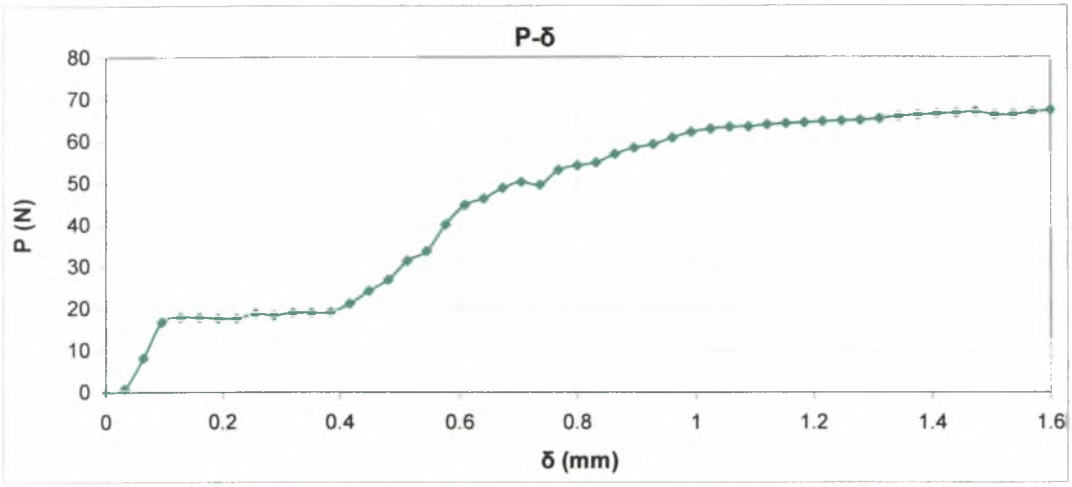


Σχήμα 5.4.2: καμπύλη P-δ για τη 2η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S500 και f=0.3

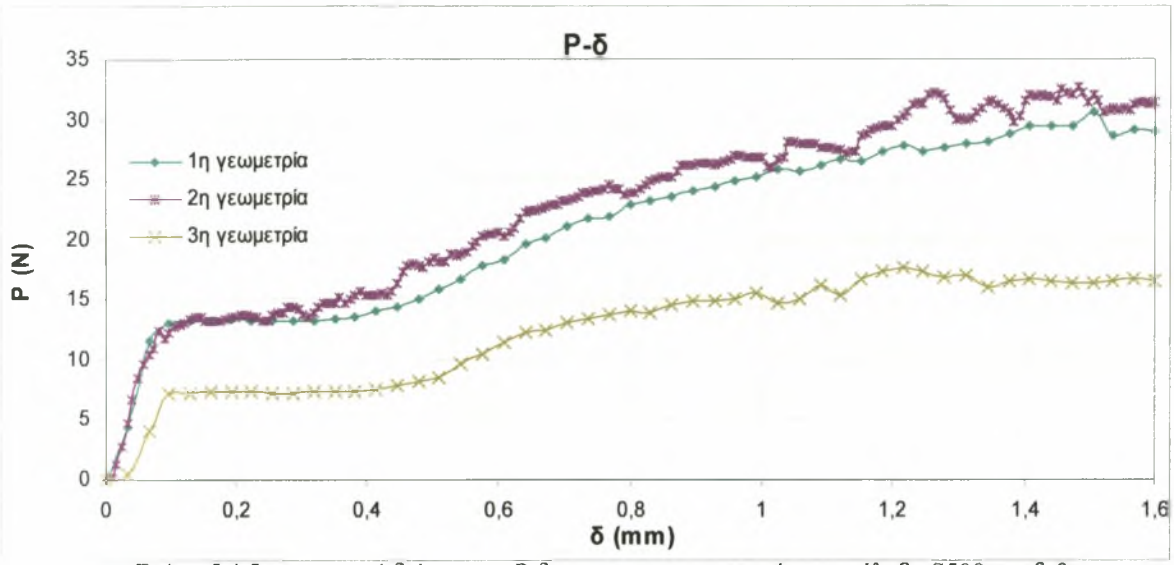


Σχήμα 5.4.3: καμπύλη P-δ για τη 3η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S500 και f=0

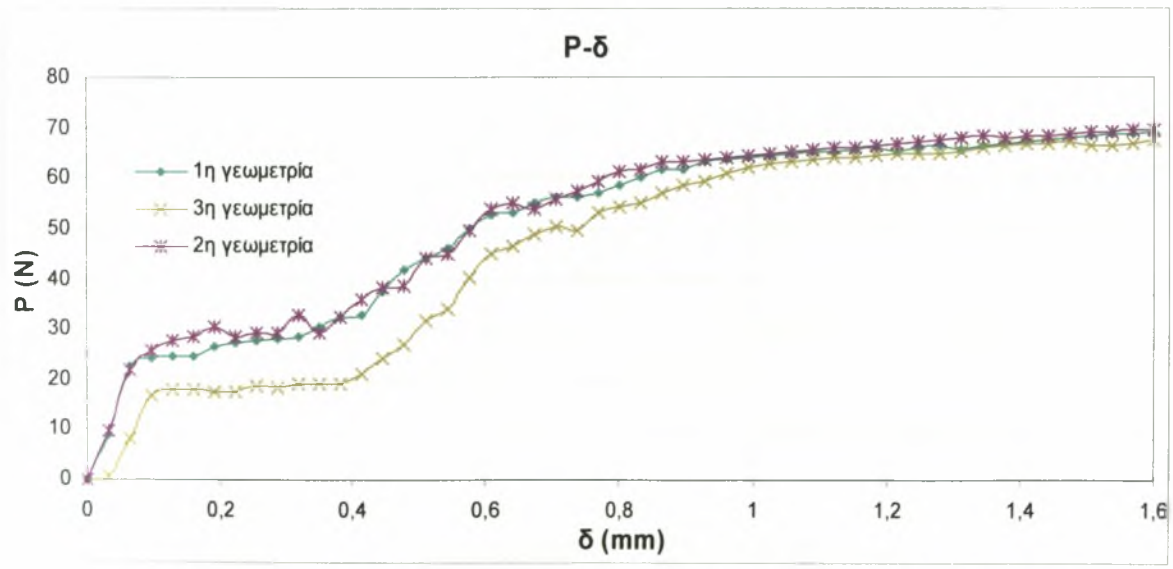
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 5.4.4: καμπύλη P-δ για τη 3η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S500 και f=0.3



Σχήμα 5.4.5: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τις τρεις γεωμετρίες, με χάλυβα S500 και f=0



Σχήμα 5.4.6: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τις τρεις γεωμετρίες, με χάλυβα S500 και f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

6^{ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ

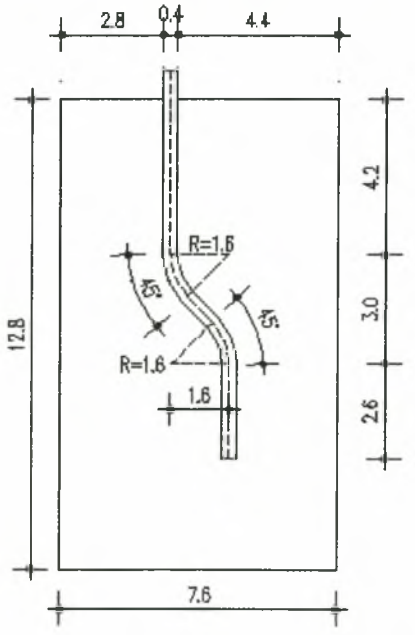
Δισδιάστατη ανάλυση της δοκιμής εξόλκευσης ινών με αγκιστροειδές άκρο

Παρόλο που τα τρισδιάστατα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στα δύο προηγούμενα κεφάλαια θεωρούνται ρεαλιστικά και δίνουν ακριβή αποτελέσματα, έχουν το μειονέκτημα του μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Μάλιστα, κάποιες αναλύσεις ξεπερνούν τις τρεις ώρες υπολογιστικού χρόνου σε έναν υπολογιστή με επεξεργαστή Pentium 4. Προέκυψε, λοιπόν, η ανάγκη δημιουργίας ενός απλοποιημένου μοντέλου, ικανού να προσομοιώσει σωστά το φαινόμενο της εξόλκευσης. Για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν τα δισδιάστατα μοντέλα που περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο, η ορθότητα των οποίων θα διαπιστωθεί μετά τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων τους με τα αντίστοιχα της τρισδιάστατης μοντελοποίησης.

6.1 Περιγραφή δισδιάστατου αναλυτικού μοντέλου

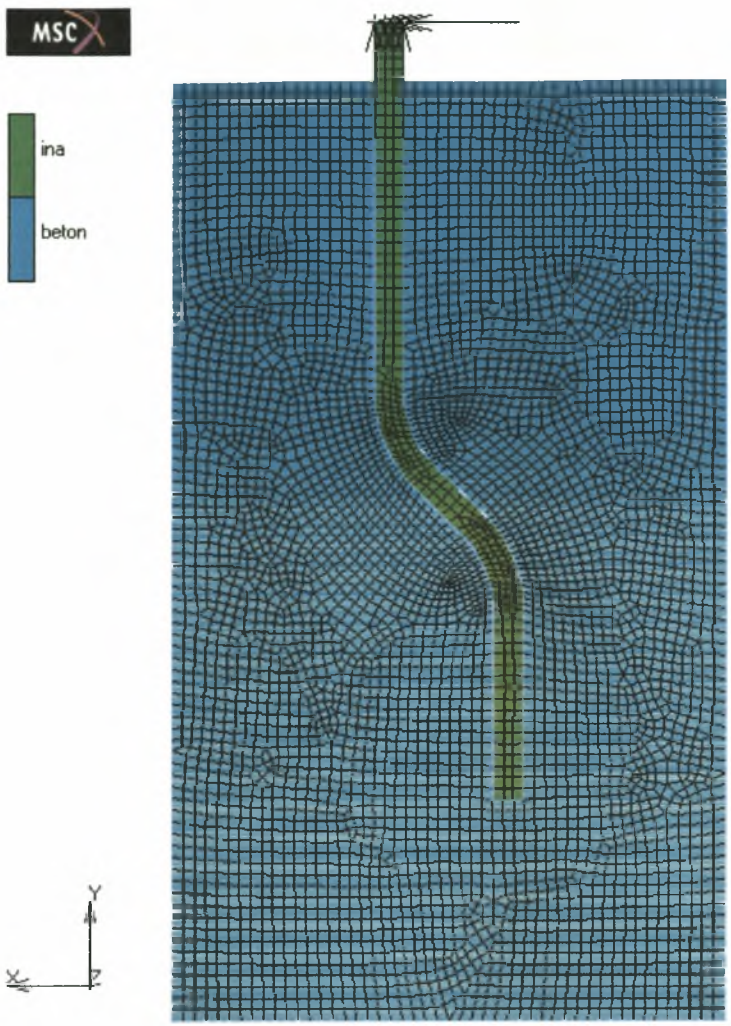
6.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Για τη δισδιάστατη προσομοίωση της κυλινδρικής μήτρας σκυροδέματος και της ίνας με κυκλική διατομή, διατηρήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου μοντέλου (*Σχήμα 6.1.1.1*). Στο *Σχήμα 6.1.1.2* παρουσιάζεται το μοντέλο στην τελική του μορφή, μετά τη διακριτοποίηση.



Σχήμα 6.1.1.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δισδιάστατου μοντέλου

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 6.1.1.2: Το δισδιάστατο μοντέλο μετά τη διακριτοποίηση

6.1.2 Συνοριακές συνθήκες

Αρχικά, δεσμεύτηκαν οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων της άνω στάθμης του σκυροδέματος, ενώ για όλους τους υπόλοιπους περιμετρικούς κόμβους δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις κατά τους άξονες x, y και z. Στους άνω κόμβους του προεξέχοντος τμήματος της ίνας ασκήθηκε επιβεβλημένη μετακίνηση κατά y ίση με 1.6mm σταδιακά, μέσα από 50 βήματα φόρτισης, με ταυτόχρονη δέσμευση των μετακινήσεων κατά τους άξονες x και z.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

6.1.3 Ιδιότητες υλικών

Οι ιδιότητες των δύο υλικών παρέμειναν και στην δισδιάστατη μοντελοποίηση οι ίδιες και φαίνονται συνοπτικά στον *Πίνακα 6.1.3.1*.

Χαρακτηριστικά υλικών	**Τιμές**
Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (f_{cc})	100 MPa
Εφελκυστική αντοχή χάλυβα S1400 (f_{st})	1400 MPa
Εφελκυστική αντοχή χάλυβα S500 (f_{st})	500 MPa
Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος E_c	39 GPa
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα E_s	210 GPa
Λόγος Poisson χάλυβα	0.2
Λόγος Poisson σκυροδέματος	0.3
Κράτυνση πλαστικού κλάδου χάλυβα	0.01%

Πίνακας 6.1.3.1: Ιδιότητες των υλικών

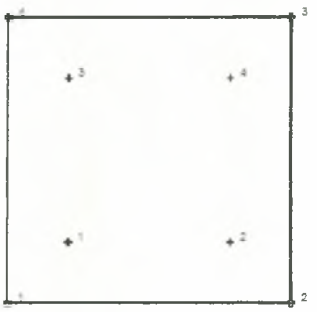
6.1.4 Διακριτοποίηση του μοντέλου – Πεπερασμένα στοιχεία

Τόσο για τη δισδιάστατη προσομοίωση του σκυροδέματος, όσο και του χάλυβα, χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία, επίπεδης έντασης. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τα στοιχεία τύπου 3 της βιβλιοθήκης πεπερασμένων στοιχείων του Marc, τα οποία είναι τεσσάρων κόμβων, ισοπαραμετρικά στοιχεία, τυχαίας γεωμετρίας τετράπλευρα, κατάλληλα για εφαρμογές επίπεδης έντασης. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούν διγραμμικές συναρτήσεις ολοκλήρωσης και η δυσκαμψία τους υπολογίζεται με παρεμβολή κατά Gauss τεσσάρων σημείων. Οι παραμορφώσεις τείνουν να είναι σταθερές σε όλο το στοιχείο και όλες οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτό. Το στοιχείο τύπου 3 προτιμάται από αλλά παρόμοια μεγαλύτερης τάξης πεπερασμένα για αναλύσεις που περιλαμβάνουν επαφή μεταξύ δύο σωμάτων. Έχει δύο βαθμούς ελευθερίας: 1=u (μετατόπιση στη x διεύθυνση), 2=v (μετατόπιση στην y διεύθυνση). Οι τέσσερις κόμβοι του στοιχείου αριθμούνται αντιωρολογιακά όπως φαίνεται και στη σχηματική αναπαράστασή του (*Σχήμα 6.1.4.1*). Το πάχος των στοιχείων του σκυροδέματος τέθηκε ίσο με 7.616mm, περίπου ίσο δηλαδή με 19 διαμέτρους της ίνας. Για την ακριβέστερη προσομοίωση της κυκλικής διατομής της ίνας με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, υπολογίστηκε η ισοδύναμη ορθογωνική διατομή (με βάση τη ροπή αδράνειας της κυκλικής) και προέκυψε το πάχος των στοιχείων

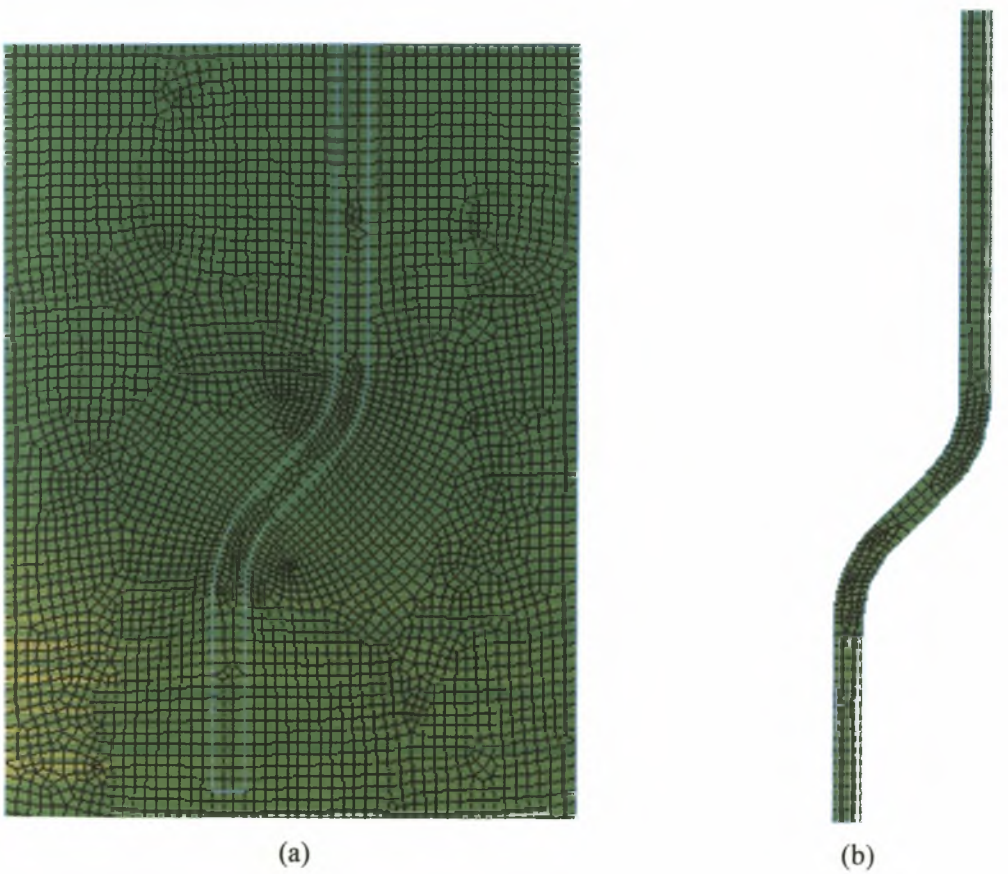
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

ίσο με 0.2352mm. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή δισδιάστατη προσομοίωση του κυλινδρικού σχήματος της μήτρας, η επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα στοιχεία της ίνας καλύπτεται ταυτόχρονα και από πεπερασμένα στοιχεία σκυροδέματος. Στα *Σχήματα 6.1.4.2a και b* παρουσιάζεται ο κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων του σκυροδέματος και της ίνας αντίστοιχα, ενώ στο *Σχήμα 6.1.4.3* φαίνεται η αλληλοεπικάλυψη των δύο κανάβων.

Μετά τη διακριτοποίηση, δημιουργήθηκαν συνολικά 319 πεπερασμένα στοιχεία με ιδιότητες χάλυβα και 5036 στοιχεία με ιδιότητες σκυροδέματος, με διαστάσεις πλευρών μικρότερες του 10mm.



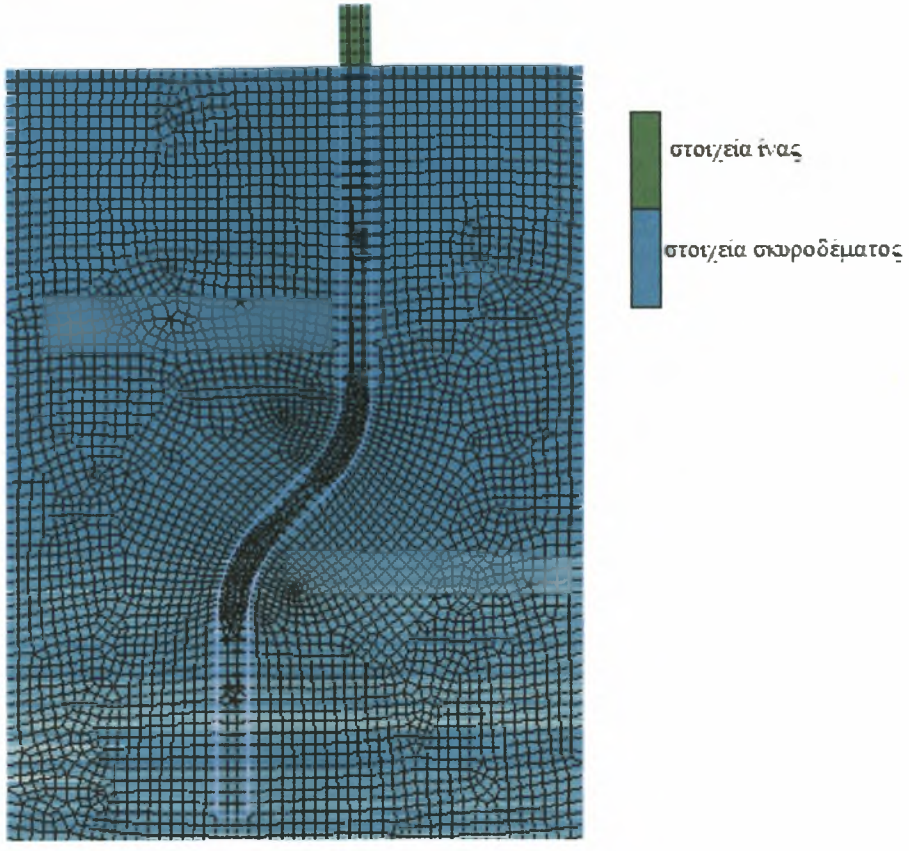
Σχήμα 6.1.4.1: Το πεπερασμένο στοιχείο τύπου 3



(a) (b)

Σχήμα 6.1.4.2 : a) κάναβος στοιχείων σκυροδέματος, b) κάναβος στοιχείων της ίνας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 6.1.4.3 : Αλληλοεπικάλυψη πεπερασμένων στοιχείων σκυροδέματος και χάλυβα

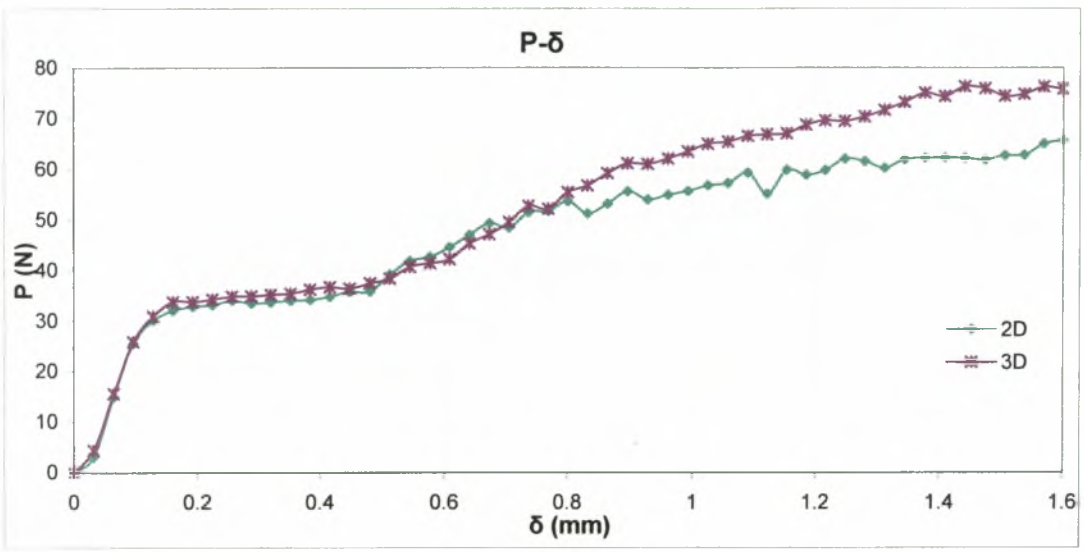
6.1.5 Συνθήκες επαφής

Οι συνθήκες επαφής που αναπτύσσονται μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος θεωρήθηκαν ίδιες με εκείνες της τρισδιάστατης ανάλυσης. Επίσης, επιλέχθηκε ο διγραμμικός νόμος τριβής Coulomb, ενώ πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις τόσο για συντελεστή τριβής ίσο με 0.3 όσο και για μηδενικό συντελεστή τριβής.

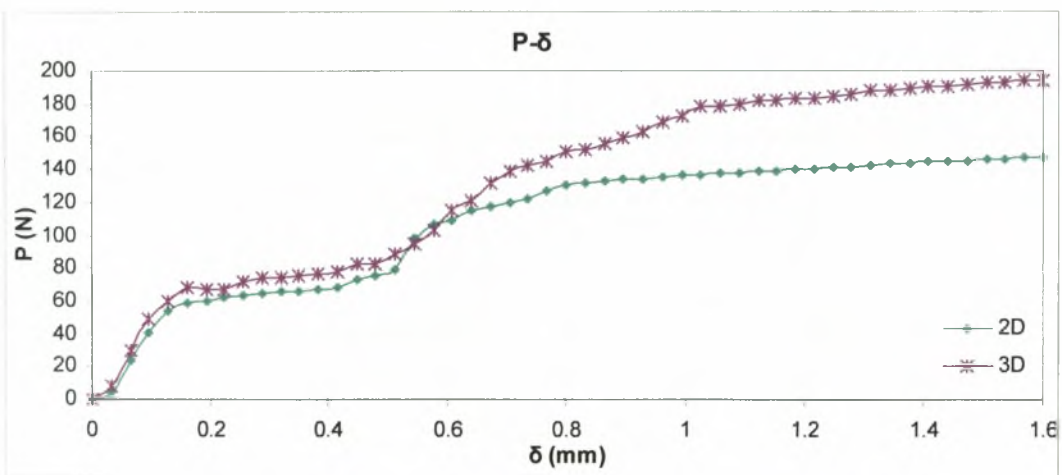
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

6.2 Αποτελέσματα της δισδιάστατης μη-γραμμικής ανάλυσης

Οι καμπύλες που προέκυψαν από τη δισδιάστατη ανάλυση, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες της τρισδιάστατης ανάλυσης, αποδεικνύουν πως το δισδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε προσεγγίζει σωστά το φαινόμενο της εξόλκευσης της ίνας από μήτρα σκυροδέματος. Ενώ η μορφή των καμπυλών είναι η ίδια, υπάρχει μια μικρή απόκλιση στις αριθμητικές τιμές τους.

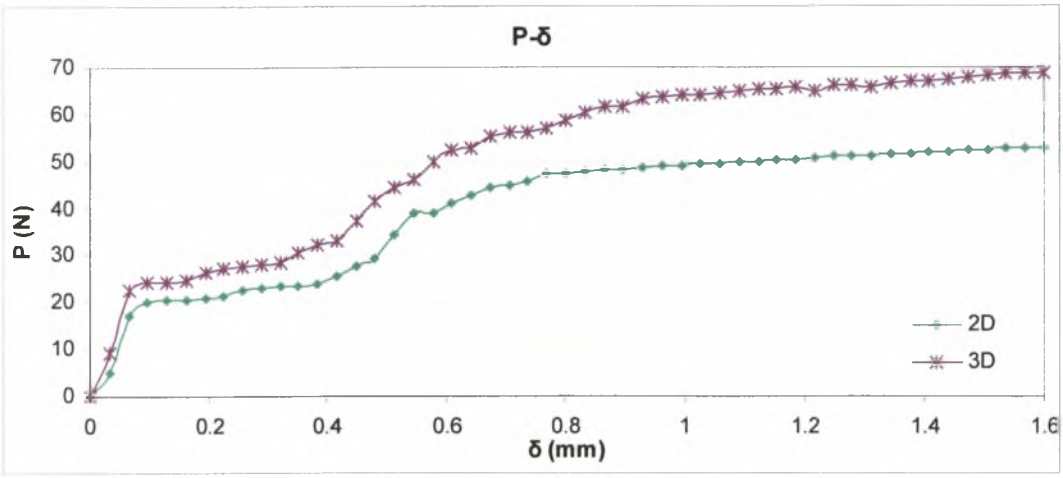


Σχήμα 6.2.1: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για χάλυβα S1400 και f=0

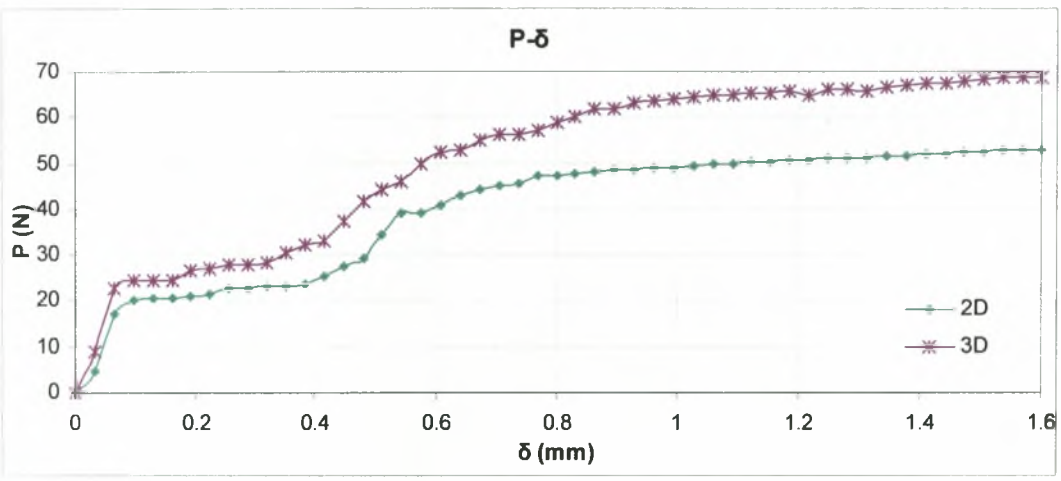


Σχήμα 6.2.2: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για χάλυβα S1400 και f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 6.2.3: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για χάλυβα S500 και f=0

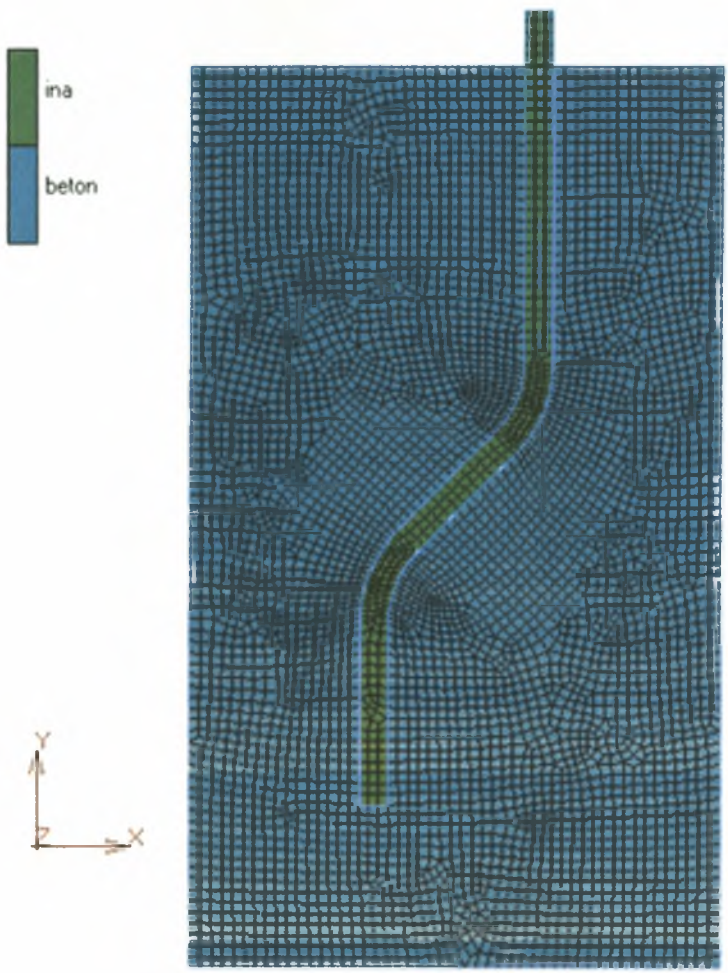


Σχήμα 6.2.4: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για χάλυβα S500 και f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

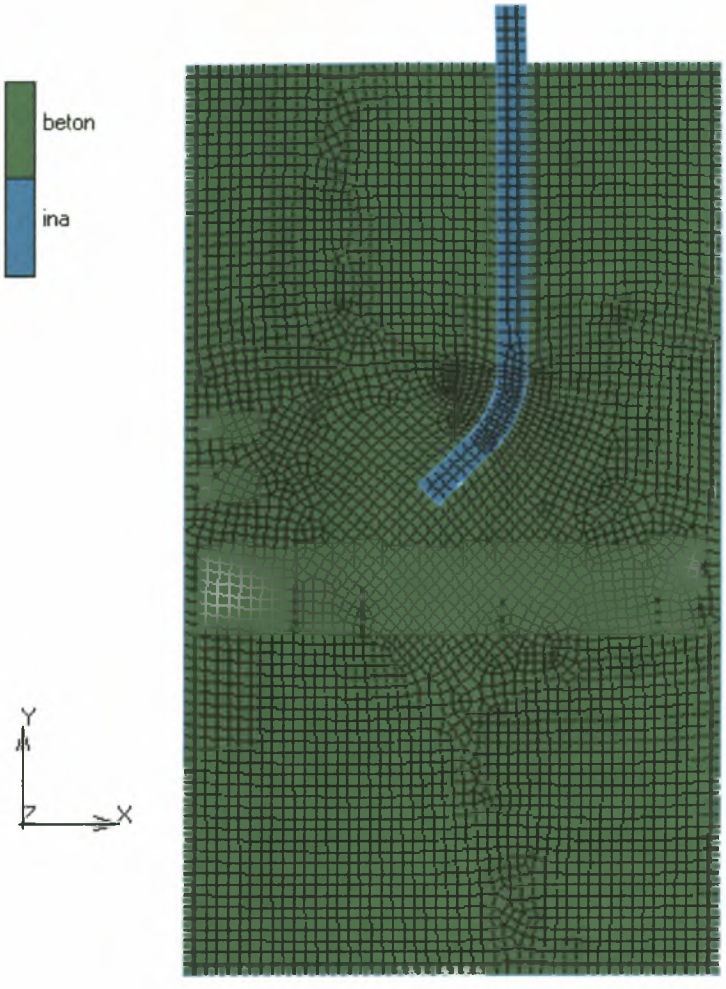
6.3 Παραμετρική ανάλυση δισδιάστατου μοντέλου σχετικά με τη γεωμετρία της ίνας

Όπως στην τρισδιάστατη ανάλυση, έτσι και στη δισδιάστατη, έγινε η μοντελοποίηση της δεύτερης και της τρίτης γεωμετρίας της ίνας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο μοντέλα μετά τη διακριτοποίηση. Για τη δεύτερη γεωμετρία (*Σχήμα 6.3.1*) δημιουργήθηκαν συνολικά 334 πεπερασμένα στοιχεία για την προσομοίωση της χαλύβδινης ίνας και 5055 πεπερασμένα για την προσομοίωση της μήτρας σκυροδέματος. Για την τρίτη γεωμετρία (*Σχήμα 6.3.2*) δημιουργήθηκαν 189 πεπερασμένα στοιχεία για την προσομοίωση της ίνας και 4592 στοιχεία για το σκυρόδεμα.



Σχήμα 6.3.1: Το μοντέλο της δεύτερης γεωμετρίας της ίνας μετά τη διακριτοποίηση

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

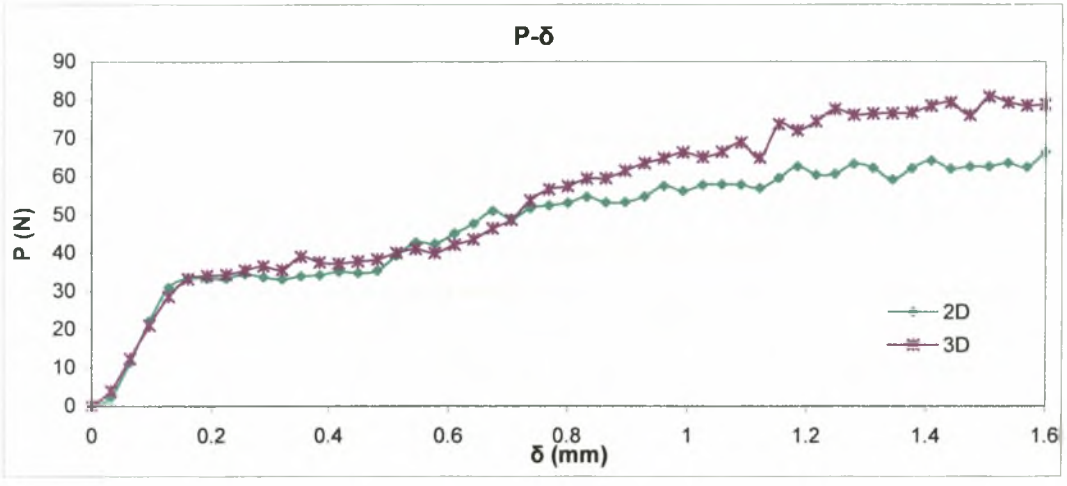


Σχήμα 6.3.2: Το μοντέλο της τρίτης γεωμετρίας της ίνας μετά τη διακριτοποίηση

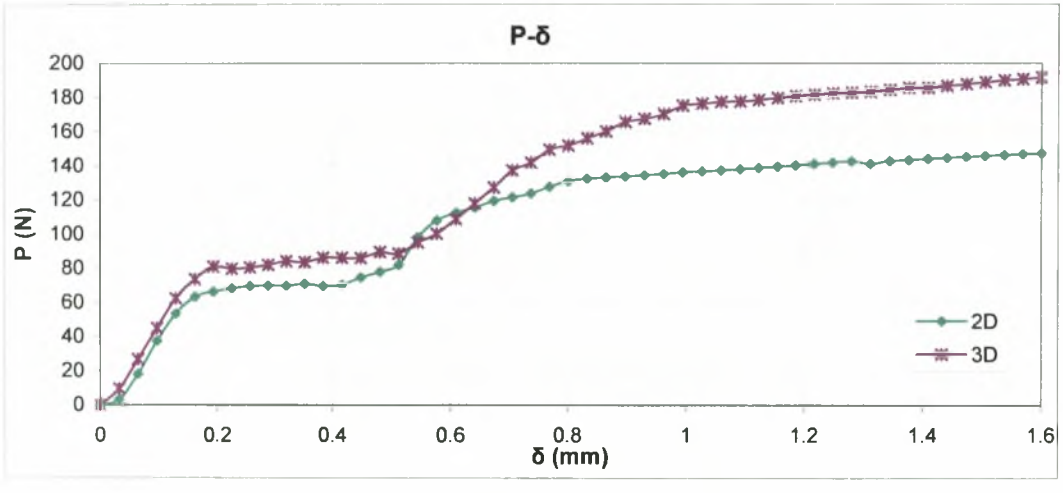
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

6.4 Αποτελέσματα της δισδιάστατης παραμετρικής ανάλυσης σχετικά με τη γεωμετρία της ίνας και την ποιότητα του χάλυβα.

Η σύγκριση των καμπυλών συμπεριφοράς της δισδιάστατης και της τρισδιάστατης ανάλυσης, για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζουμε, παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα.

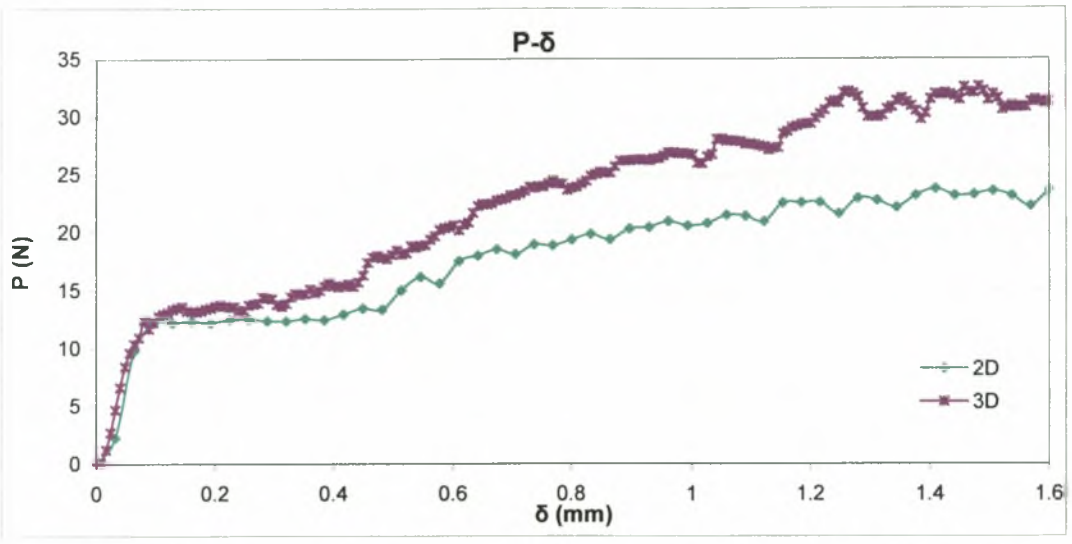


Σχήμα 6.4.1: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τη $2^{η}$ γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S1400 και f=0

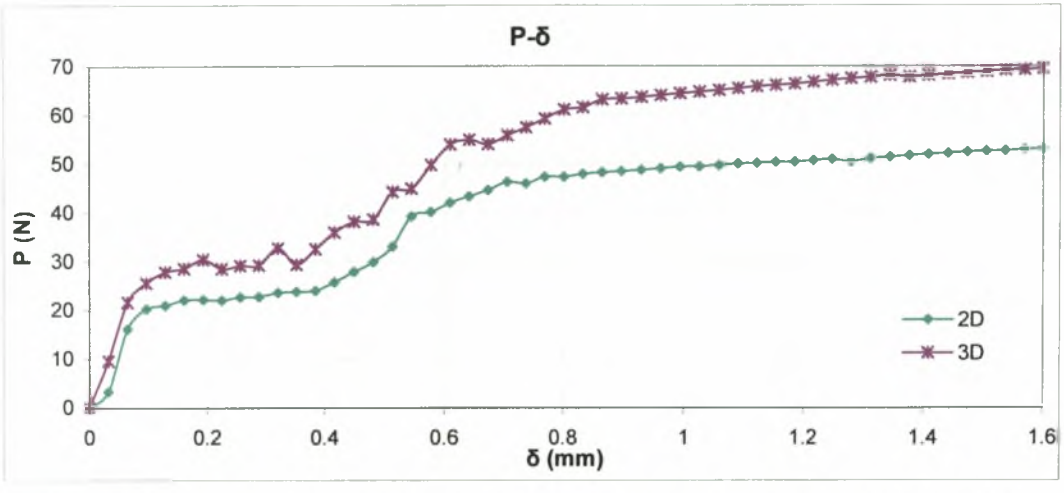


Σχήμα 6.4.2: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τη $2^{η}$ γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S1400 και f=0.3

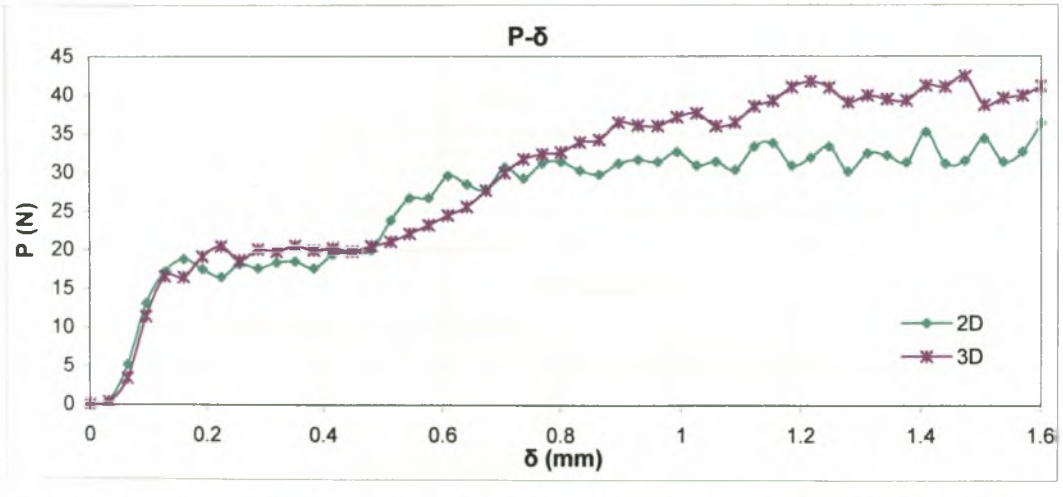
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 6.4.3: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τη 2η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S500 και f=0

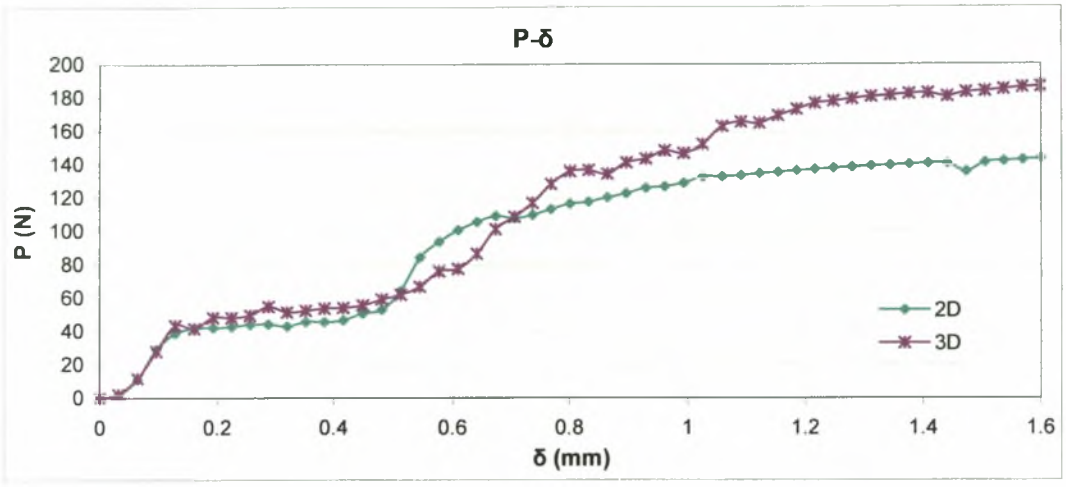


Σχήμα 6.4.4: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τη 2η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S500 και f=0.3

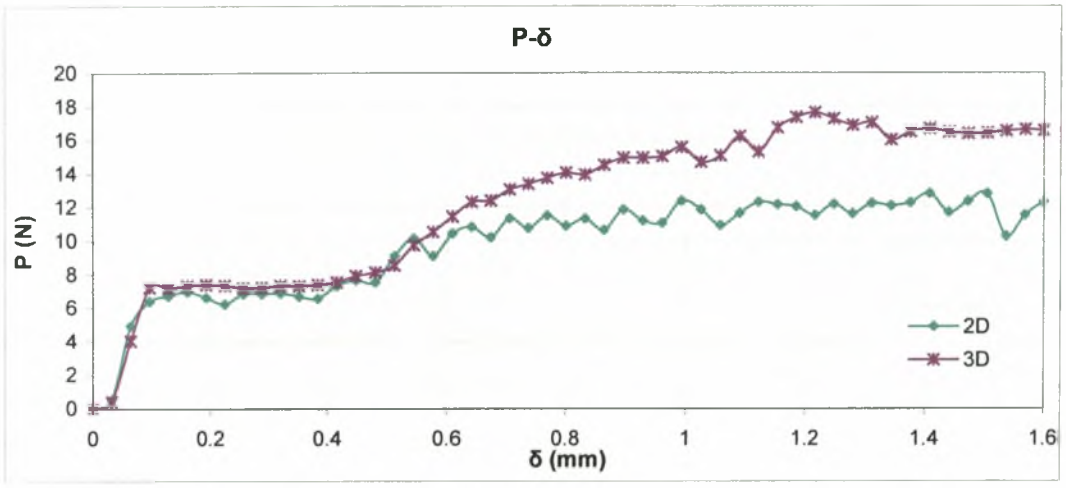


Σχήμα 6.4.5: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τη 3η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S1400 και f=0

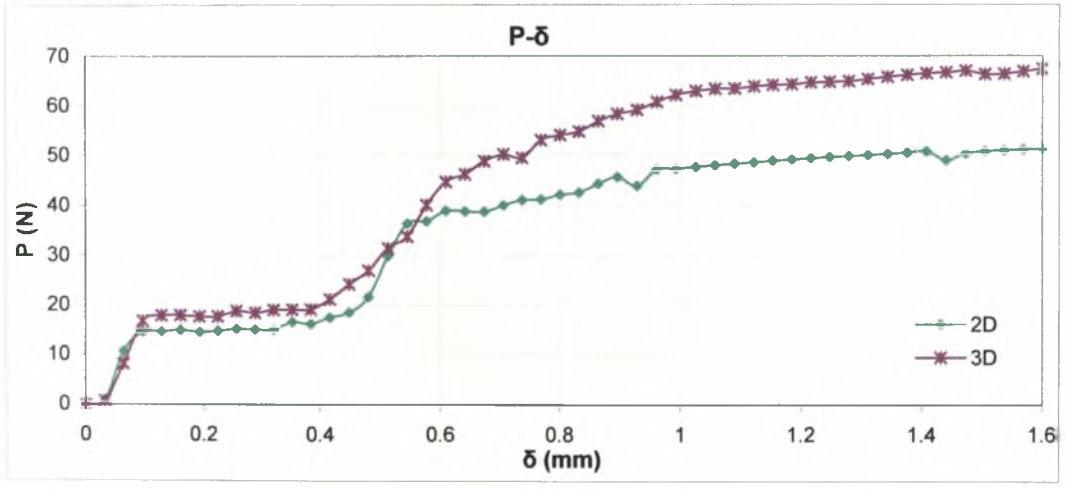
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 6.4.6: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τη 3η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S1400 και f=0.3



Σχήμα 6.4.7: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τη 3η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S500 και f=0



Σχήμα 6.4.8: συγκριτικό διάγραμμα P-δ για τη 3η γεωμετρία της ίνας, χάλυβα S500 και f=0.3

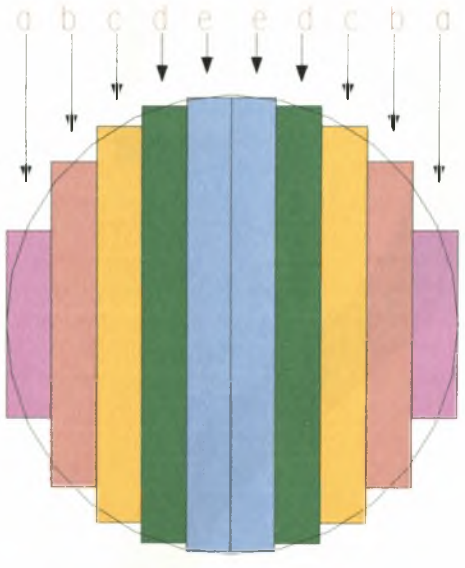
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

7ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

7.1 Περιγραφή βελτιωμένου δισδιάστατου μοντέλου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε η σύγκριση των καμπυλών που προέκυψαν από τις αναλύσεις του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου μοντέλου. Παρατηρήθηκε πως για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις οι καμπύλες αυτές διέφεραν μεταξύ τους, λιγότερο στη μορφή τους και περισσότερο στις τιμές τους. Θεωρώντας γενικότερα ότι η τρισδιάστατη μοντελοποίηση είναι πιο ρεαλιστική και προσομοιώνει πιο σωστά τα πραγματικά φαινόμενα, κρίθηκε σκόπιμη η προσπάθεια βελτίωσης του υπάρχοντος δισδιάστατου μοντέλου. Εξάλλου, είναι γεγονός πως σε κάθε δισδιάστατη μοντελοποίηση είναι αναγκαία η ύπαρξη κάποιων παραδοχών με περιθώρια βελτίωσης.

Ειδικότερα, ένα σημαντικό μειονέκτημα της δισδιάστατης προσομοίωσης έναντι της τρισδιάστατης, είναι η αδυναμία προσομοίωσης της πραγματικής κυκλικής διατομής της ίνας και της μήτρας σκυροδέματος, καθώς τα επίπεδα τετράεδρα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση έχουν σαν χαρακτηριστικό την ορθογωνική διατομή. Για το λόγο αυτό κρίθηκε καταρχήν σκόπιμο να γίνει μια πιο σωστή προσέγγιση της κυκλικής διατομής της ίνας. Η νέα αυτή προσέγγιση ήταν καθαρά γεωμετρική, έγινε δηλαδή, προσπάθεια προσέγγισης του σχήματος του κύκλου μέσω ορθογωνίων όπως φαίνεται στο *Σχήμα 7.1.1.* Με δεδομένο το πλάτος του κάθε ορθογωνίου, υπολογίστηκε το ύψος του με βάση το εμβαδόν του αντίστοιχου τμήματος του κύκλου που προσεγγίζει.

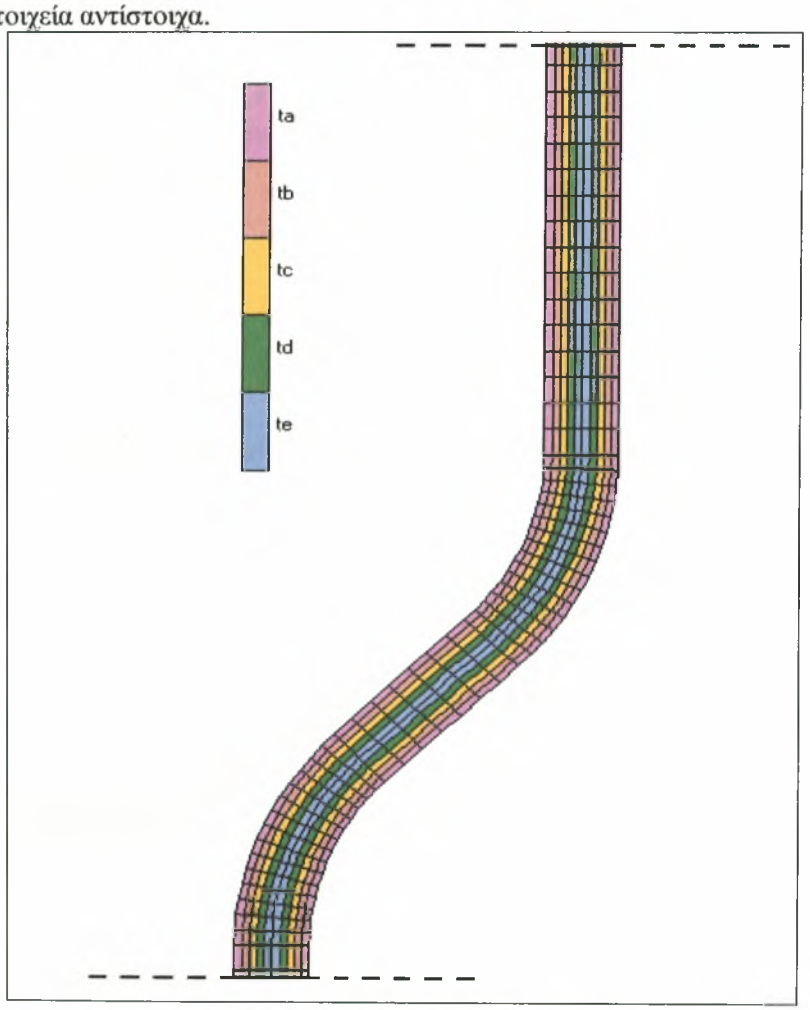


Σχήμα 7.1.1: Προσέγγιση κύκλου με ορθογώνια

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Για να γίνει εφικτή αυτή η νέα προσέγγιση έπρεπε να γίνει από την αρχή η διακριτοποίηση της ίνας. Αρχικά διαιρέθηκε σε δέκα ζώνες ίσου πλάτους που τη διέτρεχαν καθ' όλο το μήκος της (*Σχήμα 7.1.2*). Στη συνέχεια η κάθε ζώνη διακριτοποιήθηκε με τα τετράπλευρα πεπερασμένα στοιχεία τύπου 3. Στα στοιχεία της κάθε ζώνης δόθηκε διαφορετικό πάχος, ίσο με το αντίστοιχο ύψος που υπολογίστηκε για το κάθε ορθογώνιο. Πιο συγκεκριμένα, στις ζώνες 'a' δόθηκε πάχος t_a=0.1636mm, στις ζώνες 'b', 'c', 'd' και 'e' δόθηκαν τα πάχη t_b=0.2838mm t_c=0.3453mm t_d=0.3807mm t_e=0.3952mm αντίστοιχα.

Για τις αναλύσεις που ακολούθησαν δεν έγινε καμία περαιτέρω αλλαγή σε σχέση με το αρχικό δισδιάστατο μοντέλο, που να αφορά τις ιδιότητες των υλικών, τη διακριτοποίηση του σκυροδέματος, τις συνοριακές συνθήκες, τις συνθήκες επαφής και τον τύπο της ανάλυσης. Η βελτιωμένη διακριτοποίηση της ίνας εφαρμόστηκε και στις γεωμετρίες 2 και 3 με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για την πρώτη γεωμετρία δημιουργήθηκαν συνολικά 5036 πεπερασμένα στοιχεία για τη διακριτοποίηση της μήτρας σκυροδέματος και 860 για τη χαλύβδινη ίνα, για τη δεύτερη γεωμετρία δημιουργήθηκαν 5055 στοιχεία για το σκυρόδεμα και 930 στοιχεία για την ίνα, ενώ για την τρίτη γεωμετρία 4592 και 540 πεπερασμένα στοιχεία αντίστοιχα.



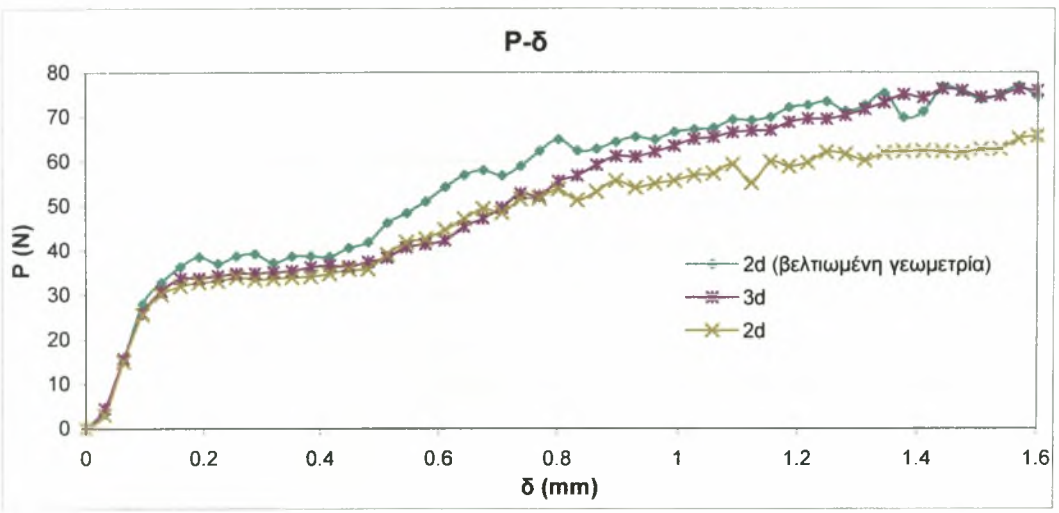
Σχήμα 7.1.2: Νέα διακριτοποίηση της ίνας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

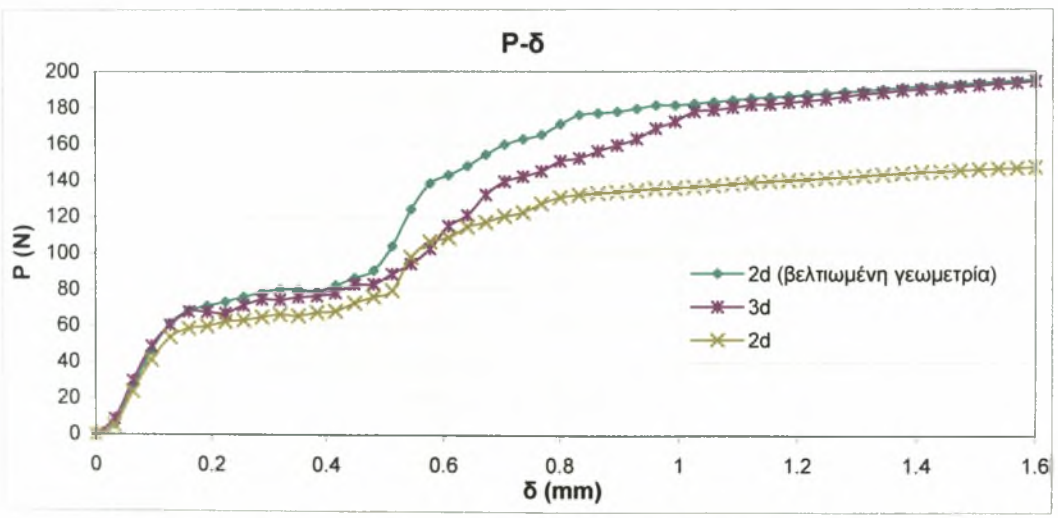
7.2 Αποτελέσματα των αναλύσεων για το βελτιωμένο δισδιάστατο μοντέλο

Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν συγκρίνονται οι καμπύλες δύναμης-μετακίνησης που προκύπτουν από τις αναλύσεις των τρισδιάστατων μοντέλων, των δισδιάστατων και των μοντέλων με τη βελτιωμένη δισδιάστατη γεωμετρία. Η σύγκριση αυτή επιβεβαιώνει πως ο νέος τρόπος διακριτοποίησης της ίνας οδηγεί σε αποτελέσματα που περιγράφουν πιο ορθά το πραγματικό φαινόμενο, καθώς οι αντίστοιχες καμπύλες προσεγγίζουν καλύτερα εκείνες της ρεαλιστικότερης τρισδιάστατης ανάλυσης. Η καλύτερη προσέγγιση των καμπυλών αυτών έγκειται στην ταύτιση του σημείου διαρροής του χάλυβα και στην πολύ μικρότερη διαφορά σχετικά με τις τιμές της δύναμης P.

7.2.1 1η γεωμετρία της ίνας

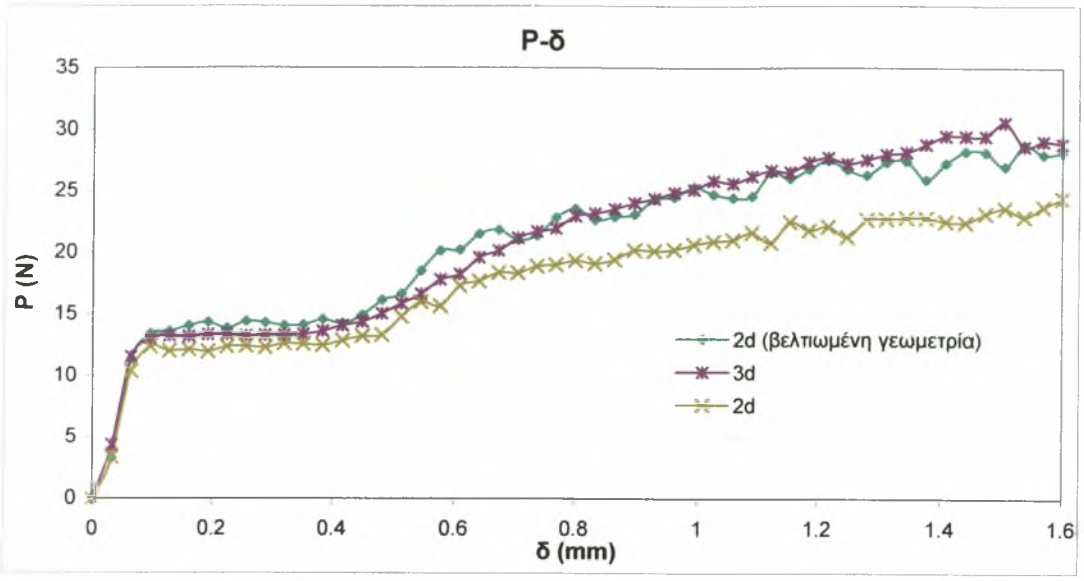


Σχήμα 7.2.1.1 :Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0

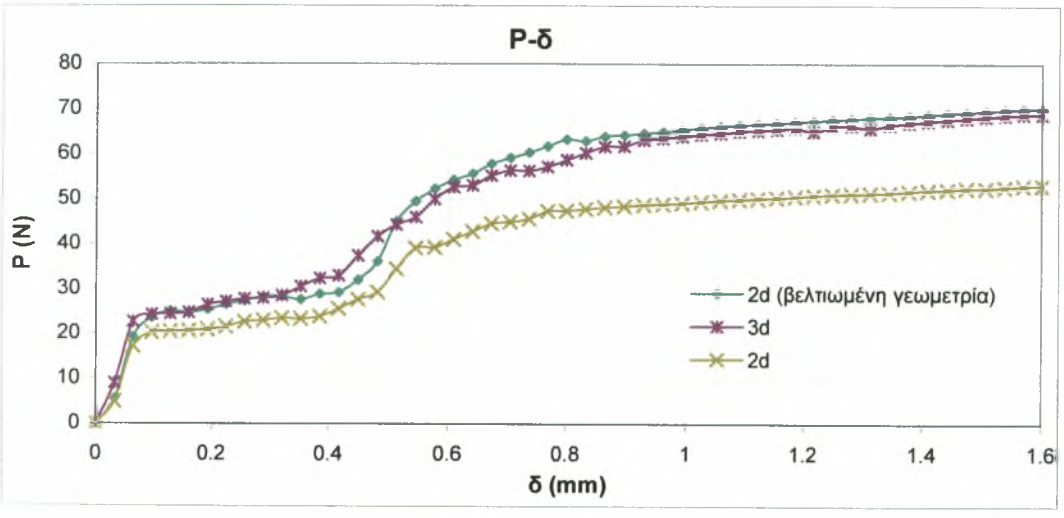


Σχήμα 7.2.1.2 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



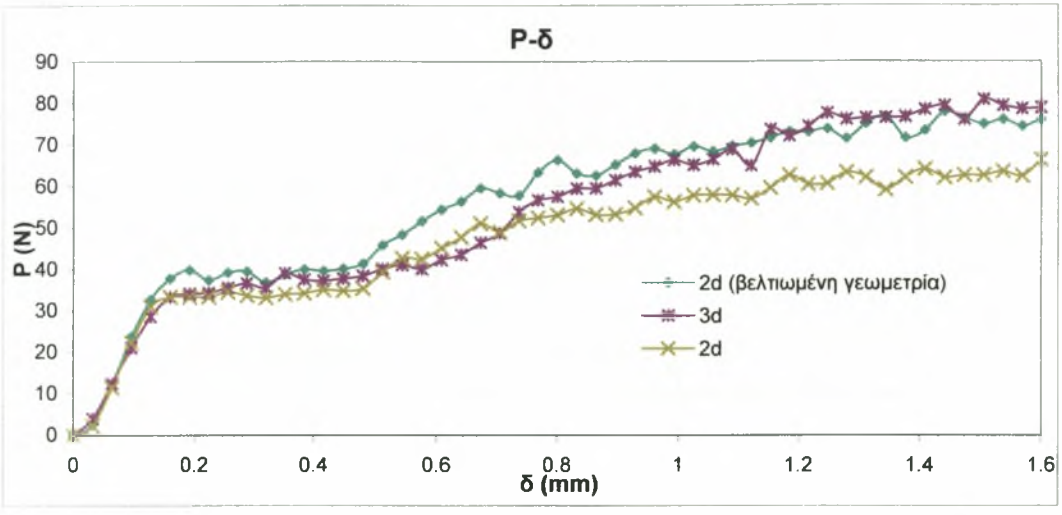
Σχήμα 7.2.1.3 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S500 και συντελεστή τριβής f=0



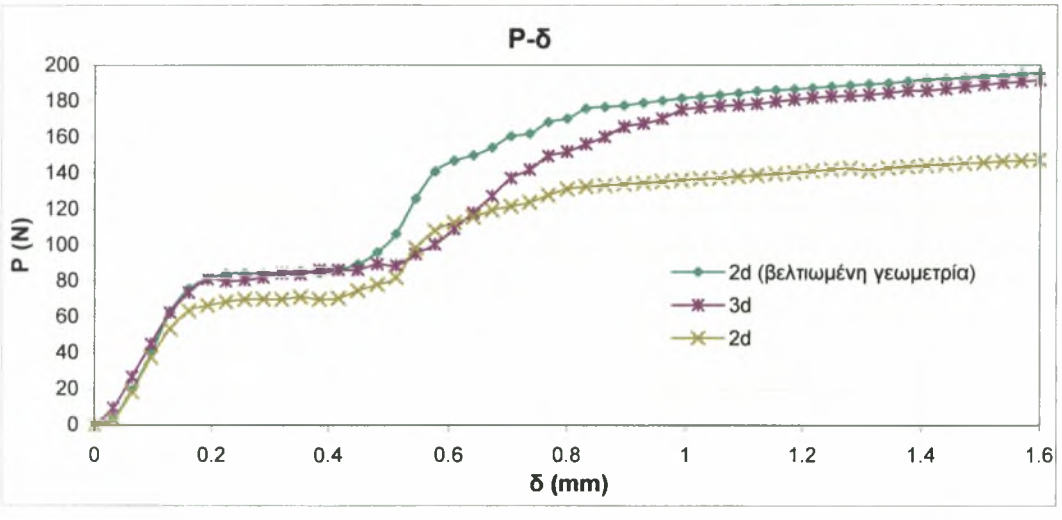
Σχήμα 7.2.1.4: Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S500 και συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

7.2.2 2η γεωμετρία της ίνας

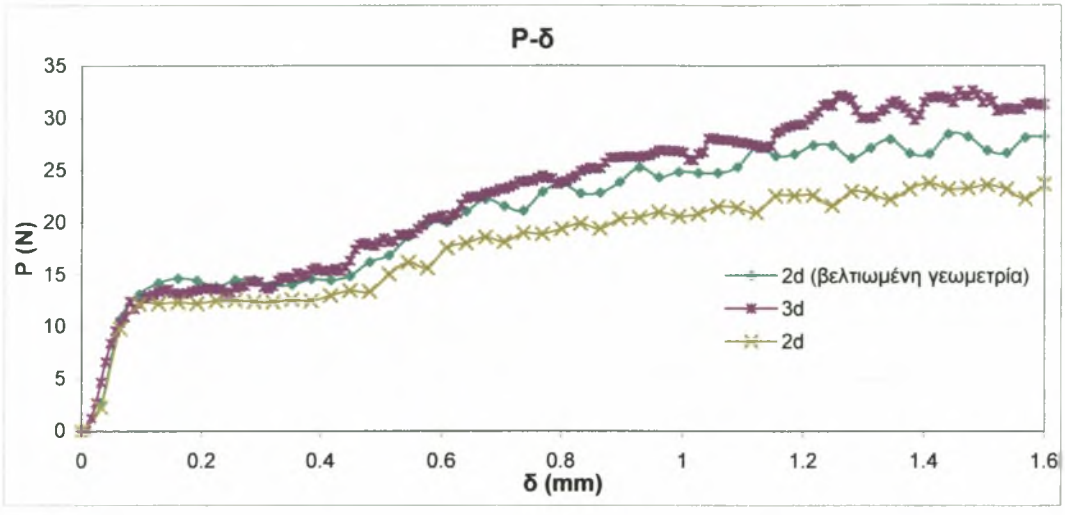


Σχήμα 7.2.2.1 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0

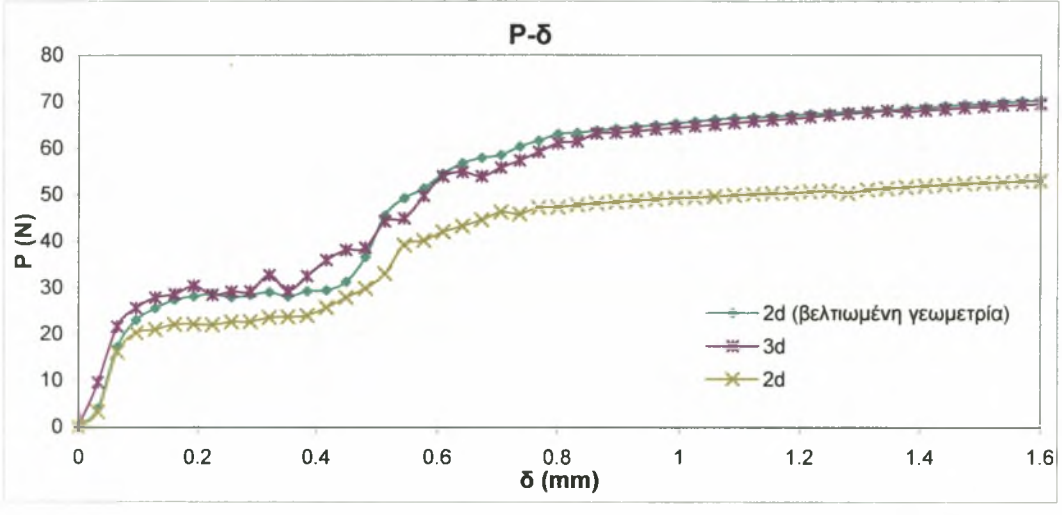


Σχήμα 7.2.2.2 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



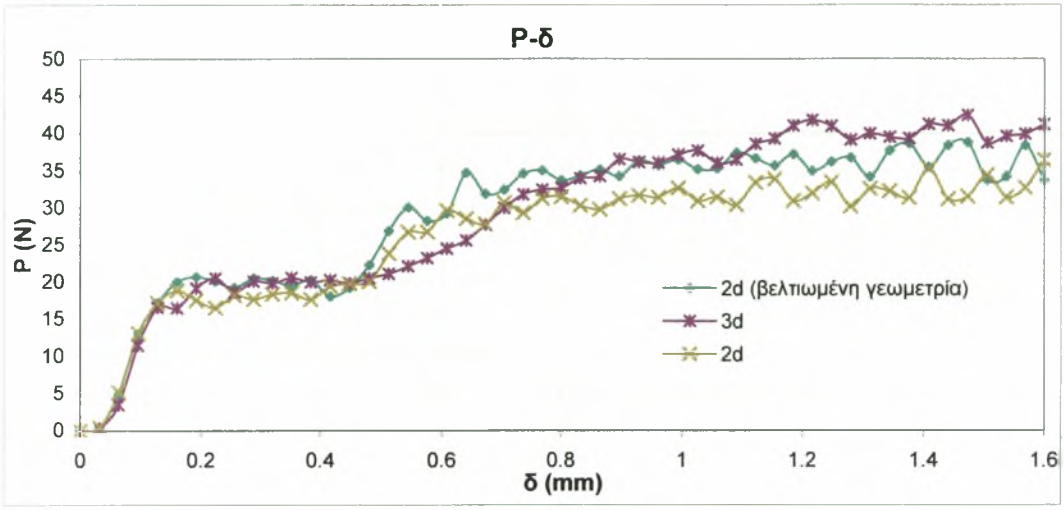
Σχήμα 7.2.2.3 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S5 και συντελεστή τριβής f=0



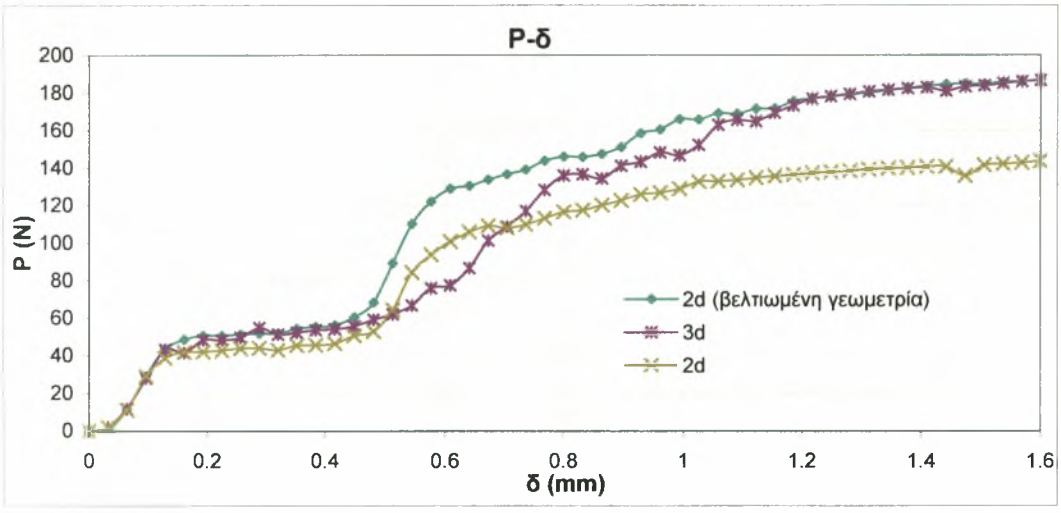
Σχήμα 7.2.2.4 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S500 και συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

7.2.3 3η γεωμετρία της ίνας

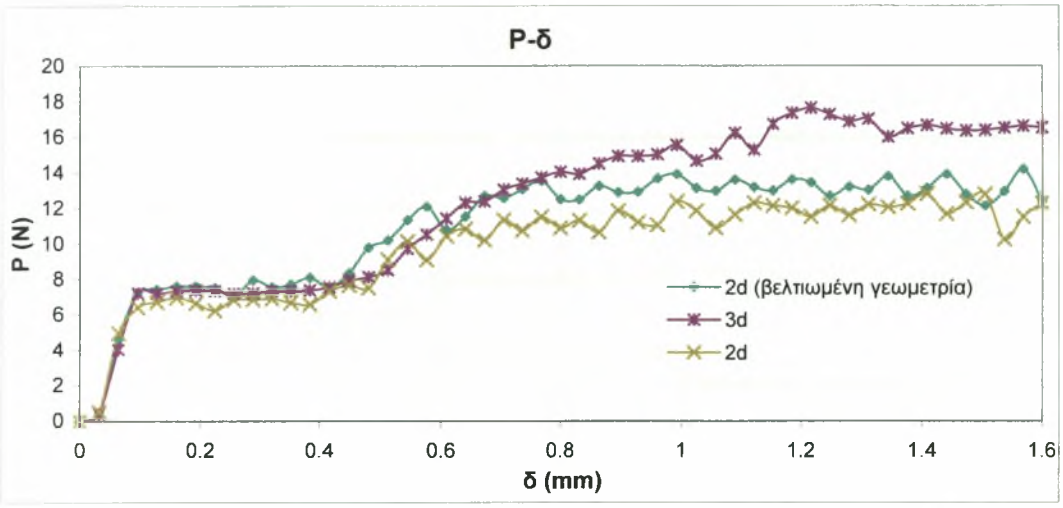


Σχήμα 7.2.3.1 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0

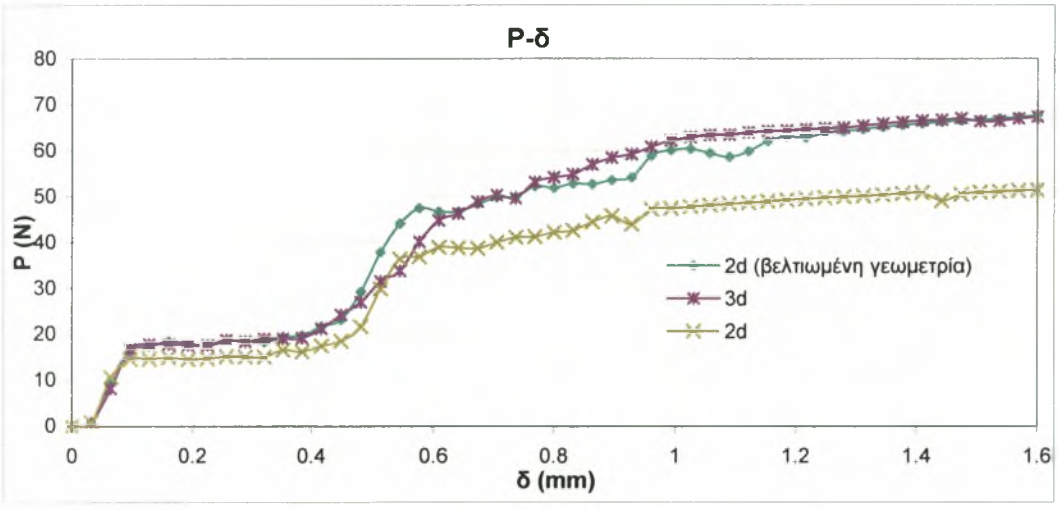


Σχήμα 7.2.3.2 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 7.2.3.3: Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S500 και συντελεστή τριβής f=0

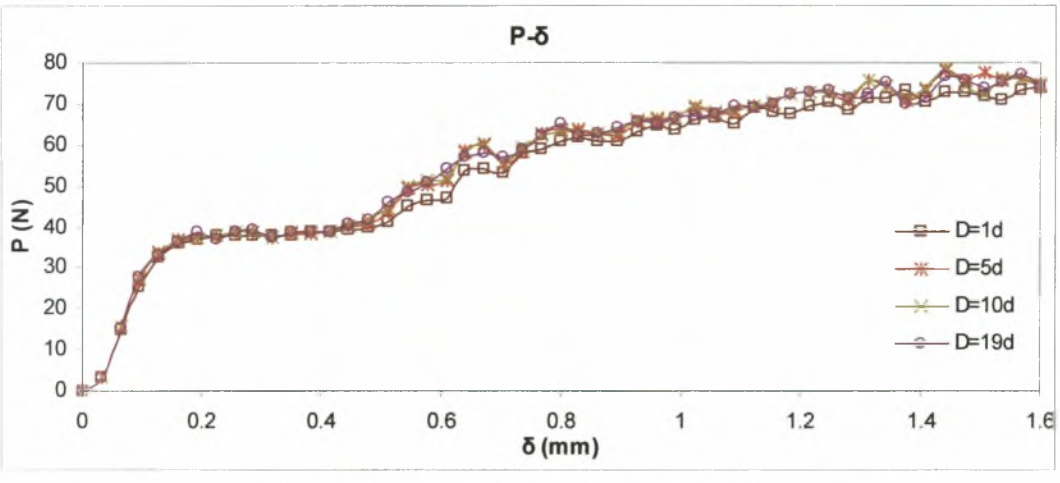


Σχήμα 7.2.3.4 : Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S500 και συντελεστή τριβής f=0.3

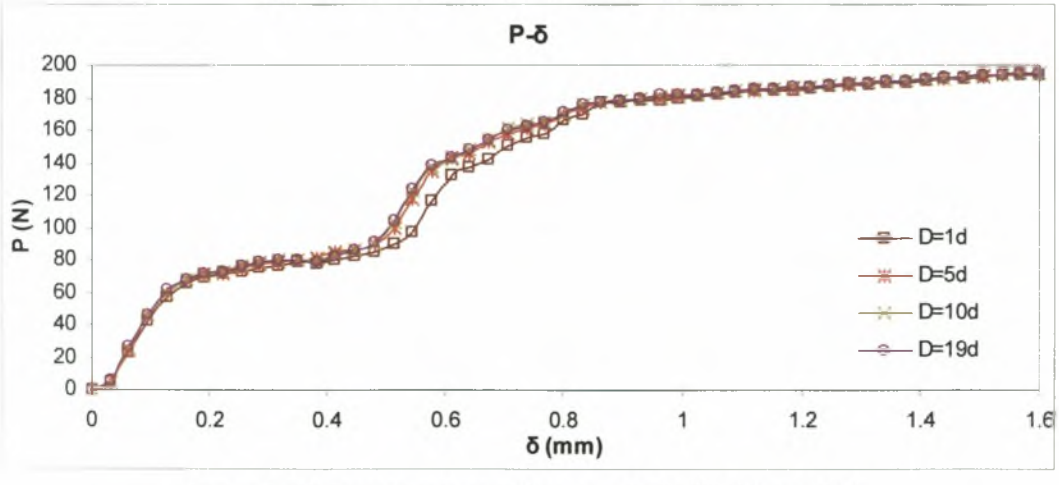
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

7.3 Παραμετρική ανάλυση σχετικά με την επιρροή του πάχους των στοιχείων του σκυροδέματος

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση που έγινε σχετικά με την επιρροή του πάχους των πεπερασμένων στοιχείων του σκυροδέματος στο πρόβλημα. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για πάχος στοιχείων σκυροδέματος ίσο με 1d, 5d και 10d, όπου d=0.4mm είναι η διάμετρος της ίνας. Οι αναλύσεις αυτές έγιναν για χάλυβα S1400, για την αρχική γεωμετρία της ίνας και για συντελεστή τριβής f=0 και f=0.3. Στα διαγράμματα που ακολουθούν (*Σχήμα 7.3.1* και *Σχήμα 7.3.2*) συγκρίνονται οι καμπύλες P-δ των παραπάνω αναλύσεων με τις αντίστοιχες για πάχος σκυροδέματος ίσο με 19d, το οποίο είχε υιοθετηθεί από την αρχή για τα δισδιάστατα μοντέλα. Η απόλυτη ταύτιση των καμπυλών αποδεικνύει πως η διαφοροποίηση του πάχους δεν επηρεάζει το φαινόμενο της εξόλκευσης της ίνας. Έτσι, επιβεβαιώνεται και το γεγονός πως το πρόβλημα που μελετάται χαρακτηρίζεται από το σχήμα και τις ιδιότητες της χαλύβδινης ίνας.



Σχήμα 7.3.1: Συγκριτικές καμπύλες για χάλυβα S1400 και f=0



Σχήμα 7.3.2: Συγκριτικές καμπύλες για χάλυβα S1400 και f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

7.4 Χρόνοι ανάλυσης-CPU time

Τέλος, παρατίθενται πίνακες με τους χρόνους ανάλυσης του τρισδιάστατου και των δύο δισδιάστατων μοντέλων. Είναι προφανές πως οι αναλύσεις του τρισδιάστατου μοντέλου απαιτούν πολύ περισσότερο υπολογιστικό χρόνο από τις αντίστοιχες των δισδιάστατων μοντέλων.

	1η γεωμετρία			
	3d	**2d**	**2d-βελτιωμένο**	
μ=0	7878	240	270	sec
μ=0.3	6813	262	291	sec

	2η γεωμετρία			
	3d	**2d**	**2d-βελτιωμένο**	
μ=0	10252	232	285	sec
μ=0.3	12126	265	320	sec

	3η γεωμετρία			
	3d	**2d**	**2d-βελτιωμένο**	
μ=0	7227	188	204	sec
μ=0.3	7862	215	262	sec

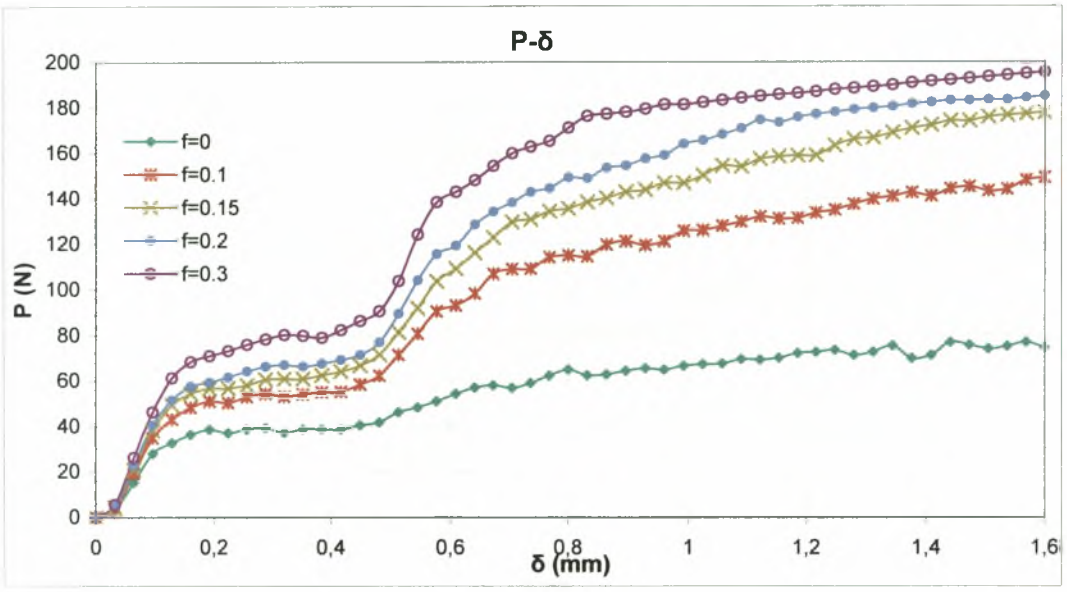
Πίνακας 7.1: Χρόνοι ανάλυσης - CPU time

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

8ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συμπεράσματα

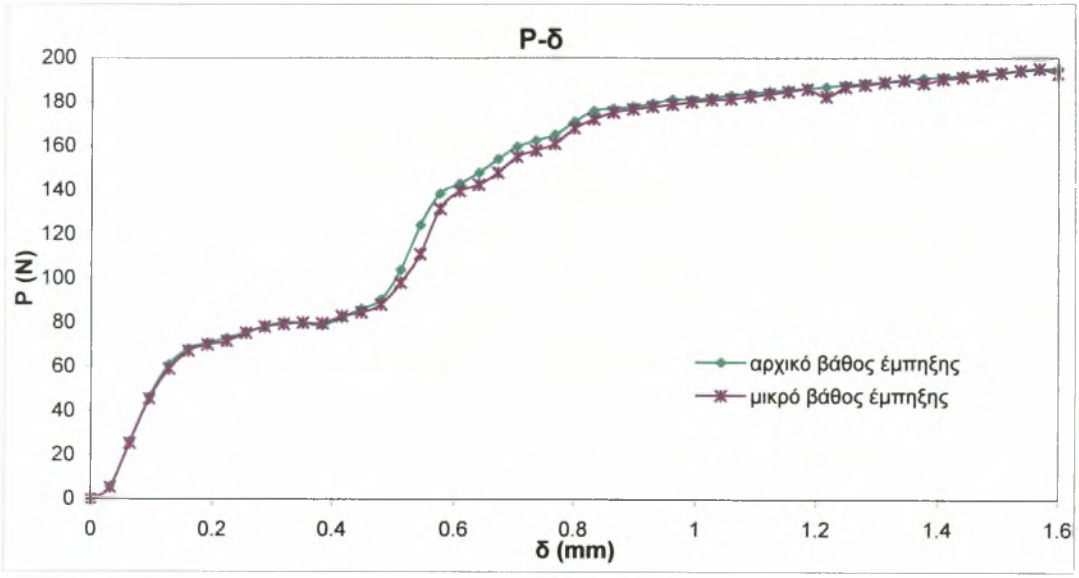
Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να διερευνηθεί η συμπεριφορά χαλύβδινων ινών (S1400) με αγκιστροειδές άκρο κατά την εξόλκευσή τους από μήτρα σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το τρισδιάστατο μοντέλο προέκυψε πως, για τις θεωρούμενες συνθήκες επαφής μεταξύ χάλυβα-σκυροδέματος και για μηδενικό συντελεστή τριβής, η ίνα ολισθαίνει και τελικά εξολκεύεται. Αντίθετα, για συντελεστή τριβής ίσο με 0.3, η ίνα μετά από υπερβολική πλαστικοποίηση του άνω ευθύγραμμου τμήματος, θα κοπεί και μόνο ένα τμήμα της θα εξολκευθεί, ενώ το υπόλοιπο θα παραμείνει μέσα στη μήτρα σκυροδέματος. Οι παραμετρικές αναλύσεις για διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής έδειξαν πως η θεωρούμενη κάθε φορά τιμή του, παίζει σημαντικό ρόλο, τόσο στη συμπεριφορά της ίνας, όσο και στις τιμές της δύναμης εξόλκευσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης.



Σχήμα 8.1: Συγκριτικές καμπύλες P-δ για τις διάφορες τιμές του συντελεστή τριβής

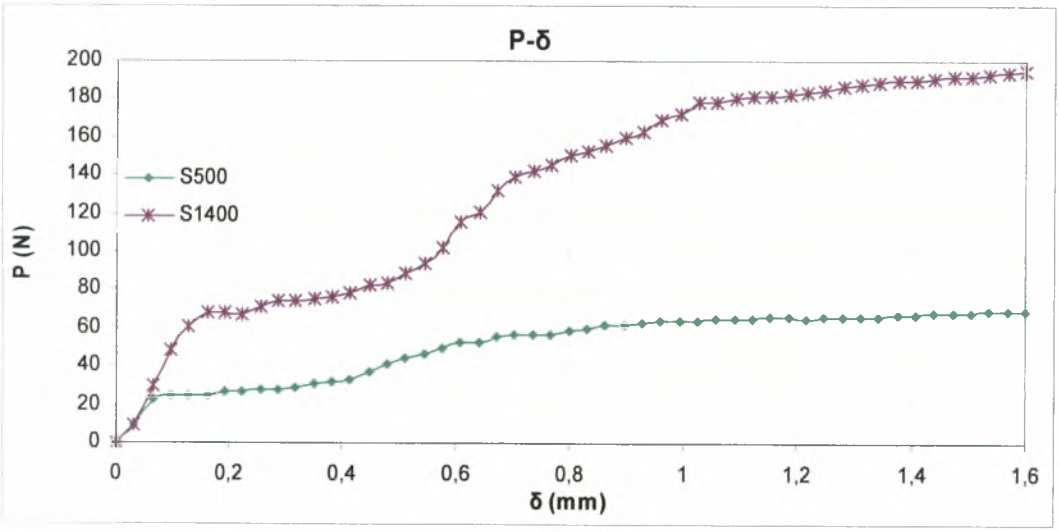
Οι παραμετρικές αναλύσεις που αφορούσαν το βάθος έμπηξης της ίνας μέσα στη μήτρα σκυροδέματος απέδειξαν πως η αυξομείωσή του δεν επηρεάζει τη γενικότερη συμπεριφορά της ίνας ή τις τιμές της P κατά την εξόλκευση *(Σχήμα 8.2)*.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 8.2: Καμπύλες δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400, συντελεστή τριβής f=0.3 και δύο διαφορετικά βάθη έμπηξης

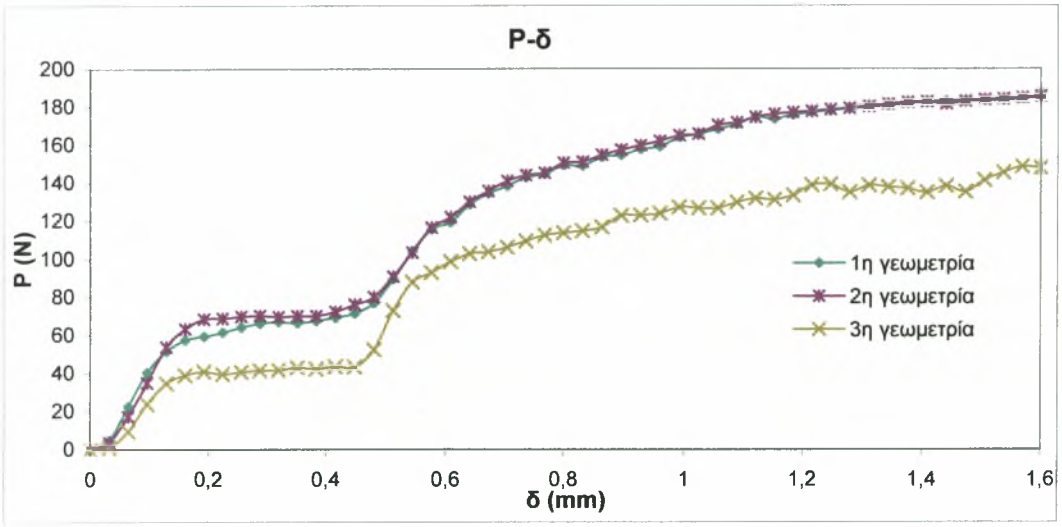
Ακόμα, ίδια παραμένει η συμπεριφορά της ίνας εάν αντί για χάλυβα S1400 χρησιμοποιηθεί χάλυβας χαμηλότερης αντοχής (S500). Στην περίπτωση αυτή όμως, οι τιμές της δύναμης, για τις οποίες η ίνα, είτε αστοχεί, είτε εξολκεύεται, είναι σημαντικά χαμηλότερες *(Σχήμα 8.3)*.



Σχήμα 8.3: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για χάλυβα S1400 και S500, με συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

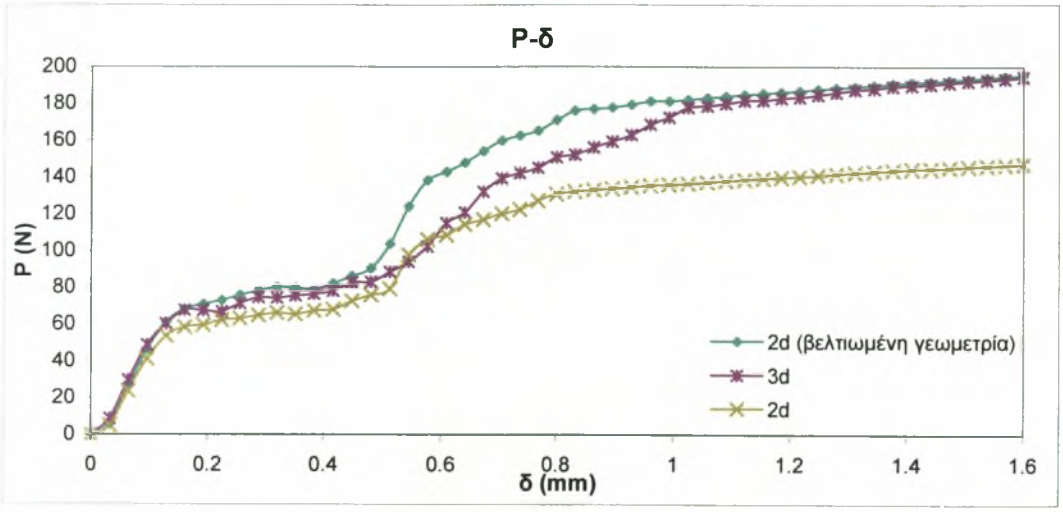
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη διερεύνηση του ρόλου του μηχανισμού αγκύρωσης της ίνας, επιβεβαίωσαν τη σπουδαιότητά του. Στην περίπτωση του ελλιπούς μηχανισμού αγκύρωσης και για συγκεκριμένο συντελεστή τριβής, παρατηρήθηκε πως η ίνα ολισθαίνει και εξολκεύεται σε αντίθεση με την κανονικά αγκυρωμένη ίνα και μάλιστα για πολύ μικρότερες τιμές της δύναμης εξόλκευσης. Στην περίπτωση της δεύτερης γεωμετρίας της ίνας, στην οποία, το μεσαίο κεκλιμένο ευθύγραμμο τμήμα της διπλασιάστηκε σε μήκος, δεν παρατηρήθηκε καμία διαφορά στη συμπεριφορά της ίνας και στις τιμές της δύναμης P, σε σχέση με την ίνα της πρώτης γεωμετρίας *(Σχήμα 8.4)*.



Σχήμα 8.4: Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης για την $1^{η}$,$2^{η}$ και $3^{η}$ γεωμετρία, με χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.2

Το δισδιάστατο μοντέλο που προσομοιώνει πιο σωστά το πραγματικό φαινόμενο, είναι εκείνο στο οποίο η ίνα διακριτοποιήθηκε χωριζόμενη σε 10 ζώνες πεπερασμένων στοιχείων διαφορετικού πάχους έτσι ώστε να προσεγγίζεται ακριβέστερα η κυκλική διατομή της ίνας. Οι καμπύλες δύναμης-μετακίνησης αυτού του δισδιάστατου μοντέλου είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες της τρισδιάστατης μοντελοποίησης *(Σχήμα 8.5)*. Λιγότερο ακριβή αποτελέσματα έχουμε στην περίπτωση το πάχος των στοιχείων της ίνας υπολογίζεται με βάση την ισοδύναμη διατομή. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως η μεταβολή του πάχους των στοιχείων του σκυροδέματος δεν επηρέασε τα αποτελέσματα των δισδιάστατων αναλύσεων. Έτσι γίνεται προφανές, πως λόγω της μεγάλης αντοχής του σκυροδέματος, αυτό δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου, σε αντίθεση με τη χαλύβδινη ίνα, της οποίας τα χαρακτηριστικά έπρεπε να προσομοιωθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



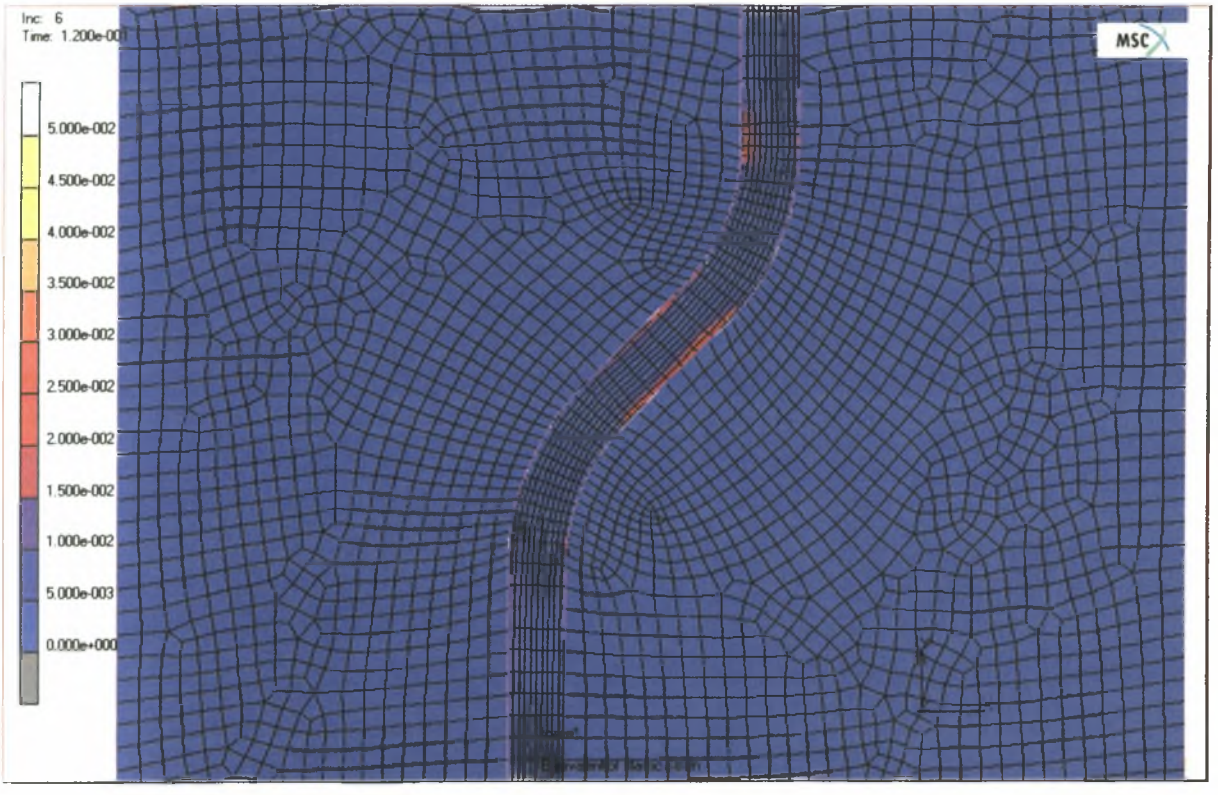
Σχήμα 8.5: Συγκριτικές καμπύλες P-δ για χάλυβα S1400 και συντελεστή τριβής f=0.3

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

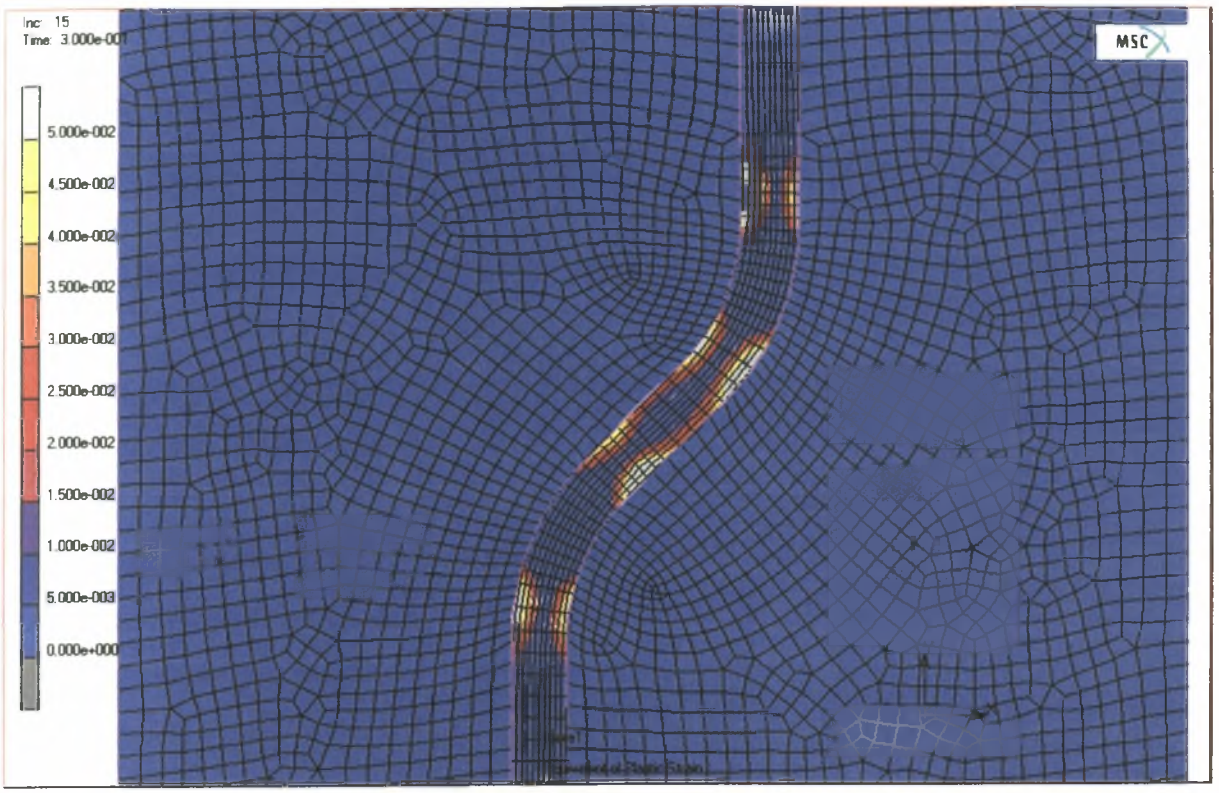
Α. Σχηματική απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της χαλύβδινης ίνας στη δισδιάστατη βελτιωμένη μοντελοποίηση

- **1η γεωμετρία της ίνας, συντελεστής τριβής f=0, χάλυβας S1400.**

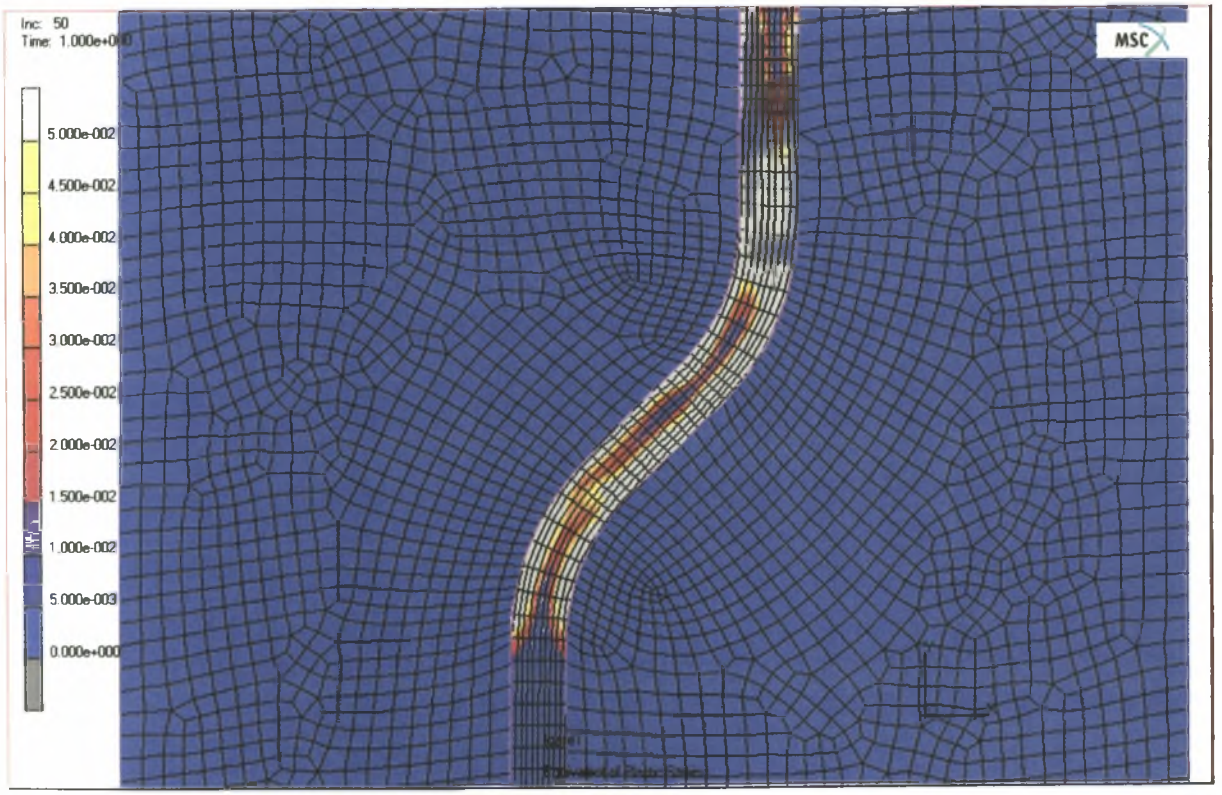


Σχήμα 1: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 6ο βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



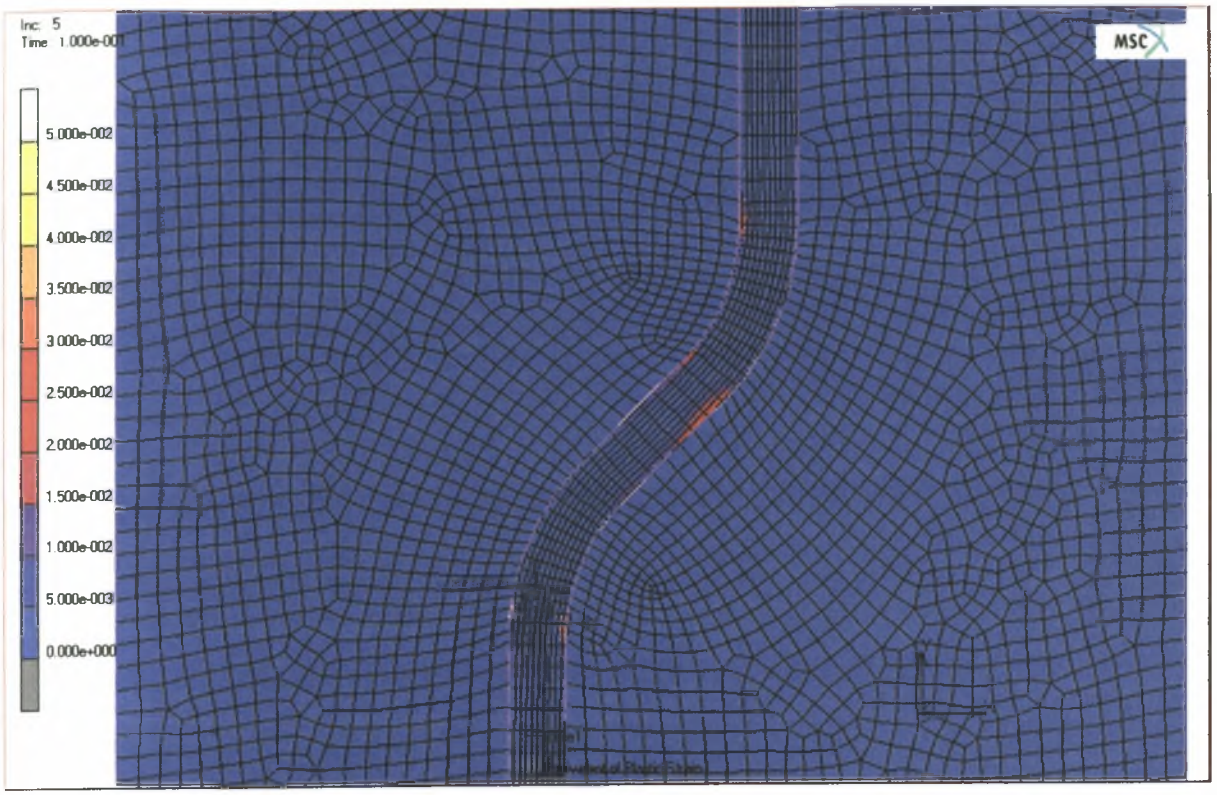
Σχήμα 2: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 15° βήμα φόρτισης



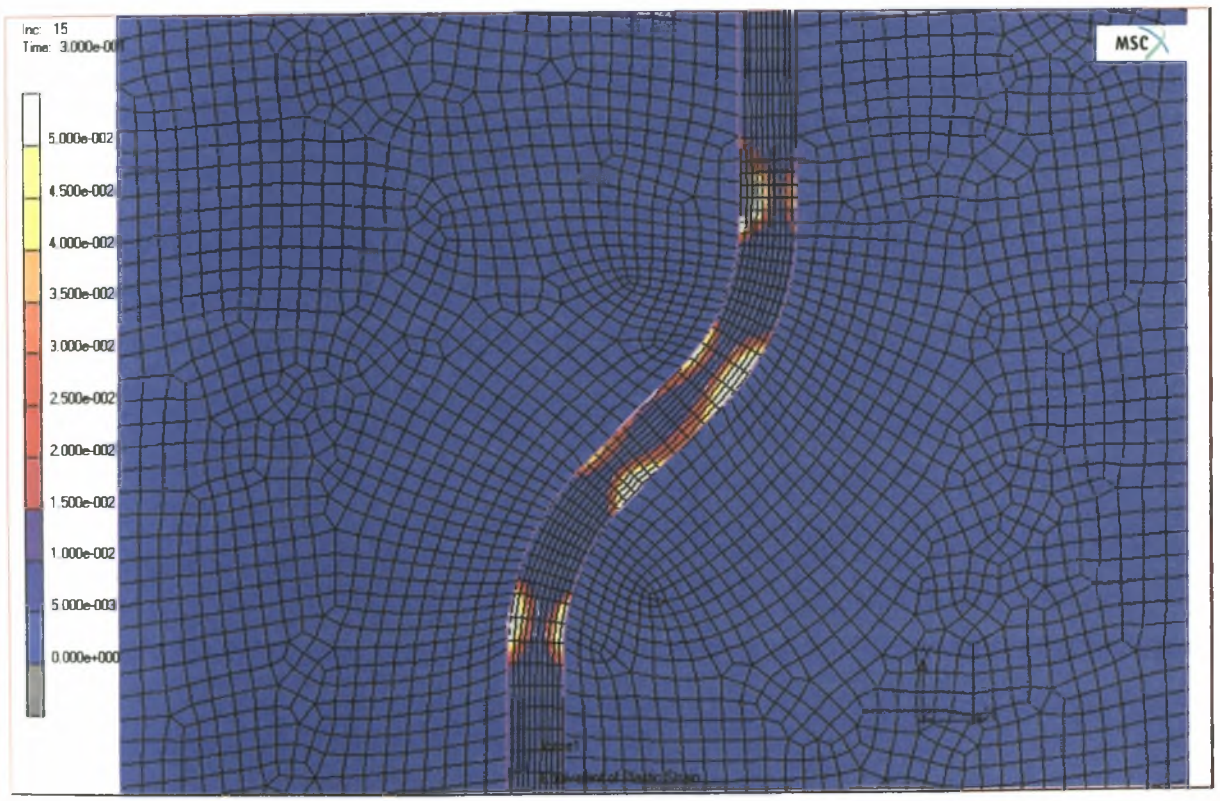
Σχήμα 3: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

- **1η γεωμετρία της ίνας, συντελεστής τριβής f=0.3, χάλυβας S1400.**

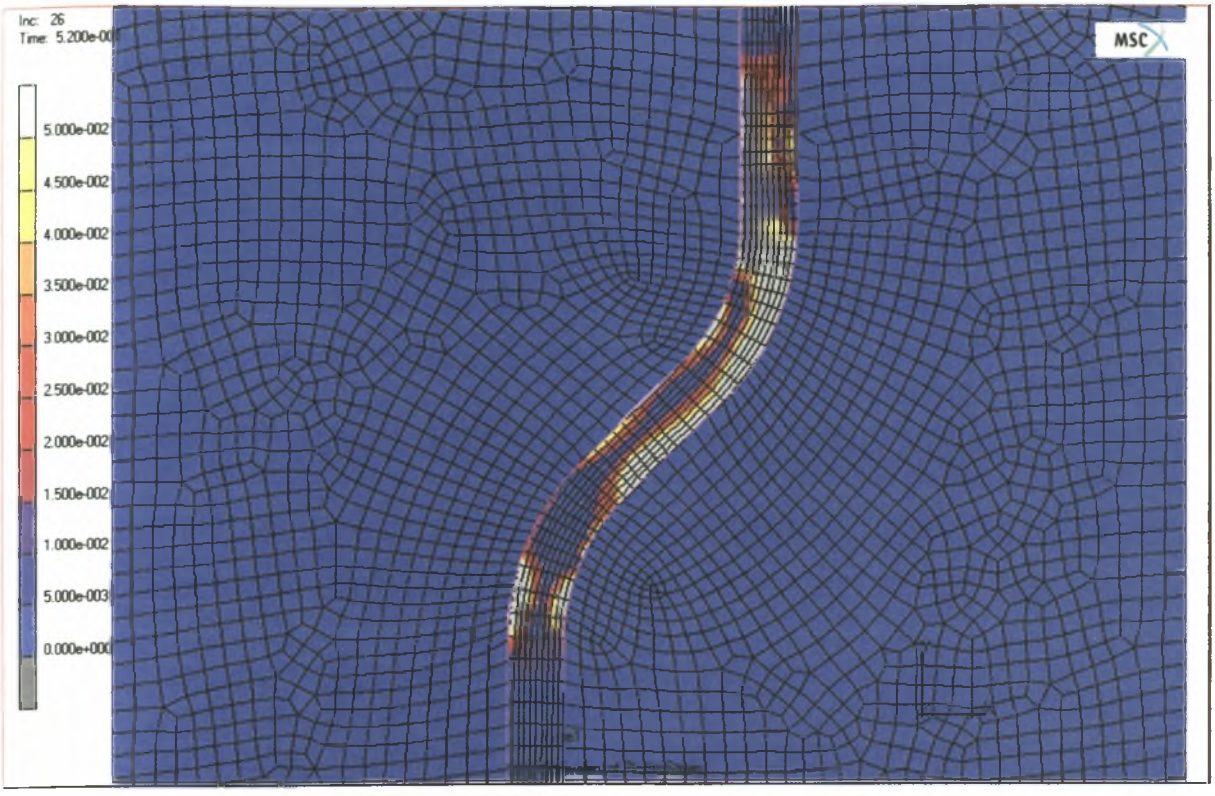


Σχήμα 4: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 5ο βήμα φόρτισης

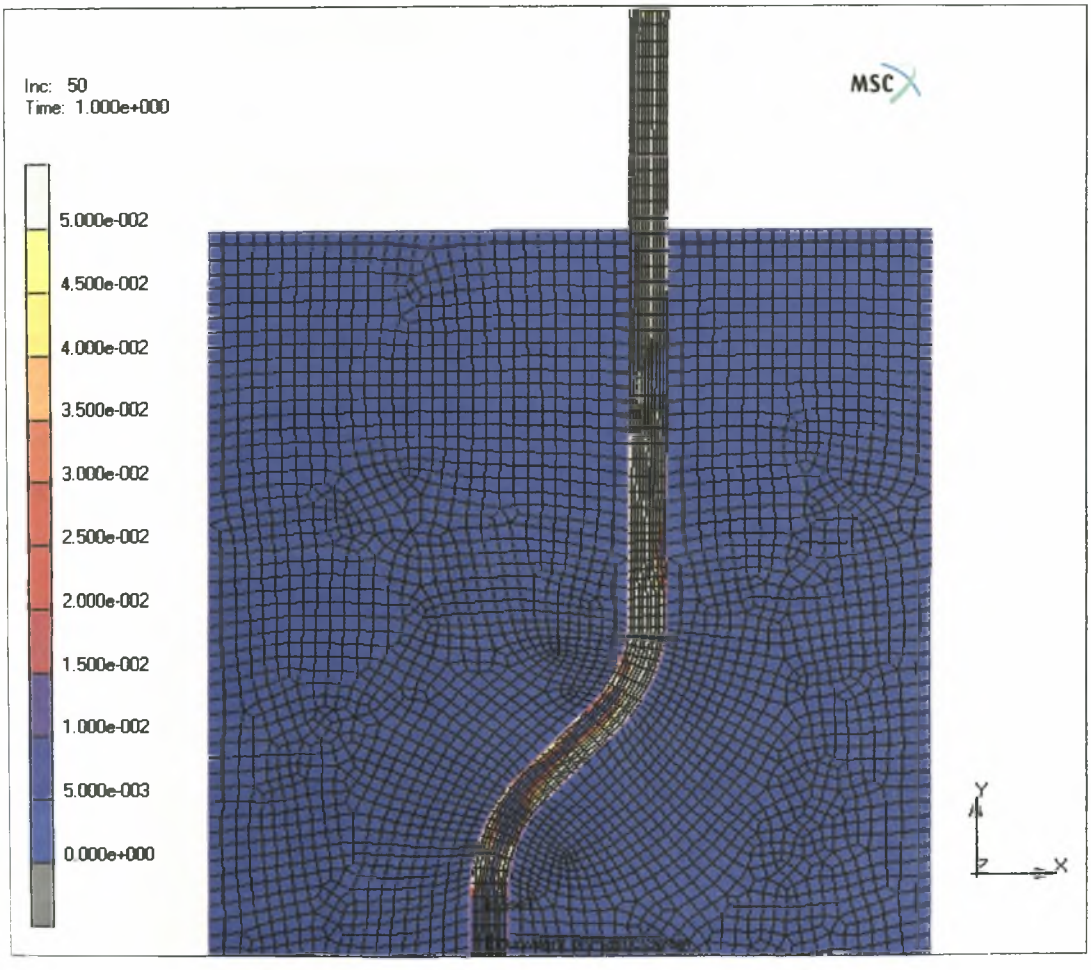


Σχήμα 5: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 15ο βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



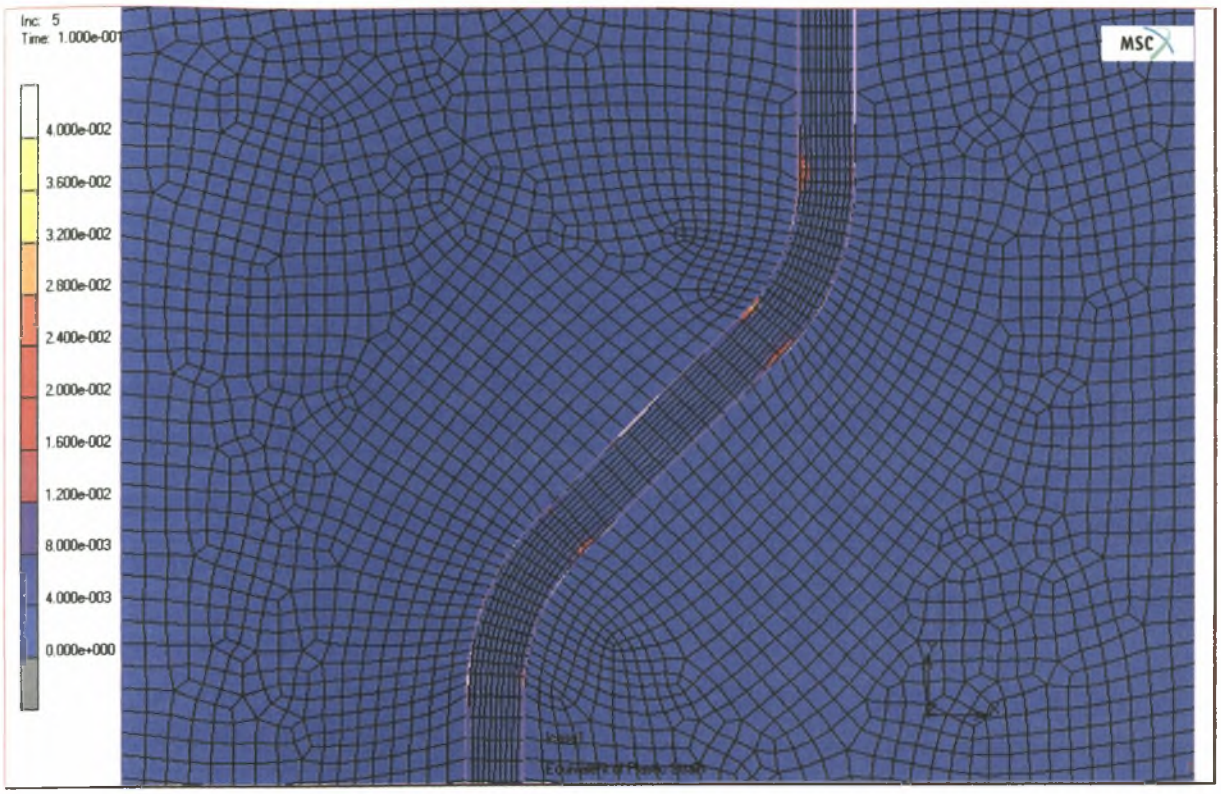
Σχήμα 6: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 26° βήμα φόρτισης



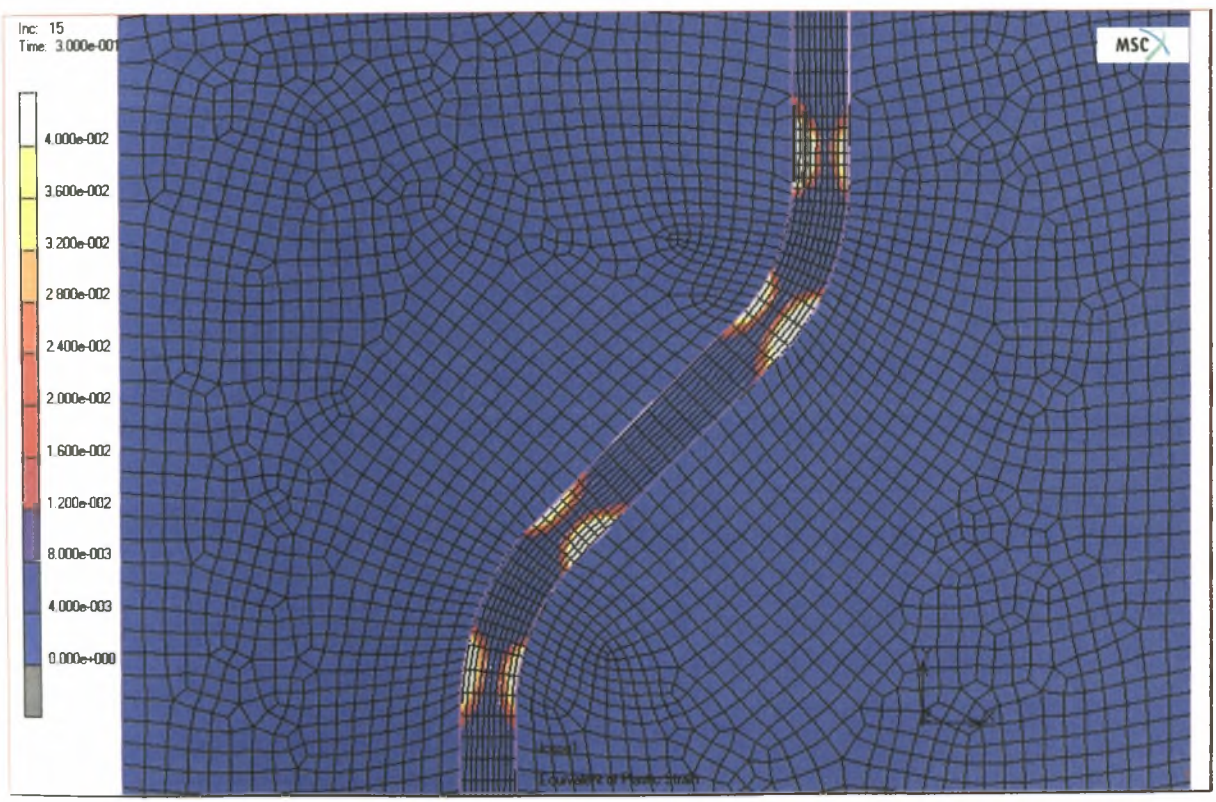
Σχήμα 7: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

- **2η γεωμετρία της ίνας, συντελεστής τριβής f=0, χάλυβας S1400.**

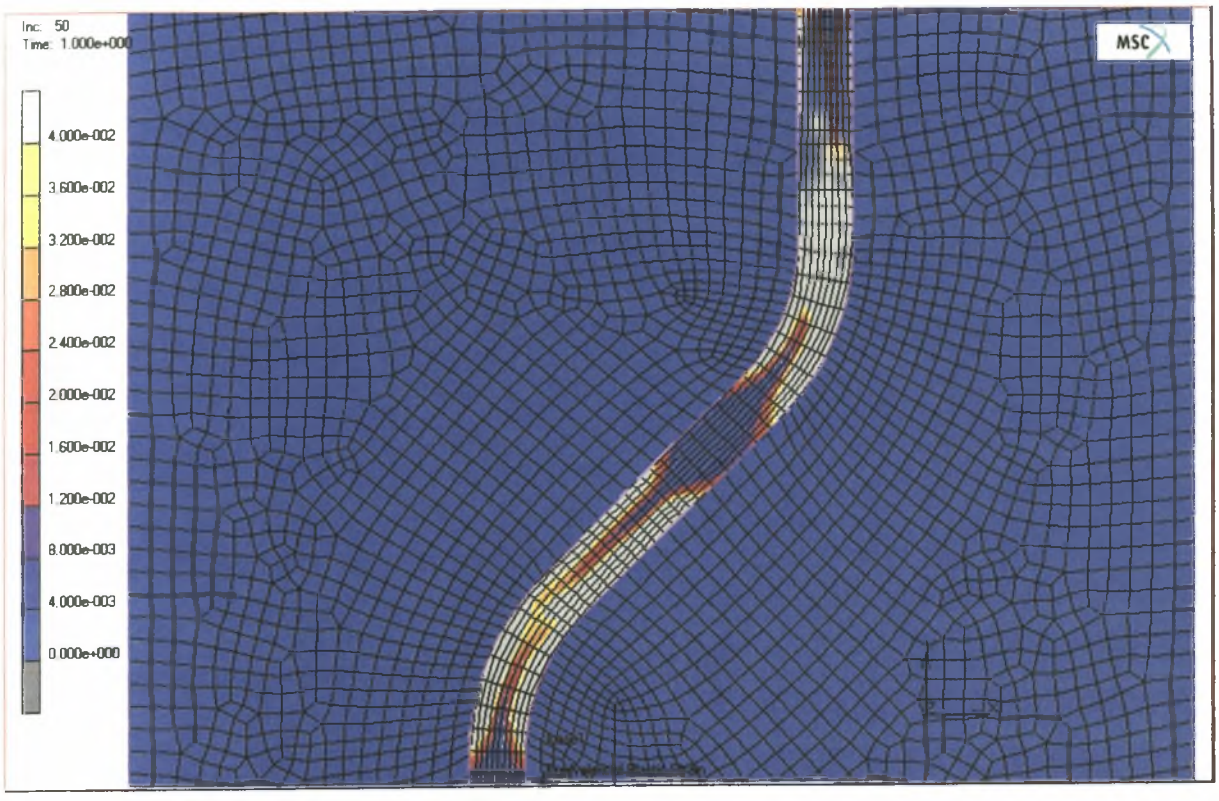


Σχήμα 8: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 5ο βήμα φόρτισης



Σχήμα 9: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 15ο βήμα φόρτισης

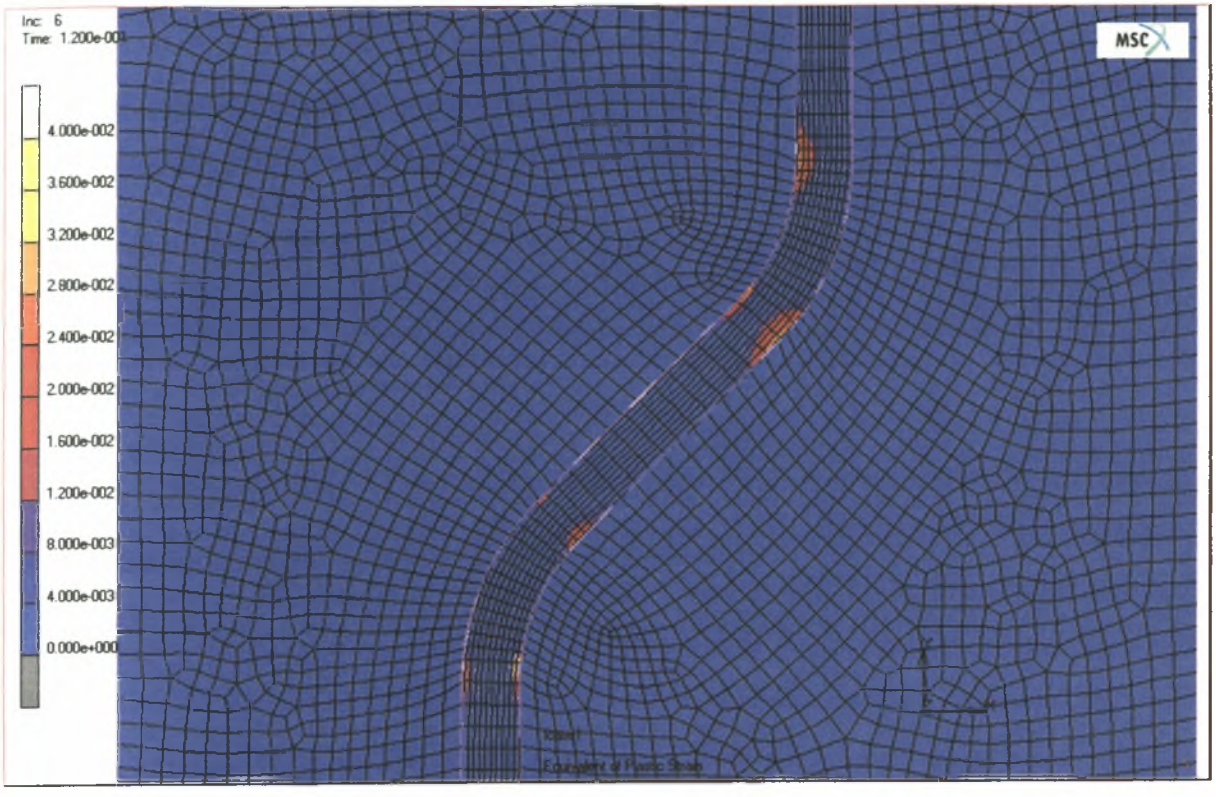
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



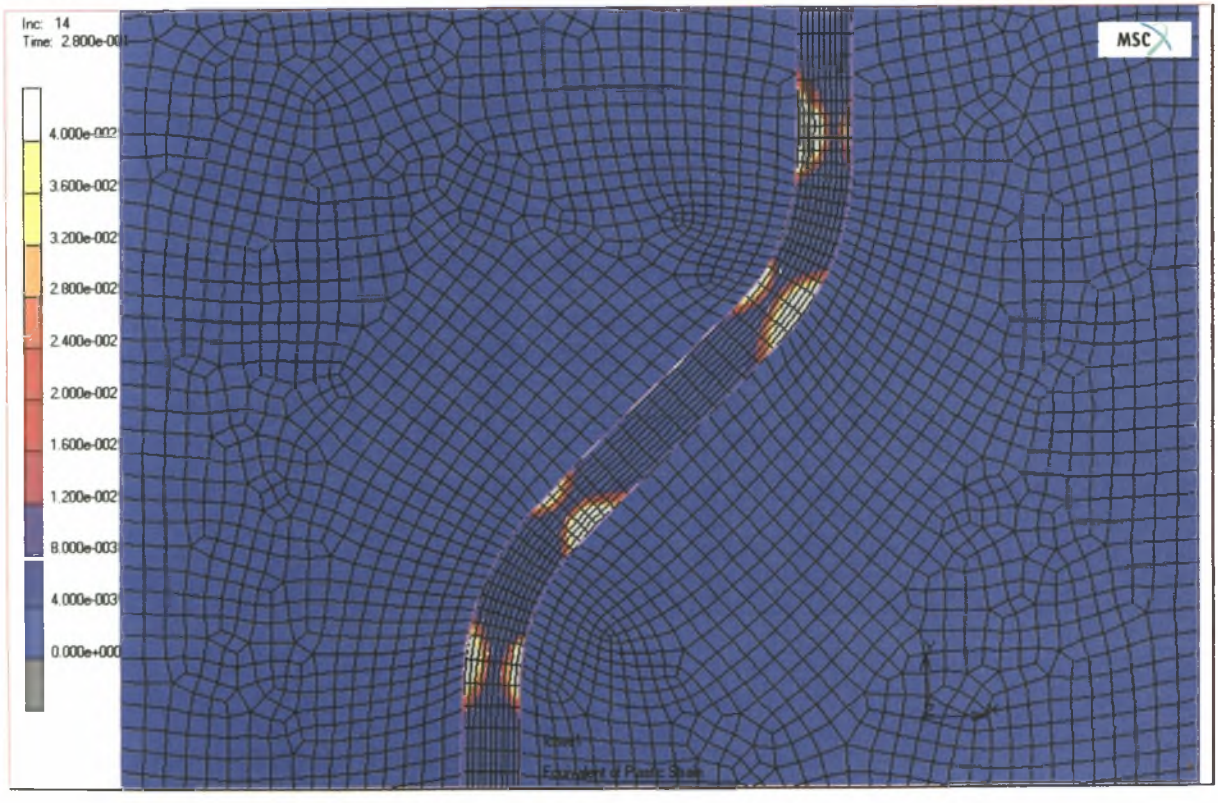
Σχήμα 10: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

- **2η γεωμετρία της ίνας, συντελεστής τριβής f=0.3, χάλυβας S1400.**

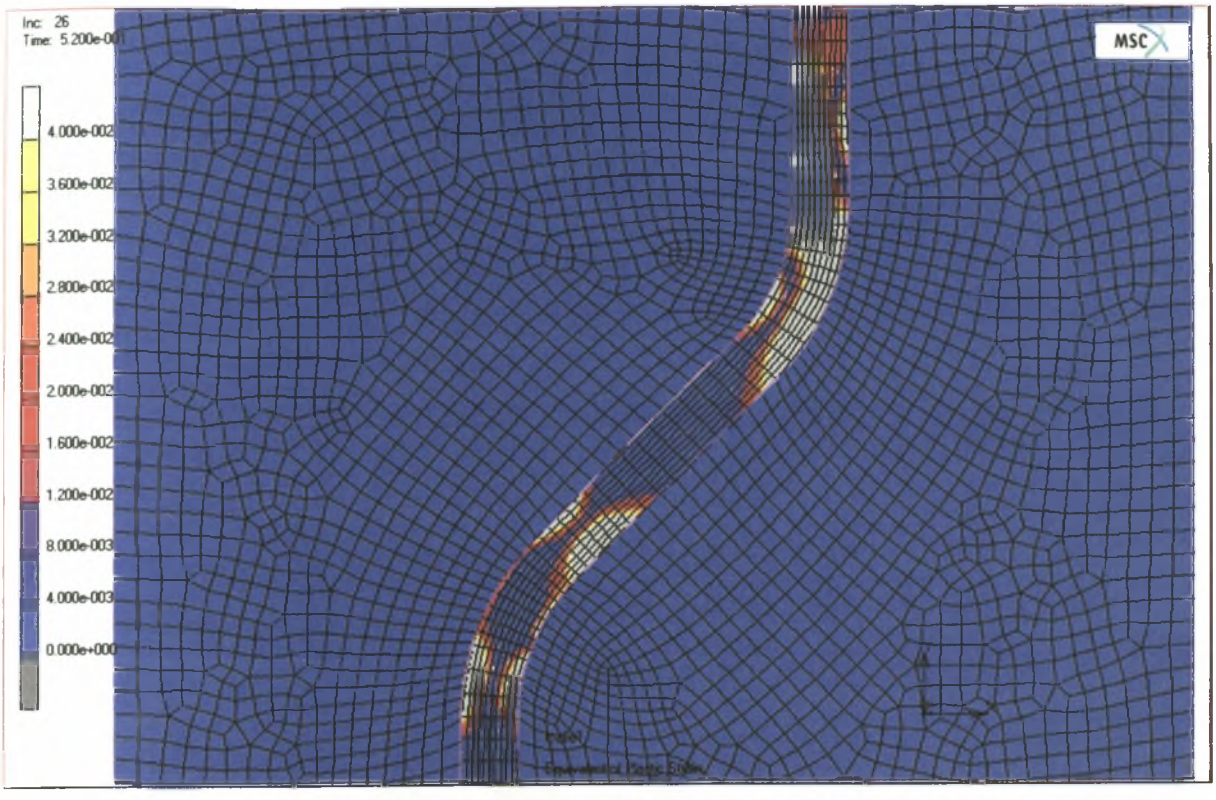


Σχήμα 11: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 6^{ο} βήμα φόρτισης

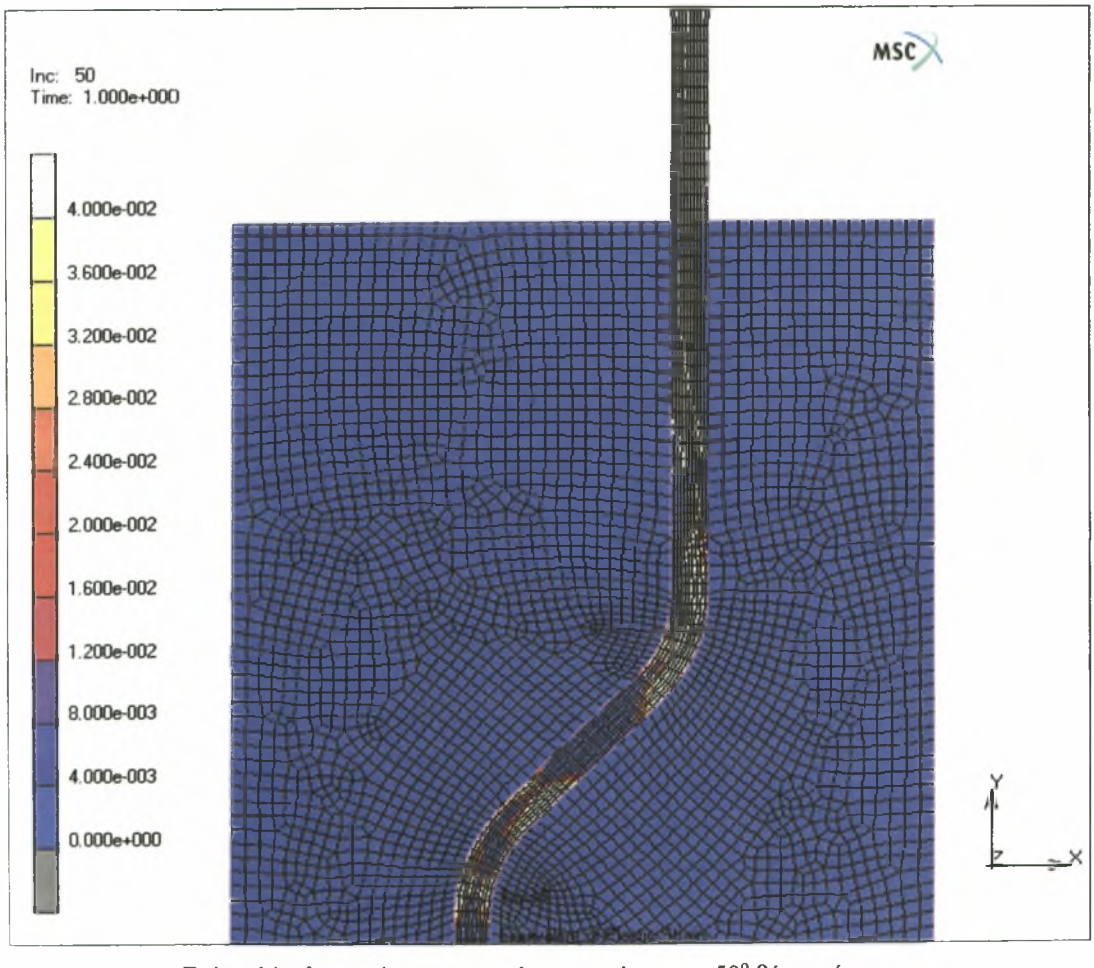


Σχήμα 12: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 14^{ο} βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



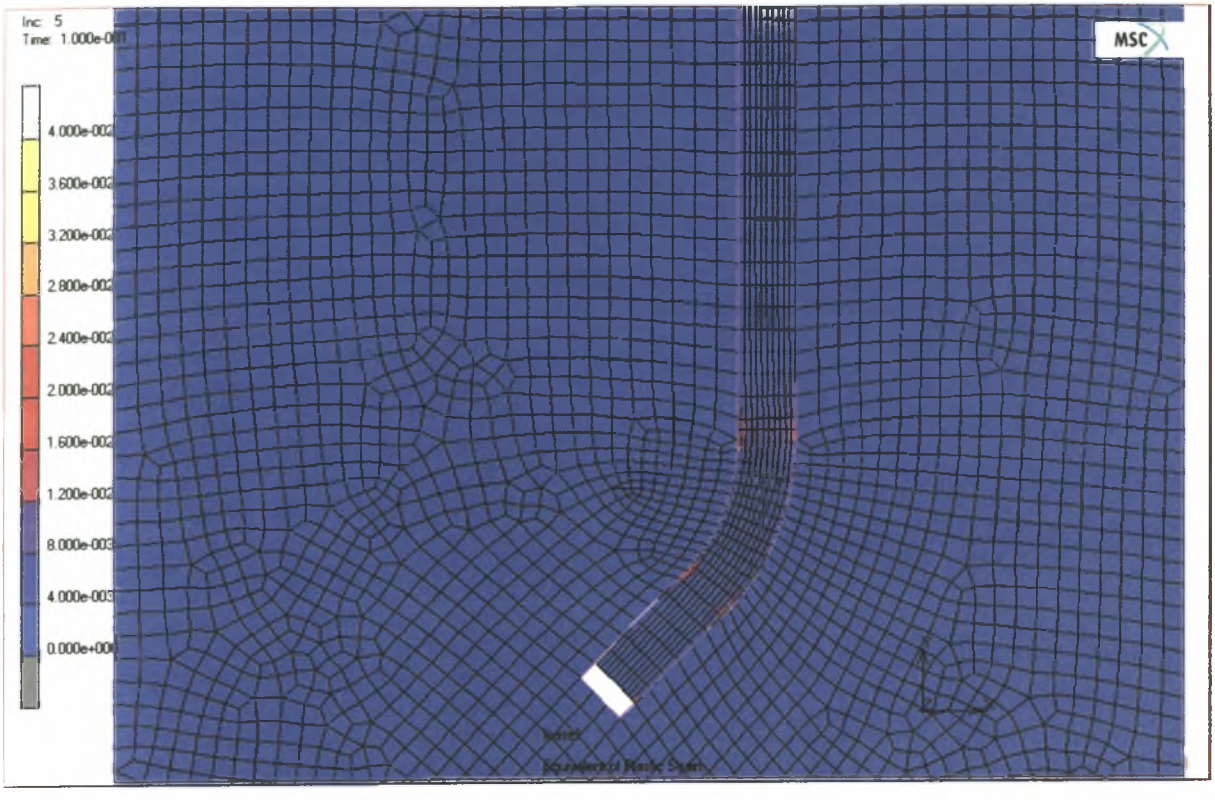
Σχήμα 13: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 26° βήμα φόρτισης



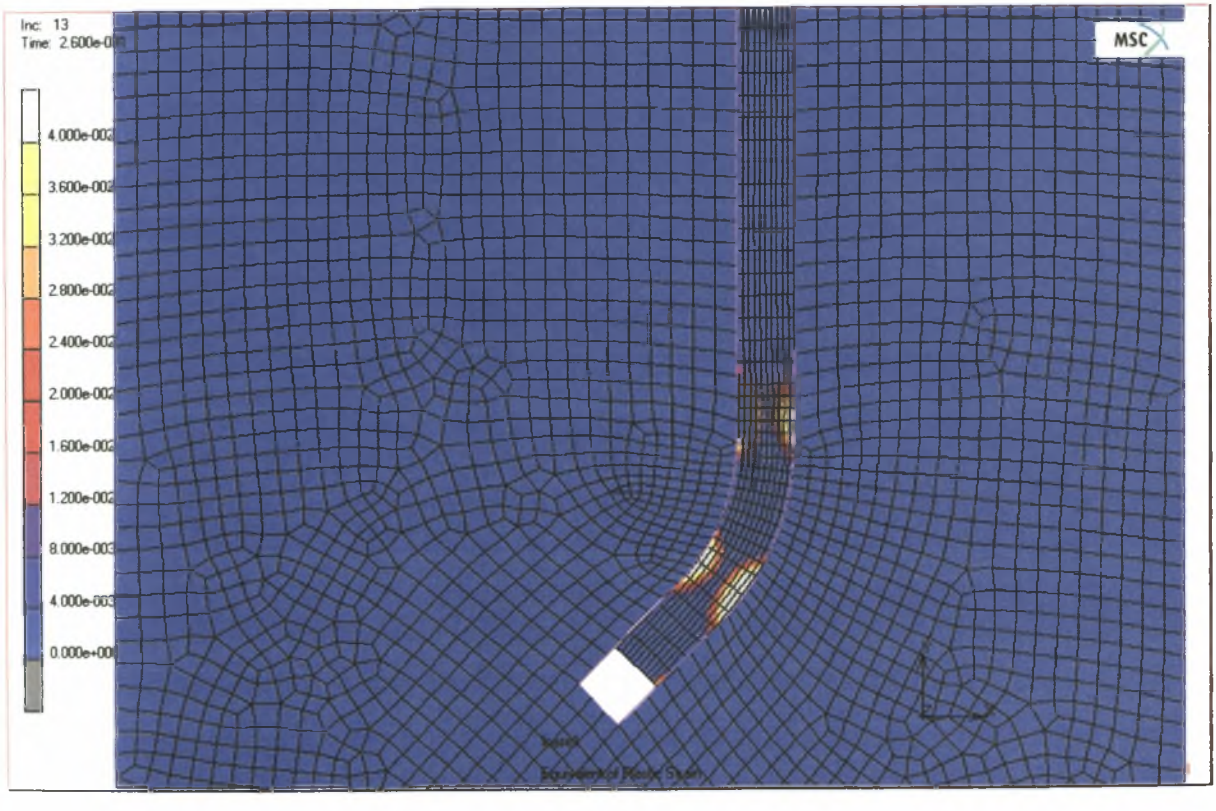
Σχήμα 14: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

- **3η γεωμετρία της ίνας, συντελεστής τριβής f=0, χάλυβας S1400.**

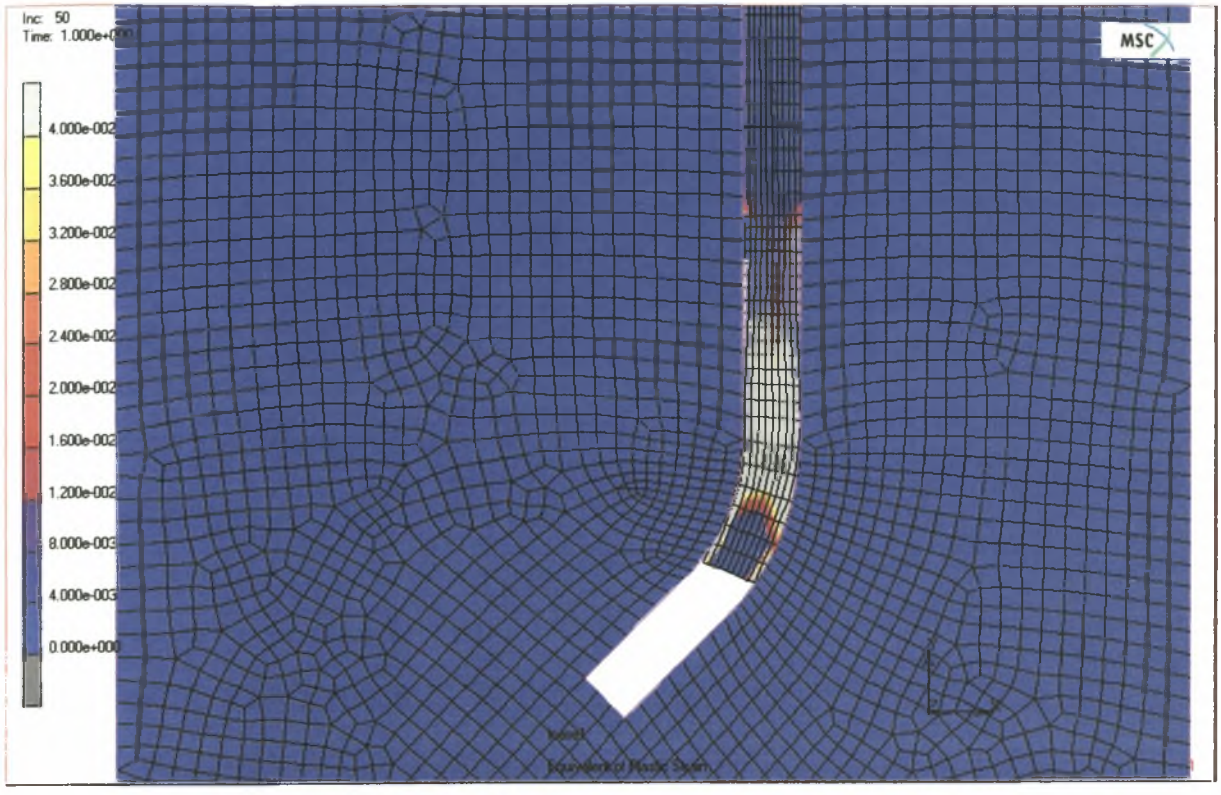


Σχήμα 15: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 5ο βήμα φόρτισης



Σχήμα 16: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 13ο βήμα φόρτισης

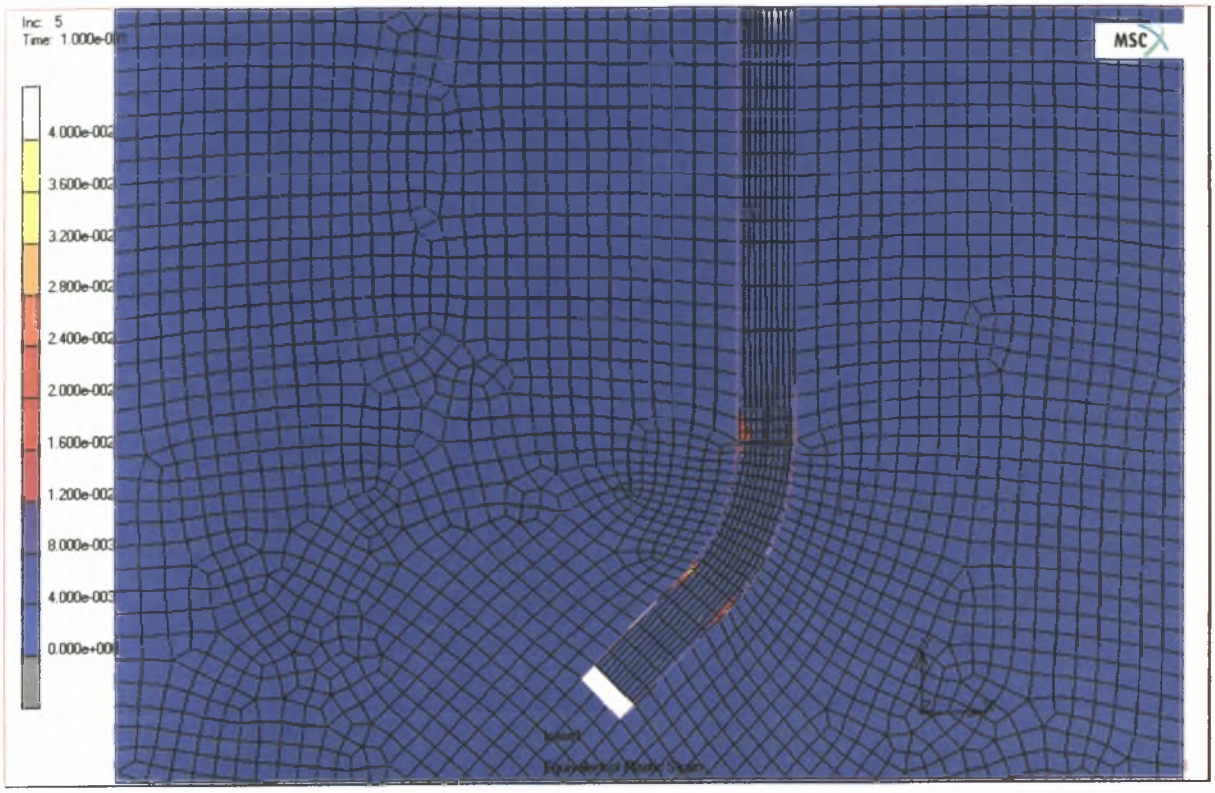
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



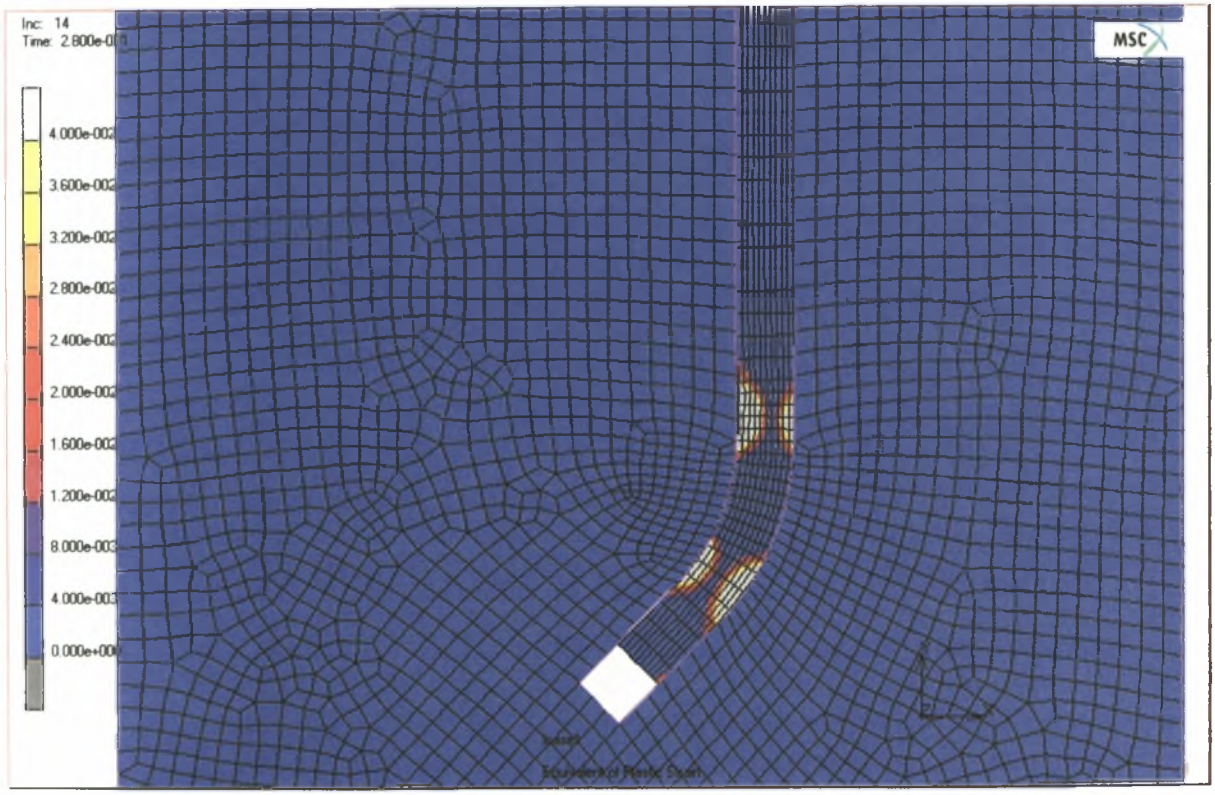
Σχήμα 17: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

- **3η γεωμετρία της ίνας, συντελεστής τριβής f=0.3, χάλυβας S1400.**

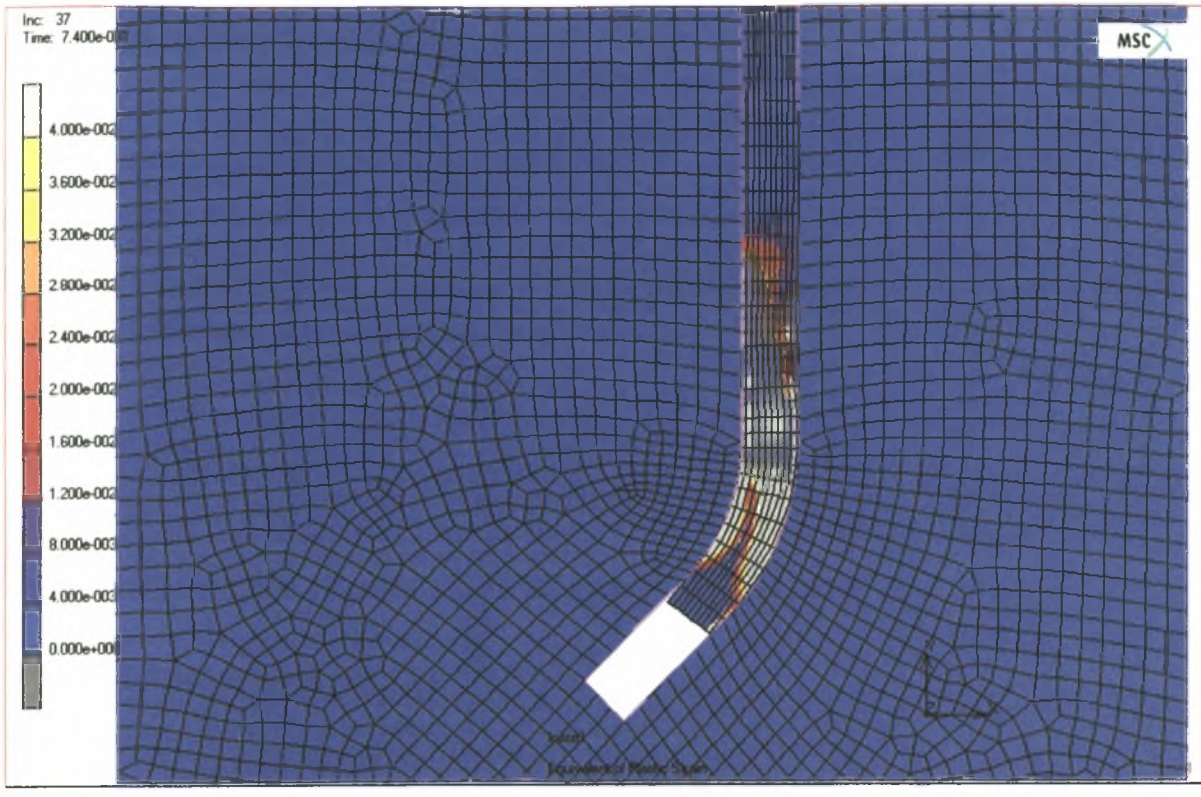


Σχήμα 18: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 5ο βήμα φόρτισης

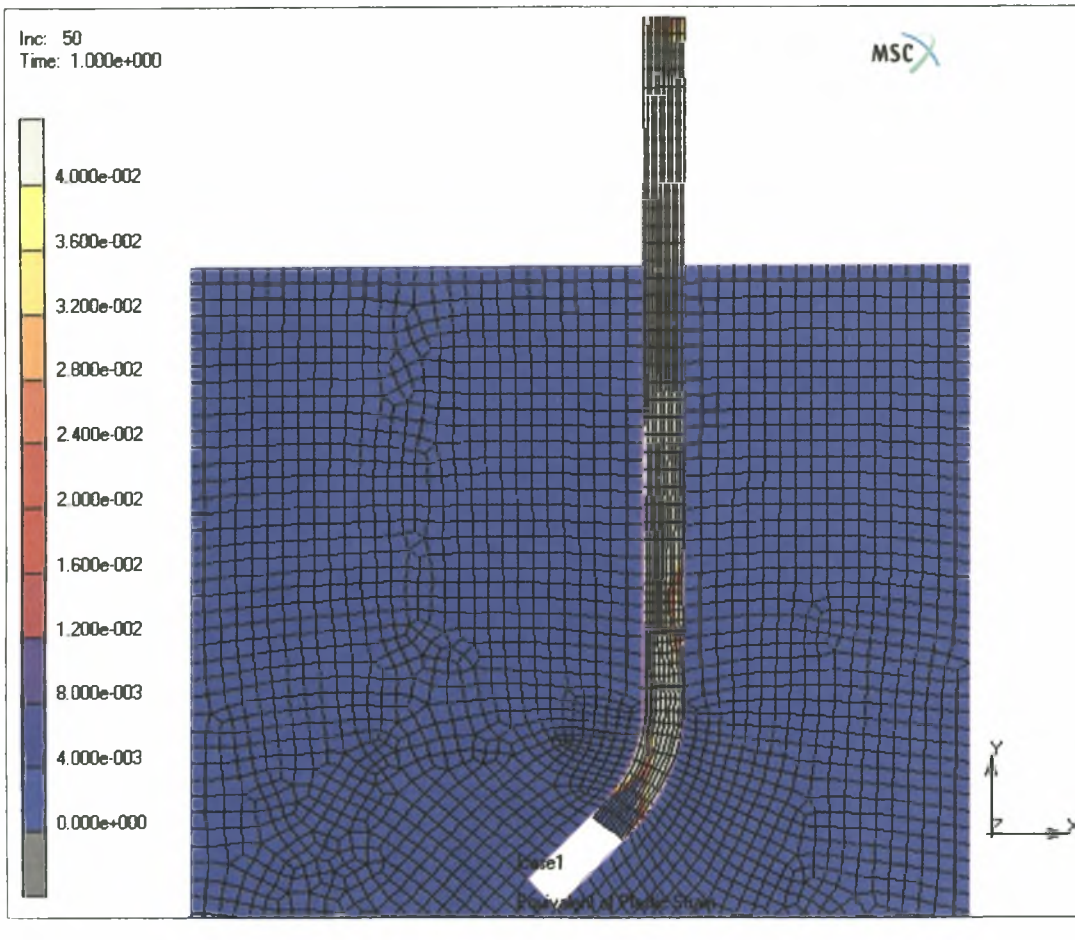


Σχήμα 19: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 14ο βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194



Σχήμα 20: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 37° βήμα φόρτισης



Σχήμα 21: πλαστικές παραμορφώσεις της ίνας στο 50° βήμα φόρτισης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

Β. Συνολική μετατόπιση του κάτω άκρου της ίνας για επιβεβλημένη μετακίνηση δ=1.6mm

1η γεωμετρία

	1400_f0	1400_f03	500_f0	500_f03	
3d	0.9167	0.5772	0.884	0.5616	mm
2d	0.8961	0.509	0.8896	0.5064	mm
2d-βελτιωμένο	0.9462	0.5378	0.9449	0.5353	mm

2η γεωμετρία

	1400_f0	1400_f03	500_f0	500_f03	
3d	0.9113	0.5923	0.8493	0.545	mm
2d	0.8892	0.5039	0.8859	0.5038	mm
2d-βελτιωμένο	0.9404	0.5321	0.9412	0.532	mm

3η γεωμετρία

	1400_f0	1400_f03	500_f0	500_f03	
3d	1.2723	0.8967	1.2375	0.8313	mm
2d	1.2766	0.7897	1.2753	0.798	mm
2d-βελτιωμένο	1.3253	0.9219	1.3223	0.9005	mm

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Fergusson PM, Bond-stress the state of the art, ACI Journal 1966; (November): 1161-88.

[2] Lutz LA, Gergely P. Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete, ACI Journal 1967;64(11):711-721

[3] Rehm G. Urber die Grundlagen des Verbundes zwinschen stahl und beton. DAFS 1961;138:59

[4] Stoker MF, Sozen MA. Investigations of prestressed R.C. for highway bridges. Part V: bond characteristics of prestressed strand. Eng Exp Station, Bulletin 503, University of Illinois 1970.

[5] Lawrence, P, 'Some theoretical considerations of fibre pull-out from an elastic matrix', Journal of Matenals Sctence, Vol 7. No 1, January 1972, pp 10-6

[6] Youjiang Wang, Victor C. LF and Stanley Backer. 1988. Modelling of Fibre Pull-out From a Cement Matrix. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.10, No. 3. pp 143-149

[7] Gilles Chanvillard and Pierre-Claude Aitcin. 1996. Pull-Out Behavior of Corrugated Steel Fibers Qualitative and Statistical Analysis. Advn Cem Bas Mat, 4: 28-41pp

[8] J.-M. Desir, M.R.B. Romdhane, F.-J. Ulm, E.M.R. Fairbairn. 1999. Steel-Concrete Interface: Revisiting Constitutive and Numerical Modelling. Computers and Structures 71, pp 489-503

[9] Gopalaratnam, V S and Shah, S P, 'Tensile fracture of steel fibre reinforced concrete', ASCE Journal of Engmeenng Mechanics, Vol 113. No 5 May 1987, pp 635-52

[10] M. Jamal Shannag, Rune Brincker and Will Hansen. 1997. Pullout Behavior of Steel Fibers from Cement-based Composites. Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 6, pp. 925-936

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
004000085943
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:36:22 EEST - 3.135.185.194