



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΟΙΛΟΔΟΚΩΝ
ΜΕ ΠΕΠΛΑΤΥΣΜΕΝΑ ΑΚΡΑ***

ΣΩΚΡΑΤΗΣ Β. ΤΣΙΟΓΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Ε. ΜΥΣΤΑΚΙΔΗΣ

ΒΟΛΟΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2001

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

Αριθ. Εισ.: 920/1

Ημερ. Εισ.: 13-11-2001

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ

2001

ΤΣΙ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062939



Ευχαριστίες

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Ε. Μυστακίδη κάτω από τη καθοδήγηση του οποίου εκπονήθηκε η Διπλωματική αυτή Εργασία. Χάρηκα ιδιαίτερα για την άψογη συνεργασία που είχαμε και για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε. Ευχαριστώ επίσης όλους τους καθηγητές μου για τις γνώσεις και τον τρόπο σκέψης που μου μετέδωσαν στη διάρκεια των σπουδών μου. Δεν θα ξεχάσω ποτέ τη ζεστή και ευχάριστη ατμόσφαιρα που δημιούργησαν στις σχέσεις με τους φοιτητές.

Ευχαριστώ τους φίλους και συναδέλφους που με στήριξαν, ή αλλιώς με ανέχτηκαν τα πέντε αυτά χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου που με βοήθησε με κάθε τρόπο στις σπουδές μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου, στους οποίους και αφιερώνεται αυτή η εργασία.

Σωκράτης Β. Τσιόγκας
Βόλος, 20 Οκτωβρίου 2001

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	5
2.1	Πειραματική Διερεύνηση.....	6
2.1.1	Πειραματικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	9
2.2	Αριθμητική Διερεύνηση.....	11
2.2.1	Περιγραφή του γενικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	11
2.3	Αριθμητική προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών.....	19
2.3.1	Πίνακας αποτελεσμάτων επίλυσης και αντίστοιχο διάγραμμα.....	20
2.3.2	Σχέδια πλαστικών παραμορφώσεων της ROR114.3/4.....	21
2.3.3	Σχέδια τάσεων Von-Mises της κοιλοδοκού ROR114.3/4.....	27
2.3.4	Σχέδια πλαστικών παραμορφώσεων της κοιλοδοκού ROR114.3/4...	31
2.4	Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών.....	35
3.	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	40
3.1	Αποτελέσματα αριθμητικής διερεύνησης.....	44
4.	ΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	49
4.1	Καθορισμός κρίσιμης μορφής αστοχίας.....	50
4.2	Γραφικές παραστάσεις αντοχής συναρτήσει του πάχους.....	51

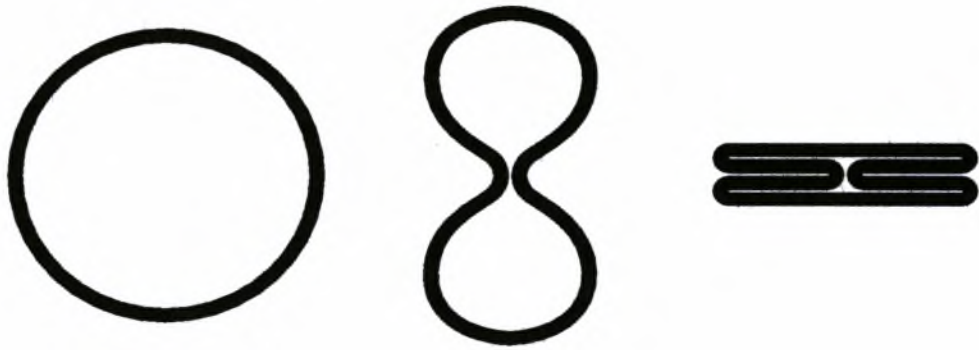
4.3	Κρίσιμο πάχος διατομής.....	59
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	70
6.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	72

1 . ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλά παραδείγματα αποδεικνύουν τις εξαιρετικές ιδιότητες των κοίλων διατομών ως δομικά στοιχεία για αντοχή σε εφελκυσμό, λυγισμό και στρέψη, ενώ συνδυάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά με ένα αρχιτεκτονικά ελκυστικό σχήμα. Επιπλέον, οι κοίλες κυκλικές διατομές έχουν αποδείξει ότι έχουν το καλύτερο σχήμα για στοιχεία εκτεθειμένα σε άνεμο και σε σεισμικά φορτία, ενώ η μικρή εξωτερική επιφάνεια σε συνδυασμό με την απουσία αιχμηρών γωνιών, τους προσφέρει την καλύτερη δυνατή προστασία στη διάβρωση. Παρ' όλο που το μοναδιαίο κόστος του υλικού των κοίλων διατομών είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των ανοικτών διατομών, το γεγονός αυτό αντισταθμίζεται από το μικρότερο βάρος της κατασκευής, τη μικρότερη επιφάνεια βαφής και το μειωμένο κόστος κατασκευής. Οι κοίλες διατομές είναι ιδανικές για την μόρφωση χωρικών δικτυωμάτων. Για τη σύνδεση μεταξύ τους σε κόμβους μέσω των οποίων υλοποιούνται οι θεωρητικές αρθρώσεις έχουν επινοηθεί πλήθος συνδεσμολογιών, στις περισσότερες των οποίων οι συνδέσεις γίνονται δια κοχλιώσεως.

Μια σπάνια σχετικά συνδεσμολογία υλοποιείται με κοιλοδοκούς κυκλικής διατομής των οποίων τα άκρα μορφώνονται σε ελάσματα και εν συνεχεία ανοίγονται οπές επ' αυτών για την σύνδεση των μελών δια κοχλιώσεως σε κομβοελάσματα. Η διαμόρφωση των άκρων σ' αυτού του τύπου κοιλοδοκούς πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Είναι η πιο σύντομη μέθοδος για να κλειστεί αεροστεγώς το εσωτερικό τους, αλλά και να υλοποιηθεί έλασμα στο άκρο χωρίς να απαιτούνται κολλήσεις ή επιπλέον εργασίες. Προφανώς η μέθοδος αυτή είναι σχετικά οικονομική λύση.

Η διαδικασία μόρφωσης είναι η εξής: Σε πρώτο στάδιο το άκρο τοποθετείται ανάμεσα σε δύο αντικριστά τοποθετημένες λεπίδες οι οποίες συνθλίβουν την κυκλική διατομή και την μορφώνουν σε σχήμα 8 (οκτώ). Σε δεύτερο στάδιο τοποθετείται η παραμορφωμένη διατομή σε πρέσα με τα πέλατα της παράλληλα στη διεύθυνση των λεπίδων που θα προσδώσει στη διατομή την μορφή ελάσματος έτοιμο προς διάτρηση (βλέπε Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Διαδικασία μορφοποίησης των άκρων των κοιλοδοκών

Το ύψος των λεπίδων και των πελμάτων της πρέσας εξαρτάται από την διάμετρο της διατομής. Όσο μεγαλύτερη η διάμετρος και το πάχος της διατομής τόσο μεγαλύτερο είναι το αξονικό θλιπτικό φορτίο που μπορεί να παραλάβει. Συνεπώς τόσο μεγαλύτερα πρέπει να είναι τα παραπάνω ύψη, ώστε να χωρέσουν οι επιπλέον κοχλίες που πιθανό να απαιτηθούν για να εξασφαλιστεί η αντοχή της σύνδεσης.

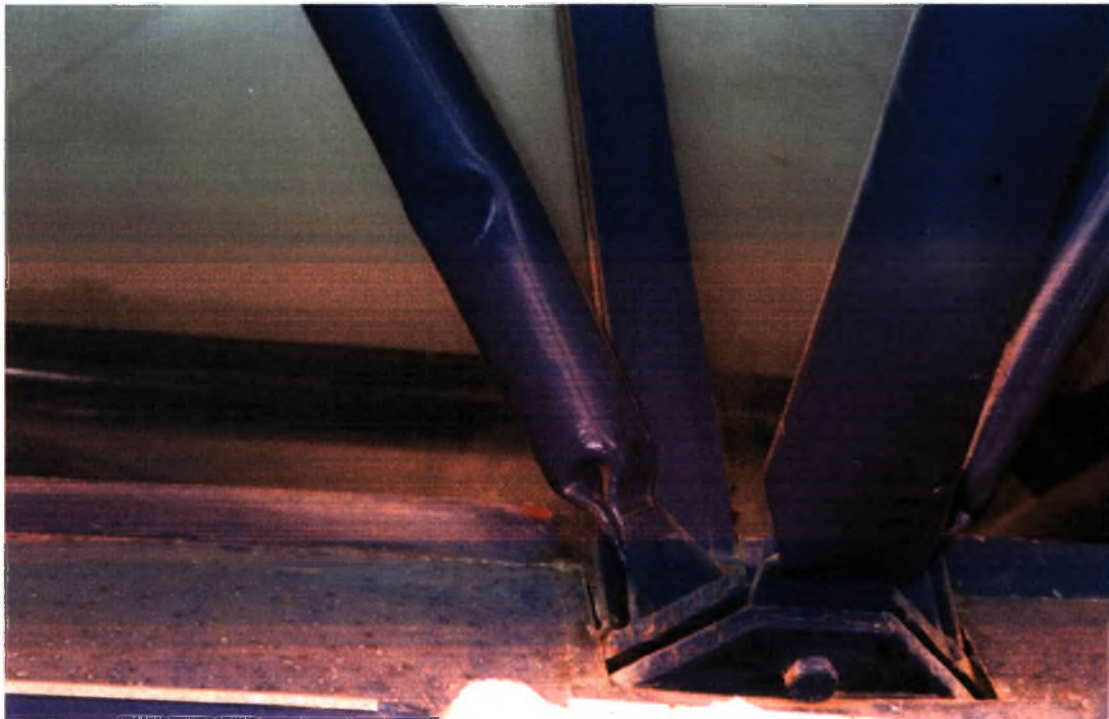
Κοιλοδοκοί όπως περιγράφηκαν πιο πάνω με την συγκεκριμένη διαμόρφωση των άκρων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μορφώνοντας χωροδικτυώματα υφίστανται σε διάφορες κατασκευές (βλέπε φωτογραφίες 1 και 2)

Η ανάγκη να διαπιστωθεί η αξιοπιστία τέτοιων κατασκευών, παράλληλα με εύλογες εικασίες για μειωμένη αντοχή σχεδιασμού, που γεννά η ιδιαιτερότητα αυτή στα άκρα των μελών, οδήγησαν σε διερεύνηση της αντοχής τους μέσω πειραμάτων στο εργαστήριο, αλλά και μέσω αριθμητικών μοντέλων. Αυτό που αναμένεται είναι, οι εν ψυχρώ και ακαριαίας επιβολής παραμορφώσεις κατά τη διαμόρφωση των άκρων να αλλοιώσουν την συμπεριφορά της διατομής στη φάση της λειτουργίας του μέλους. Στη φάση αυτή η κοιλοδοκός υφίσταται καταπόνηση σε αξονικό

θλιπτικό φορτίο, ενώ λόγω της διαμόρφωσης των άκρων, έχουν υπεισέλθει ατέλειες στο μέλος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια να διερευνηθούν και να ποσοτικοποιηθούν οι παραπάνω εκτιμήσεις, μέσω αριθμητικών μοντέλων.

Φωτογραφία 1



Στις φωτογραφίες 1 και 2 φαίνεται κόμβος όπου συνέρχονται και κοχλιώνονται ράβδοι του τύπου που περιγράφηκε πιο πάνω. Μάλιστα στην συγκεκριμένη περίπτωση, μια από αυτές έχει λυγίσει.

Φωτογραφία 2



2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Για τις ανάγκες της εργασίας έγινε υπολογισμός και διερεύνηση της αντοχής σε αξονικό θλιπτικό φορτίο κοιλοδοκών κυκλικής διατομής με πεπλατυσμένα άκρα, λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη ζωνών πλαστικοποίησης του υλικού στη διαμορφωμένη περιοχή των άκρων. Όπως αποδεικνύεται και στη πορεία της διερεύνησης, σε πολλές περιπτώσεις η αστοχία του υλικού στις ζώνες αυτές είναι κρίσιμη για το μέλος. Προτείνεται για τον σκοπό αυτό η παραμετρική ανάλυση των κοιλοδοκών με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων, ικανών να περιγράψουν αξιόπιστα την πλαστικοποίηση του υλικού και τις μεγάλες μετακινήσεις και παραμορφώσεις που επιφέρει σ' αυτό η διαμόρφωση των άκρων. Πειραματικά αποτελέσματα αντίστοιχων δοκιμών στο εργαστήριο χρησίμευσαν ως οδηγός στην προσπάθεια της αριθμητικής διερεύνησης.

Ταυτόχρονα με την σύγκριση των αποτελεσμάτων, πειραματικών και υπολογιστικών, διαπιστώνεται η αξιοπιστία και το μέγεθος του σφάλματος που υπεισέρχεται στην προσπάθεια να προσομοιωθεί η εντατική κατάσταση του μέλους με την βοήθεια προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

Η θεωρία πεπερασμένων στοιχείων και το αντίστοιχο πρόγραμμα ήταν το εργαλείο με το οποίο έγινε η αριθμητική προσέγγιση της πραγματικής εντατικής κατάστασης των δοκιμίων. Στην πορεία του κεφαλαίου επαληθεύονται τα πειραματικά αποτελέσματα και δίνεται η δυνατότητα να αναλυθούν με τον ίδιο τρόπο και άλλα υποθετικά δοκίμια.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αναλυτική διερεύνηση που αποτελεί τον κύριο όγκο δουλειάς, ενώ πριν από αυτό γίνεται μια περιγραφή του πειραματικού κομματιού στο οποίο αναφέρεται η εργασία.

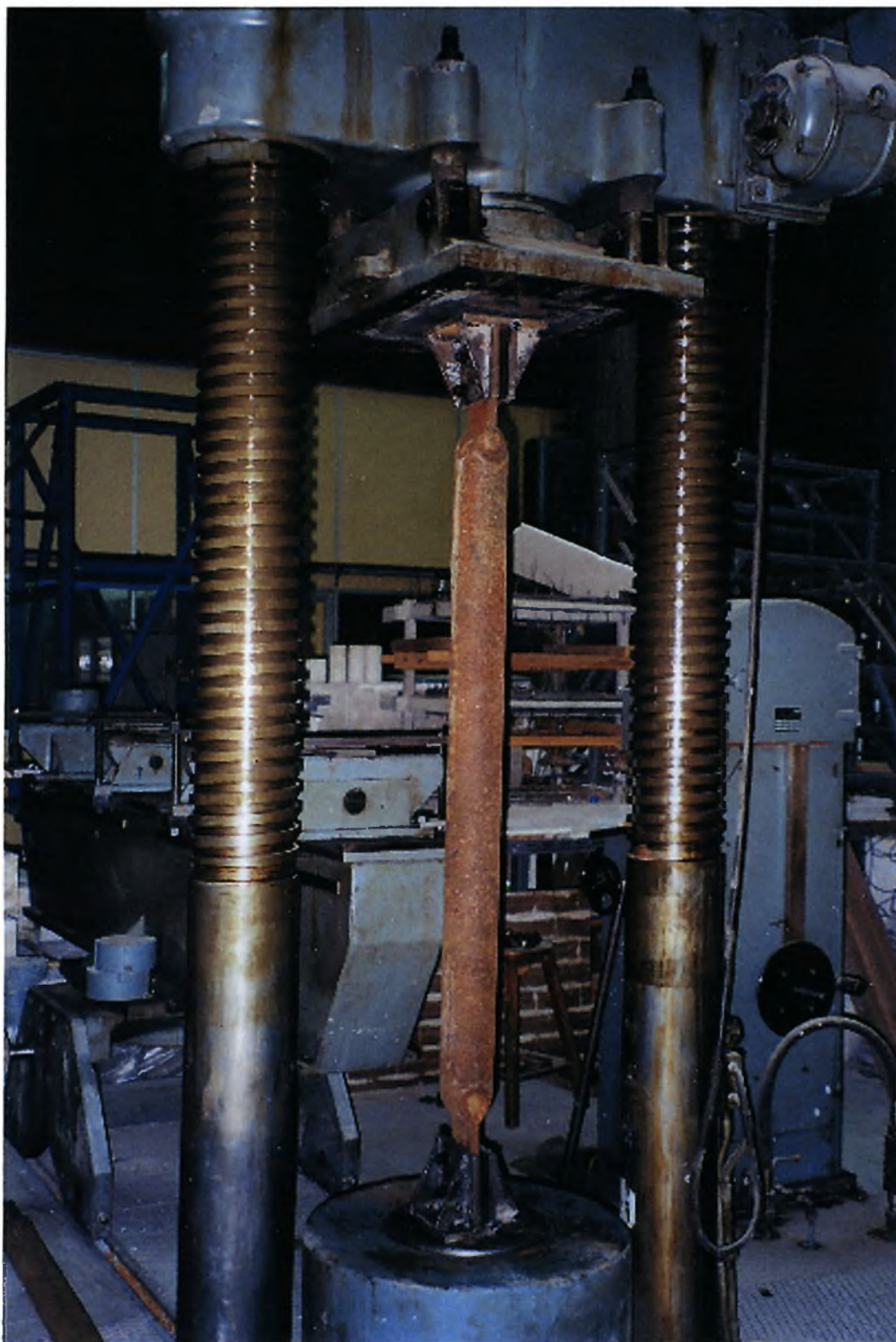
2.1 Πειραματική Διερεύνηση

Η δοκιμή που πραγματοποιήθηκε αφενός είχε στόχο την καθαρή αξονική θλίψη της κοιλοδοκού, αφετέρου είναι και μια προσπάθεια να προσομοιωθεί στο εργαστήριο όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερα ο τρόπος η σύνδεσής του μέλους όπως πραγματοποιείται σε υφιστάμενες κατασκευές. Έτσι όπως φαίνεται και σε παρακάτω φωτογραφίες, οι κοιλοδοκοί τοποθετήθηκαν στην πρέσα αφού βιδώθηκαν στα άκρα αυτών πέλματα που εφάπτονται σ' αυτά της πρέσας (βλέπε Φωτ. 3, 4).



Φωτ. 3. Άνω άκρο διατομής ROR114.3/4 πριν την εφαρμογή του φορτίου

Φωτ. 4. Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο διατομής ROR114.3/4





Φωτ. 5. Κάτω άκρο διατομής ROR114.3/4 πριν την εφαρμογή του φορτίου



Φωτ. 6. Κάτω άκρο διατομής ROR114.3/4 μετά την εφαρμογή του φορτίου

2.1.1 Πειραματικά αποτελέσματα και συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων πάνω στα δύο διαφορετικά δοκίμια φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Διατομή	Πειραματική αντοχή $P_{max}(KN)$
ROR114.3/4	236
ROR88.9/4	262

Επίσης έγιναν πειράματα εφελκυσμού σε δοκίμια από το υλικό των παραπάνω σωλήνων τα οποία έδωσαν τις παρακάτω τιμές για το όριο διαρροής και το όριο θραύσης.

Διατομή	Όριο διαρροής $f_v(KN/m^2)$	Όριο θραύσης $f_u(KN/m^2)$
ROR114.3/4	300000	360000
ROR88.9/4	360000	440000

Με τις παραπάνω τιμές για το όριο διαρροής, συντελεστή ατελειών $\alpha=0.21$ και το δεδομένο ύψος των δοκιμίων που είναι στα 1.875m υπολογίστηκε η ονομαστική αντοχή σε λυγισμό κατά Ευρωκώδικα 3 και προέκυψαν οι τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Διατομή	Πειραματική αντοχή $P_{max}(KN)$	Αντοχή σε λυγισμό Κατά EC3 $P_b(KN)$	P_{max}/ P_b
ROR114.3/4	236	348.8	0.66
ROR88.9/4	262	302.4	0.87

- ♦ Παρατηρώντας τους πίνακες φαίνεται ότι τα μέλη αστοχούν για φορτίο μικρότερο του ονομαστικού φορτίου λυγισμού κατά EC3, θεωρώντας όμως πάντα συντελεστή ατελειών $\alpha=0.21$

- ◆ Από τις φωτογραφίες των πειραματικών δοκιμών πριν και μετά την επιβολή του φορτίου είναι φανερό πως τα μέλη αστοχούν λόγω πλαστικοποίησης στην περιοχή της διαμόρφωσης και όχι λόγω λυγισμού (βλέπε Φωτ. 5, 6).
- ◆ Από τα παραπάνω διαπιστώνεται πως η διερεύνηση για την αντοχή των μελών πρέπει να επικεντρωθεί στην κρίσιμη πλέον περιοχή της διαμόρφωσης, καθώς σ' αυτή οφείλεται η προ του λυγισμού αστοχία του μέλους (βλέπε Φωτ. 3, 5, 6, 7).



Φωτ. 7. Κάτω άκρο διατομής ROR88.9/4 μετά την εφαρμογή του φορτίου

2.2 Αριθμητική Διερεύνηση

Όπως είναι γνωστό σε κάθε ερευνητή που χρησιμοποιεί την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, η μοντελοποίηση (modelling), δηλαδή η προσομοίωση του πραγματικού προβλήματος στον υπολογιστή, αποτελεί το πιο κρίσιμο τμήμα της όλης μελέτης. Στην παρούσα μελέτη, για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, καθώς και πολλών άλλων που προέκυψαν στην πορεία, χρειάστηκε να κατασκευαστούν πολλά δοκιμαστικά μοντέλα και να γίνουν πολλές δοκιμαστικές επιλύσεις ώστε να επιλεγεί τελικά η καταλληλότερη λύση. Η πορεία που ακολουθήθηκε σε συνδυασμό με όλες τις επί μέρους παραμέτρους που συνιστούν τα τελικά μοντέλα περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

Επίσης αυτό που έχει ενδιαφέρον να διερευνηθεί αριθμητικά, σύμφωνα με τα όσα συμπεράσματα προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές, είναι η αντοχή των άκρων των μελών, αφού σε πολλές περιπτώσεις η αντοχή τους είναι μικρότερη της αντοχής λυγισμού του μέλους. Έτσι λοιπόν μοντελοποιείται μόνο το ανώτερο τμήμα της κοιλοδοκού με κέρδος σε υπολογιστικό όγκο και κατά συνέπεια σε χρόνο.

2.2.1 Περιγραφή του γενικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Για τον υπολογισμό της αντοχής των κοιλοδοκών μορφώθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι τετράκομβρα στοιχεία πλακοδίσκου, οι διαστάσεις των οποίων είναι 1x1 cm για όλα τα μοντέλα με εξαίρεση κάποια λίγα δοκιμαστικά με διαστάσεις 0.5x0.5 cm.

Μοντελοποιείται το ανώτερο τμήμα της κοιλοδοκού για κάθε διατομή. Το μήκος του τμήματος αυτού επιλέχτηκε έτσι ώστε να μην επηρεάζει την αντοχή του. Για όλες τις διατομές που επιλύθηκαν εκτός αυτής διαμέτρου 139.7mm το μήκος των 0.47m ήταν αρκετό, ώστε και για μεγαλύτερο μήκος τα αποτελέσματα να διαφέρουν ελάχιστα. Για την μεγαλύτερη των διατομών όμως το ύψος κρίθηκε αναγκαίο να διπλασιαστεί. Για μήκος 0.47m και υλικό Fe360 η αντοχή της διατομής 139.7/4 υπολογίστηκε στα 241.218 KN. Ενώ για 0.94m στα 275.978 KN. Ειδικότερα, λόγω των συγκεκριμένων

χαρακτηριστικών για τη γεωμετρία και τη φόρτιση, μοντελοποιείται μόνον το μισό του κυλίνδρου. Για την αποκατάσταση της στατικής λειτουργίας, χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες συνθήκες συμμετρίας (Σχ. 2.4).

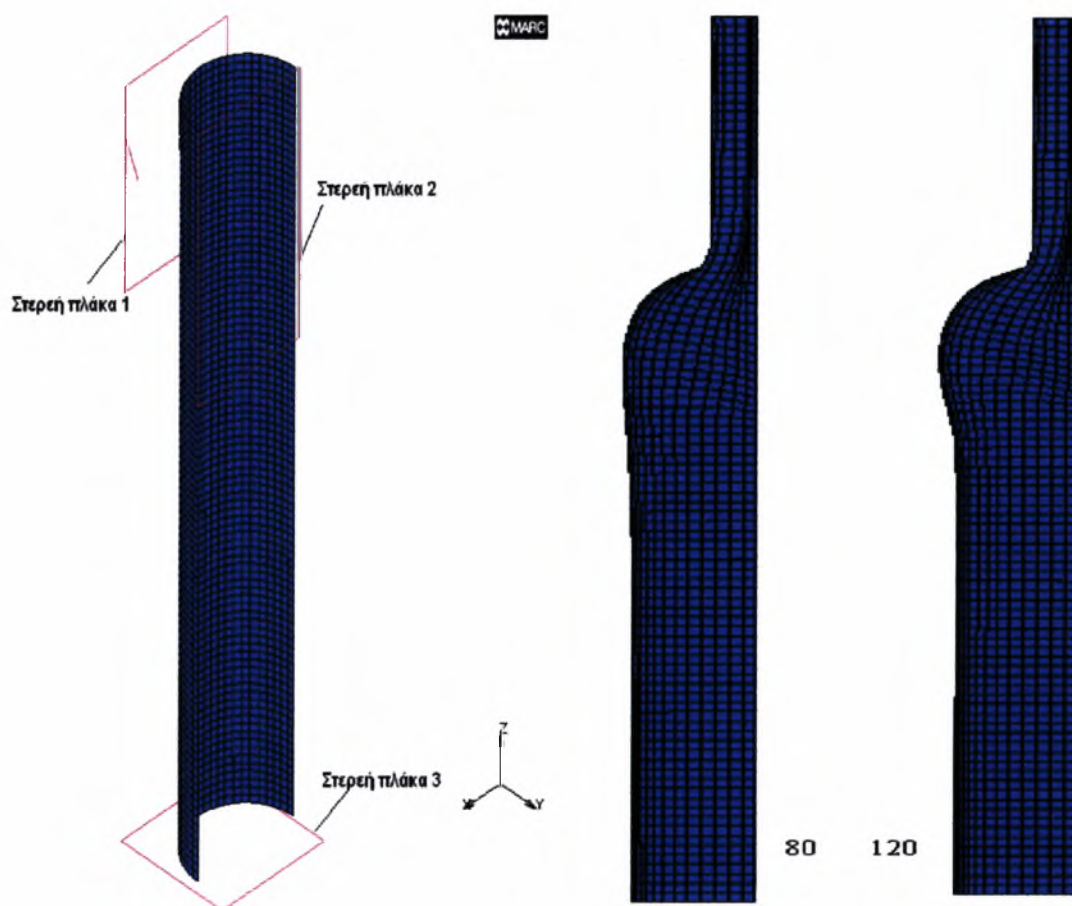
Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ιστορία των τάσεων και των παραμορφώσεων λόγω της διαμόρφωσης των άκρων, το μοντέλο υποβάλλεται στις εξής καταπονήσεις:

- Επιβεβλημένες μετακινήσεις κατά τη διεύθυνση των γενέτειρων του κυλίνδρου έτσι ώστε να προσομοιωθεί η διαμόρφωση των άκρων (βλέπε σχ. 2.2 και 2.3). Η μετακίνηση αυτή επιβάλλεται σε 40 βήματα χρόνου (1-40).
- Επιβεβλημένη μετακίνηση της στερεάς πλάκας 1 για να ληφθεί υπόψη το πρεσάρισμα του άκρου (σχ. 2.1). Η μετακίνηση αυτή επιβάλλεται σε 40 πρόσθετα βήματα χρόνου (41-80).
- Επιβεβλημένη μετακίνηση της στερεάς πλάκας 3 για να καταπονηθεί το μοντέλο με αξονικά φορτία (σχ. 2.1). Η μετακίνηση αυτή επιβάλλεται σε 40 πρόσθετα χρονικά βήματα (81-120).

Σε όλα τα στοιχεία δόθηκαν χαρακτηριστικά ισότροπου υλικού. Για την επιφάνεια διαρροής χρησιμοποιείται το μοντέλο Von-Mises, ενώ στο νόμο του υλικού λαμβάνεται υπόψη η κράτυνση του χάλυβα. Ενδεικτικά σχέδια όπου φαίνονται οι τάσεις Von-Mises για την ROR114.3/4 παρουσιάζονται στην παράγραφο 2.3.3.

Οι επίλυσεις των μοντέλων γίνονται με τη μέθοδο μεγάλων μετακινήσεων Updated Lagrangian. Επίσης, λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων που ενδέχεται να αναπτυχθούν, χρησιμοποιείται μόρφωση σταθερής διόγκωσης για τα πεπερασμένα στοιχεία του μοντέλου. Ο έλεγχος της λύσης έγινε σύμφωνα με την μέθοδο Full Newton-Raphson. Ως κριτήριο σύγκλησης λήφθηκε το υπόλοιπο της δύναμης και της ροπής σύμφωνα με το οποίο σε κάθε επανάληψη η σχετική ακρίβεια να μην ξεπερνά το 0.05. Κατά την μέθοδο αυτή το μητρώο δυσκαμψίας ξαναυπολογίζεται σε κάθε επανάληψη. Στις περισσότερες μοντελοποιήσεις, για την επίλυση κάθε βήματος δεν ξεπεράστηκαν οι διακόσες επαναλήψεις. Η επίλυση του τελικού συστήματος εξισώσεων $P = K * u$, έγινε σύμφωνα με την επαναληπτική μέθοδο LANCZOS η οποία θεωρείται κατάλληλη για μεγάλα συστήματα.

Τέλος, η επαφή μεταξύ των στερεών πλάκων και του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνεται υπόψη με κατάλληλο αλγόριθμο. Η στερεή πλάκα 2 εξασφαλίζει το ότι δεν θα υπάρξει διείσδυση των κόμβων του μοντέλου στο συμμετρικό τμήμα (βλέπε Σχ. 2.1).

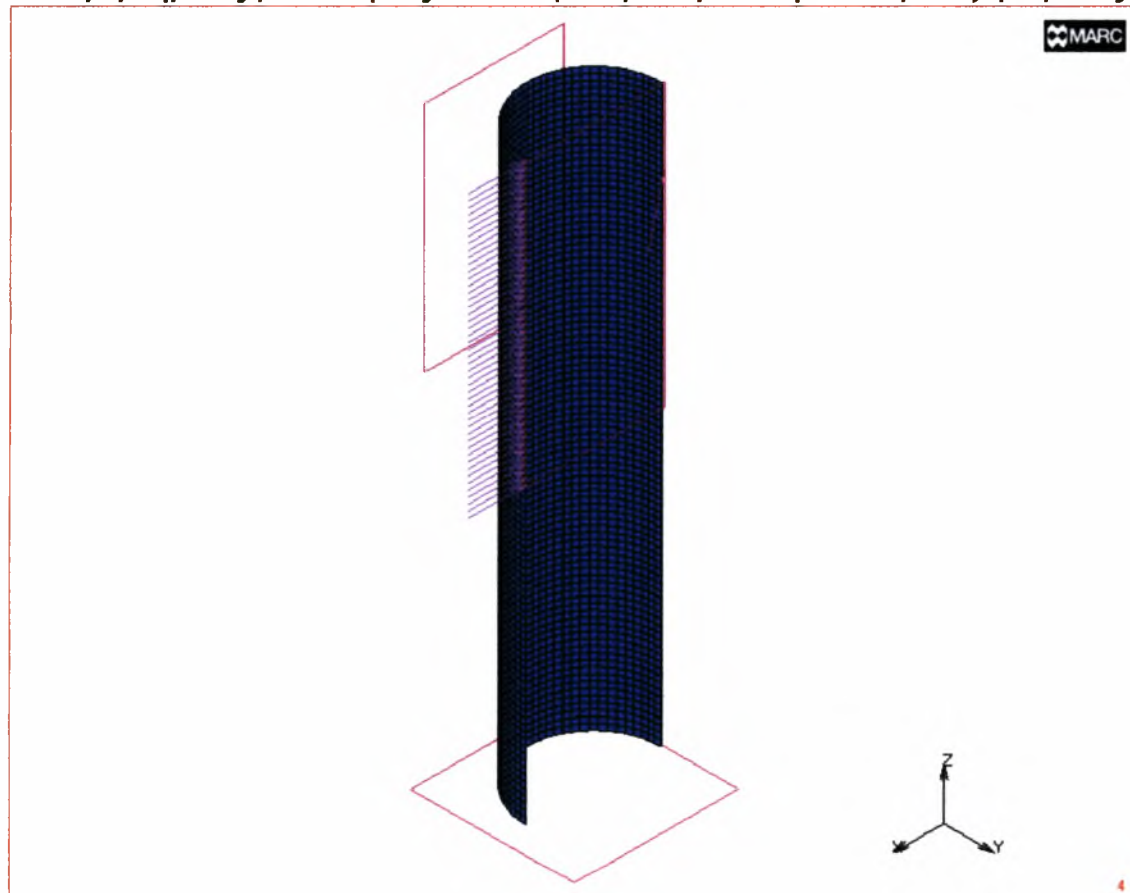


Σχ. 2.1

Από την επιβαλλόμενη μετακίνηση της πλάκας 3 στους κατώτερους κόμβους υπολογίζεται η μέγιστη αξονική δύναμη που αναλαμβάνεται από το μοντέλο. Στο πάνω σχήμα και στο χρονικό βήμα 120 είναι χαρακτηριστική για την αυτή μορφή αστοχίας του μέλους η εικόνα διόγκωση στη περιοχή της διαμόρφωσης.

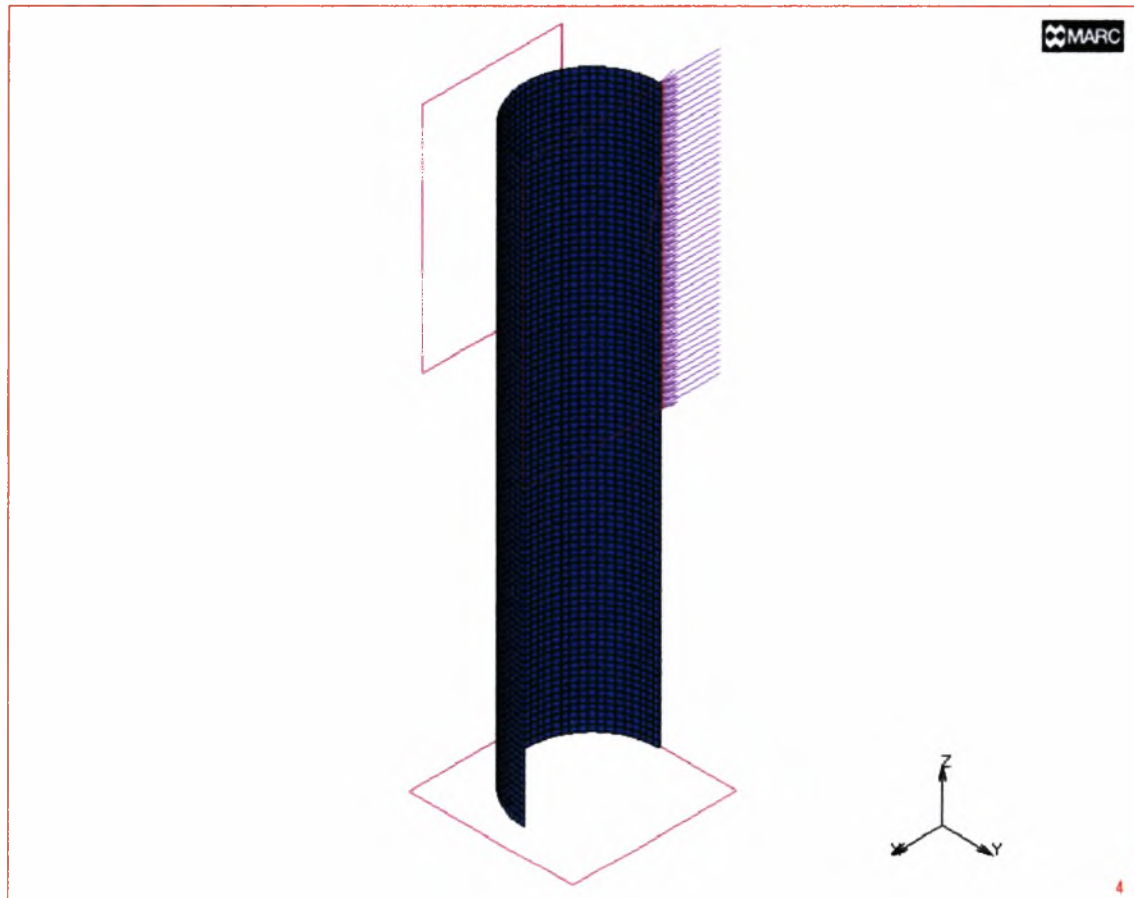
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι συνθήκες στήριξης και συμμετρίας καθώς και οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις που ισχύουν για όλες τις μοντελοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Επιβεβλημένες μετακινήσεις -0.05m για προσομοίωση του στραντζαρίσματος



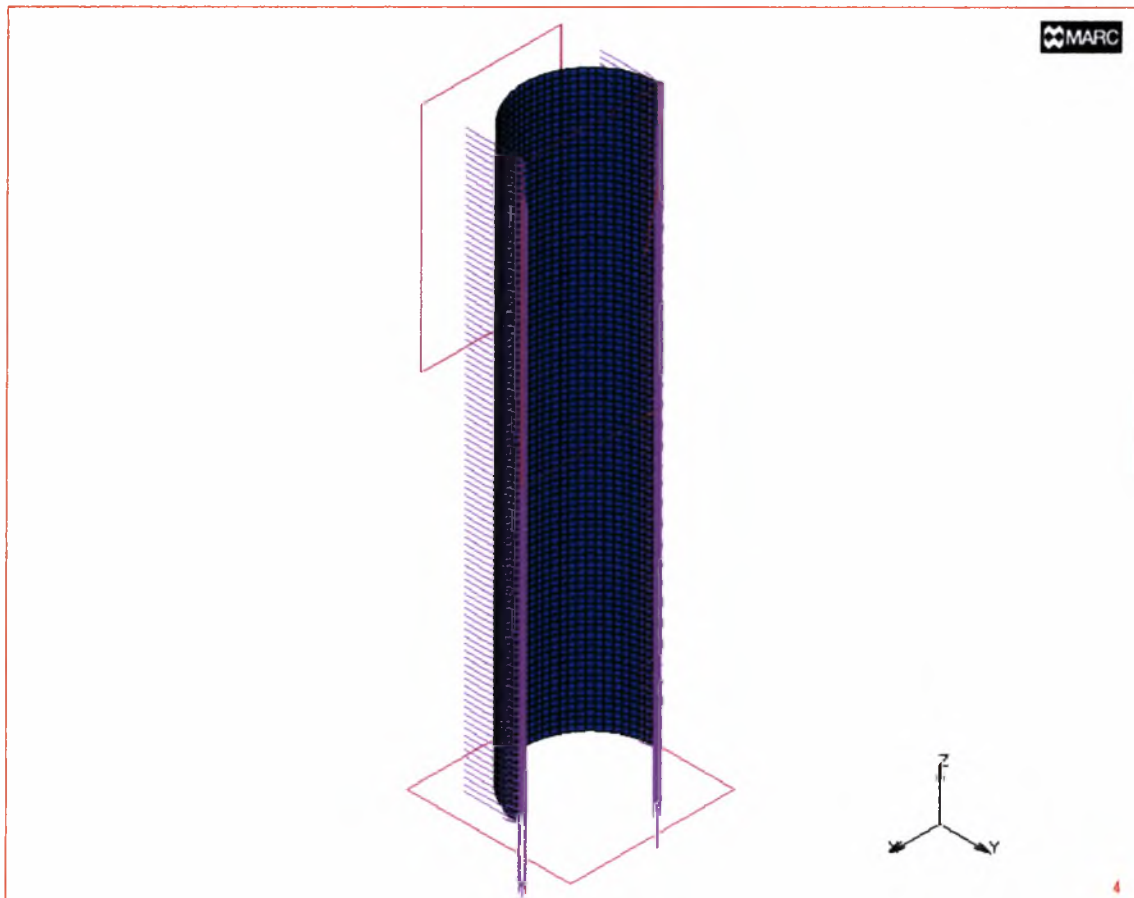
Σχ. 2.2

Επιβεβλημένες μετακινήσεις +0.05m για προσομοίωση του στραντζαρίσματος

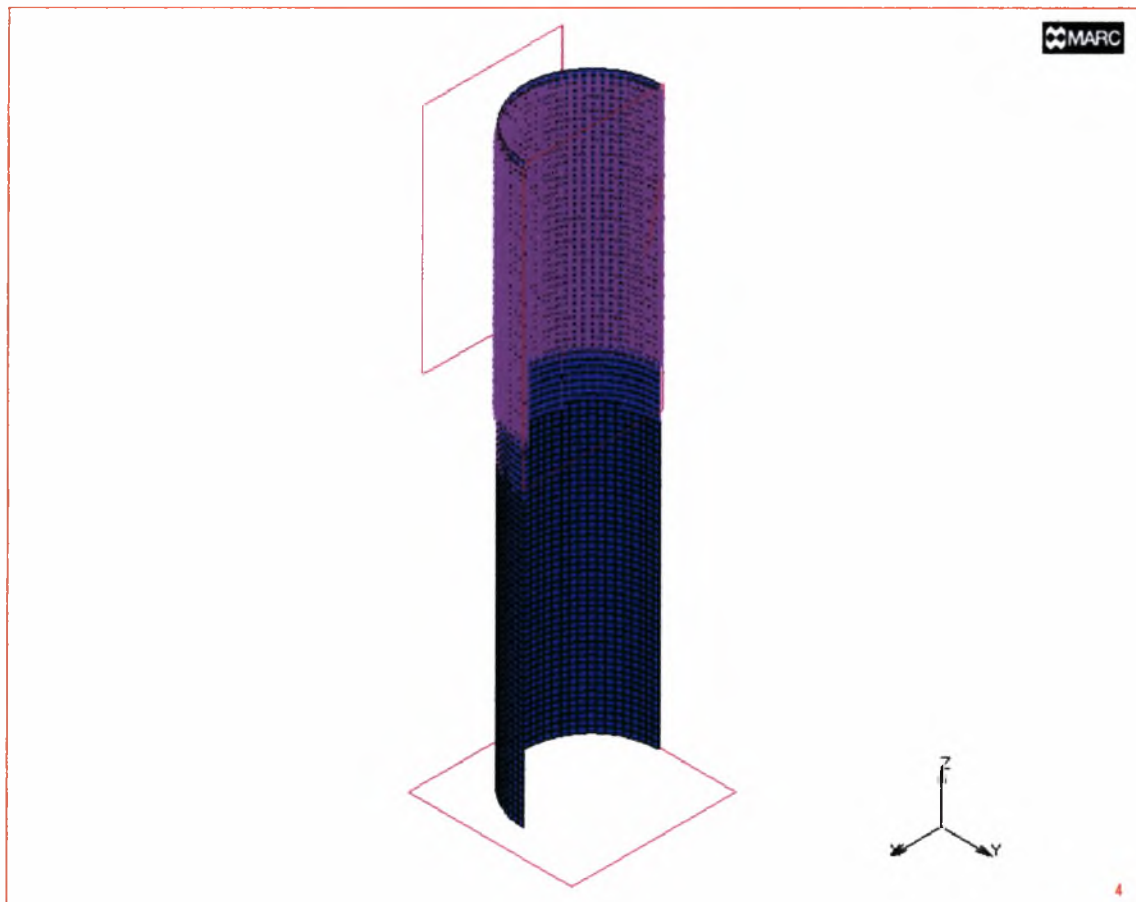


Σχ. 2.3

Συνοριακές συνθήκες συμμετρίας. Απαγόρευση μετακίνησης κόμβων τομής κατά Y και απαγόρευση στροφής γύρω απ' τον Z.

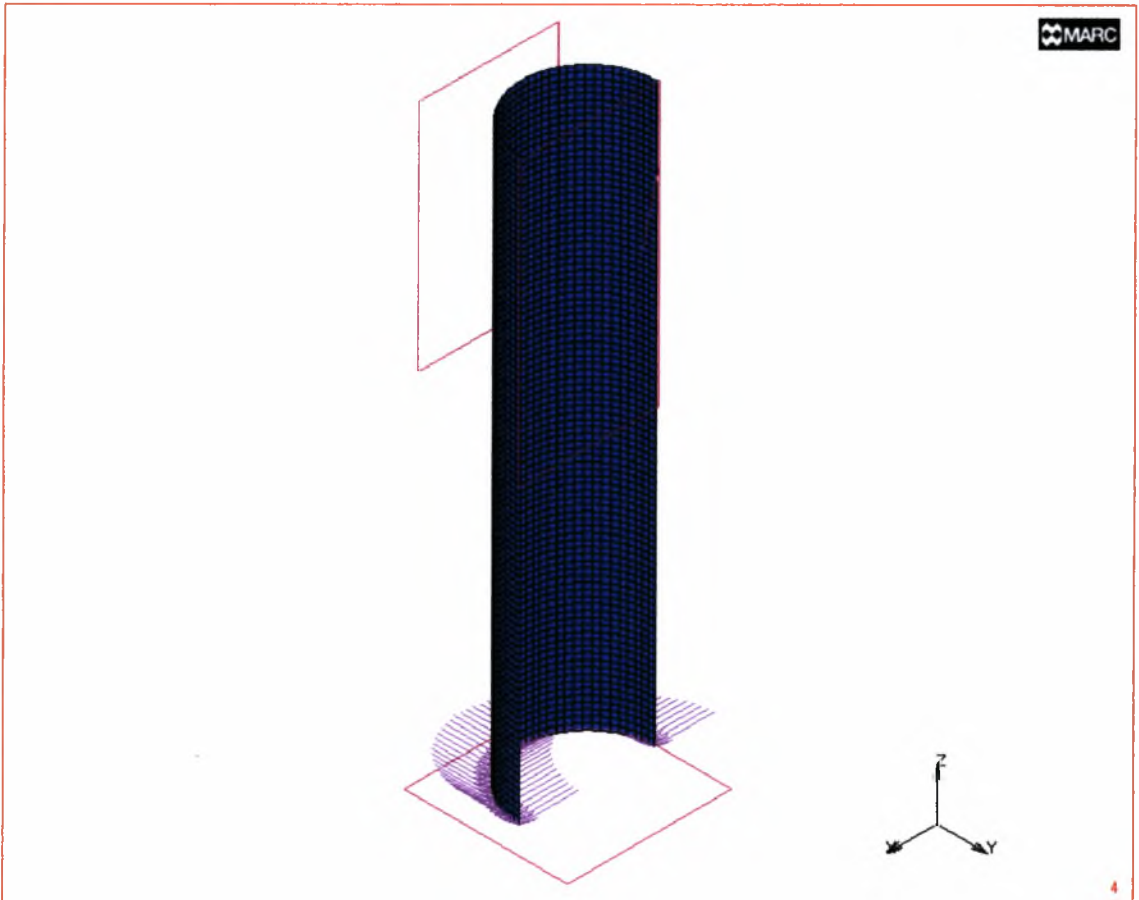


Σχ. 2.4



Σχ. 2.5

Απαγόρευση μετακίνησης κατά Z των κόμβων που πρόκειται να προσομοιώσουν το πεπλατυσμένο τμήμα της διατομής το οποίο κοχλιώνεται στα ελάσματα του κόμβου της κατασκευής και μεταφέρει τα φορτία στο μέλος.



Σχ. 2.6

Απαγόρευση μετακινήσεων κατά Χ και κατά Υ στους κατώτερους κόμβους του μοντέλου.

2.3 Αριθμητική προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών

Για κάθε ένα από τα πειραματικά δοκίμια της κοιλοδοκού ROR 88.9/4 και ROR 114.3/4 κατασκευάστηκαν 3 διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα. Σκοπός είναι η επιλογή του μοντέλου εκείνου που εξυπηρετεί καλύτερα τις ανάγκες της διερεύνησης που πραγματοποιείται στη παρούσα εργασία. Η επίλυση των μοντέλων αυτών έδωσε μεταξύ των άλλων τα εξής αποτελέσματα:

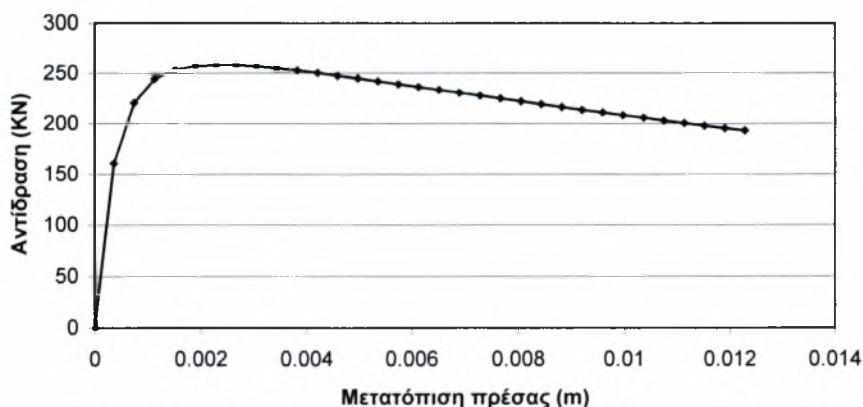
- Τις αριθμητικές τιμές της αντοχής των μελών σε αξονικό θλιπτικό φορτίο, σε συνάρτηση με την αξονική τους παραμόρφωση και την γραφική απεικόνιση αυτής
- Τις έγχρωμες απεικονίσεις, πάνω στο τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, των τάσεων Von-Mises και των πλαστικών παραμορφώσεων στα διάφορα χρονικά βήματα.

Στις υποενότητες του κεφαλαίου 2.3 παρουσιάζονται τα πιο πάνω αποτελέσματα για εκείνο το μοντέλο της κοιλοδοκού ROR 114.3/4, το οποίο κατασκευάστηκε με πιο πυκνό κάνναβο πεπερασμένων στοιχείων εκ των τριών της σειράς των μοντελοποιήσεων. Για υλικό ίδιο με αυτό του πειραματικού δοκιμίου της ίδιας διαμέτρου δίνει μέγιστη αντοχή το προαναφερθέν μοντέλο δίνει $N_{max}=258.426$ KN στο χρονικό βήμα 95.

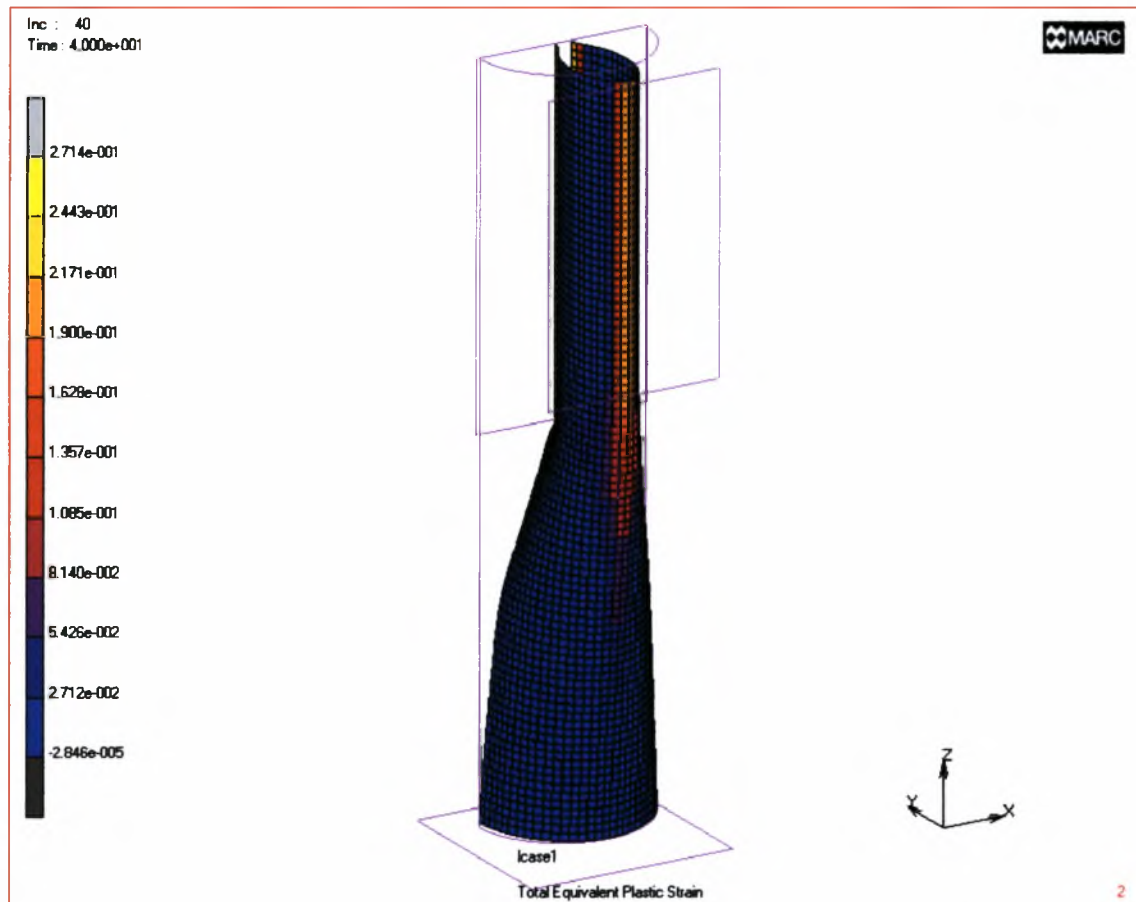
2.3.1 Πίνακας αποτελεσμάτων επίλυσης και αντίστοιχο διάγραμμα

Χρονικό βήμα	Αξονική παραμόρφωση(m)	Αντίδραση(KN)
90	0.00035665	160.692
91	0.00074046	220.664
92	0.00112623	244.756
93	0.00151151	253.676
94	0.00189655	257.192
95	0.00228171	258.426
96	0.00266691	258.224
97	0.00305211	256.93
98	0.00343721	255.036
99	0.00382241	252.768
100	0.00420741	250.222
101	0.00459231	247.592
102	0.00497691	244.904
103	0.00536211	242.006
104	0.00574671	239.288
105	0.00613161	236.444
106	0.00651631	233.618
107	0.00690101	230.818
108	0.00728561	227.962
109	0.00767031	225.098
110	0.00805491	222.236
111	0.00843951	219.402
112	0.00882431	216.596
113	0.00920891	213.81
114	0.00959361	211.052
115	0.00997821	208.332
116	0.01036291	205.66
117	0.01074751	203.048
118	0.01113231	200.492
119	0.01151691	197.9776
120	0.01190161	195.5128

ROR114.3x4 34x94 Nmax=258.426

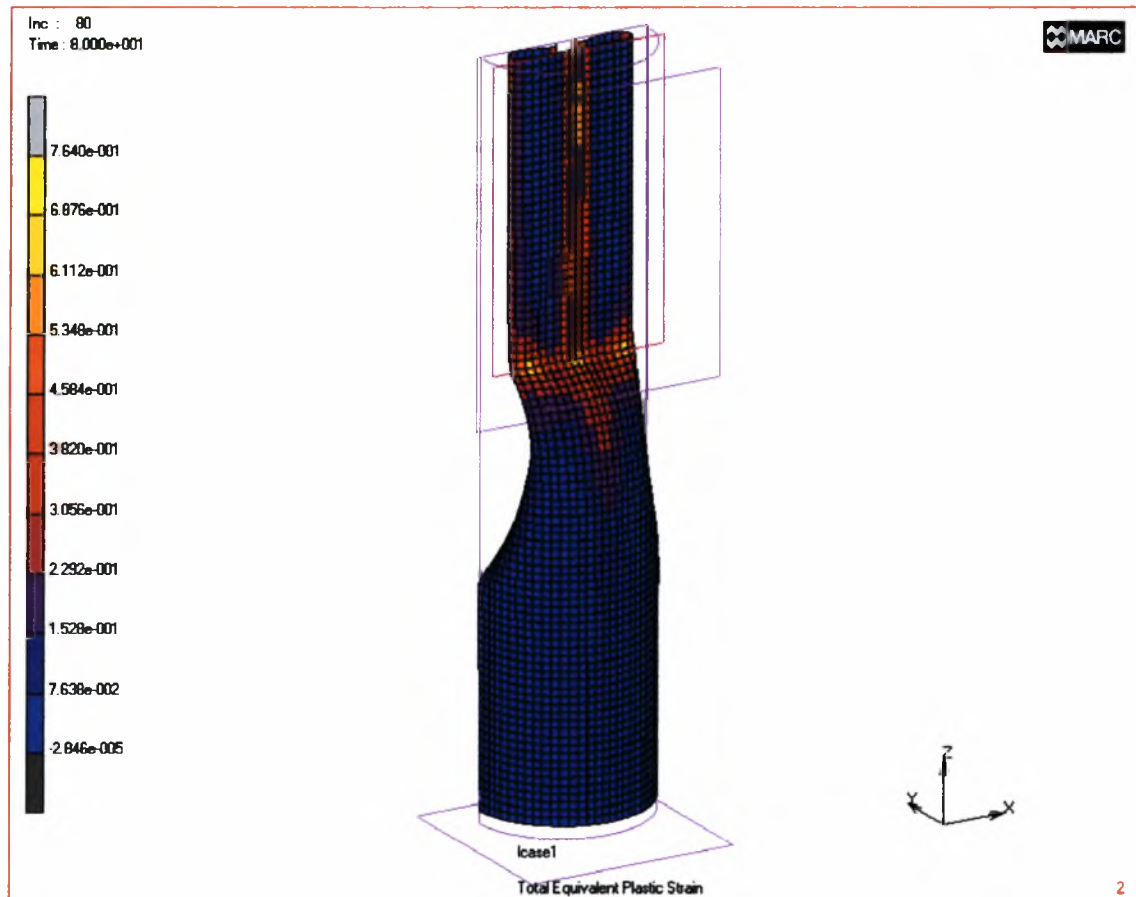


2.3.2 Σχέδια πλαστικών παραμορφώσεων της ROR114.3/4



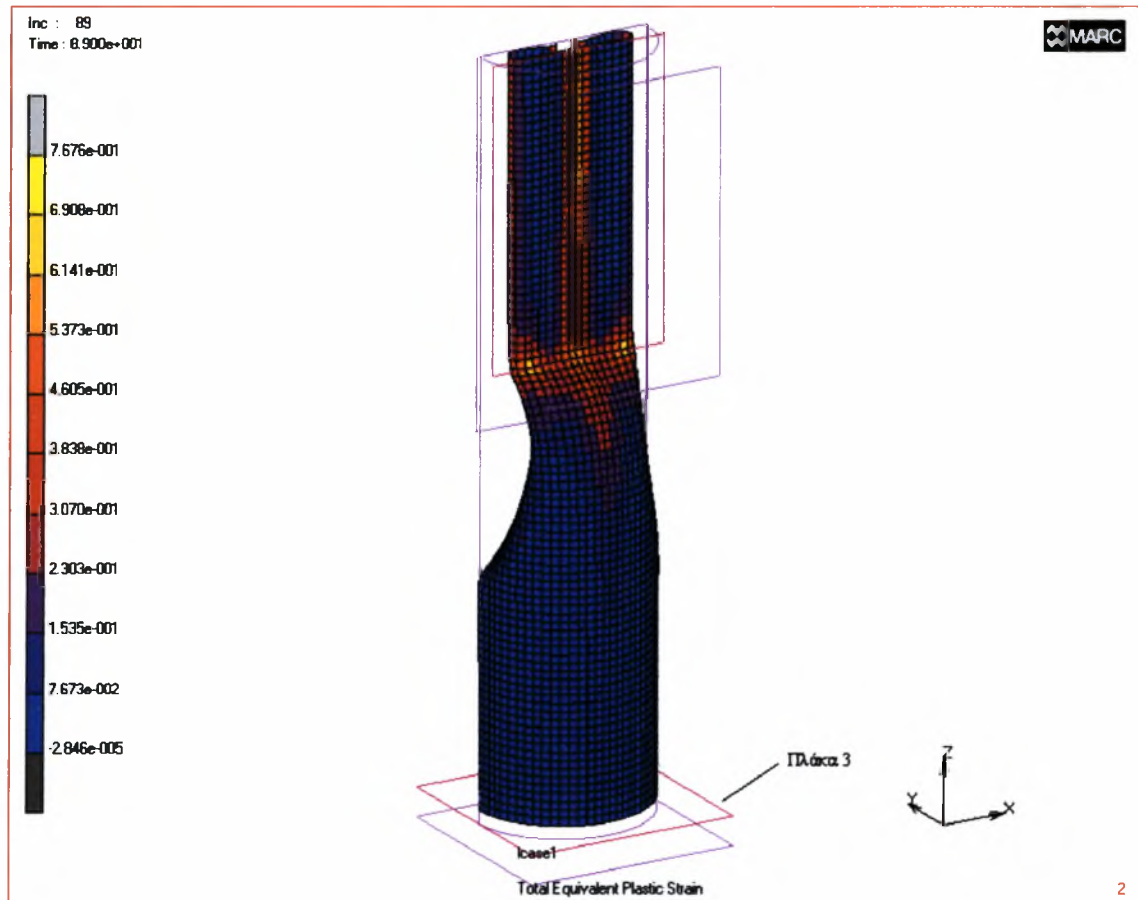
Πλαστικές παραμορφώσεις στο 40ο βήμα

Τα πιο ανοιχτά χρώματα στη ράχη της διαμόρφωσης συμβολίζουν τα στοιχεία που έχουν πλαστικοποιηθεί και υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις .



Πλαστικές παραμορφώσεις στο 80ο βήμα

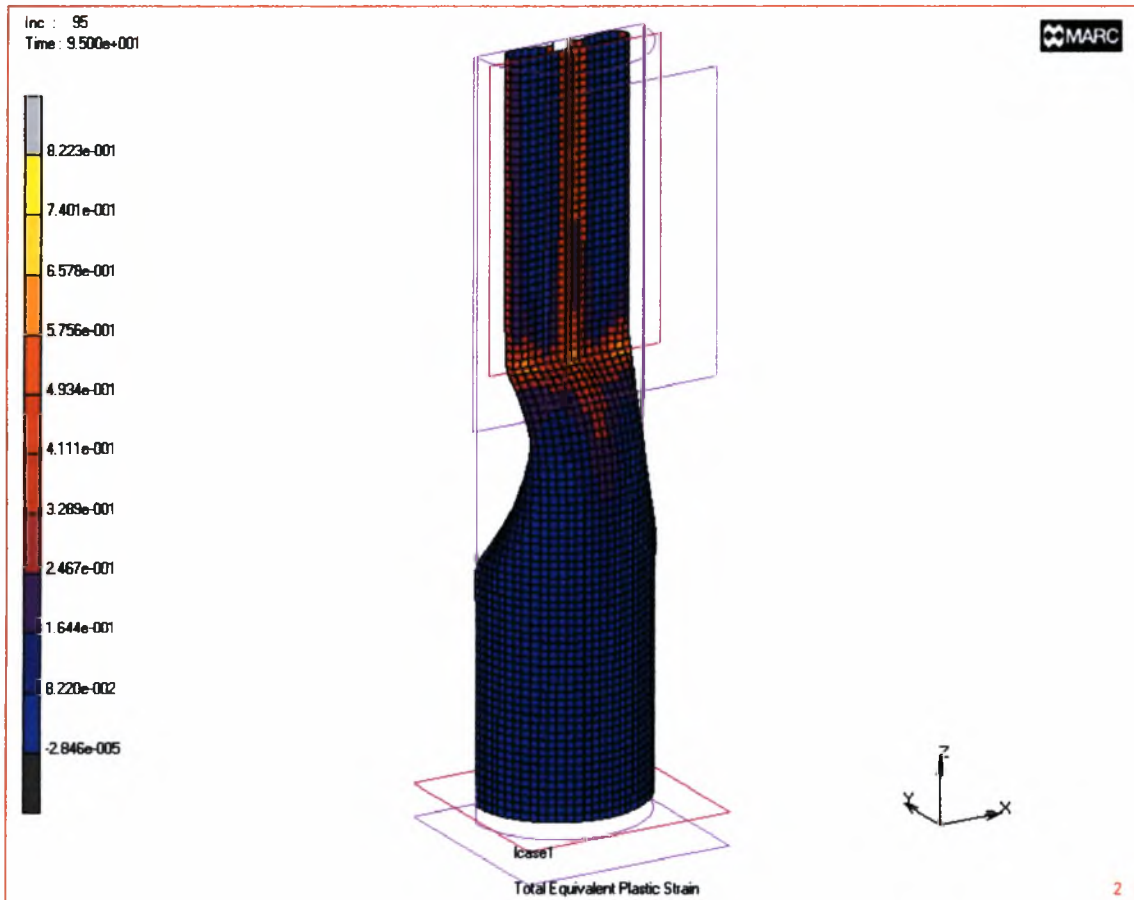
Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις μετά το δεύτερο στάδιο του στραντζαρίσματος. Εξακολουθεί να υφίσταται η ζώνη πλαστικοποίησης του υλικού κατά μήκος της ράχης του μέλους, ενώ έχει σχηματιστεί και μια δεύτερη στη ρίζα του πεπλατυσμένου τμήματος της κοιλοδοκού κάθετα στον άξονα της πρώτης και του μέλους.



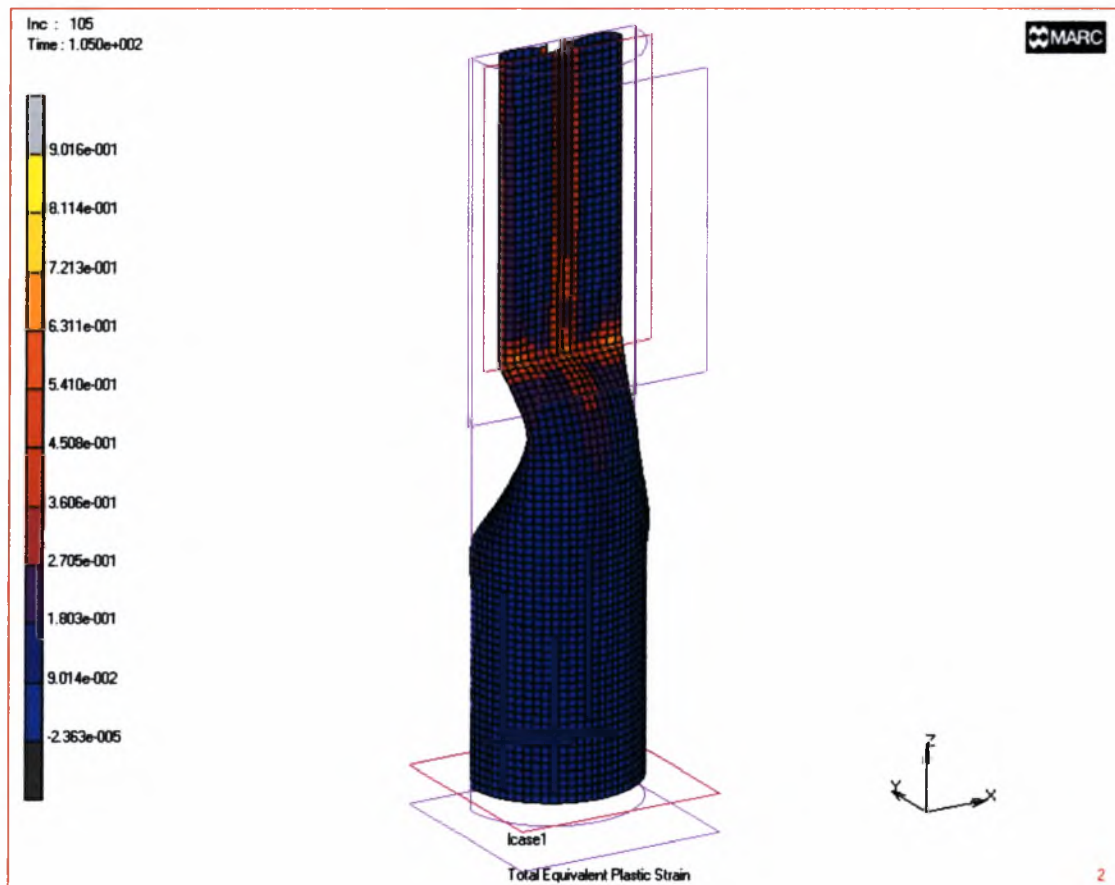
Πλαστικές παραμορφώσεις στο 89^ο βήμα

Η στερεή πλάκα 3 έρχεται σε επαφή με τους κάτω κόμβους στο 89^ο βήμα επιβάλλοντας κατακόρυφη μετακίνηση σ' αυτούς. Η πλάκα 3 εφάπτεται των κατώτερων κόμβων εννέα βήματα μετά την έναρξη της μετακίνησής της, γιατί κατά την διαδικασία της διαμόρφωσης του άκρου το μέλος βραχύνεται και οι κατώτεροι κόμβοι μετατοπίζονται προς τα πάνω, απομακρυνόμενοι από την πλάκα 3. Από τα βήματα 81 έως 88 στο μοντέλο δεν αλλάζει τίποτα.

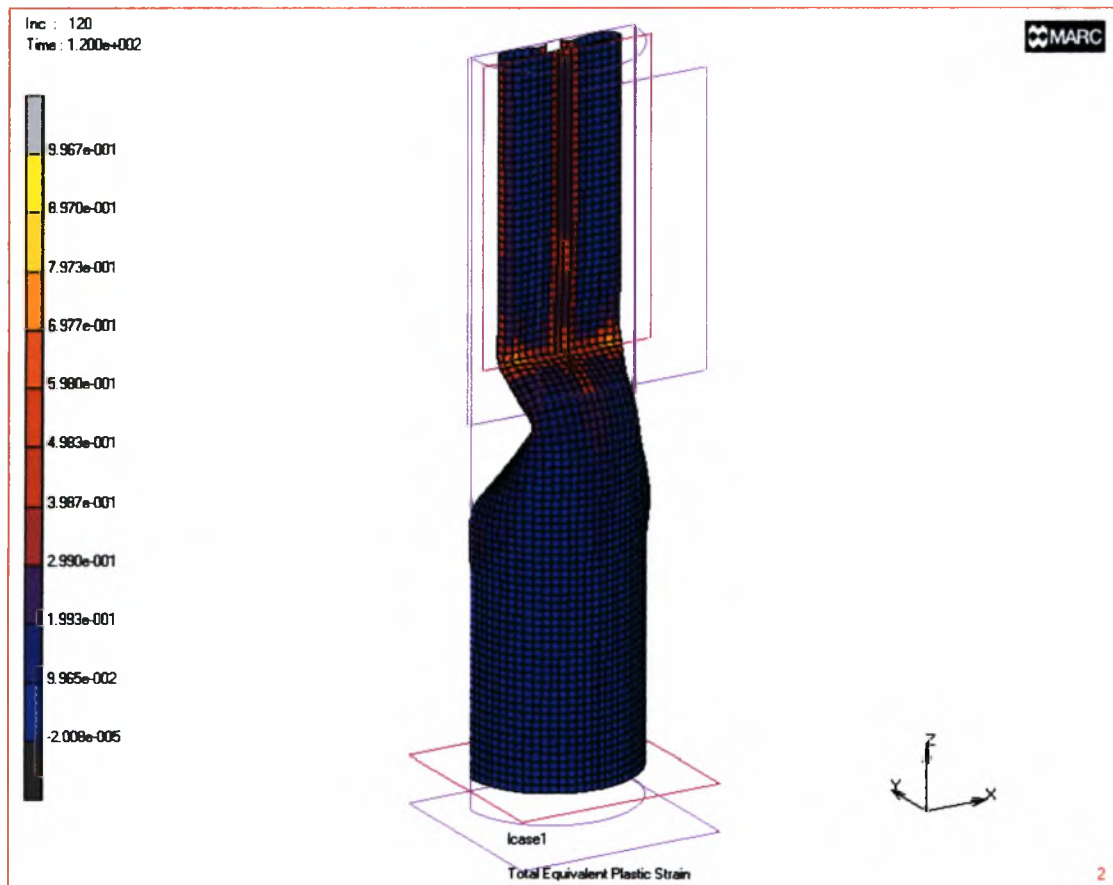
Πλαστικές παραμορφώσεις στο 95° βήμα



Στο βήμα αυτό η αναλαμβανόμενη δύναμη παίρνει την μέγιστη τιμή της. Από το βήμα αυτό και πέρα η δύναμη που αναλαμβάνει φθίνει, ενώ οι παραμορφώσεις των πεπερασμένων στοιχείων στην ζώνη πλαστικοποίησης η οποία είναι προσανατολισμένη κατά τον άξονα X αυξάνουν.



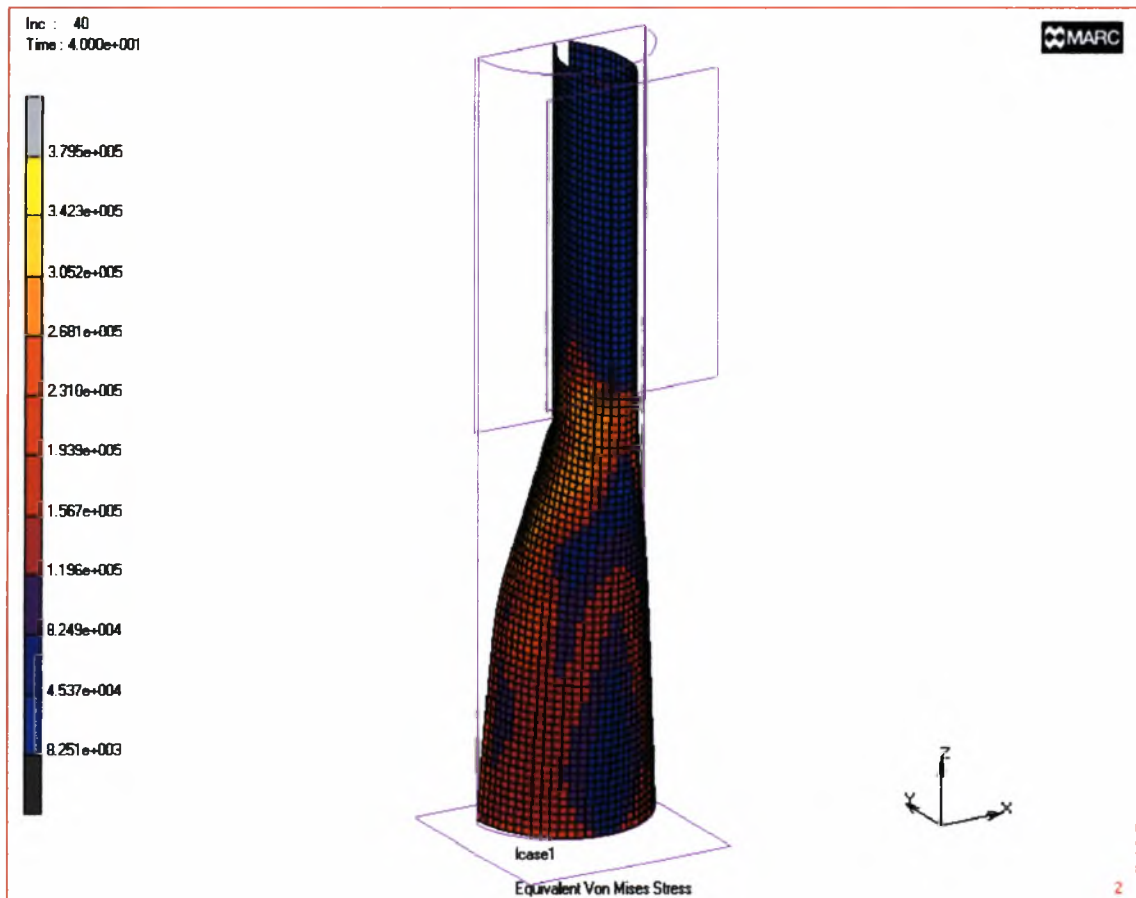
Πλαστικές παραμορφώσεις στο χρονικό βήμα 105

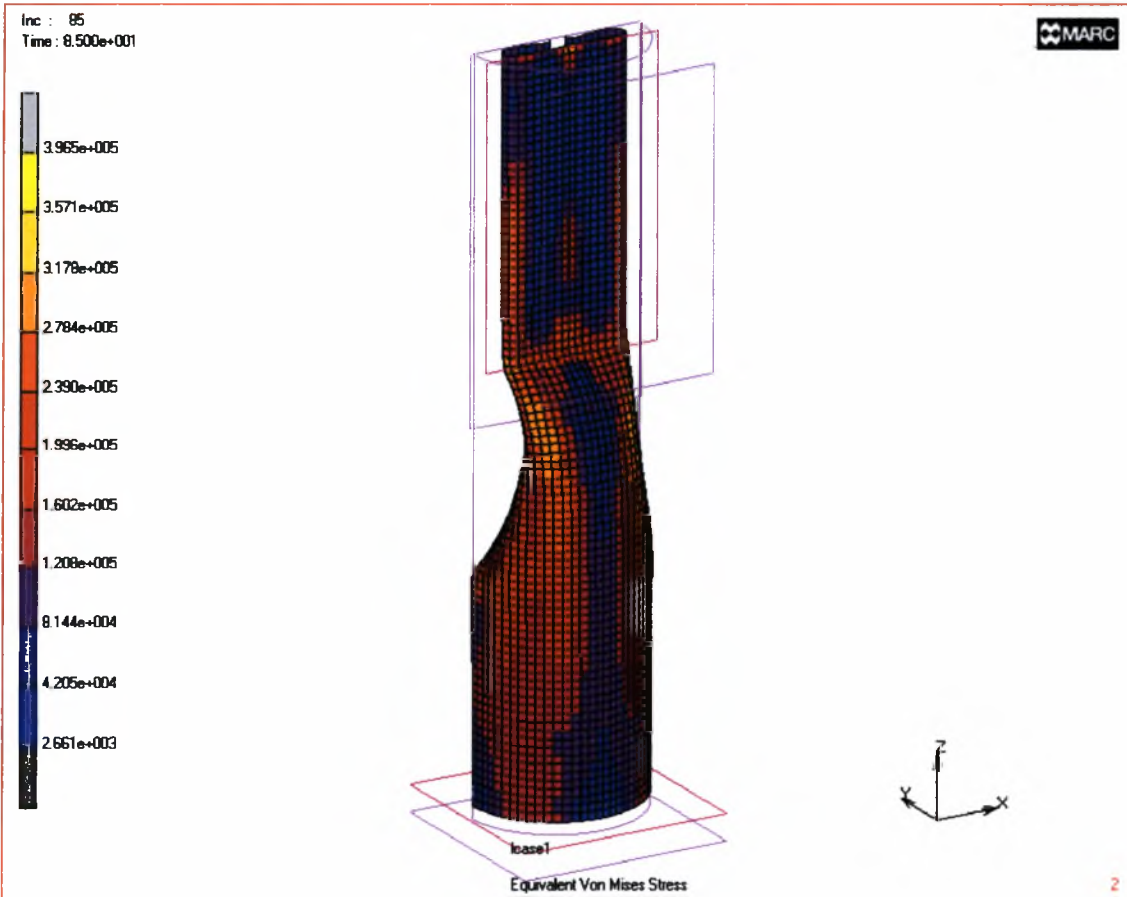
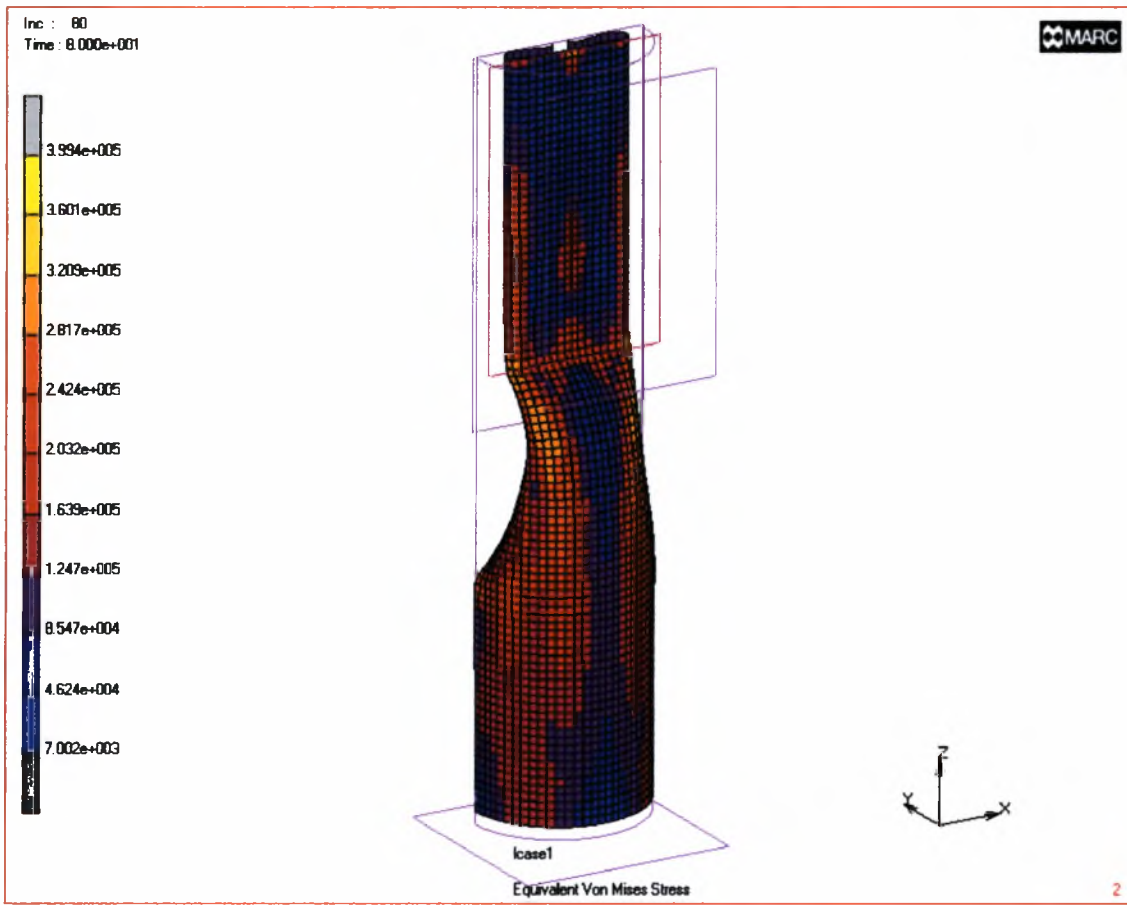


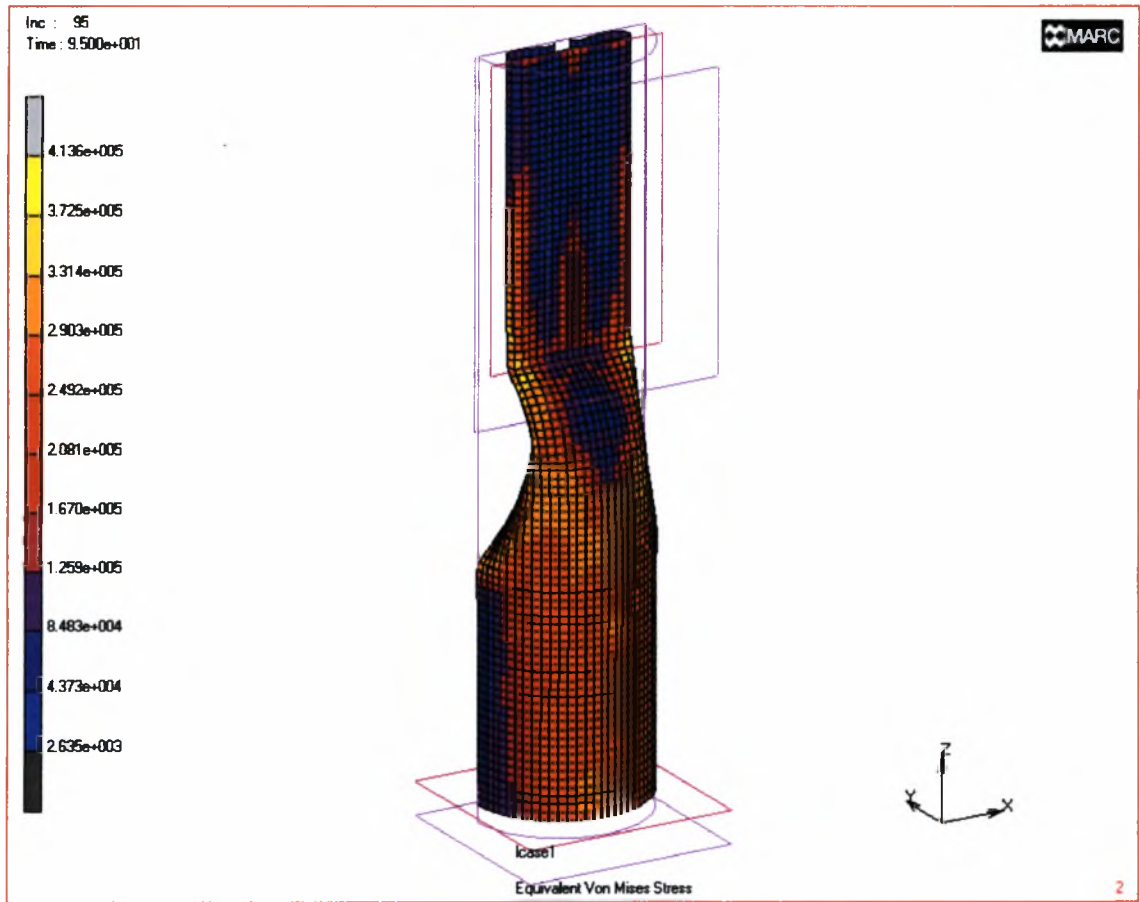
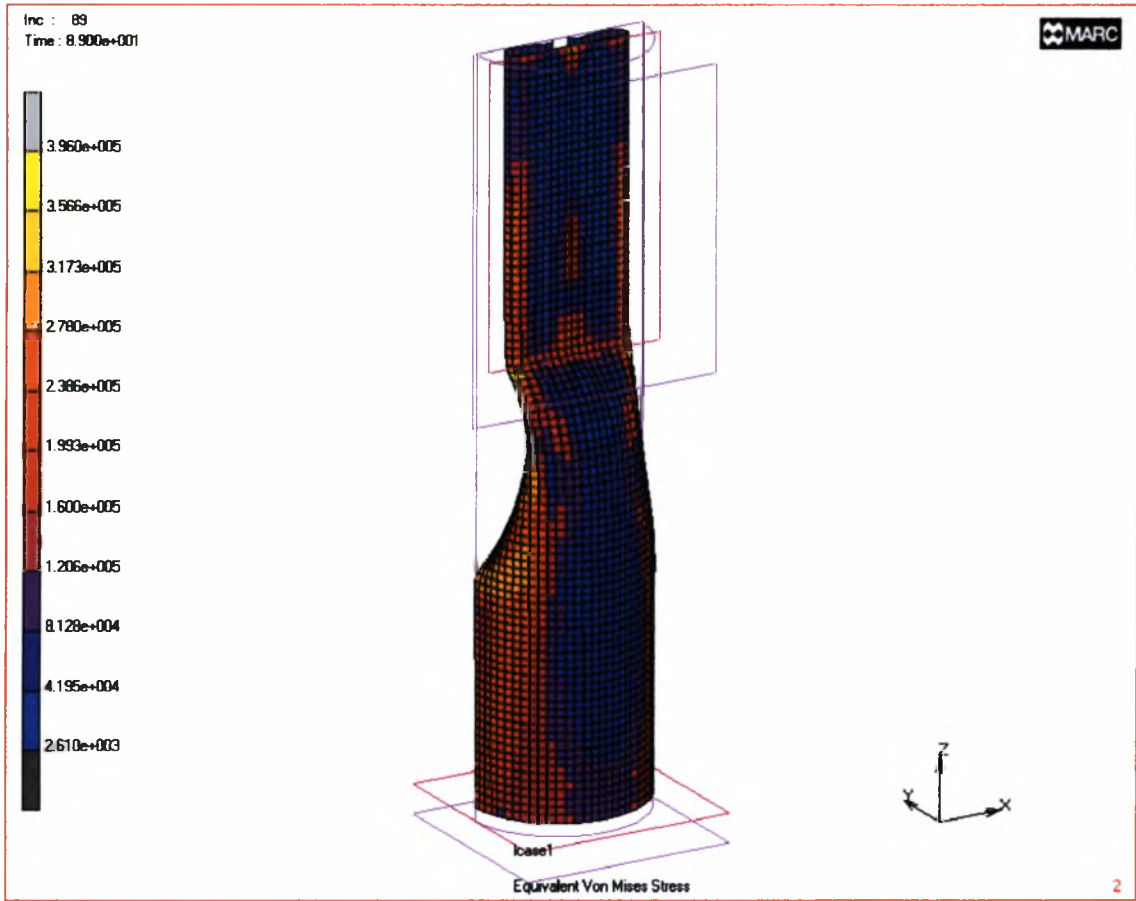
Πλαστικές παραμορφώσεις στο χρονικό βήμα 120

2.3.3 Σχέδια τάσεων Von-Mises της κοιλοδοκού ROR114.3/4

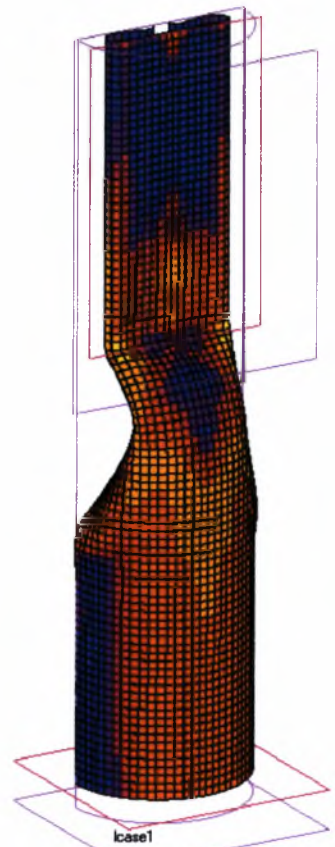
Στα σχέδια που ακολουθούν παρουσιάζονται σχηματικά οι τάσεις Von-Mises σε χαρακτηριστικά χρονικά βήματα.







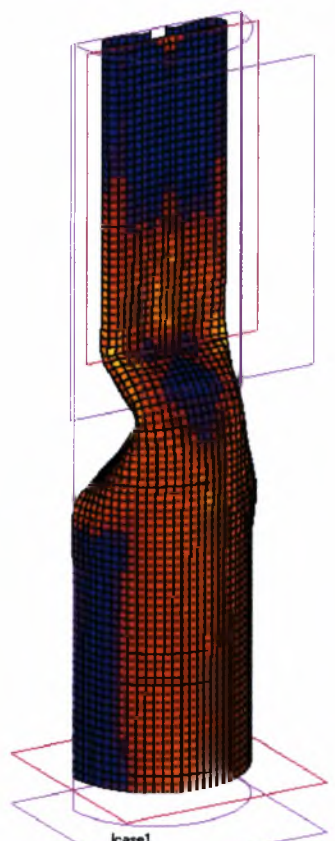
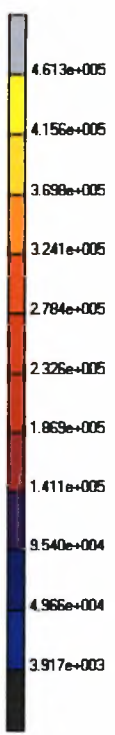
Inc : 105
Time : 1.050e+002



Equivalent Von Mises Stress

2

Inc : 120
Time : 1.200e+002

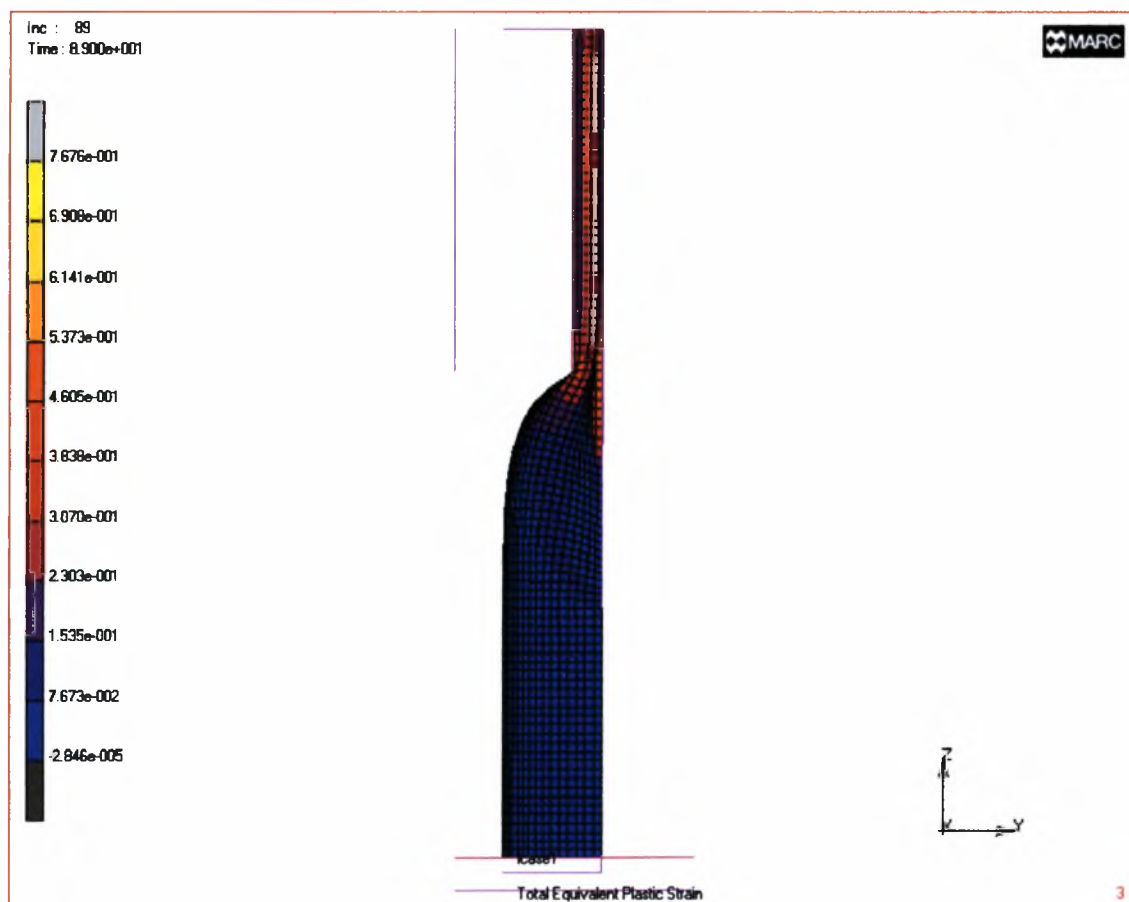


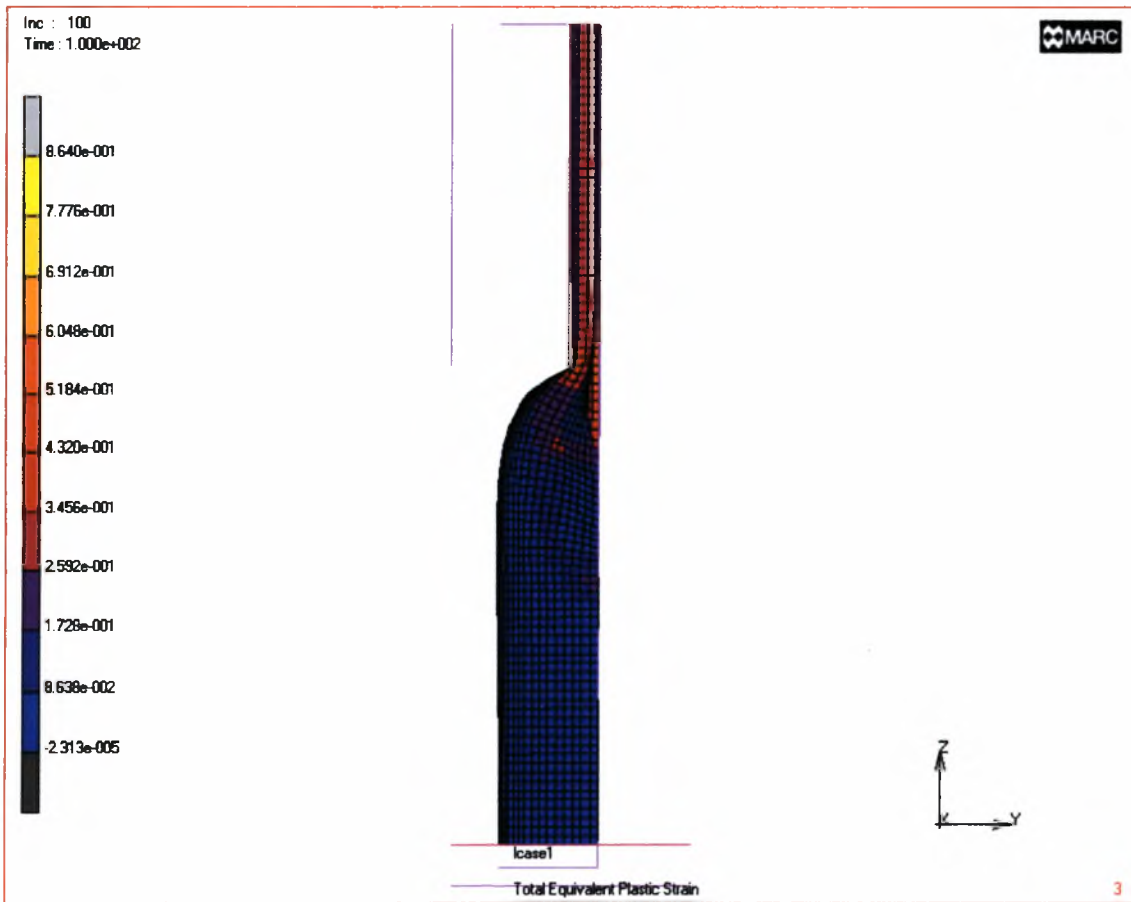
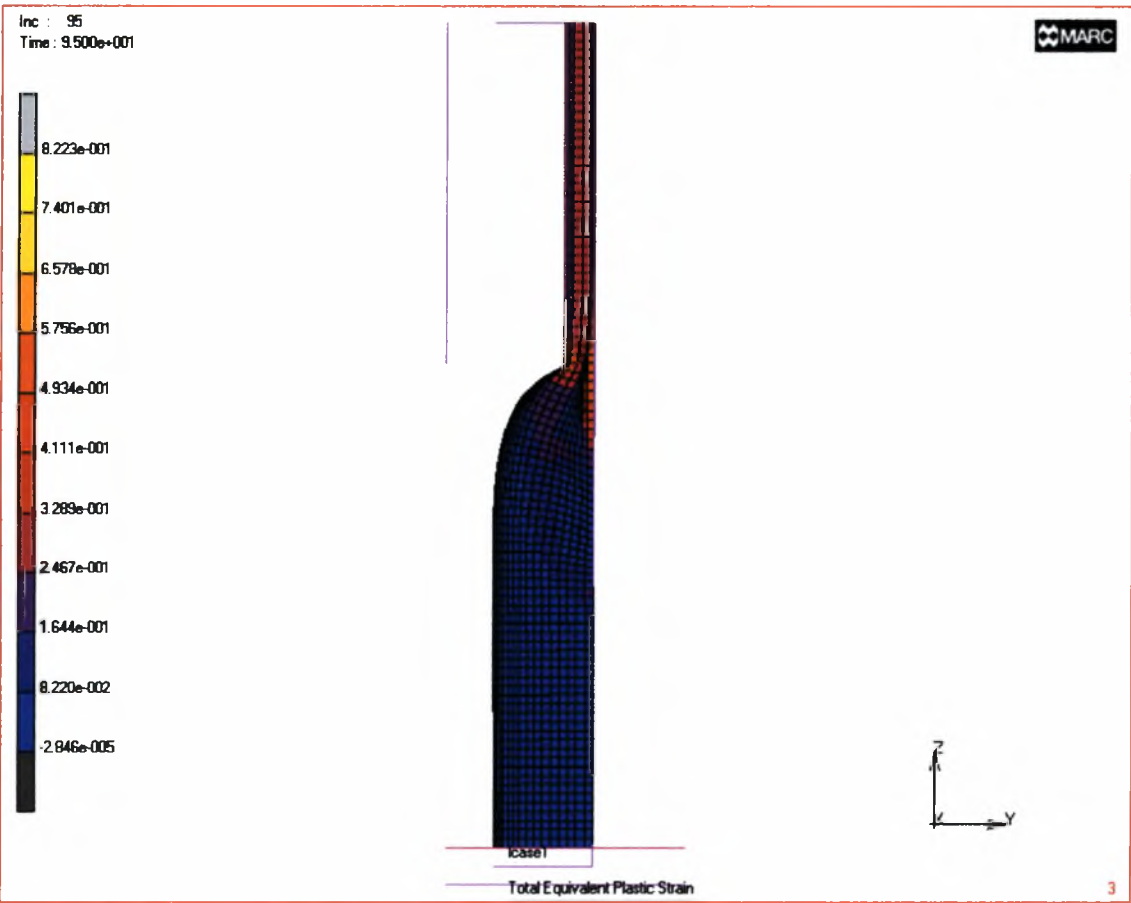
Equivalent Von Mises Stress

2

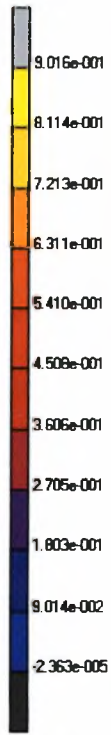
2.3.4 Σχέδια πλαστικών παραμορφώσεων

Στα παρακάτω σχέδια αξίζει να παρατηρηθεί η μεγάλη παραμόρφωση στη περιοχή της πλαστικοποίησης του υλικού και ιδιαίτερα μετά το χρονικό βήμα 95 από το οποίο, όπως ήδη έχει αναφερθεί, υπολογίζεται η μέγιστη αξονική δύναμη που μπορεί να παραλάβει το μέλος.





Inc : 105
Time : 1.050e+002

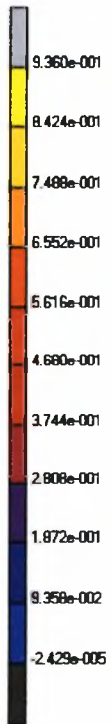


lcase1

Total Equivalent Plastic Strain

3

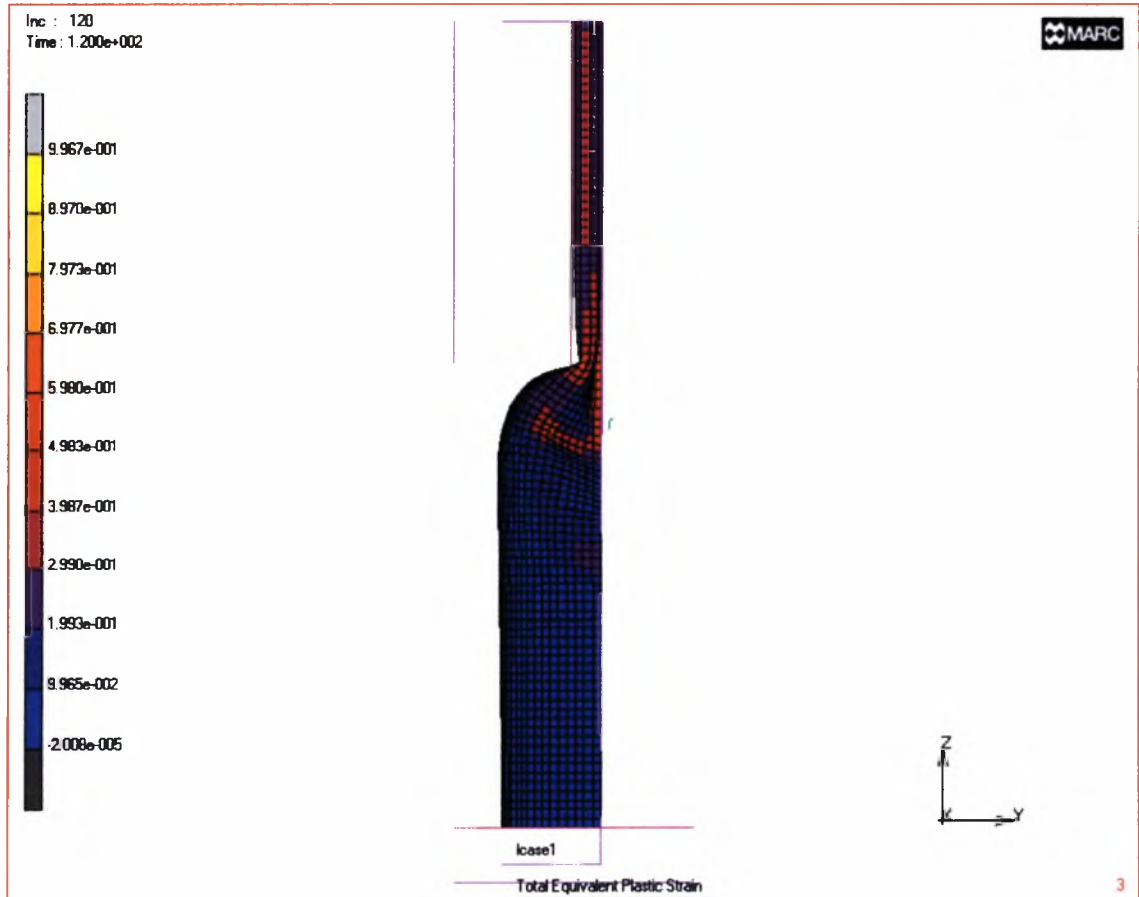
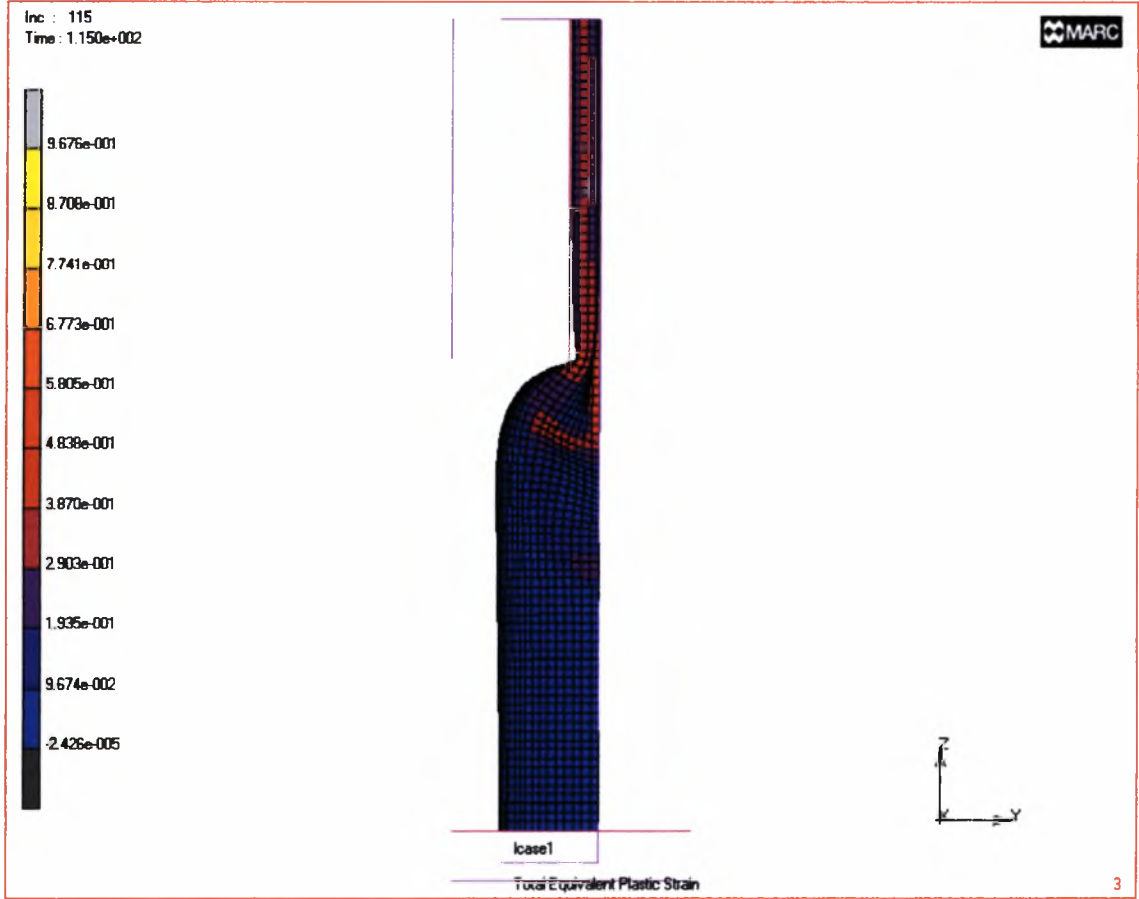
Inc : 110
Time : 1.100e+002



lcase1

Total Equivalent Plastic Strain

3



2.4 Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών

Κατασκευάστηκαν τρία αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση κάθε πειραματικού δοκιμίου. Από αυτά ένα έχει διπλάσιο ύψος απ' τα άλλα και ένα έχει τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία πλευράς 0.5 mm αντί 1 mm που έχουν τα άλλα δύο. Για κάθε μοντέλο χρησιμοποιήθηκε νόμος υλικού ίδιος με του αντίστοιχου πειραματικού δοκιμίου. Τα αποτελέσματα της επίλυσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και αποδεικνύουν ότι οι επιλύσεις αυτών και παρόμοιων μοντέλων παρέχουν αποτελέσματα πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές της αντοχής.

Αριθμητικό Μοντέλο <u>ROR 88.9/4</u>	Μέγιστη αξονική αριθμητικού μοντέλου	Αντίστοιχη μέγιστη αξονική εργαστηριακού δοκιμίου
Μοντέλο ROR88.9x4 Ύψους 0.47 m 13x47 =611 στοιχεία διαστάσεων 1x1 cm	Nmax=270.4 KN	Nmax=262 KN
Μοντέλο ROR88.9x4 Ύψους 0.94 m 13x94 =1222 στοιχεία διαστάσεων 1x1 cm	Nmax=271.94 KN	Nmax=262 KN
Μοντέλο ROR88.9x4 ύψους 0.47 m 26x94 =2444 στοιχεία διαστάσεων 0.5x0.5 cm	Nmax=250.43 KN	Nmax=262 KN

Από τις τιμές του πάνω πίνακα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Τα αποτελέσματα των αριθμητικών μοντέλων προσεγγίζουν με μικρή απόκλιση της τάξης του $\pm 4\%$ αυτά των πειραματικών. Αυτό σημαίνει ότι οι μοντελοποιήσεις που έγιναν παρέχουν αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα για τον σκοπό της εργασίας.
- Το αριθμητικό μοντέλο της πειραματικής κοιλοδοκού ROR 88.9/4 με 611 στοιχεία αποκλίνει, ως προς τα αποτελέσματα, από αυτά του μοντέλου με 2444 στοιχεία σε ποσοστό 7%. Το ποσοστό αυτό επιτρέπει την χρήση του μοντέλου με τα 611 στοιχεία για την εξαγωγή ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελεσμάτων, με όφελος την οικονομία υπολογιστικού όγκου και χρόνου.
- Για ύψος μοντέλου 0.94 m αντί των 0.47 m τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων διαφέρουν ελάχιστα. Αυτό σημαίνει πως με ύψος μοντέλου 0.47 m εξασφαλίζονται πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα στο προσδιορισμό του μέγιστου αξονικού θλιπτικού φορτίου που μπορεί να φέρει η κοιλοδοκός.
- Αντίστοιχες εικόνες με αυτές των πειραματικών δοκιμών γύρω από την περιοχή των άκρων, πριν και μετά την επιβολή των φορτίων, δείχνουν το ίδιο φαινόμενο πλαστικοποίησης και ταύτιση της μορφής της παραμορφωμένης περιοχής.

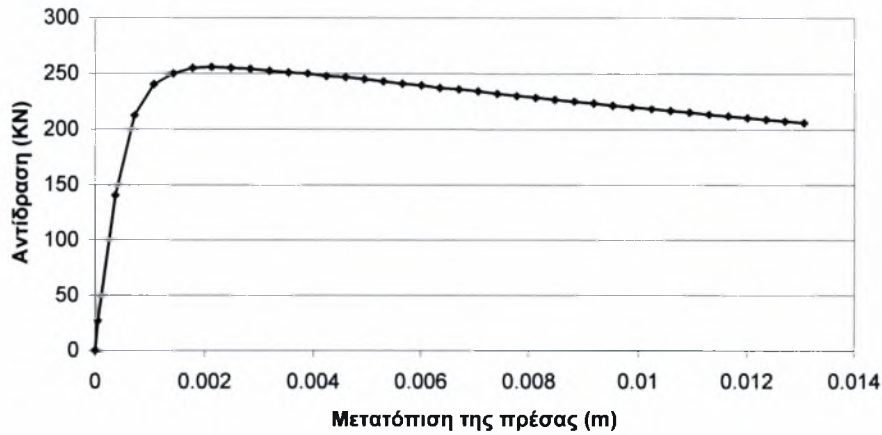
Αριθμητικό Μοντέλο ROR 114.3/4	Μέγιστη αξονική αριθμητικού μοντέλου	Αντίστοιχη μέγιστη αξονική εργαστηριακού δοκιμίου
Μοντέλο ROR114.3x4 Ύψους 0.47 m 17x47 =799 στοιχεία διαστάσεων 1x1 cm	Nmax=245.266 KN	Nmax=236 KN
Μοντέλο ROR114.3x4 Ύψους 0.94 m 17x94 =1598 στοιχεία διαστάσεων 1x1 cm	Nmax=249.268 KN	Nmax=236 KN
Μοντέλο ROR114.3x4 Ύψους 0.47 m 34x94 =3196 στοιχεία διαστάσεων 0.5x0.5 cm	Nmax=258.426 KN	Nmax=236 KN

Οι τιμές των αποτελεσμάτων από τον πίνακα για την κοιλοδοκό ROR114.3x4 οδηγούν στην εξαγωγή των ίδιων συμπερασμάτων με αυτά που προέκυψαν από το αριθμητικό μοντέλο της κοιλοδοκού ROR 88.9x4.

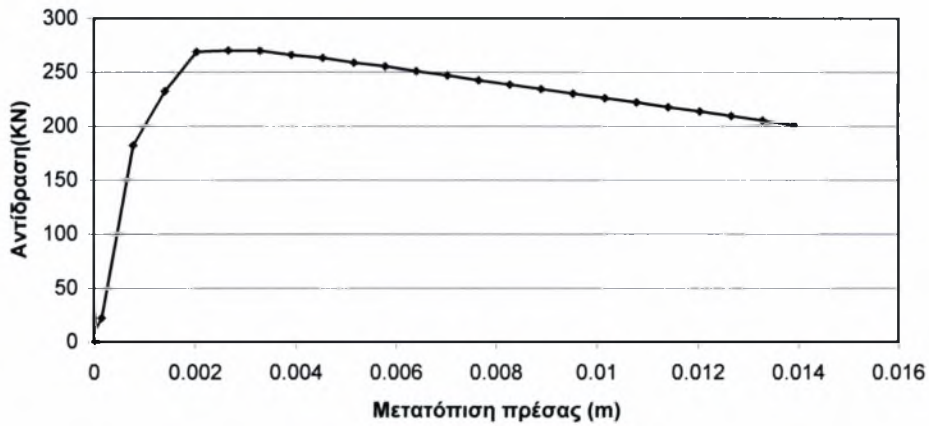
Μπορεί να θεωρηθεί πως η επιλογή της πυκνότητας του καννάβου, του ύψους του μοντέλου, των συνθηκών στήριξης στις τομές και στο άκρο, καθώς και οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι επιτυχής. Το σφάλμα είναι ανεκτό και ο χρόνος επίλυσης των αριθμητικών προσομοιωμάτων είναι σχετικά μικρός. Η επίλυση του μοντέλου με τα 611 στοιχεία της ROR 88.9/4, ολοκληρώνεται σε περίπου 2 ώρες, ενώ το αντίστοιχο μοντέλο με τα 2444 στοιχεία απαιτεί περίπου 10 ώρες.

Αντίστοιχα διαγράμματα «Επιβαλλόμενης αξονικής βράχυνσης-Αντίδρασης» των μοντέλων της ROR88.9x4 και της ROR114.3x4 των παραπάνω πινάκων.

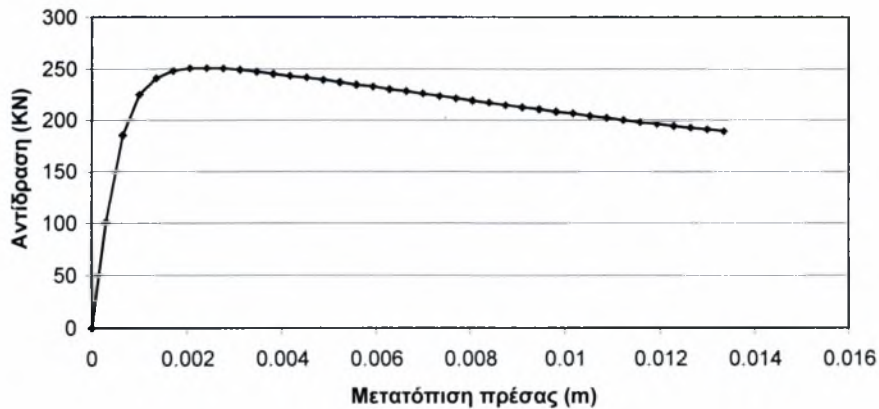
ROR88.4x4 13x47 Nmax=270.4



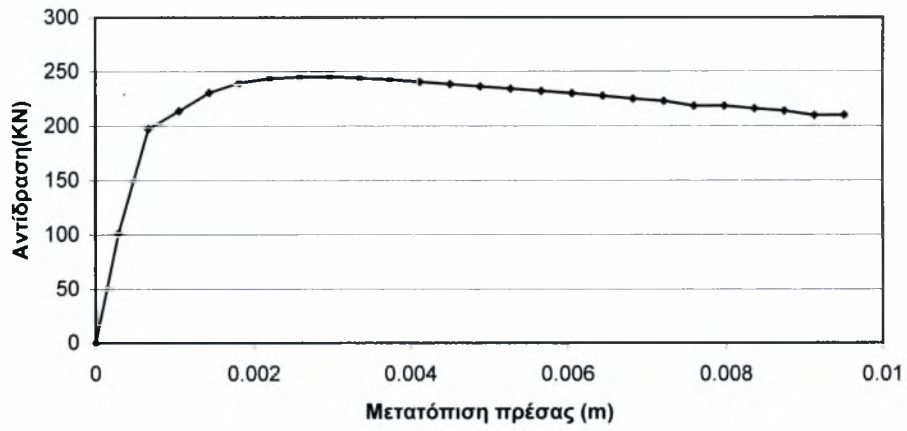
ROR88.9x4 13x94 Nmax=271.94



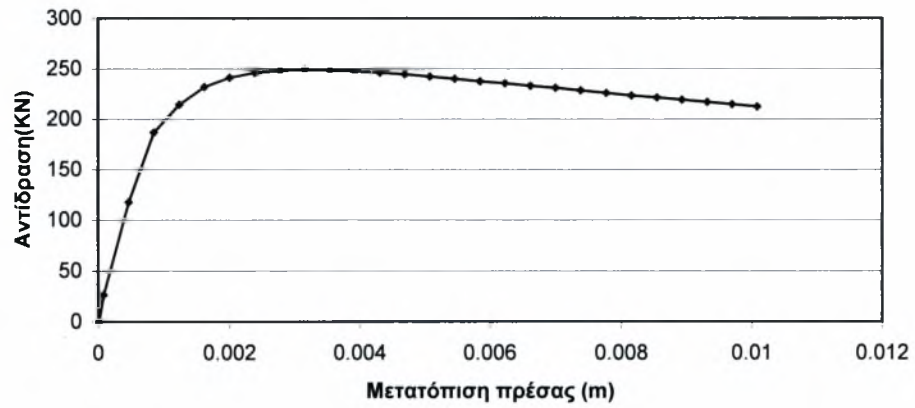
ROR88.9x4 26x94 Nmax=250.43



ROR114.3x4 17x47 Nmax=245.266



ROR114.3x4 17x94 Nmax=249.268



3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο διαπιστώθηκε ότι, με μικρό σφάλμα, μπορούμε να έχουμε εκτίμηση της αντοχής κοιλοδοκών της σειράς ROR με πεπλατυσμένα άκρα. Αποφασίστηκε να μοντελοποιηθούν 6 χαρακτηριστικές διαμέτροι και τέσσερα πάχη για κάθε μια. Συνολικά οι διατομές που μοντελοποιήθηκαν είναι 24 και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα. Το αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι όμοιο με αυτό που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι παράμετροι που μεταβάλλονται σ' αυτό είναι η διάμετρος του κυλίνδρου της κοιλοδοκού και το πάχος των πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας μοντέλων

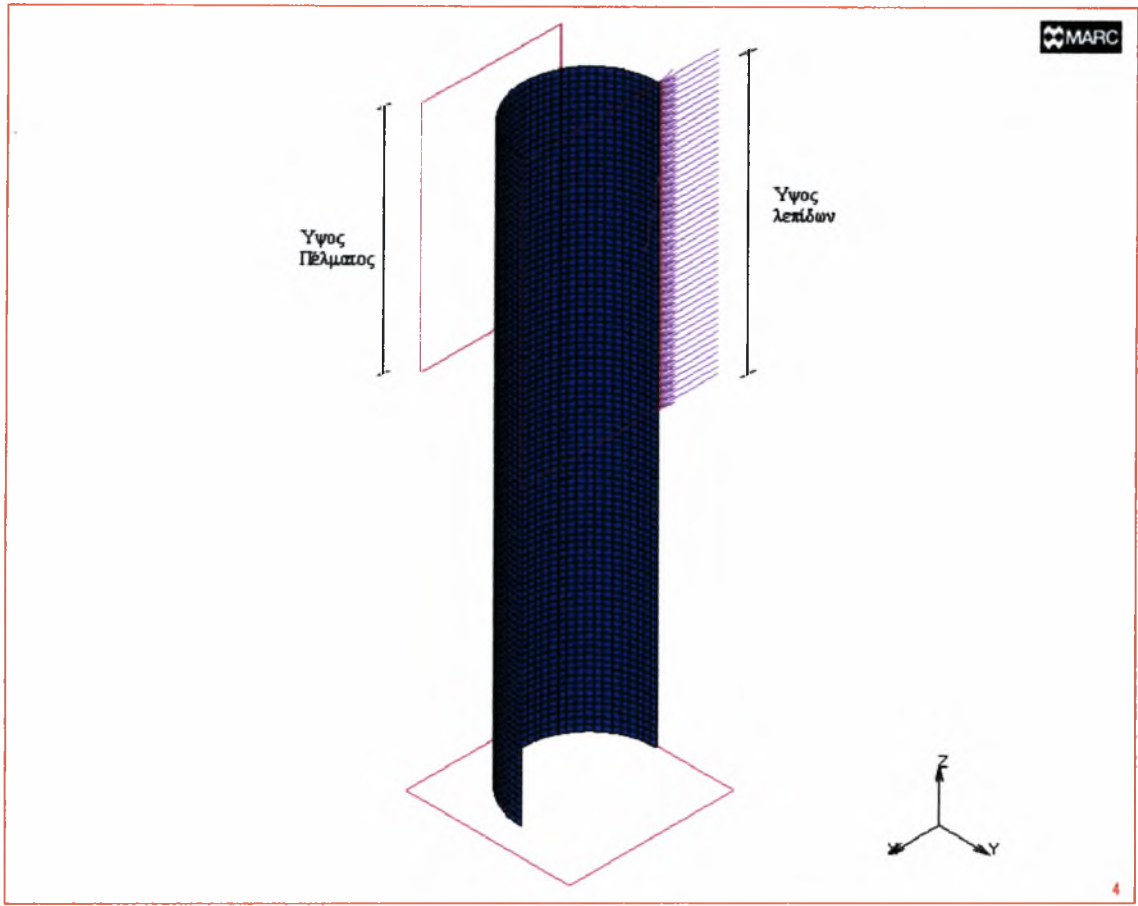
<i>ROR</i>	60,3	(mm)	2,9	3,2	3,6	4
<i>ROR</i>	76,1	(mm)	2,9	3,2	4	5
<i>ROR</i>	88,9	(mm)	3,2	4	5,6	6,3
<i>ROR</i>	101,6	(mm)	4	5,6	6,3	7,1
<i>ROR</i>	114,3	(mm)	4	5,6	6,3	7,1
<i>ROR</i>	139,7	(mm)	4	5,6	6,3	8

Το ύψος των λεπίδων και των πελμάτων της πρέσας (βλέπε Σχ. 3.1) για τις διατομές 114.3 και 88.9 που χρησιμοποιήθηκαν για τις εργαστηριακές δοκιμές μετρήθηκαν και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Για τις υπόλοιπες διατομές που μοντελοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία οι αντίστοιχες τιμές φαίνονται παρακάτω και προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή και με την ίδια διαφορά $\Delta Y=4\text{cm}$ των δύο υψών.

Διατομή (mm)	Ύψος λεπίδων (cm)	Ύψος πελμάτων (cm)
60.3	11	7
76.1	14	10
88.9	17	13
101.6	20	16
114.3	23	19
139.7	29	25

Το μέγεθος ΔY καθορίζει την ομαλότητα της μετάβασης από την κυκλική στη πεπλατυσμένη διατομή. Είναι επομένως καθοριστικό για την ομαλότητα κατανομής των φορτίων από το άκρο στο σώμα του μέλους. Δοκιμάζοντας διάφορα ΔY στα αριθμητικά μοντέλα με διατομές ROR 88.9/4 και ROR 114.3/4 διαπιστώνεται πως η αντοχή του διαμορφωμένου άκρου είναι ανάλογη του ΔY . Επίσης για κάθε συνδυασμό διαμέτρου και πάχους διατομής υπάρχει άνω και κάτω όριο πέρα του οποίου η αύξηση ή η μείωση αντίστοιχα του ΔY δεν επηρεάζει ουσιαστικά την αντοχή του άκρου. Έτσι π.χ. για την ROR 88.9/4 αύξηση του ΔY πέρα των 4 cm και για την ROR 114.3/4 μείωση του ΔY πέρα των 4 cm δεν επηρεάζει την αντοχή του άκρου.

ΔY	Αντοχή ROR 88.9/4	Αντοχή ROR 114.3/4
1 cm	248.4 KN	-
2 cm	-	249.2 KN
4 cm	270.4 KN	249.4 KN
8 cm	270.8 KN	-
10 cm	-	261.8 KN
14 cm	-	267.5 KN
20 cm	-	289.3 KN



Σχ. 3.1

Για το υλικό των μοντέλων χρησιμοποιείται ελαστικοπλαστικός νόμος με κράτυνση.

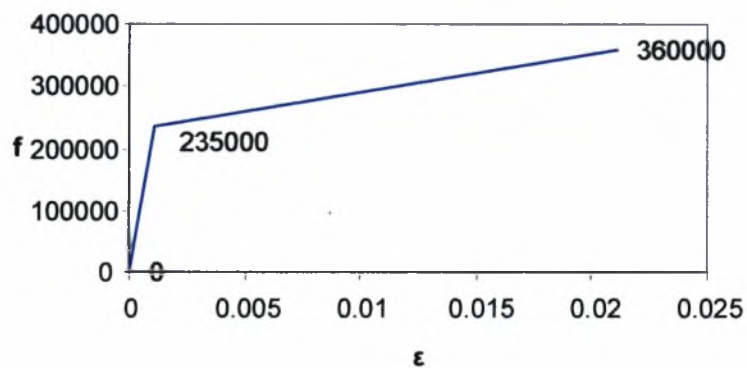
Τα χαρακτηριστικά του είναι:

◆ Για Fe360

Όριο διαρροής $f_y=235000 \text{ kN/m}^2$

Όριο θραύσης $f_u=360000 \text{ kN/m}^2$

Διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

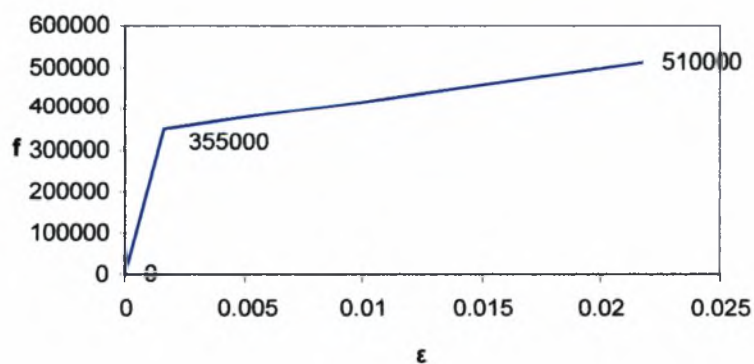


◆ Για Fe510

Όριο διαρροής $f_y=355000 \text{ kN/m}^2$

Όριο θραύσης $f_u=510000 \text{ kN/m}^2$

Διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων



◆ Μέτρο ελαστικότητας: $E=2,1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$

◆ Λόγος Poisson: $\nu=0,3$

3.1 Αποτελέσματα αριθμητικής διερεύνησης

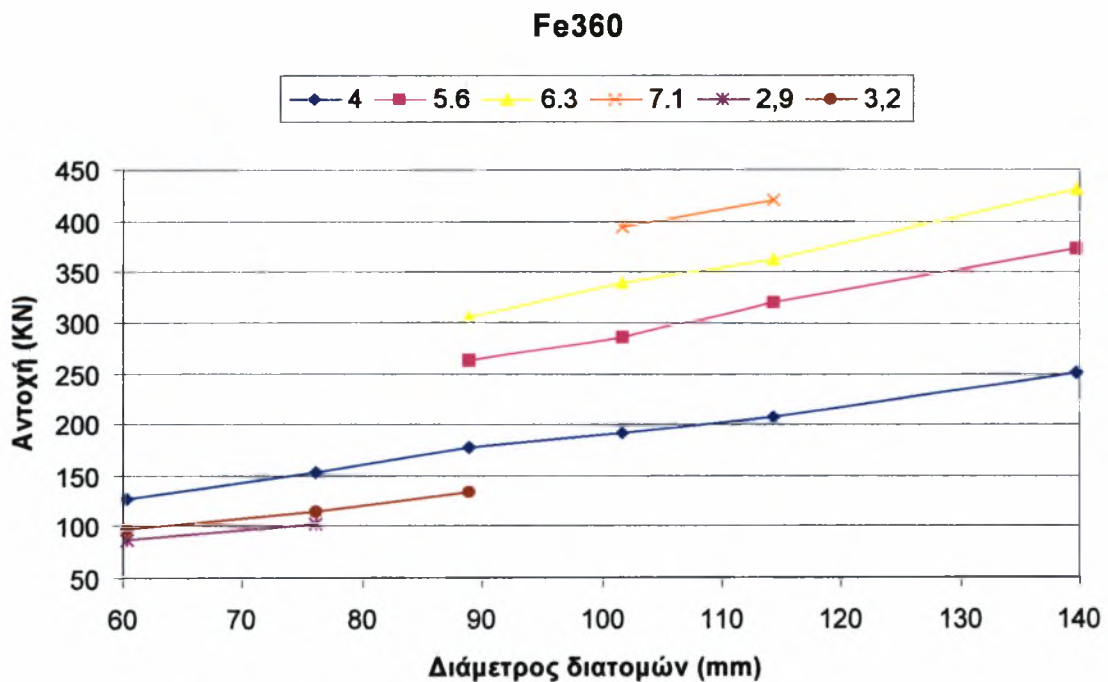
Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η αριθμητική διερεύνηση για την αντοχή των μελών περιορίστηκε στην κρίσιμη περιοχή της διαμόρφωσης. Επομένως τα αποτελέσματα αυτής αντιπροσωπεύουν την αντοχή των άκρων λόγω πλαστικοποίησης του υλικού στην περιοχή αυτή. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται:

- ◆ Πίνακες αντοχής σε αξονικό θλιπτικό φορτίο για διάφορους συνδυασμούς διαμέτρου(mm) και πάχους(mm) διατομής για χάλυβα Fe 360 και Fe 510.
- ◆ Διαγράμματα τής αντοχής σε συνάρτηση με την διάμετρο για κάθε πάχος.

Πίνακας Αντοχών για Fe 360

<i>mm</i>	<i>60.3</i>	<i>76.1</i>	<i>88.9</i>	<i>101.6</i>	<i>114.3</i>	<i>139.7</i>
2.9	86.82	101.9				
3.2	98	115.5	133.91			
3.6	113.8					
4.0	127.2	153.8	177.08	191.86	206.39	250.89
5.0		202.8				
5.6			263.73	285.35	321.12	372.75
6.3			307.29	339.97	362.22	430.52
7.1				394.15	420.12	
8.0						575.07

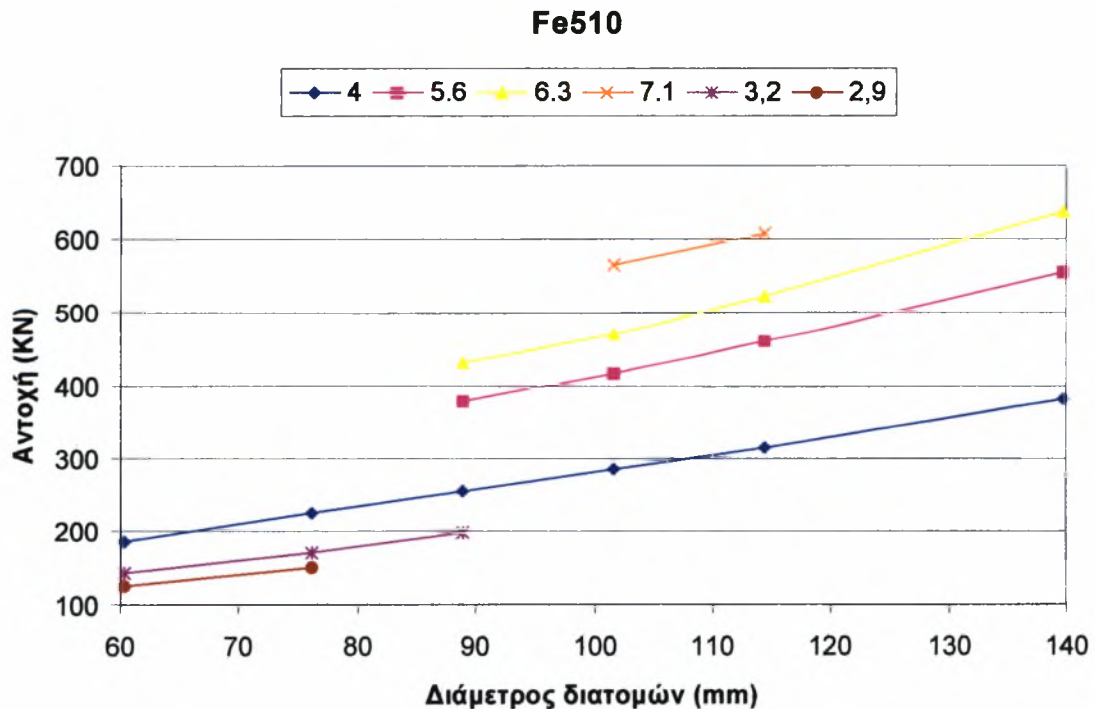
Οι τιμές της αντοχής των μοντέλων είναι σε (KN) και έχουν διαιρεθεί με τον συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{M0}=1.1$ για να είναι συγκρίσιμες με τα αντίστοιχα φορτία σχεδιασμού έναντι λυγισμού κατά EC3.



Πίνακας Αντοχών για Fe 510

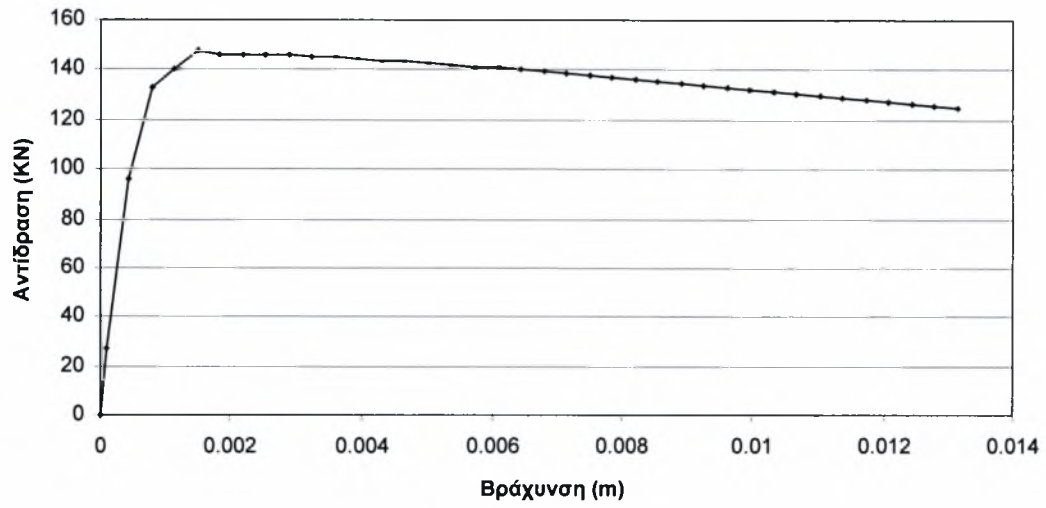
mm	60.3	76.1	88.9	101.6	114.3	139.7
2.9	126.1	150.5				
3.2	141.5	169.7	197.84			
3.6	162.4					
4	184.5	224.2	254.40	285.25	315.05	382.37
5		293.5				
5.6			377.99	414.95	460.55	556.64
6.3			431.85	471.48	524.22	637.23
7.1				565.46	608.51	
8						836.14

Οι τιμές της αντοχής των μοντέλων είναι σε (KN) και έχουν διαιρεθεί με τον συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{M0}=1.1$ για να είναι συγκρίσιμες με τα αντίστοιχα φορτία σχεδιασμού έναντι λυγισμού κατά EC3.

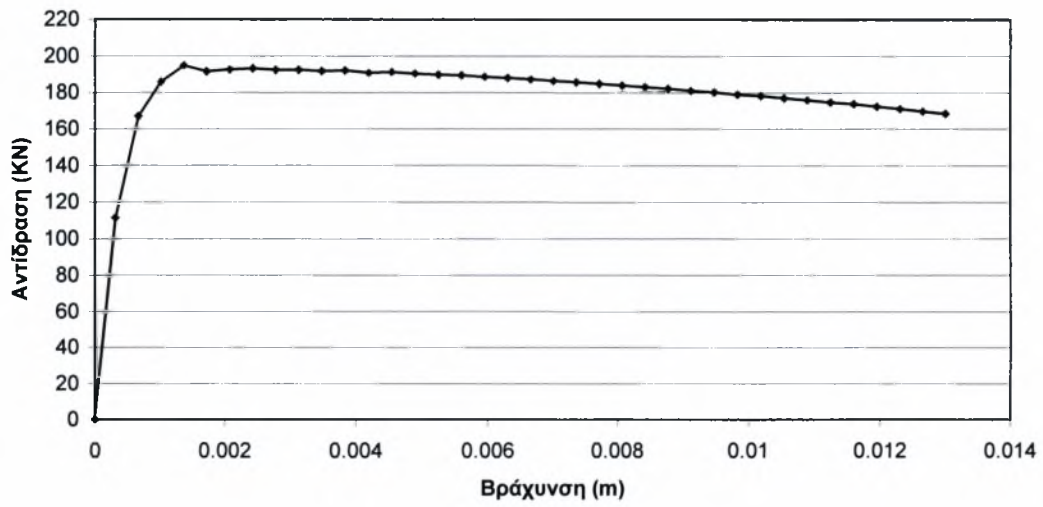


Σειρά ROR88.9 για Fe360

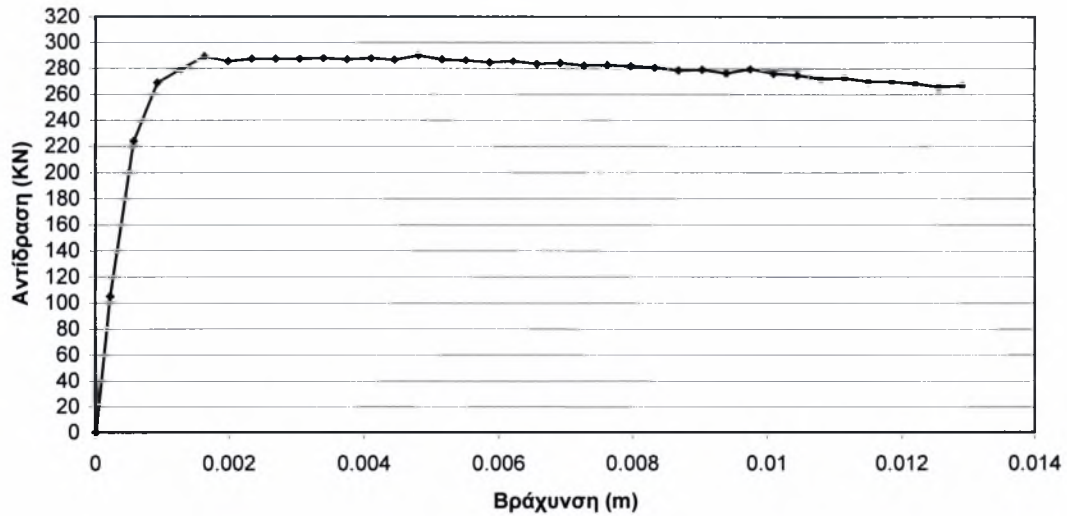
ROR88.9x3.2 maxN=147.3



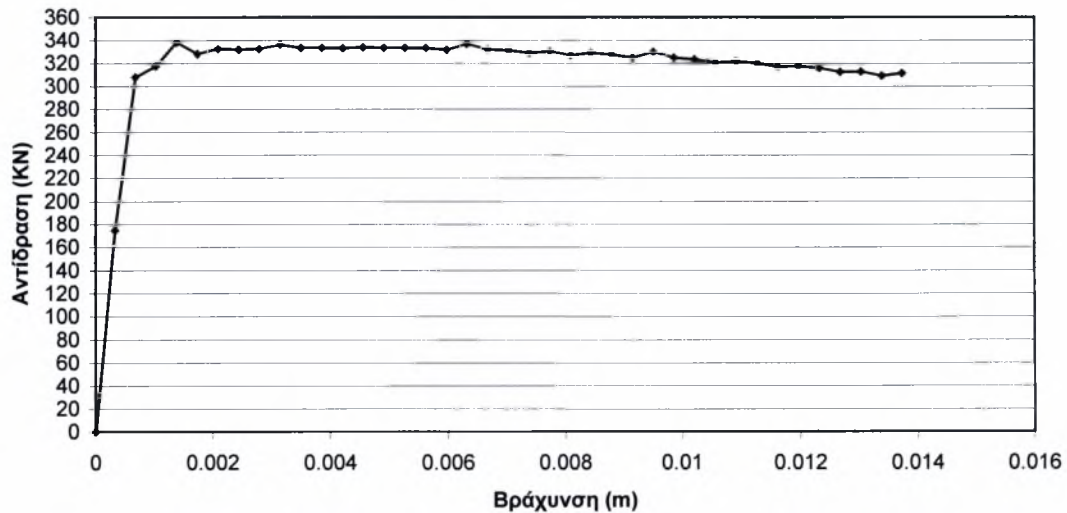
ROR88.9x4.0 maxN=194.78



ROR88.9x5.6 maxN=290.1



ROR88.9x6.3 maxN=338



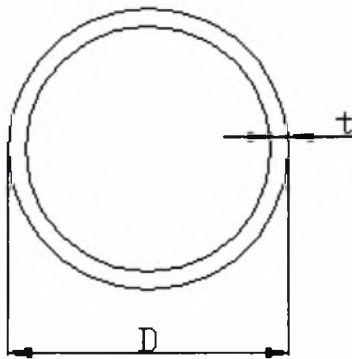
- ◆ MaxN είναι η μέγιστη αντοχή των μοντέλων που εμφανίζεται κατά την πλαστικοποίηση του διαμορφωμένου άκρου. Αντιστοιχεί στο μέγιστο των διαγραμμάτων.
- ◆ Παρατηρείται στα διαγράμματα ότι η αντοχή του μέλους σε αξονικό θλιπτικό φορτίο μετά την έναρξη της πλαστικοποίησης της περιοχής του άκρου μειώνεται με ρυθμό, που για τα μικρότερα πάχη είναι μεγαλύτερος, ενώ όσο το πάχος της διατομής αυξάνει, η κλίση του καθοδικού κλάδου του διαγράμματος τείνει να μηδενιστεί. Το ίδιο ισχύει και για τα διαγράμματα των άλλων διατομών τόσο για χάλυβα Fe360 όσο και για Fe510.

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η πρακτική αξία των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας βασίζεται στην δυνατότητα που δίνεται, μέσω γραφικής απεικόνισης αυτών, για γρήγορο, εύκολο και σχετικά ακριβή υπολογισμό της αντοχής σχεδιασμού του συγκεκριμένου τύπου κοιλοδοκών. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφεται η σύνθεση των γραφημάτων και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.

4.1 Καθορισμός κρίσιμης μορφής αστοχίας

Η λυγηρότητα είναι χαρακτηριστικό μέγεθος μιας δοκού από χάλυβα. Για δοκό κοίλης κυκλικής διατομής εξαρτάται μόνο από τα τρία μεγέθη (D, t, ℓ) που απαιτούνται για να οριστεί πλήρως η γεωμετρία του μέλους. Ο υπολογισμός της αντοχής σχεδιασμού σε λυγισμό σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 απαιτεί επιπλέον τον νόμο του υλικού και τον συντελεστή ατελειών α του μέλους. Τα τελευταία αυτά δεδομένα τίθενται σταθερά για τις ανάγκες τις παρούσας εργασίας.



Λυγηρότητα λ :

$$\lambda = \ell / i$$

όπου :

$$i = \sqrt{(D/2)^2 + (D/2 - t)^2}$$

και

$$\ell = \text{μήκος}$$

Για κάθε καμπύλη λυγισμού όπως ορίζεται από τον Ευρωκώδικα 3 αντιστοιχεί και ένας συντελεστής ατελειών, ο οποίος ισοδυναμεί με μια αρχική καμπυλότητα στους τύπους υπολογισμού του αξονικού φορτίου λυγισμού. Στην παρούσα εργασία, οι υπολογισμοί έχουν γίνει για συντελεστή ατελειών $\alpha=0.21$, που αντιστοιχεί σε καμπύλη λυγισμού a , δηλαδή σε κοίλες διατομές που παρασκευάζονται με την διαδικασία της εν θερμό εξέλασης. Επίσης οι υπολογισμοί έχουν γίνει για χάλυβα Fe360, αλλά και Fe510.

Συμπερασματικά λοιπόν, η λυγηρότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο σύμφωνα με το οποίο οι κοίλες δοκοί κυκλικής διατομής δεδομένης διαμέτρου, πάχους και ύψους διακρίνονται ως προς την κρίσιμη μορφή αστοχίας τους. Με την βοήθεια γραφημάτων είναι δυνατός ο προσδιορισμός του τρόπου αστοχίας αλλά και του αξονικού θλιπτικού φορτίου σχεδιασμού αυτών. Ανάλογα με την λυγηρότητα του μέλους καθορίζεται αν αυτό αστοχεί από λυγισμό ή από πλαστικοποίηση της διαμορφωμένης περιοχής του άκρου.

4.2 Γραφικές παραστάσεις αντοχής συναρτήσει του πάχος

Από τις υπολογισμένες σύμφωνα με τον EC3 αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες και πάχη με δεδομένη διάμετρο διατομής, μαζί με τα αποτελέσματα της αναλυτικής διερεύνησης, συντίθενται οι πίνακες αντοχών, καθώς και οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

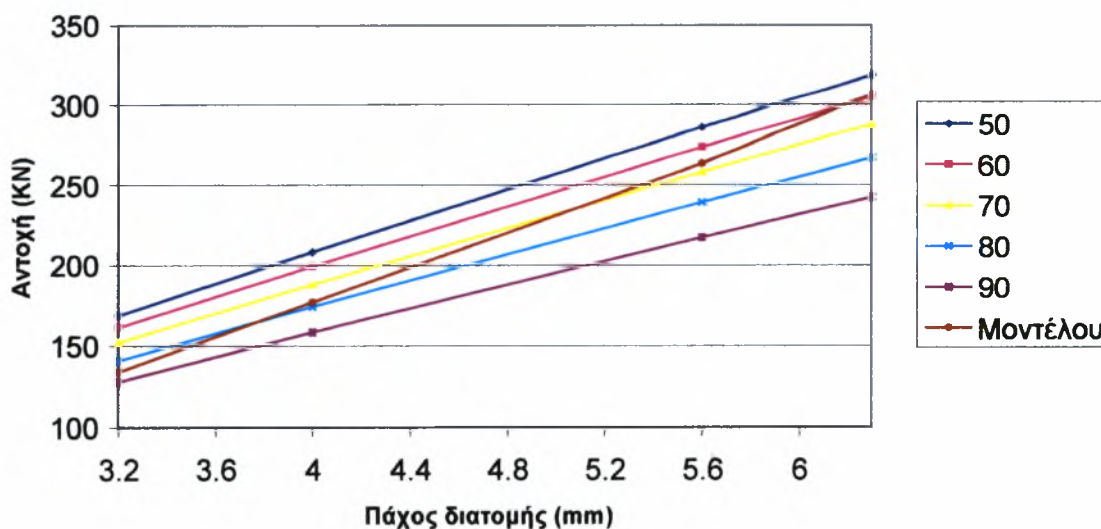
Σειρά ROR88.9 Fe360

Πίνακας αντοχών

Πάχος (mm)	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN) κατά EC3					Αντοχή Πλα/σης
	50	60	70	80	90	
3,2	168,27	161,04	151,97	140,80	127,87	133,91
4,0	208,31	199,36	188,13	174,31	158,30	177,07
5,6	286,21	273,91	258,49	239,49	217,49	263,72
6,3	319,21	305,49	288,29	267,10	242,57	307,28

Για τον υπολογισμό των φορτίων λυγισμού ο συντελεστής ατελειών λήφθηκε $\alpha=0.21$. Οι τιμές της αντοχής των μοντέλων έχουν διαιρεθεί με τον συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{m0}=1.1$ για να είναι συγκρίσιμες με τα αντίστοιχα φορτία σχεδιασμού έναντι λυγισμού κατά EC3.

ROR88.9 Fe360



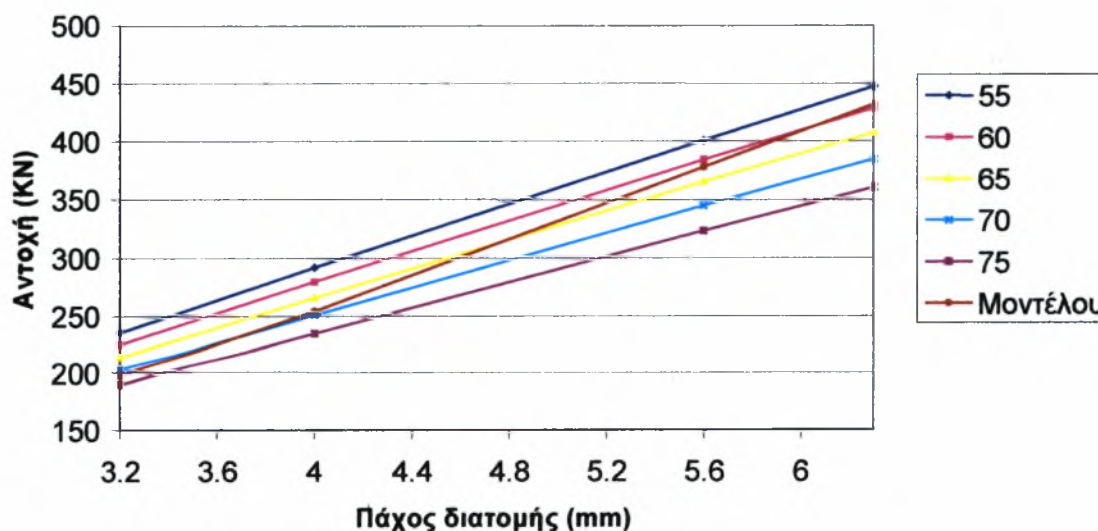
Σειρά ROR88.9 Fe510

Πίνακας αντοχών

Πάχος	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN) κατά EC3					Αντοχή Μοντέλου
	55	60	65	70	75	
3,2	235,73	225,90	214,85	202,76	189,99	197,83
4,0	291,83	279,66	265,98	251,02	235,21	254,40
5,6	400,95	384,24	365,45	344,88	323,16	377,99
6,3	447,18	428,54	407,58	384,64	360,42	431,85

Για τον υπολογισμό των φορτίων λυγισμού ο συντελεστής ατελειών λήφθηκε $\alpha=0.21$. Οι τιμές της αντοχής των μοντέλων έχουν διαιρεθεί με τον συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{m0}=1.1$ για να είναι συγκρίσιμες με τα αντίστοιχα φορτία σχεδιασμού έναντι λυγισμού κατά EC3.

ROR88.9 Fe510



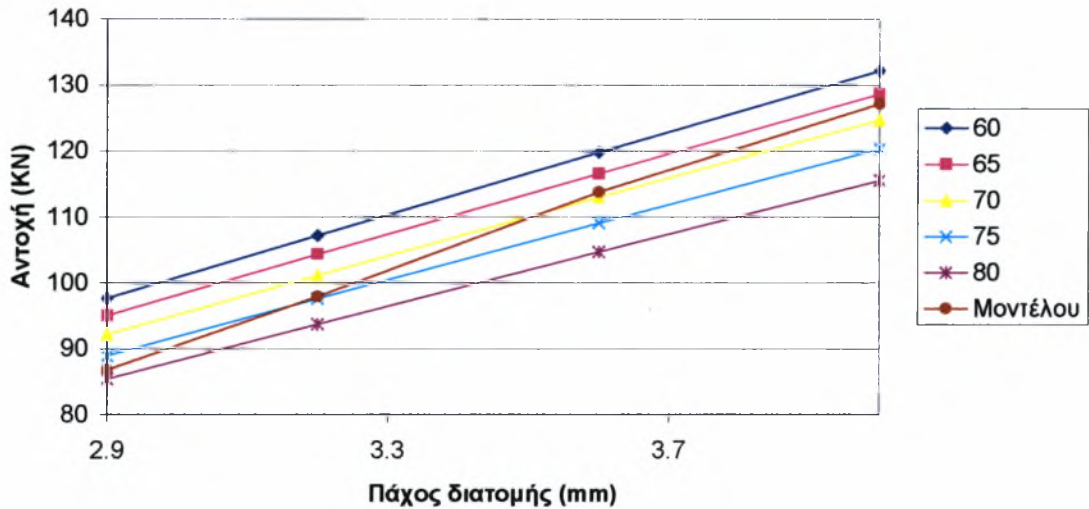
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι για κάθε λυγηρότητα υπάρχει κάποιο κρίσιμο πάχος, για μικρότερο του οποίου το μέλος αστοχεί λόγω υπερβολικής πλαστικοποίησης των άκρων, πριν αυτό συμβεί λόγω λυγισμού. Η τιμή αυτή του πάχους αντιστοιχεί στο σημείο τομής της γραμμής, που αναπαριστά την αντοχή του μέλους εκ των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης, με αυτή, που αναπαριστά την αντοχή σε λυγισμό κατά EC3 για την εκάστοτε λυγηρότητα. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των διαφόρων διατομών δίνουν την αντοχή του πεπλατυσμένου άκρου για αστοχία λόγω πλαστικοποίησης του υλικού στην περιοχή αυτή.

Αυτό που παρατηρείται στα διαγράμματα είναι ότι η γραμμή που τέμνει τις υπόλοιπες και αναπαριστά την αντοχή του μέλους λόγω πλαστικοποίησης του υλικού στη περιοχή του άκρου, τείνει σε ευθεία. Μπορεί επομένως προεκτείνοντας την υποθετική αυτή ευθεία και προς τις δύο κατευθύνσεις, να υπολογιστεί η αντοχή και άλλων διατομών, μικρότερων ή μεγαλύτερων.

Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από τα αντίστοιχα διαγράμματα των υπόλοιπων διατομών που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες.

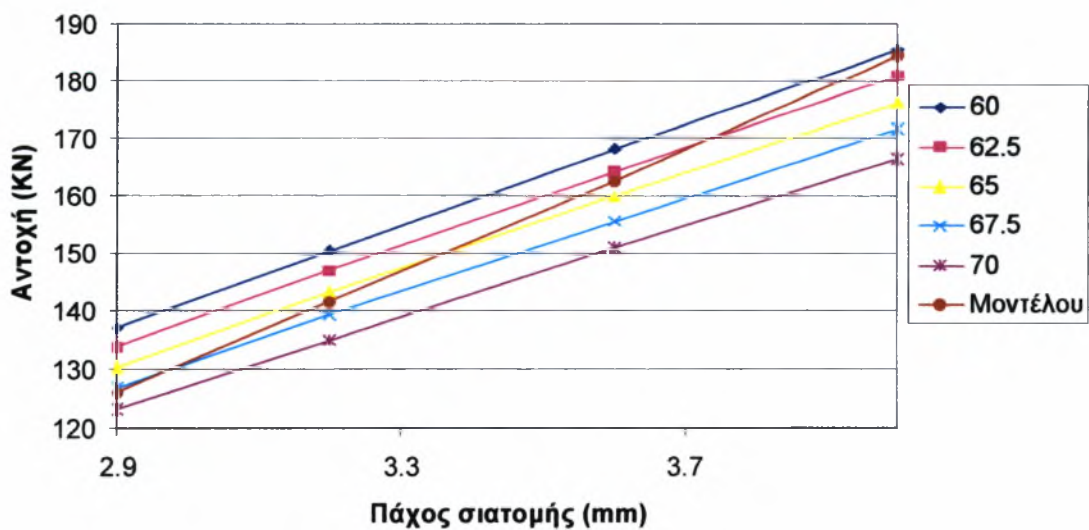
Πάχος (mm)	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή
	60	65	70	75	80	Μοντέλου
2.9	97.710642	95.11478659	92.20894	88.97838	85.43263	86.818
3.2	107.254689	104.4052796	101.2156	97.66948	93.7774	98
3.6	119.816285	116.6331543	113.0699	109.1085	104.7605	113.82
4	132.191036	128.6791478	124.7479	120.3773	115.5803	127.18

ROR60.3 Fe360



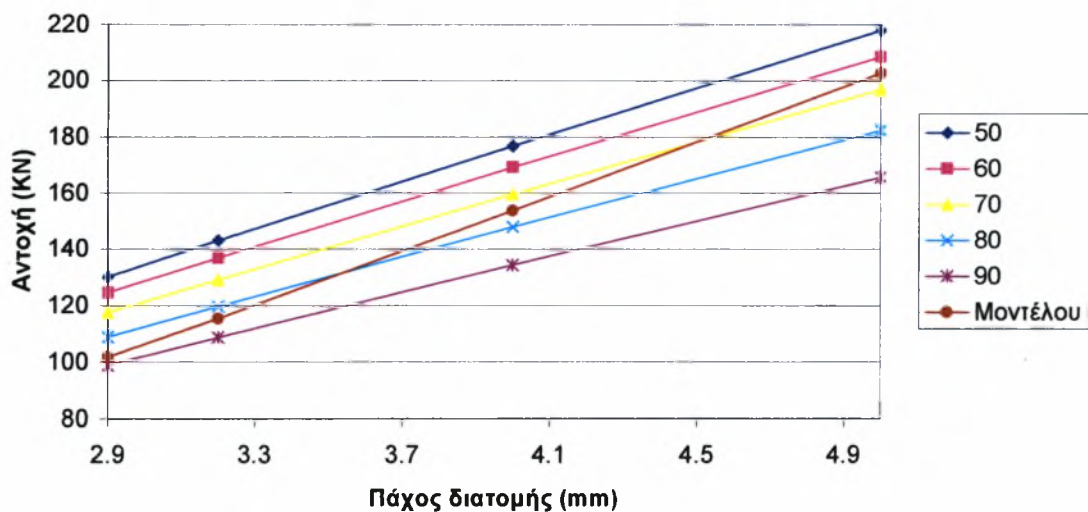
Πάχος	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή
	60	62.5	65	67.5	70	Μοντέλου
2.9	137.0686	133.8047	130.3637	126.7634	123.0286	126.09
3.2	150.4571	146.8743	143.0972	139.1453	135.0457	141.45
3.6	168.0785	164.0762	159.8567	155.4419	150.8621	162.36
4	185.4378	181.0221	176.3668	171.4961	166.4433	184.45

ROR60.3 Fe510



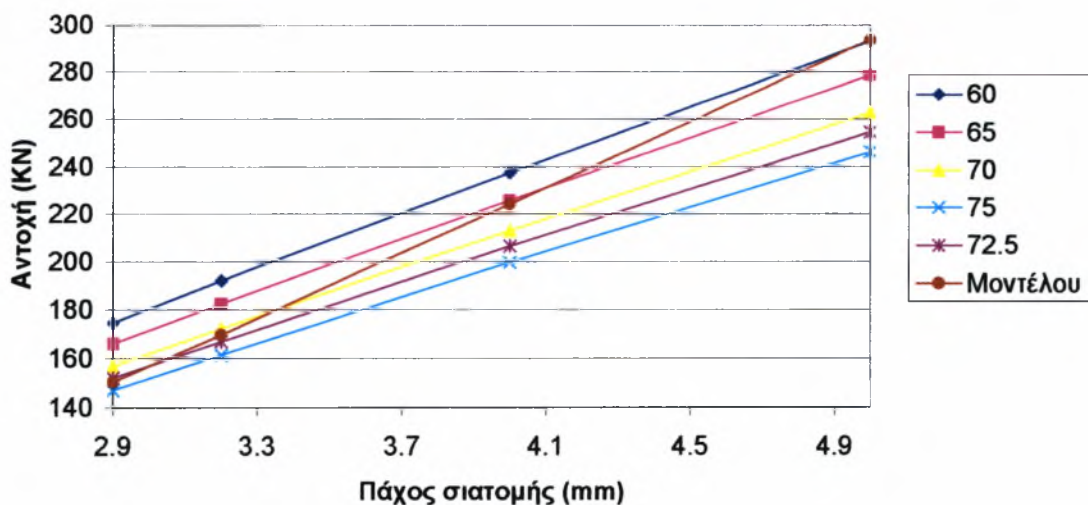
Πάχος (mm)	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή
	50	60	70	80	90	Μοντέλου
2.9	130.203649	124.6069933	117.5909	108.9493	98.94293	101.91
3.2	143.083444	136.9331642	129.223	119.7266	108.7304	115.47
4	176.892659	169.2891292	159.7571	148.0168	134.4223	153.82
5	218.048649	208.676075	196.9263	182.4545	165.6971	202.82

ROR76.1 Fe360



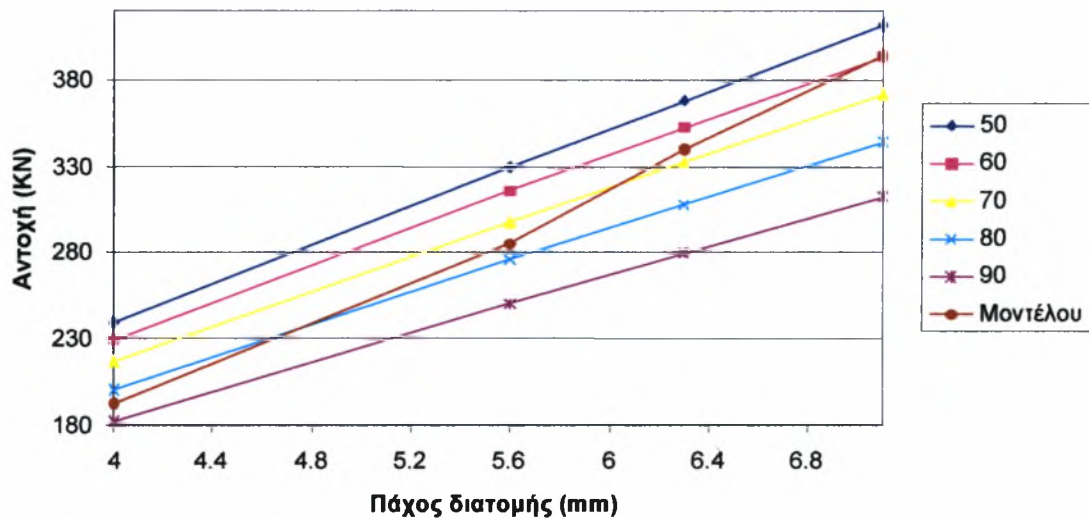
Πάχος	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή
	60	65	70	75	72.5	Μοντέλου
2.9	174.7989	166.2483	156.8941	147.0132	151.9984	150.45
3.2	192.0901	182.6937	172.4142	161.5558	167.0341	169.73
4	237.4791	225.8624	213.154	199.7298	206.5027	224.18
5	292.7311	278.4117	262.7465	246.1991	254.5477	293.55

ROR76.1 Fe510



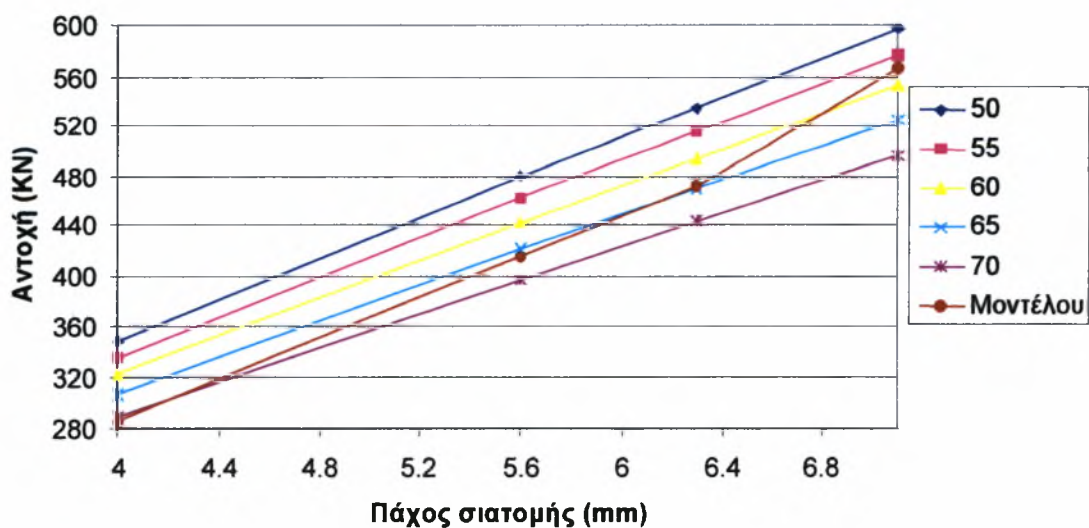
Πάχος (mm)	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή
	50	60	70	80	90	Μοντέλου
4	239.454449	229.1617711	216.2586	200.366	181.9636	191.86
5.6	329.739912	315.5664165	297.7981	275.9133	250.5723	285.35
6.3	368.252391	352.4234798	332.5799	308.139	279.8383	339.97
7.1	411.530608	393.8414318	371.6658	344.3525	312.7258	394.15

ROR101.6 Fe360



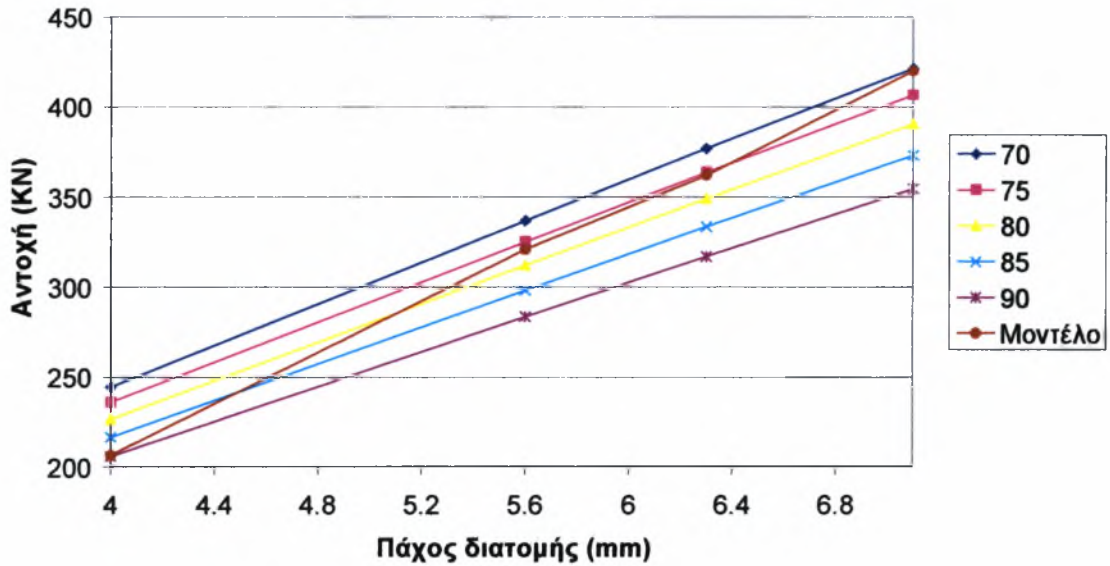
Πάχος (mm)	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή
	50	55	60	65	70	Μοντέλου
4	347.6645	335.4485	321.4685	305.7434	288.5403	285.25
5.6	478.7502	461.9282	442.6771	421.0228	397.3334	414.95
6.3	534.6666	515.8799	494.3802	470.1968	443.7406	471.48
7.1	597.5024	576.5077	552.4814	525.4559	495.8904	565.46

ROR101.6 Fe510



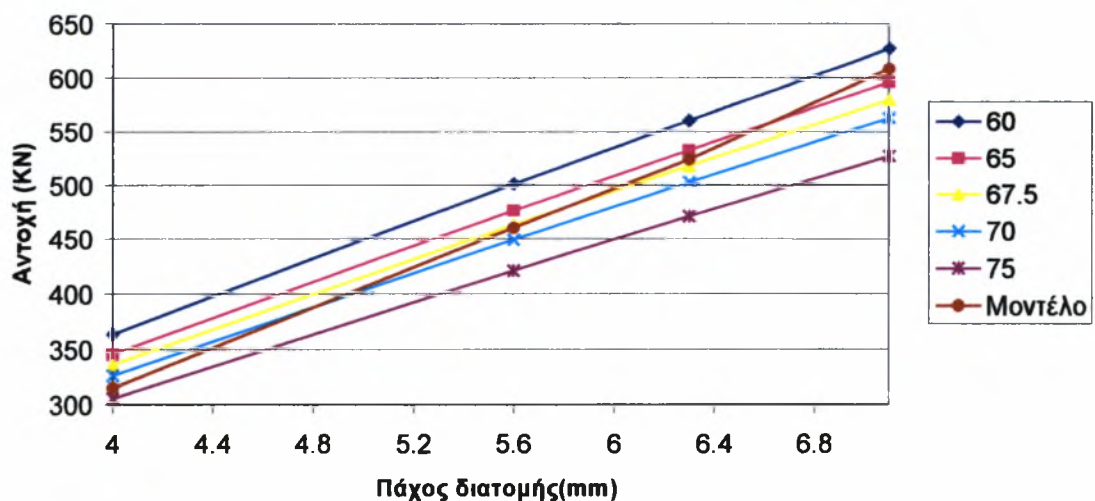
Πάχος	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή Μοντέλου
	70	75	80	85	90	
4	244.562	235.994	226.59	216.456	205.779	206.387
5.6	337.133	325.321	312.357	298.388	283.669	321.116
6.3	376.982	363.774	349.278	333.657	317.199	362.22
7.1	421.592	406.821	390.61	373.141	354.735	420.12

ROR114.3 Fe360



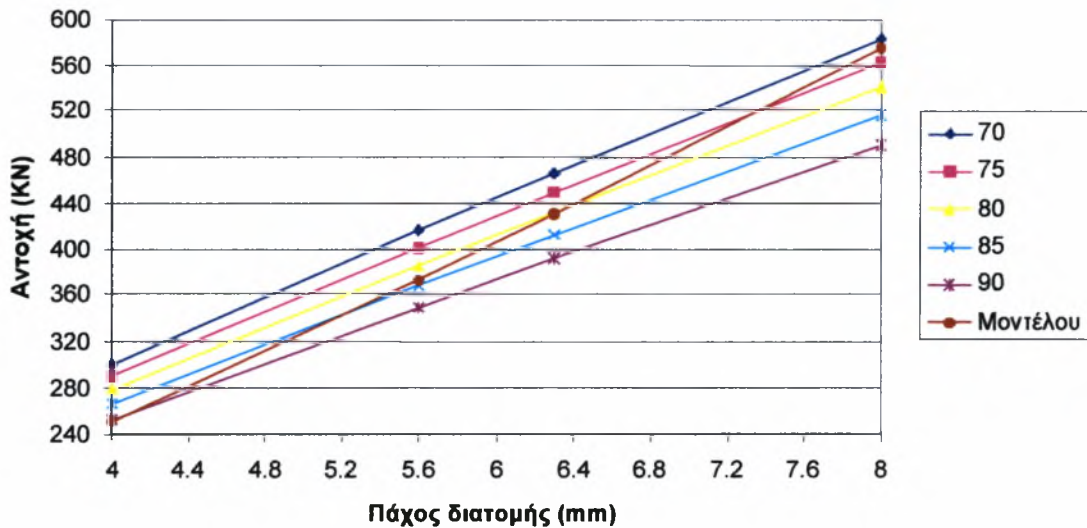
Πάχος	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή Μοντέλου
	60	65	67.5	70	75	
4	363.54	345.75	336.20	326.30	305.75	315.04
5.6	501.14	476.63	463.47	449.81	421.48	460.55
6.3	560.38	532.97	518.2527	502.98	471.30	524.22
7.1	626.69	596.04	579.58	562.50	527.07	608.51

ROR114.3 Fe510



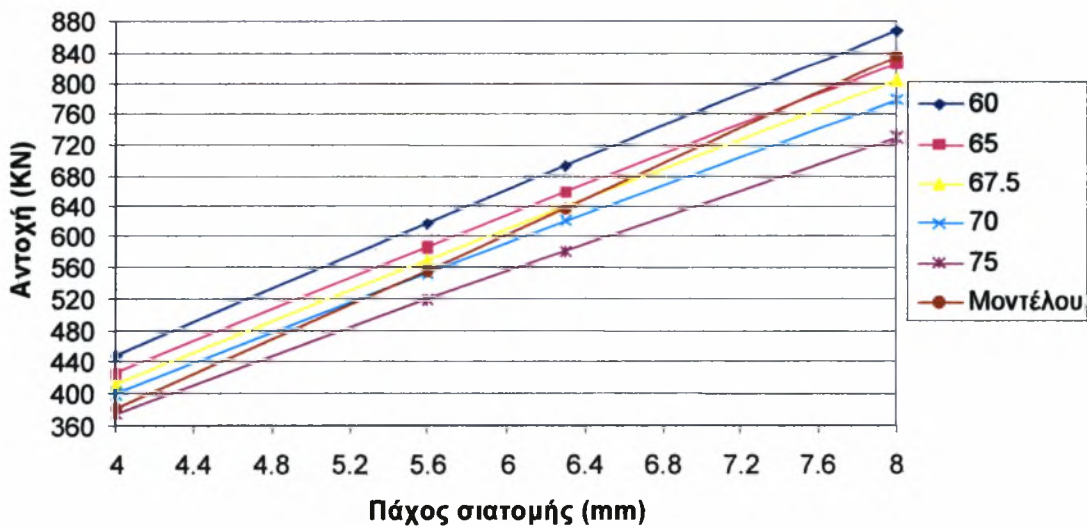
Πάχος (mm)	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή
	70	75	80	85	90	Μοντέλου
4	300.633417	290.1006414	278.5403	266.0832	252.958	250.8891
5.6	415.949695	401.3767818	385.3821	368.1468	349.9871	372.7491
6.3	465.496903	449.1880899	431.2881	411.9998	391.6769	430.5182
8	583.634375	563.1865824	540.7439	516.5603	491.0798	575.0655

ROR139.7 Fe360



Πάχος	Αντοχές σε λυγισμό για διάφορες λυγηρότητες (KN)					Αντοχή
	60	65	67.5	70	75	Μοντέλου
4	446.8918	425.0313	413.2932	401.1164	375.8547	382.3655
5.6	618.3095	588.0639	571.8232	554.9757	520.0241	556.64
6.3	691.9614	658.113	639.9378	621.0834	581.9685	637.2273
8	867.5728	825.1341	802.3463	778.7069	729.665	836.1418

ROR139.7 Fe510



4.3 Κρίσιμο πάχος διατομής

Με βάση τις γραφικές παραστάσεις του προηγούμενου κεφαλαίου, υπολογίζετε για κάθε μια από τις διατομές και κάθε λυγηρότητα το κρίσιμο πάχος της διατομής. Αν είναι γνωστά η διάμετρος και η λυγηρότητα (λ) μιας κοιλοδοκού της σειράς ROR με πεπλατυσμένα άκρα, ως κρίσιμο πάχος διατομής (t_{cr}), ορίζεται το πάχος εκείνο για μικρότερο του οποίου το μέλος αστοχεί λόγω πλαστικοποίησης της διαμορφωμένης περιοχής των άκρων του, πριν αυτό συμβεί από λυγισμό. Στους επόμενους δύο πίνακες βρίσκονται συγκεντρωμένα τα κρίσιμα πάχη, σε mm, των διατομών που μοντελοποιήθηκαν για τις λυγηρότητες που φαίνονται και για χάλυβες Fe360 και Fe510.

Fe360

D	λ	60	65	70	75	80	85	90
	t_{cr}							
60.3				3.50	3.15			
76.1			5.00	4.50	3.90	3.50	3.10	
88.9		6.25	5.60	5.10	4.30	3.80	3.20	
101.6		7.10	6.40	6.10	5.60	4.80	4.00	
114				7.10	6.40	5.15	4.45	4.00
139.7					7.35	6.30	5.30	4.10

Fe510

D	λ	60	62.5	65	67.5	70	72.5	
	t_{cr}							
60.3			3.70	3.35	3.00			
76.1		4.95	4.40	4.1	3.65	3.35	3.00	
88.9		6.05	5.15	4.70	4.10	3.65	3.25	
101.6		6.80	6.50	6.20	4.95	4.30	3.65	
114			7.20	6.60	5.80	4.80	4.05	
139.7				7.40	6.40	5.45	4.70	

Από τους δύο προηγούμενους πίνακες διαιρώντας τις τιμές του t_{cr} για κάθε διατομή και κάθε λυγηρότητα με την διάμετρό D αυτής, προκύπτουν οι επόμενοι δύο πίνακες για κάθε χάλυβα αντίστοιχα. Ο αδιάστατος λόγος t_{cr}/D ορίζεται ως ο κρίσιμος λόγος για μικρότερο του οποίου το μέλος αστοχεί λόγω πλαστικοποίησης της διαμορφωμένης περιοχής του άκρου, πριν αυτό λυγίσει. Ο ορισμός αυτός βασίστηκε στα διαγράμματα αντοχής σε συνάρτηση με το λόγο t/D της διατομής τα οποία παρατίθενται στο τέλος του κεφαλαίου.

Fe360

D	λ	60	65	70	75	80	85	90
	t_{cr}/D							
60.3				0.058	0.052			
76.1			0.065	0.059	0.0515	0.046	0.041	
88.9		0.070	0.063	0.057	0.048	0.043	0.037	
101.6		0.070	0.063	0.060	0.055	0.047	0.0395	
114				0.062	0.056	0.045	0.039	0.034
139.7					0.0525	0.045	0.038	0.030
M.O.		0.070	0.0637	0.0592	0.0525	0.0452	0.0389	0.032

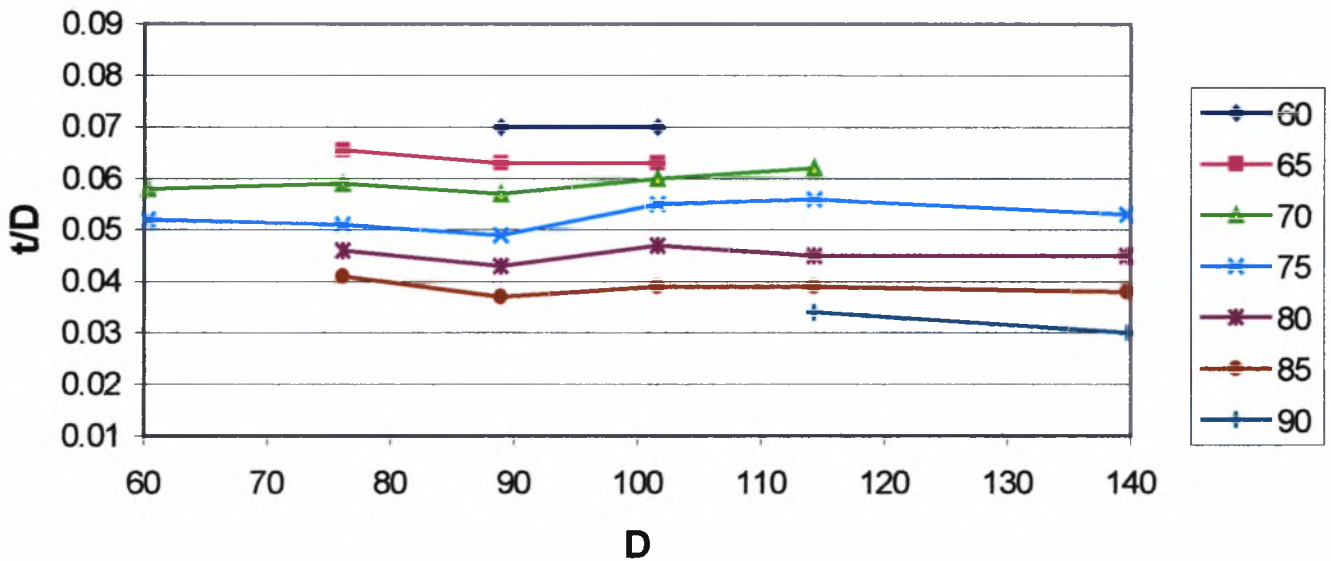
Fe510

D	λ	60	62.5	65	67.5	70	72.5	
	t_{cr}/D							
60.3			0.061	0.0555	0.0495			
76.1		0.065	0.058	0.0535	0.048	0.044	0.039	
88.9		0.068	0.058	0.053	0.046	0.041	0.0365	
101.6		0.067	0.064	0.061	0.0485	0.042	0.0360	
114			0.063	0.058	0.051	0.042	0.0355	
139.7				0.053	0.046	0.039	0.0335	
M.O.		0.0667	0.0608	0.0567	0.0482	0.0416	0.0361	

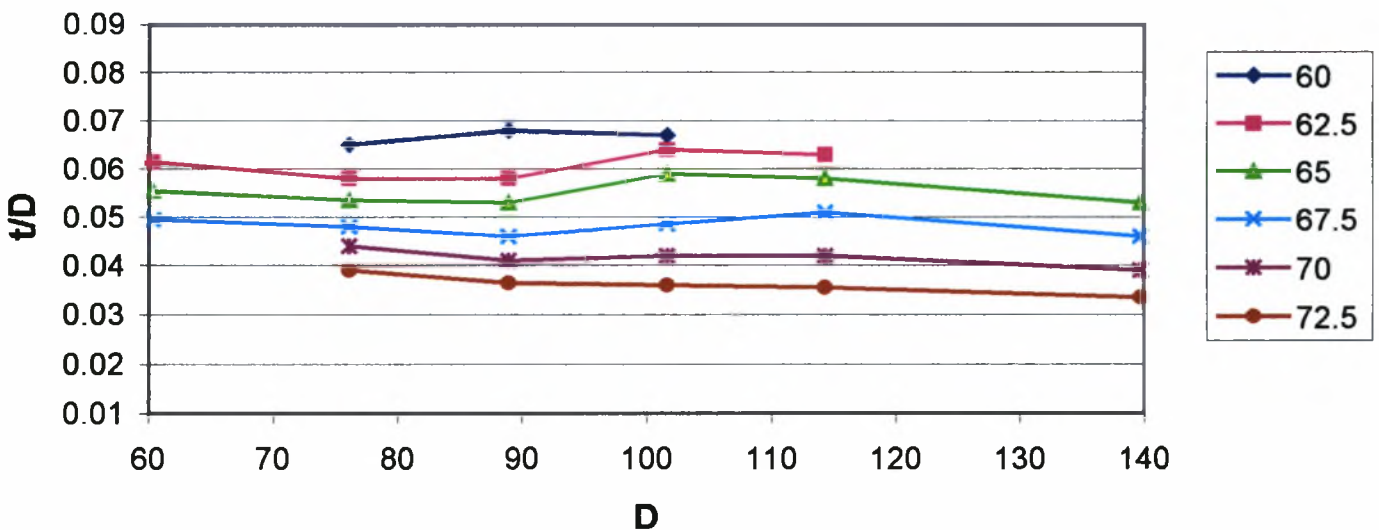
Αυτό που παρατηρείται είναι ότι για κάθε λυγηρότητα ο κρίσιμος λόγος t_{cr}/D μπορεί να θεωρηθεί με μικρές αποκλίσεις σταθερός και ανεξάρτητος από την διάμετρο D . Οι μέγιστες αποκλίσεις από το μέσο όρο είναι της τάξεως του $\pm 7\%$.

Ακολουθούν τα αντίστοιχα, για κάθε έναν από τους πάνω πίνακες, διαγράμματα.

Fe360

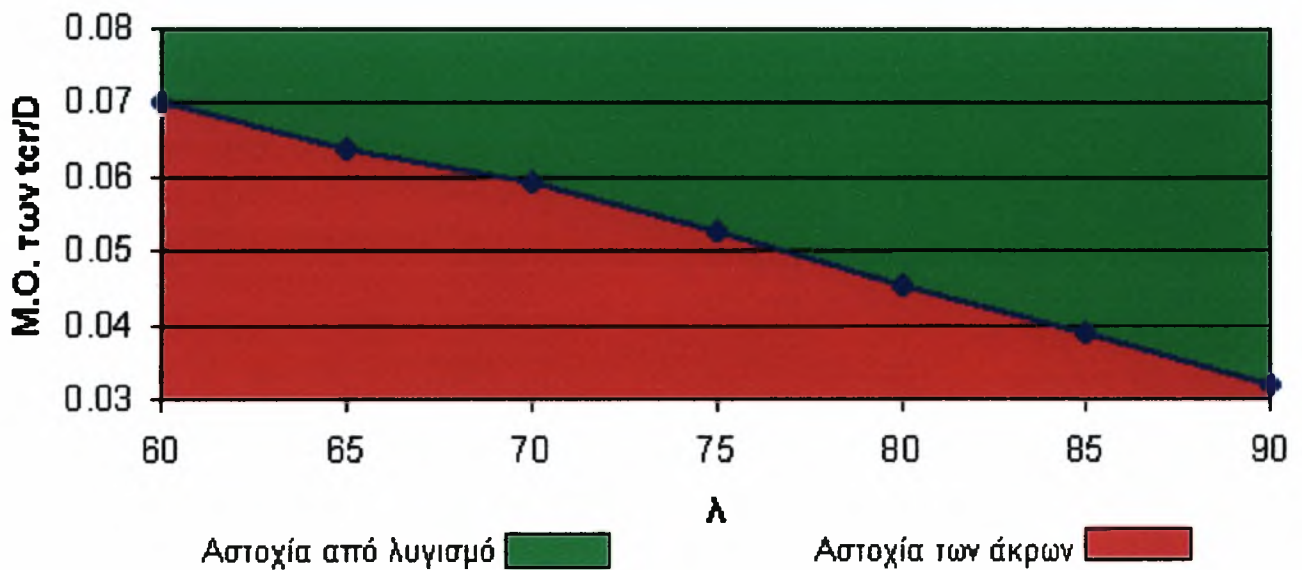


Fe510

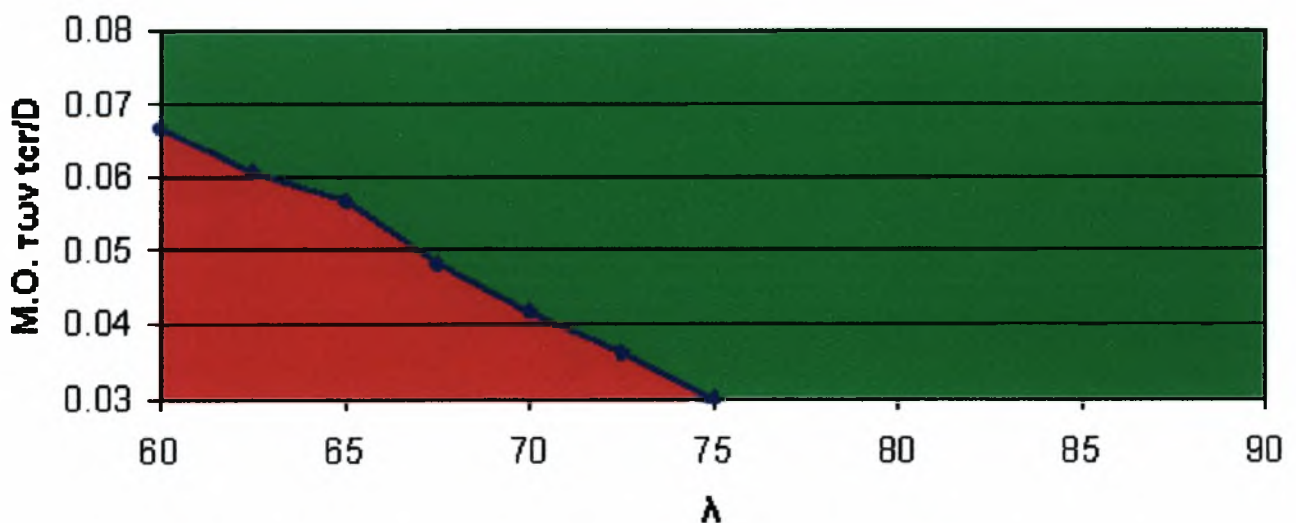


Παρουσιάζεται γραφικά ότι ο κρίσιμος λόγος t/D παραμένει, με μικρές αποκλίσεις, σταθερός σε συνάρτηση με την διάμετρο D . Εξαρτάται όμως από την λυγηρότητα του μέλους. Θεωρώντας ότι οι τιμές του t_{cr}/D για κάθε λυγηρότητα είναι σταθερές και ίσες με τον μ.ο. αυτών σχεδιάζουμε τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις της σχέσης του λόγου t_{cr}/D με την λυγηρότητα λ για κάθε υλικό.

Fe360



Fe510



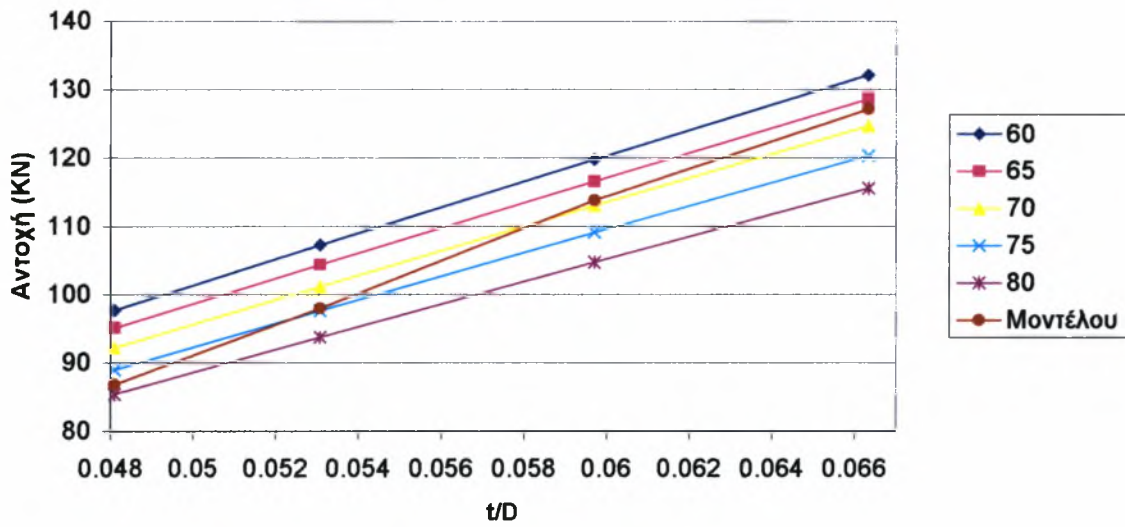
Τα προηγούμενα διαγράμματα δείχνουν ότι σε κάθε λυγηρότητα αντιστοιχεί και ένας κρίσιμος λόγος t_{cr}/D ανεξάρτητος της διαμέτρου D . Η σχέση των t_{cr}/D με την λυγηρότητα λ τείνει σε γραμμική. Η μέση κλίση του τμήματος της γραφικής παράστασης της σχέσης αυτής είναι $d(t_{cr}/D) / d(\lambda) = 0.00127$ για Fe360 και $d(t_{cr}/D) / d(\lambda) = 0.00245$ για Fe510.

Δεχόμαστε ότι το σφάλμα που γίνεται θεωρώντας τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις ευθείες είναι ανεκτό. Έτσι με προέκταση αυτών εκατέρωθεν μπορούμε να υπολογίσουμε τον λόγο t_{cr}/D και για άλλες λυγηρότητες.

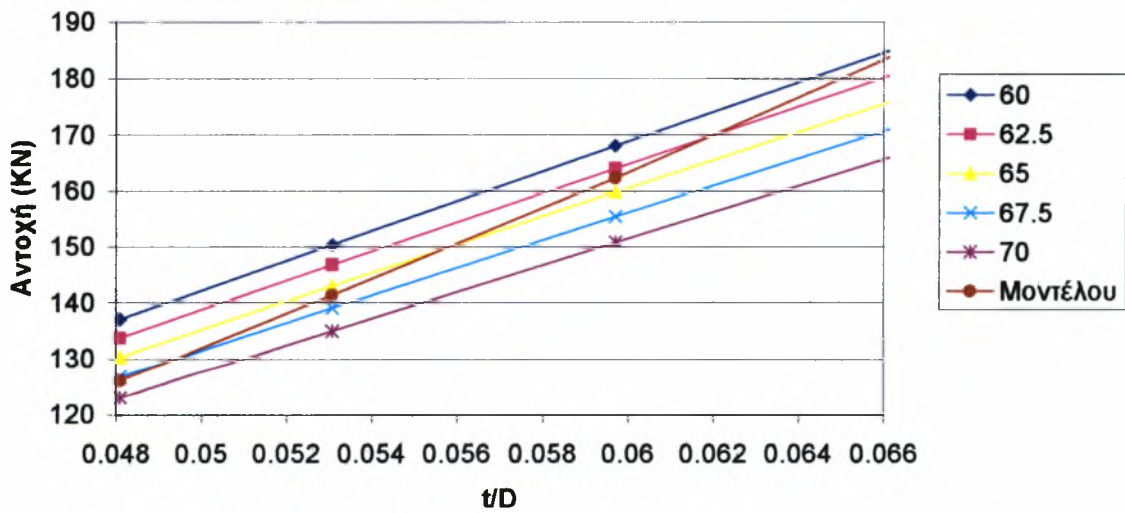
Τέλος, επισημαίνουμε ότι οι κοιλοδοκοί που αντιστοιχούν στην περιοχή των διαγραμμάτων οι οποίες συμβολίζονται με πράσινο χρώμα αστοχούν από λυγισμό. Ενώ στη κόκκινη περιοχή αντιστοιχούν αυτές που αστοχούν από πλαστικοποίηση των πεπλατυσμένων άκρων.

Γραφικές παραστάσεις αντοχής σε συνάρτηση με τον λόγο t_{cr}/D

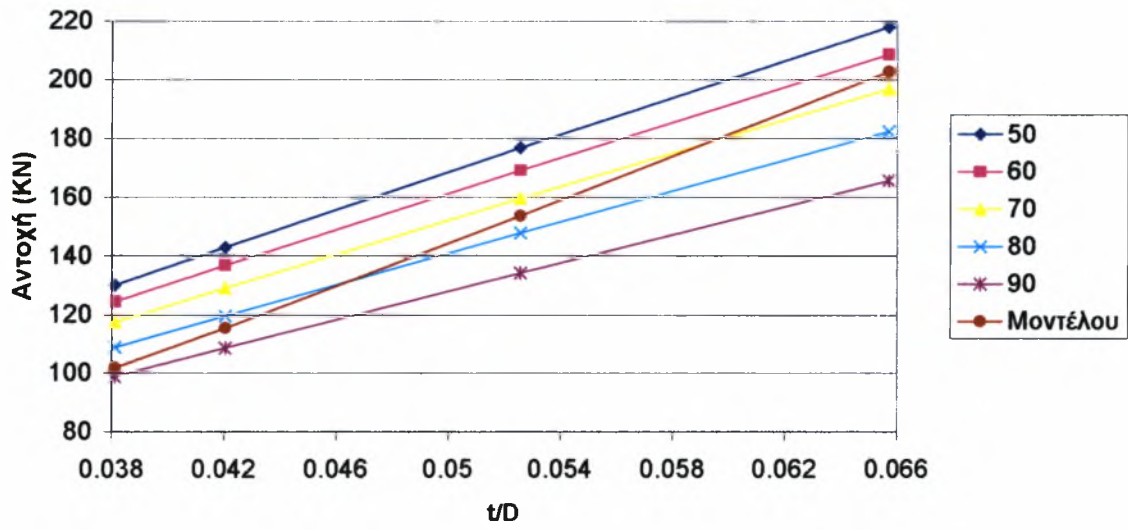
ROR60.3 Fe360



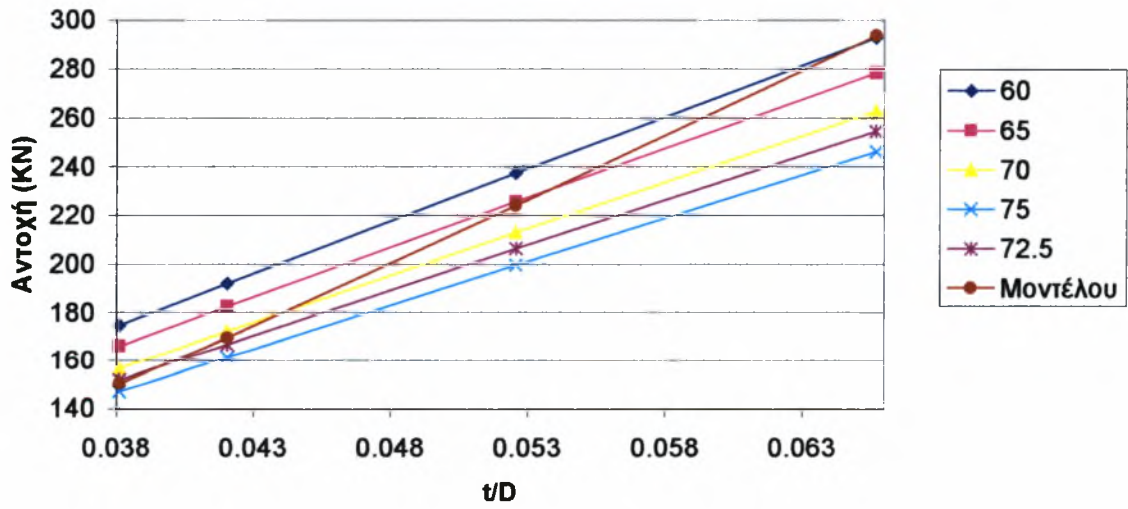
ROR60.3 Fe510



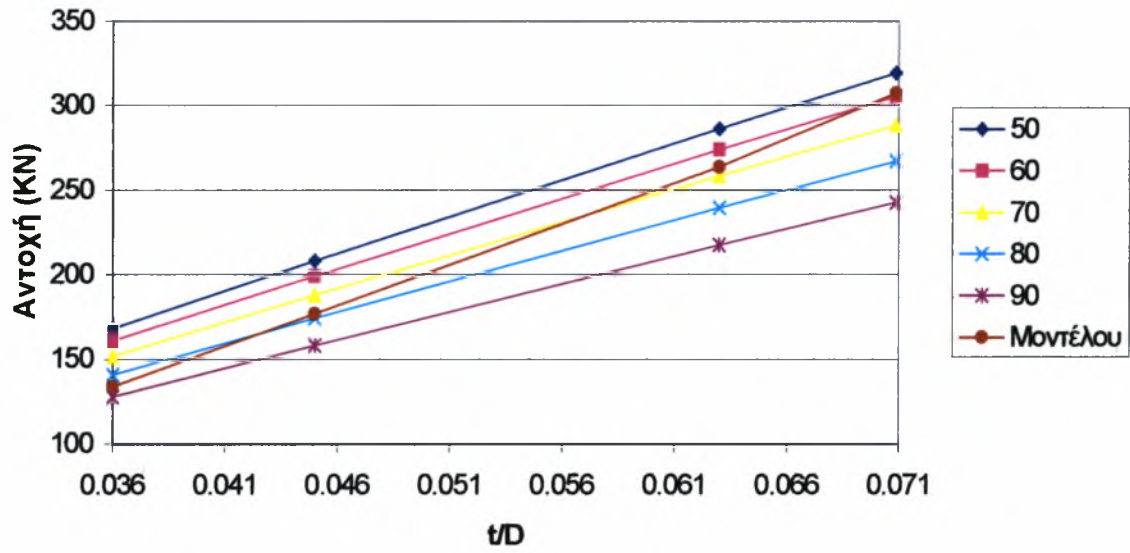
ROR76.1 Fe360



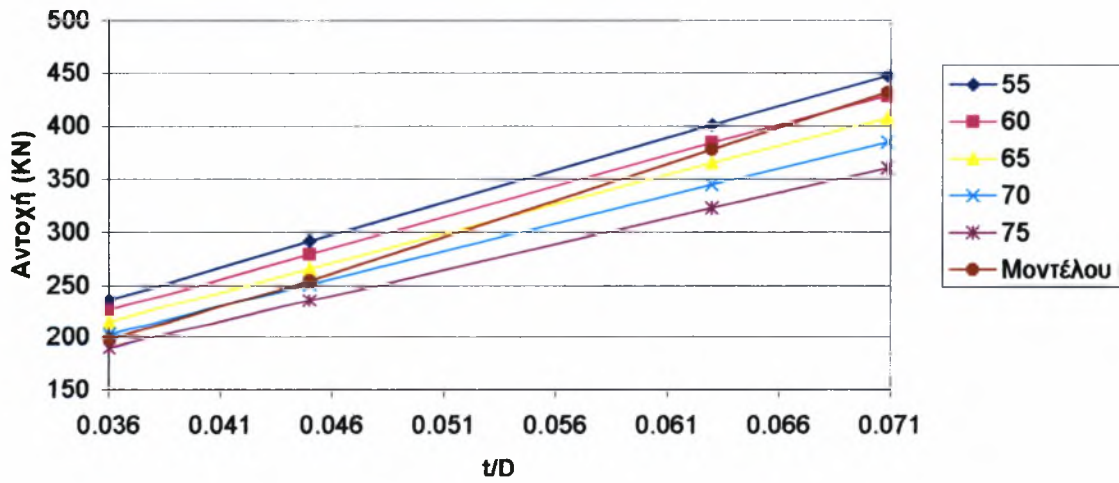
ROR76.1 Fe510



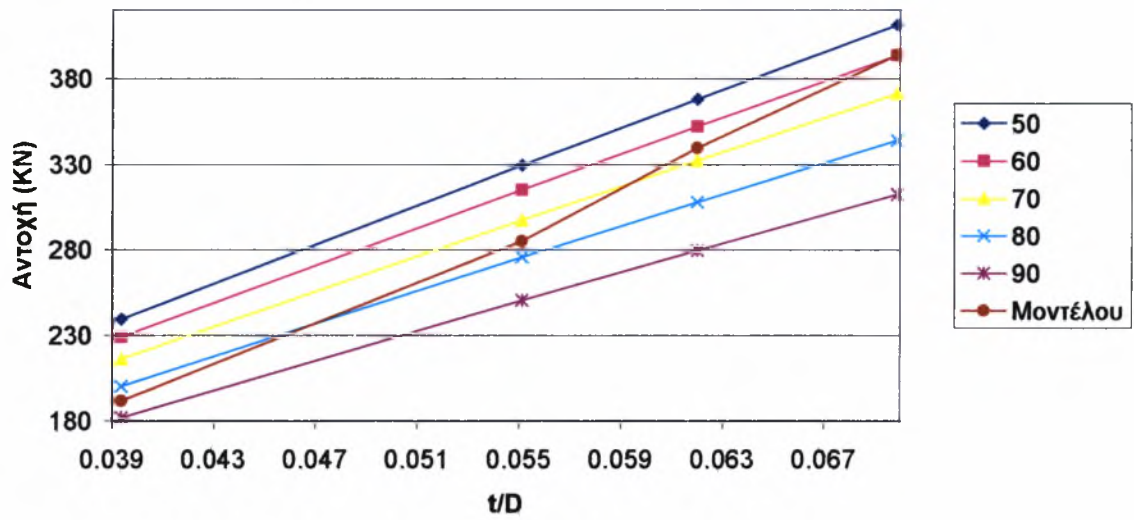
ROR88.9 Fe360



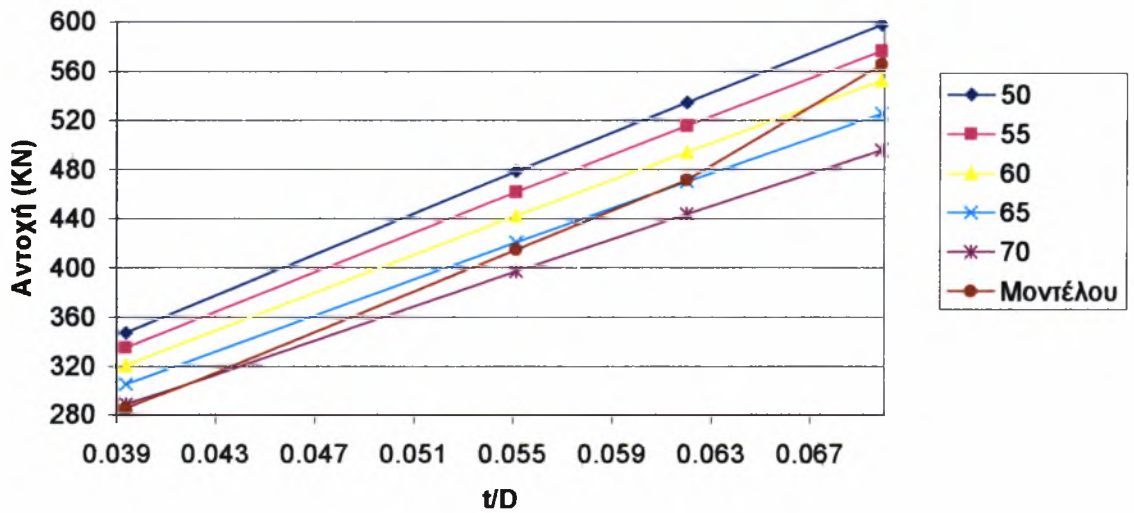
ROR88.9 Fe510



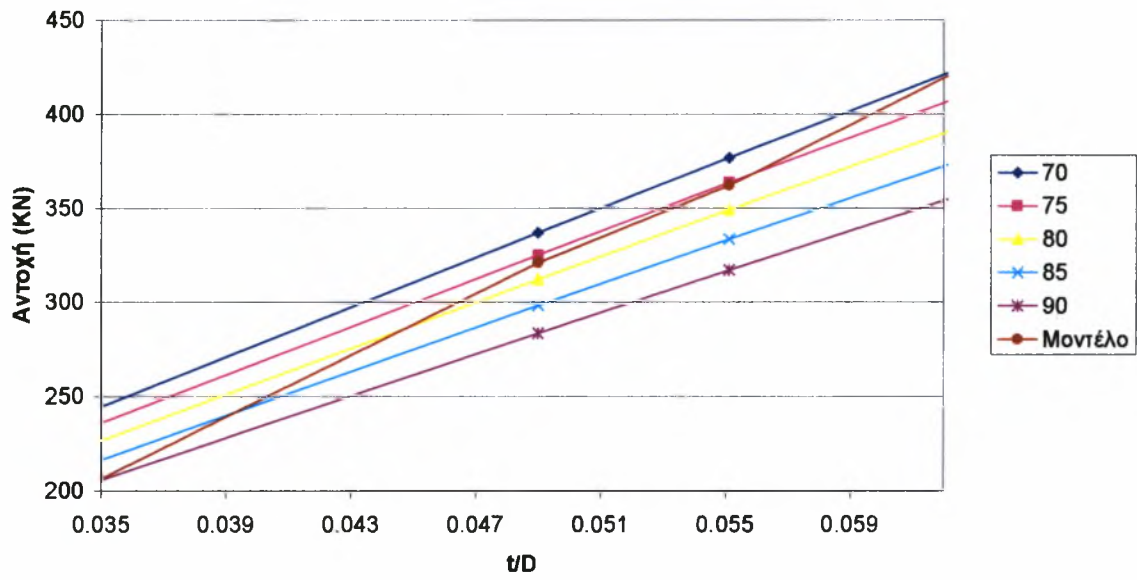
ROR101.6 Fe360



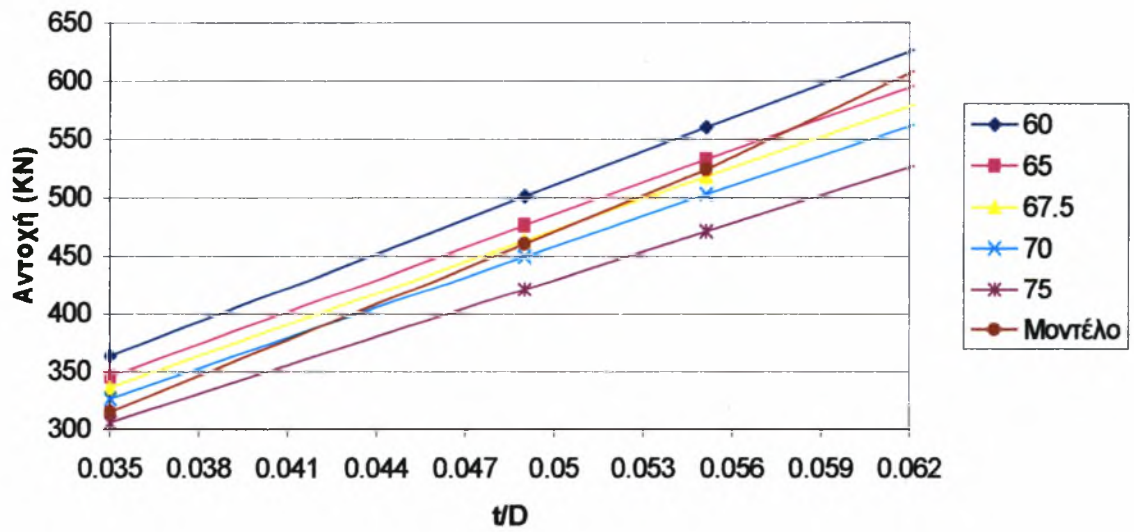
ROR101.6 Fe510



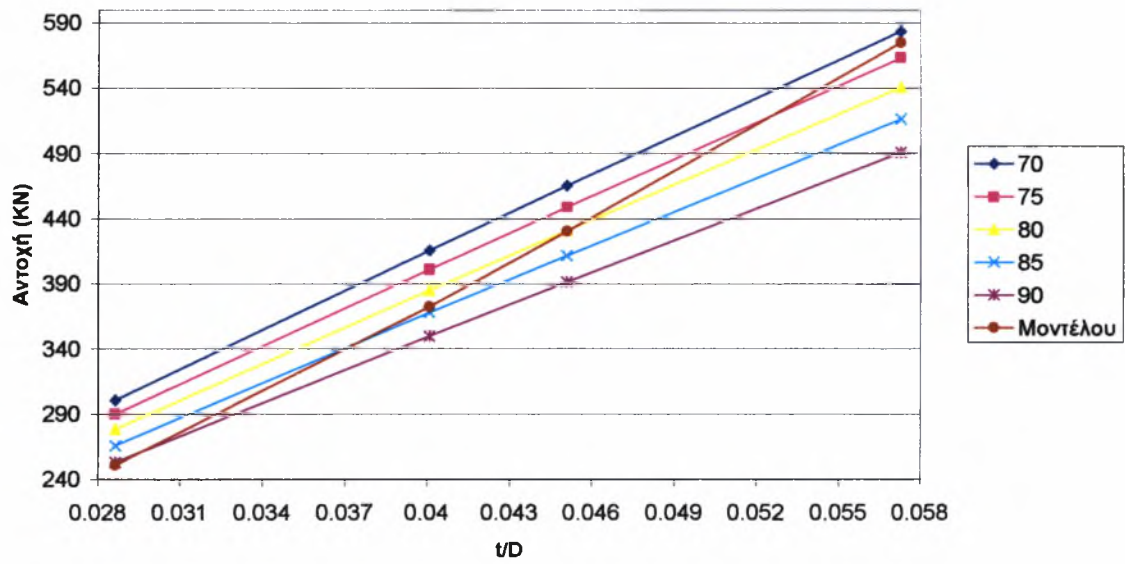
ROR114.3 Fe360



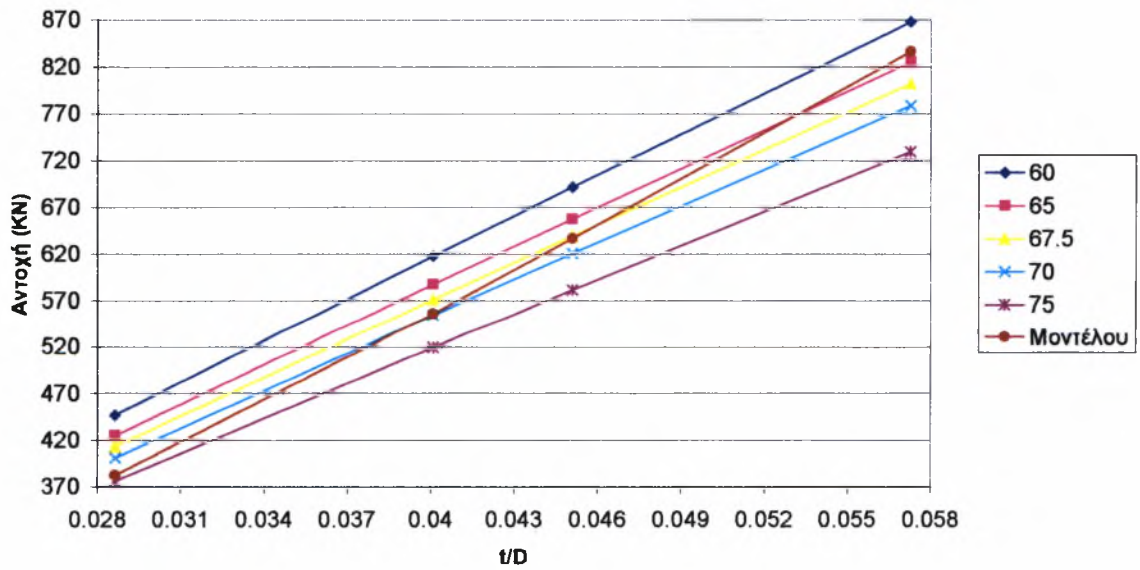
ROR114.3 Fe510



ROR139.7 Fe360



ROR139.7 Fe510



5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Φωτογραφίες των πειραματικών δοκιμίων πριν και μετά την επιβολή του φορτίου έδειξαν πως τα συγκεκριμένα μέλη αστοχούν λόγω πλαστικοποίησης στην περιοχή της διαμόρφωσης και όχι λόγω λυγισμού (βλέπε Φωτ. 5, 6). Αντίστοιχες εικόνες των μοντέλων από τις αριθμητικές επιλύσεις με αυτές των πειραματικών δοκιμίων γύρω από την περιοχή των άκρων, πριν και μετά την επιβολή των φορτίων, δείχνουν το ίδιο φαινόμενο πλαστικοποίησης και όμοια μορφή της παραμορφωμένης περιοχής. Από τα παραπάνω διαπιστώνεται πως η διερεύνηση για την αντοχή των μελών πρέπει να επικεντρωθεί στην κρίσιμη πλέον περιοχή της διαμόρφωσης, καθώς σ' αυτή οφείλεται η μείωση της αντοχής (βλέπε Φωτ. 3, 5, 6, 7).

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της παραμετρικής διερεύνησης, προσεγγίστηκαν οι σχέσεις των παραμέτρων μέγιστη αντοχή N_{max} , διάμετρος D , πάχος t , μήκος ℓ , καθώς και λυγηρότητα λ μεταξύ τους. Έχουν κατασκευαστεί διαγράμματα των σχέσεων: $N_{max} - t$ για κάθε λ , του λόγου $t/D - D$ για κάθε λ και του κρίσιμου λόγου t_{cr}/D σε συνάρτηση με το λ . Όλες οι σχέσεις αυτές τείνουν σε γραμμικές με μικρές αποκλίσεις. Αυτές οφείλονται σε σφάλμα προσδιορισμού της αντοχής κατά την αριθμητική επίλυση των προσομοιωμάτων. Σφάλμα που οφείλεται κυρίως στη πυκνότητα του καννάβου των πεπερασμένων στοιχείων. Για παράδειγμα το αριθμητικό μοντέλο της πειραματικής κοιλοδοκού ROR 88.9/4 με 611 στοιχεία δίνει αντοχή 270.4 KN, ενώ αυτό με 2444 στοιχεία δίνει αντοχή 250.4, δηλαδή ποσοστό απόκλισης 7%. Αντίστοιχα, το ποσοστό αυτό επιτρέπει την χρήση του μοντέλου με τα 611 στοιχεία για την εξαγωγή ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελεσμάτων, με όφελος την οικονομία υπολογιστικού όγκου και χρόνου.

Αξίζει να επισημανθεί ότι στόχος της αριθμητικής διερεύνησης είναι ο προσδιορισμός της αντοχής του άκρου της κοιλοδοκού και όχι του πλήρους μέλους, που θα απαιτούσε πολύ μεγαλύτερο όγκο υπολογισμών. Για το σκοπό μοντελοποιήθηκαν μόνο 0.47 μέτρα μήκους από το άκρο. Αν εξαιρέσουμε τα μοντέλα με $D = 139.9$ mm που κατασκευάστηκαν με ύψος 0.94 m, σε όλα τα υπόλοιπα τα αποτελέσματα των αριθμητικών

μεταβάλλονται ελάχιστα για μεγαλύτερο από 0.47 μέτρα ύψος. Διαπιστώθηκε παράλληλα, πως όσο μεγαλώνει η διάμετρος του μοντέλου τόσο αντίστοιχα πρέπει να αυξηθεί το ύψος του μοντέλου, ώστε να μείνει το σφάλμα στα αποτελέσματα μικρό. Η σημαντικότερη διαπίστωση από την αριθμητική διερεύνηση είναι ότι, για δεδομένης διαμέτρου κοιλοδοκό κυκλικής διατομής με πεπλατυσμένα άκρα, υπάρχει συνδυασμός των παραμέτρων λυγηρότητα και πάχος διατομής, ο οποίος είναι κρίσιμος και καθορίζει αν το μέλος αστοχεί λόγω υπερβολικής πλαστικοποίησης των άκρων, πριν αυτό συμβεί λόγω λυγισμού.

Αν είναι γνωστή η διάμετρος D και το μήκος μιας κοιλοδοκού η λυγηρότητα υπολογίζεται συναρτήσει μόνο του πάχους t της κοίλης διατομής. Κάποια από τις τιμές αυτές του πάχους t ορίζεται ως κρίσιμο πάχος t_{cr} . Για τιμές του πάχους μικρότερες του t_{cr} το μέλος πλαστικοποιείται στην περιοχή της διαμόρφωσης των άκρων για φορτίο μικρότερο του φορτίου λυγισμού. Σ' αυτή την μορφή αστοχίας το μέλος, καθώς αυξάνεται η αξονική θλιπτική παραμόρφωση, χάνει προοδευτικά την αντοχή του με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο του πάχους t . Από διαγράμματα αντοχής του πεπλατυσμένου άκρου σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση Μπορούμε να διαπιστώσουμε την πολύ καλή συμπεριφορά του άκρου μετά την έναρξη της πλαστικοποίησης του. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει παρατηρώντας πως ο φθίνων κλάδος της γραφικής παράστασης αντοχής παραμόρφωσης έχει μικρή κλίση. Στο κεφάλαιο 2.3.1 σ' ένα τέτοιο διάγραμμα της κοιλοδοκού ROR 114.3/4 μετρήθηκε μέγιστη αντοχή 258 KN με αξονική παραμόρφωση 2.3 mm, ενώ για παραμόρφωση 12 mm η αντοχή υπολογίζεται στα 195 KN. Για τιμές μεγαλύτερες του t_{cr} η απώλεια της αντοχής του μέλους θεωρείται ότι οφείλεται στο λυγισμό όπως υπολογίζεται από τον EC3. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο λόγος t_{cr}/D όπου t_{cr} είναι το κρίσιμο πάχος διατομής διαμέτρου D . Με τον υπολογισμό αυτό αντιστοιχήθηκε ένας σταθερός για κάθε λυγηρότητα λ κρίσιμος λόγος t_{cr}/D . Πράγμα που θα βοηθήσει, όπως και πολλά άλλα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, στη διαστασιολόγηση κατασκευών από κοιλοδοκούς κυκλικής διατομής με πεπλατυσμένα άκρα.

6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα περιλαμβάνεται μια σύντομη περιγραφή της χρήσης του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων MARC, που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των αριθμητικών προσομοιωμάτων.

6.1 Μοντελοποίηση με το πρόγραμμα MARC

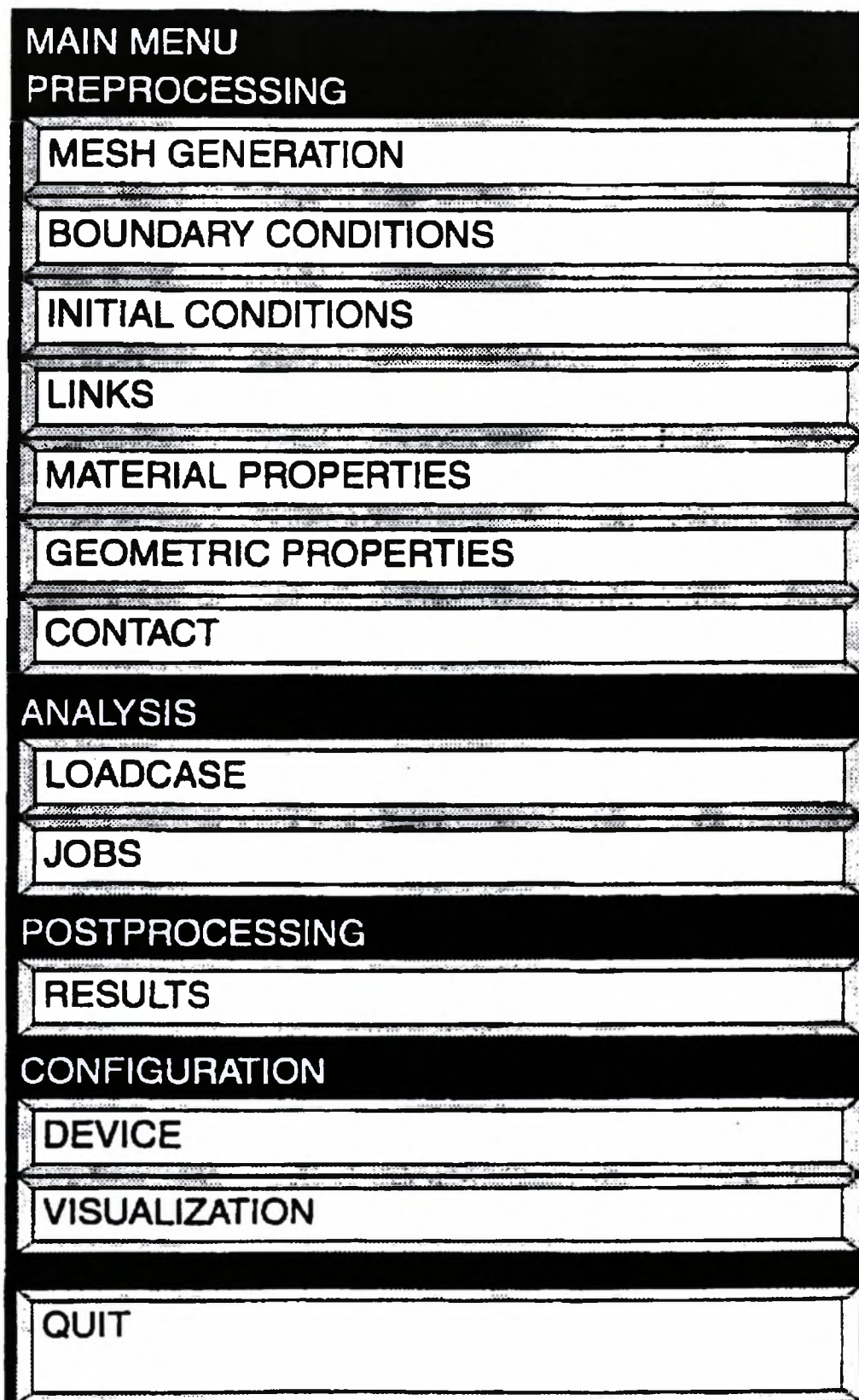
Από τότε που εμφανίστηκε ο πρώτος Η/Υ, ο ENIAC, έχουν περάσει λιγότερο από πενήντα χρόνια. Στο διάστημα αυτό έχουν πραγματοποιηθεί τεράστια άλματα όχι μόνο στην ηλεκτρονική τεχνολογία του υλικού (hardware), αλλά και στην παράλληλα εξελισσόμενη πληροφορική τεχνολογία του λογισμικού (software). Η πρόοδος στην κατασκευή Η/Υ τεκμηριώνεται στα μάτια του απλού χρήστη των μηχανημάτων αυτών: (α) με την αξιοθαύμαστη μείωση του όγκου τους, (β) την εκπληκτική αύξηση της ταχύτητάς τους, (γ) την πρακτικά χωρίς όρια πλέον χωρητικότητά τους, τόσο σε κεντρική όσο και σε περιφερειακή μνήμη και τελευταίο (δ) στη δραστικότερη μείωση των τιμών τους.

Ο μηχανικός-χρήστης ενός Η/Υ δε χρειάζεται να γνωρίζει οπωσδήποτε περισσότερα για τον υπολογιστή του, από ότι ένας οδηγός για το αυτοκίνητο του, προκειμένου να το οδηγήσει με ασφάλεια. Οι βασικές βέβαια έννοιες και λειτουργίες, όπως και η γενική αρχιτεκτονική ενός συστήματος Η/Υ, οφείλουν να είναι γνωστές. Περισσότερες γνώσεις χρειάζονται σχετικά με το λειτουργικό σύστημα, το λογισμικό δηλαδή που ελέγχει τη λειτουργία του Η/Υ, συντονίζει τις εκτελούμενες διεργασίες και δημιουργεί την "επιφάνεια χρήσης" (user interface). Επίσης, ο μηχανικός-μελετητής δε χρειάζεται να επιβαρυνθεί οπωσδήποτε με την εκμάθηση γλωσσών προγραμματισμού. Αντίθετα, πρέπει να είναι πλήρως εξοικειωμένος με τα προγράμματα εφαρμογής, που χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς του και κυρίως με τα όρια ασφαλούς χρήσης τους.

Όπως προαναφέρθηκε, η επικρατέστερη μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιεί το λογισμικό για την επίλυση των προβλημάτων του μηχανικού, είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Με αυτήν αντιμετωπίζεται σχεδόν κάθε πρόβλημα, ειδικά δε σε μεγάλες και σύνθετες κατασκευές η εφαρμογή της είναι μάλλον επιβεβλημένη. Στη διάθεση του μηχανικού-μελετητή υπάρχουν σήμερα αξιόλογα προγράμματα που, βασισμένα στη μέθοδο αυτή, δίνουν δυνατότητες επίλυσης όχι μόνο προβλημάτων της γραμμικής στατικής και δυναμικής, αλλά και προβλημάτων της θεωρίας δευτέρας τάξεως, μεγάλων μετακινήσεων ελαστικής ευστάθειας, αλληλεπίδρασης εδάφους-ανωδομής, ανελαστικής συμπεριφοράς και άλλων πολλών, που ακόμη και στο κοντινό παρελθόν ήταν πολύ δύσκολο να αντιμετωπισθούν ικανοποιητικά.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων MARC, που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της κοιλοδοκού με πεπλατυσμένα άκρα, αποτελεί ένα πολύ ισχυρό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Βασίζεται σε ένα γραφικό περιβάλλον εισαγωγής των δεδομένων στο οποίο πραγματοποιείται η μόρφωση του μοντέλου.

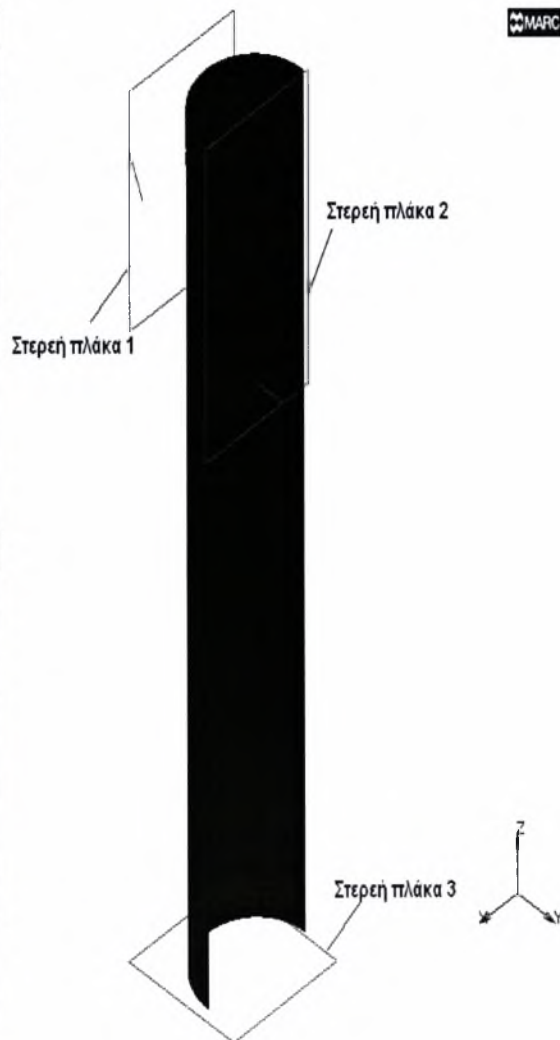
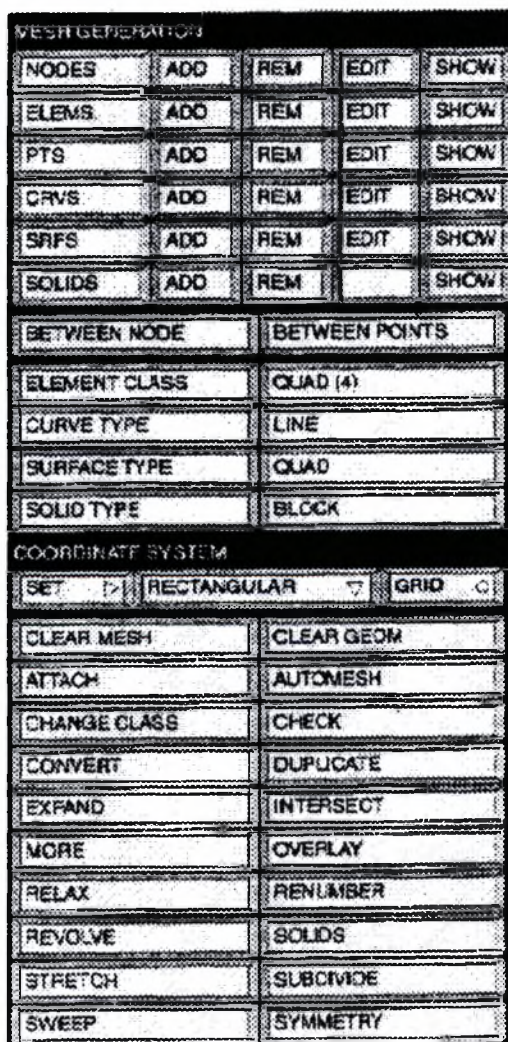
Το πρώτο βήμα συνίσταται στην υποδιαίρεση και διάσπαση του μέλους, στα επιμέρους στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων, που θα το απαρτίζουν. Συγκεκριμένα, το μοντέλο αποτελείται από μια κυλινδρική επιφάνεια ύψους 0.47m για σχεδόν όλα τα μοντέλα που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η επιφάνεια αυτή διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία 1 x 1 cm. Στο δεύτερο βήμα, μετά τη διακριτοποίηση του φορέα, προσδίδουμε μηχανικές ιδιότητες σε κάθε στοιχείο. Τέλος στο τρίτο βήμα καθορίζουμε τις παραμέτρους επίλυσης και το μοντέλο είναι πλέον έτοιμο να επιλυθεί. Τα παραπάνω τρία βασικά βήματα που ακολουθήθηκαν για τη σύνθεση του μοντέλου, περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους μέσα στις οποίες εξηγείται αναλυτικά ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων, καθώς και η μεθοδολογία κατασκευής του μοντέλου. Στην περιγραφή των δεδομένων εισαγωγής στο γραφικό περιβάλλον του MARC, παρεμβάλλονται εικόνες με τα κυριότερα μενού επιλογών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του μοντέλου.



Σχ. 5.1 Το κύριο μενού επιλογών του **MARC**

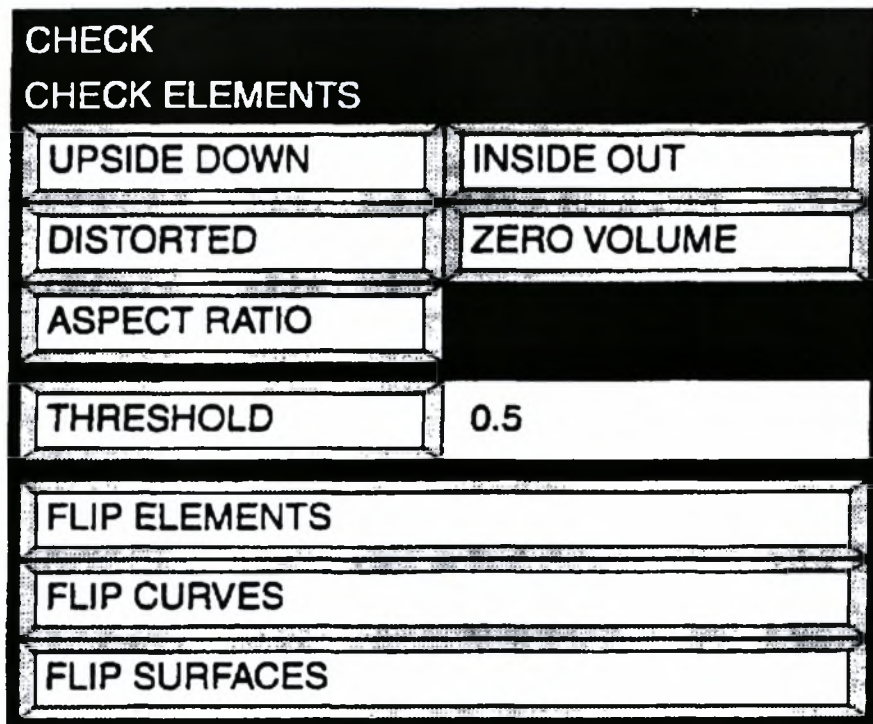
6.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (MESH GENERATION)

Από το κύριο μενού επιλογών του MARC (Σχ 2.2), επιλέγουμε το πλήκτρο MESH. Στο καινούργιο μενού επιλογών που εμφανίζεται Σχ(2.3), μπορούμε να σχεδιάσουμε την μορφή της επιφάνειας του μοντέλο μας και των επιφανειών που αντιπροσωπεύουν τα πέλματα της πρέσας, κάνοντας κλικ στο πλήκτρο ADD SURFACE. Κατά τη σχεδίαση των στέρεων πλακών 1,2,3 και της ημικυλινδρική επιφάνεια της κοιλοδοκού για να μπορέσουμε να λάβουμε υπόψη τις συνθήκες επαφής που θα αναπτυχθούν μεταξύ τους, αφήνουμε μία πολύ μικρή απόσταση θεωρητικά απειροστή, στην πράξη όχι μεγαλύτερη από ένα χιλιοστό, ανάμεσα τους. Έτσι, με τον τρόπο αυτό το MARC χειρίζεται τις πλάκες και την επιφάνεια της κοιλοδοκού σαν ξεχωριστά σώματα που είναι ελεύθερα να αναπτύξουν συνθήκες επαφής.



Στη συνέχεια, διακριτοποιούμε την επιφάνεια του μοντέλου χρησιμοποιώντας την επιλογή ADD ELEMENTS (Σχ.2.3). Με την παραπάνω επιλογή διακριτοποιούμε το φορέα σε ένα πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (elements). Όπως είναι φυσικό, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων που διακριτοποιούν το φορέα, τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν στην επίλυση. Παράλληλα όμως, τόσο πιο πολύ επιβαρύνεται με επιπλέον επεξεργασία το MARC, απαιτώντας περισσότερο χρόνο για την επίλυση. Για τον παραπάνω λόγο, διακριτοποιήθηκαν με τετράκομβα στοιχεία πλακοδίσκου με τέτοια πυκνότητα κανάβου ώστε, να μην προκύπτει ακατάλληλος λόγος ύψους προς πλάτος (Bad aspect ratio). Στην παραπάνω διακριτοποίηση προσέχουμε ώστε, οι κόμβοι των διακριτοποιημένων στοιχείων στην επιφάνεια της κοιλοδοκού να μην αλληλοκαλύπτονται. Ο λόγος που έχουμε την παραπάνω απαίτηση, είναι για να μην δημιουργηθούν διπλοί κόμβοι (duplicate nodes) στην επιφάνεια αυτή με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται σαν κόμβοι τομής. Για να είμαστε σίγουροι ότι κατά τη δημιουργία του μοντέλου δεν έχουν δημιουργηθεί τέτοιοι διπλοί κόμβοι, με την επιλογή SWEEP το MARC ενώνει ή εξαφανίζει τους παραπάνω κόμβους, που απέχουν μεταξύ τους μικρότερη απόσταση από την ανοχή (tolerance) που επιλέγουμε.

Τέλος, αφού ολοκληρώσουμε τη διαδικασία διακριτοποίησης του μοντέλου, είναι σημαντικό να ελέγξουμε συνολικά το μοντέλο για στοιχεία διαταραγμένα. Λέγοντας διαταραγμένα, εννοούμε στοιχεία που μπορεί να γεννήθηκαν με επιλογή κόμβων αντίθετης από μίας φοράς με μία προκαθορισμένη, όπως λόγου χάρη σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Επίσης είναι δυνατόν να έχουν δημιουργηθεί στοιχεία μηδενικής διάστασης, όπως και με κακό λόγο ύψους προς πλάτος. Όλες οι παραπάνω αδυναμίες του μοντέλου είναι δυνατόν να ελεγχθούν απ' την επιλογή CHECK (Σχ. 2.4). Με την παραπάνω επιλογή εμφανίζεται ένα νέο μενού, που μας δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε τους παραπάνω ελέγχους και κάνοντας κλικ στο πλήκτρο FLIP ELEMENTS να διορθώσουμε τα προβληματικά στοιχεία που εμφανίζει το MARC, χρωματίζοντας τα με πράσινο χρώμα.



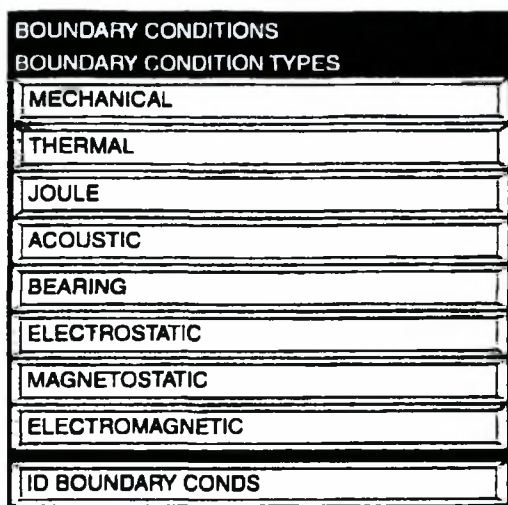
Σχ. 2.4 Το μενού CHECK, με το οποίο ελέγχουμε την ορθότητα των πεπερασμένων στοιχείων

6.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (BOUNDARY CONDITIONS)

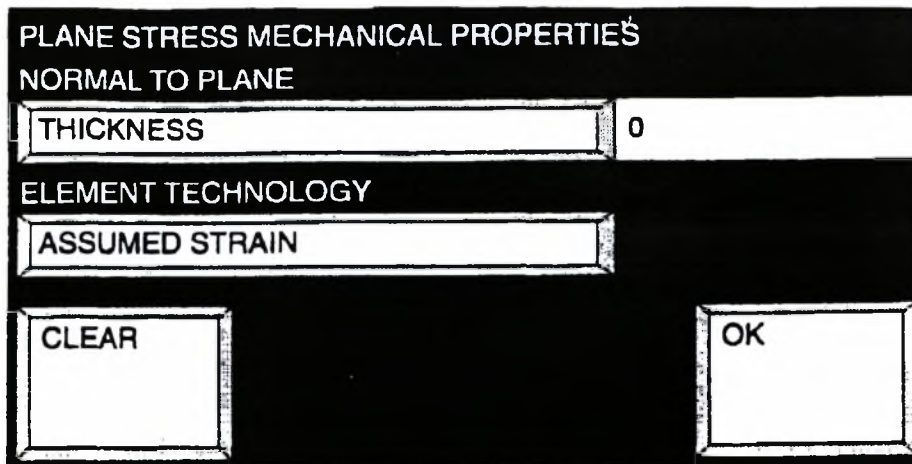
Με την επιλογή αυτή, θα καθορίσουμε τις συνοριακές συνθήκες που αναπτύσσονται στα σύνορα του μοντέλου. Απ' το κύριο μενού επιλέγουμε το πλήκτρο BOUNDARY CONDITIONS. Στο καινούριο μενού επιλογών που εμφανίζεται (Σχ.2.5), επιλέγουμε να προσδώσουμε μηχανικές ιδιότητες κάνοντας κλικ στο πλήκτρο MECHANICAL.

Στο νέο μενού που εμφανίζεται, μπορούμε πλέον να ορίσουμε τις συνοριακές συνθήκες στους κόμβους που επιθυμούμε.

Μπορούμε μέσω της επιλογής FIXED DISPLACEMENT να επιβάλουμε μετακινήσεις και στροφές, όπου αν θέσουμε εκφυλιστικά την τιμή μηδέν ουσιαστικά επιβάλουμε απαγόρευση. Ενώ με την αντίστοιχη επιλογή για τα σημειακά φορτία POINT LOAD ορίζουμε τα επιβαλλόμενα φορτία στους αντίστοιχους κόμβους



Σχ. 2.5 Το μενού συνοριακών συνθηκών, απ' το οποίο επιλέγουμε το πλήκτρο MECHANICAL.



Σχ. 2.9 Μενού εισαγωγής του πάχους στις διακριτοποιημένες οντότητες του μοντέλου.

Τέλος, με το παραπάνω μενού εισάγουμε το πάχους, στο κάθε στοιχείο της διατομής (Σχ.2.9).

6.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΠΑΦΗΣ (CONTACT CONDITIONS)

Από το κύριο μενού επιλογών του MARC, επιλέγουμε το πλήκτρο CONTACT. Στο νέο μενού που εμφανίζεται (Σχ.2.10), επιλέγουμε τα πεπερασμένα στοιχεία που θα αναπτύξουν συνθήκες επαφής. Η συνθήκη αφορά την επαφή μεταξύ στέρεας πλάκας και των πεπερασμένων στοιχείων της ημικυλινδρικής επιφάνειας. Για να ορίσουμε την επαφή αυτή ορίζουμε την πλάκα ως στερεά από την επιλογή RIGID, καθώς και τα στοιχεία της κοιλοδοκού που πρόκειται να έρθουν σε επαφή την εκάστοτε στερεά πλάκα. Με τον παραπάνω τρόπο, το μοντέλο μας αποκτάει τη δυνατότητα να αναπτύξει εντάσεις και παραμορφώσεις, απ' την αλληλεπίδραση της στέρεας πλάκας.

CONTACT			
PREV			NEXT
NEW	NAME	REM	EDIT
BODY TYPE			
RIGID			DEFORMABLE
CONTACT BODY PROPERTIES			
ELEMENTS	ADD	REM	0
CURVES	ADD	REM	0
SURFACES	ADD	REM	0
TABLES			
ID CONTACT			ID BACKFACES
FLIP ELEMENTS			FLIP CURVES
FLIP SURFACES			

Σχ. 2.10 Το Μενού στο οποίο ορίζουμε τα πεπερασμένα στοιχεία που θα αναπτύξουν συνθήκες επαφής.

6.5 ΕΠΙΒΟΛΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (LOADS)

Από το κύριο μενού επιλογών του MARC επιλέγουμε το πλήκτρο LOADS. Στο νέο μενού που εμφανίζεται (Σχ.2.12), επιλέγουμε τον τύπο της μηχανικής ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα επίλυση. Στο νέο μενού που εμφανίζεται, με το πλήκτρο LOADS (Σχ.2.13) επιλέγουμε τις καταπονήσεις που θα επιβάλλουμε, τις οποίες έχουμε εισάγει προηγουμένως απ' την επιλογή BOUNDARY CONDITIONS, που βρίσκεται στο κεντρικό μενού του MARC. Όπως είχαμε περιγράψει σε εκείνο το μενού (παράγραφος 2.3), έχουμε θέσει τις συνοριακές συνθήκες τις οποίες τώρα στο μενού LOADS, μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε ποιες θα εφαρμοστούν στο μοντέλο. Στο μοντέλο μας, επιλέγουμε το MARC να εφαρμόσει και τις τέσσερις συνθήκες. Αυτόματα το MARC θέτει το μήνυμα SELECTED, με το οποίο το πρόγραμμα μας ενημερώνει ότι επιλέχθηκαν.

LOADCASE			
PREV			NEXT
NEW	NAME	REM	EDIT
MECHANICAL ANALYSES			
STATIC			
BUCKLE			
CREEP			
DYNAMIC MODAL			
DYNAMIC TRANSIENT			
DYNAMIC HARMONIC			
SPECTRUM RESPONSE			
RIGID PLASTIC			
HEAT TRANSFER ANALYSES			
STEADY STATE			
TRANSIENT			
COUPLED ANALYSES			
STATIC			
DYNAMIC TRANSIENT			
RIGID PLASTIC			
DEACTIVATE		ACTIVATE	
MORE			

Σχ. 2.12 Το μενού επιλογής του τύπου της μηχανικής ανάλυσης.

Η δεύτερη επιλογή που χρησιμοποιούμε απ' το παραπάνω μενού (MECHANICAL STATIC PARAMETERS), είναι το SOLUTION CONTROL. Επιλέγοντας αυτήν την επιλογή, ορίζουμε το μέγιστο και ελάχιστο αριθμό κύκλων σύγκλισης που θα πραγματοποιεί το MARC, προκειμένου να επιλύσει το κάθε βήμα φόρτισης (increment). Επίσης, επιλέγουμε τη μέθοδο σύγκλισης FULL NEWTON RAPHSON απ' την επιλογή INTERATIVE PROCEDURE.

MECHANICAL STATIC PARAMETERS	
LOADS	
SOLUTION CONTROL	
CONVERGENCE TESTING	
CONTACT	
GAP CHANGES	
TOTAL LOADCASE TIME	1
STEPPING PROCEDURE	
FIXED	# STEPS 1
ADAPTIVE LOADING	
MECH. LOAD (ARC LENGTH)	PARAMETERS
THERMAL LOAD	PARAMETERS
MECH. LOAD (EQUILIBRIUM)	PARAMETERS
RESET	OK

Σχ. 2.13. Το μενού επιλογής των παραμέτρων της μηχανικής ανάλυσης

Τέλος με την επιλογή CONVERGE TESTING , επιλέγουμε τα όρια στο σφάλμα της σύγκλισης (Σχ.2.14). Στο μοντέλο μας επιλέγουμε ανοχή 0.05 στις δυνάμεις αντίδρασης όπως και στις μετατοπίσεις. Αν τα παραπάνω όρια κατά την διάρκεια της επίλυσης ξεπεραστούν αφού έχει εξαντηθεί ο μέγιστος αριθμός κύκλων επαναλήψεων, το MARC διακόπτει την ανάλυση τερματίζοντας την επίλυση.

Οι παραπάνω παράμετροι της επίλυσης είναι πολύ σημαντικές, γιατί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι άμεσα συνδεδεμένη μαζί τους. Φυσικά όσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιδιώκουμε τόσο περισσότερο επιβαρύνεται η επίλυση, αφού είναι πιθανό να απαιτούνται περισσότεροι κύκλοι για να συγκλίνει η αριθμητική διαδικασία.

CONVERGENCE TESTING

MODE

RELATIVE	ABSOLUTE	RELATIVE/ABS.
----------	----------	---------------

CRITERIA

RESIDUAL FORCE	DISPLACEMENT	STRAIN ENERGY
RESIDUAL FORCE & MOMENT	DISPLACEMENT & ROTATIONS	

RESIDUAL FORCES

RELATIVE FORCE TOLERANCE	0.1
MINIMUM REACTION CUTOFF	0
MAXIMUM ABSOLUTE RESIDUAL	0

RESIDUAL MOMENTS

RELATIVE MOMENT TOLERANCE	0
MINIMUM MOMENT CUTOFF	0
MAXIMUM ABSOLUTE MOM RES	0

DISPLACEMENTS

RELATIVE DISPLACEMENT TOLERANCE	0.1
MINIMUM DISPLACEMENT CUTOFF	0
MAXIMUM ABSOLUTE DISPLACEMENT	0

ROTATIONS

RELATIVE ROTATION TOLERANCE	0
MINIMUM ROTATION CUTOFF	0
MAXIMUM ABSOLUTE ROTATION	0

STRAIN ENERGY

MAXIMUM ABSOLUTE ROTATION	0
---------------------------	---

OK

Σχ.2.14. Το μενού CONVERGENCE TESTING, στο οποίο είναι σημαντικό να θέσουμε τις ανοχές στην σύγκλιση του μοντέλου, κατά την διάρκεια της μη γραμμικής ανάλυσης

6.6 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Από το κύριο μενού επιλογών του MARC, επιλέγουμε το πλήκτρο JOBS. Με την επιλογή αυτή το πρόγραμμα εμφανίζει ένα νέο μενού επιλογών, απ' το οποίο επιλέγοντας το πλήκτρο RUN μπορεί να ξεκινήσει η εκτέλεση του προγράμματος (Σχ.2.15). Κατά την διάρκεια της εκτέλεσης του προγράμματος, εμφανίζονται οι τιμές με τις οποίες το MARC προσπαθεί να συγκλίνει. Οι παραπάνω τιμές είναι απαραίτητο να παρακολουθούνται κατά τα πρώτα βήματα της επίλυσης, γιατί φανερώνουν πόσο κοντά βρίσκεται στα όρια ανοχής που θέσαμε, ο αλγόριθμος σύγκλισης του MARC.

JOBS PROCESSOR			
PREV			NEXT
NEW	NAME	REN	EDIT
ANALYSIS CLASS			
MECHANICAL			
RIGID PLASTIC			
HEAT TRANSFER			
COUPLED			
COUPLED RIGID PLASTIC			
Joule HEATING			
ACOUSTIC			
BEARING			
ELECTROSTATIC			
MAGNETOSTATIC			
ELECTROMAGNETIC			
ADAPTIVE MESH CRITERIA			
ELEMENT TYPES			
ADDITIONAL PRINT			
DOMAIN DECOMPOSITION			
CHECK	RENUMBER ALL		
DEACTIVATE	ACTIVATE		
RUN			

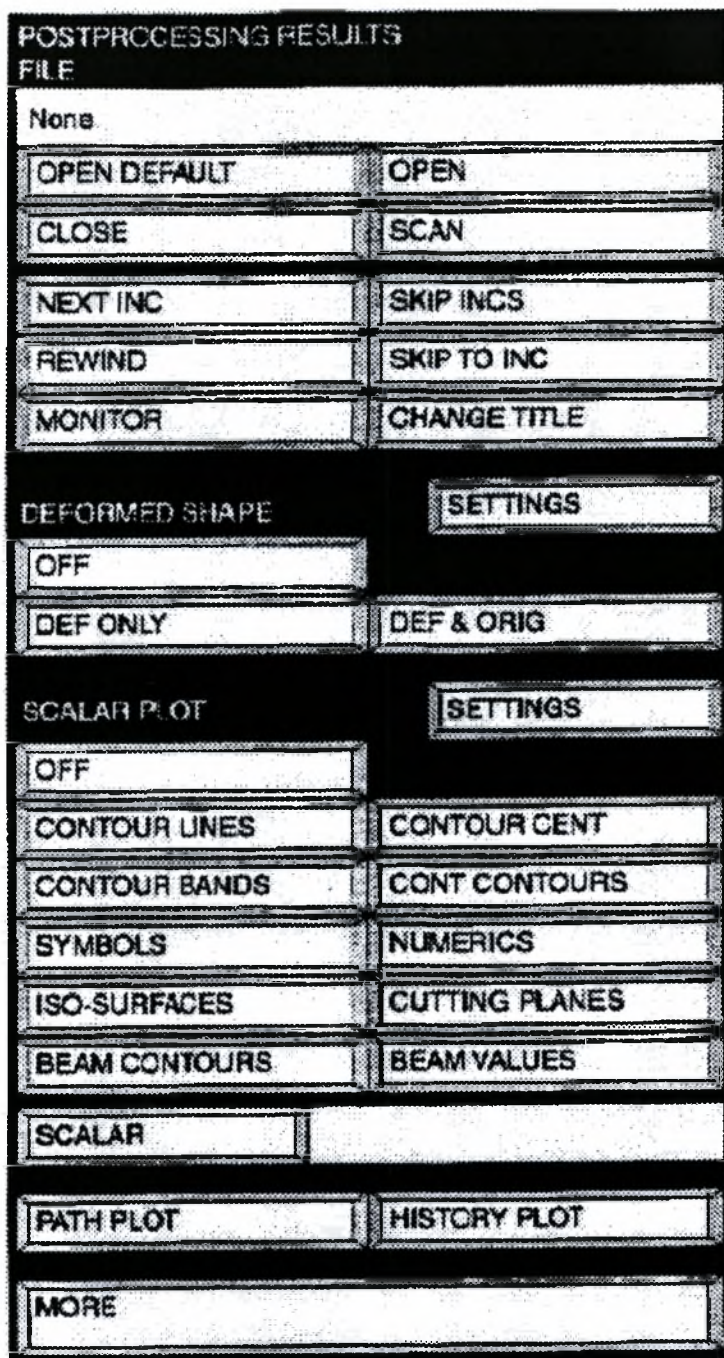
Σχ. 2.15 Το μενού εκτέλεσης του μοντέλου μας με την επιλογή που βρίσκεται στο τελευταίο πλήκτρο της οθόνης επιλογών.

6.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Αφού έχουν ολοκληρωθεί οι επιλύσεις, μπορούμε πλέον με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων MARC, επιλέγοντας το αντίστοιχο μοντέλο που θα μελετήσουμε να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα της επίλυσης.

Απ' το κύριο μενού του MARC, διαλέγουμε την επιλογή RESULTS. Στη νέα οθόνη επιλογών που προσφέρει το MARC (Σχ.3.1), διαλέγουμε την επιλογή "OPEN DEFAULT". Η παραπάνω επιλογή μας δίνει τη δυνατότητα, να παρακολουθήσουμε σταδιακά την επιπόνηση του μοντέλου, για τα βήματα (increments) που έχει ήδη επιλύσει το MARC.

Το πρόγραμμα MARC μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε από το νέο μενού που εμφανίζεται, τις τάσεις, παραμορφώσεις, μετακινήσεις, αντιδράσεις που αναπτύσσονται για το κάθε βήμα φόρτισης, οι οποίες απεικονίζονται σε κάθε κόμβο του διακριτοποιημένου μοντέλου είτε αριθμητικά (NUMERIC) , είτε με τη μορφή ζωνών χρωματικών αποχρώσεων (CONTOUR BANDS). Στη προκειμένη περίπτωση μελέτης του μοντέλου, μας ενδιαφέρουν κυρίως οι ισοδύναμες τάσεις (VON MISES) καθώς και οι παραμορφώσεις (PLASTIC STRAINS), που αναπτύσσονται στη διατομή. Οι τελευταίες δύο επιλογές επιτρέπουν τον εντοπισμό των πλαστικών περιοχών που αναπτύσσονται στα διάφορα στοιχεία της διατομής.



Σχήμα 3.1 Το μενού μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν αφού ολοκληρώθηκε η επίλυση του μοντέλου.

