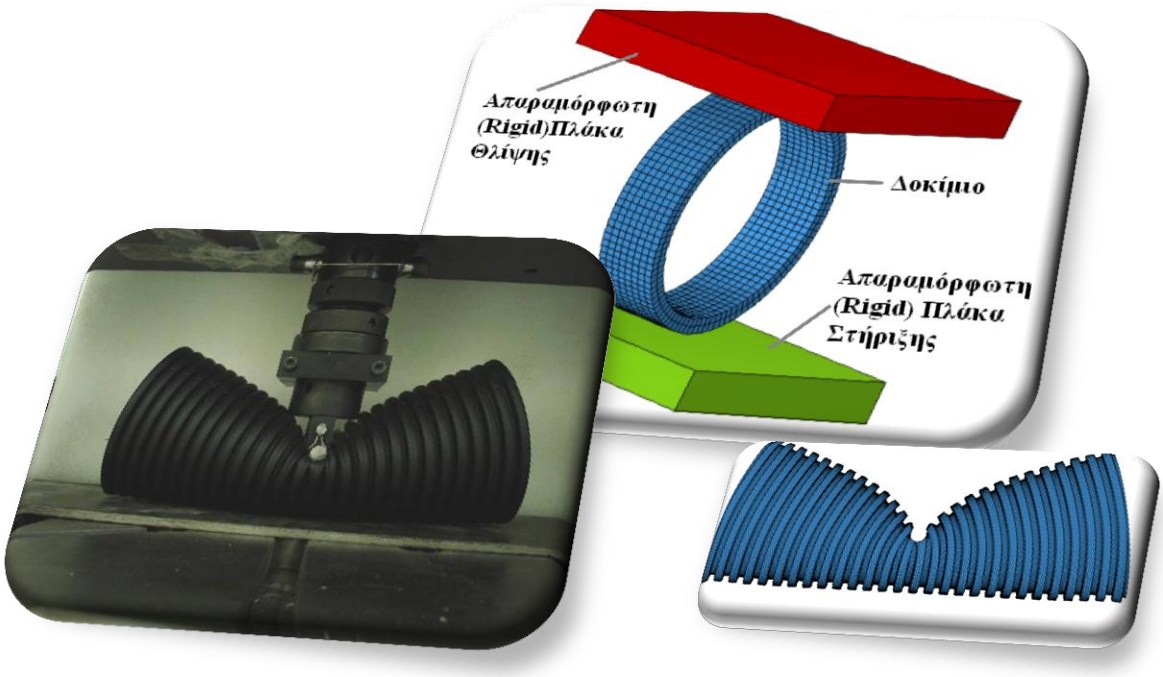
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ & ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ



ΚΟΥΖΙΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη σύγχρονη βιομηχανία, η χρήση των πλαστικών σωλήνων βρίσκει ιδιαίτερα ευρεία εφαρμογή, κυρίως λόγω του εξέχοντος ρόλου που παίζουν οι σωλήνες σε τομείς όπως η διακίνηση ρευστών, η ύδρευση διαφόρων κατοικήσιμων περιοχών, η αποχέτευση και οι τηλεπικοινωνίες. Το μέγεθος της λειτουργικότητας των σωλήνων επηρεάζεται συνήθως από διάφορους παράγοντες, των οποίων η επίδραση μεταβάλλεται καθώς μεταπηδούμε από τη μία χρονική περίοδο στην άλλη. Επομένως, ο μηχανικός χρειάζεται να γνωρίζει τις διάφορες αδυναμίες και ατέλειες που μπορεί ανά πάσα στιγμή να παρουσιάσει ο σωλήνας, προκειμένου να λάβει τα ανάλογα μέτρα, ώστε ούτε η ακεραιότητα του σωλήνα να τεθεί σε κίνδυνο αλλά ούτε και να αποτραπεί η περαίωση του έργου που αυτός επιτελεί. Για τον παραπάνω λόγο, κρίνεται αναγκαία η ανάλυση της επίδρασης των διαφόρων φορτίσεων και τάσεων στους σωλήνες κατά τη διάρκεια ζωής τους, και πώς αυτοί επηρεάζουν τη μεταβολή της πιθανότητας για εμφάνιση μελλοντικών αστοχιών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων στις οποίες υπόκεινται οι πλαστικοί σωλήνες, και ειδικά οι σωλήνες από πολυαιθυλένιο (PE) πρώτης γενιάς, όταν αυτοί καταπονηθούν αξονικά και πλευρικά, καθώς επίσης και η σύγκριση των πειραματικών αυτών εφαρμογών με την αριθμητική προσομοίωση της παραπάνω καταπόνησης, με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση της εφαρμογής λογισμικού LS-DYNA.

.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον Καθηγητή *κ. Δ. Μανωλάκο* για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναφορικά με την ανάθεση της μελέτης του παρόντος θέματος και στον *κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο (Ε.Ε.ΔΙ.Π)* για τη συμβολή του στη διεξαγωγή των πειραμάτων και στην πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε ως προς τη χρήση του λογισμικού LS-DYNA.

Αθήνα, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2011

ΚΟΥΖΙΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

« *Αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου που με στήριξαν*
και με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου »

Σα βγεις στον πηγαιμό για την Ιθάκη,
να εύχεσαι να'ναι μακρύς ο δρόμος,
γεμάτος περιπέτειες, γεμάτος γνώσεις.
Τους Λαιστρυγόνας και τους Κύκλωπας,
τον θυμωμένο Ποσειδώνα μη φοβάσαι,
τέτοια στον δρόμο σου ποτέ σου δεν θα βρεις,
αν μέν' η σκέψις σου υψηλή,
αν εκλεκτή συγκίνησις το πνεύμα και το σώμα σου αγγίζει.
Τους Λαιστρυγόνας και τους Κύκλωπας,
τον άγριο Ποσειδώνα δεν θα συναντήσεις,
αν δεν τους κουβανείς μες στην ψυχή σου,
αν η ψυχή σου δεν τους στήνει εμπρός σου.
Να εύχεσαι να'ναι μακρύς ο δρόμος.
…….
Η Ιθάκη σ' έδωσε τ' ωραίο ταξίδι.
Χωρίς αυτήν δεν θα βγαινες στον δρόμο.
Άλλα δεν έχει να σε δώσει πια.
Κι αν πτωχική την βρεις, η Ιθάκη δεν σε γέλασε.
Έτσι σοφός που έγινες, με τόση πείρα,
ήδη θα το κατάλαβες οι Ιθάκες τι σημαίνουν.

Κ. Καβάφης

Ιθάκη (1911)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΚΒΟΛΗ.....**1**

1.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΚΒΟΛΗΣ.....1

1.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ.....2

1.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΒΟΛΗΣ.....6

1.4. ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΜΕ ΚΕΦΑΛΗ ΑΡΑΧΝΗΣ.....12

1.5. ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.....22

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1ΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....26

2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....26

2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....27

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2ΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....- 35 -

3.1 ΡΗΞΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....- 35 -

3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΡΗΞΗ.....- 35 -

3.1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΡΗΞΗΣ.....- 36 -

3.1.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΠΟΘΕΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΙΑΣ ΣΩΛΗΝΟΓΡΑΜΜΗΣ.....- 40 -

3.1.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΛΟΓΩ ΡΗΞΗΣ.....- 40 -

3.2 ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....- 42 -

3.2.1 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΕΙΑ.....- 42 -

3.2.2 ΜΟΡΦΕΣ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ.....- 43 -

3.2.3 ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ.....- 45 -

3.2.4 ΓΕΝΙΚΑ ΑΙΤΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....- 46 -

3.2.5 ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΩΝ ΕΝΤΑΦΙΑΣΜΕΝΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....- 47 -

3.2.6 ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΩΝ ΧΙΤΩΝΙΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....- 48 -

3.2.7 ΤΟΠΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΛΟΓΩ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ.....- 48 -

3.2.8 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΛΟΓΩ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ.....- 49 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3ΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....- 50 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ..... - 52 -

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... - 52 -

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ..... - 53 -

4.2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ..... - 53 -

4.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ..... - 53 -

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ..... - 56 -

4.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΕΣΑΣ INSTRON 4482 ..... - 56 -

4.3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ..... - 57 -

4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ..... - 59 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4ΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ..... - 66 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΟ LS-DYNA ..... - 67 -

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... - 67 -

5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ LS-DYNA ..... - 67 -

5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΟ LS DYNA ..... - 71 -

5.3.1 ΚΥΡΙΟ ΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ LS DYNA ..... - 71 -

5.3.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PRE-PROCESSOR – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ..... - 72 -

5.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ POST-PROCESSOR -ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ..... - 77 -

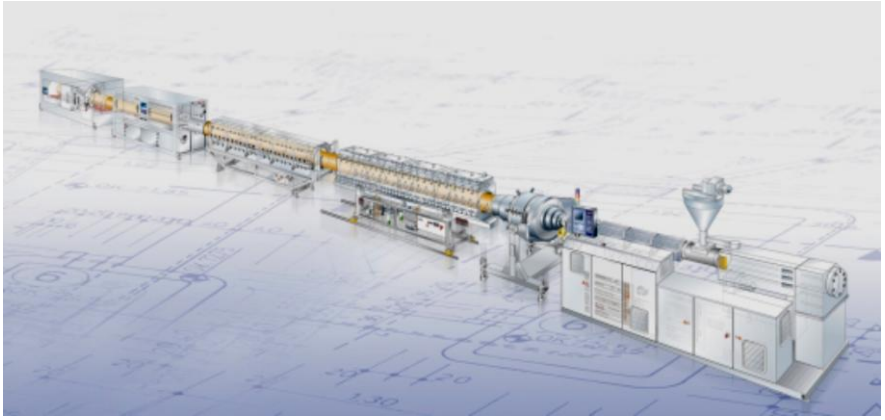
5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... - 85 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5ΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ ..... - 87 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΚΒΟΛΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΚΒΟΛΗΣ

Η εκβολή αποτελεί μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές τόσο για τη μορφοποίηση όσο και για την ανάμειξη πολυμερών. Περίπου το 60% των πλαστικών παγκοσμίως μορφοποιούνται με τη μέθοδο της εκβολής. Στα προϊόντα που μορφοποιούνται με εκβολή ανήκουν οι σωλήνες, ράβδοι, προφίλ (όπως πλαίσια σε παράθυρα), φιλμ, ίνες, μονωμένα καλώδια για ηλεκτρικές εφαρμογές και άλλα προϊόντα. Εφαρμόζεται κυρίως για τα θερμοπλαστικά πολυμερή και προσφάτως και για ορισμένα θερμοσκληρυνόμενα και ελαστομερή [1-7].



Σχήμα 1.1 Γραμμή παραγωγής προϊόντων πολυμερών με την μέθοδο της εκβολής

Κατά την διεργασία της εκβολής, σφαιρίδια του πολυμερούς και τυχών πρόσθετα μορφοποίησης, τροφοδοτούνται μέσω μιας χοάνης στην μήτρα (extruder), όπου με θέρμανση, πραγματοποιείται ιξώδης ροή του πολυμερούς το οποίο, με χρήση δοσιμετρικού κοχλία, βγαίνει από τη μήτρα πλήρως διαμορφωμένο. Με αυτή την κατεργασία παράγονται συνεχή αντικείμενα με σταθερή διατομή όπως σωλήνες, ράβδοι, φύλλα, ίνες και προφίλ.

1.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Η λέξη ***πολυμερές*** προέρχεται από την ελληνική λέξη που σημαίνει πολλά μέρη. Σήμερα ο όρος πολυμερές κατά τον ορισμό της IUPAC,αναφέρεται σε κάθε ουσία που τα μόριά της χαρακτηρίζονται από την επανάληψη ενός ή περισσοτέρων ειδών ατόμων ή ομάδων ατόμων, που αποκαλούνται δομικές μονάδες (constitutional units), ενωμένων μεταξύ τους με ομοιοπολικό δεσμό, σε ένα ικανοποιητικό αριθμό, ώστε η ουσία να παρουσιάζει ένα σύνολο ιδιοτήτων που δεν μεταβάλλεται πρακτικά με την προσθήκη ή την αφαίρεση μιας ή περισσοτέρων τέτοιων μονάδων.

Οι απλές χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των πολυμερών καλούνται *μονομερή*. Για να χρησιμοποιηθεί μια χημική ένωση ως μονομερές θα πρέπει να διαθέτει δύο ή περισσότερες θέσεις από τις οποίες να μπορεί να αντιδράσει. Ο αριθμός των δραστικών θέσεων ενός μονομερούς χαρακτηρίζει τη *δραστικότητά* του. Μονομερή όπως το αιθυλένιο ($CH_2 = CH_2$) ή το αμινοξύ ($H_2N - R - COOH$) είναι διδρστικά ενώ αντίθετα η γλυκερίνη ($CH_2(OH) - CH(OH) - CH_2(OH)$) είναι τριδραστική και το βουταδιένιο ($CH_2 = CH - CH = CH_2$) τετραδραστικό [5-14].

Από το κάθε μονομερές προκύπτει μια ή περισσότερες μονάδες που συμμετέχουν στη δομή των μακρομορίων του αντίστοιχου πολυμερούς. Από το αιθυλένιο για παράδειγμα προκύπτουν δύο μονάδες η μεθυλενο-ομάδα ($-CH_2-$) και η αιθύλενο-ομάδα ($-CH_2CH_2-$). Η μεγαλύτερη μονάδα που προέρχεται από ένα μονομερές καλείται *μονομερής μονάδα* (monomer unit). Στην περίπτωση του αιθυλενίου η μεγαλύτερη μονομερής μονάδα είναι η αιθυλενο-ομάδα ($-CH_2CH_2-$).

Η επαναλαμβανόμενη χημική αντίδραση με την οποία τα μόρια ενός η περισσοτέρων μονομερών ενώνονται προς το σχηματισμό του μορίου του πολυμερούς καλείται *πολυμερισμός* (polymerization).

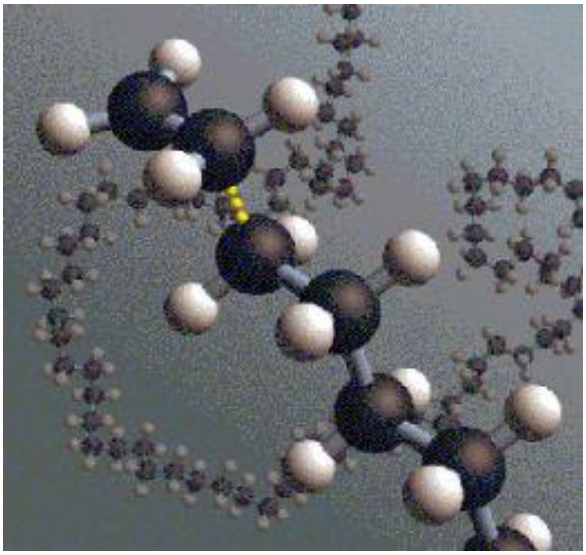
Ο αριθμός *n* των δομικών μονάδων που συμμετέχουν στη δομή του μορίου του πολυμερούς δηλαδή στην πολυμερική αλυσίδα καλείται *βαθμός πολυμερισμού DP* (degree of polymerization). Επειδή σε ένα δείγμα πολυμερούς τα μήκη των αλυσίδων συνήθως ποικίλουν σε μέγεθος στην πράξη χρησιμοποιείται ο μέσος βαθμός πολυμερισμού $\overline{DP}$ *(average degree of polymerization).* Ενώσεις με $\overline{DP}$ <10 χαρακτηρίζονται ως ολιγομερή.

Τα πολυμερή ανάλογα με τον τρόπο μορφοποίησής τους διακρίνονται σε ***θερμοπλαστικά (thermoplastics), θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings) και ελαστομερή (elastomers or rubbers)*** [12-15].

Αναλυτικότερα:

- ***<u>Θερμοπλαστικά ή πλαστομερή ή πλαστικά (thermoplastics)</u>***

Αποτελούνται συνήθως από γραμμικά μακρομόρια. Με θέρμανση μαλακώνουν και μετατρέπονται σε ρευστά (χαλάρωση των μοριακών δεσμών), διατηρούν δε την κατάσταση αυτή όσο χρόνο διαρκεί η επίδραση της θερμότητας και στη συνέχεια μπορούν εύκολα να μορφοποιηθούν με άσκηση υψηλών πιέσεων. Η ακολουθούσα απόψυξη αποδίδει στερεό υλικό.η όλη διεργασία είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά διατίθενται σε υγρή ή στέρεα μορφή. Είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες και παράγονται με πολυμερισμό προσθήκης ή συμπύκνωσης. Τυπικά θερμοπλαστικά πολυμερή είναι: Το πολυαιθυλένιο (PP),το πολυστυρένιο (PS),τα πολυαμίδια (Nylon),τα φθοροπολυμερή κ.α

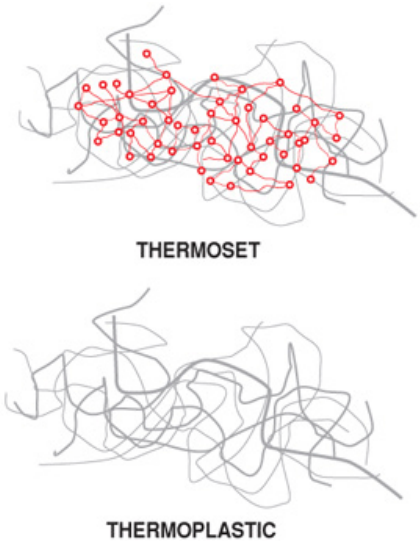


Σχήμα 1.2 Χημικός δεσμός θερμοπλαστικού πολυμερούς (πολυαιθυλένιο)

- ***<u>Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (thermosettings)</u>***

Αποτελούνται από μη γραμμικά και σχετικά μικρά μακρομόρια. Με θέρμανση ή υπό πίεση αρχικά μαλακώνουν και μορφοποιούνται,αλλά με περαιτέρω κατεργασία αποκτούν πυκνή δικτυωτή δομή και μετατρέπονται σε σκληρά στερεά κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά είναι άμορφα σκληρά στερεά, άτηκτα

και δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, παράγονται δε με πολυμερισμό συμπύκνωσης. Στα εν λόγω πολυμερή συχνά παρατηρείται το φαινόμενο της διόγκωσης (swell).



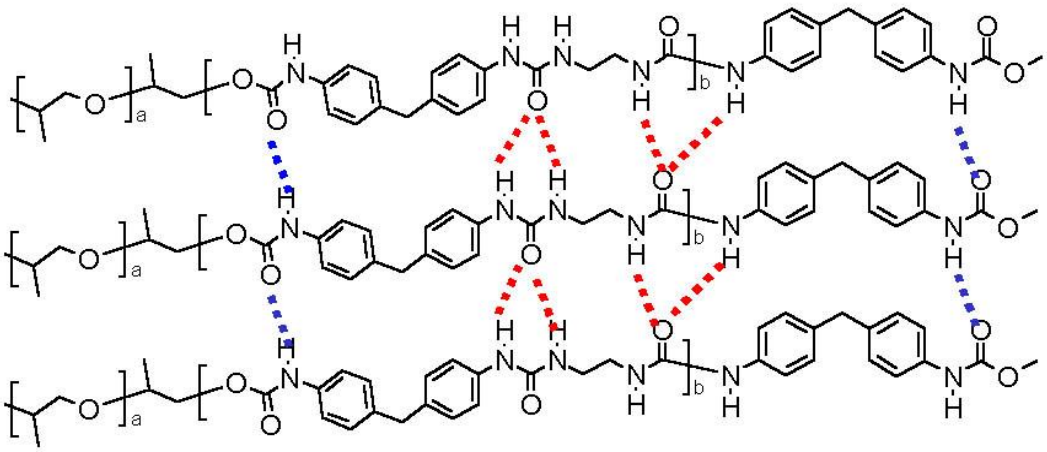
Σχήμα 1.3 Θερμοπλαστικά – θερμοσκληρυνόμενα υλικά

- ***Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή***

Είναι τα φαινολικά πολυμερή (φαινοπλάστες ή βακελίτες),οι ρητίνες,οι βακελίτες κ.α .

- ***Ελαστομερή ή ελαστικά (elastomers ή rubbers)***

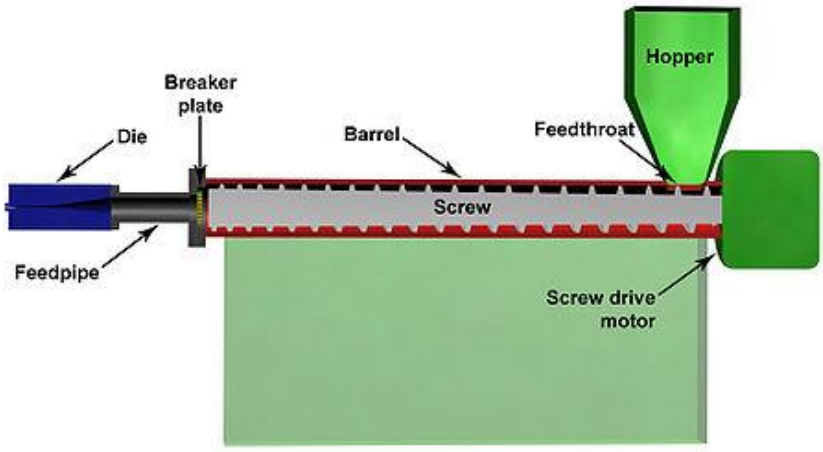
Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Εμφανίζουν την ιδιότητα της υπερπλαστικότητας δηλαδή κατά τον εφελκυσμό επιδέχονται πολύ μεγάλη επιμήκυνση και κατά την αποφόρτιση ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος. Τυπικά ελαστικά είναι το ελαστικό κόμμι,το συνθετικό και φυσικό καουτσούκ,το συνθετικό πολυϊσοπροπένιο,οι σιλικόνες κ.λ.π [15-20].



Σχήμα 1.4 Αλυσίδα ελαστομερούς υλικού

1.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΚΒΟΛΗΣ

Το σύστημα εκβολής αποτελείται από τον εκβολέα, τον κινητήρα, τον πινάκα έλεγχου, το σώμα-κυλινδρο (barrel), τον κοχλία (screw), την πρόσδεση της κεφαλής, το κιβώτιο ταχυτήτων η τον δίσκο μείωσης της ταχύτητας τροφοδοσίας και την μήτρα (die)[20-22].

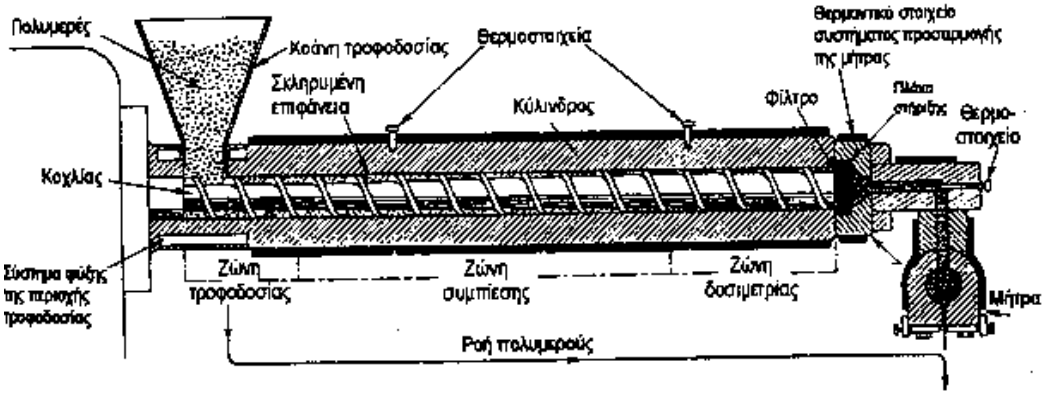


Σχήμα 1.5 Σύστημα εκβολής

- . ***Εκβολέας***

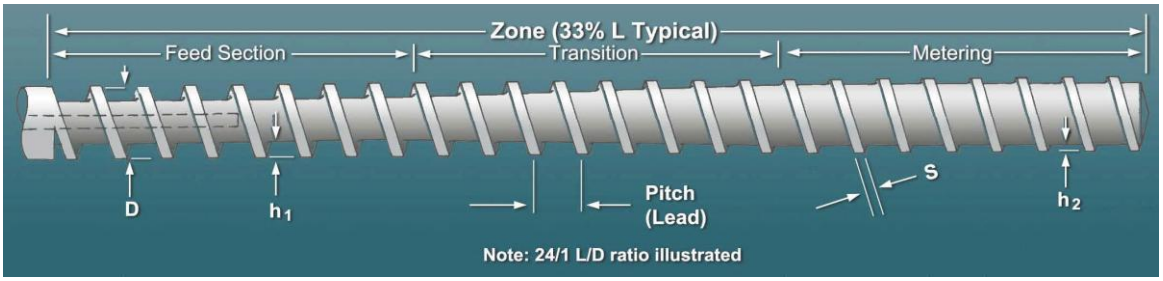
Ο εκβολέας είναι η μονάδα παροχής τήγματος στη διαδικασία της εκβολής. Παρέχει τήγμα του πολυμερούς σε ομοιόμορφη θερμοκρασία και σύσταση με έναν σταθερό και ελεγχόμενο ρυθμό. Οι μηχανές αυτές εξελίχθηκαν, από τις πρώτες διατάξεις που κάποτε μετέτρεψαν τους εκβολείς ελαστικών, στις σύνθετες μονάδες παραγωγής τήγματος που χρησιμοποιούνται τώρα. Οι περισσότεροι εκβολείς που είναι σε χρήση είναι μονοκόχλιοι (single-screw extruders). Οι μηχανές με δύο (twin-screw) ή πολλαπλούς κοχλίες (multiple-screw) είναι πιο πρόσφατη εξέλιξη [22-24].

Επίσης υπάρχουν εκβολείς για πιο ειδικές εφαρμογές όπως ο εκβολέας ελαστικού τήγματος (elastic melt extruder) και η γραναζωτή αντλία (gear pump).



Σχήμα 1.6 Κύρια τμήματα εκβολέα

Η λειτουργία των περισσότερων εκβολέων γίνεται με την κάθοδο των πολυμερών υπό μορφή κόκκων,σκόνης ή φολιδίων από τη χοάνη τροφοδοσίας στο άνοιγμα μεταξύ του περιστρεφόμενου κοχλία (screw) και του θερμαινόμενου κυλίνδρου (barrel).Το πολυμερές μεταφέρεται προς τα εμπρός,συμπιέζεται και τήκεται και τελικά υπό μορφή τήγματος περνά μέσα από τη μήτρα εκβολής όπου παίρνει το κατάλληλο σχήμα προτού εξέλθει και στερεοποιηθεί με ψύξη στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1.7 Κοχλίας εκβολής

Ο κοχλίας περιστρέφεται από το σύστημα μετάδοσης κίνησης που αποτελείται από ένα κινητήρα (motor) και ένα κιβώτιο ταχυτήτων (gear box) για τον έλεγχο των στροφών του κοχλία. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης εξασφαλίζει τις απαιτήσεις της διάταξης σε μηχανική ενέργεια. Η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια μιας διάταξης εκβολής αυξάνεται όταν:

- Αυξάνεται η ογκομετρική παροχή εξόδου
- Αυξάνεται η διάμετρος του κυλινδρικού σώματος
- Αυξάνεται το μήκος του κοχλία και
- Απαιτείται υψηλή ογκομετρική παροχή εξόδου σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι απαιτήσεις σε μηχανική ενέργεια επίσης εξαρτώνται από τον τύπο της πολυμερικής ρητίνης και το σχεδιασμό της μήτρας. Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας αποτελείται από θερμαντικά στοιχεία ηλεκτρικής αντίστασης (heating elements), σύστημα ψύξης στην περιοχή της τροφοδοσίας και έναν αριθμό θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία είναι συνδεδεμένα με τους ρυθμιστές θερμοκρασίας οι οποίοι ενεργοποιούν τα θερμαντικά ή ψυκτικά στοιχεία ώστε να διατηρηθεί το επιθυμητό θερμοκρασιακό προφίλ του εκβολέα. Κατά την περιστροφή του ο κοχλίας δέχεται μια ώθηση από το πολυμερικό τήγμα προς το πίσω μέρος του εκβολέα. Για το λόγο αυτό υπάρχουν τα έδρανα αντίθλιψης (thrust bearing) που λειτουργούν για την απόσβεση αυτής της δράσης. Το κύριο σώμα της διάταξης εκβολής αποτελείται από τον κύλινδρο (barrel) και τον κοχλία (screw).

Ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και η εσωτερική επιφάνεια είναι ειδικά επεξεργασμένη για να έχει αντίσταση στην τριβή και στη διάβρωση.Η εσωτερική διάμετρος του κυλίνδρου είναι μια σημαντική παράμετρος που καθορίζει το μέγεθος και τη δυναμικότητα του εκβολέα. Με τη βοήθεια του ηλεκτροκινητήρα (motor) ο κοχλίας περιστρέφεται αξονικά μέσα στον κύλινδρο,προωθώντας το πολυμερές που τροφοδοτείται μέσω της χοάνης τροφοδοσίας (hopper).

Κατά τη διαδρομή προς την έξοδο το προϊόν τήκεται. Το τήγμα οδηγείται σε μια πλάκα όπου βρίσκονται στερεωμένα μεταλλικά δισκία με διάφορα ανοίγματα, που παίζουν το ρόλο του φίλτρου. Συγκρατούν δηλαδή ακαθαρσίες και ξένα σώματα που μπορεί να βρίσκονται μέσα στο πολυμερές.Μετά το φίλτρο, το τήγμα του πολυμερούς οδηγείται στην κεφαλή του εκβολέα και στη συνέχεια βγαίνει από τη μήτρα (die), έχοντας πάρει τη μορφή που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε. Πρέπει να σημειωθεί ότι, μετά την έξοδο από τον εκβολέα, το μορφοποιημένο τήγμα του πολυμερούς πρέπει να σταθεροποιηθεί [24].

<u>Η τήξη συντελείται από τους ακόλουθους μηχανισμούς:</u>

- Με τη μεταφορά θερμότητας από τα θερμαντικά στοιχεία
- Με την διάτμηση η οποία προκαλείται από την κίνηση του κοχλία.

▪ . ***<u>Κύλινδρος του εκβολέα</u>***

Η εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του σώματος ενός εκβολέα αποτελεί αφ' ενός μια επιφάνεια για ανάπτυξη διάτμησης και αφ' ετέρου για μετάδοση θερμότητας. Ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο (L/D) είναι μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού. Σαν μήκος θεωρείται το ενεργό, δηλαδή, η απόσταση από το χωνί τροφοδοσίας μέχρι το φίλτρο, ενώ σαν διάμετρος θεωρείται η εσωτερική διάμετρος του κυλίνδρου. Ο λόγος L/D είναι ενδεικτικός της διατιθέμενης επιφάνειας για εναλλαγή θερμότητας και ανάμειξης που πρέπει να υποστεί το πολυμερές. Οι συνηθισμένοι λόγοι L/D σε εκβολείς για θερμοπλαστικά υλικά κυμαίνονται από 16/1 μέχρι 24/1. Το σώμα ενός εκβολέα μπορεί να θερμαίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις ή με επαγωγικό ρεύμα, είναι όμως δυνατό να θερμαίνεται και μέσω κελύφους που κυκλοφορεί λάδι ή άλλο θερμαντικό ρευστό. Η ηλεκτρική θέρμανση έχει το πλεονέκτημα της γρήγορης απόκρισης, του θερμοκρασιακού ελέγχου κατά ζώνες και δεν συνεπάγεται περιορισμούς ως προς το ύψος της επιθυμητής θερμοκρασίας όπως συμβαίνει με το ρευστό. Επιπλέον τα ηλεκτρικά στοιχεία θέρμανσης μπορούν να κατασκευασθούν σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών, σχημάτων και ηλεκτρικής ισχύος [22].

Οι εκβολείς που θερμαίνονται με ηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να ψύχονται με κυκλοφορία αέρα ή νερού. Η απομάκρυνση θερμότητας είναι βασική απαίτηση, όταν υπάρχουν κίνδυνοι από την υπερθέρμανση της ρητίνης λόγω τριβών. Οι μηχανές με μεγαλύτερο μήκος έχουν και μεγαλύτερη επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας και προτιμώνται για πιο δύστηκτα πολυμερή. Στους περισσότερους κυλίνδρους ανοίγονται κάθετες οπές για θερμοστοιχεία (thermocouples) που ανιχνεύουν και ελέγχουν τη θερμοκρασία τους. Οι κύλινδροι σχεδιάζονται για ελάχιστη διαστολή στη μέγιστη πίεση λειτουργίας τους, η οποία είναι 5000psi (34,45MPa), και έχουν ελάχιστη πίεση θραύσης 10000psi (68,9MPa). Οι ακριανές φλάντζες μπορούν να προσαρμοστούν στον κύλινδρο με βίδες ή με shrink and wedge συνδέσμους σχεδιασμένους να παραλαμβάνουν την εσωτερική πίεση των κυλίνδρων. Οι κύλινδροι κατασκευάζονται από χοντρό κραματωμένο χάλυβα. Είναι πλέον καθιερωμένο ο κύλινδρος να επενδύεται με σκληρό κράμα με βάση το κοβάλτιο, για να τον κάνει ανθεκτικό στην τριβή και στις χημικές αντιδράσεις. Υπάρχουν μερικοί κύλινδροι που φτιάχνονται ακόμα από χάλυβα που μπορεί να σκληρυνθεί με νιτριδίωση (εναζώτωση). Οι νιτριδιωμένοι κύλινδροι έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από τους επιμεταλλωμένους. Μερικά υλικά είναι πολύ διαβρωτικά και απαιτούν κυλίνδρους από ειδικά κράματα όπως Hastelloy ή Z-nickel. Οι απαιτήσεις ακρίβειας του κυλίνδρου είναι ότι το ολικό σφάλμα ευθυγράμμισης μετά από όλες τις μηχανουργικές κατεργασίες πρέπει να είναι μικρότερο από το μισό της απόστασης κυλίνδρου-κοχλία. Αυτό κυμαίνεται από 0,002 για μηχανές 2 ιντσών (5,08 cm) έως 0,010 για μηχανές 6 ιντσών (15,24 cm). Στις σύγχρονες μηχανές οι κύλινδροι είναι

εξοπλισμένοι με έναν αεραγωγό για να εξαερίζεται το πολυμερές. Ο αεραγωγός μπορεί να ταπώνεται όταν ο εξαερισμός δεν είναι απαραίτητος.

- .***Κινητήρας***

Ένας εκβολέας πρέπει να περιλαμβάνει έναν κινητήρα ρυθμιζόμενης ταχύτητας περιστροφής, εφ' όσον απαιτείται λειτουργία με διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής και πολυμερή διαφόρων χαρακτηριστικών επεξεργασίας. Για την ρύθμιση της ταχύτητας εφαρμόζονται τόσο μηχανικά όσο και ηλεκτρικά συστήματα [21].

- Μηχανικά: Για μηχανική ρύθμιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα τροχαλίας-ιμάντα. Η μηχανική ρύθμιση εφαρμόζεται σε εκβολείς που απαιτούν ισχύ κινητήρα άνω των 25 HP.
- Ηλεκτρικά: υπάρχουν δύο τρόποι ηλεκτρικής ρύθμισης της ταχύτητας. Ο ένας εφαρμόζει κινητήρα συνεχούς ρεύματος μεταβλητής ταχύτητας και ο άλλος κινητήρας εναλλασσόμενου σε συνδυασμό με μια μαγνητική αρπάγη.

Και οι δύο παραπάνω τρόποι δίνουν ακρίβεια στη ρύθμιση για μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων απ' ότι οι μηχανικά ρυθμιζόμενοι κινητήρες.

- .***Κιβώτιο ταχυτήτων (GEARBOX)***

Τα κιβώτια ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται στους μονοκόχλιους εκβολείς είναι εδώ και πολλά χρόνια, σχεδόν αποκλειστικά, μονάδες άμεσης μετάδοσης (direct-drive units) παρά μειωτήρες ατέρμονα κοχλία (wormgear reducers). Τα γρανάζια έχουν είτε ελικοειδή οδόντωση, είτε τύπου ψαροκόκαλου (herringbone type) για ελάχιστη φθορά κατά τη μέγιστη μεταφορά ροπής. Τα κιβώτια ταχυτήτων είναι σταθερά ρυθμισμένα καθώς οι εκβολείς λειτουργούν γενικά για βδομάδες χωρίς διακοπή.

Οι σχέσεις μετάδοσης των κιβωτίων κυμαίνονται από 6:1 έως 12:1 ανάλογα και με τη βασική ταχύτητα του κινητήρα και τις απαιτήσεις ροπής για το κατεργαζόμενο πολυμερές. Είναι πάντα πλεονεκτικότερο να χρησιμοποιείται το κιβώτιο ταχυτήτων στην κλίμακα όπου ο

κινητήρας λειτουργεί σε υψηλότερες ταχύτητες, τόσο για καλύτερο έλεγχο, όσο και για πιο αποδοτική λειτουργία του κινητήρα.

- .***Πίνακας ελέγχου εκβολέα (CONTROL CABINET)***

Τα όργανα ελέγχου για τον κινητήρα και για τη θερμοκρασία του κυλίνδρου είναι τοποθετημένα σε μια καμπίνα (control cabinet). Μερικές φορές η καμπίνα είναι ανεξάρτητη μονάδα τοποθετημένη κοντά στην μήτρα, αλλά τελευταία συνηθίζεται να προσαρμόζεται στην ίδια βάση με τον εκβολέα. Τα χειριστήρια ελέγχου της θερμοκρασίας μπορούν να επιλεχθούν ανάμεσα σε διάφορους τύπους ανάλογα με τις ανάγκες της μηχανής και τον βαθμό πολυπλοκότητας της εγκατάστασης παραγωγής.

- .***Πρόσδεση κεφαλής***

Η κεφαλή-έξοδος του εκβολέα είναι το μέρος όπου προσαρμόζονται οι μήτρες εκβολής. Υπάρχουν διάφορες δυνατότητες για την προσαρμογή των κεφαλών στον κύλινδρο. Η απλούστερη διευθέτηση είναι να βιδωθεί η κεφαλή απ' ευθείας στη φλάντζα του κυλίνδρου. Αυτός ο τρόπος απαιτεί προσεκτικό χειρισμό της μήτρας για την ασφαλή απομάκρυνσή της κατά την διάρκεια των εργασιών καθαρισμού.

1.4. ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΜΕ ΚΕΦΑΛΗ ΑΡΑΧΝΗΣ

Στην βιομηχανία παραγωγής πλαστικών σωλήνων συναντάμε πολλούς τύπους κεφαλών αράχνης. Τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν τον τύπο της κεφαλής αναφέρονται κυρίως στα πόδια της αράχνης και έχουν να κάνουν με:

- Την γεωμετρία των ποδιών
- Τον αριθμό των ποδιών
- Τον αριθμό των δακτυλίων που βρίσκονται τα πόδια
- Το μέγεθος των δακτυλίων της αράχνης

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 1.8, Σχήμα 1.9 και Σχήμα 1.10) βλέπουμε λίγα παραδείγματα της ποικιλίας των κεφαλών αράχνης που συναντάμε στην βιομηχανία.

Σχήμα 1.8 Διπλή κεφαλή αράχνης

Σχήμα 1.9 Μονή κεφαλή αράχνης

Σχήμα 1.10 Διάφορα μεγέθη κεφαλών αράχνης

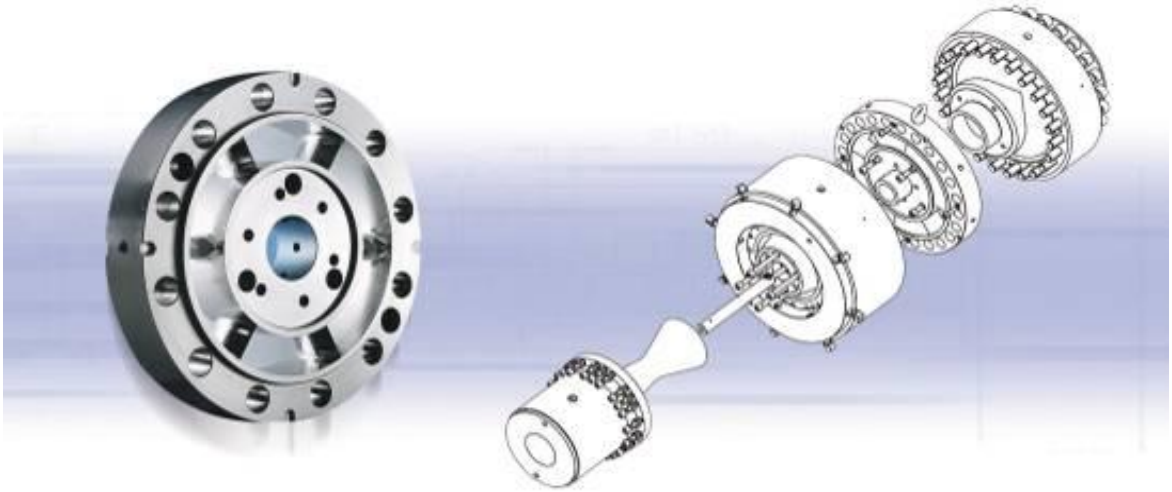
Επίσης, ποικίλουν τα μεγέθη και η γεωμετρία της ίδιας της μήτρας (Σχήμα 1.11 και Σχήμα 1.12).

Αυτό συμβαίνει κυρίως για δύο λόγους:

a) Έχουμε διαφορετικές απαιτήσεις κάθε φορά στο μέγεθος και την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος.

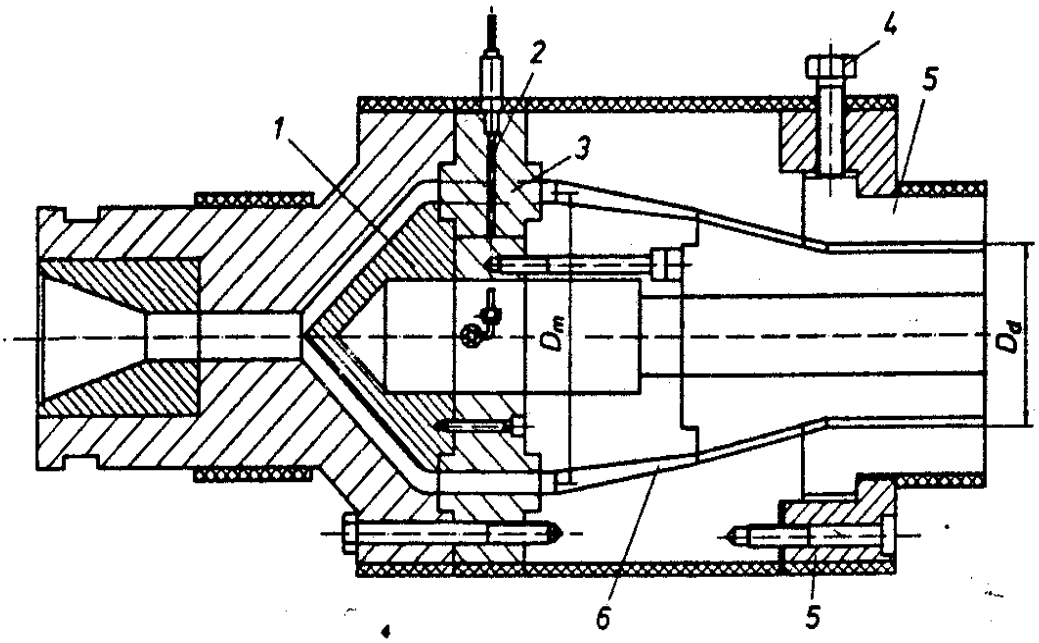
b) Προσπάθεια αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν κατά την παραγωγική διαδικασία. Αυτά έχουν να κάνουν κυρίως με την αντοχή της μήτρας και με τις ατέλειες που προκύπτουν στο παραγόμενο προϊόν λόγω της ύπαρξης της κεφαλής αράχνης.

Σχήμα 1.11 Τμήματα μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης



Σχήμα 1.12 Συναρμολόγηση μήτρας εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης

Στο Σχήμα 1.13 φαίνεται μια κεφαλή κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη και ορισμένα μέρη της.



Σχήμα 1.13 Τομή κεφαλής κεντρικής τροφοδοσίας με αράχνη

1) κώνος αρσενικού κεφαλής,
2) αράχνη,

3) πόδι αράχνης,
4) κοχλίας κεντραρίσματος,
5) δακτύλιος συγκράτησης μήτρας,
6) ζώνη χαλάρωσης,

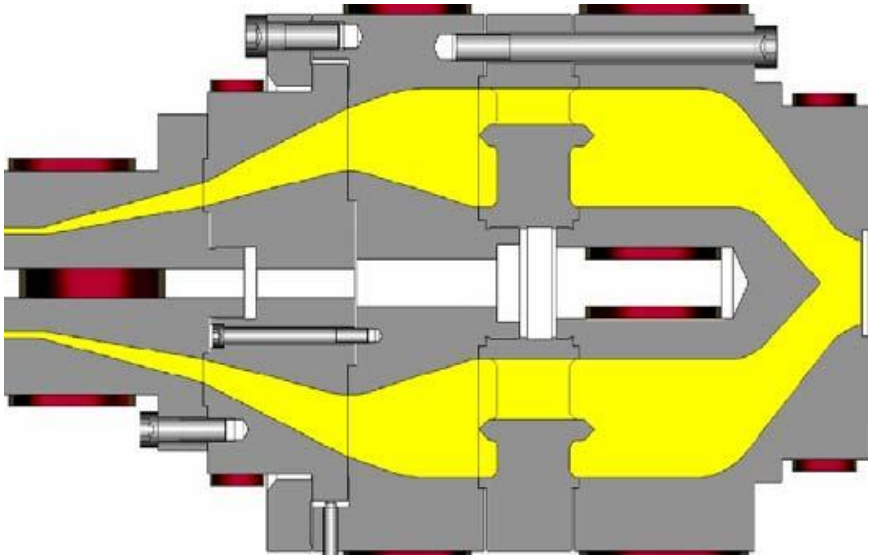
D_m: μέση διάμετρος της αράχνης,

D_d: εξωτερική διάμετρος της μήτρας

➢ ***<u>Ροή υλικού μέσα από την μήτρα</u>***

Το ρεύμα του τήγματος πού παρέχει ο εκβολέας σε ένα κυλινδρικό κανάλι ροής, μετασχηματίζεται σε μια δακτυλιοειδή ροή. Το τήγμα εκτρέπεται στη ζώνη της αράχνης σε ξεχωριστά ρεύματα και ρέει γύρω από τα πόδια της αράχνης. Ακολουθεί η συγκλίνουσα περιοχή του πυρήνα στην οποία τα ξεχωριστά ρεύματα ξαναενώνονται. Στο τέλος βρίσκεται η μήτρα με τα παράλληλα τοιχώματα. Ο λόγος της διαμέτρου της αράχνης προς τη διάμετρο εξόδου για κεφαλές σωλήνων είναι συνήθως 1,4 -1,6 για PVC και 2 για PE, ωστόσο αυτές οι τιμές εξαρτώνται και από τη διάμετρο της μήτρας [24].

Τα βασικά τμήματα της κεφαλής, όπως η στήριξη της αράχνης και ο δακτύλιος εξόδου είναι γενικά εναλλάξιμα ώστε μια κεφαλή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες γεωμετρίες. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη ροή στη μήτρα, αυτή μπορεί να μετακινηθεί ακτινικά με τη βοήθεια κοχλιών κεντραρίσματος που είναι τοποθετημένοι περιφερειακά. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένας δακτύλιος στήριξης της μήτρας.



Σχήμα 1.14 Ροή πολυμερούς σε μήτρα εκβολής πλαστικού σωλήνα με κεφαλή αράχνης

➢ ***Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα***

Οι κεφαλές με αράχνη ήταν οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες στο παρελθόν επειδή λόγο της κεντρικής τροφοδοσίας τους επιτρέπουν μια καλή διανομή του τήγματος ανεξάρτητα από τις συνθήκες λειτουργίας.

Ωστόσο έχουν το μειονέκτημα ότι τα πόδια της αράχνης αφήνουν σημάδια ροής. Αυτά δεν είναι πάντα εμφανή όπως τοπικές στενώσεις και ίχνη αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν στη δομή του προϊόντος δημιουργώντας μηχανικά αδύναμες περιοχής.

Ο υψηλός βαθμός προσανατολισμού του τήγματος στην περιοχή των ποδιών της αράχνης είναι μεταξύ άλλων ένας λόγος για τη δημιουργία σημαδιών ροής. Ο προσανατολισμός δημιουργείται από της υψηλές κλίσεις της ταχύτητας όταν το τήγμα προσκολλάται στα τοιχώματα και ειδικά λόγω της μεγάλης επέκτασης μέρους του τήγματος κοντά στο τέλος των ποδιών της αράχνης.

Διαφορές στη πυκνότητα λόγω διαφορών στη θερμοκρασία του τήγματος και της αράχνης μπορούν επίσης να παίξουν έναν ρόλο.

Προκειμένου να μειώσουμε το σημάδια ροής, τα οποία είναι αναπόφευκτα με τη χρήση κεφαλών με αράχνη, υπάρχουν διάφορες τεχνικές.

- Αύξηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου παραμονής της μάζας του υλικού στην κεφαλή.
- Ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή στη ζώνη της αράχνης
- Δημιουργώντας μια ομοιόμορφη δομή σε ολόκληρη την περιφέρεια της κεφαλής προσανατολίζοντας τα μόρια κατά μήκος και ανάμεσα στα πόδια της αράχνης.
- Αλλαγή της γεωμετρίας των ποδιών της αράχνης.

Για να επιτευχθεί αυτό εφαρμόζονται διάφορες λύσεις, στην πράξη όμως, αυτό που γίνεται σχεδόν πάντα, είναι ο εξαναγκασμός του τήγματος να ακολουθήσει μια έντονα συγκλίνουσα ροή μετά από τα πόδια της αράχνης. Οι κεντρικά τροφοδοτούμενες κεφαλές με αράχνη πρέπει να αντέχουν σε πιέσεις άνω των 600 bar διότι τα πολυμερικά τήγματα κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορούν να αναπτύξουν πιέσεις αυτής της τάξεως. Γι' αυτό τα πόδια της αράχνης πρέπει να διαστασιολογούνται έτσι ώστε να αντέχουν με ασφάλεια στις δυνάμεις που προκύπτουν από τις υψηλές πιέσεις. Από πλευρά μηχανικής αντοχής οι εξωτερικές διάμετροι των κεφαλών με αράχνη δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 700mm.

➢ ***Αρχές σχεδιασμού κεφαλής με αράχνη***

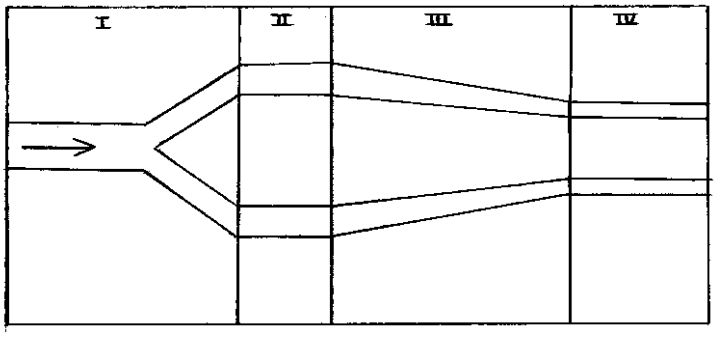
Στις κεφαλές με αράχνη υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές ζώνες οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του καναλιού ροής της κεφαλής και φαίνονται στο Σχήμα 1.15:

α. Η ζώνη εκτροπής (I), στην οποία το τήγμα που εξέρχεται από τον εκβολέα, εκτρέπεται από τον άξονα εκβολής και διανέμεται μέσω σε μια δακτυλιοειδή διατομή.

β. Η ζώνη της αράχνης (II), στην οποία το αρσενικό της μήτρας συγκρατείται από τα πόδια της αράχνης.

γ. Η ζώνη χαλάρωσης (III), όπου η ροή γίνεται ομοιόμορφη κατά μήκος του καναλιού ροής.

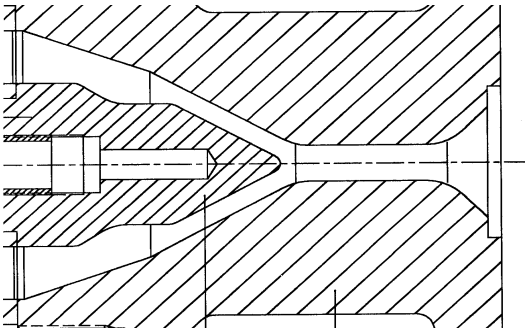
δ. Η παράλληλη ζώνη της μήτρας (IV), όπου το εκβαλλόμενο προϊόν διαμορφώνεται στις επιθυμητές διαστάσεις.



Σχήμα 1.15 Ζώνες του καναλιού ροής της κεφαλής

Η επιλογή των βασικών διαστάσεων της κεφαλής και της μήτρας εξαρτάται από το υλικό της κατεργασίας και από τις επιθυμητές διαστάσεις του τελικού προϊόντος.

- Η ζώνη εκτροπής του τήγματος περιλαμβάνει τον λαιμό της κεφαλής και τον κώνο του αρσενικού της κεφαλής. Πριν από τον κώνο το τήγμα διέρχεται από μια ευθύγραμμη περιοχή κυκλικής διατομής στον λαιμό της κεφαλής όπου του προσδίδεται θερμότητα, και οδηγείται ομαλά στον κώνο. Τέλος, στην άλλη άκρη της κεφαλής υπάρχει ένα κωνικό τμήμα που αποτελεί την είσοδο της κεφαλής.



Σχήμα 1.16 Ζώνη εκτροπής του τήγματος

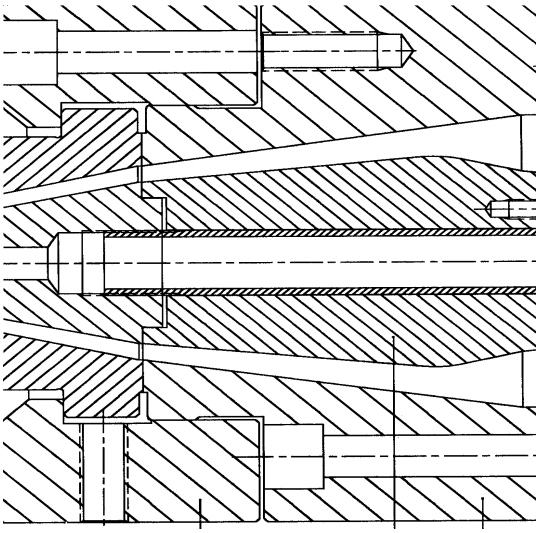
- Στις κεφαλές με αράχνη η διάμετρος D_m και η διατομή στην περιοχή της αράχνης σχεδιάζονται μεγαλύτερες από διάμετρο Dd της μήτρας και τη διατομή εξόδου. Αυτό επιτρέπει στο τήγμα που έχει χωριστεί στην περιοχή της αράχνης να επανενωθεί γιατί έτσι μόνο προκύπτει η συγκλίνουσα περιοχή. Επιπλέον με την ίδια κεφαλή μπορούμε να παράγουμε σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων αλλάζοντας μόνο τη διάμετρο της μήτρας. Ο σκοπός στον σχεδιασμό αυτής της ζώνης είναι να γίνουν τα πόδια της αράχνης με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν στις δυνάμεις λόγω της πίεσης και στις διατμητικές τάσεις και να

έχουν την ελάχιστη επίδραση στη ροή. Γι' αυτό οι ρεολογικοί και μηχανικοί παράγοντες είναι ιδιαίτερα διαπλεκόμενοι σε αυτή τη ζώνη.

Έτσι τα πόδια της αράχνης :

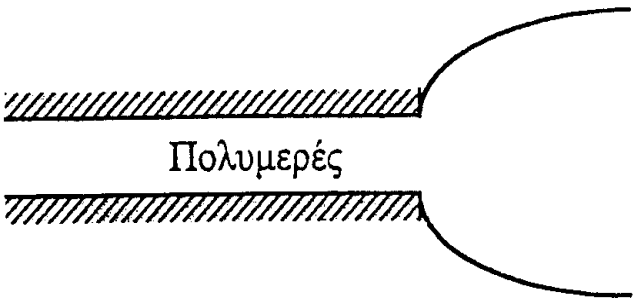
- ✓ Δεν πρέπει να είναι μακρύτερα από 30-80mm,
- ✓ παχύτερα από 9-12mm και
- ✓ αριθμός τους να αυξάνεται περίπου με το τετράγωνο της διαμέτρου.

- Η ζώνη χαλάρωσης ξεκίνα αμέσως μετά την αράχνη και καταλήγει στην παράλληλη περιοχή της μήτρας. Όπως προαναφέρθηκε η περιοχή αυτή πρέπει να είναι συγκλίνουσα. Στην πράξη η κλίση αυτή μπορεί να φτάσει τις 30° στην περιοχή της μήτρας στην περίπτωση εκβολής PE χωρίς να επηρεάζεται το υλικό.



Σχήμα 1.17 Ζώνη χαλάρωσης

- Στην παράλληλη ζώνη της μήτρας το τήγμα του πολυμερούς διογκώνεται εξερχόμενο από τη μήτρα (swelling) κυρίως σε πολυμερή με μεγάλο ιξώδες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.18.



Σχήμα 1.18 Διόγκωση του πολυμερούς κατά την έξοδό του από τη μήτρα

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ανακατανομή των ροϊκών γραμμών κατά την έξοδο του ρευστού (Νευτωνική διόγκωση, μέχρι 19%), στην επίδραση της μνήμης εξόδου, στην απελευθέρωση κάθετων τάσεων στην έξοδο και στη θερμική διόγκωση. Ωστόσο, η εξωτερική διατομή της μήτρας συνήθως σχεδιάζεται μεγαλύτερη από την επιθυμητή διατομή του σωλήνα, έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η συρρίκνωση του υλικού.

➢ ***<u>Κριτήρια σωστού σχεδιασμού και υλικά για κεφαλές εκβολής</u>***

Οι βασικές διαστάσεις του συνολικού καναλιού ροής μέσα στην κεφαλή οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν, επιλέγονται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Επαρκής όγκος του καναλιού ροής για να αποφευχθούν εσωτερικές τάσεις στον σωλήνα εξασφαλίζοντας κατάλληλο χρόνο παραμονής του τήγματος μέσα στην κεφαλή. Εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος παραμονής του συγκεκριμένου υλικού.
- Όταν επιλέγονται οι διαστάσεις δεν πρέπει να υπερβαίνονται οι μέγιστες αναλογίες των διατομών προκειμένου να αποφευχθούν υπερβολικές πιέσεις οπισθέλκουσας. Οι τελευταίες μειώνουν την παροχή και επομένως τον ρυθμό παραγωγής. Επίσης και το ελάχιστο αυτών των αναλογιών πρέπει να τηρείται αλλιώς θα δημιουργούνται ορατές γραμμές ροής.
- Απότομες αλλαγές της διαμέτρου του καναλιού ροής δημιουργούν περιοχές στροβιλισμού της ροής και πρέπει να αποφεύγονται. Επίσης πρέπει να αποφεύγονται ασυνέχειες, εμπόδια και ανωμαλίες στη ροή του υλικού.
-

➢ ***<u>Τα υλικά για κεφαλές εκβολής πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις</u>***

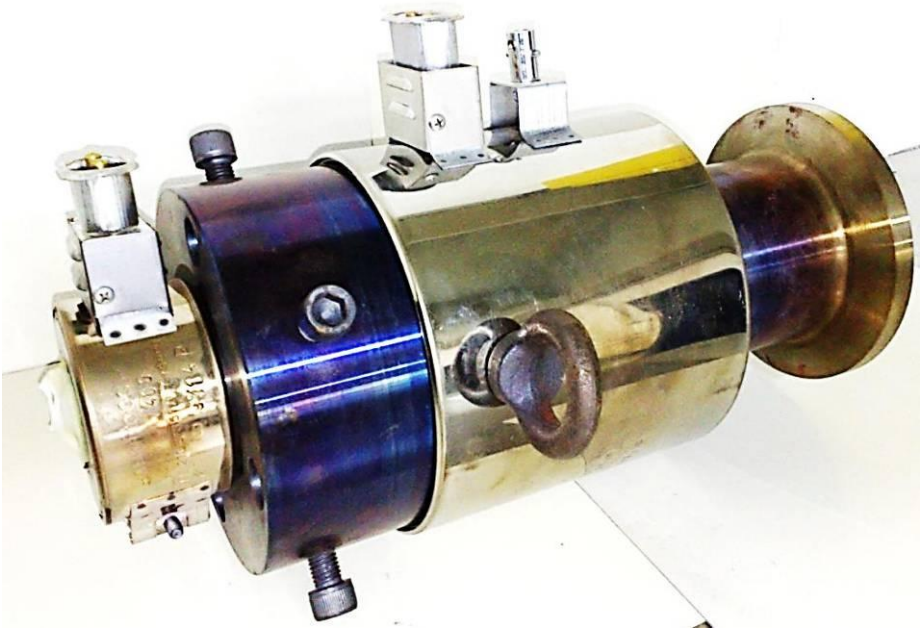
- Να είναι εύκολα κατεργάσιμα
- Να είναι ανθεκτικά σε πίεση, θερμοκρασία και φθορά
- Να έχουν επαρκή αντοχή και στιβαρότητα
- Να έχουν επαρκή επιφανειακή σκληρότητα
- Να μπορούν εύκολα να φινιριστούν σε μια ικανοποιητική επιφάνεια (χωρίς πορώδες)
- Να ανταποκρίνονται επαρκώς σε μια απλή θερμική καταπόνηση
- Να έχουν ελάχιστη τάση στρέβλωσης και αλλαγής διαστάσεων κατά τη θερμική τους καταπόνηση
- Να είναι ανθεκτικά σε χημική διάβρωση
- Να παρέχουν δυνατότητα επιμετάλλωσης
- Να έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα
- Να μην έχουν προένταση από παραμένουσες τάσεις

➢ ***<u>Επίσης, για να κάνουμε σωστή επιλογή πρέπει να λάβουμε υπόψη τα παρακάτω δεδομένα</u>***

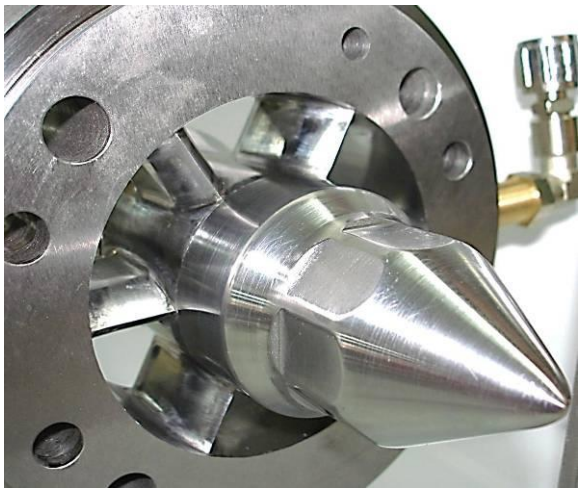
- Το υλικό της κατεργασίας και τον τύπο του πολυμερούς που θα μορφοποιηθεί με εκβολή
- Τη φύση και το μέγεθος των μηχανικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά την εκβολή του πολυμερούς
- Τις κατεργασίες που θα πραγματοποιηθούν για την κατασκευή της μήτρας.
- Τις θερμικές κατεργασίες και καταπονήσεις που θα υποστεί το υλικό της μήτρας και κατά πόσο το επηρεάζουν.

1.5. ΜΗΤΡΑ ΕΚΒΟΛΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

Παρακάτω, παρουσιάζουμε τη γενική διάταξη της μήτρας εκβολής του εργαστηρίου του Τομέα των κατεργασιών αποτελούμενη από όλα τα τμήματά της, καθώς και την αράχνη κεφαλής, όπου φαίνεται η γεωμετρία των ποδιών της.

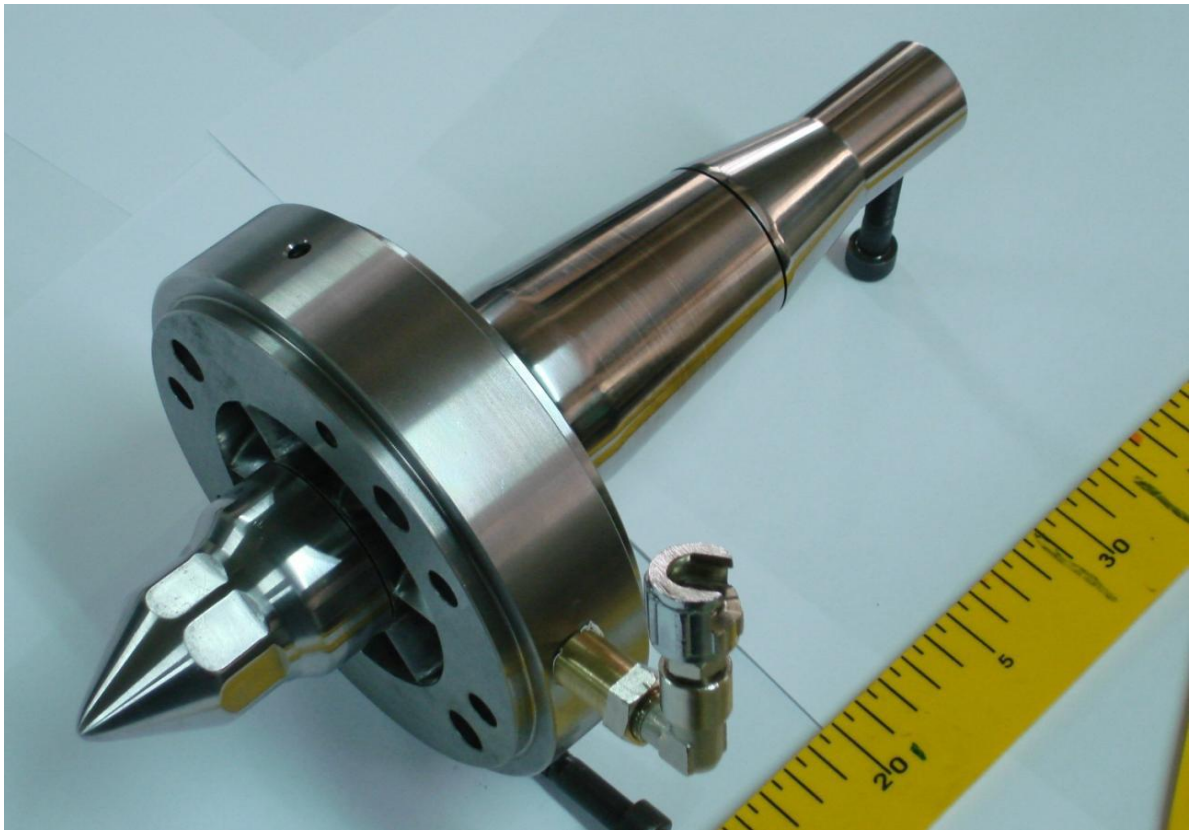


Σχήμα 1.19 Συνολική άποψη μήτρας εκβολής εργαστηρίου



Σχήμα 1.20 Αράχνη κεφαλής και κώνος αρσενικού κεφαλής

Η μήτρα εκβολής του εργαστηρίου, παράγει πλαστικό σωλήνα (Φ 32) από πολυαιθυλένιο.



Σχήμα 1.21 Αράχνη κεφαλής

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1) Καραγιαννίδης Γ., Σιδερίδου Ε.,*'Χημεία των Πολυμερών',* Β' Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη (2006).

2) Osswald T.A., Menges G., *'Materials Science of Polymers for Engineers',* Hanser Publisher, New York. 2003.

3) Hosler, D., Burkett, S. L., and Tarkanian, M. J., *Science*, **284(5422)**, 1988, (1999).

4) Oesper E., Ralph E., *Journal of Chemical Education* **6**: 432 – 440 (1929).

5) Hyatt, J. W., Hyatt I. J., U.S. Pat. 105,338 (1870).

6) Μανωλάκος Δ., '*Σημειώσεις διαλέξεων στα πλαίσια του μαθήματος Προηγμένα Υλικά'* Σχολής Μηχαν.Μηχανικών Ε.Μ.Π. (2003).

7) Cowie, J.M.G. *'Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials,* Chapman and Hall, 2nd edition (1991).

8) Odian, G., *'Principles of Polymerization'* (4th ed.). New York: Wiley-Interscience, (2004).

9) Cowie, J. M. G.; Arrighi, V., '*Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials'* (3rd ed.). Scotland: CRC Press, (2008).

10) Likhtman, A.E., McLeish, T.C.B., *Macromolecules* **35** 6332–6343, (2002).

11) Doi, M., Edwards, S.F. *'The Theory of Polymer Dynamics'*, Clarendon Press, Oxford, (1986).

12) Stockmayer, W. H., Fixman, A., *Annals of the New York Academy of Sciences,* **57,** issue 4 Branched Mole, pp. 334-352 (1988).

13) Andruzzi, F., Lupinacci, D., Magagnini, P.L., *Macromolecules*, **13**, 15–18, (1980).

14) Erman, B., Flory, P.J., Hummel, J.P., *Macromolecules*, **13**, 86-90, (1980).

15) Pispas, S., Poulos, Y., Hadjichristidis, N., *Macromolecules*, **31**, 4177–4181, (1998).

16) Tomalia, D.A., Baker, H., Dewald, J., Hall, M., Kallos, G., Martin, S., Roeck, J., Ryder, J., Smith P., *Polymer Journal* **17**, 270-283, (1985).

17) Pispas, S, Hadjichristidis, N, Macromolecules, **27,** 1891-1892, (1994).

18) Rubinstein, M. and Colby, R., '*Polymer Physics'*, Oxford University Press, (2006).

19) Callister, N. 'Materials Science and Engineering - An Introduction,' Wiley, (2007).

20) Ταραντίλη, Π.Α, *'Τεχνική των Πολυμερών'*, Ε.Μ.Π, (2004).

21) Vlachopoulos, J., Wagner, J.R., (eds.), *'The SPE Guide on Extrusion Technology and Troubleshooting'*, Society of Plastics Engineers, Brookfield CT (2001).

22) Μητσούλης Ε., *'Βασικές Αρχές Μορφοποίησης Πολυμερών'*, Ε.Μ.Π, (1999).

23) Chung, E., *'Extrusion of Polymers – Theory and Practice'*, Hanser Gardner Publishing, Inc., Cincinnati, Ohio (2000).

24) Rauwendaal, R., *'Polymer Extrusion'*, Hanser Publishers (2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, χωρίς αμφιβολία, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της. Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα “προσομοίωσης” της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού.

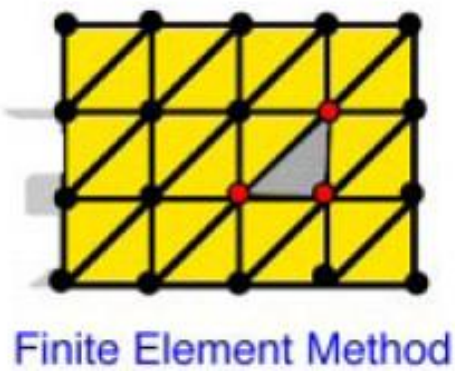
- Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού.

- Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Η κυρίαρχη μέθοδος CAE είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM).

2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η FEM έχει την άριστη ευελιξία στη αντιμετώπιση σύνθετης γεωμετρίας και ανώμαλων ορίων, που είναι και το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής. Αυτή η μέθοδος απαιτεί τον διαχωρισμό της φυσικής περιοχής σε πεπερασμένα στοιχεία. Οι μεταβλητές τομέων αντιπροσωπεύονται με τις συναρτήσεις μορφής και τις κομβικές τιμές σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Χρησιμοποίηση των υπόλοιπων τεχνικών ελαχιστοποίησης (ή, ισοδύναμα, 'variational' τεχνικές) όπως η μέθοδος Galerkin, οι διέπουσες εξισώσεις μετασχηματίζονται σε διακριτές μορφές. Για την τρισδιάστατη προσομοίωση της διαμόρφωσης με χύτευση, το ολικό σύστημα πινάκων που προκύπτει από τις αλγεβρικές εξισώσεις είναι συνήθως μεγάλο και σποραδικό, όποιος απαιτεί το μεγάλο υπολογιστική μνήμη και χρόνο CPU. Οι χρόνοι CPU μπορούν να υπολογιστούν ανάλογα με τον αριθμό πεπερασμένων στοιχείων στα πλέγματα και τους βαθμούς ελευθερίας (DOF) ανά κόμβο. Στα μεταβατικά προβλήματα, μια έκφραση πεπερασμένων στοιχείων για τα χρονικά παράγωγα χρησιμοποιείται χαρακτηριστικά από κοινού με τον διαχωρισμό πεπερασμένων στοιχείων [1-5].

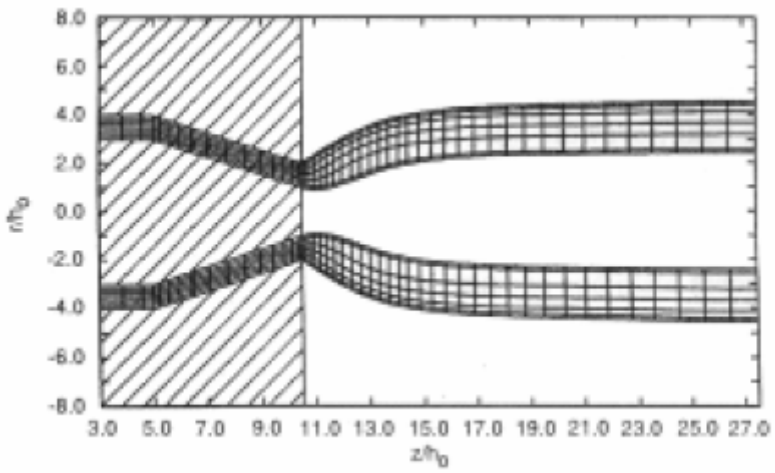
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά νέα τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση των προβλημάτων ροής ρευστών. Έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής στη δεκαετία του '60 μαζί με την εμφάνιση των ψηφιακών υπολογιστών τσέπης, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει γίνει η βάση για τα πιο εμπορικά δομικά δυναμικά προγράμματα και προγράμματα προσομοίωσης ροής ρευστών [1-7]. Η FEM είναι μια μέθοδος με περιοχές στην οποία ολόκληρη η γεωμετρία που μοντελοποιείται πρέπει να διαχωρίζεται στους κόμβους και τα στοιχεία. Το πλέγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 αντιπροσωπεύει τον διαχωρισμό που απαιτείται ώστε να μοντελοποιηθεί μια δισδιάστατη γεωμετρία με την FEM.



Σχήμα 2.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Αν και αρκετές διαφορετικές μέθοδοι είναι διαθέσιμες για να ληφθούν οι τελικές εξισώσεις, η μέθοδος Galerkin των σταθμισμένων υπολοίπων προτιμάται συνήθως στα προβλήματα ροής ρευστών. Μόλις δημιουργηθεί το πλέγμα, οι διαφορικές εξισώσεις κατεύθυνσης εκφράζονται σε ακέραια μορφή και ενσωματώνονται αριθμητικά για να προκύψει ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων. Λόγω της φύσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, έχει την δυνατότητα να μοντελοποιήσει πολύ πολύπλοκες μορφές. Μπορεί επίσης να παρέχει αρκετά ακριβείς λύσεις στις τοπικές μεταβλητές, όπως οι ταχύτητες ή οι πιέσεις των ρευστών, για μεγάλη ποικιλία προβλημάτων που περιλαμβάνουν μη γραμμικές ροές. Εντούτοις, οι υψηλότερης τάξης παράγωγες λύσεις, όπως οι κλίσεις της ταχύτητας, τείνουν να είναι λιγότερο ακριβείς [7-16]. Χωρίς σύνθετες προσαρμοστικές τεχνικές πλέγματος, η FEM είναι επίσης δύσκολο να χρησιμοποιηθεί για προβλήματα με κινητά στερεά όρια. Δεδομένου ότι οι εξισώσεις κατεύθυνσης προσεγγίζονται με τη Galerkin μέθοδο, έχουν ένα ορισμένο ποσό εγγενούς λάθους, ακόμη και χωρίς να πραγματοποιηθούν αριθμητικά λάθη, γεγονός το οποίο επιδρά σε όλο τον υπολογισμό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει να γίνει η FEM επισφαλής σε τελείως μη γραμμικές περιπτώσεις. Αν και αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί μερικώς από τις ειδικές ‘upwinding’ τεχνικές εν τούτοις αυξάνει το μέγεθος της υπολογιστικής προσπάθειας. Επιπλέον, δεδομένου ότι η λύση υπολογίζεται μόνο στους κόμβους και ο παράγων ταχύτητα πρέπει να ληφθεί υπόψη, η τροχιά των μορίων στην περιοχή ροής δεν επιτυγχάνεται εύκολα με την FEM.

Εντούτοις, η FEM χρησιμοποιείται εκτενώς κατά τη προσομοίωση διαδικασιών που δεν είναι καθόλου γραμμικές όπως η ροή των ιξωδοελαστικών υλικών. Παραδείγματος χάριν, στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η προβλεφθείσα διόγκωση κατά την εξώθηση του HDPE διαμέσου μιας συγκλίνουσας μήτρας. Ο Mitsoulis πρόβλεψε τη ροή διάφορων υλικών μέσω μητρών διαφορετικής γεωμετρίας χρησιμοποιώντας το μοντέλο K-BKZ. Τα αριθμητικά αποτελέσματά του προέκυψαν δεν αποκλίνουν σημαντικά από τα πειραματικά[16-18].



Σχήμα 2.2 Προβλεφθείσα διόγκωση κατά την εξώθηση του HDPE διαμέσου μιας συγκλίνουσας μήτρας.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει αποδειχθεί επίσης ιδανική για την προσομοίωση διαδικασιών πλήρωσης καλουπιών, προσανατολισμού ινών, συρρίκνωση και στρέβλωση λεπτών πλαστικών μερών. Η σημαντικότερη δυσκολία που προκύπτει κατά τη προσομοίωση διαδικασιών πλήρωσης καλουπιών (και άλλων διαδικασιών με κινούμενα όρια) είναι η απεικόνιση της παροδικά ελεύθερης επιφάνειας (ή στερεά κινούμενα όρια κατά τη μίξη). Το υλικό αλλάζει σχήμα συνεχώς καθώς ρέει και διαμορφώνεται μέσα στην κοιλότητα, καθιστώντας απαραίτητο να επαναπροσδιοριστεί η γεωμετρία της περιοχής ενδιαφέροντος μετά από κάθε διαδοχικό χρονικό βήμα. Ο επαναπροσδιορισμός του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων ή του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών είναι το πιο δύσκολο μέρος των προσομοιώσεων όσον αφορά προβλήματα κινούμενων ορίων και πολλές φορές καθιστά την προσομοίωση παράλογη.

Οι Kouba, Vlachopoulos, deLorenzi και Nied ανέπτυξαν μια τεχνική για να μοντελοποιήσουν την ‘membrane stretching’ κατά τη χύτευση με εμφύσηση και τη θερμοδιαμόρφωση. Αν και οι διαδικασίες είναι βασικά τρισδιάστατες, μπορούν να αντιπροσωπευθούν με δισδιάστατα στοιχεία σε μορφή ελάσματος προσανατολισμένα στον τρισδιάστατο χώρο.

Οι Tadmor, Broyer και Gutfinger χρησιμοποίησαν μια χωρική διαμόρφωση πεπερασμένων διαφορών για να επιλύσουν δισδιάστατα προβλήματα ροής σε γεωμετρικά σύνθετες μορφές. Χρησιμοποιώντας μια Hele-Shaw διατύπωση για να προσομοιώσουν την ροή, η μέθοδος

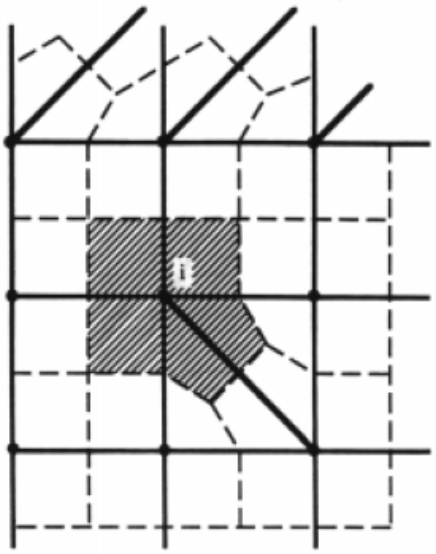
τους είναι εφαρμόσιμη σε ροές σε στενά διάκενα μεταβλητού πάχους, όπως η έγχυση σε καλούπια με λεπτά μέρη και ροών μέσα σε συγκεκριμένες μήτρες εξώθησης. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως ανάλυση ροής δικτύων (FAN), και εφαρμόζεται επιτυχώς σε νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα 'Eulerian' πλέγμα κελιών που καλύπτει την κοιλότητα ροής. Ένας παράγοντας πλήρωσης συνδέεται με κάθε κελί, δηλαδή ένας αριθμός που κυμαίνεται ανάμεσα στο μηδέν και στο ένα. Ένας μηδενικός παράγοντας πλήρωσης δηλώνει ένα άδειο κελί, και ένας παράγοντας πλήρωσης ίσος με ένα δηλώνει ένα κελί που είναι πλήρες με υλικό. δημιουργείται μια τοπική ισορροπία μάζας γύρω από κάθε κελί, που έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με άγνωστες παραμέτρους τις πιέσεις στο κέντρο των κελιών [15-18]. Η τοπική πίεση που προκύπτει από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η διανομή της ροής ανάμεσα στα κελιά, που με την σειρά της χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη ροή μέσα στην κοιλότητα ενημερώνοντας τους παράγοντες πλήρωσης των κελιών. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι απαιτούνται σχετικά λεπτά πλέγματα, ειδικά εάν υπάρχουν καμπύλα όρια στη γεωμετρία. Αυτό το μειονέκτημα μπορεί να υπερνικηθεί με την χρήση τελεστών πεπερασμένων διαφορών, αλλά αυτό καθιστά την προσομοίωση απαιτητική και δύσκολη στη χρήση.

Οι Osswald, Tucker, Wang και άλλοι τροποποίησαν την ανάλυση ροής δικτύων για να μοντελοποιήσουν την μη ισόθερμη ροή των μη νευτώνειων υγρών μέσα σε λεπτές τρισδιάστατες κοιλότητες χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία. Η τεχνική, η οποία είναι συνήθως γνωστή ως προσέγγιση ελέγχου όγκου (CVA), απαιτεί η τρισδιάστατη επιφάνεια σχηματοποίησης να διαιρείται σε πεπερασμένα στοιχεία τριών ή τεσσάρων κόμβων. Τα κελιά ή οι όγκοι ελέγχου προκύπτουν από τη σύνδεση του κέντρου μάζας των στοιχείων με το μέσο των πλευρών των στοιχείων. Κατά την εφαρμογή της ισορροπίας μάζας σε κάθε κελί, οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι οι ίδιες με εκείνες που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου Galerkin στην εξίσωση κατεύθυνσης για την πίεση. Αυτό επιτρέπει την χρήση των τυπικών τεχνικών συνδυασμού πεπερασμένων στοιχείων κατά την κατάστρωση του συστήματος των γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων.

Μια χαρακτηριστική διαμόρφωση των στοιχείων και του κομβικού ελέγχου όγκου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Στο σχέδιο οι συνεχόμενες γραμμές δηλώνουν πλευρές στοιχείων και οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα όρια ελέγχου όγκου. Το διαγραμμισμένο τμήμα αναπαριστά τον όγκο ελέγχου για τον κόμβο *i*. Αυτή η τεχνική

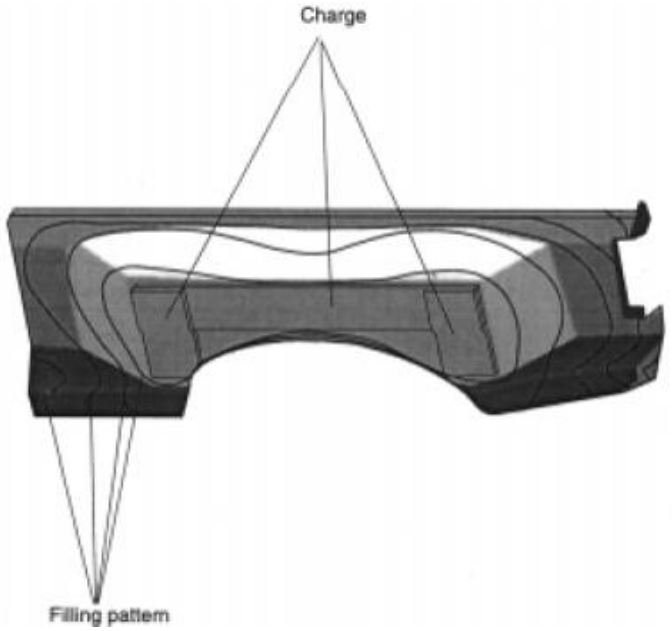
παραμένει ο κυρίαρχος τρόπος διαμόρφωσης της μοντελοποίησης διαδικασιών πλήρωσης μητρών όπως η συμπίεση και η έγχυση σε καλούπια.

Τα εμπορικά διαθέσιμα πακέτα λογισμικού χρησιμοποιούν στο σύνολο τους αυτήν την τεχνική για να περιγράψουν τα μέτωπα της ροής κατά τη διάρκεια της πλήρωσης μητρών. Σαν παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 ένα σχέδιο πλήρωσης μητρών κατά τη πλήρωση με συμπίεση ενός κομματιού SMC που αναπαριστάται με το πλέγμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών μέσα στο φορμαρισμένο με συμπίεση τμήμα του προφυλακτήρα (φτερό) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 και Σχήμα 2.5.

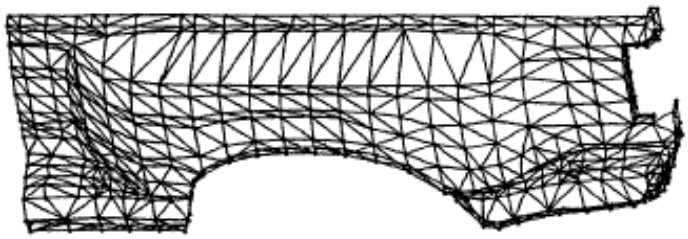


Σχήμα 2.3 Διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων/ όγκου ελέγχου

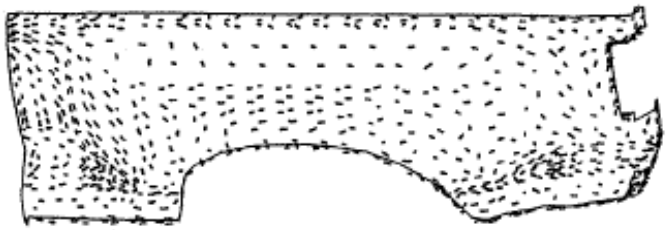
Τα προγράμματα προσομοίωσης πλήρωσης μητρών παρουσιάζουν συμφωνία σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα. Απαιτείται ακόμα μεγάλη έρευνα για την πρόβλεψη της πλήρωσης μητρών με έγχυση πολύ λεπτών προϊόντων [10-12]. Δεδομένου ότι η βιομηχανία μειώνει συνεχώς το πάχος των προϊόντων, αυτό το ζήτημα παραμένει μια κορυφαία ερευνητική προτεραιότητα στον τομέα της πλήρωσης με έγχυση.



Σχήμα 2.4 Προσομοίωση του σχεδίου πλήρωσης με συμπίεση μητρών κατά τη διάρκεια της σχηματοποίησης ενός φτερού SMC αυτοκίνητου



Σχήμα 2.5 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων φτερού αυτοκινήτου



Σχήμα 2.6 Πρόβλεψη προσανατολισμού των ινών κατά την πλήρωση με συμπίεση της μήτρας του φτερού αυτοκινήτου

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1) Bandyopadhyay, S., Layek, G.C. 2011 Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 16 (1), pp. 252-265

2) Grippo, L., Sciandrone, M. 2010 Optimization Methods and Software 25 (6), pp. 971-999

3) U. Schendel, Introduction to Numerical Methods for Parallel Computers, Ellis Horwood Limited, 1984

4) Marc Snir, MPI--the complete reference, Cambridge, Mass, 1998

5) C. T. Kelley, Iterative methods for linear and nonlinear equations, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995

6) Anne Greenbaum, Iterative Method for Solving Linear Systems, Society of Industrial and Applied Mathematics, 1997

7) Wolfgang Hackbusch, Iterative Solution of Large Sparse Systems of Equations, Springer-Verlag, 1994

8) The Finite Element Method, 4th ed., Vol. 1, O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, McGraw-Hill, London, 1989.

9) An Introduction to the Finite Element Method, 3rd ed., J. N. Reddy, McGraw-Hill, New York, 2006.

10) Introduction to Finite Elements in Engineering, 3rd ed., T. R. Chandrupatla and A. D. Belegundu, Prentice Hall, 2002.

11) Mitsoulis E, AZChE J., 32, 497 (1986).

12) Mitsoulis E and Heng F. L , Rheol. A&, 26, 414 (1987).

13) Tham N C and Mennig G, Rheol. Acta 40, 67–73, 2001

14) Bohme G. and Broszeit J, Theor. Comput. Fluid Dyn. 9 65–74, 1997

15) Bohme G. and Wunsch O., Arch. Appl. Mech. 67 167–78, 1997

16) Codina R. and Soto O. Int. J. Numer. Methods Eng. 46, 1559–73, 1999

17) Shojaei, A., Ghaffarian, S.R., Karimian, S.M.H., Composites Science and Technology 63 (13), pp. 1931-1948, 2003

18) Potente, H., Kurte, M., Ridder, H., International Polymer Processing 18 (2), pp. 115-121, 2003

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

3.1 ΡΗΞΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΡΗΞΗ

Η ρήξη των σωλήνων είναι στατιστικά μία από τις πιο συνήθεις περιπτώσεις αστοχίας, η οποία μπορεί να εμφανιστεί υπό διάφορες μορφές και να οδηγήσει στην εμφάνιση διάφορων παρενεργειών. Η σημασία της ρήξης οφείλεται στα διάφορα συνακόλουθα συμβάντα που μπορεί

να εμφανιστούν, ορισμένα από τα οποία μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες. Η απώλεια αντοχής και στιβαρότητας είναι οι τεχνικές επιπτώσεις της ρήξης των σωλήνων.

Κάθε υλικό έχει μία συγκεκριμένη αντίσταση σε ρήξη. Η ικανότητα ενός υλικού που φέρει εγκοπές να αντέξει ένα εφαρμοζόμενο φορτίο ονομάζεται ***αντοχή ρήξης.*** Ορισμένοι υποβοηθητικοί παράγοντες μπορεί να αυξήσουν την πιθανότητα ενδεχόμενης εμφάνισης ρήξης. Αυτοί οι παράγοντες ονομάζονται ***αυξητήρες τάσης.*** Οι εγκοπές και τα ελαττώματα που προϋπάρχουν στην επιφάνεια του υλικού μπορούν να παίξουν το ρόλο αυξητήρων τάσης, εντείνοντας έτσι την τάση και προκαλώντας συγκέντρωση τάσεων. Το αντικείμενο μελέτης που αφορά τη συμπεριφορά των υλικών που φέρουν εγκοπές ή άλλα μικρής έκτασης ελαττώματα ονομάζεται ***μηχανική της ρήξης.***

Η ρήξη των πολυμερών είναι μία μορφή αστοχίας, η οποία είναι αποτέλεσμα της εξασθένησης των μοριακών δεσμών, του διαχωρισμού των μοριακών αλυσίδων και του διαχωρισμού των επιφανειών που έχουν υποστεί ρήξη. Η ρήξη είναι ένα καθολικό φαινόμενο, το οποίο μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορα υλικά σώματα κάτω από διάφορες συνθήκες. Στα συστήματα σωλήνων, η ρήξη δεν εμφανίζεται μόνο στους πλαστικούς σωλήνες, αλλά ακόμα και στους σωλήνες από άλλα υλικά όπως ατσάλι, σίδηρο και συνθετικά υλικά [1-5].

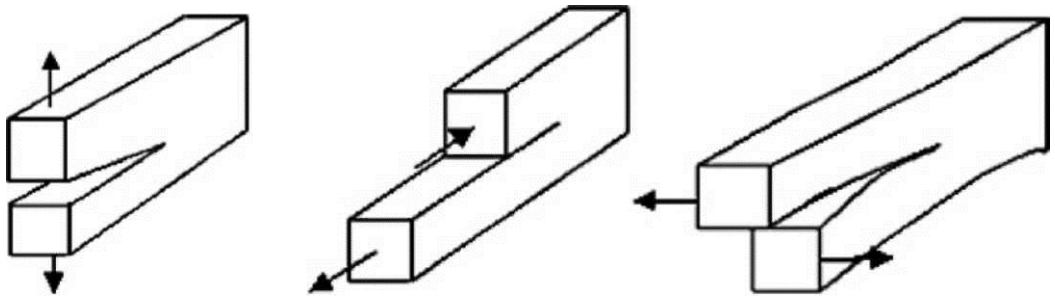
Σε ένα υλικό αντικείμενο, μπορούμε να διακρίνουμε τρία διαφορετικά είδη ρήξης, τα οποία είναι επιγραμματικά τα εξής:

(1) Η ρήξη που προκαλείται από τη σχετική **ελεύθερη** κίνηση δύο επιφανειών μεταξύ τους, προκαλώντας ένα άνοιγμα στη διεπιφάνεια μεταξύ των επιφανειών αυτών.

(2) Η ρήξη που προκαλείται από το **γλίοτρημα** της μίας επιφάνειας πάνω στην άλλη.

(3) Η ρήξη που προκαλείται από την σχετική **παράπλευρη** κίνηση των δύο επιφανειών μεταξύ τους.

Οι περιπτώσεις (1), (2) και (3) εμφανίζονται σχηματικά στην **Εικόνα 3.1:**



Περίπτωση (1) **Περίπτωση (2)** **Περίπτωση (3)**

Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση των κυριότερων μορφών ρήξης

3.1.2 <u>ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΡΗΞΗΣ</u>

Η ρήξη των πλαστικών σωλήνων μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως η εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση, οι χημικοί παράγοντες, οι θερμοκρασιακές κλίσεις και οι συνθήκες παραγωγής και επισκευής. Στους πλαστικούς σωλήνες, η ρήξη μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορα στάδια, τα βασικότερα από τα οποία είναι τα εξής:

(1) Χαλάρωση των μοριακών δεσμών

(2) Ράγισμα

(3) Δημιουργία στατικών σπασιμάτων

(4) Αργή ανάπτυξη σπασιμάτων Διάδοση σπασιμάτων

(5) Γρήγορη διάδοση σπασιμάτων

(6) Ολική θραύση

Ράγισμα

Το ράγισμα είναι ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζει τα λεπτά σπασίματα επιφάνειας, τα οποία μπορεί να εμφανιστούν σε πλαστικά, κυρίως σε άμορφα πολυμερή, κάτω από τάσεις χαμηλότερες της τάσης διαρροής. Το ράγισμα συνήθως εμφανίζεται στην ίδια κατεύθυνση με την τάση διαρροής. Η διαφορά μεταξύ ενός ραγίσματος και ενός σπασίματος είναι ότι το σπάσιμο οφείλεται στο διαχωρισμό δύο επιφανειών, ενώ στη ραγισμένη επιφάνεια οι δύο επιφάνειες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ακόμα συνδεδεμένες μεταξύ τους από μοριακά ινίδια μήκους της τάξης των 10nm, τα οποία γεφυρώνουν δύο πλευρές. Μεταξύ αυτών των ινιδίων υπάρχουν μικρά διάκενα μεγέθους περίπου 10nm. Η σπασμένη επιφάνεια, από την άλλη μεριά, δεν περιλαμβάνει δομή ινιδίων [7].

Το ράγισμα πιστεύεται ότι οφείλεται σε τριαξονική καταπόνηση του σωλήνα στα όρια και τις ασυνέχειες των μοριακών δεσμών. Υψηλές τάσεις σε ακαθαρσίες που υπάρχουν στο υλικό μπορεί να προκαλέσουν μακροσκοπική διαρροή. Καθώς αυξάνεται η διάρκεια φόρτισης, η όλκιμη διαρροή εμφανίζεται κάτω από μικρότερου μεγέθους τάσεις. Σε χαμηλές τάσεις, λόγω υλικών ελαττωμάτων, τοπικών περιοχών με συγκεντρωμένες τάσεις και παραμενουσών τάσεων, μπορεί να εμφανιστεί μικροσκοπική διαρροή. Οι ζώνες μικροσκοπικής διαρροής μπορεί να συγκεραστούν μεταξύ τους και να δημιουργήσουν μικροδιακενώσεις, οι οποίες στη συνέχεια αποκτούν ινώδη μορφή και γίνονται *ραγίσματα.*

Μία τυπική ζώνη ραγίσματος μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη: την ινώδη ζώνη, την πορώδη ζώνη και τη ζώνη ελαστικής υφής. Η ζώνη ελαστικής υφής βρίσκεται στο άκρο του ραγίσματος. Οι εμφανιζόμενες τάσεις λαμβάνουν τις υψηλότερές τους τιμές στη ζώνη ελαστικής υφής και τις χαμηλότερες στην πορώδη ζώνη.

Το ράγισμα μπορεί να επιταχυνθεί μέσω της επαφής με **επιταχυντικά** μέσα υγρής ή αέριας μορφής όπως απορρυπαντικά. Ένα πεδίο τάσεων ειδικά με την παρουσία μέσων όπως τα προαναφερθέντα επίσης συντελεί στην επιτάχυνση της δημιουργίας ραγισμάτων. Σε περίπτωση που αρκετός χρόνος έχει περάσει, περισσότερη ποσότητα ρευστού απορροφάται στις μικροδιακενώσεις. Λόγω της απορρόφησης ρευστού, το όριο διαρροής του υλικού ελαττώνεται τοπικά. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μία σχετικά χαμηλή τάση μαζί με **επιταχυντικά** μέσα όπως τα παραπάνω μπορεί να προκαλέσει ράγισμα, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να καταλήξει σε σπάσιμο.

Σπάσιμο

Το σπάσιμο των σωλήνων είναι ένας φανερός δείκτης της αστοχίας ενός σωλήνα. Το σπάσιμο είναι συγκεκριμένα μία μορφή ρήξης, με την έννοια ότι η εφαρμοζόμενη τάση γίνεται σχεδόν ίση με το όριο ρήξης. Το όριο ρήξης είναι μία υλική ιδιότητα που δείχνει την αντοχή του υλικού στην ανάπτυξη ατελειών, πόρων και ακαθαρσιών. Η σημασία του «σπασίματος» όπως θα μπορούσε να την ερμηνεύσει ο καθένας είναι παρ'όλα αυτά αρκετά ευρεία και περιλαμβάνει διάφορα στάδια παρατήρησης. Στο μοριακό επίπεδο, το σπάσιμο μπορεί να θεωρηθεί ως η εξασθένηση ατομικών δυνάμεων και η τοπική ή ολική αποσύνδεση των μοριακών αλυσίδων. Σε υψηλότερα επίπεδα, κάποιος θα μπορούσε να χαρακτηρίσει τα σπασίματα ως *όλκιμα* ή *ψαθυρά.* Επιπροσθέτως, ορισμένα υλικά μπορεί να επιδείξουν χαμηλό βαθμό ολκιμότητας και κατά συνέπεια να χαρακτηριστούν ως *μικρο-όλκιμα* υλικά. Επίσης θα μπορούσαμε να αναφερθούμε σε μία συμπεριφορά ως μικρο-όλκιμη αν παρατηρείται κάποιος βαθμός ολκιμότητας στη μικροσκοπική κλίμακα. Το σπάσιμο μπορεί να εμφανιστεί σε μία από τις βασικές μεθόδους ρήξης που αναφέραμε στην Υποενότητα 3.1., ή μπορεί να εμφανιστεί στα πλαίσια μίας συνδυαστικής μορφής ρήξης.

Σύγκριση μεταξύ όλκιμου και ψαθυρού σπασίματος

Η κατάταξη μίας μορφής σπασίματος σε όλκιμη ή ψαθυρή μπορεί να αποβεί χρήσιμη για διάφορες ανιχνεύσεις αστοχιών. Από τη μακροσκοπική οπτική γωνία, το όλκιμο σπάσιμο είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση προτού σπάσει. Από την άλλη μεριά, τα ψαθυρά σπασίματα αποτελούν φαινόμενα που σχετίζονται σε ελάχιστο ή μηδενικό βαθμό με πλαστικές παραμορφώσεις. Η μορφή της ανάπτυξης σπασιμάτων στα όλκιμα υλικά διαφέρει από αυτή που εμφανίζεται στα ψαθυρά. Στην όλκιμη ρήξη, το σπάσιμο αναπτύσσεται αργά και συνοδεύεται από μία μεγάλη ποσότητα πλαστικής παραμόρφωσης. Το υπάρχον σπάσιμο συνήθως δε θα εξαπλωθεί εκτός εάν εφαρμοστεί μία αυξημένη τάση. Αντιθέτως, στην ψαθυρή ρήξη, τα σπασίματα εξαπλώνονται πολύ γρήγορα με ελάχιστη ή καθόλου πλαστική παραμόρφωση. Όταν εμφανιστούν τα πρώτα σπασίματα, αυτά όχι μόνο συνεχίζουν να αναπτύσσονται πάνω στο ψαθυρό υλικό, αλλά επίσης αυξάνουν σε μέτρο και διαδίδονται με ταχύτητες που φτάνουν και την ταχύτητα του ήχου.

Σχήμα 3.2.: Όλκιμο σπάσιμο σε σωλήνα πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (PE-HD) κάτω από εσωτερική υδροστατική πίεση

Τόσο σε μακροσκοπικό όσο και σε μικροσκοπικό επίπεδο, οι επιφάνειες που φέρουν όλκιμα σπασίματα έχουν μεγαλύτερες περιοχές λαιμού και σε γενικές γραμμές μία πιο τραχιά εμφάνιση από ότι μία επιφάνεια που φέρει ψαθυρά σπασίματα. Η επιφάνεια αποτελείται από πολλές μικροδιακενώσεις και πολλά κοιλώματα. Ένα από τα χαρακτηριστικά της όλκιμης αστοχίας είναι το ότι λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και όχι ακαριαία. Αντίθετα, η ψαθυρή αστοχία είναι ένα ξαφνικό φαινόμενο το οποίο κάνει σαφώς λιγότερο χρόνο για να εμφανιστεί [8-10].

Το όλκιμο σπάσιμο λαμβάνει χώρα σε διάφορα στάδια:

(1) Τα ινίδια τεντώνονται και δημιουργούνται μικροδιακενώσεις στο εσωτερικό του υλικού.

(2) Η ελαστοπλαστική παραμόρφωση συνεχίζεται και οι μικροδιακενώσεις διαστέλλονται, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σπασίματος.

(3) Το σπάσιμο συνεχίζει να αυξάνεται και εξαπλώνεται σε διάφορες κατευθύνσεις.

(4) Τέλος λαμβάνει χώρα η διάδοση των σπασιμάτων κατά μήκος μίας επιφάνειας που κλίνειπρος την κατεύθυνση του άξονα των εφαρμοζόμενων τάσεων. Στην **Εικόνα 3.2** εμφανίζεται ένα όλκιμο σπάσιμο σε ένα σωλήνα πίεσης πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (PE-HD) κάτω από εσωτερική υδροστατική πίεση. Σε συγκεκριμένη θέση του σωλήνα παρατηρείται όλκιμη

ρήξη, ενώ τα σπασίματα που δημιουργούνται έχουν στις περισσότερες περιπτώσεις εγκάρσια διεύθυνση.

3.1.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΠΟΘΕΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΙΑΣ ΣΩΛΗΝΟΓΡΑΜΜΗΣ

Η αστοχία μίας σωληνογραμμής λόγω ρήξης εμφανίζεται σε διάφορα στάδια. Παρ'όλα αυτά, αυτά τα στάδια δεν είναι αυστηρά καθορισμένα και η διάρκεια εμφάνισης του καθενός μπορεί να ποικίλλει από περίπτωση σε περίπτωση. Προκειμένου να μελετήσουμε τη μελλοντική εμφάνιση ενδεχόμενης αστοχίας σε ένα σωλήνα που υπέστη ρήξη, θα πρέπει να διεξάγουμε μία εμπεριστατωμένη υπόθεση αστοχίας, στην οποία θα περιγράφονται όλα τα στάδια που, κατά περίπτωση, θα οδηγούσαν στην αστοχία της σωληνογραμμής. Στην **εικόνα 3.3** παριστάνονται τα 4 στάδια που οδηγούν στην αστοχία της σωληνογραμμής, στα πλαίσια μίας συνήθους υπόθεσης αστοχίας.

(α): Στο πρώτο στάδιο ο σωλήνας εμφανίζεται στην αρχική του μορφή, πάνω σε τραχύ κάλυμμα με μεγάλα κομμάτια από πέτρες, κάθετη πίεση εδάφους και σημειακά φορτία που προκαλούνται από τις πέτρες.

(β): Στο δεύτερο στάδιο ο σωλήνας υφίσταται παραμόρφωση λόγω των σημειακών φορτίων και της κάθετης πίεσης εδάφους.

(γ): Παράπλευρη μετατόπιση της απροστάτευτης καμπύλης εδάφους που βρίσκεται δίπλα στον ποταμό.

(δ): Ρήξη του σωλήνα στην κάτω ζώνη λόγω της συνδυασμένης δράσης του κάθετου φορτίου, του σημειακού φορτίου και των δυνάμεων τριβής λόγω της παράπλευρης μετατόπισης του εδάφους.

3.1.4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΛΟΓΩ ΡΗΞΗΣ

Σε αυτή την παράγραφο θα προσπαθήσουμε να μελετήσουμε σε βάθος το πώς η ρήξη ενός πλαστικού σωλήνα μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του. Η μελέτη θα γίνει με επιγραμματική παράθεση των πληροφοριών και των αποδείξεων που οδηγούν στις υποθέσεις και τις κρίσεις μας σχετικά με την ενδεχόμενη αστοχία του

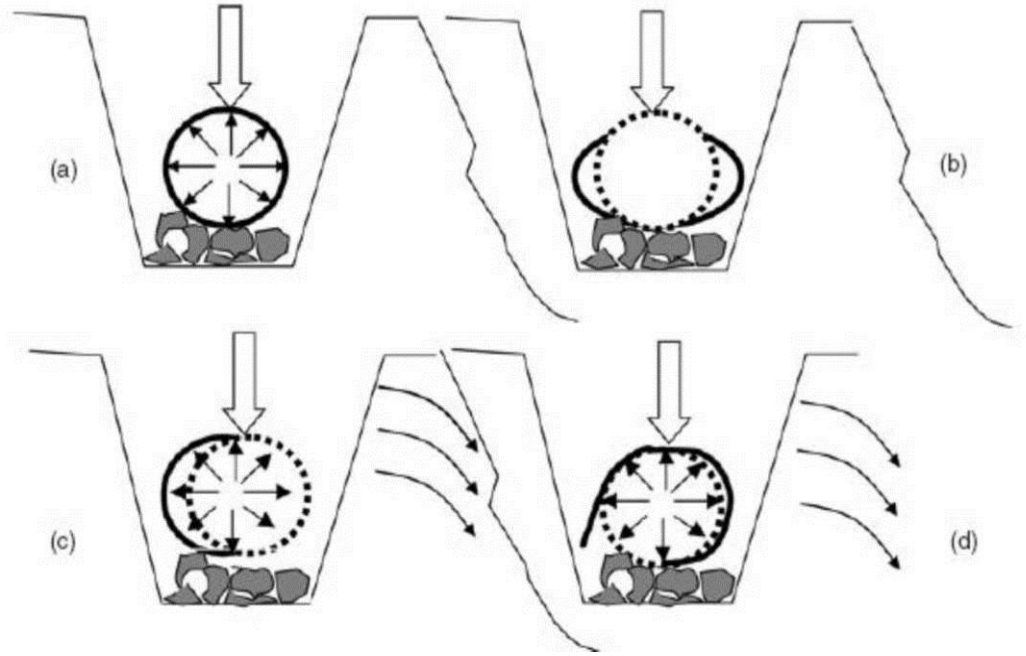
σωλήνα. Οι διάφορες περιπτώσεις αστοχίας που παρουσιάζονται εδώ αποτελούν ως επί το πλείστον στατιστικά γεγονότα που προκλήθηκαν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Το γεγονός ότι ένα συγκεκριμένο είδος υλικού ή σωλήνα αστόχησε δε σημαίνει απαραίτητα ότι το υλικό ή ο σωλήνας παρουσιάζει αδυναμίες ή δυσλειτουργίες. Οι συνθήκες που προκάλεσαν αυτά τα γεγονότα θα μπορούσαν να είχαν προκαλέσει ζημιές σε άλλα υλικά και προϊόντα σωλήνων. Θα πρέπει να έχουμε στο νου μας ότι το υλικό και ο σωλήνας είναι μόνο δύο από τους πολλούς παράγοντες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν την αστοχία.

3.2 ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

3.2.1 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΤΑΘΕΙΑ

Η σταθερότητα των υλικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των δομών και των συστημάτων σωλήνων, είναι μία από τις βασικότερες απαιτήσεις. Με απλά λόγια, όταν λέμε ότι ένα σύστημα είναι σταθερό εννοούμε ότι μπορεί να διατηρηθεί σε μία υπάρχουσα κατάσταση χωρίς να εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις από αυτήν. Η έλλειψη σταθερότητας ενός συστήματος, ή αλλιώς η *ασταθειά* του, μπορεί να προκαλέσει μεταβολές - αρκετές φορές ανεπιθύμητες - στις ιδιότητες και στη συμπεριφορά του συστήματος [10-12].

Τα δομικά συστήματα, όπως τα συστήματα σωλήνων, μπορεί να υποστούν κάποιες παραμορφώσεις και μεταβολές στη στιβαρότητα, οι οποίες θα μπορούσαν να



Σχήμα 3.3.: Υπόθεση αστοτοχίας ωωληνογραμμής**.**

ελαττώσουν την αντοχή τους και την επισκευασιμότητά τους. Κατά συνέπεια, η αστάθεια θεωρείται ως ένας τρόπος αστοχίας, ο οποίος θα πρέπει οπωσδήποτε να αποφευχθεί. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες έχουν αστοχήσει διάφορες δομές εξαιτίας της αστάθειας που παρατηρείται στην κατάσταση ισορροπίας τους. Στα κτίρια, ορισμένα κάθετα λεπτά στελέχη μπορεί να αστοχήσουν υπό την επίδραση

σχετικά υψηλών φορτίων. Αυτή η μορφή αστάθειας είναι γνωστή με τον όρο *λυγισμός.* Ο λυγισμός μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορες περιπτώσεις: στα τμήματα συμπίεσης δοκών και πλαισίων, σε στύλους, σε σωλήνες, σε λαμαρίνες και κελυφοειδείς δομές και σε διάφορα στοιχεία μηχανών [12-15]. Οι σωλήνες μπορούν επίσης να καταρρεύσουν είτε κατά διαμήκη είτε κατά παράπλευρο τρόπο. Η σταθερότητα και η αστάθεια των πλαστικών σωλήνων επηρεάζονται σημαντικά από το χρόνο και τη θερμοκρασία, όπως επίσης και από άλλους συστημικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις στις οποίες η κατάσταση ισορροπίας μίας δομής μπορεί να γίνει δυναμικά ασταθής. Αυτό σημαίνει ότι η δομή μπορεί να υπόκειται σε ταλαντωτικές κινήσεις με αυξανόμενο πλάτος. Αυτή η μορφή αστάθειας έχει εμφανιστεί σε γέφυρες αναρτήσεων, σε αεροπλάνα, σε σωλήνες διακίνησης ρευστών, σε περιστρεφόμενους άξονες, σε σώματα που έχουν υποστεί κρούση και σε στοιχεία μηχανών που έχουν καταπονηθεί από δυναμικά φορτία.

3.2.2 <u>ΜΟΡΦΕΣ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ</u>

Οι ελαστικές δομές θα μπορούσαν να χάσουν την αστάθειά τους με διάφορους τρόπους. Οι μορφές αστάθειας εξαρτώνται από τις ιδιότητες του ίδιου του συστήματος και του περιβάλλοντός του, όπως επίσης και από εφαρμοζόμενες δυνάμεις σε οριακές καταστάσεις [9]. Συστήματα σε στατική ισορροπία μπορούν να γίνουν στατικά και δυναμικά ασταθή. Για δομικά συστήματα, μπορούμε να ορίσουμε τρεις διαφορετικούς τύπους αστάθειας:

(1) Διακλάδωση της ισορροπίας - *κλασσική κατάρρευση*

(2) Οριακή αστάθεια ισορροπίας

(3) Δυναμική και ακανόνιστη αστάθεια

Διακλάδωση της ισορροπίας

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της στατικής ελαστικής αστάθειας είναι η κατάσταση *διακλάδωσης της ισορροπίας.* Σε ένα συγκεκριμένο στάδιο φόρτισης, η κατάσταση αστάθειας μίας δομής μπορεί να φτάσει σε ένα σημείο

διακλάδωσης στο οποίο υπάρχουν **δύο** διαφορετικές πιθανές καταστάσεις ισορροπίας. Η διακλάδωση της ισορροπίας αποτελεί ουσιαστικά το σημείο τομής μεταξύ των δύο διαδρομών που αντιπροσωπεύουν τις δύο καταστάσεις, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ένα τέτοιο σημείο μπορούν να υπάρξουν δύο καταστάσεις ισορροπίας για το ίδιο φορτίο. Πέρα από το σημείο διακλάδωσης, το σύστημα μπορεί να έχει μία από τις δύο μορφές συμπεριφοράς. Μπορεί είτε να παραμείνει στην αρχική κατάσταση ισορροπίας του ή να αποκλίνει από την *πρωτεύουσα διαδρομή* παραμόρφωσης και να ακολουθήσει μία εναλλακτική, *δευτερεύουσα διαδρομή* παραμόρφωσης. Από φυσικής άποψης, η δομή επιλέγει τη διαδρομή κατά την οποία το σύστημα αποκτά την ελάχιστη δυνατή ενέργεια.

Οριακή αστάθεια ισορροπίας

Η απώλεια σταθερότητας μέσω του επονομαζόμενου *περιορισμού ισορροπίας* είναι χαρακτηριστική για τις δομές που φέρουν το εγκάρσιο φορτίο κυρίως μέσω συμπιεστικών αξονικών δυνάμεων, όπως τα αβαθή τόξα και τα αβαθή κελύφη. Σε δομές που υφίστανται αυτή τη μορφή της αστάθειας δεν υπάρχει σημείο διακλάδωσης. Η καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης τέτοιου είδους συστημάτων είναι συνεχής και αποτελείται από μία απλή καμπύλη χωρίς διακλαδώσεις. Αυτή η καμπύλη έχει σταθερά σημεία μεγίστου και ελαχίστου, ενώ η κατάσταση κρίσιμου φορτίου αντιστοιχεί σε ένα από τα δύο παραπάνω σημεία.

Δυναμική και ακανόνιστη αστάθεια

Η αστάθεια που προκαλείται από τις δυναμικές επιδράσεις και η αποκαλούμενη με τον όρο *ακανόνιστη αστάθεια* χαρακτηρίζονται αμφότερες ως *δυναμικές αστάθειες,* με την έννοια ότι η κίνηση και η ισορροπία του συστήματος μπορεί να γίνει δυναμικά ασταθής. Ο όρος «δυναμική αστάθεια» σημαίνει ότι το ασταθές σύστημα θα μπορούσε να παρουσιάζει ταλαντώσεις με αυξανόμενο πλάτος. Η δυναμική αστάθεια των ελαστικών συστημάτων μπορεί να εμφανιστεί όταν οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις είναι *μη-συντηρητικές.*

Η κατάσταση ισορροπίας ενός ελαστικού συστήματος μπορεί επίσης να γίνει ασταθής με *δυναμικό τρόπο.* Για παράδειγμα, μία ισορροπημένη δομή που υπόκειται σε μη-συντηρητικές δυνάμεις μπορεί να υπόκειται σε ταλαντώσεις με αυξανόμενο πλάτος, με αποτέλεσμα την εμφάνιση *ακανόνιστης αστάθειας.* Η ακανόνιστη αστάθεια μπορεί επίσης να εμφανιστεί σε δομές που έχουν σταθερή κίνηση. Σε συστήματα σωλήνων πίεσης και σε υποβρύχιους σωλήνες, η ακανόνιστη κίνηση είναι μία μορφή αυξανόμενων παράπλευρων ταλαντώσεων. Κάτω από ορισμένες καταστάσεις, η κίνηση αυτή μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση επιπλέον τάσεων, κυρίως στους συνδέσμους μεταξύ των σωλήνων.

Μία ειδική περίπτωση κατάρρευσης ενός σωλήνα, η οποία μπορεί να εμφανιστεί κατά καιρούς στους βυθισμένους σωλήνες, είναι γνωστή με τον όρο *διαδιδόμενη κατάρρευση.* Μαζί με διάφορες πιθανές φορτίσεις, οι σωλήνες που τοποθετούνται στην επιφάνεια της θάλασσας υπόκεινται συνήθως σε σχετικά υψηλή υδροδυναμική πίεση. Η εξωτερική πίεση μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση στο σωλήνα, η οποία στη συνέχεια μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος του και να προσβάλει ένα σημαντικό μήκος της σωληνογραμμής. Για την πρόληψη της διαδιδόμενης κατάρρευσης έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μηχανισμοί γνωστοί με το γενικό όρο *διακόπτες κατάρρευσης.*

3.2.3 ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Υπερβολικές θεωρούνται οι παραμορφώσεις που είναι μεγαλύτερες από τις αριθμητικά υπολογιζόμενες τιμές κατά τη μελέτη της αντοχής ενός σωλήνα. Οι παραμορφώσεις που μπορεί να εμποδίσουν τη λειτουργία του σωλήνα, ώστε να εκτεθεί σε κατάρρευση, θεωρούνται υπερβολικές παραμορφώσεις. Οι υπερβολικές παραμορφώσεις μπορεί να έχουν τη μορφή μεγάλων διαμηκών παραμορφώσεων ή επιπεδοποίησης του σημείου τομής των σωλήνων. Οι υπερβολικές παραμορφώσεις δεν αποτελούν κατ'ανάγκη το αίτιο για την αστάθεια των σωλήνων. Για παράδειγμα, μεγάλες τοπικές επικαθίσεις σε ένα σύστημα σωλήνων αποχέτευσης ροής βαρύτητας μπορεί να θεωρηθούν υπερβολικές παραμορφώσεις, επειδή ενδέχεται να εμποδίσουν την ελεύθερη ροή των ρευστών ή να οδηγήσουν στην καθίζηση στερεών υλικών στο σωλήνα. Η επιπεδοποίηση των αποχετευτικών σωλήνων θα μπορούσε να ελαττώσει την υδραυλική ακτίνα του σωλήνα και κατά συνέπεια να έχει αρνητικές συνέπειες στη ροή του ρευστού. Από μηχανικής άποψης, οι υπερβολικές

παραμορφώσεις είναι μη-γραμμικές και συνήθως υπερβαίνουν τα όρια επισκευασιμότητας του σωλήνα.

3.2.4 ΓΕΝΙΚΑ ΑΙΤΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

Η κατάρρευση των πλαστικών σωλήνων είναι μία μορφή αστάθειας, η οποία μπορεί να παρουσιαστεί σε διάφορες περιπτώσεις. Η κατάρρευση ενός σωλήνα μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής ενός συστήματος σωλήνων, όπως επίσης και να προκαλέσει πολλές παρενέργειες, όπως δραστικές οικονομικές συνέπειες. Αυτή η μορφή αστάθειας μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της κατασκευής, της αποθήκευσης, της μεταφοράς, της εγκατάστασης, της επίβλεψης, της συντήρησης και της επισκευής του σωλήνα [13]. Τα βασικά αίτια της εμφάνισης αστοχίας στα συστήματα σωλήνων είναι τα εξής:

(1) Λανθασμένος σχεδιασμός

(2) Υλικές και γεωμετρικές αδυναμίες στο σωλήνα

(3) Ελαττώματα και προκαταρκτικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της κατασκευής

(4) Ζημιές και προκαταρκτικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, της μεταφοράς και της εγκατάστασης

(5) Περιβαλλοντικοί παράγοντες (μηχανικά φορτία, θερμικές και χημικές επιδράσεις

(6) Ζημιές και παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της επίβλεψης και της επισκευής

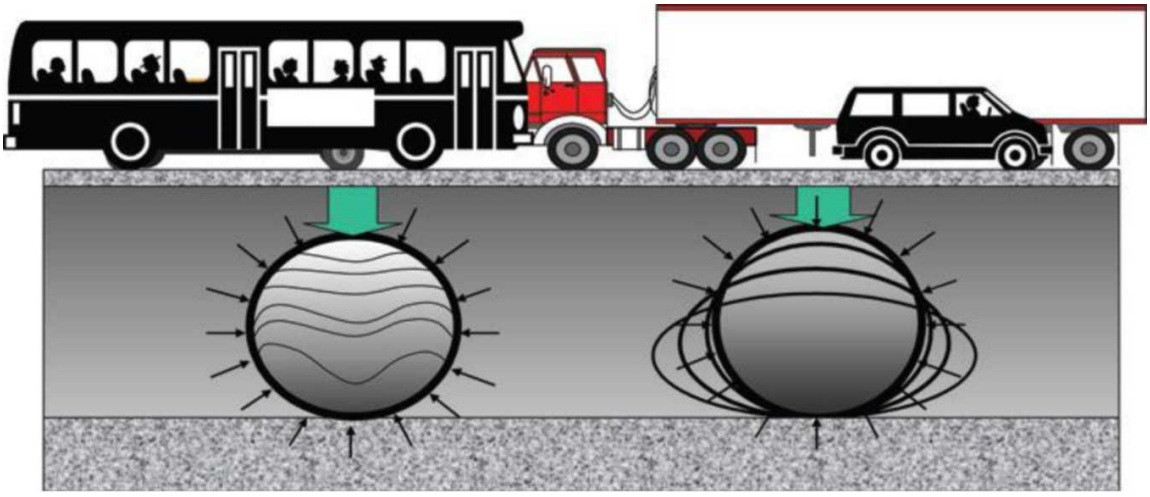
(7) Εξωτερικές παρεμβάσεις

Ορισμένα πρότυπα και διάφοροι οδηγοί αντιμετωπίζουν την κατάρρευση των συστημάτων σωλήνων ως την τμηματική κατάρρευση κάτω από παράπλευρη πίεση. Πράγματι, τα συστήματα σωλήνων μπορεί να υποστούν όχι μόνο παράπλευρες, αλλά και διαμήκεις μορφές αστοχίας. Παραδείγματα ενδεχόμενων διαμηκών φαινομένων κατάρρευσης αποτελούν οι εκτεθειμένοι σωλήνες σε υψηλή θερμοκρασία και τα εντόνως επικλινή συστήματα σωλήνων που χρησιμοποιούνται στους επικλινείς σωλήνες που τροφοδοτούν τους υδροστροβίλους.

3.2.5 ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΩΝ ΕΝΤΑΦΙΑΣΜΕΝΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

Τα ενταφιασμένα συστήματα σωλήνων υπόκεινται σε διάφορες περιβαλλοντικές ενέργειες. Οι βασικές φορτίσεις στους ενταφιασμένους σωλήνες είναι η εσωτερική πίεση, η πίεση εδάφους, τα συσσωρευμένα φορτία και η εξωτερική υδατική πίεση. Επιπλέον, η συμπεριφορά του συστήματος σωλήνων μπορεί να επηρεαστεί από επιπλέον φορτίσεις όπως μερικές καθιζήσεις, αιχμές, διασταύρωση μεταξύ σωλήνων και κινήσεις του εδάφους.

Η συμπεριφορά κατάρρευσης των ενταφιασμένων πλαστικών σωλήνων επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση του σωλήνα και του περιβάλλοντος εδάφους. Η σχετική στιβαρότητα του σωλήνα και του περιβάλλοντος μέσου αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα που καθορίζει τη μορφή παραμόρφωσης του συστήματος σωλήνων. Η **εικόνα 3.4** δείχνει σχηματικά δύο μορφές συμπεριφοράς κατάρρευσης των συστημάτων ενταφιασμένων σωλήνων. Μία από αυτές τις δύο μορφές χαρακτηρίζεται από τη μορφή παραμόρφωσης «snap through» και εμφανίζεται κυρίως σε ενταφιασμένους σωλήνες που βρίσκονται σε στιβαρό περιβάλλον [14-18]. Η άλλη μορφή χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη ενός οβάλ σχήματος στο σωλήνα και παρατηρείται συνήθως στις περιπτώσεις κατά της οποίες η στιβαρότητα του σωλήνα είναι μεγαλύτερη από το μέτρο τάνυσης του περιβάλλοντος μέσου.



Σχήμα 3.4.: Μορφές κατάρρευσης στους ενταφιασμένους οωλήνες.

3.2.6 ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΩΝ ΧΙΤΩΝΙΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

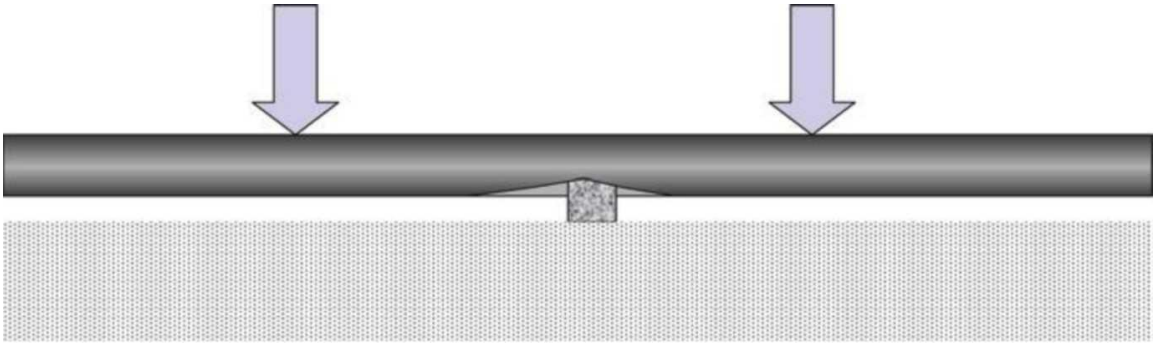
Σε πολλές περιπτώσεις, τα ήδη υπάρχοντα συστήματα σωλήνων θα πρέπει να αποκατασταθούν με σκοπό την ικανοποίηση των λειτουργικών απαιτήσεων ή την αύξηση της διάρκειας ζωής τους. Μία από τις συνήθεις μεθόδους αποκατάστασης είναι η τοποθέτηση ενός χιτωνίου σωλήνα μέσα στο υπάρχον σύστημα σωλήνων. Τα χιτώνια μπορεί να αποτελούνται από στερεές στρώσεις ρητίνης, ψεκασμένη ρητίνη ή καινούργιους σωλήνες που έχουν εγκατασταθεί στον παλιό σωλήνα. Τα θερμοπλαστικά χιτώνια και τα χιτώνια που έχουν κατασκευαστεί από πλαστικά ενισχυμένα με ίνες είναι εξίσου συνήθη με τα χιτώνια σωλήνων.

Τα λεπτά χιτώνια συνήθως συνδέονται στο υπάρχον τοίχωμα του σωλήνα. Λειτουργούν ως προστατευτικά εμπόδια εναντίον της διάχυσης και της διαρροής. Επίσης μπορούν να έχουν δομικές λειτουργίες με σκοπό την αύξηση της αντοχής ή της στιβαρότητας του συστήματος. Στη λειτουργία της στιβαρότητας, τα χιτώνια θα πρέπει να αλληλεπιδρούν με το κύριο σύστημα σωλήνων και να φέρουν τα εφαρμοζόμενα φορτία με συνδυαστικό τρόπο. Σε διάφορες περιπτώσεις, τα χιτώνια σωλήνων υπόκεινται σε εξωτερική υδροστατική πίεση. Η πίεση μπορεί να εφαρμοστεί στο σύνθετο σύστημα σωλήνων ή στο διάστημα μεταξύ του χιτωνίου και του κύριου σωλήνα [19]. Πολλές περιπτώσεις εσωστρεφούς κατάρρευσης των χιτωνίων σωλήνων έχουν εντοπιστεί στη βιβλιογραφία. Η κατάρρευση των χιτωνίων σωλήνων γίνεται με τη μορφή απο-ελασματοποίησης του χιτωνίου από το τοίχωμα του κύριου σωλήνα και όχι με τη μορφή ανάπτυξης ελλειπτικού σχήματος.

3.2.7 ΤΟΠΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΛΟΓΩ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι συγκεντρωμένες δυνάμεις μπορούν να επιδράσουν πάνω στο σύστημα σωλήνων. Παραδείγματα τέτοιων ενεργειών αποτελούν οι διασταυρώσεις των σωληνογραμμών η μία πάνω στην άλλη, τα τμήματα από τις πέτρες που λειτουργούν σαν κάλυμμα των σωλήνων και τα κομμάτια από ξύλα εγκατάστασης στις αυλακώσεις, τα οποία πολλές φορές ξεχνά ο μηχανικός να απομακρύνει. Η παράπλευρη πίεση εδάφους και τα συσσωρευμένα φορτία σπρώχνουν το σωλήνα αντίθετα από την πλευρά των τοπικών κομματιών που βρίσκονται σε επαφή με το σωλήνα, προκαλώντας σχετικά υψηλές δυνάμεις αντίδρασης, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν υψηλές τοπικές τάσεις και κρατύνσεις

όπως και τοπική κατάρρευση. Οι σωλήνες που στηρίζονται πάνω σε σημειακές θέσεις ενδέχεται επίσης να εμφανίσουν τοπική κατάρρευση. Η **Εικόνα 3.5** δείχνει σχηματικά την τοπική κατάρρευση ενός σωλήνα λόγω της ύπαρξης ενός κομματιού πέτρας ή ξύλου κάτω από το σωλήνα.



Σχήμα 3.5.: Τοπική κατάρρευση του σωλήνα λόγω της ύπαρξης σημειακού φορτίου.

3.2.8 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΛΟΓΩ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετήσουμε την περίπτωση κατά την οποία ένας σωλήνας κινδυνεύει να αστοχήσει όταν υπόκειται σε κατάρρευση. Η μελέτη αυτή θα βασίζεται σε στατιστικά γεγονότα, τα οποία ενδεχομένως να οφείλονται σε συγκεκριμένες συνθήκες. Κατά συνέπεια, το γεγονός ότι ένα συγκεκριμένο υλικό ή ένας συγκεκριμένος τύπος σωλήνα αστόχησε δεν αντικατοπτρίζει κατ'ανάγκη την αδυναμία ή τη δυσλειτουργία που σχετίζεται με αυτό το υλικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1) Osswald T.A., Menges G., *'Materials Science of Polymers for Engineers',* Hanser Publisher, New York. 2003.

2) Oesper E., Ralph E., *Journal of Chemical Education* **6**: 432 – 440 (1929).

3) Μανωλάκος Δ., '*Σημειώσεις διαλέξεων στα πλαίσια του μαθήματος Προηγμένα Υλικά'* Σχολής Μηχαν.Μηχανικών Ε.Μ.Π. (2003).

4) Cowie, J.M.G. *'Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials,* Chapman and Hall, 2nd edition (1991).

5) Rahman, Shah "Thermoplastics at Work: A Comprehensive Review of Municipal PVC Piping Products, (2004). Process Emissions for Vinyl Pipe Industry, Journal of Vinyl & Additive Technology, September, 1996.

6) PVC vs. Copper, Domestic Hot & Cold Water Systems, A Cost/Benefit Comparison, conducted by IFT Technical Services, Berkeley, California, for the Vinyl Institute, July, 1990.

7) PVC Drain, Waste and Vent Pipe vs. Cast Iron Soil Pipe, A Cost/Benefit Comparison, conducted by IFT Technical Services, Berkeley, California, for the Vinyl Institute, July, 1990.

8) PVC Pipe and Drinking Water Safety, the Vinyl Institute, July, 1991.

9) Comparison of Noise Radiated From 75 mm Drain Pipes, conducted by Howe Gastmeier Chapnik Ltd., Mississauga, Ontario, for IPEX, Inc., February, 1999.

10) Waste Pipe Noise Evaluation, conducted by J.J. Van Houten and Associates, Anaheim, California, for Pacific Western Extruded Plastics Company, July, 1991.

11) Plastic Piping in the Built Environment, The Modern, State-of-the-Art Choice for Plumbing Systems, Information Guide, The Plastic Pipe and Fittings Association, Glen Ellyn, Illinois.

12) Plastic Pipe in Fire Resistive Construction, The Plastic Pipe and Fittings Association, Glen Ellyn, Illinois, Copyright 1997.

13) The Growing World of Plastic Piping, A Listing of Common Applications of Plastic Piping Systems Covered by National Consensus Standards, The Plastic Pipe and Fittings Association, Glen Ellyn, Illinois, Fourth Edition, 1997.

14) Thawing Thermoplastic Water Pipes, Bulletin 10-83, The Plastic Pipe and Fittings Association, Glen Ellyn, Illinois.

15) Crush Strength and Flexibility of Thermoplastic Piping, Bulletin 1-80, The Plastic Pipe and Fittings Association, Glen Ellyn, Illinois.

16) Hydrostatic Strengths and Suggested Pressure Ratings for CPVC 4120 at Various Temperatures, Bulletin 2-80, The Plastic Pipe and Fittings Association, Glen Ellyn, Illinois.

17) Pressure Rating of PVC Plastic Piping for Water at Elevated Temperatures, Bulletin 3, The Plastic Pipe and Fittings Association, Glen Ellyn, Illinois.

18) Installation Handbook: CPVC Hot & Cold Water Piping, The Plastic Pipe and Fittings Association, Glen Ellyn, Illinois, Copyright 1997.

19) Economic Comparison of Vinyl Building Products Compared to "Traditional" Materials used for Siding, Windows and Plumbing, conducted by Marquest Consulting, for the Vinyl Institute, August, 1996.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη σημασία της επίδρασης των διαφόρων φορτίσεων και τάσεων στους πλαστικούς σωλήνες κατά τη διάρκεια ζωής τους, θέτει τις προϋποθέσεις ούτος ώστε να διεξάγονται ποικίλα πειράματα και μελέτες. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας επιτρέπει την μοντελοποίηση και την αριθμητική προσομοίωση ανάλογων πειραμάτων, με τη χρήση κατάλληλων πακέτων λογισμικού. Ωστόσο, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι θέμα ύψιστης σημασίας και αντικείμενο έρευνας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασίας πραγματοποιείται ο πειραματικός προσδιορισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων στις οποίες υπόκεινται οι πλαστικοί σωλήνες. Επίσης γίνεται σύγκριση των πειραματικών αυτών εφαρμογών με την αριθμητική προσομοίωση της καταπόνησης, με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση της εφαρμογής λογισμικού LSDYNA. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά κυλινδρικά δοκίμια από πολυαιθυλένιο (PE) τρίτης και πρώτης γενιάς. Τα πειράματα εκπονήθηκαν στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, με χρήση της πρέσας INSTRON.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής ανάλυση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το υλικό των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, περιγράφεται η διαδικασία της πλευρικής καταπόνησης και του μηχανήματος στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, και τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

4.2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

1^{ο} ΔΟΚΙΜΙΟ

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικός σωλήνας με πτυχώσεις (11 πτυχώσεις) από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας πρώτης γενιάς.

2^{ο} ΔΟΚΙΜΙΟ

Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικός σωλήνας με πτυχώσεις (28 πτυχώσεις) από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας πρώτης γενιάς.

4.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το πολυαιθυλένιο αποτελεί τον κυριότερο εκπρόσωπο της οικογένειας των πολυολεφινών, με βάση την παγκόσμια ετήσια παραγωγή ενώ συγχρόνως αποτελεί από τα πλέον διαδεδομένα πολυμερή. Το πολυαιθυλένιο παράγεται από τον πολυμερισμό του αιθυλενίου το οποίο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα υποπροϊόντα του πετρελαίου. Ο πολυμερισμός του αιθυλενίου έγινε για πρώτη φορά τυχαία στα εργαστήρια της εταιρίας ICI το 1933. Κατόπιν άρχισε η παραγωγή του στην Αγγλία με σκοπό τη χρήση του πολυαιθυλενίου αποκλειστικά ως υλικού μόνωσης και προστασίας καλωδίων σε εγκαταστάσεις ραντάρ υψηλής συχνότητας. Στη δεκαετία του '50 ξεκίνησε η παραγωγή γραμμικού πολυαιθυλενίου, αυτή τη φορά για χρήσεις μεταφοράς νερού. Από κει και έπειτα το πολυαιθυλένιο αναγνωρίζεται παγκοσμίως για τις θερμομηχανικές, ηλεκτρικές και χημικές του ιδιότητες[1-4]. Στη δεκαετία του '90 ανακαλύφθηκαν νέες μέθοδοι παραγωγής, οι οποίες έδωσαν πολυαιθυλένια με βελτιωμένες θερμομηχανικές δυνατότητες. Τη περίοδο αυτή έγινε δυνατός ο καλύτερος σχεδιασμός των μακρομορίων, με συνέπεια τη μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης των χαρακτηριστικών εγγενών ιδιοτήτων τους. Αποτέλεσμα αυτής της έρευνας υπήρξε η γέννηση δυο νέων τύπων πολυαιθυλενίου, του PE80 (δεύτερης γενιάς) με MRS 8 και του PE100 (τρίτης γενιάς) με MRS 10. Παράλληλα, οι εργαστηριακές έρευνες συνεχίζονται για την παραγωγή του PE125 με MRS 12.5.

Παρά την απλή χημική δομή του, η επεξεργασία του πολυαιθυλενίου περιλαμβάνει μια πληθώρα παραγωγικών διαδικασιών οι οποίες καταλήγουν σε πολλά και διαφορετικά προϊόντα. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος του παραγόμενου πολυαιθυλενίου προορίζεται για σωλήνες μεταφοράς νερού και φυσικού αερίου, πλαστικών φύλλων και εξαρτημάτων για αγροτικές εφαρμογές κυρίως (π.χ. φιλμ θερμοκηπίων), καθώς και υλικών συσκευασίας (π.χ. πλαστικές σακούλες). Επίσης, χρησιμοποιείται ευρέως και στην προστασία καλωδίων τηλεπικοινωνιών.

> Παραγωγή πολυαιθυλενίου - πολυμερισμός

Ο πολυμερισμός του πολυαιθυλενίου γίνεται με διεργασίες κατά τις οποίες λαμβάνονται διαφορετικά προϊόντα όπως LDPE, HDPE, LLDPE, PE-X κ.λ.π. Οι ιδιότητες του πολυαιθυλενίου εξαρτώνται από την πυκνότητα, το Μοριακό Βάρος και την κατανομή του. Αύξηση της πυκνότητας (αύξηση κρυσταλλικότητας) σημαίνει μεταβολή των παρακάτω ιδιοτήτων:

- Μείωση της: αντοχή σε κρούση, διαφάνειας και αντοχής σε περιβαλλοντική ρηγμάτωση.
- Αύξηση της: αντοχής σε εφελκυσμό στο σ. διαρροής, μέτρο ελαστικότητας, σκληρότητας, αντίστασης σε χημικά και διαπερατότητας από ατμούς και αέρια.

> Κατηγορίες πολυαιθυλενίου

Παλαιότερα ο διαχωρισμός του πολυαιθυλενίου γινόταν με βάση την πυκνότητα. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες που χαρακτηρίζουν το πολυαιθυλένιο ανάλογα με την πυκνότητα του. Αυτές είναι:

- Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας: HDPE και HPPE
- Πολυαιθυλένιο μέσης πυκνότητας: MDPE
- Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας: LDPE και LLDPE

Οι σωλήνες HDPE χρησιμοποιούνται σήμερα κυρίως σε δίκτυα υψηλής πίεσης, ενώ το LDPE χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις δικτύων χαμηλής πίεσης όπως π.χ. σε αρδευτικά δίκτυα, όπου απαιτείται μεγαλύτερη ελαστικότητα. Με την εισαγωγή των πολυαιθυλενίων υψηλής απόδοση άλλαξε ο τρόπος ομαδοποίησης των πολυαιθυλενίων για την παραγωγή σωλήνων και εξαρτημάτων. Ειδικότερα, τα πολυαιθυλένια διαχωρίζονται με βάση την ελάχιστη απαιτούμενη μακροχρόνια

υδραυλική αντοχή τους (MRS) Παράλληλα, οι συνδυασμοί της πυκνότητας με το MK5 δίνουν διαφορετικούς τύπους σωλήνων που προορίζονται για διαφορετικές χρήσεις ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους [4-7]. Το MRS αφορά τη μέγιστη περιφερειακή τάση, στην οποία εγγυημένα αντέχει ένας σωλήνας PE, όταν λειτουργεί στην ονομαστική του πίεση για 50 χρόνια στους 20°C.

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο πείραμα τα δύο δοκίμια υποβλήθηκαν σε αξονική και πλευρική καταπόνηση αντίστοιχα στην πρέσα INSTRON 4482 του εργαστηρίου. Αρχικά, τα δύο δοκίμια κόπηκαν στο επιθυμητό μήκος στο μηχάνημα κοπής (μηχανικό πριόνι - κορδέλα) και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στη πρέσα INSTRON. Αφού έγινε η ρύθμιση των απαραίτητων δεδομένων, η ελάττωση του μεγέθους των δοκιμίων μετρήθηκε και καταγράφηκε σε Η/Υ από ειδική συνδεδεμένη με τη πρέσα συσκευή καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων ελήφθησαν μια σειρά από φωτογραφίες και η καμπύλη τάσης -παραμόρφωσης, για την περαιτέρω μοντελοποίηση των δοκιμίων αυτών, μέσω του προγράμματος LS-DYNA, και την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

4.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΕΣΑΣ INSTRON 4482

Τα βασικά μέρη της πρέσας είναι ο μηχανισμός της κεφαλής και το ταμπλό χειρισμού. Το ταμπλό χειρισμού έχει μια θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE η οποία συνδέεται μέσω της παράλληλης θύρας με έναν επιτραπέζιο Η/Υ. Η πρέσα INSTRON 4482 έχει μέγιστο φορτίο 10tn, μέγιστη ταχύτητα 500mm/min,ταχύτητα επιστροφής 600 mm/min, μέγιστο φορτίο σε μέγιστη ταχύτητα 75tn, μέγιστη ταχύτητα σε μέγιστο φορτίο 250 mm/min και η κεφαλή της έχει αναγραφόμενη ευαισθησία 2 mV/V. Στον κεντρικό τομέα του ταμπλό χειρισμού γίνεται το καλιμπράρισμα της μηχανής, ορίζεται η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής, οριοθετείται το ύψος μέχρι το οποίο θα κινείται η κεφαλή, ορίζεται το διάστημα στο οποίο θα γίνει η καταπόνηση του δοκιμίου, ελέγχεται η εκτύπωση των αποτελεσμάτων, ενεργοποιείται η επικοινωνία με τον Η/Υ και τέλος ρυθμίζονται οι μετρητές φορτίου και παραμόρφωσης. Ο τομέας οθονών υγρών κρυστάλλων του ταμπλό χειρισμού περιλαμβάνει τρεις οθόνες υγρών κρυστάλλων καθώς και κομβία στα οποία γίνεται η επιλογή του φορτίου, της επιμήκυνσης, της παραμόρφωσης καθώς και τα ανώτερα και κατώτερα όρια αυτών.

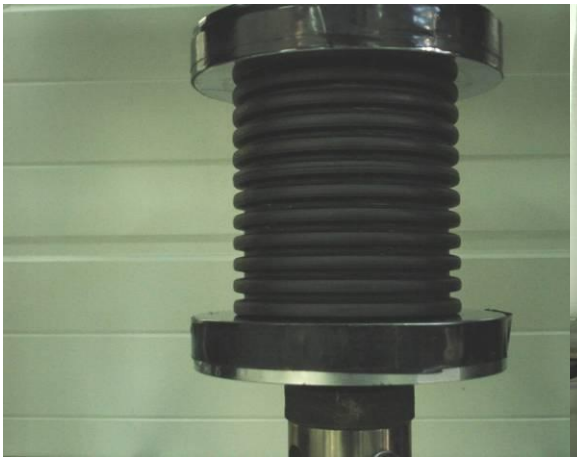
Σχήμα 4.1.: INSTRON 4482 ονομαστικού φορτίου 10tn.

4.3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

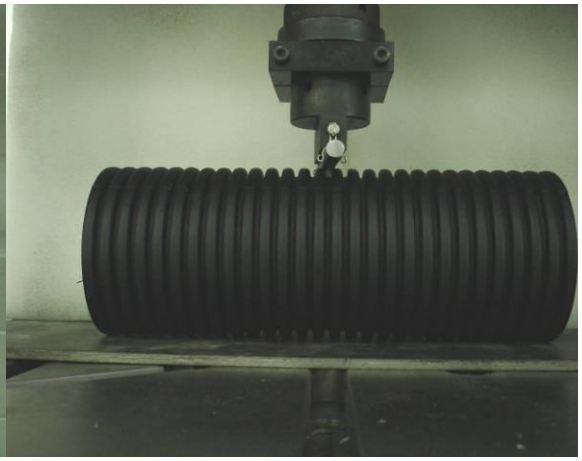
Πριν την έναρξη των δοκιμών γίνεται η σωστή ρύθμιση της πρέσας ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι αξιόπιστα. Σε πρώτη φάση, αυτό προϋποθέτει την σωστή τοποθέτηση και σύνδεση των καλωδίων, ώστε οι ενδείξεις να είναι ακριβείς και το λογισμικό να παίρνει τις σωστές τιμές από την κονσόλα. Σε δεύτερη φάση, καθορίζεται η ταχύτητα συνυπολογίζοντας πολλές παραμέτρους ώστε να εισάγουμε τη σωστή τιμή για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν κυρίως το υλικό των δοκιμίων, τις περαιτέρω αλλαγές που θα υποστούν αυτά κατά τη διάρκεια των δοκιμών, καθώς και τη μέγιστη ταχύτητα του εξωτερικού καταγραφέα - λήπτη που εξαρτάται από το ρυθμό δειγματοληψίας. Για τη εισαγωγή της ταχύτητας επιλέγεται το κομβίον "SPEED", όπου εμφανίζεται η ισχύουσα τιμή και έτσι υπολογίζεται και προσδιορίζεται η νέα, κατάλληλη τιμή μέσω του πληκτρολογίου. Η επιθυμητή τιμή καταχωρείται στο λογισμικό πατώντας το κομβίον "ENTER", δίνεται όμως η δυνατότητα αλλαγής της κατά τη διάρκεια του πειράματος με τον ίδιο τρόπο.

- Οι δοκιμές για τα δοκίμια 1, 2 ήταν οιωνεί στατικές και πραγματοποιήθηκαν με σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου 10 mm/min.

Στο τελευταίο στάδιο της προετοιμασίας τα δοκίμια τοποθετούνται σωστά στις πλάκες της πρέσας ώστε να αποφευχθούν τυχόν μετακίνηση του δοκιμίου και αποοριζοντιοποιήση των πλακών της πρέσας. Στις Εικόνες 4.2., 4.3,. απεικονίζονται τα δοκίμια όπως τοποθετήθηκαν στις πλάκες της πρέσας για να υποβληθούν σε πλευρική καταπόνηση.



Σχήμα 4.2: Δοκίμιο 1



Σχήμα 4.3: Δοκίμιο 2

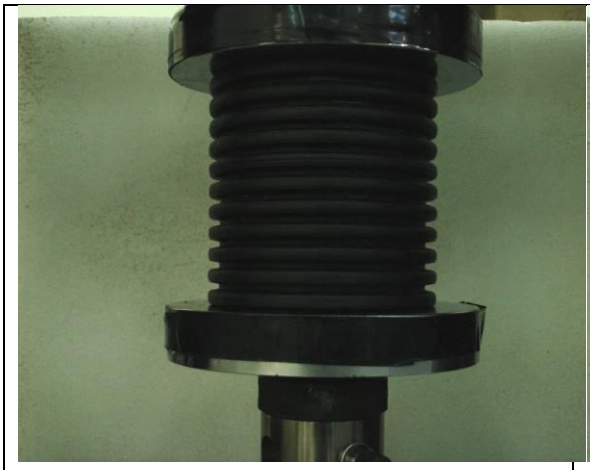
4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

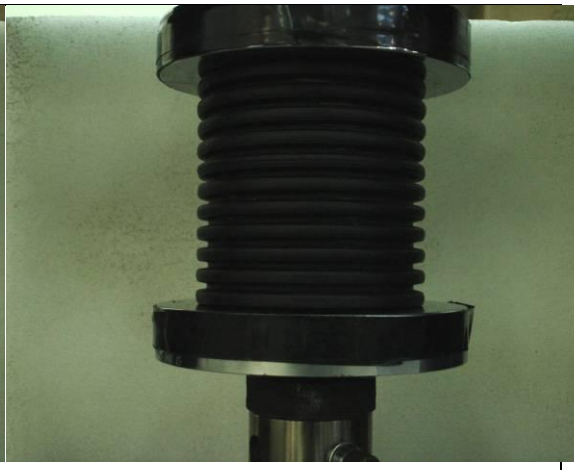
Στην ενότητα αυτή παραθέτουμε τα διαγράμματα που προέκυψαν καθώς και τις φωτογραφίες των δοκιμίων μετά το πέρας της αξονικής και πλευρικής τους καταπόνησης. Οι αρχικές διαστάσεις των δοκιμίων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Αρχικές διαστάσεις δοκιμίων.

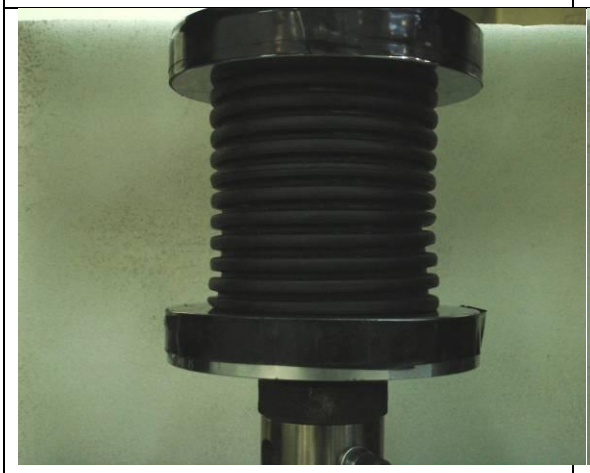
ΠΕΙΡΑΜΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ Φ (mm)	ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ S (mm)	ΜΗΚΟΣ l (mm)
1°	1	112	1.0 / 0.7	112
2°	2	112	1.0 / 0.7	287

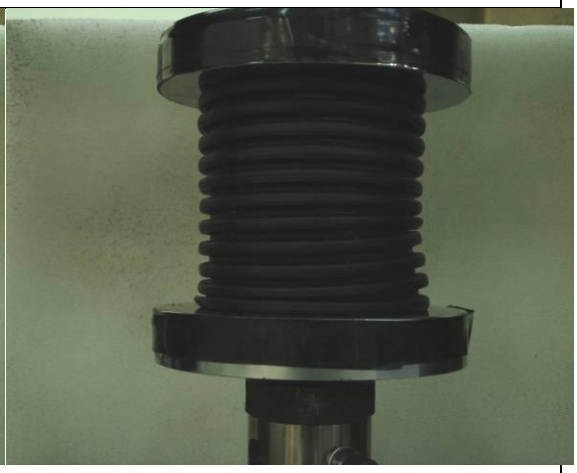
ΔΟΚΙΜΙΟ 1



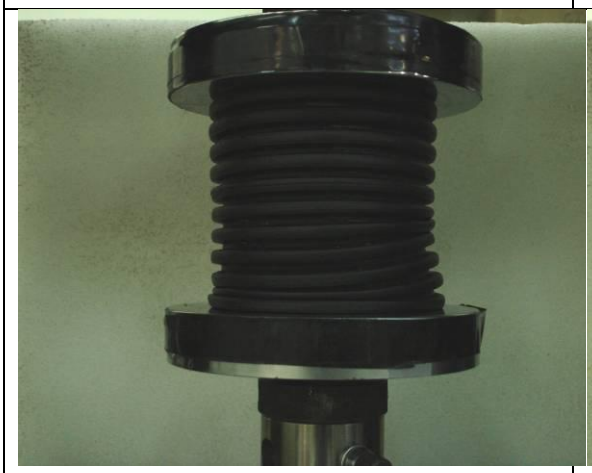
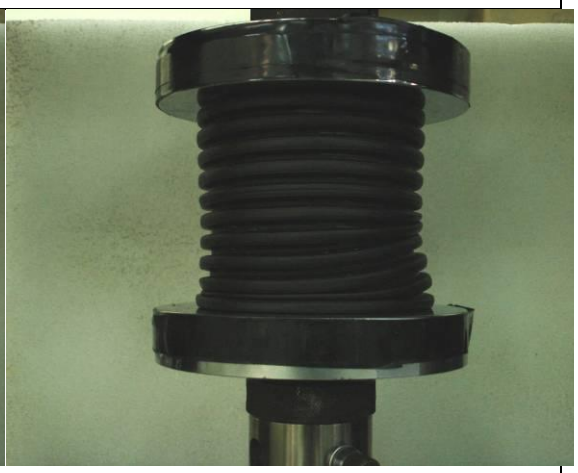
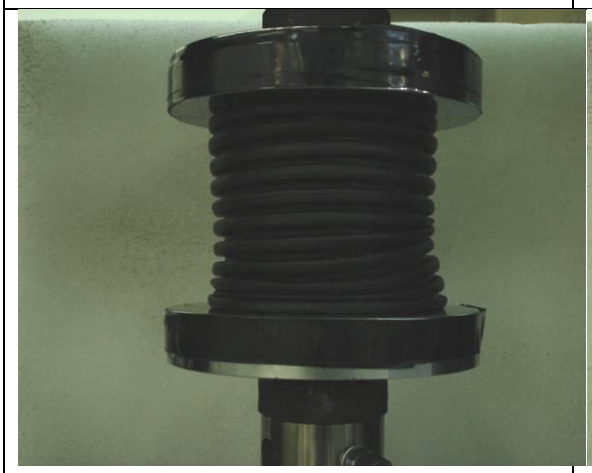
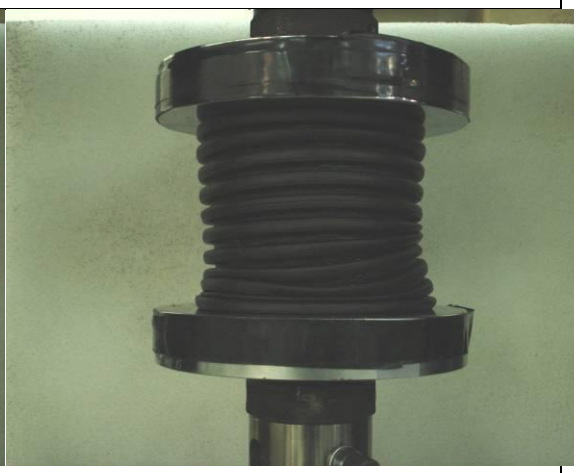
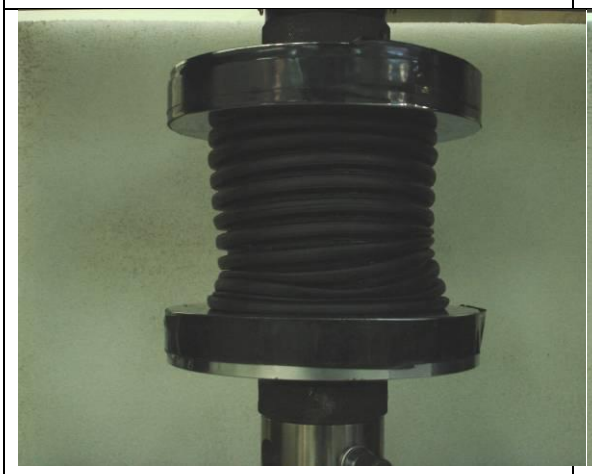
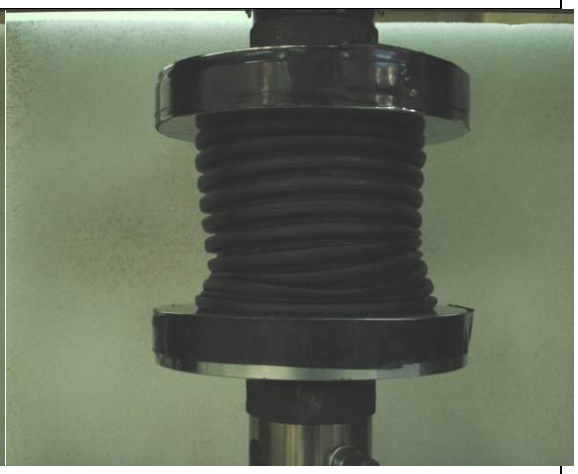


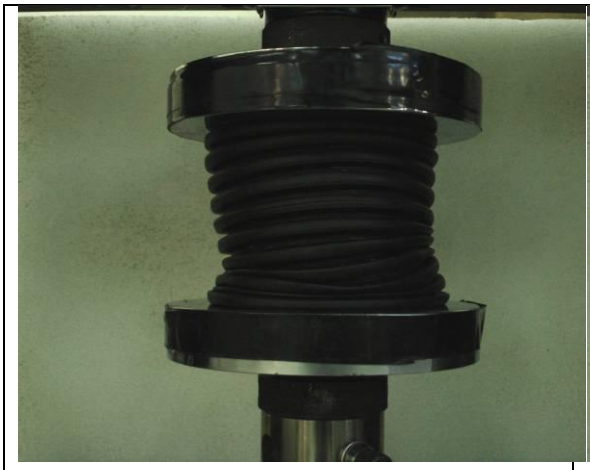
Στιγμιότυπο 0	Στιγμιότυπο 1
$L_0 = 0$	$L_0 = 2,5$

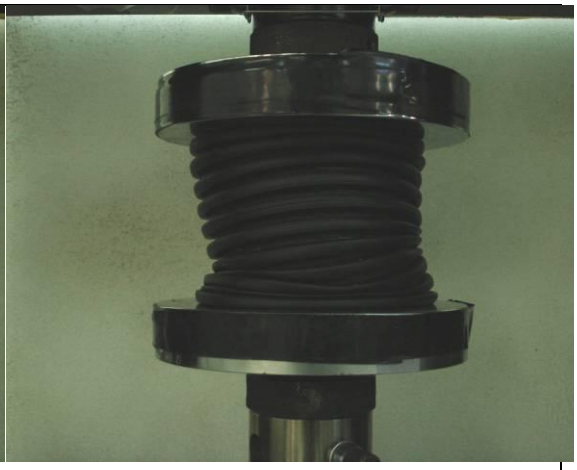




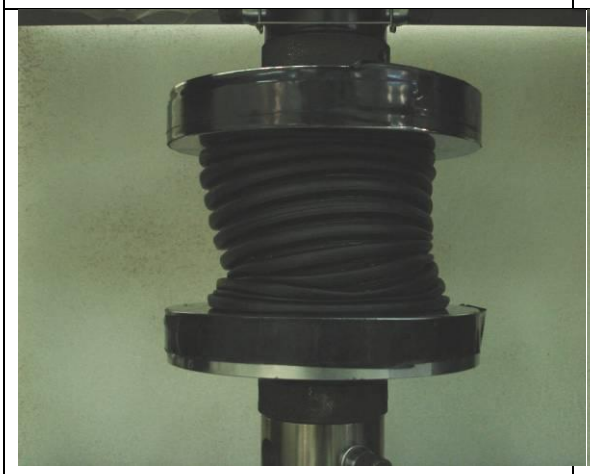
Στιγμιότυπο 2	Στιγμιότυπο 3

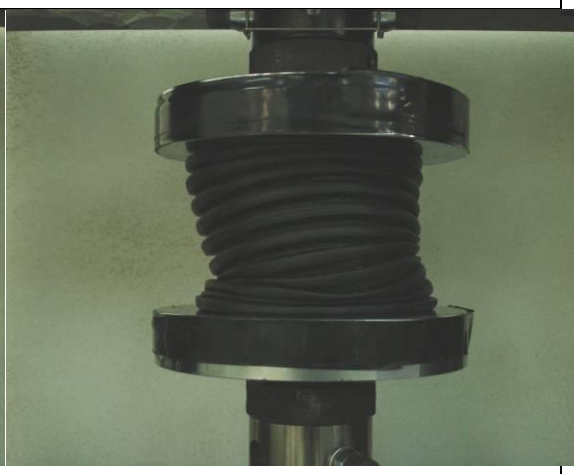
L_0 = 3,9	**L_0 = 6,1**
	
Στιγμιότυπο 4 **L_0 = 9,1**	**Στιγμιότυπο 5** **L_0 = 13,1**
	
Στιγμιότυπο 6 **L_0 = 16,5**	**Στιγμιότυπο 7** **L_0 = 19,6**
	
Στιγμιότυπο 8 **L_0 = 23,2**	**Στιγμιότυπο 9** **L_0 = 26**



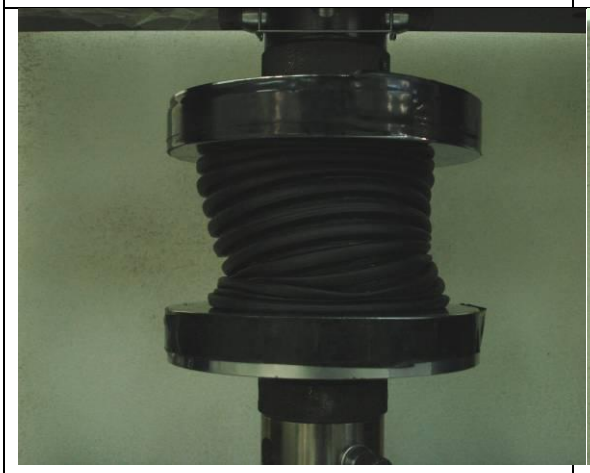


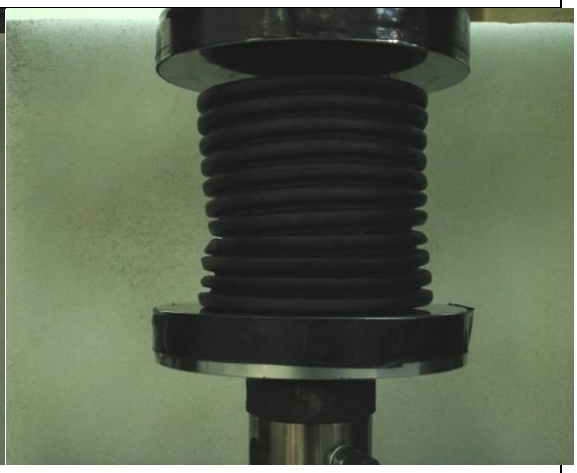
Στιγμιότυπο 10 **L_0 = 27,4**	**Στιγμιότυπο 11** **L_0 = 29,8**





Στιγμιότυπο 12 **L_0 = 32,6**	**Στιγμιότυπο 13** **L_0 = 35,7**

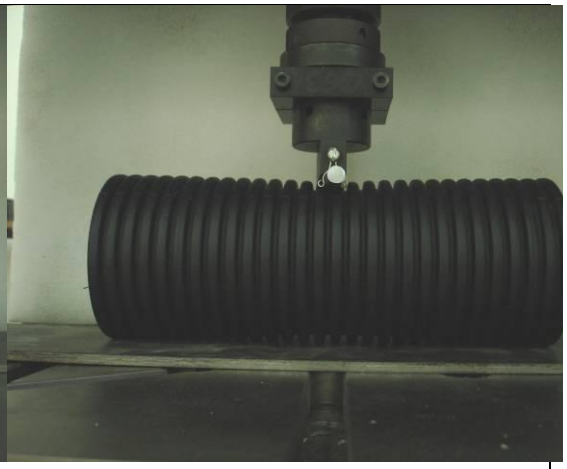




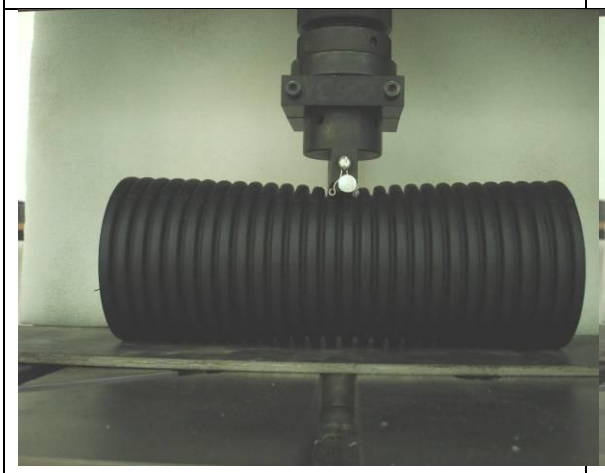
Στιγμιότυπο 14 **L_0 = 40**	**Στιγμιότυπο 15** **L_0 = 0**

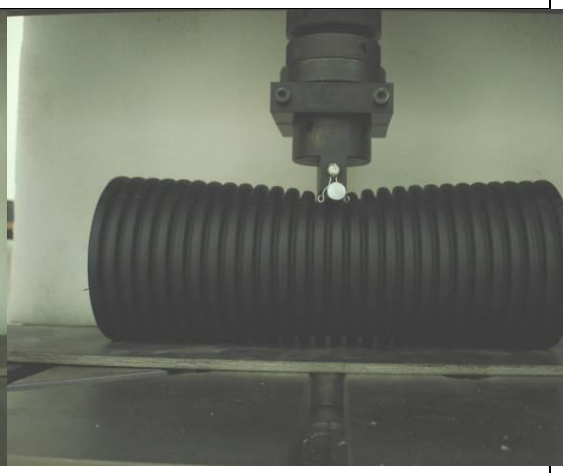
Σχήμα 4.4: Δοκίμιο 1 - Αξονική Κατάρρευση

ΔΟΚΙΜΙΟ 2

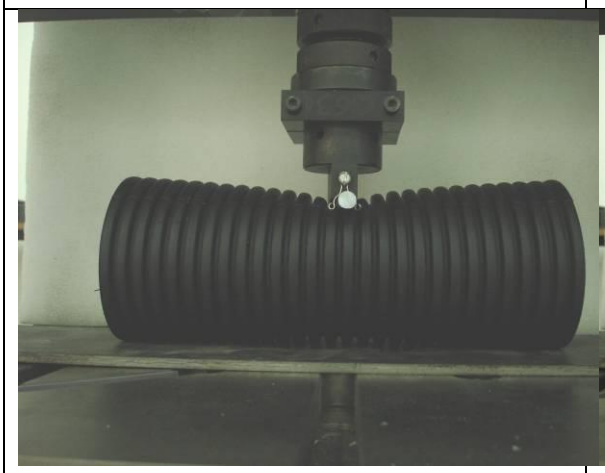


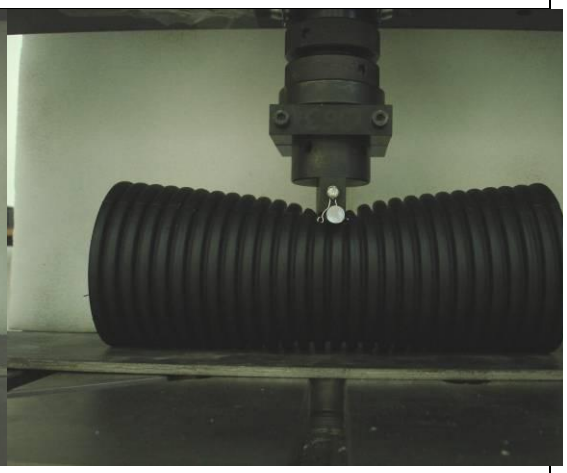
Στιγμιότυπο 0 **L_0 = 0**	**Στιγμιότυπο 1** **L_0 = 5,3**



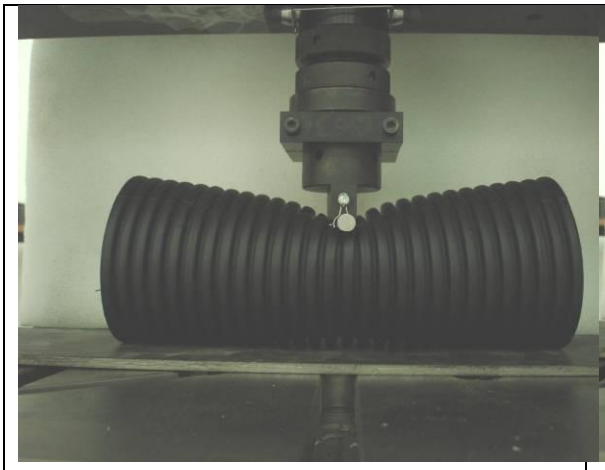


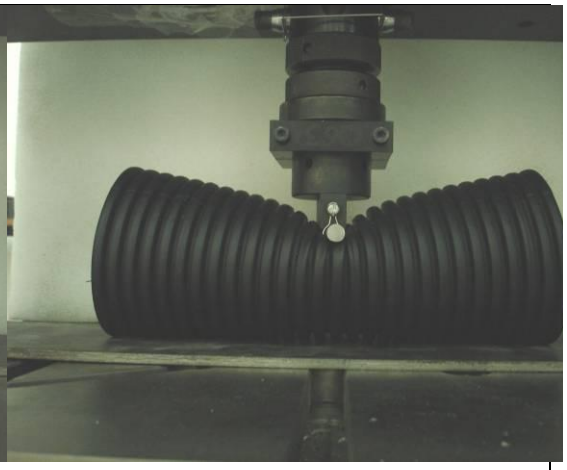
Στιγμιότυπο 2 **L_0 = 8**	**Στιγμιότυπο 3** **L_0 = 11,9**



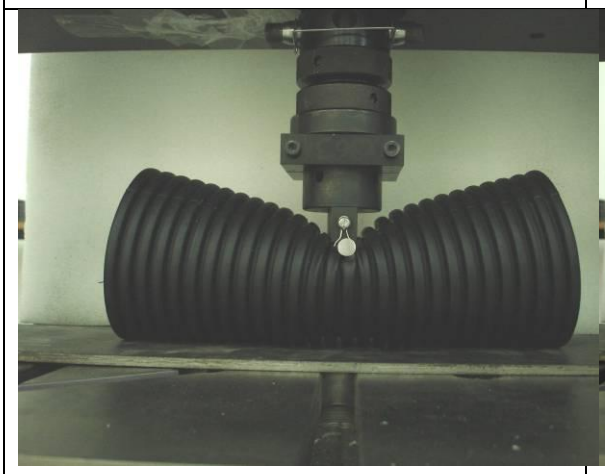


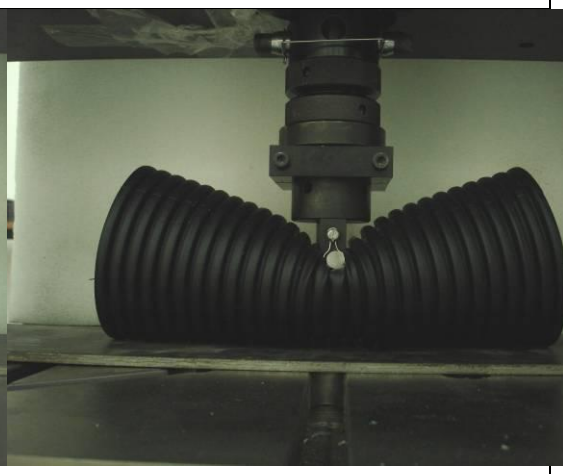
Στιγμιότυπο 4 **L_0 = 15,9**	**Στιγμιότυπο 5** **L_0 = 20,5**



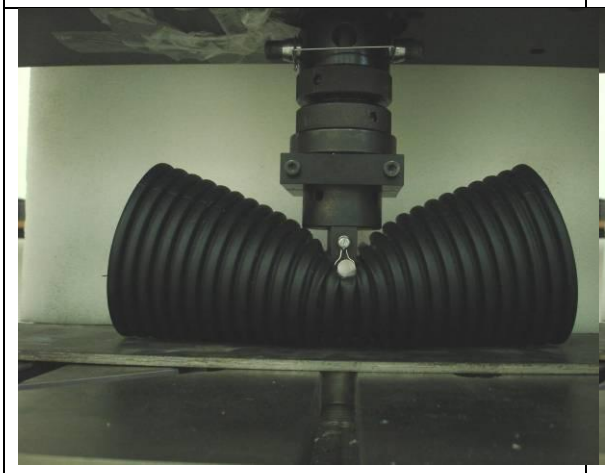


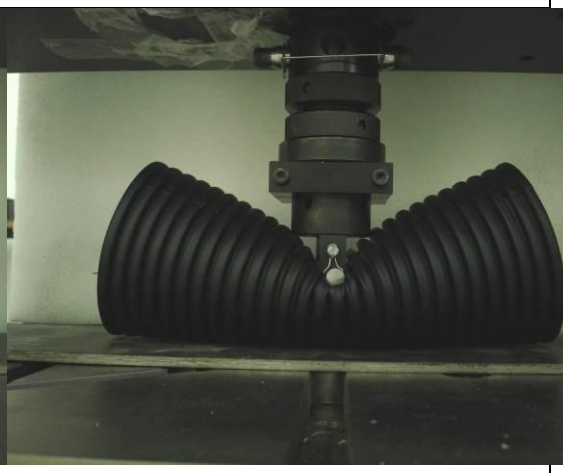
Στιγμιότυπο 6 **L_0 = 25,4**	**Στιγμιότυπο 7** **L_0 = 30,9**



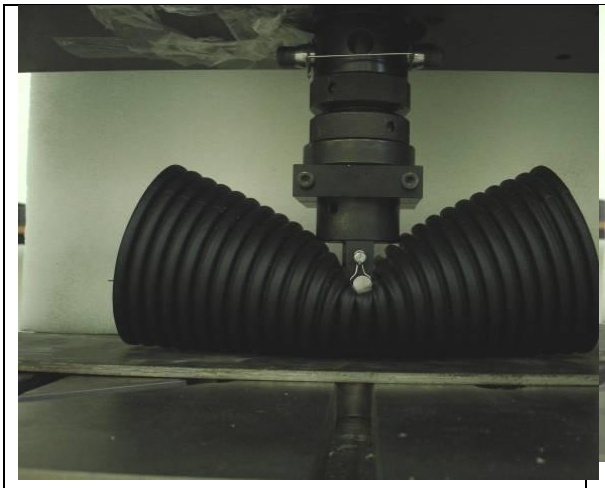
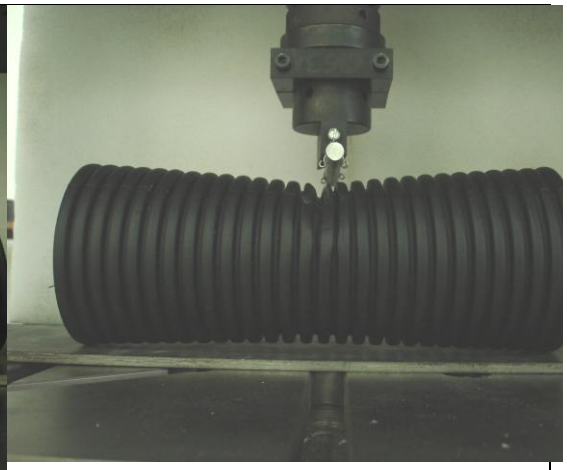


Στιγμιότυπο 8 **L_0 = 37,7**	**Στιγμιότυπο 9** **L_0 = 46,6**





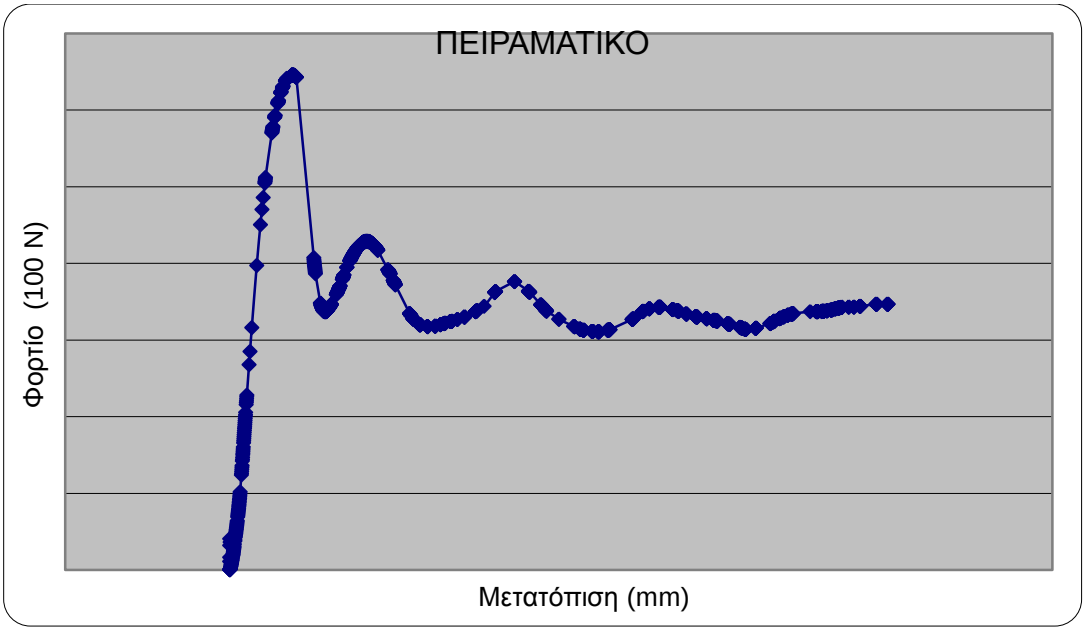
Στιγμιότυπο 10 **L_0 = 52,8**	**Στιγμιότυπο 11** **L_0 = 60,**

	
Στιγμιότυπο 12 **L_0 = 70,5**	**Στιγμιότυπο 13** **L_0 = 0**

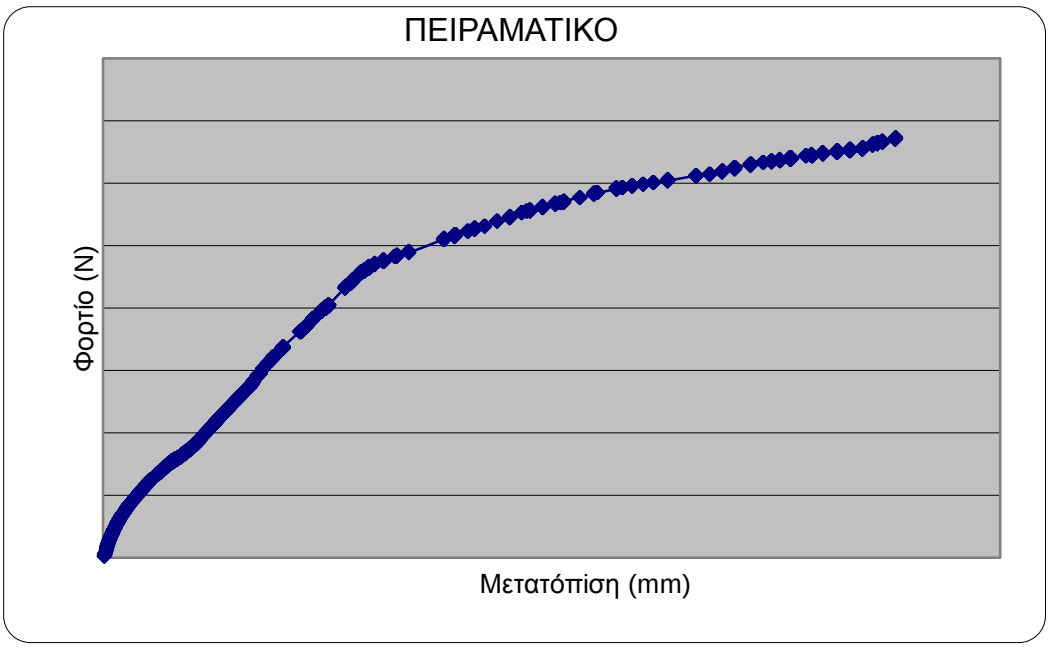
Σχήμα 4.5: Δοκίμιο 2- Πλευρική Κατάρρευση

Κατά την κατάρρευση των δοκιμίων παρατηρείται μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, όπως ήταν αναμενόμενο για το υλικό του πολυαιθυλενίου. Από τα διαγράμματα δεν είναι ξεκάθαρο το σημείο της μετάβασης και αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι όλες οι περιοχές στο υλικό του δοκιμίου δεν εισέρχεται ομοιόμορφα στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης.

Από τις παραμορφώσεις της γεωμετρίας των δοκιμίων κατά την εξέλιξη των πειραμάτων δεν παρατηρήθηκε αστοχία του υλικού. Στο δοκίμιο 1, κατα την αξονική παραμόρφωση, η μείωση του αρχικού ύψους κατά 36% απαιτεί εφαρμογή δύναμης της τάξης των 3232,18 N. Στο δοκίμιο 2, κατά την πλευρική κατάρρευση, η μείωση της αρχικής διαμέτρου κατά 63%. απαιτεί εφαρμογή δύναμης της τάξης των 673,82 N



Διάγραμμα 4.1: Μετατόπιση - Φορτίο Αξονικής Κατάρρευσης



Διαγραμμα 4.2: Μετατόπιση - Φορτίο Πλευρικής Κατάρρευσης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1) Osswald T.A., Menges G., *'Materials Science of Polymers for Engineers',* Hanser Publisher, New York. 2003.

2) Oesper E., Ralph E., *Journal of Chemical Education* **6**: 432 – 440 (1929).

3) Μανωλάκος Δ., '*Σημειώσεις διαλέξεων στα πλαίσια του μαθήματος Προηγμένα Υλικά'* Σχολής Μηχαν.Μηχανικών Ε.Μ.Π. (2003).

4) Cowie, J.M.G. *'Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials,* Chapman and Hall, 2nd edition (1991).

5) Rahman, Shah "Thermoplastics at Work: A Comprehensive Review of Municipal PVC Piping Products, (2004). Process Emissions for Vinyl Pipe Industry, Journal of Vinyl & Additive Technology, September, 1996.

6) PVC vs. Copper, Domestic Hot & Cold Water Systems, A Cost/Benefit Comparison, conducted by IFT Technical Services, Berkeley, California, for the Vinyl Institute, July, 1990.

7) PVC Drain, Waste and Vent Pipe vs. Cast Iron Soil Pipe, A Cost/Benefit Comparison, conducted by IFT Technical Services, Berkeley, California, for the Vinyl Institute, July, 1990.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΟ LS-DYNA

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μοντελοποίηση της πλευρικής καταπόνησης των δοκιμίων γίνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA για τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση μοντέλων σε τρεις διαστάσεις. Το λογισμικό αυτό εμφανίζεται για πρώτη φορά στην αγορά το 1976. Με το πέρασμα των χρόνων, εξελίσσεται και βελτιώνεται συνεχώς με την προσθήκη πολλών νέων παραμέτρων και βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχουσών για να φτάσουμε στην τελευταία έκδοση που χρησιμοποιείται σήμερα. Το πρόγραμμα αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τους ερευνητές και χρησιμοποιείται ευρέως τόσο σε πανεπιστημιακά όσο και σε βιομηχανικά εργαστήρια. Το λογισμικό LS-DYNA χρησιμοποιεί EXPLICIT κώδικα και η λειτουργία του στηρίζεται σε δυο βασικά προγράμματα, τον επονομαζόμενο Προ / Μετά - Επεξεργαστή (Pre/Post-Processor) και το ίδιο το LS-DYNA, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας κειμένου και επίλυσης του εκάστοτε πειράματος που μοντελοποιείται βάση αυτού του λογισμικού [1-3]. Η μοντελοποίηση του δοκιμίου γίνεται στον Προ- Επεξεργαστή ενώ η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται στο Μετά -Επεξεργαστή, η λειτουργία των δυο αυτών προγραμμάτων στηρίζεται στο πρόγραμμα FEMB (Finite Element Builder). Η εταιρία κατασκευής των προγραμμάτων Pre και Post Processor, είναι η ETA και η τρέχουσα έκδοση είναι η 28.

5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ LS-DYNA

Το πρώτο και σημαντικότερο στάδιο για τη μοντελοποίηση των πειραματικών διαδικασιών σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, όπως το LS-DYNA, είναι ο καθορισμός του είδους της ανάλυσης και της φύσης του προβλήματος. Προσδιορίζεται το είδος του προβλήματος:

- Ελαστική ή πλαστική ανάλυση,

- Στατικό πρόβλημα (μη - εξαρτώμενο από το χρόνο) ή Δυναμικό πρόβλημα (χρονικά εξαρτώμενο πρόβλημα),

- Γραμμικό ή μη-γραμμικό πρόβλημα.

Σε κάθε περίπτωση βάση της αρχής D Alembert, διατυπώνονται οι εξισώσεις ισορροπίας που διέπουν το πρόβλημα:

$$\Sigma fi = \rho(t) \qquad [5.1]$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων των επιμέρους δυνάμεων στις οποίες υποβάλλεται το δοκίμιο προς μελέτη, των εξισώσεων κίνησης και θεωρώντας ότι το πρόβλημα είναι γραμμικό, προκύπτει η συνήθης γραμμική διαφορική εξίσωση σε μητρωϊκή μορφή:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\acute{u}(t)+K]\{u(t)\} = \{\rho(t)\} \qquad [5.2]$$

[M] Μητρώο μάζας, [C] Μητρώο απόσβεσης, [K] Μητρώο δυσκαμψίας, ü(t) Διάνυσμα επιτάχυνσης, ύ(t) Διάνυσμα ταχύτητας, υ(t) Διάνυσμα μετατόπισης, ρ(t) Διάνυσμα φορτίσεων.

Η επίλυση αυτών των εξισώσεων, γίνεται με τις γνωστές μεθόδους λύσης διαφορικών εξισώσεων δευτέρου βαθμού.

Στην περίπτωση μη γραμμικής συμπεριφοράς, οι ελαστικές δυνάμεις δεν είναι ανάλογες της μετατόπισης και η διαφορική εξίσωση παίρνει τη παρακάτω μορφή:

$$m\cdot \ddot{u} + \boldsymbol{C}\cdot \acute{u} + k\cdot u = \rho(t) \qquad [5.3]$$

Η επίλυση αυτών των διαφορικών εξισώσεων, γίνεται μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Επίλυση διαφορικών εξισώσεων μη γραμμικών προβλημάτων μέσω του λογισμικού LS DYNA. Όπως αναφέρθηκε στη εισαγωγή, το λογισμικό LS DYNA χρησιμοποίει Explicit κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Για την επίλυση αυτών των διαφορικών

εξισώσεων ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί τη μέθοδο κεντρικής διαφοράς [4-9]. Πρόκειται για μια επαναληπτική μέθοδο, μέσω της οποίας γίνεται η ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης στον χρόνο. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την ικανοποίηση των παρακάτω συνθηκών:

$$\ddot{U}t = \frac{1}{\Delta t^2}(U_{1-\Delta t} - 2U_t + U_{1-\Delta t})$$

$$\dot{U}t = \frac{1}{2\Delta t}(-U_{1-\Delta t} + U_{1-\Delta t})$$

Οι εξισώσεις κίνησης σε μητρωϊκή μορφή, είναι οι εξής:

$$M \times a^n = P^n - F_n + H_n$$

M : διαγώνιο μητρώο μάζας,

P^n: μητρώο εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων,

P^n: διάνυσμα απόκλισης των τάσεων,

H^n: αντίδραση κλεψύδρας.

Για την μεταβίβαση από το βήμα ΐ στο βήμα ΐ +1, με τη μέθοδο ολοκλήρωσης των κεντρικών διαφορών έχουμε:

$$a_n = M^{-1} \times (P^n - F_n + H_n)$$

$$v^{n+1/2} = v^{n-1/2} + a^n \times \Delta t^n$$

$$U^{n+1} = u^n + v^{n+1/2} \times \Delta t^{n+1/2}$$

Όπου,

V: η ταχύτητα των κόμβων στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων υ: το διάνυσμα των μετατοπίσεων

Οι νέες θέσεις των διαφόρων σημείων της αρχικής γεωμετρίας, προκύπτουν με τη προσθήκη των αποτελεσμάτων στις προηγούμενες μεταβολές των μετατοπίσεων.

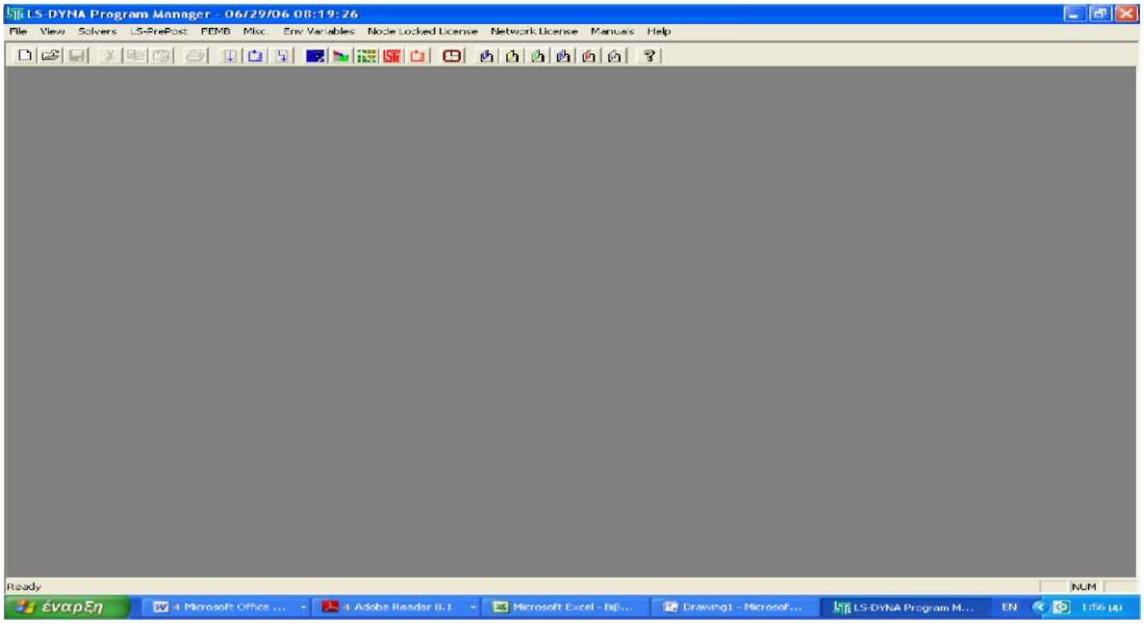
$$X^{n+1} = X^{0} + u^{n+1}$$

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μικρή ευαισθησία σε σφάλματα στρογγυλοποίησης και τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν επηρεάζονται από πιθανά σφάλματα του χρησιμοποιούμενου Η/Υ. Η μέθοδος αυτή είναι χρονοβόρα και απαιτείται μεγάλος αποθηκευτικός χώρος για την αποθήκευση των ενδιάμεσων σταδίων και των τελικών αποτελεσμάτων.

5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΟ LS DYNA

5.3.1 ΚΥΡΙΟ ΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ LS DYNA

Η προσομοίωση των δοκιμίων και της καταπόνησης στην οποία αυτά υποβάλλονται προϋποθέτει τη χρήση των τριών προγραμμάτων που διαθέτει το λογισμικό LS DYNA. Η μεταβίβαση σε κάθε ένα από τα τρία αυτά προγράμματα γίνεται από το κύριο μενού του προγράμματος.



Σχήμα 5.1.: Κύριο μενού προγράμματος LS DYNA

Στο μενού **File** δίνεται η δυνατότητα ανάγνωσης ή δημιουργίας κάποιου αρχείου ανάγνωσης, όπως το αρχείο *.dyn, βάση των εντολών, OPEN και NE\/\/. Η προβολή τέτοιων αρχείων γίνεται μέσω του text editor, το οποίο περιλαμβάνει το πρόγραμμα **LS DYNA**.

Στο μενού **Solvers,** γίνεται η επιλογή της εντολής ανάλυσης των μοντέλων που έχουν δημιουργηθεί στο πρόγραμμα FEMB. Ανάλογα με την εντολή που επιλέγουμε, ξεκινά μια νέα ανάλυση ή συνεχίζει μια προηγούμενη που πιθανόν να έχει σταματήσει.

Στο μενού FEMB, γίνεται η πρόσβαση στα προγράμματα Pre και Post - Processor καθώς επίσης και στο (Graph – Processor).

5.3.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PRE-PROCESSOR – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 1 & 2:

Γεωμετρικός σχεδιασμός των τεμαχίων του μοντέλου

Ορίζεται η δημιουργία νέου τεμαχίου, στο οποίο αποδίδεται η ονομασία "σταθερή βάση". Οι διαστάσεις του είναι 150 χ 150 χ 20 . Στη συνέχεια, ορίζεται η δημιουργία δεύτερου τεμαχίου, με την ονομασία "πλάκα θλίψης".. Η γεωμετρία του δοκιμίου κατασκευάζεται με την εντολή Line>CREATE>ARC>ABOUT A CENTER . Επιλέγεται ως σύστημα συντεταγμένων το Global System. Στη συνέχεια, συμπληρώνουμε τα απαραίτητα δεδομένα. Σημειώνεται ότι αρχικά κατασκευάζεται το ένα τέταρτο του δοκιμίου, ούτως ώστε να γίνει η διακριτοποίηση του, για μεγαλύτερη ευκολία, και στη συνέχεια με την εντολή MIROR ολοκληρώνεται η μορφή του δοκιμίου.

Διακριτοποίηση μοντέλου

Η διακριτοποίηση του μοντέλου γίνεται με την εντολή Element>Plate/Solid ME5H. Με την εντολή αυτή ορίζονται πεπερασμένα στοιχεία (FE) τύπου BRICK. Τα τρία τεμάχια διακριτοποιούνται επιλέγοντας 12-Line (Solid). Με την επιλογή αυτή ορίζεται ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων για κάθε τεμάχιο (Division). Για την "σταθερή βάση" και την "πλάκα θλίψης" η τριάδα των Division είναι: N_1= 1,N_2=1,N_3=1, ουσιαστικά το τεμάχιο αποτελεί ένα πεπερασμένο στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι οι δυο πλάκες δεν διακριτοποιούνται, διότι όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω το υλικό τους μοντελοποιείται με απαραμόρφωτο υλικό (MAT 20). Για το δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε η εξής τριάδα των: N1= 26,N2=2,N3=8. Δηλαδή, 26 πεπερασμένα στοιχεία περιφερειακά στο τόξο των 90 μοιρών, στο σύνολο του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν 104 πεπερασμένα στοιχεία, 2 πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος και 8 πεπερασμένα στοιχεία κατά το πλάτος. Για να προσομοιώνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η παραμόρφωση σε κάμψη, απαιτούνται τουλάχιστον δυο πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος. Το πλήθος των άλλων δυο μεγεθών προκύπτει από την απαίτηση ομοιομορφίας των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την διακριτοποίηση του δοκιμίου.

Το αμέσως επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος των κόμβων. Με την εντολή MIRROR, για την ολοκλήρωση του δοκιμίου, εμφανίζονται στις ακμές του περιγράμματος του κάθε τεταρτημορίου του δοκιμίου που επαναλαμβάνεται διπλοί κόμβοι με τις ίδιες συντεταγμένες. Ο έλεγχος που πραγματοποιείται αποσκοπεί στη συγχώνευση τέτοιων κόμβων, ώστε το πρόγραμμα να αντιλαμβάνεται το δοκίμιο ως ένα ενιαίο σώμα. Για τη περάτωση της διαδικασίας αυτή επιλέγουμε την εντολή Node>Check Coincident. Στη συνέχεια, ορίζεται η ανοχή του ελέγχου, δηλαδή η ακτίνα γύρω από την οποία θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος γειτονικών κόμβων.

Τέλος, ελέγχεται η ορθότητα του σχεδιασμού των στερεών στοιχείων των σωμάτων με την εντολή Check> Auto Orient Solid

Προσδιορισμός φυσικών ιδιοτήτων του μοντέλου

Στη φάση αυτή επιλέγονται και αποδίδονται οι φυσικές ιδιότητες για το κάθε τεμάχιο. Στη περίπτωση του πρώτου δοκιμίου η "σταθερή βάση", η "πλάκα θλίψης" και το δοκίμιο έχουν την ίδια φυσική ιδιότητα. Τα τεμάχια αυτά είναι στερεά σώματα (5OIIü5). Η εντολή για την διαδικασία αυτή είναι η εξής, Property>Crete>Solids, καθορίζεται η ονομασία της κάθε ιδιότητας, SECID 1, SECID 2 , SECID 3 και αποδίδεται με την εντολή ASSIGN στο κάθε τεμάχιο του μοντέλου. Σημειώνεται ότι στη θέση EIEMENT FORMULATION επιλέγεται ο αριθμός 2 για το δοκίμιο, που αντιστοιχεί στην ιδιότητα Fully integrated S/R Solid. Με την επιλογή αυτή εξασφαλίζεται η πιο ρεαλιστική απεικόνιση των έντονα παραμορφωμένων περιοχών καθώς έτσι αποφεύγεται η πιθανή εμφάνιση του φαινόμενου "hour glassing" (έντονη στρέβλωση) στα πεπερασμένα στοιχεία. Για τα δυο άλλα τεμάχια γίνεται χρήση (by default) του προεπιλεγμένου τύπου ELEMENT FORMULATION (αριθμός 1), που αντιστοιχεί στη ιδιότητα Constant stress solid. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται καθώς τα υλικά αυτά θεωρούνται απαραμόρφωτα. [LS DYNA Theory Manual]

Καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την εντολή Materiall>CREATE>STRUCTURAL>επιλογή κωδικού υλικού, από τις κάρτες υλικών του κώδικα LS - DYNA, με το οποίο θα γίνει η προσομοίωση του δοκιμίου.

- Για την σταθερή βάση:

Η βάση και η πλάκα θλίψης είναι κατασκευασμένα από χάλυβα. Από το Manual του LS - DYNA ο καταλληλότερος τύπος υλικού που προσομοιώνει καλύτερα το υλικό του τεμαχίου της βάσης είναι το MATERIAL TYPE 20 (MAT_RIGID), απαραμόρφωτο υλικό.

Ιδιότητες του υλικού:

Πυκνότητα Χάλυβα (MASS DENSITY) : 7.830000E-003

Μέτρο ελαστικότητας (YOUNG MODULUS) : 2.070000E+005

Λόγος POISSON (POISONS RATIO) : 3.0000E-001

Βαθμοί ελευθερίας κίνησης του τεμαχίου:

CON : 1

CON :7

CON :7

Οι παραπάνω επιλογές σημαίνουν ότι το τεμάχιο δεν μεταφέρεται κα δεν περιστρέφεται. Τα υλικά που δημιουργήθηκαν ονομάζονται ως εξής, MID 1, MID 2, MID 3 και με την εντολή ASSIGN αποδίδονται σε κάθε ένα από τα τεμάχια που έχουν κατασκευαστεί.

Για την πλάκα θλίψης:

Ο τύπος του υλικού καθώς και οι ιδιότητες του είναι ίδιες με εκείνες της σταθερής βάσης. Οι βαθμοί ελευθερίας διαφέρουν.

CON : 1 CON :6 CON :7

Οι παραπάνω επιλογές σημαίνουν ότι το τεμάχιο δεν περιστρέφεται και δεν μεταφέρεται κατά τους άξονες χ και ζ, παρά μόνο κατά τον άξονα γ.

-Για το δοκίμιο:

Από το Manual του LS DYNA ο καταλληλότερος τύπος υλικού που προσομοιώνει καλύτερα το υλικό του δοκιμίου (HDPE) είναι το MATERIAI TYPE 24 (MAT_PIECE\/\/ISE_LINEAR_PLASTICITY). Για την προσομοίωση της καταπόνησης απαιτούνται επίσης σημεία της καμπύλης τάσης παραμόρφωσης του υλικού των δοκιμίων. Για τον σκοπό αυτό διεξήχθη το πείραμα εφελκυσμού, από το οποίο προέκυψα τα ζητούμενα. Σημειώνεται ότι τα σημεία αυτά αφορούν την περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1. σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα. Τα υλικά τα οποία δημιουργούνται ονομάζονται ως εξής, MID 1, MID 2, MID 3 και με την εντολή ASSIGN αποδίδονται σε κάθε ένα από τα τεμάχια που έχουν κατασκευαστεί.

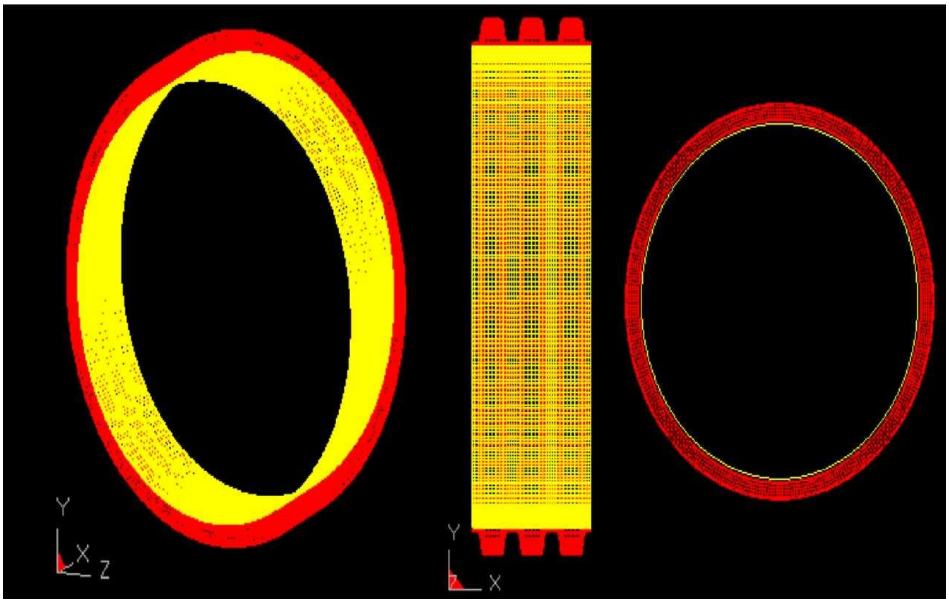
Πίνακας 5.1. Δοκιμές εφελκυσμού σωλήνων

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΩΛΗΝΩΝ					
ΣΩΛΗΝΑΣ Corrugated	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm^3)	TENSILE STRAIN (%)	YIELD STRENGTH (MPa)	BREAK STRESS (MPa)	ELONGATION AT BREAK %
Φ 110	0.955	12.71	21.83	21.84	380.62

Για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του μοντέλου θα πρέπει να οριστούν οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή έτσι ώστε να μην εμφανιστεί το ανεπιθύμητο φαινόμενο της εισχώρησης του ενός τεμαχίου στο άλλο. Τα τεμάχια του μοντέλου που έρχονται σε επαφή είναι τρία, οπότε οι διεπιφάνειες θα είναι τρεις. Η μια μεταξύ της κάτω βάσης της πλάκας θλίψης και του πάνω μέρους του δοκιμίου, η άλλη θα είναι μεταξύ της πάνω βάσης της σταθερής βάσης και του κάτω μέρους του δοκιμίου και η τελευταία θα είναι εκείνη μεταξύ των στοιχείων του δοκιμίου.

Με την εντολή SET>NODES>CREATE>(όνομα)>BY ELEMENT ορίζονται οι πάνω και κάτω επιφάνειες της σταθερής βάσης και της πλάκας θλίψης, αντίστοιχα καθώς και τα στοιχεία που απαρτίζουν το δοκίμιο. Με την εντολή SET>NODES> CREATE > (όνομα) ορίζονται οι πάνω και κάτω επιφάνειες του δοκιμίου. Με την εντολή CONTACT>CREATE>3 DIMENSION>CONTACT-NODES TO SURFACE>(όνομα) καθορίζονται οι επιφάνειες, οι οποίες έρχονται σε επαφή. Στο σημείο αυτό ορίζεται ως MASTER επιφάνεια η κάτω βάση της πλάκας θλίψης και η πάνω βάση της σταθερής βάσης, και ως επιφάνεια SLAVE ένα μέρος των στοιχείων του δοκιμίου με τα οποία έρχεται σε επαφή η κάθε MASTER επιφάνεια αντίστοιχα. Με την εντολή CONTACT>CREATE>3 DIMENSION>CONTACT SINGLE SURFACE > (όνομα). όλα τα στοιχεία του δοκιμίου ορίζονται ως SLAVE SEGMENTS. Σε κάθε μια από τις παραπάνω εντολές ορίζονται οι γενικά αποδεκτές τιμές συντελεστών τριβής: συντελεστής στατικής τριβής FS = 0.2 και συντελεστής δυναμικής τριβής FD =0.15.

Ο σχεδιασμός του μοντέλου ολοκληρώνεται με τον καθορισμό των επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Στο σημείο αυτό το αρχείο αποθηκεύεται σε μορφή *.fmb. Στο Σχήμα 5.1. παρουσιάζεται τα δοκίμια όπως μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα Pre-Processor.

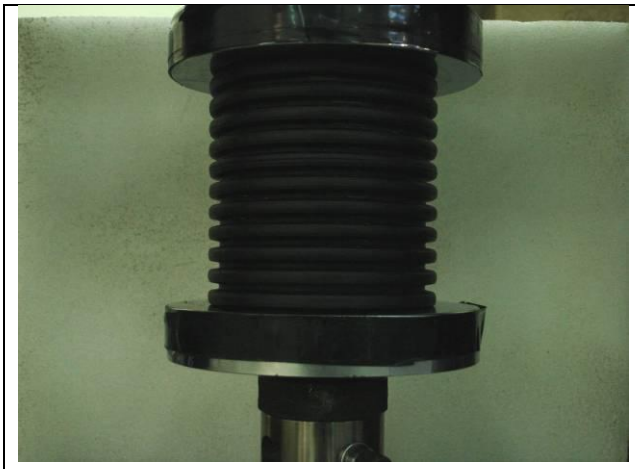
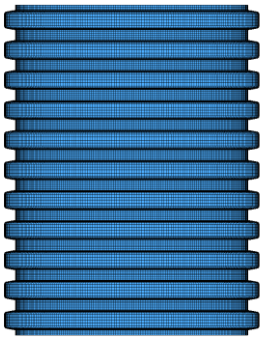
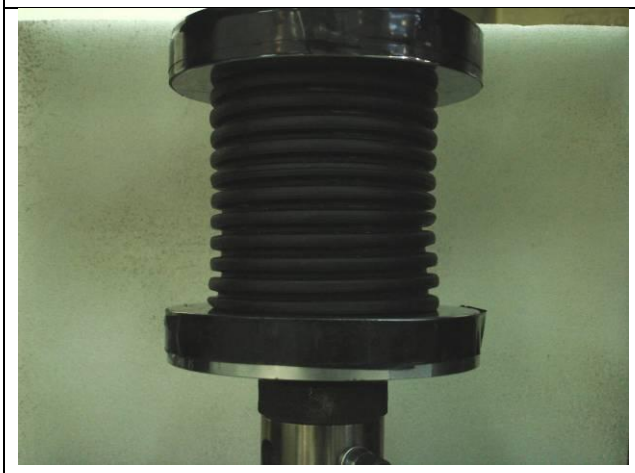
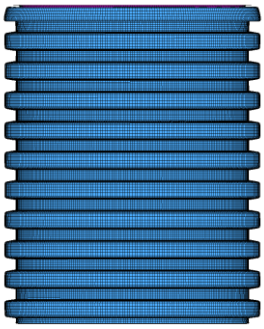


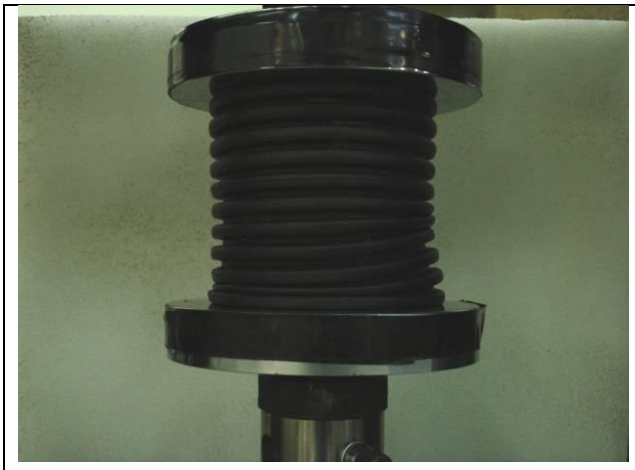
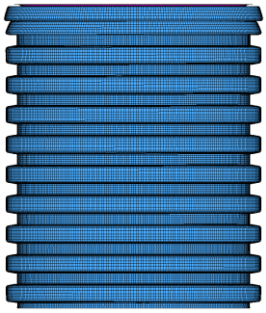
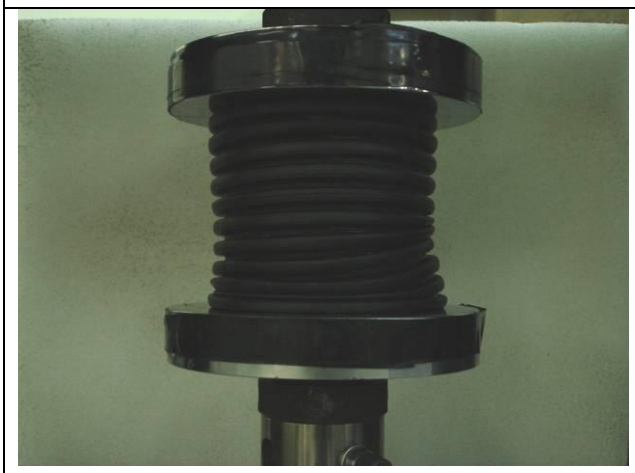
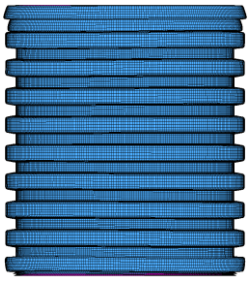
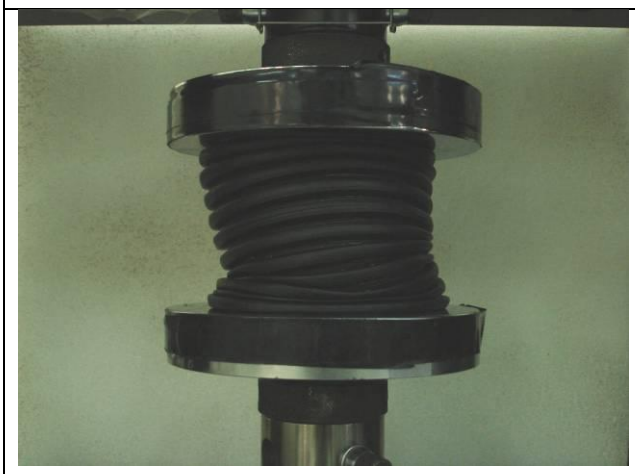
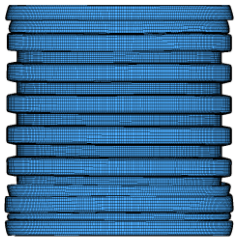
Σχήμα 5.1: Μοντελοποίηση Δοκιμίων στο πρόγραμμα LS DYNA

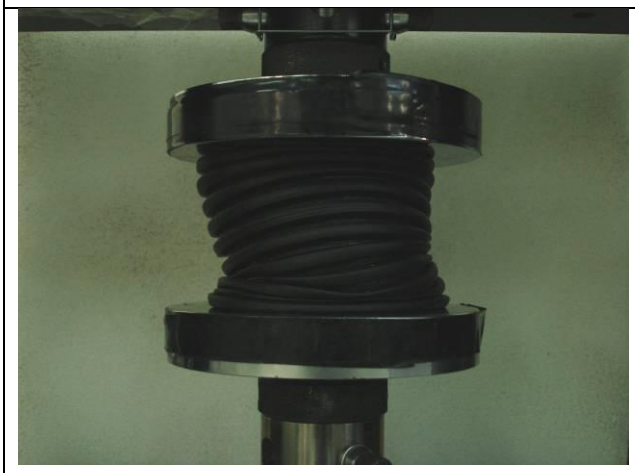
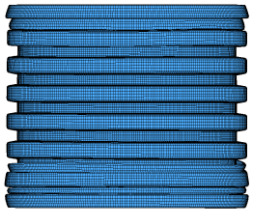
5.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ POST-PROCESSOR -ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Μέσω του προγράμματος Post-Processor λαμβάνονται τα αποτελέσματα των φάσεων προσομοίωσης της καταπόνησης και οι γραφικές παραστάσεις φορτίου - μετατόπισης για κάθε δοκίμιο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη προσομοίωση της πλευρικής καταπόνησης.

ΔΟΚΙΜΙΟ 1

	
Στιγμιότυπο 0 Exp **L_0 = 0**	**Στιγμιότυπο 0 FEM** **L_0 = 0**
	
Στιγμιότυπο 1 Exp **L_0 = 3,9**	**Στιγμιότυπο 1 FEM** **L_0 = 3,9**

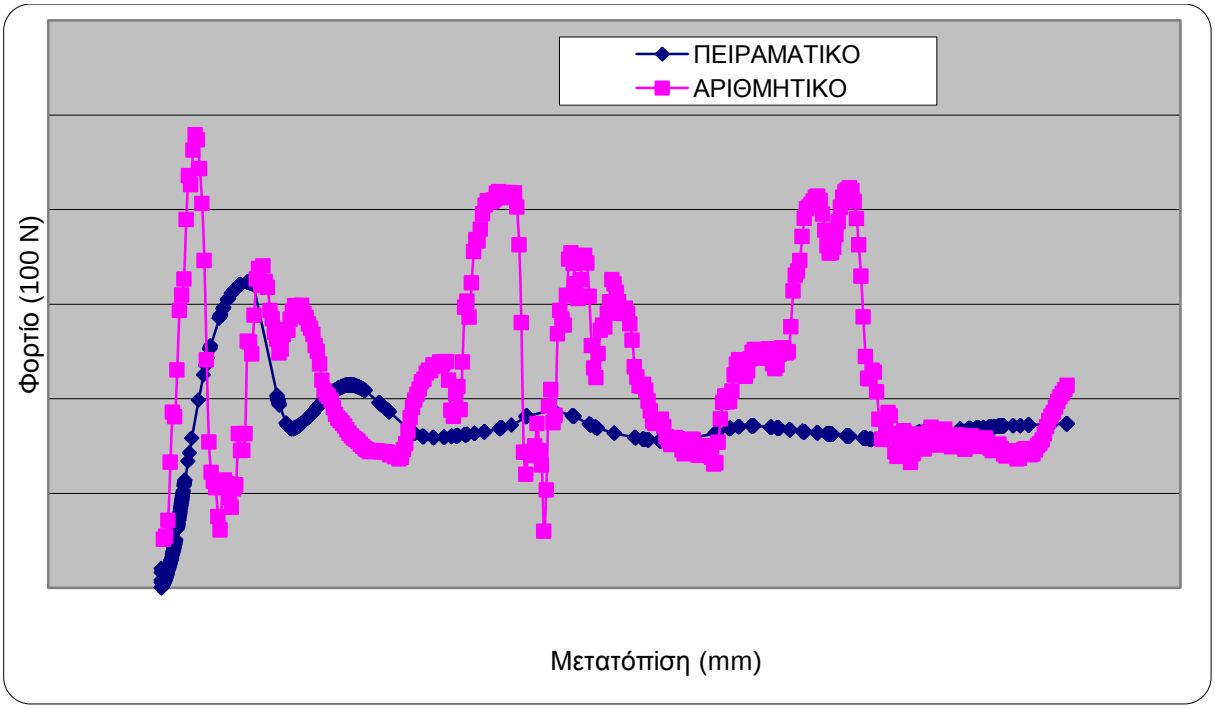
	
Στιγμιότυπο 2 Exp **L_0 = 9,1**	**Στιγμιότυπο 2 FEM** **L_0 = 9,1**
	
Στιγμιότυπο 3 Exp **L_0 = 16,5**	**Στιγμιότυπο 3 FEM** **L_0 = 16,5**
	
Στιγμιότυπο 4 Exp	**Στιγμιότυπο 4 FEM**

L_0 = 32,6	L_0 = 32,6
	
Στιγμιότυπο 5 Exp **L_0 = 40**	**Στιγμιότυπο 5 FEM** **L_0 = 40**

Σχήμα 5.2:.: Φάσεις κατάρρευσης 1^{ου} δοκιμίου (6) αποτελέσματα προσομοίωσης στο LS-DYNA.

<u>Πίνακας 5.2. — Σύγκριση αποτελεσμάτων</u> - <u>Δοκίμιο 1.</u>

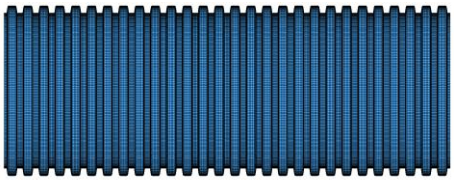
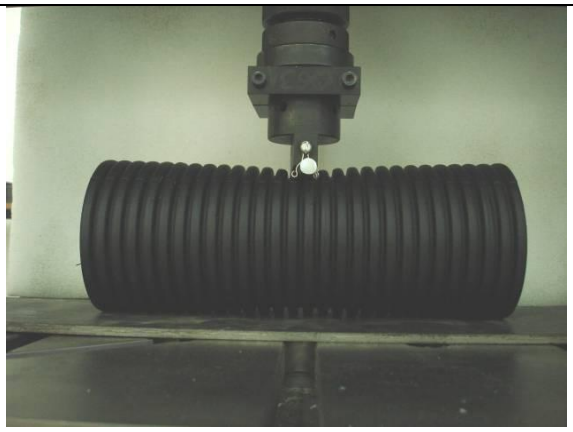
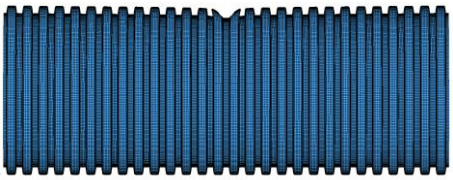
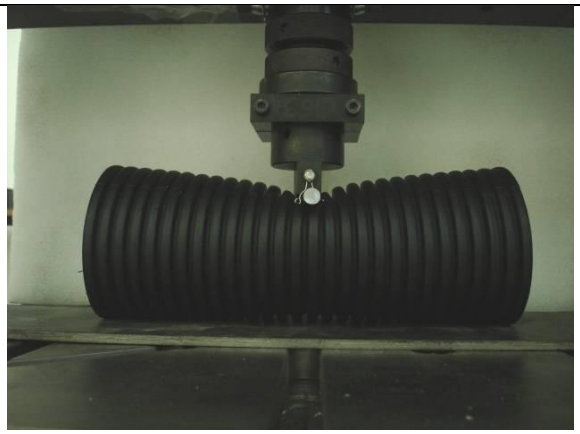
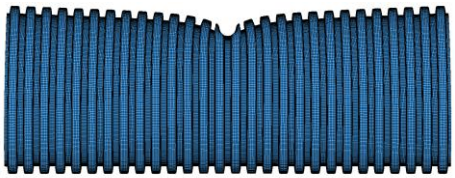
ΔΟΚΙΜΙΟ 1		**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**	**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ	P_{max}	3232,18 (N)	4792 (N)
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ	P_{mean}	1742,18 (KN)	2263,5 (N)

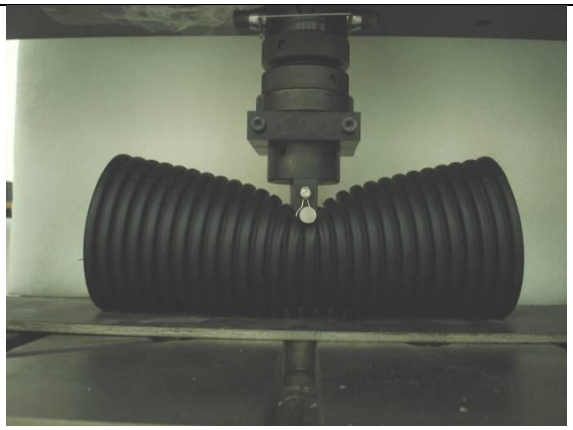
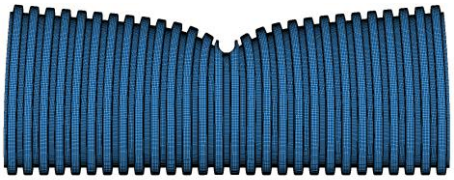
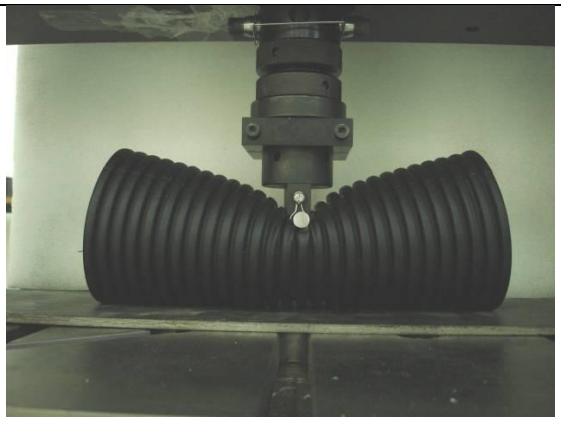
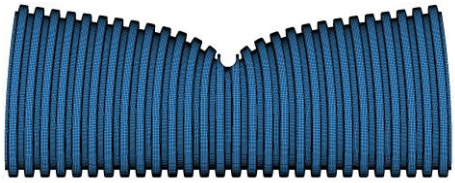
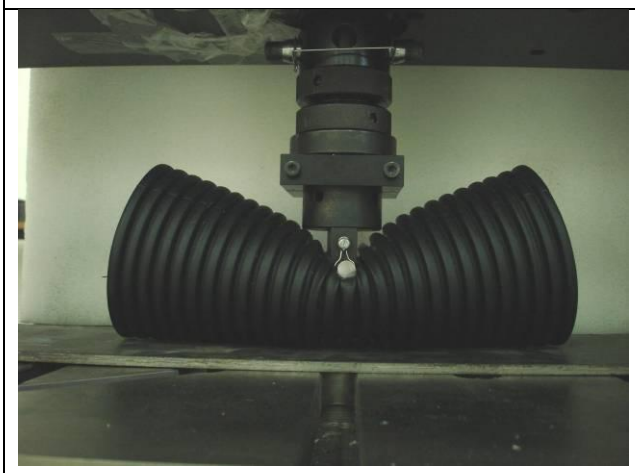
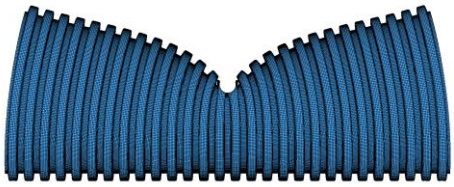


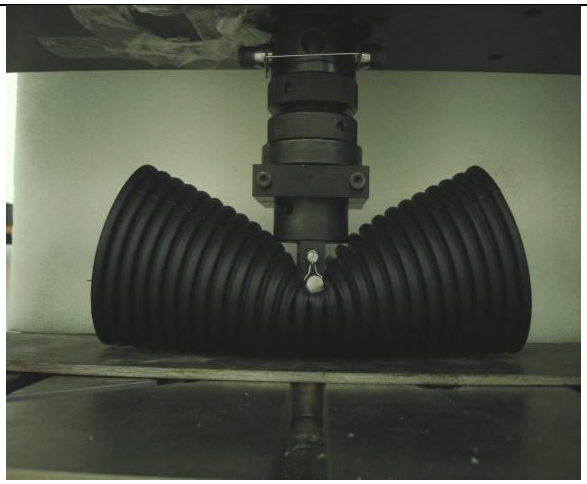
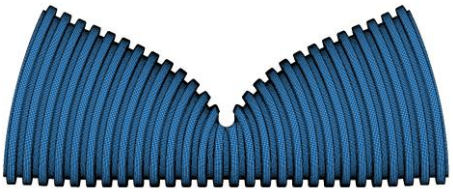
Διάγραμμα 5.1. Διάγραμμα «σύγκρισης» φορτίου - μετατόπισης 1^{ου} δοκιμίου.

Για τα στάδια κατάρρευσης του δοκιμίου 1, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 5.2., και σύμφωνα με το διάγραμμα 5.1. παρατηρείται απόκλιση στην εφαρμοζόμενη δύναμη. Για την μείωση του αρχικού ύψους κατά 36% στις πειραματικές συνθήκες καταπόνησης απαιτήθηκε εφαρμογή φορτίου της τάξης των 3232,18 N , ενώ για το ιδανικό δοκίμιο κατά την προσομοίωση απαιτήθηκε φορτίο της τάξης των 4792 N. Στο δοκίμιο 2, κατά την πλευρική κατάρρευση, η μείωση της αρχικής διαμέτρου κατά 63%. απαιτεί εφαρμογή δύναμης της τάξης των 673,82 .

ΔΟΚΙΜΙΟ 2

	
Στιγμιότυπο 0 Exp **L_0 = 0**	**Στιγμιότυπο 0 FEM** **L_0 = 0**
	
Στιγμιότυπο 2 Exp **L_0 = 8**	**Στιγμιότυπο 2 FEM** **L_0 = 8**
	
Στιγμιότυπο 3 Exp **L_0 = 20,5**	**Στιγμιότυπο 3 FEM** **L_0 = 20,5**

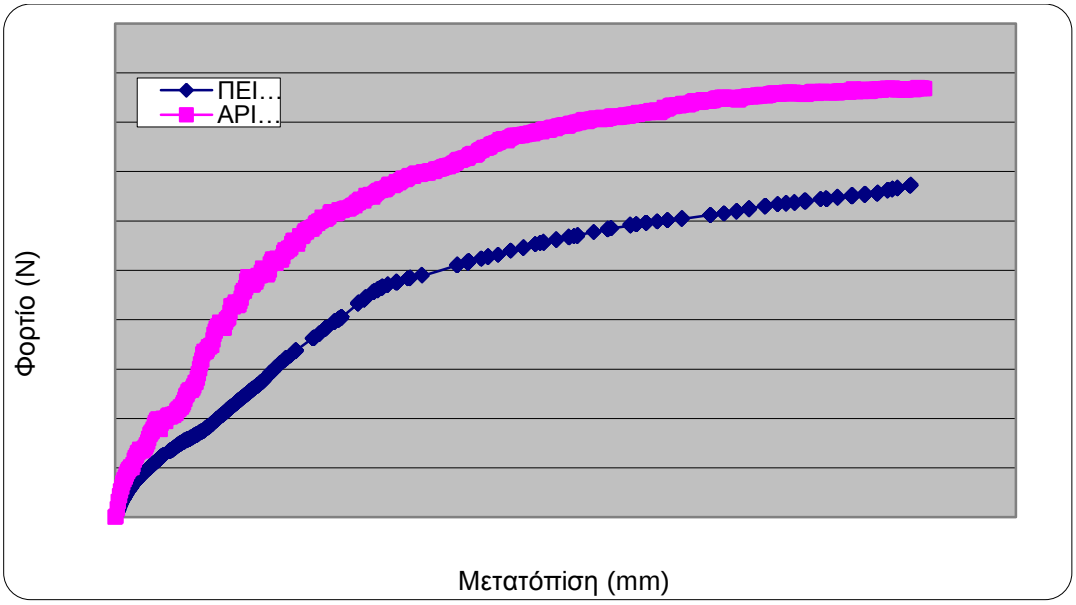
	
Στιγμιότυπο 4 Exp **L_0 = 30,9**	**Στιγμιότυπο 4 FEM** **L_0 = 30,9**
	
Στιγμιότυπο 5 Exp **L_0 = 37,7**	**Στιγμιότυπο 5 FEM** **L_0 = 37,7**
	
Στιγμιότυπο 6 Exp **L_0 = 52,8**	**Στιγμιότυπο 6 FEM** **L_0 = 52,8**

	
Στιγμιότυπο 7 Exp **L_0 = 70,5**	**Στιγμιότυπο 7 FEM** **L_0 = 70,5**

Σχήμα 5.4:.: Φάσεις κατάρρευσης 2^{ου} δοκιμίου (7) αποτελέσματα προσομοίωσης στο LS-DYNA.

<u>Πίνακας 5.3. — Σύγκριση αποτελεσμάτων -.</u>

ΔΟΚΙΜΙΟ 2		**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**	**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ	P_{max}	673,2 (N)	868 (N)
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ	P_{mean}	510 (N)	677 (N)



Διάγραμμα 5.2. Διάγραμμα «σύγκρισης» φορτίου - μετατόπισης 2^{ου} δοκιμίου.

Για τα στάδια κατάρρευσης του δοκιμίου 2, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 5.3., και σύμφωνα με το διάγραμμα 5.2. παρατηρείται μικρή απόκλιση στην εφαρμοζόμενη δύναμη. Στο δοκίμιο 2, κατά την πλευρική κατάρρευση, η μείωση της αρχικής διαμέτρου κατά 63%. απαιτεί εφαρμογή δύναμης της τάξης των 673,82 N, ενώ για το ιδανικό δοκίμιο κατά την προσομοίωση απαιτήθηκε φορτίο της τάξης των 868 N

Γενικά, απόκλιση της τιμής του φορτίου στα διάφορα στάδια της κατάρρευσης των δοκιμίων μεταξύ πειραμάτων και προσομοίωσης οφείλονται σε ατέλειες που υπάρχουν στο πραγματικό δοκίμιο, στην ομοιογένεια του υλικού του, καθώς και στον τρόπο στήριξης των δοκιμίων στις πλάκες της πρέσας. Σε αντίστοιχα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί έχουν προκύψει παρόμοιες αποκλίσεις στις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης.

5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε γενικές γραμμές, οι τρόποι παραμόρφωσης που προέκυψαν και στις δύο διαδικασίες, οι οποίοι είναι οι τυπικοί σε τέτοιου είδους φορτίσεις, εμφανίζουν εξαιρετική ομοιότητα. Όσον αφορά τις αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών του φορτίου, αυτές έχουν τη δυνατότητα να ερμηνευτούν βάσει της εξιδανικευμένης γεωμετρίας και της κατασκευαστικής ομοιομορφίας και ομοιογένειας του υλικού στα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων.

> Στα φυσικά δοκίμια του σωλήνα με τις πτυχώσεις, παρατηρήθηκε μία απόκλιση από την απόλυτη εκ περιστροφής μορφή σε μακροσκοπικό επίπεδο, καθώς επίσης και τοπική ανομοιομορφία σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του δοκιμίου. Επιπρόσθετα, λόγω της έλλειψης λεπτομερών γεωμετρικών στοιχείων για την αξονική διατομή του πτυχωτού σωλήνα, έγιναν ορισμένες μετρήσεις σε μία τυχαία διατομή, με τις αναγκαστικές παραδοχές ως προς τη μορφή και «στρογγυλεύσεις» ως προς τις διαστάσεις, προκειμένου να προκύψει η εξιδανικευμένη γεωμετρία του δοκιμίου. Ορισμένες ανομοιομορφίες υπάρχουν επίσης στις γωνίες επαφής του εξωτερικού (πτυχωτού) τμήματος με το εσωτερικό (κυλινδρικό). Οι ανομοιομορφίες αυτές εξαρτώνται από το είδος του υλικού και τη διαδικασία παραγωγής του.

> Ένας άλλος λόγος εξαιτίας του οποίου παρατηρήθηκε απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης και της πειραματικής εφαρμογής, ήταν η ελλιπής παράθεση στοιχείων των μηχανικών ιδιοτήτων του δοκιμίου, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη μοντελοποίηση της απόκρισης του δοκιμίου. Λόγω της διαμόρφωσής του, δεν ήταν εφικτό να γίνει έστω και η μη τυποποιημένη δοκιμή - η οποία εκτελέστηκε στο υλικό του απλού κυλινδρικού σωλήνα - για την εξαγωγή ολοκληρωμένων δεδομένων.

Και στις δύο περιπτώσεις, δεν ήταν απόλυτα δεδομένες οι οριακές συνθήκες (συντελεστές τριβής) μεταξύ δοκιμίων και πλακών συμπίεσης, κάτι που μας οδήγησε στην εκλογή μέσων συνήθων τιμών.

Σήμερα, η αξιοπιστία της θεωρητικής ανάλυσης με ηλεκτρονικούς υπολογιστές είναι τόσο μεγάλη, ώστε να αντικαθιστά και πειράματα, εκεί που τα μαθηματικά μοντέλα είναι ακριβή. Η ανάπτυξη αυτής της ικανότητας οφείλεται στη βελτιστοποίηση των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων έχει γενικά επικρατήσει, και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη

των κατασκευών. Η χρήση του κώδικα LS-DYNA δίνει τη δυνατότητα πρόβλεψης αποτελεσμάτων διαφόρων καταπονήσεων που διαφορετικά θα απαιτούσαν πλήθος πειραμάτων στα εργαστήρια. Ωστόσο, απαιτείται πολύ καλή αντίληψη και γνώση του εξεταζόμενου φαινομένου και όλων των επιμέρους παραμέτρων που το διέπουν, έτσι ώστε να προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5ΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1) STC. "LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume 1".

2) http://oregonstate.edu/~nimmalas/research/compDNL/comparisonOfDNL.doc. Retrieved 2009-03-25.

3) S. Baudin, P. Ray, B.J. Mac Donald, M.S.J. Hashmib, Development of a novel method of tube bending using finite element simulation, Journal of Materials Processing Technology 153–154 (2004) 128–133.

4) Y.S. Zeng, Z.Q. Li, Experimental research on the tube push bending process, Journal of Materials Processing Technology 122 (2002) 237–240.

5) Thomas J.R. Hughes (Sept. 2000) Z.R. Wang, G. Liu, S.J. Yuan, B.G. Teng, Z.B. He, Progress in shell hydroforming, Journal of Materials Processing Technology 167 (2005) 230-236.

6) H.K. Lee, C.J. Van Tyne, D. Field, Finite element bending analysis of oval tubes using rotary draw bender for hydroforming applications, Journal of Materials Processing Technology 168 (2005) 327-335.

7) W. Johnson, P.B. Mellor, Engineering Plasticity, Wiley & Sons, New York, 1983.

8) H.A. Al-Qureshi, Elastic-plastic analysis of tube bending, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 87–104.