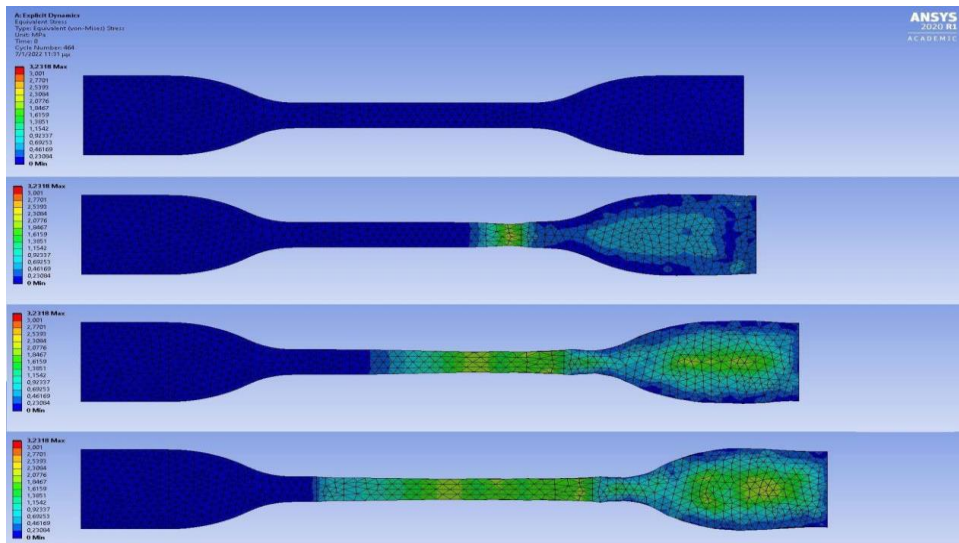




# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και ελαστικών  
σταθερών διαφόρων υλικών



Εκπόνηση:  
Κεσκίνογλου Νικόλαος

Επίβλεψη  
Γεώργιος Τσιάτας  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023

# Περιεχόμενα

## Κεφάλαιο 1

Πολυμερή – Εποξειδικές ρητίνες.....	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Ιστορικά Στοιχεία.....	7
1.3 Δομή – Σύνθεση εποξειδικών ρητινών.....	7
1.4 Βασικά χαρακτηριστικά των εποξειδικών ρητινών.....	7
1.5 Εφαρμογές των εποξειδικών ρητινών.....	8
1.6 Πρόσθετα υλικά στα πολυμερή.....	9
1.6.1 Τεχνολογικές απαιτήσεις για τα πρόσθετα υλικά.....	9
1.6.2 Μέθοδοι ενσωμάτωσης των πρόσθετων υλικών στα πολυμερή.....	9
1.6.3 Πλαστικοποιητές για τις εποξειδικές ρητίνες.....	9
1.7 Μεταβολές στη θερμοκρασία της υαλώδους μεταπτώσεως (Tg).....	10

## Κεφάλαιο 2

Η δυναμική συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών.....	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Ορισμοί και βασικές έννοιες.....	15

## Κεφάλαιο 3

Γενικά στοιχεία πειραματικής διαδικασίας εφελκυσμού.....	18
3.1 Εισαγωγή.....	18
3.2 Γενικά στοιχεία.....	18
3.3 Πειραματική διερεύνηση πλαστικοποιητή σε ρητίνες.....	19

## Κεφάλαιο 4

Προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών με τη μέθοδο του εφελκυσμού.....	21
4.1 Εισαγωγή.....	21
4.2 Μορφή δοκιμίων.....	21
4.3 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης.....	23
4.4 Μηκυνσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν.....	24

4.5	Διαδικασία δοκιμών – Αποτελέσματα.....	27
-----	--	----

## Κεφάλαιο 5

	Πειραματική διαδικασία με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων.....	36
5.1	Εισαγωγή.....	36
5.2	Περιγραφή πειραματικών δεδομένων.....	36
5.2.1	Χρησιμοποιούμενα δοκίμια.....	37
5.2.2	Πειραματική διαδικασία.....	37
5.3	Υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών USIP – 11.....	38
5.4	Μέθοδος των υπερήχων.....	39
5.5	Εξάρτηση των ελαστικών σταθερών από τη θερμοκρασία.....	39
5.6	Συμπεράσματα.....	45

## Κεφάλαιο 6

	Εσωτερική μηχανική φθορά (internal damage).....	47
6.1	Εισαγωγή.....	47
6.2	Εκτίμηση της εσωτερικής μηχανικής φθοράς (internal damage).....	50

## Κεφάλαιο 7

	Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	52
7.1	Εισαγωγή.....	52
7.2	Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία.....	52
7.3	Ανάλυση των Πεπερασμένων Στοιχείων με το ANSYS.....	53
7.4	Ανάλυση ποιότητας διακριτοποίησης για εφελκυσμό.....	53
7.5	Εξαγωγή αποτελεσμάτων από την ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία.....	54

## Κεφάλαιο 8

	Συμπεράσματα.....	58
--	-------------------	----

## **ΣΚΟΠΟΣ**

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι κυρίως η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων και ελαστικών σταθερών των διαφόρων υλικών, ανάλογα με το ποσοστό πλαστικοποιητή τους, ανάλογα με το υλικό πριν και μετά τη μηχανική καταπόνηση, στην προκειμένη περίπτωση τον εφελκυσμό. Η διπλωματική αυτή εργασία είναι κυρίως πειραματικού τύπου, δηλαδή αφού κατεργαστήκαμε και φτιάξαμε πανομοιότυπα δοκίμια σε σχήμα - μέγεθος - ποιότητα επιφάνειας, λάβαμε τις αρχικές μετρήσεις των παραμέτρων/διαστάσεων που μας ενδιαφέρουν, πριν τα πειράματα. Κατόπιν πραγματοποιήσαμε πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού (καταστροφική καταπόνηση) και έπειτα με τη μέθοδο των υπερήχων (μη καταστροφική καταπόνηση), όπου παράλληλα λαμβάναμε τις διάφορες μετρήσεις που χρειαζόμασταν για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Με κάποια από αυτά έγινε και ο υπολογισμός της εσωτερικής μηχανικής φθοράς (damage). Τέλος, έγινε και μία υπολογιστική μελέτη των πειραμάτων εφελκυσμού με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων με το λογισμικό ANSYS και σύγκριση των μεταξύ των αποτελεσμάτων.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα Αναπλ. Καθηγητή κ. Τσιάτα Γεώργιο ο οποίος αποδέχθηκε να επιβλέψει αυτή τη διπλωματική εργασία, τον κ. Ε. Θεοτόκογλου για την πολύτιμη βοήθειά του στον τομέα των Πεπερασμένων Στοιχείων, καθώς και τις χρήσιμες υποδείξεις του κυρίως στο υπολογιστικό τμήμα της εργασίας για την ολοκλήρωσή της. Θα ήθελα επίσης να αναφέρω τη βοήθεια και καθοδήγηση του αείμνηστου Καθηγητή Ι. Πρασιανάκη ο οποίος επωμίστηκε την εποπτεία της σημαντικής μελέτης των υλικών με τη μέθοδο των υπερήχων και συνέβαλε τα μέγιστα. Επίσης ευχαριστώ τον Αφυπ. Αναπλ. Καθηγητή κ Αιμ. Σιδερίδη που τόσο αποτελεσματικά βοήθησε και με καθοδήγησε καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης, καθώς επίσης και τον συντ. Καθηγητή Β. Κυτόπουλο που συνέβαλε στην διερεύνηση της εσωτερικής φθοράς. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω και το Τεχνικό προσωπικό του Τομέα Μηχανικής, που βοήθησε με οποιοδήποτε τρόπο να εκπονηθεί το πειραματικό μέρος της εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα πολυμερή αντλούν τις μηχανικές τους ιδιότητες από την αλληλεπίδραση δομικών παραμέτρων, όπως μοριακό βάρος, διακλαδώσεις στις αλυσίδες των μακρομορίων, εσωτερική ευκινησία των αλυσίδων, κρυσταλλικότητα, ομοιογένεια δομής και διαμοριακές δυνάμεις.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της δομής της πλαστικοποιημένης εποξειδικής ρητίνης με βάση τη θερμομηχανική της συμπεριφορά, και πώς η συμπεριφορά αυτή μεταβάλλεται, όταν η ρητίνη περιέχει πρόσθετα. Σ' όλα τα στάδια της μελέτης η ρητίνη είναι διγλυκιδυλο-αιθέρας της διφαινόλης A (DGEBA), σκληρυμένη με τριεθυλενοτετραμίνη, και περιέχει σαν πρόσθετα διάφορα ποσοστά πλαστικοποιητή. Ο πλαστικοποιητής έχει μια βασική λειτουργία: την τροποποίηση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς της μήτρας.

Η όλη μελέτη χωρίζεται σε τρία μέρη, το θεωρητικό, το πειραματικό και το υπολογιστικό.

Στο πρώτο μέρος γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στη φύση των πολυμερών και στις εποξειδικές ρητίνες. Επίσης αναφέρεται η φύση της βισκοελαστικής συμπεριφοράς των πολυμερών και η σχέση των βισκοελαστικών συναρτήσεων με τη δομή των υλικών αυτών. Εν συνεχεία, περιγράφεται και τονίζεται η παρουσία των πρόσθετων υλικών στις εποξειδικές ρητίνες και ειδικότερα η επίδραση του πλαστικοποιητή πάνω στις φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται αναφορά στον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών με τη μέθοδο του εφελκυσμού, καθώς και στα σφάλματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις των πειραμάτων

Στο τρίτο μέρος, ξεκινάει με το πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής και συγκεκριμένα με την καταστροφική καταπόνηση – μέθοδο του μονοαξονικού εφελκυσμού. Παρουσιάζονται τα δοκίμια και η προετοιμασία τους, τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εφελκυσμού, καθώς και οι μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να πραγματοποιηθούν τα πειράματα του εφελκυσμού. Παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων τα διάφορα αποτελέσματα των πειραμάτων προκειμένου να εξάγουμε τα συμπεράσματά μας.

Στο επόμενο μέρος συνεχίζουμε τα πειράματα πλέον με μη καταστροφικές μεθόδους και ειδικά με τη μέθοδο των υπερήχων. Γίνεται παρουσίαση των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η μέθοδος των πειραμάτων που έγιναν. Παρουσιάζεται με Πίνακες και Διαγράμματα η εξάρτηση των ελαστικών σταθερών των εποξειδικών ρητινών από τις διαφορές θερμοκρασίες των.

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζουμε την έννοια της Εσωτερικής Φθοράς των υλικών και πώς αυτή συνδέεται με την έννοια της καταπόνησης. Ορίζεται ως ιδιότητα εκείνη κατά την οποία η αντοχή των υλικών μειώνεται μέχρι την αστοχία. Υπολογίζεται επίσης με τη μέθοδο των υπερήχων αφού έχουμε υπολογίσει πρώτα τα μέτρα ελαστικότητας με τη μέθοδο του εφελκυσμού προηγουμένως. Παρουσίαση αποτελεσμάτων με διαγράμματα.

Τελευταίο είναι το υπολογιστικό μέρος της μελέτης αυτής, το οποίο και έγινε με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων με τη χρήση του υπολογιστικού λογισμικού ANSYS. Γίνεται παρουσίαση στον τρόπο υπολογισμού μέσω των πεπερασμένων στοιχείων, σύγκριση αποτελεσμάτων με τα πειράματα εφελκυσμού και παρουσίαση συγκριτικών αποτελεσμάτων, με

διαγράμματα και επεξήγηση αυτών. Τέλος, απεικονίζεται η μεταβολή του δοκιμίου και οι εντάσεις σε διάφορα στάδια της καταπόνησης.

Η διπλωματική κλείνει με τα συμπεράσματα.

# Πολυμερή – Εποξειδικές ρητίνες

## 1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τις εποξειδικές ρητίνες, τη χρησιμότητά τους, τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται, τον τρόπο παρασκευής τους καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Τέλος, αναφέρονται τα πεδία αξιοποίησής των.

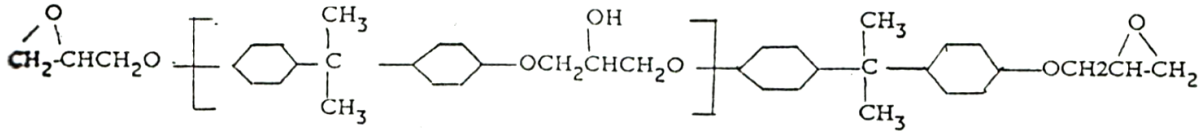
## 1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας κατά τα τελευταία χρόνια, καθιστά επιτακτική ανάγκη την πληρέστερη μελέτη των υλικών. Νέα υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες προστίθενται καθημερινά στα ήδη χρησιμοποιούμενα, για τις νέες εφαρμογές. Οι μελετητές μηχανικοί χρειάζονται ανθεκτικά υλικά, χρησιμοποιούμενα σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες, όπως επίσης και υλικά που να μπορούν να ανταποκρίνονται στην απότομη μεταβολή των θερμοκρασιών σε μεγάλες περιοχές. Χρειάζονται επίσης υλικά με πολύ καλές ιδιότητες στις απλές ή σύνθετες, στατικές ή δυναμικές καταπονήσεις. Όσο καλύτερα γνωρίζουμε τις ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών, τόσο ανθεκτικότερες και συνάμα οικονομικότερες κατασκευές μπορούμε να σχεδιάσουμε και να κατασκευάσουμε. Η αναζήτηση λοιπόν της κατασκευής των εποξειδικών ρητινών ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του '20 στις Η.Π.Α. Ένας πρώτος τρόπος σύνθεσης ρητινών επιτεύχθηκε το 1930 από τον Dr Greenlee από epichlorohydrin – bisphenol A. Οι ρητίνες αυτές είχαν την ιδιότητα ότι δεν ήταν καυστικά ευαίσθητες και χρησιμοποιούνταν για επάλειψη. Οι προσπάθειες δεν σταμάτησαν εδώ, έτσι το 1948 κατασκευάστηκε η συνηθέστερη εποξειδική ρητίνη DGEBA. Η παραγωγή αυξήθηκε σταδιακά για όλες τις χρήσεις και κατάφερε το 1965 να ξεπεράσει τα 110 εκατ. rounds. Προς τα τέλη του 1950 κατασκευάστηκαν νέες εποξειδικές ρητίνες όπως epichlorohydrin και polyhydrin.

## 1.3 Δομή – Σύνθεση εποξειδικών ρητινών

Με τον όρο εποξειδική ρητίνη εννοούμε την ένωση η οποία σχηματίζεται από περισσότερα από ένα εποξείδια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους υπό μορφή ευθεία ή δακτυλίου. Επίσης ο όρος αυτός αναφέρεται τόσο σε ρητίνες θερμοσκληρυνόμενες (δηλ. έχουν σκληρυνθεί), όσο και σε ρητίνες θερμοπλαστικές (δηλ. έχουν υποστεί σκλήρυνση). Οι εποξειδικές ρητίνες παράγονται με θερμοσκλήρυνση προπολυμερών που παρέχουν περισσότερες από μία δραστικές ομάδες 1,2 εποξειδίου στο μόριό τους. Η πρώτη ύλη για τη σύνθεση των εποξειδικών ρητινών είναι η διφαινόλη Α, λόγω της εύκολης διαδικασίας παραγωγής της. Η σύνθεση της ευρύτερα διαδεδομένης εποξειδικής ρητίνης DGEBA βασίζεται στην αντίδραση της επιχλωρυδρίνης και της διφαινόλης Α.

Ο τύπος της ρητίνης αυτής είναι:



**Εικόνα 1.1** Ο τύπος της εποξειδικής ρητίνης DGEBA

Η αντίδραση σύνθεσης της DGEBA μεταξύ επιχλωρυδρίνης και διφαινόλης Α παρουσία υδροξειδίου του Νατρίου γίνεται σε δύο στάδια:

1. Το σχηματισμό ενδιάμεσου προϊόντος χλωρυδρίνης
2. Την αφυδραλογόνωση της χλωρυδρίνης και το σχηματισμό αιθέρα.

Επίσης, ο βαθμός πολυμερισμού στις βιομηχανικές εποξειδικές ρητίνες κυμαίνεται από 0 μέχρι 14 και εξαρτάται από τη μοριακή αναλογία των μονομερών. Έτσι, μπορεί να δημιουργηθεί μια ανάπτυξη πλέγματος με προσθήκη στα πολυμερή με τη βοήθεια σκλήρυνσης. Τα προϊόντα ανάλογα με το βαθμό πολυμερισμού, είναι υγρά μικρού ιξώδους, μέχρι στερεά με σημείο τήξεως της τάξης των 140°C. (Παναγιώτου Κ.)

#### 1.4 Βασικά χαρακτηριστικά των εποξειδικών ρητινών

Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες του τύπου DGEBA είναι άκαμπτα άμορφα στερεά που μοιάζουν με γυαλί. Μελετώντας τη δομή των εποξειδικών ρητινών με κάποιο πρόσθετο όπως σκληρυντής, πλαστικοποιητής με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, παρατηρούμε ότι οι ρητίνες αποτελούνται από σχεδόν μικρού μεγέθους μακρομόρια τρισδιάστατα διακλαδωμένα δίκτυα ή συσσωματώματα μέτριου μοριακού βάρους. Οι υγρές ρητίνες, είναι υγρά σχετικά παχύρευστα που όταν θερμαίνονται αποκτούν μικρότερο ιξώδες. Αν μεγεθυνθούν 10 εκατομμύρια φορές, τα μόρια ρητίνης μοιάζουν με μικρά κομμάτια από νήμα με μήκος που ποικίλει από 1,27 cm για υγρές ρητίνες μέχρι 5-6 cm για τις στερεές ρητίνες. Μετά τη διαδικασία σκλήρυνσης τα νήματα αυτά ενώνονται στα άκρα και κατά μήκος, σχηματίζοντας διασταυρώσεις (crosslinks). Τα τελικά αυτά προϊόντα είναι θερμοσκληρυνόμενα δηλαδή στερεά που με θέρμανση μαλακώνουν, αλλά δεν γίνονται ποτέ υγρά. Η σκλήρυνση των ρητινών είναι αντιστρεπτή διαδικασία. Κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ των στερεών και υγρών εποξειδικών ρητινών παρατηρούμε ότι οι στερεές πλεονεκτούν έναντι των υγρών γιατί:

- α)είναι εύκολη η επεξεργασία τους
- β)έχουν υψηλή χημική αντίσταση
- γ)έχουν μηχανική αντοχή
- δ)έχουν άριστο κολλώδες

Η ραγδαία ανάπτυξη των εποξειδικών ρητινών και η εκτεταμένη χρήση τους στη βιομηχανία οφείλεται στο συνδυασμό μεγάλου αριθμού ιδιοτήτων, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι παρακάτω:

**Χαμηλό ιξώδες.** Οι υγρές ρητίνες και τα μέσα σκλήρυνσης έχουν μικρό ιξώδες, με αποτέλεσμα την εύκολη κατεργασία και τροποποίησή τους.



**Εύκολη διεργασία σκλήρυνσης.** Οι εποξειδικές ρητίνες σκληραίνονται γρήγορα και πρακτικά σε κάθε θερμοκρασία από 5°C έως 150°C, ανάλογα με το μέσο σκλήρυνσης.

**Μικρή συστολή.** Μια από τις καλύτερες ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών είναι η μικρή συστολή τους στη διαδικασία σκλήρυνσης, όπου δεν παράγονται πτητικά παραπροϊόντα.

**Μεγάλη ικανότητα πρόσφυσης.** Λόγω της παρουσίας πολικών υδροξυλικών και αιθερικών ομάδων.

**Καλές μηχανικές ιδιότητες.** Υπερέχουν σε σχέση με άλλους τύπους ρητινών. Πιθανόν λόγω της μικρής συστολής τους ελαχιστοποιείται η παρουσία τάσεων που θα εξασθένιζαν τη μηχανική αντοχή.

**Μεγάλη ηλεκτρική μόνωση.** Οι εποξειδικές ρητίνες είναι εξαιρετικοί ηλεκτρικοί μονωτές.

**Μεγάλη αντοχή σε χημικά και διαλύτες.** Η αντοχή σε χημικά της σκληρυνόμενης εποξειδικής ρητίνης εξαρτάται από το μέσο σκλήρυνσης.

**Υψηλή δύναμη συγκόλλησης.** Στη σύγχρονη τεχνολογία πλαστικών είναι από τις καλύτερες που έχει παρατηρηθεί. Αυτή η ιδιότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τις πολλές εφαρμογές.

## 1.5 Εφαρμογές των εποξειδικών ρητινών

Ο μεγάλος αριθμός των ιδιοτήτων των εποξειδικών ρητινών, οδήγησαν σε γρήγορο ρυθμό την ανάπτυξη και τη χρήση τους σε ευρεία μορφή. Μερικές από τις σημαντικότερες εφαρμογές τους είναι:

- Ως βασικό συγκολλητικό σκυροδέματος.
- Ως συγκολλητικό σε δομικά μέρη της ατράκτου αεροσκαφών.
- Ως συγκολλητικό πλαστικών και μεταλλικών κομματιών σε βάρκες και αυτοκίνητα.
- Στην κατασκευή κτιρίων και αυτοκινητοδρόμων και γενικά σε κατασκευές όπου υπάρχουν απαιτήσεις για υψηλή χημική αντίσταση.
- Στην κατασκευή τριχών για πινέλα.
- Ως φυλλώδης ρητίνες για την κατασκευή πλαισίων και τελειωμάτων αεροσκαφών και πυραύλων.
- Διαλύματα επίστρωσης που έχουν βασικό συστατικό τη ρητίνη είναι πολύ χρήσιμα για τη συντήρηση και την κατασκευή τελειωμάτων, όπως τελειώματα θαλάσσιας υφής, τελειώματα λιθοδομής, τελειώματα αεροσκαφών κ.α. Επίσης χρησιμοποιούνται στις επαλείψεις κατασκευαστικού χάλυβα, επαλείψεις δεξαμενών καθώς και για επαλείψεις σε βάρκες από σκυρόδεμα.

## 1.6 Πρόσθετα υλικά στα πολυμερή

Με τον όρο πρόσθετα υλικά αναφερόμαστε σε εκείνα τα υλικά, που διασπείρονται μέσα στο πολυμερές χωρίς να προκαλέσουν σημαντική αλλαγή στη δομή του. Για το λόγο αυτό εξαιρούνται καταλύτες, τα μέσα σκλήρυνσης, που χρησιμοποιούνται στα θερμοσκληρυνόμενα συστήματα. Το 1939 ο Goodyear διαπίστωσε ότι η προσθήκη του θείου σε πρώτη ύλη ελαστικού

έδωσε προϊόντα με πολύ βελτιωμένες ιδιότητες. Η προσθήκη των υλικών αυτών (πρόσθετων) είχε σαν σκοπό:

- Την τροποποίηση των φυσικών, μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων.
- Την πρόληψη της επιδεινώσεως των ιδιοτήτων τους από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και την υπεριώδη ακτινοβολία.
- Την επίτευξη αδιαφάνειας και χρωματισμού.
- Την ελάττωση του κόστους με σύγχρονη διατήρηση των επιθυμητών ιδιοτήτων.

Τα πρόσθετα ταξινομούνται ανάλογα με τη λειτουργία τους και όχι με κάποια χημική βάση και είναι:

**α)** πρόσθετα που τροποποιούν τις μηχανικές ιδιότητες

**1)** πλαστικοποιητές **2)** εγκλείσματα **3)** μέσα δυσκαμψίας

**β)** πρόσθετα που τροποποιούν τις ιδιότητες επιφανείας

**γ)** πρόσθετα για τη μείωση του κόστους

**1)** διαλύτες **2)** κοκκώδη εγκλείσματα

**δ)** πρόσθετα που βοηθούν τη διεργασία παραγωγής

**1)** σταθεροποιητές **2)** λιπαντικά **3)** θιξοτροπικά μέσα

**ε)** τροποποιητές οπτικών ιδιοτήτων

**στ)** μέσα πρόληψης γήρανσης.

### **1.6.1 Τεχνολογικές απαιτήσεις για τα πρόσθετα υλικά**

#### **1. Αναμειξιμότητα και κινητικότητα των πρόσθετων υλικών**

Αυτό που μας ενδιαφέρει και απαιτούμε για κάθε πρόσθετο είναι η αποτελεσματικότητά του για το σκοπό που επιλέχθηκε. Όμως η τελική επιλογή του πρόσθετου εξαρτάται από την τελική λειτουργία του, γιατί είναι δυνατόν προσπαθώντας να βελτιώσουμε κάποια ιδιότητα, να υποβαθμισθούν άλλες. Επιπλέον η σωστή διαδικασία ενσωμάτωσης του πρόσθετου στη μήτρα του πολυμερούς, επηρεάζει άμεσα την αποτελεσματικότητά του. Όταν η λειτουργία του δεν είναι σε μοριακό επίπεδο, τότε η πλήρης αναμειξιμότητα και κινητικότητα ή ικανότητα διάχυσης των μορίων του πρόσθετου μέσα στη μήτρα είναι επιθυμητές. Όταν στην ενδιάμεση φάση ασκείται ισχυρή έλξη μεταξύ πολυμερούς και πρόσθετου, τότε χρειάζεται μερική αναμειξιμότητα. Αυτό είναι εφικτό όταν οι φυσικές ιδιότητες στην ενδιάμεση φάση μεταβάλλονται σταδιακά από εκείνες του πολυμερούς σε εκείνες του πρόσθετου, ακόμα και αν μία τέτοια αλλαγή γίνεται σε πολύ μικρή απόσταση δηλαδή λίγων μοριακών στρωμάτων.

#### **2. Μετανάστευση και κατανάλωση των πρόσθετων υλικών**

Το πρόσθετο δεν μπορεί να εξαερώνεται από τη μήτρα στη διάρκεια της διεργασίας, ούτε να εκρέει στην επιφάνεια της μήτρας. Επίσης, το πρόσθετο δεν πρέπει να εκχυλίζεται από υγρά με τα οποία πιθανόν το πολυμερές να έρθει σε επαφή. Το φαινόμενο της εκχύλισης εξαρτάται από

την κινητική της διάχυσης. Οι παράμετροι που εξαρτάται είναι η αναμειξιμότητα πολυμερούς πρόσθετου, μέγεθος μορίων του πρόσθετου, φυσικοχημικές επιδράσεις μεταξύ πρόσθετου και πολυμερούς κ.α. Άρα ανόργανα και αδιάλυτα πρόσθετα, όπως χρωστικές ουσίες, εγκλείσματα κ.λπ. δεν εμφανίζουν το φαινόμενο εκχύλισης, ενώ πρόσθετα όπως πλαστικοποιητές μικρού μοριακού βάρους, μπορούν να εκκρεύσουν στην επιφάνεια και ταυτόχρονα να αποτελέσουν μέσο μετανάστευσης και άλλων προσμίξεων, όπως οι σταθεροποιητές. Αν συνέβαιναν τα παραπάνω σε υγρά ή άλλα προϊόντα που έρχονται σε επαφή με το πολυμερές θα εμφανιζόταν σημαντική ρύπανση. Τότε το πολυμερές θα έχανε τις ιδιότητες που είχε λόγω της παρουσίας του πρόσθετου υλικού.

### **3. Τοξικότητα των πρόσθετων υλικών**

Το πρόσθετο υλικό τόσο κατά τη διάρκεια ανάμειξης όσο και στη διάρκεια της κατανάλωσης δεν πρέπει να αποτελεί κίνδυνο για την υγεία. Ειδικότερα πρέπει να προσέξουμε, όταν το πολυμερές πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη συσκευασία τροφίμων ή για την κατασκευή παιχνιδιών.

#### **1.6.2 Μέθοδοι ενσωμάτωσης των πρόσθετων υλικών στα πολυμερή**

Τα πρόσθετα υλικά επιδρούν στη μικροδομή της εποξειδικής ρητίνης και τροποποιούν τις μηχανικές ιδιότητές της, γι' αυτό μπορούμε να τα κατατάξουμε συνήθως σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

**1) Το πολυμερές είναι αναμείξιμο με το πρόσθετο**, οπότε προκύπτει μονοφασικό σύστημα και οι αλυσίδες του πολυμερούς περιβάλλονται από τα μόρια του πρόσθετου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλαστικοποιητές. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα από την παρουσία του πρόσθετου, είναι η μετατόπιση της μεταβατικής ζώνης σε μικρότερη θερμοκρασία.

**Το πολυμερές είναι ασυμβίβαστο με το πρόσθετο**, δηλαδή είναι μη αναμείξιμα. Το σύστημα που προκύπτει είναι διφασικό και τα μίγματα που προκύπτουν καλούνται σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλη σημασία όταν το πρόσθετο είναι μεταλλικό έγκλεισμα. Συνήθως τα εγκλείσματα είναι πιο σκληρά από τη μήτρα και οι ιδιότητες του συστήματος βρίσκονται κάπου ανάμεσα στις ιδιότητες των δύο συστατικών. (Παναγιώτου Κ.)

#### **1.6.3 Πλαστικοποιητές για τις εποξειδικές ρητίνες**

Ο όρος πλαστικοποιητής, στην τεχνολογία των εποξειδικών ρητινών σημαίνει:

**1) Συστατικό μεγάλου μοριακού βάρους** που αντιδρά, έστω και σε μικρή έκταση με τη ρητίνη στη διάρκεια της σκλήρυνσης, με αποτέλεσμα να προκαλεί ευκαμψία αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ των σημείων διασταύρωσης.

**Αδρανές συστατικό μεγάλου μοριακού βάρους** που προστίθενται στη ρητίνη για να προκαλέσει μηχανική πλαστικοποίηση. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πλαστικοποιητών και χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία. Συνήθως χρησιμοποιούνται εστέρες και εστεροποιημένες ρητίνες μεγάλου μοριακού βάρους τύπου DGEBA. Ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα σαν πλαστικοποιητής είναι ο διβουτυλικός φθαλικός εστέρας, που εκτός από μέσο πλαστικοποίησης, ενεργεί και σαν διαλύτης. Χαρακτηριστικό των πλαστικοποιημένων υλικών είναι οι υποβαθμισμένες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, η μικρή αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια, ιδιαίτερα σε διαλύτες, καθώς και σε μεγάλες θερμοκρασίες. Οι εποξειδικές ρητίνες δεν είναι

εύκαμπτα υλικά και ακόμα και με προσθήκη μεγάλων συγκεντρώσεων πλαστικοποιητή δεν αποκτούν ιδιότητες που να προσεγγίζουν ιδιότητες συνηθισμένων ελαστομερών. Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο προστίθενται οι πλαστικοποιητές, είναι η ελάττωση του έμφυτου εύθραυστου των εποξειδικών ρητινών. Το αποτέλεσμα της προσθήκης του πλαστικοποιητή είναι η αύξηση της δυνατότητας παραμόρφωσης και για αυτό το λόγο πολλά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν. (Ε. Κοντού, 1985)

### **1.7 Μεταβολές στη θερμοκρασία της υαλώδους μεταπτώσεως ( $T_g$ )**

Τα άμορφα πολυμερή περνούν από την υαλώδη κατάσταση σε μια άλλη περιοχή, όπου εμφανίζουν ιδιότητες ελαστομερών. Αυτό συμβαίνει σε μια θερμοκρασιακή περιοχή που λέγεται θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$ . Έτσι, με τη μέτρηση του ειδικού όγκου για διάφορες θερμοκρασίες, σε μια διεργασία ψύξης του υλικού, προκύπτει η  $T_g$  ως η θερμοκρασία, όπου αλλάζει κλίση η καμπύλη. Η μέθοδος όμως αυτή εμφανίζει δυσκολίες στην πράξη και για το λόγο αυτό έχουν επικρατήσει άλλες μέθοδοι, όπως η θερμιδομετρία. Όπου κατά τη μέτρηση της ειδικής θερμότητας εμφανίζεται ασυνέχεια στην περιοχή της θερμοκρασίας  $T_g$ . Αντίθετα με ότι συμβαίνει στην τήξη των κρυστάλλων, δεν υπάρχει μεγάλη μεταβολή όγκου καθώς το πολυμερές αλλάζει από γυαλί σε υγρό. Επίσης δεν υπάρχει λανθάνουσα θερμότητα ανάλογη με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Στην πραγματικότητα δεν γίνονται απότομες αλλαγές στις θερμοδυναμικές παραμέτρους στη θερμοκρασία  $T_g$ , αντίστοιχες με εκείνες που συμβαίνουν σε μια μεταβολή πρώτης τάξης. Έχει διαπιστωθεί ότι ο συντελεστής θερμικής διαστολής για τα πολυμερή είναι μεγαλύτερος πάντα από τη θερμοκρασία  $T_g$ . Αν και το μέγεθος αυτής της διαφοράς διαφέρει από πολυμερές σε πολυμερές, ο συντελεστής θερμικής διαστολής στην υαλώδη κατάσταση είναι περίπου το μισό της αντίστοιχης τιμής για την υγρή κατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να καθορισθεί με μεγάλη ακρίβεια η μεταβατική θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$ . Οποιαδήποτε άλλη ιδιότητα του πολυμερούς, σχετική με τη θερμική διαστολή, θα δείχνει ανάλογη μεταβολή της  $T_g$ . Για τις μεθόδους καθορισμού της  $T_g$  που προαναφέρθηκαν, υπάρχει μία βασική δυσκολία. Το αποτέλεσμα εξαρτάται από παράγοντες, όπως η ταχύτητα θέρμανσης ή ψύξης του πολυμερούς στη διάρκεια της μέτρησης. Έτσι για υλικό που ψύχεται αργά, βρίσκεται μικρότερη  $T_g$  από ότι για υλικό που ψύχεται γρήγορα. Αυτό φαίνεται να είναι ένας γενικός κανόνας, δηλαδή η μεγαλύτερη ταχύτητα στο πείραμα θα δώσει μεγαλύτερη τιμή στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$ . Οι διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της  $T_g$  στα πολυμερή, διακρίνονται σε δυναμικές, που περιλαμβάνουν απορρόφηση μηχανικής ενέργειας και στατικές. Διαπιστώθηκε ότι η  $T_g$  συνδέεται με τις κινήσεις των ακραίων τμημάτων των αλυσίδων πολυμερούς, αλλά και με την κίνηση των ενδιάμεσων ενεργών τμημάτων κάθε αλυσίδας. Δύο βασικά προβλήματα δημιουργούνται με τη συσχέτιση αυτής της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης με τις μοριακές κινήσεις. Το ένα αφορά τη φύση αυτών των μοριακών κινήσεων και το άλλο αφορά την ενεργοποίηση των κινήσεων αυτών σε μία στενή περιοχή, καθώς η θερμοκρασία αυξάνει. Θα πρέπει οι κινήσεις αυτές να σχετίζονται με μία εναλλαγή των διαφόρων θέσεων που έχουν τα κομμάτια των αλυσίδων ανάμεσα στα σημεία διασταυρώσεων. Η εναλλαγή αυτή γίνεται με περιστροφή γύρω από τις συνδέσεις των αλυσίδων μεταξύ τους και οφείλεται στην κίνηση Brown.

Το γεγονός ότι η ανεξαρτητοποίηση αυτή της περιστροφής των τμημάτων των αλυσίδων γίνεται σε μία στενή θερμοκρασιακή περιοχή, μπορεί να εξηγηθεί ικανοποιητικά, όπως προαναφέρθηκε, με την έννοια του ελεύθερου όγκου. Ο ελεύθερος όγκος αντιπροσωπεύει το χώρο όπου τα μόρια μίας άμορφης φάσης είναι ικανά να κινούνται με ελευθερία αντίστοιχη των μορίων ενός αερίου. (E. Κοντού, 1985)

# Η δυναμική συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών

## 2.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται επεξήγηση του τρόπου υπολογισμού των δυναμικών σταθερών των υλικών καθώς και η χρησιμότητα των εν λόγω σταθερών στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των υλικών.

## 2.2. Ορισμοί και βασικές έννοιες

Μία μέθοδος δοκιμασίας των ιξωδοελαστικών υλικών είναι η δυναμική μηχανική δοκιμή (dynamic mechanical test) όπου υπεισέρχεται η συχνότητα. Κατά τη δοκιμή αυτή, επιβάλλουμε στο δοκίμιο μία περιοδικά μεταβαλλόμενη (π.χ. ημιτονοειδώς) τάση ή παραμόρφωση και μελετούμε την απόκριση του υλικού. Για γραμμική ιξωδοελαστική συμπεριφορά, τόσο η μεταβαλλόμενη τάση (ή παραμόρφωση) όσο και η αποκρινόμενη παραμόρφωση (ή τάση) θα μεταβάλλονται ημιτονοειδώς αλλά θα είναι εκτός φάσης. Έτσι, αν επιβάλλουμε μία διατμητική παραμόρφωση

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

η τάση – απόκριση του υλικού θα είναι

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2.2)$$

όπου  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα και  $\delta$  η διαφορά φάσης. Η εξίσωση (2.2) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\sigma = (\sigma_0 \cos \delta) \sin \omega t + (\sigma_0 \sin \delta) \cos \omega t \quad (2.3)$$

οπότε, η τάση  $\sigma$  μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες, η μία μέτρου  $\sigma_0 \cos \delta$ , σε φάση με την παραμόρφωση και η άλλη μέτρου  $\sigma_0 \sin \delta$  με διαφορά φάσης  $90^\circ$  με την παραμόρφωση. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε:

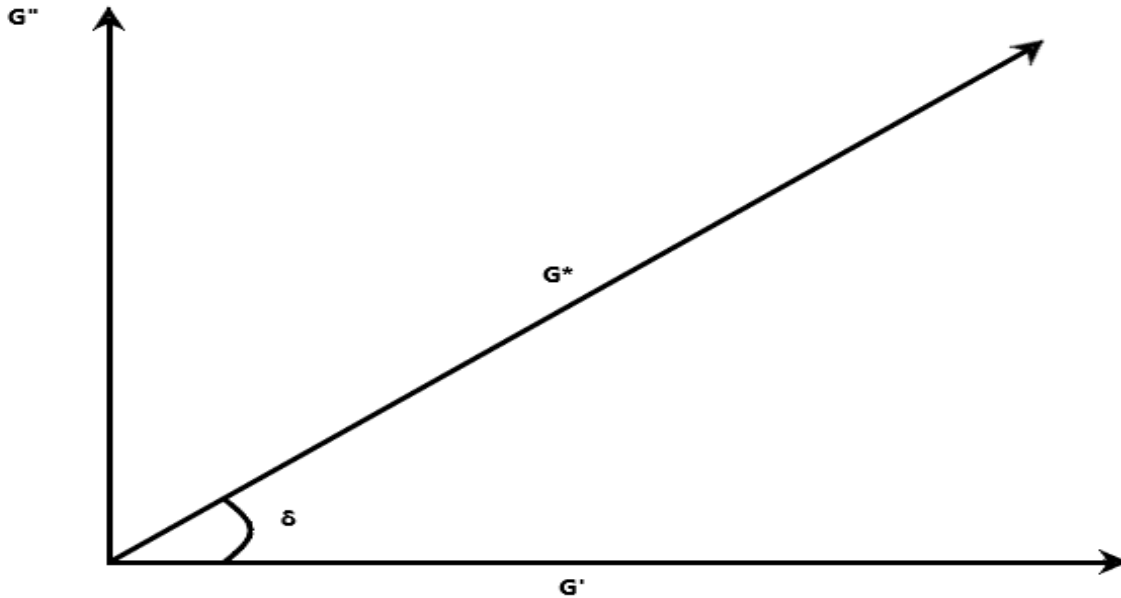
$$\sigma = \gamma_0 G' \sin \omega t + \gamma_0 G'' \cos \omega t \quad (2.4)$$

Όπου

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (2.5)$$

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (2.6)$$

Οι εξισώσεις 2.5 & 2.6 υποδεικνύουν ότι τα μέτρα  $G'$  και  $G''$  θα μπορούσαν να αναπαρασταθούν μιγαδικά ως εξής: Στο υλικό μας αποδίδουμε ένα μιγαδικό μέτρο  $G^*$ , του οποίου η σχέση με τα μέτρα  $G'$  και  $G''$  ευρίσκεται αν θέσουμε:



**Εικόνα 2.1 Η γεωμετρική παράσταση του μιγαδικού μέτρου διάτμησης  $G^*$**

$$\gamma = \gamma_0 e(i\omega t) \quad (2.7)$$

$$\sigma = \sigma_0 e[i(\omega t + \delta)] \quad (2.8)$$

$$\frac{\sigma}{\gamma} = G^* = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} e(i\delta) = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \sin \delta) = G' + iG'' \quad (2.9)$$

Το πραγματικό μέρος δηλαδή του  $G^*$  είναι το  $G'$ , το οποίο είναι σε φάση με την παραμόρφωση και συχνά αναφέρεται ως μέτρο αποθήκευσης (storage modulus), επειδή καθορίζει την ενέργεια που εναποθηκεύεται ως ελαστική ενέργεια στο δοκίμιο λόγω της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Το φανταστικό μέρος του  $G^*$  είναι το  $G''$ , το οποίο είναι 90° εκτός φάσης με την επιβαλλόμενη παραμόρφωση και συχνά αναφέρεται ως το μέτρο απώλειας (loss modulus), επειδή καθορίζει την απώλεια της μηχανικής ενέργειας σε θερμική. Αυτό φαίνεται από τον υπολογισμό της απώλειας ενέργειας  $\Delta E$  ανά κύκλο. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι, για ένα τέλειο ελαστικό (για το οποίο ισχύει ο νόμος του Hooke, ( $\sigma = G\gamma$ ), η μηχανική ενέργεια που αποθηκεύεται κατά την παραμόρφωση του υλικού αποδίδεται εξ'

ολοκλήρου κατά την επαναφορά του στην αρχική κατάσταση. Για μία ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη, δηλαδή, παραμόρφωση  $\gamma$  η τάση – απόκριση του ελαστικού υλικού θα είναι σε φάση με την παραμόρφωση και την ενέργεια, που αποθηκεύεται κατά το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο του κύκλου, ανακτάται εξ' ολοκλήρου κατά το δεύτερο και τέταρτο τεταρτημόριο. Αντίθετα, για ένα ιξώδες ρευστό η σχέση μεταξύ  $\sigma$  και  $\gamma$  είναι, ως γνωστόν,  $\sigma = \eta(d\gamma/dt)$ , όπου  $\eta$  ο συντελεστής ιξώδους του υλικού. Όλη η μηχανική ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωση του ιξώδους υλικού χάνεται εξ' ολοκλήρου σε θερμική ενέργεια. Για μια ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη, δηλαδή, παραμόρφωση  $\gamma$ , η τάση – απόκριση του ιξώδους υλικού θα είναι  $90^\circ$  εκτός φάσης με την παραμόρφωση και ανά κύκλο θα χάνεται όλη η ενέργεια, η οποία είναι:

$$\Delta E_\eta = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sigma d\gamma = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \eta \frac{d\gamma}{dt} \frac{d\gamma}{dt} dt = \pi \eta \omega \gamma_0^2 \quad (2.10)$$

Σε ένα λοιπόν ιξωδοελαστικό υλικό, από το οποίο περιμένουμε τόσο ελαστική όσο και ιξώδη συμπεριφορά, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το μέτρο  $G'$  αντιπροσωπεύει το ελαστικό μέρος του υλικού ενώ το  $G''$  αντιπροσωπεύει το ιξώδες μέρος του.

$$E = \omega \gamma_0^2 \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (G' \sin \omega t \cos \omega t) dt = \frac{1}{2} G' \quad (2.11)$$

Αν το ολοκλήρωμα στην εξίσωση (2.11) υπολογιστεί για ένα τεταρτημόριο του κύκλου και όχι για μία πλήρη περίοδο, ο πρώτος όρος δίνει τη μέγιστη αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια  $E$ . Όπως αναμενόταν, η ενέργεια αυτή είναι ανεξάρτητη της συχνότητας. Συνδυαζόμενη η εξίσωση αυτή με την εξίσωση (2.9) και τους ορισμούς των  $G'$  και  $G''$ , παίρνουμε :

$$G' = \frac{2E}{\gamma_0^2}, \quad G'' = \frac{\Delta E}{\pi \gamma_0^2}, \quad \tan \delta = \frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (2.12)$$

Ο λόγος  $\frac{\Delta E}{2\pi E} = 2\pi \tan \delta$  ονομάζεται ειδική απώλεια, και ο  $\tan \delta$  συντελεστής απώλειας (loss factor). Αντίστοιχη μελέτη δύναται να γίνει κατά τον ίδιο τρόπο και για το μέτρο ελαστικότητας  $E^*$ . Στην περίπτωση των πολυμερών, το  $G''$  είναι, σχεδόν πάντα, πολύ μικρό σε σχέση με το  $G'$ . Έτσι το μέτρο του  $G^*$ , δηλαδή το  $|G^*|$ , είναι προσεγγιστικά ίσο με το  $G'$ . Τα ελαστικά μέτρα  $G$  (ή  $E$ ), που παίρνουμε από τα πειράματα ερπυσμού και χαλάρωσης τάσης, είναι προσεγγιστικά ίσα επίσης με το  $G'$ , το οποίο αναφέρεται ακόμη και ως δυναμικό μέτρο (dynamic modulus). Έτσι, ενώ το  $G'$  θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι δυνατόν να το προσδιορίσουμε και με άλλες μηχανικές δοκιμές, το  $G''$  και τη γωνία  $\delta$  τα προσδιορίζουμε αποκλειστικά με τις δυναμικές μηχανικές δοκιμές (εκτός από τις μηχανικές υπάρχουν και άλλες τεχνικές για τον προσδιορισμό της γωνίας  $\delta$ ). Οι δύο αυτές ιδιότητες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη δομή του πολυμερούς, οπότε οι δυναμικές μηχανικές δοκιμές προσφέρονται ιδιαίτερα για τη μελέτη της μοριακής δομής και της μορφολογίας του πολυμερούς. Πέραν αυτού, το εύρος του φάσματος των κλιμάκων χρόνου, που διατίθενται με τις δυναμικές δοκιμές είναι πολύ μεγάλο (περίπου από  $10^{-5}$  μέχρι  $10^8$  κύκλοι/δευτερόλεπτο). Είναι πολύ συνηθισμένο να ορίζουμε τη δυναμική μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού με το μέτρο  $G'$  και την εφαπτομένη της γωνίας  $\delta$ ,  $\tan \delta = \frac{G''}{G'}$ . Η



εφαπτομένη αυτή είναι γνωστή ως εφαπτομένη απώλειας (loss tangent) και είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος. Όταν το  $G''$  είναι πολύ μικρό, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι  $\delta \approx \tan \delta$ . Τυπικές τιμές των  $G'$ ,  $G''$  και  $\tan \delta$  για ένα πολυμερές είναι:  $2 * 10^5 \frac{N}{m^2}$ . Τέλος, πρέπει να διευκρινίσουμε ότι η επίδραση της συχνότητας γίνεται εμφανέστερη στα πειράματα με τη μέθοδο των υπερήχων, τα οποία αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο, όπου αυτή είναι πολύ υψηλή.

# Γενικά στοιχεία πειραματικής διαδικασίας εφελκυσμού

## 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, αναφέρονται οι παράμετροι μέσω των οποίων υπολογίζουμε τις στατικές και δυναμικές ελαστικές σταθερές του κάθε υλικού. Αναφέρεται επίσης ο τρόπος λήψης των μετρήσεων στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με την καταστροφική μέθοδο του εφελκυσμού. Τέλος επεξηγούνται τα ανάλογα σφάλματα και η εύρεσή τους.

## 3.2 Γενικά στοιχεία

Μια μονοαξονική καταπόνηση έχει μόνο μία μη μηδενική τάση, τη  $\sigma_x$ .

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \rightarrow \sigma_x = E\varepsilon_x \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} \rightarrow \sigma_x = -E \frac{\varepsilon_y}{\nu} \quad (3.2)$$

$$\gamma_{xy} = 0 \quad (3.3)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (3.4)$$

όπου  $\sigma_x$  η ασκούμενη τάση,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  η διαμήκης και η εγκάρσια παραμόρφωση,  $\tau_{xy}$  η διατμητική τάση,  $\gamma_{xy}$  η διατμητική παραμόρφωση και  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. (I.N. Πρασιανάκης, 1990)

## 3.3 Πειραματική διερεύνηση πλαστικοποιητή σε ρητίνες

Όπως προαναφέρθηκε, οι μηχανικές ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών μπορούν να μεταβληθούν προσθέτοντας διαφορετικές ποσότητες πλαστικοποιητή. Το γεγονός αυτό τις κάνει ικανές να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπα σε πειραματικές δοκιμές. Οι ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών εξαρτώνται έντονα από το χρόνο, έτσι αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση της βισκοελαστικής συμπεριφοράς άλλων υλικών της

Μηχανικής. Από το ποσοστό του πλαστικοποιητή μπορεί να γνωρίζουμε τις τιμές της τάσης θραύσης  $\sigma_F$ , του μέτρου ελαστικότητας  $E$  και του λόγου Poisson  $\nu$  ως συνάρτηση αυτής της παραμέτρου. Λόγω της αξιοσημείωτης αύξησης της χρήσης των εποξειδικών ρητινών ως κατασκευαστικά υλικά τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τη διερεύνηση των παραπάνω ιδιοτήτων τους. (Ε. Κοντού, 1985)

## Ανάλυση σφάλματος

### i) Σφάλμα στην τάση

$\sigma = \frac{P}{A}$ , όπου  $P$  το εφαρμοζόμενο φορτίο και  $A$  το εμβαδόν διατομής με πλάτος  $b$  και πάχος  $t$  ισούται με  $A = bt$ . Έτσι  $\sigma = \frac{P}{bt}$ .

Το σφάλμα,  $d\sigma$ , στην τάση  $\sigma$  είναι:

$$d\sigma = \frac{d\sigma}{dP} dP + \frac{d\sigma}{dt} dt \quad (3.5)$$

όπου

$$\frac{d\sigma}{dP} = \frac{1}{bt}, \quad \frac{d\sigma}{db} = \frac{P}{b^2t}, \quad \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{P}{bt^2}$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση του  $d\sigma$  βρίσκουμε:

$$d\sigma = \frac{1}{bt} dP - \frac{P}{b^2t} db - \frac{P}{bt^2} dt \quad (3.6)$$

### ii) Σφάλμα στο μέτρο ελαστικότητας $E$

Η σχέση του μέτρου ελαστικότητας δίδεται ως εξής:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_x} \quad (3.7)$$

Όπου  $\sigma$  είναι η τάση [ $\sigma = \frac{P}{A}$ ] και  $\varepsilon_x$  η διαμήκης παραμόρφωση [ $\varepsilon_x = \varepsilon_\delta = \frac{\Delta L}{L_0}$ ].

Έτσι έχω:

$$E = \frac{P}{bt} \frac{1}{\varepsilon_x} \quad (3.8)$$

Το σφάλμα,  $dE$  στο μέτρο ελαστικότητας είναι:

$$dE = \frac{\partial E}{\partial P} dP + \frac{\partial E}{\partial b} db + \frac{\partial E}{\partial t} dt + \frac{\partial E}{\partial \varepsilon_x} d\varepsilon_x \quad (3.9)$$

Όπου:

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \frac{1}{bt\varepsilon_x} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = -\frac{P}{b^2t\varepsilon_x} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \varepsilon_x} = -\frac{P}{bt\varepsilon_x^2} \quad (3.12)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση του  $dE$  βρίσκουμε:

$$dE = \frac{1}{bt\varepsilon_x} dP - \frac{P}{b^2t\varepsilon_x} db - \frac{P}{bt^2\varepsilon_x} dt - \frac{P}{bt\varepsilon_x^2} d\varepsilon_x \quad (3.13)$$

### iii) Σφάλμα στο λόγο Poisson $\nu$

Ο λόγος Poisson δίδεται ως εξής:

$$\nu = \left| -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (3.14)$$

Όπου  $\varepsilon_x$  η διαμήκης και  $\varepsilon_y$  η εγκάρσια παραμόρφωση,

$$\varepsilon_y = \varepsilon_\delta = \frac{\Delta b}{b} \quad (3.15)$$

Το σφάλμα  $dv$  είναι:

$$dv = \frac{\partial \nu}{\partial \varepsilon_x} d\varepsilon_x + \frac{\partial \nu}{\partial \varepsilon_y} d\varepsilon_y \quad (3.16)$$

Όπου

$$\frac{\partial \nu}{\partial \varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x^2} d\varepsilon_x \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \nu}{\partial \varepsilon_y} = \frac{1}{\varepsilon_x} \quad (3.18)$$

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε:

$$dv = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x^2} d\varepsilon_x + \frac{1}{\varepsilon_x} d\varepsilon_y \quad (3.19)$$

Χρησιμοποιώντας τον πίνακα με τιμές του φορτίου  $P$  ή της τάσεως  $\sigma$ , της διαμήκης και εγκάρσιας παραμόρφωσης  $\varepsilon_x$  και  $\varepsilon_y$  αντιστοίχως και γνωρίζοντας τις διατάσεις της διατομής του δοκιμίου  $b$  και  $t$ , υπολογίζονται τα σφάλματα  $d\sigma$ ,  $dE$  και  $dv$ .

# Προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών με τη μέθοδο του εφελκυσμού

## 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται λεπτομερής παρουσίαση των πειραμάτων με την καταστροφική μέθοδο του εφελκυσμού, οι μηχανές και τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, οι διαδικασίες του πειράματος, η μορφή των υπό εξέταση δοκιμίων και ο τρόπος παραγωγής-κατασκευής τους. Επίσης γίνεται επεξήγηση του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να μοντελοποιήσουμε τα πειραματικά δεδομένα του υλικού που παρουσίαζε μη γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή του αλουμινίου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με τη μορφή συγκεντρωτικών πινάκων και διαγραμμάτων για την καλύτερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων.

Οι στατικές ελαστικές σταθερές για καθένα από τα δοκίμια, υπολογίστηκαν με τη μέθοδο του εφελκυσμού. Μετρώντας και καταγράφοντας συνεχώς τις τιμές του φορτίου ταυτόχρονα με τις αντίστοιχες επιμηκύνσεις του αρχικού μήκους του δοκιμίου μπορέσαμε να κατασκευάσουμε το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων. Από την κλίση του διαγράμματος  $\sigma = f(\varepsilon)$  υπολογίστηκε το Μέτρο Ελαστικότητας  $E$  για κάθε υλικό. Επίσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής είχαμε τοποθετήσει μηκυσιόμετρα και κατά τις δύο διευθύνσεις του δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό καταφέραμε να μετρήσουμε τόσο την αξονική όσο και την εγκάρσια παραμόρφωση και έτσι να υπολογίσουμε το λόγο Poisson  $\nu$ . Το μέτρο διάτμησης  $G$  υπολογίστηκε έμμεσα από τη σχέση:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.1)$$

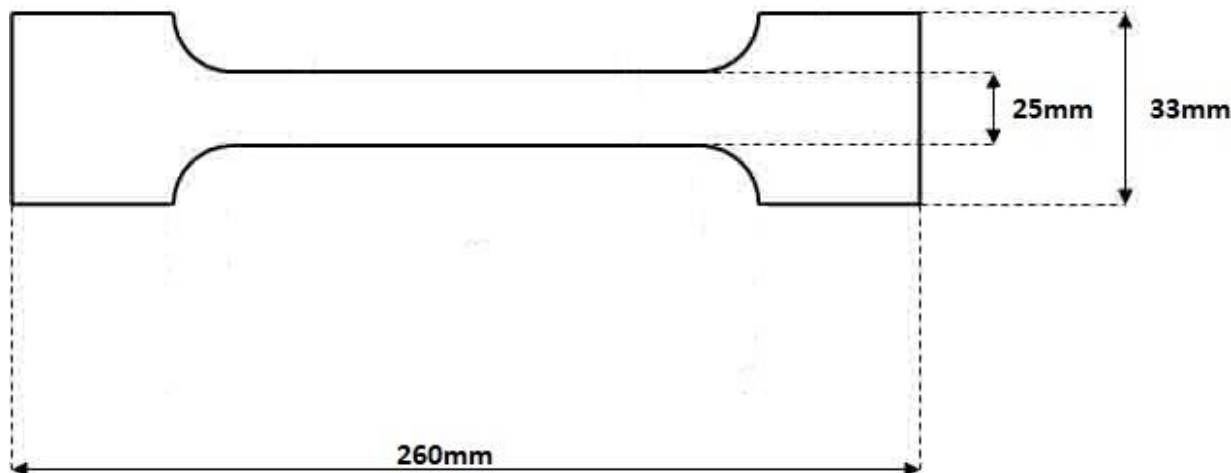
Όμως πριν δούμε αναλυτικά τη διαδικασία των δοκιμών και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ας δούμε τη μορφή των δοκιμίων και τις μηχανές και όργανα που χρησιμοποιήθηκαν.

## 4.2 Μορφή δοκιμίων

Πριν την πραγματοποίηση οποιουδήποτε πειράματος θα πρέπει να καθοριστούν οι προδιαγραφές των χρησιμοποιούμενων δοκιμίων και οι συνθήκες στις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι πειραματικές δοκιμές. Όταν αναφερόμαστε στις προδιαγραφές των δοκιμίων εννοούμε πρώτα από όλα το υλικό κατασκευής τους το οποίο θα πρέπει να είναι

ακριβώς το ίδιο και να έχει αποθηκευτεί για το ίδιο χρονικό διάστημα, στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας κ.λπ., έτσι ώστε όλα τα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα να έχουν τις ίδιες ιδιότητες. Εφ' όσον έχει αποφασισθεί το υλικό των δοκιμίων, επόμενο βήμα είναι να επιλεγεί το σχήμα και οι διαστάσεις τους, δηλαδή με άλλα λόγια, να επιλεγεί η κατάλληλη τυποποίηση. Όσον αφορά τις συνθήκες των πειραματικών δοκιμίων, θα πρέπει να επιλεγούν αρχικά οι συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία) για τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, ο αριθμός των δοκιμίων που θα ελεγχθούν σε ένα πείραμα, καθώς και η ταχύτητα πραγματοποίησης του πειράματος.

Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη δοκιμή, κατασκευάστηκαν κατά DIN 50125. Ήταν πρισματικά και με διαστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 4.1:



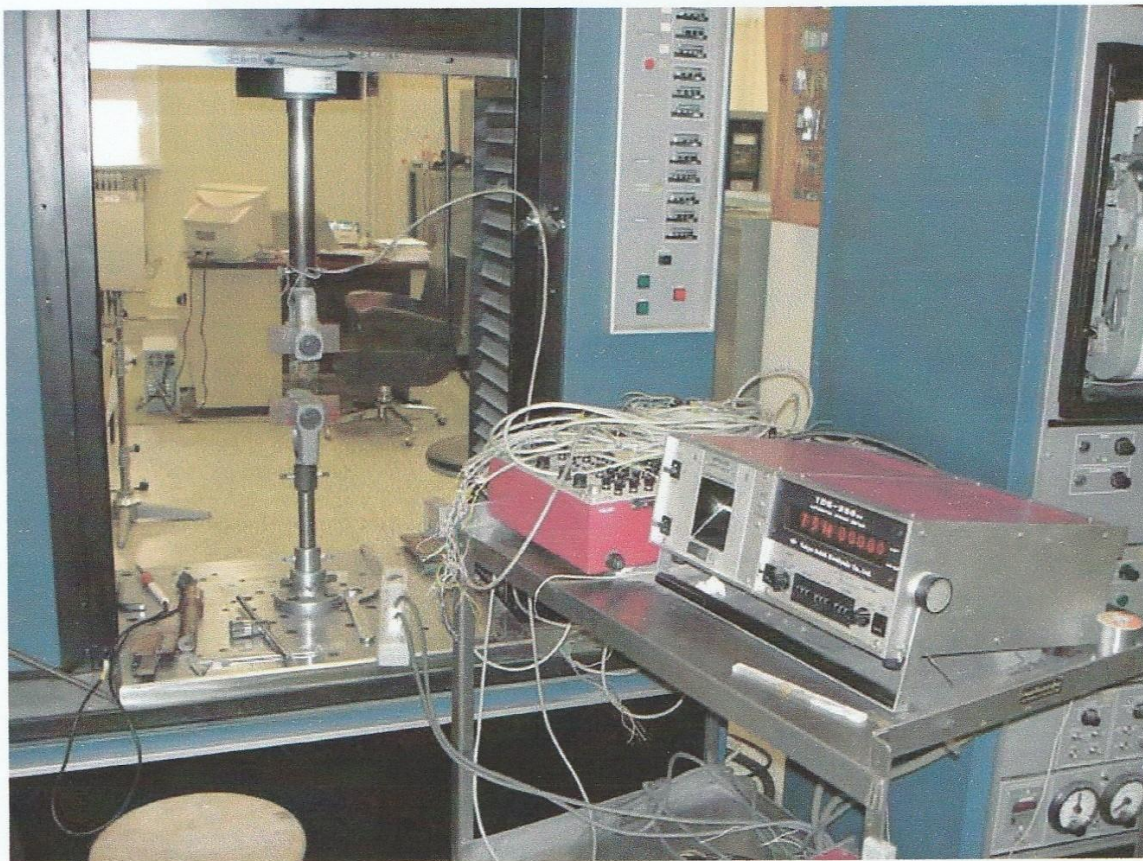
**Εικόνα 4.1.**

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν παρασκευάστηκαν από ένα σύστημα που βασίζεται σε έναν αιθέρα (diglycidil) της δισφαινόλης A (ρητίνη Epikote 828) ως πολυμερές, με ένα εποξύ ισοδύναμο 185 – 192, με μοριακό βάρος μεταξύ 370 – 384, ιξώδες 15000 cP στους 25°C. Ως μέσο σκλήρυνσης προστέθηκε τριαιθυλενοτετραμίνη 8% κ.β. Ως πλαστικοποιητής χρησιμοποιήθηκε ένα πολύ σουλφίδιο του Thiokol LP-3, δηλαδή κύριος πλαστικοποιητής αυτός έχει μοριακό βάρος 1000, πυκνότητα 1270 kg/m<sup>3</sup> και ιξώδες 700 έως 1200cP σε θερμοκρασία δωματίου. Τα υλικά που μελετήθηκαν σε αυτήν την εργασία συμβολίζονται με C100-P-8, δηλώνοντας την ποσότητα του προπολυμερούς, το ποσοστό του πλαστικοποιητή και την αμίνη που χρησιμοποιήθηκε ως σκληρυντική ουσία, όπου το ποσοστό P του πλαστικοποιητή μπορεί να είναι από 0 έως 100 %, ενώ το σύμβολο C δηλώνει τον τύπο της εποξειδικής ρητίνης, η οποία στην περίπτωσή μας έχει υποστεί σκλήρυνση εν ψυχρώ (cold-setting resin). Η παραγωγή των υλικών έγινε με τον παρακάτω τρόπο που περιγράφεται στη συνέχεια. Το προπολυμερές θερμάνθηκε μέχρι τους 30°C, έτσι ώστε να μειωθεί το ιξώδες του. Στη συνέχεια έγινε η προσθήκη κατάλληλων ποσοτήτων σκληρυντικής ουσίας και πλαστικοποιητή και το μείγμα αφού ανακατεύθηκε προσεκτικά, τοποθετήθηκε σε ένα κενό θάλαμο για να αφαιρεθεί ο αέρας. Ακολούθως, το υλικό τοποθετήθηκε σε ένα εκμαγείο από Plexiglas για να πάρει την επιθυμητή φόρμα και επικαλύφθηκε με ένα στρώμα λαδιού σιλικόνης. Η ψύξη του μείγματος έγινε στους 25°C και ο χρόνος πραγματοποίησης της διαδικασίας αυτής ήταν της τάξης των 15min. Το διαμορφωμένο υλικό αφαιρέθηκε από το εκμαγείο 48 ώρες αργότερα και υπέστη θερμική

κατεργασία, έχοντας στόχο όχι μόνο να ολοκληρωθεί η σκλήρυνσή του αλλά και να αφαιρεθούν οι παραμένουσες τάσεις στα δοκίμια. Κατά τη θερμική αυτή κατεργασία είχαμε αύξηση της θερμοκρασίας με ρυθμό 5°C ανά ώρα, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ως τους 100 °C και η θερμοκρασία αυτή διατηρήθηκε σταθερή για περίπου 24 ώρες. Στη συνέχεια το υλικό απομακρύνθηκε από το φούρνο και αφέθηκε να κρυώσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος επιβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο μία απότομη μείωση της θερμοκρασίας του, παρ' όλο που αυτή η διαδικασία δεν ελαχιστοποιεί τις εσωτερικές τάσεις.

### 4.3 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Αρχικά η μηχανή εφελκυσμού η οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου INSTRON. Η μηχανή αυτή είναι σύγχρονης τεχνολογίας με δυνατότητα αυτόματης καταγραφής φορτίου. Έχει τη δυνατότητα να ασκήσει φορτίο μέχρι 50kN ξεκινώντας από πολύ μικρές κλίμακες. Όμως για τα δικά μας δοκίμια η μηχανή παρουσίαζε προβλήματα στις αρπάγες. Επειδή τα δοκίμια ήταν σχετικά μεγάλα, δεν μπορούσαν να “πιαστούν” στις μικρές κωνικές αρπάγες της μηχανής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήσαμε τις επίπεδες αρπάγες, όμως τα δοκίμια γλιστρούσαν με αποτέλεσμα να δημιουργήσουμε προβλήματα και να μην επιτρέπουν τη σωστή εκτέλεση της δοκιμής.



**Εικόνα 4.2** Συσκευή ελέγχου Instron .

Προκειμένου λοιπόν να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιήσαμε τελικά τη μηχανή τύπου AMSLER (LAFFON & SOHN), μεγίστου φορτίου 200kN και με ενδιάμεσες κλίμακες 20–40–100–200kN.

Η μορφή της μηχανής AMSLER φαίνεται στην παρακάτω **Εικόνα 4.3**.



**Εικόνα 4.3** Συσκευή ελέγχου Instron.

Η επιβολή του φορτίου και η μέτρησή του γίνονται υδραυλικά. Η μηχανή διαθέτει ένα σύστημα δύο δεικτών, από τους οποίους ο ένας παρακολουθεί και δείχνει τις διακυμάνσεις του φορτίου που επιβάλλεται από τις αρπάγες στο δοκίμιο, και ο δεύτερος δείκτης συμπαρασύρεται από τον πρώτο, μόνο όμως κατά τη φορά της αύξησης του φορτίου, επιτρέποντάς μας να γνωρίζουμε το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο. Ο κατασκευαστής εγγυάται ότι η ακρίβεια των ενδείξεων είναι της τάξης του  $\pm 1\%$ .

#### **4.4 Μηκυσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν**

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της παραμόρφωσης των δοκιμίων, κατά τη δοκιμή του εφελκυσμού, ονομάζονται μηκυσιόμετρα. Εκείνα που χρησιμοποιήσαμε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μας είναι το ηλεκτρικό μηκυσιόμετρο (strain gage) και το μηχανικό μηκυσιόμετρο Huggenberger. Στο ηλεκτρικό μηκυσιόμετρο ή ηλεκτρομηκυσιόμετρο ο μετρητής είναι μια ωμική αντίσταση, κατασκευασμένη από λεπτό σύρμα ειδικού κράματος μετάλλων. Ο μετρητής αυτός προσκολλάται στην επιφάνεια του δοκιμίου με ειδική κόλλα



σύμφωνα με τις προδιαγραφές του. Όμως για να έχουμε σωστά αποτελέσματα πρέπει η επιφάνεια του δοκιμίου να έχει καθαριστεί σωστά. Εμείς κατά την προετοιμασία των δοκιμών τα λειάναμε με σμυριδόχαρτο 600μ. Στη συνέχεια τα καθαρίσαμε με ειδικό υγρό και μετά κολλήσαμε τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα. Η μορφή ενός τέτοιου μετρητή παραμόρφωσης φαίνεται στην παρακάτω **Εικόνα 4.4**.



**Εικόνα 4.4** Μετρητής παραμόρφωσης



**Εικόνα 4.5** Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα που είναι προσκολλημένα στο δοκίμιο

Όπως βλέπουμε κάθε ηλεκτρομηκυνσιόμετρο έχει δύο ακροδέκτες, οι οποίοι με ειδικά καλώδια συνδέονται με το μετρητικό κύκλωμα που μετράει τη μεταβολή της αντίστασης  $\Delta R$  και υπολογίζει την παραμόρφωση.

Ως μετρητικό κύκλωμα χρησιμοποιήσαμε μία γέφυρα Wheatstone τύπου TDS 256 DC (AUTOMATIC STRAIN METER) που διαθέτει το εργαστήριο. Η γέφυρα αυτή έχει αυτόματο καταγραφικό που δίνει απευθείας την παραμόρφωση αφού πρώτα τοποθετήσουμε τον κατάλληλο συντελεστή  $k$  του χρησιμοποιούμενου μηκυσιομέτρου (gage factor). Στα μηκυσιόμετρα που χρησιμοποιήσαμε, ο συντελεστής  $k$  έχει την τιμή  $k=2,17$ .



**Εικόνα 4.6** Βαθμονομημένη γέφυρα Wheatstone που συνδέεται με τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα του δοκιμίου

Το μηχανικό μηκυσιόμετρο Huggenberger αποτελείται από σύστημα μοχλών. Κατά την εφαρμογή παραμόρφωσης ο δείκτης του οργάνου δείχνει κάποια ένδειξη. Από την ένδειξη αυτή προσδιορίζεται η ανοιγμένη παραμόρφωση με βάση τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{m\lambda} \quad (4.2)$$

Όπου  $\delta$ =η ένδειξη του μηκυσιομέτρου

$m$ =η μεγέθυνση του οργάνου

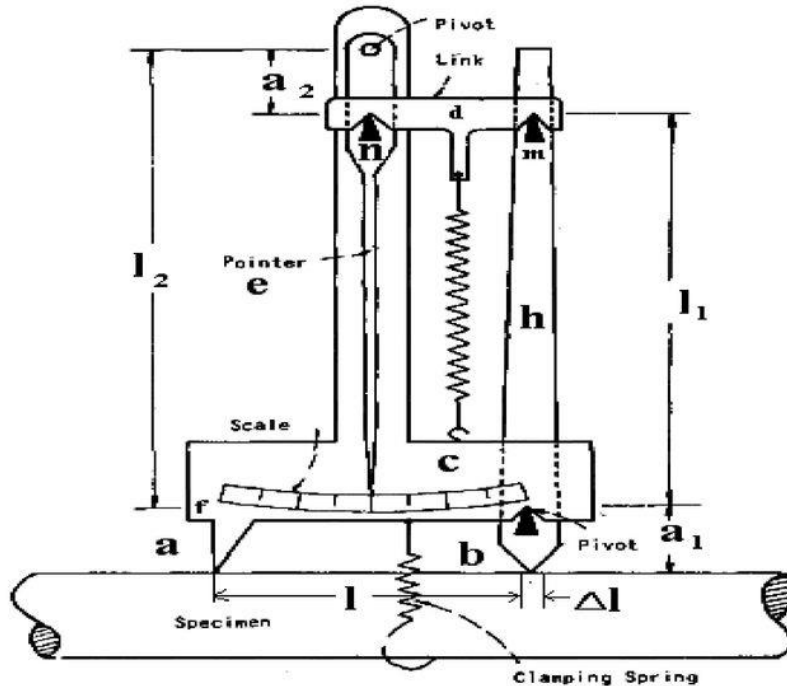
$\lambda$ =η βάση μέτρησης.

Το μηκυσιόμετρο που χρησιμοποιήσαμε έχει βάση μέτρησης  $\lambda = 20mm$  και μεγέθυνση  $m = 1026$ . Η ευαισθησία του δε, δηλαδή η ελάχιστη τιμή που μπορεί να μετρήσει είναι

$\varepsilon = 0,0005 c_x$ . Η μορφή του μηκυσιόμετρου Huggenberger φαίνεται στο Σχήμα 4.4 που ακολουθεί:



## HUGGENBERGER EXTENSOMETER



Εικόνα 4.7 Μηκυσιόμετρο Huggenberger

Το Huggenberger είναι πιο αξιόπιστο από το ηλεκτρομηκυσιόμετρο, έχει όμως δύο βασικά μειονεκτήματα. Αφενός μετράει μόνο αξονικές παραμορφώσεις και αφετέρου χρησιμοποιείται μόνο στην ελαστική περιοχή όπου οι παραμορφώσεις είναι μικρές. Επίσης, λόγω του μικρού εύρους της κλίμακας μετρήσεως, ο δείκτης της πρέπει να μηδενίζεται και οι νέες τιμές να προστίθενται στις προηγούμενες. Το μηκυσιόμετρο αφαιρείται πριν την ελαστική περιοχή.

### 4.5 Διαδικασία δοκιμών - Αποτελέσματα

Η δοκιμή εφελκυσμού έγινε για καθένα από τα άλλα δοκίμια (από αλουμίνιο και Plexiglas) με την ίδια ακριβώς διαδικασία, κατά DIN 50125. Το αλουμίνιο είναι μεταλλικό υλικό πολύ όλκιμο ενώ το Plexiglas είναι πολυμερικό υλικό που δεν είναι όλκιμο. Αρχικά καθαρίσαμε το δοκίμιο και κολλήσαμε πάνω σε αυτό και στο κέντρο του, δύο ηλεκτρομηκυσιόμετρα, ένα κατά τον άξονα  $x$  και ένα κατά τον άξονα  $y$ . Σκοπός μας ήταν να μπορέσουμε να μετρήσουμε εκτός από την αξονική παραμόρφωση και την εγκάρσια για να υπολογίσουμε το λόγο Poisson. Αφού περιμέναμε να περάσουν 24 ώρες τουλάχιστον, ώστε να σταθεροποιηθεί η κόλλα, να αποκτήσει τη μέγιστη αντοχή της, είμασταν έτοιμοι για την εκτέλεση του πειράματος. Τοποθετήσαμε το

δοκίμιο έτσι ώστε ο άξονάς του να συμπίπτει με τον άξονα φόρτισης της μηχανής και προσαρμόσαμε σε αυτό δύο μηκυνσιόμετρα Huggenberger για τον υπολογισμό της αξονικής παραμόρφωσης. Ρυθμίσαμε την κατάλληλη κλίμακα φορτίων και την ταχύτητα φόρτισης και ξεκινήσαμε τον εφελκυσμό του δοκιμίου. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα καταγράψαμε τις τιμές του φορτίου  $P_i$  και τις αντίστοιχες  $E_i^a$  και  $E_i^d$  των Huggenberger. Η καταγραφή των αξονικών ( $\varepsilon_{xi}$ ) και των εγκάρσιων ( $\varepsilon_{yi}$ ) παραμορφώσεων των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων γινόταν αυτόματα, πατώντας απλά ένα διακόπτη. Όταν φτάσαμε στην περιοχή της διαρροής, όπου οι παραμορφώσεις ήταν μεγάλες, απομακρύναμε τα Huggenberger και συνεχίσαμε τις μετρήσεις μόνο με τα gages σχεδόν μέχρι τη θραύση του δοκιμίου, όπου και το πείραμα ολοκληρώθηκε. Από τις τιμές του φορτίου  $P_i$  με τις αντίστοιχες ενδείξεις  $\varepsilon_i^a$  και  $\varepsilon_i^d$  και  $\varepsilon_{xi}$  υπολογίσαμε τις τάσεις  $\sigma_i$  και τις αντίστοιχες αξονικές παραμορφώσεις  $\varepsilon_i$  με βάση τις σχέσεις:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{S_0} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\frac{\varepsilon_i^a + \varepsilon_i^d}{2 * 1026 * 20} + \varepsilon_{xi}}{2} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{xi} \quad (4.5)$$

όπου  $S_0$  = το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου.

Όπως είχαμε ενδείξεις από τα Huggenberger χρησιμοποιήσαμε τη σχέση (4.3), ενώ από το όριο της διαρροής και μετά που τα απομακρύναμε χρησιμοποιήσαμε την (4.4). Με βάση τις τιμές που προέκυψαν κατασκευάσαμε το **Διάγραμμα** τάσεων-παραμορφώσεων. Η διαδικασία αυτή έγινε ξεχωριστά για καθένα από τα δοκίμια. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στους παρακάτω **Πίνακες** και **Διαγράμματα**. Επίσης στα **Διαγράμματα** φαίνονται τα αρχικά τμήματα των καμπυλών που αντιστοιχούν σε παραμόρφωση  $\varepsilon$  μέχρι  $10^{-2}$  και τα οποία βοηθούν στον ορθότερο προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας. Από τα διαγράμματα αυτά μπορέσαμε και υπολογίσαμε το μέτρο ελαστικότητας  $E$  για καθένα από τα υλικά μας. Επίσης από τις τιμές  $\varepsilon_{xi}$  και  $\varepsilon_{yi}$  των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων υπολογίσαμε και το λόγο Poisson από τη σχέση

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yi}}{\varepsilon_{xi}} \quad (4.5)$$

Ξέροντας το  $E$  και το  $\nu$  υπολογίσαμε το μέτρο διάτμησης  $G$  με βάση τη σχέση

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.6)$$

Πρέπει να πούμε για την κατασκευή του διαγράμματος για το Plexiglas λόγω των περιέργων αποτελεσμάτων που παίρναμε, η δοκιμή χρειάστηκε να επαναληφθεί 4 φορές. Τις δύο τελευταίες φορές τα αποτελέσματα ήταν λογικά και ο σχεδιασμός της καμπύλης έγινε από τις μέσες αυτές τιμές. Επίσης επειδή τα δοκίμια του Plexiglass δεν έσπασαν στο ελεύθερο τμήμα,

αλλά κοντά στις αρπάγες, θεωρούμε ότι η τάση στην οποία πραγματοποιήθηκε η θραύση του δοκιμίου δεν αντιπροσωπεύει πλήρως την αντοχή του.

#### Πίνακας 4.8

Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού για δοκίμιο από αλουμίνιο  $S_0=(24.3 \times 10) \text{mm}^2$

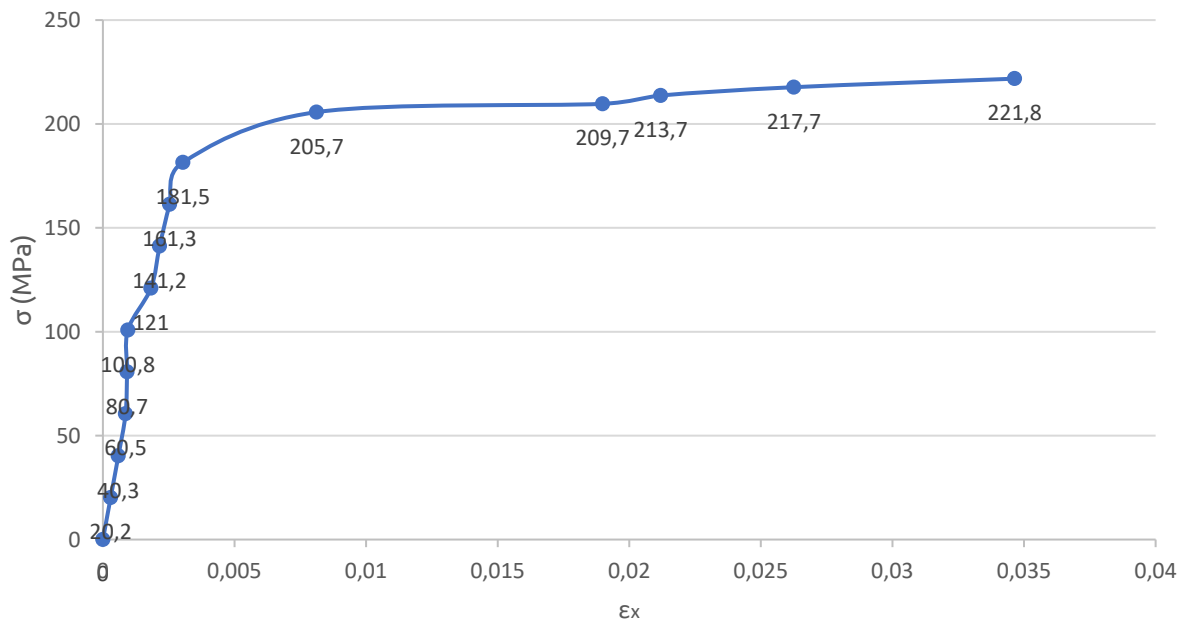
$\alpha/\alpha$	$\sigma(\text{MPa})$	$\varepsilon_x 10^{-6}$	$\varepsilon_y 10^{-6}$	$\nu$
0	0	0	0	0
1	20,2	294	94	0,32
2	40,3	587	199	0,34
3	60,5	861	298	0,34
4	80,7	1180	393	0,33
5	100,8	1480	498	0,33
6	121	1825	629	0,34
7	141,2	2156	756	0,35
8	161,3	2537	884	0,34
9	181,5	3039	1063	0,35
10	205,7	8116	3130	0,39
11	209,7	18987	7121	0,38
12	213,7	21193	7852	0,37
13	217,7	26255	9705	0,37
14	221,8	34641	12613	0,36
$\sigma_\delta = 205,6 \text{ MPa}$			$\sigma_\theta = 239,9 \text{ MPa}$	

### Πίνακας 4.9

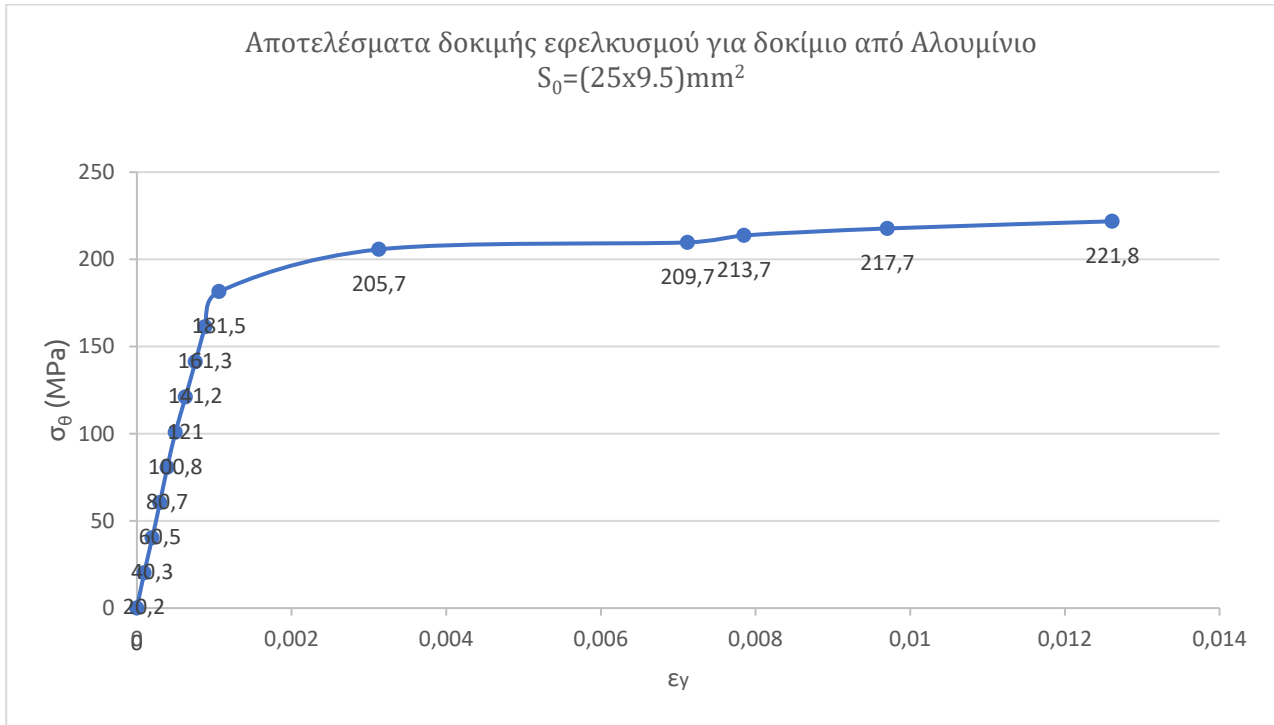
Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού για δοκίμιο από Plexiglas  $S_0=(25 \times 9.5) \text{mm}^2$

$\alpha/\alpha$	$\sigma(\text{MPa})$	$\varepsilon_x 10^{-6}$	$\varepsilon_y 10^{-6}$	$\nu$
0	0	0	0	0
1	2.1	654	265	0.43
2	4.2	1243	493	0.40
3	5.9	1803	701	0.40
4	6.3	1978	788	0.38
5	8.4	2752	1046	0.38
6	10.5	3391	1288	0.38
7	11.8	3780	1441	0.38
8	12.6	4260	1632	0.39
9	14.7	4792	1813	0.38
10	16.8	5478	2068	0.38
11	21.1	6949	2636	0.38
12	25.3	8320	3144	0.38
13	29.5	9782	3669	0.38
14	33.7	11335	4209	0.37
15	37.9	12985	4781	0.37
16	42.1	14655	5398	0.37
17	45.5	16419	6010	0.37
<b><math>\sigma_\delta = 50.1 \text{ MPa}</math></b>			<b><math>\sigma_\theta = 50.1 \text{ MPa}</math></b>	

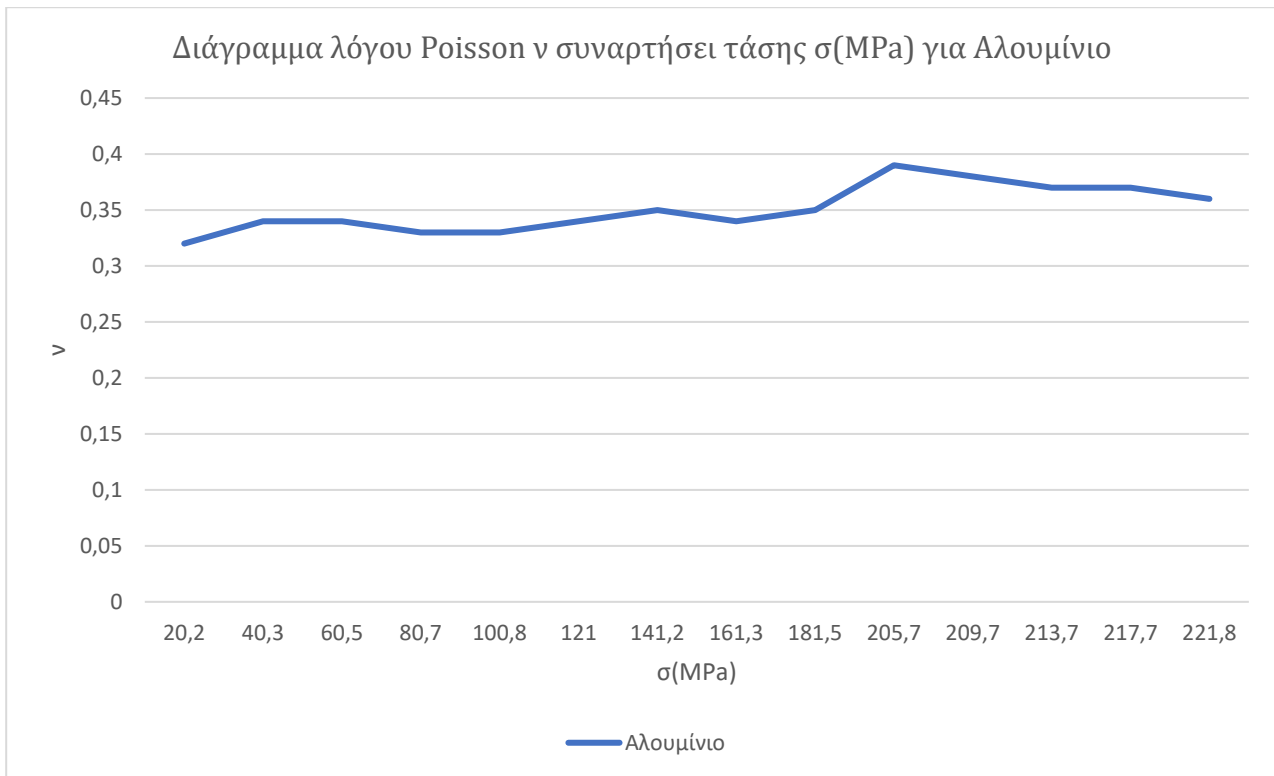
Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού για δοκίμιο από Αλουμίνιο  
 $S_0=(24.3 \times 10) \text{mm}^2$



Διάγραμμα 4.10 τάσης  $\sigma(\text{MPa})$ -παραμόρφωσης  $\varepsilon_x$  Αλουμινίου

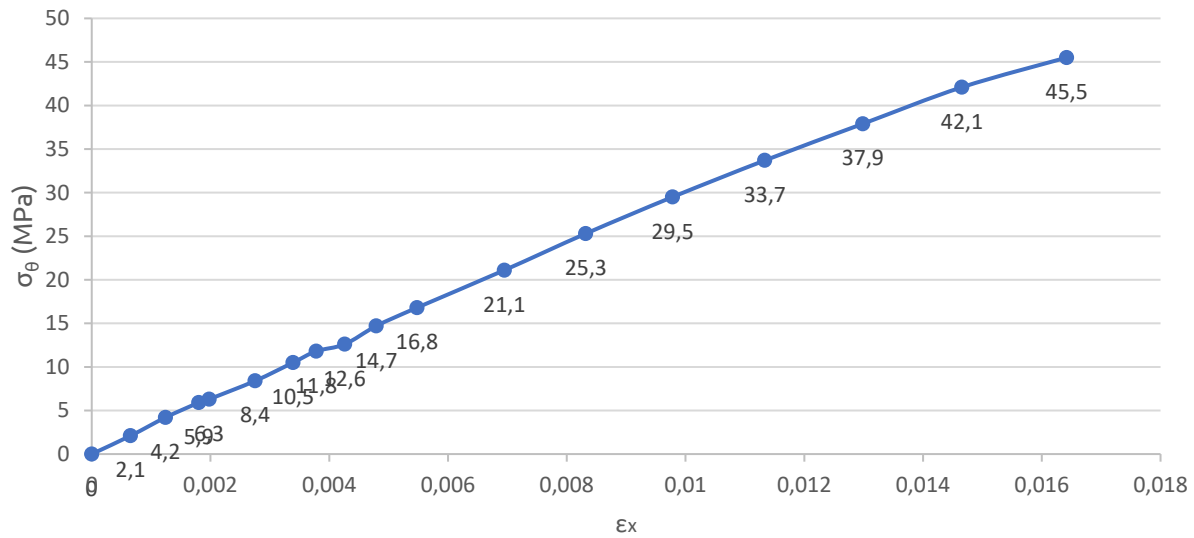


**Διάγραμμα 4.11** τάσης  $\sigma$ (MPa)-παραμόρφωσης  $\epsilon_\gamma$  Αλουμινίου



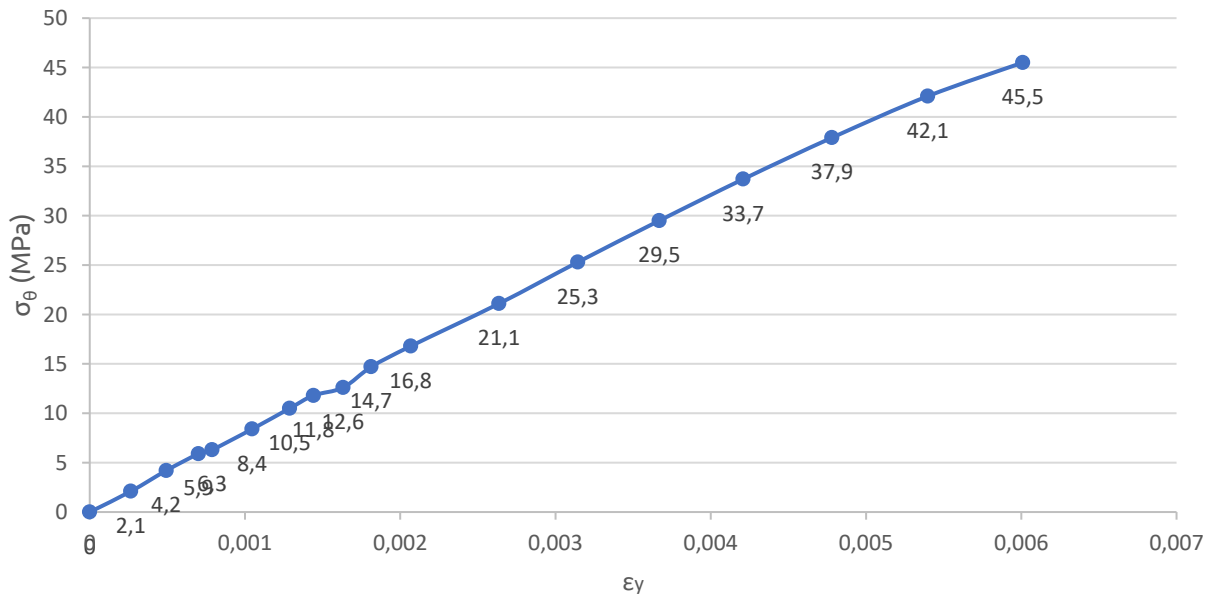
**Διάγραμμα 4.12** λόγου Poisson  $\nu$  συναρτήσει τάσης  $\sigma$ (MPa) για Plexiglass

Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού για δοκίμιο από Plexiglass  
 $S_0=(25 \times 9.5) \text{mm}^2$



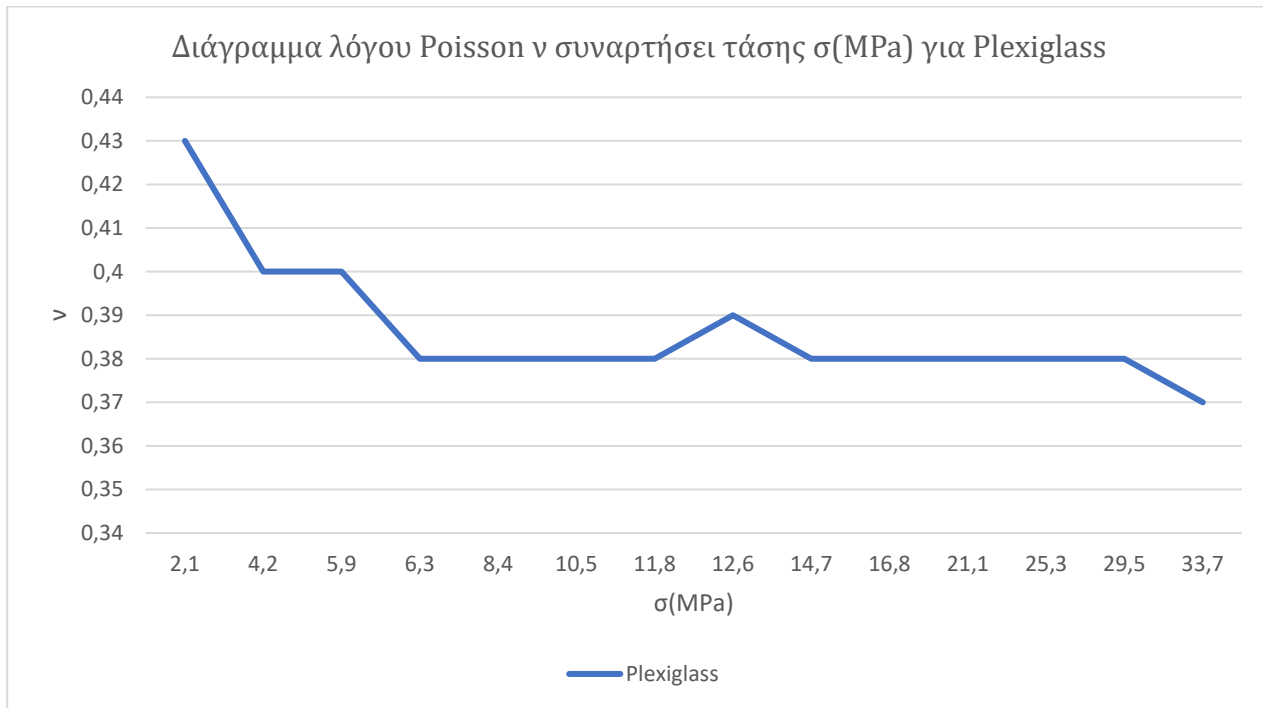
**Διάγραμμα 4.13** τάσης  $\sigma$ (MPa)-παραμόρφωσης  $\epsilon_x$  Plexiglass

Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού για δοκίμιο από Plexiglass  
 $S_0=(25 \times 9.5) \text{mm}^2$



**Διάγραμμα 4.14** τάσης  $\sigma$ (MPa)-παραμόρφωσης  $\epsilon_y$  Plexiglass





**Διάγραμμα 4.15** λόγου Poisson ν συναρτήσει τάσης σ(MPa) για Plexiglass

### Θεωρητική εκτίμηση της πορείας του Μέτρου Ελαστικότητας $E$

Στο σημείο αυτό, θα γίνει μία προσπάθεια θεωρητικής εκτίμησης της πορείας του μέτρου ελαστικότητας βασιζόμενοι σε κάποιες πειραματικές τιμές. Από το διάγραμμα μεταβολής των πειραματικών τιμών του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του ποσοστού πλαστικοποιητού είναι προφανές ότι αυτό ελαττώνεται όσο αυξάνει αυτό το ποσοστό. Άρα, λαμβάνοντας υπόψιν το μελετημένο πεδίο δηλαδή από  $P = 0\%$  έως  $P = 40\%$  ( $P = 0.40$ ) ως προσεγγίσουμε τη μεταβολή με μία παραβολή 2<sup>ου</sup> βαθμού, η οποία θα έχει τη μέγιστη τιμή της στο  $P = 0$ . Έτσι έχω:

$$EP = AP^2 + BP + C \quad (4.7)$$

$$E' = 2AP + B \quad (4.8)$$

$$\text{Για } P = 0, C = E_0 \quad (4.9)$$

$$\text{Για } P = 0 \rightarrow E' = 0 \rightarrow B = 0 \quad (4.10)$$

$$\text{Για } P = 0,40 \rightarrow E = E_{40} \rightarrow E_{40} = A(0,40)^2 + E_0 \rightarrow \quad (4.11)$$

$$\rightarrow A = \frac{(E_{40} - E_0)}{(0,40)^2} \quad (4.12)$$

$$\text{Οπότε } E(P) = \frac{(E_{40}+E_0)}{(0,40)^2} P^2 + E_0 \quad (4.13)$$

Όμως, εάν λάβουμε υπόψιν τη γενική πορεία του μέτρου ελαστικότητας από πειράματα άλλων ερευνητών φθάνοντας μέχρι τη μέγιστη περιεκτικότητα  $P = 1$  πλαστικοποιητού, είναι εμφανές ότι το μέτρο ελαστικότητας συνεχώς μεν μειώνεται αλλά ο ρυθμός μειώσεως μεταβάλλεται και τείνει προς μία τιμή περίπου ασυμπτωτική όσο το ποσοστό του πλαστικοποιητού πλησιάζει το 100% δηλαδή  $P = 1$ . Συνεπώς, η 2<sup>ου</sup> βαθμού παραβολή δεν δύναται να προσεγγίσει μια τέτοιας μορφής μεταβολή. Λογικά, πρέπει να υπάρχει κάπου ένα σημείο καμπής ώστε να είναι συμβατό με τις προκύπτουσες πειραματικές τιμές. Οπότε θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με μια παραβολή 3<sup>ου</sup> βαθμού ως εξής: Βεβαίως, σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να είναι γνωστή και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας για  $P = 1$  όπως επίσης και να θεωρηθεί, προφανώς, ότι αυτή είναι η ελάχιστη τιμή του μέτρου.

$$EP = AP^3 + BP^2 + CP + D \quad (4.14)$$

$$\text{Για } P = 0 \rightarrow E = E_0 \rightarrow D = E_0 \quad (4.15)$$

$$E' = 3AP^2 + 2BP + C \quad (4.16)$$

$$\text{Για } P = 0 \rightarrow E' = 0 \rightarrow C = 0 \quad (4.17)$$

$$\text{Για } P = 1 \rightarrow E = E_1 \& E' = 0 \quad (4.18)$$

$$A(1)^3 + B(1)^2 + D = E_1 \quad (4.19)$$

$$\rightarrow 3A(1)^2 + 2B(1) + C = 0 \quad (4.20)$$

$$\rightarrow 3A + 2B + C = 0 \quad (4.21)$$

Η λύση του συστήματος δίνει:

$$B = 3(E_1 - E_0) \quad (4.22)$$

$$A = 2(E_0 - E_1) \quad (4.23)$$

$$E(P) = 2(E_0 - E_1)P^3 + 3(E_1 - E_0)P^2 + E_0 \quad (4.24)$$

Από το διάγραμμα της τάσης θραύσης σε σχέση με την περιεκτικότητα του πλαστικοποιητή, παρατηρούμε μια ανάλογη πορεία. Θεωρώντας λοιπόν την ίδια λογική με το μέτρο ελαστικότητας και λαμβάνοντας υπόψιν τις πλήρεις τιμές από τη βιβλιογραφία μέχρι  $P = 1$  έχω:

$$\sigma P = AP^3 + BP^2 + CP + D \quad (4.25)$$

$$\Gamma\iota\alpha P = 0 \rightarrow \sigma(0) = \sigma_0 \quad (4.26)$$

$$D = \sigma(0) = \sigma_0 \quad (4.27)$$

$$P = 1 \rightarrow \sigma = \sigma(1) = \sigma_1 \quad (4.28)$$

$$A + B + C + D = \sigma_1 \quad (4.29)$$

$$\frac{d\sigma}{dP} = \sigma' = 3AP^2 + 2BP + C \quad (4.30)$$

$$\Gamma\iota\alpha P = 0 \rightarrow \sigma' = 0, \& C = 0 \quad (4.31)$$

$$\Gamma\iota\alpha P = 1 \rightarrow \sigma' = 0 \quad (4.32)$$

$$3A + 2B + C = 0 \quad (4.33)$$

Από (2),(4) →

$$-3A - 3B - 3D = -3\sigma_1 \quad (4.34)$$

$$3A + 2B = 0 \quad (4.35)$$

$$-B - ED = -3\sigma_1 \rightarrow B = 3\sigma_1 - 3D \quad (4.36)$$

$$= 3\sigma_1 - 3\sigma_0 = 3(\sigma_1 - \sigma_0) \quad (4.37)$$

$$\text{Άρα } 3A + 2(3\sigma_1 - 3\sigma_0) = 0 \rightarrow \quad (4.38)$$

$$A = \frac{2}{3}(3\sigma_1 - 3\sigma_0) = 2(\sigma_0 - \sigma_1) \quad (4.39)$$

Αντικαθιστώντας έχω:

$$\sigma(P) = 2(\sigma_0 - \sigma_1)P^3 + (3\sigma_1 - 3\sigma_0)P^2 + \sigma_0 \quad (4.40)$$

$$= 2(\sigma_0 - \sigma_1)P^3 - 3(\sigma_0 - \sigma_1)P^2 + \sigma_0 \quad (4.41)$$

$$\sigma(P) = P^2(\sigma_0 - \sigma_1)(2P - 3) + \sigma_0 \quad (4.42)$$

# Πειραματική διαδικασία με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων - συσκευές

## 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται λεπτομερής παρουσίαση του πειράματος με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων, οι μηχανές και τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, τα υπό εξέταση δοκίμια και ο τρόπος παρασκευής τους. Γίνεται λεπτομερής αναφορά στον τρόπο διεξαγωγής του πειράματος καθώς και στον τρόπο λήψης των μετρήσεων. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπό μορφή συγκεντρωτικών πινάκων και διαγραμμάτων για την ευκολότερη ανάγνωσή τους. Το κεφάλαιο κλείνει με τα συμπεράσματα του πειράματος.

## 5.2 Περιγραφή πειραματικών δεδομένων

Η πειραματική μελέτη για τον προσδιορισμό των μηχανικών ελαστικών σταθερών έγινε με τη βοήθεια της υπερηχητικής μεθόδου και με πειράματα εφελκυσμού. Επίσης, έγιναν πειράματα για την εκτίμηση της μηχανικής φθοράς.

### 5.2.1 Χρησιμοποιούμενα δοκίμια

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτήν την εργασία κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του ΕΜΠ και έχουν υποστεί φυσική γήρανση περίπου 30 ετών. Αποτελούνται από σύστημα εποξειδικής ρητίνης-σκληρυντή καθώς και πλαστικοποιητή σε αναλογία 0,5,10,20,30 και 40p.h.r.

### 5.2.2 Πειραματική διαδικασία

Σε πρώτη φάση έγιναν μετρήσεις σε απλά και σύνθετα δοκίμια με τη μέθοδο των υπερήχων για τον προσδιορισμό των ελαστικών τους σταθερών. Ο πίνακας μετρήσεων ενός μέρους αυτών των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν και στη συνέχεια της εργασίας, υπάρχει στο επόμενο κεφάλαιο (5.1). Σε αυτή τη φάση χρησιμοποιήθηκε ο υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών USIP-11. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν πέντε δοκίμια που περιείχαν πλαστικοποιητή σε διαφορετικές αναλογίες (0%,5%,10%,30% & 40%). Τα δοκίμια αυτά καταπονήθηκαν σε εφελκυσμό και κατασκευάστηκε το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ώστε να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας  $E$  και η τάση θραύσης τους  $\sigma_f$ . Η δοκιμή έγινε σε συνθήκες περιβάλλοντος.

### 5.3 Υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών USIP-11

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τον προσδιορισμό των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων και κατ' επέκταση των ελαστικών σταθερών  $E$ ,  $\nu$  και  $G$  χρησιμοποιήθηκε ο υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών **USIP-11 (ultrasonic flaw detector)** της εταιρίας Krautkramer Γερμανίας. Είναι ένας ανιχνευτής γενικής χρήσης, με μεγάλη οθόνη, που κυρίως προορίζεται για εργαστηριακή χρήση. Το όργανο αυτό είναι κατάλληλο για ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών χρήσεων, και είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να ικανοποιεί σχεδόν οποιοσδήποτε συνθήκες πειραματικών δοκιμών. Η υπερηχητική συσκευή USIP 11 (**Εικόνα 5.1**) είναι γερμανικής προέλευσης και κατασκευάζεται από την εταιρία KRAUTKRAMER.



**Εικόνα 5.1** Υπερηχητική συσκευή USIP 11

Οι κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν, καθέτου δέσμης και γωνιακής δέσμης είναι τις ίδιες εταιρίας. Οι κεφαλές αυτές συνδέονται με τη συσκευή μέσω κατάλληλου καλωδίου. Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι πριν γίνει οποιαδήποτε μέτρηση, πρέπει να γίνει βαθμονόμηση της συσκευής. Έχει μεγάλο εύρος συχνοτήτων, που χωρίζονται σε τέσσερις περιοχές. Έχει δυνατότητα να συνδέεται με υπερηχητικές κεφαλές συχνοτήτων από 0,5 έως 25 MHz. Έχει επίσης τη δυνατότητα να υπολογίζει ατέλειες που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος. Οι δυνατότητες μέτρησης αρχίζουν από 5mm και φθάνουν τα 15m (σε χάλυβα, χρησιμοποιώντας διαμήκη κύματα). Η συσκευή USIP-11 είναι εξαιρετικά αξιόπιστη και ακριβής. Χρησιμοποιείται κυρίως για πειραματικούς σκοπούς, καθώς και στην εκπαίδευση. Η συσκευή είναι επιτραπέζια και παρόλο που δεν περιλαμβάνεται στις φορητές, μπορεί να μεταφέρεται εύκολα λόγω του μικρού της βάρους και των μικρών διαστάσεών της, προκειμένου να γίνουν μετρήσεις επιτόπου. Η συσκευή έχει τέσσερις περιοχές συχνοτήτων (0.5-2.5, 2-8, 10-15, 20-25 MHz) κάτι που της δίνει

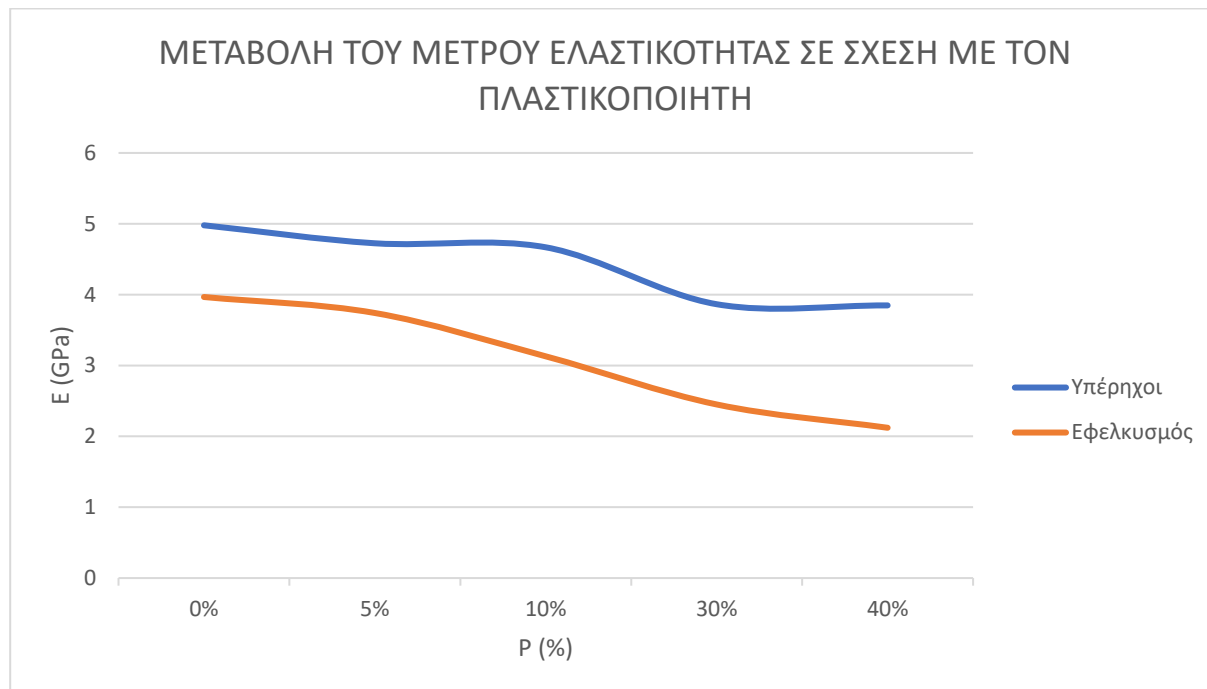
τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται για μετρήσεις σε πολλά διαφορετικά υλικά, αλλά και ταυτόχρονα να παρέχει υψηλή διακριτικότητα ατελειών, όταν εξετάζονται εξαρτήματα υψηλών απαιτήσεων (στις υψηλές συχνότητες). Άλλες δυνατότητες της συσκευής είναι η μεγέθυνση κλίμακας, η χρήση με εμβαπτιζόμενες κεφαλές, η τεκμηρίωση των μετρήσεων με τη βοήθεια ενός ξεχωριστού εξαρτήματος που προσαρμόζεται στη συσκευή και φωτογραφίζει την οθόνη, η ανίχνευση ατελειών με τα διαγράμματα DGS, η ρύθμιση του πλάτους των παλμών, η εξάλειψη του “θορύβου” που προέρχεται από ηχώ σημάτων που ανακλώνται σε “ακατάστατους” κρυστάλλους του υλικού κ.ά. Τέλος, εκτός από την ανίχνευση ατελειών, η συσκευή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των διαμήκων και εγκάρσιων υπερηχητικών κυμάτων, προκειμένου να υπολογισθούν στη συνέχεια οι διάφορες σταθερές του υλικού, όπως το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , ο λόγος Poisson  $\nu$  και το μέτρο διάτμησης  $G$ .

#### 5.4 Μέθοδος των υπερήχων

Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 5.2**) φαίνονται τα αποτελέσματα μετρήσεων σε διάφορα δοκίμια από εποξειδική ρητίνη. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται ο αριθμός του δοκιμίου, στη δεύτερη το ποσοστό πλαστικοποιητή που περιέχει και στις τρεις τελευταίες οι ελαστικές σταθερές των δοκιμίων μετά από χρήση των γνωστών τύπων. (**Κεφ.2**) (I.N. Πρασιανάκης, 1993)

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΛΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΤΗΣ	$c_l$ (m/sec)	$c_t$ (m/sec)	E (MPa)	$\nu$	G (MPa)
1	0%	2690	1244	4987	0.364	1828
2	0%	2693	1241	4971	0.365	1821
3	5%	2664	1217	4816	0.368	1760
4	5%	2664	1233	4925	0.364	1806
5	10%	2650	1204	4740	0.370	1730
6	10%	2650	1204	4740	0.370	1730
7	10%	2633	1183	4588	0.374	1670
8	10%	2650	1194	4676	0.372	1703
9	30%	2548	1064	3865	0.394	1386
10	40%	2523	1054	3848	0.394	1380
11	45%	2501	1047	3829	0.394	1373

**Πίνακας 5.2**



**Διάγραμμα 5.3** Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας  $E$  σε σχέση με το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$

### 5.5 Εξάρτηση των ελαστικών σταθερών από τη θερμοκρασία

Όταν ξεκίνησε η διπλωματική αυτή εργασία, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίαζε η μελέτη των ελαστικών σταθερών στις εποξειδικές ρητίνες. Αυτό διότι οι εποξειδικές ρητίνες είναι βισκοελαστικά υλικά και με βάση την αντίστοιχη θεωρία αναμενόταν αξιοσημείωτη μεταβολή των σταθερών συναρτήσει της θερμοκρασίας (όπως και συναρτήσει της συχνότητας). Η εκπόνηση της εργασίας έγινε στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από εποξειδικές ρητίνες με διαφορετική περιεκτικότητα σε πλαστικοποιητή και έχουν ονομασίες C-108, C-120, C-148. Η εποξειδική ρητίνη C-120 σημαίνει ότι σε 100 γραμμάρια (gr) εποξειδικής ρητίνης υπάρχουν 20 γραμμάρια (gr) πλαστικοποιητού. Αυτή καλείται για συντομία και εποξειδική ρητίνη 20% ή  $P = 20\%$ . Δηλαδή, σε οποιαδήποτε σύνθεση δηλώνεται ότι σε 100 γραμμάρια (gr) εποξειδικής ρητίνης υπάρχουν τόσα γραμμάρια πλαστικοποιητή όσος είναι ο δεύτερος αριθμός ή το σύμβολο  $P$  και  $x$  γραμμάρια (gr) σκληρυντή. Η μέτρηση για τον υπολογισμό της ταχύτητας των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων, έγινε με κεφαλές καθέτου δέσμης διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής Υλικών συχνότητας 2MHz. Οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 20°C–80°C. Αυτό γιατί οι κεφαλές που χρησιμοποιήσαμε και που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής Υλικών δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 90°C, διότι υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του κρυστάλλου. Επίσης, η μέτρηση για τον υπολογισμό της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων έγινε με μεγαλύτερη ευκολία απ' ό,τι για την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων. Τα εγκάρσια κύματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόσβεση απ' ό,τι τα διαμήκη. Είναι, πολλές φορές, αδύνατη η μέτρηση της απόσβεσης των εγκάρσιων κυμάτων καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει. Συγκεκριμένα, για  $P > 40\%$  η μέτρηση απόσβεσης  $\alpha_t$  ήταν σχεδόν αδύνατη, αφού η ένδειξη στην οθόνη της υπερηχητικής

συσκευής ήταν λιγότερο έντονη από εκείνη των διαμήκων κυμάτων. Ακόμη ο υπολογισμός της απόσβεσης των εγκάρσιων κυμάτων δεν ήταν εφικτός λόγω της μεγάλης απόσβεσης με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται δεύτερη ηχώ (απαραίτητη για τον υπολογισμό της απόσβεσης). Γι' αυτό το λόγο στους πίνακες που θα δοθούν πιο κάτω η απόσβεση των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων δεν έχουν υπολογισθεί, επίσης σε μερικές θερμοκρασίες δεν έχουμε πάρει ένδειξη κυρίως με κεφαλή εγκάρσιων κυμάτων. Γνωρίζουμε όμως, ότι η απόσβεση  $\alpha_t$  και  $\alpha_l$  αυξάνει γραμμικά καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει (Ε. Κοντού, 1985). Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων και κατόπιν δυναμικών ελαστικών σταθερών  $E'$ ,  $G'$ ,  $\nu'$  σε θερμοκρασίες από 20°C έως 80°C, χρησιμοποιήθηκε ένας κλίβανος που διαθέτει το Εργαστήριο Αντοχής Υλικών. Όπως είπαμε, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τρία (3) εποξειδικών ρητινών (C-108, C-120, C-148), ένα δοκίμιο από plexiglass και ένα από αλουμίνιο. Μετά από βαθμονόμηση της υπερηχητικής συσκευής, στα δοκίμια αρχικά υπολογίσαμε, από τις ενδείξεις που πήραμε σε συνθήκες περιβάλλοντος ( $\approx 20^\circ\text{C}$ ) τις ταχύτητες των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων. Τα δοκίμια φέρουν εγκοπή (όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6), για την τοποθέτηση ηλεκτρικού θερμομέτρου με σκοπό να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία του δοκιμίου που μας ενδιαφέρει. Τοποθετούμε τα δοκίμια μέσα στον κλίβανο και τον ρυθμίζουμε σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 40°C που θέλουμε να πετύχουμε. Αφήνουμε τα δοκίμια για αρκετή ώρα, μέχρις ότου πάρουν την επιθυμητή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της αναμονής έχει βαθμονομηθεί η συσκευή μας. Πρώτα έγιναν οι μετρήσεις με κεφαλή καθέτου δέσμης διαμήκων κυμάτων. Αφού τα δοκίμια πάρουν τη θερμοκρασία που θέλουμε, τα βγάζουμε ένα-ένα και γίνεται η αντίστοιχη μέτρηση. Στη συνέχεια τοποθετούνται ξανά μέσα στον κλίβανο και περιμένουμε να πάρουν την επόμενη επιθυμητή θερμοκρασία (60°C) Η ίδια διαδικασία αλλά ανάποδα, δηλαδή από τη θερμοκρασία των 80°C σε 20°C, εφαρμόζεται και για την κεφαλή καθέτου δέσμης εγκάρσιων κυμάτων. Η όλη διαδικασία παρουσιάζεται εύκολη, αλλά χρειάστηκε μεγάλη προετοιμασία και επανάληψη του πειράματος αρκετές φορές. Χρειάστηκαν αρκετές ώρες δουλειάς καθώς και η βοήθεια ενός δεύτερου ατόμου. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, οι κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (60-80°C) μπορούν να παραμείνουν στο δοκίμιο μόνο για λίγα λεπτά (min) έως μερικά δευτερόλεπτα (5sec). Έτσι στις μετρήσεις για τον υπολογισμό της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων  $c_t$  εξ' αιτίας της μεγάλης απόσβεσης αντιμετωπίσαμε προβλήματα λόγω του χρόνου που απαιτούσε για να δοθεί η πρώτη ένδειξη στην οθόνη της συσκευής. Μετά από αρκετές επαναλήψεις πήραμε τις ενδείξεις στις θερμοκρασίες 20-80°C και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι ταχύτητες εγκάρσιων  $c_t$  και διαμήκων  $c_l$  τα οποία αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8 και με βάση τα αποτελέσματα αυτά σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα 5.6 και 5.7 από τα οποία παρατηρούμε τα εξής:

- Η ταχύτητα των διαμήκων  $c_l$  και εγκάρσιων  $c_t$  κυμάτων μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνει και καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει.

Στα **Διαγράμματα 5.11-5.15** απεικονίζονται οι μεταβολές των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων  $c_l$  και  $c_t$  συναρτήσει των πέντε υλικών. Στον **Πίνακα 5.10** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των δυναμικών ελαστικών σταθερών  $E'$ ,  $G'$ ,  $\nu'$  για τα διάφορα δοκίμια στις διάφορες θερμοκρασίες, με βάση το τυπολόγιο της **παραγράφου 2.2** Στον πίνακα αυτόν που προέκυψε από τα αποτελέσματα αυτού, παρατηρούμε τα εξής:



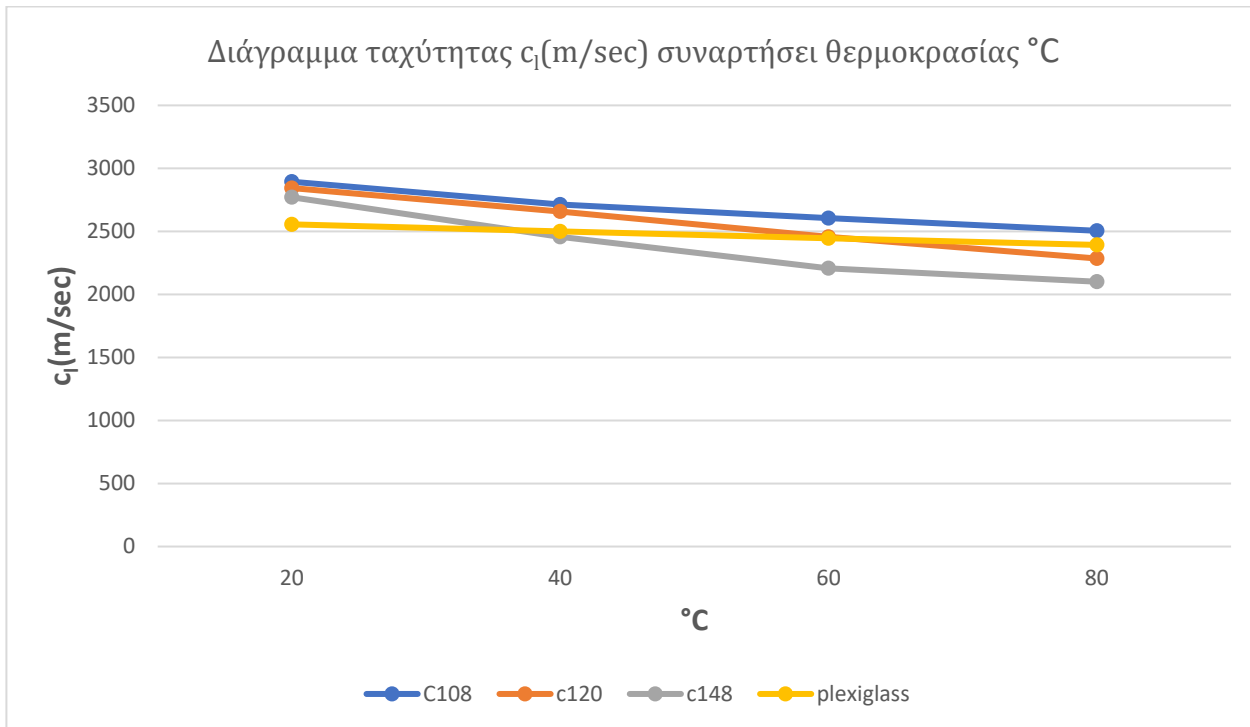
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας  $E'$  και διάτμησης  $G'$  μειώνονται.
- Ο λόγος Poisson  $\nu'$ , αυξάνει όσο αυξάνει η θερμοκρασία φθάνοντας σε μια οριακή τιμή.

**Πίνακας 5.9**

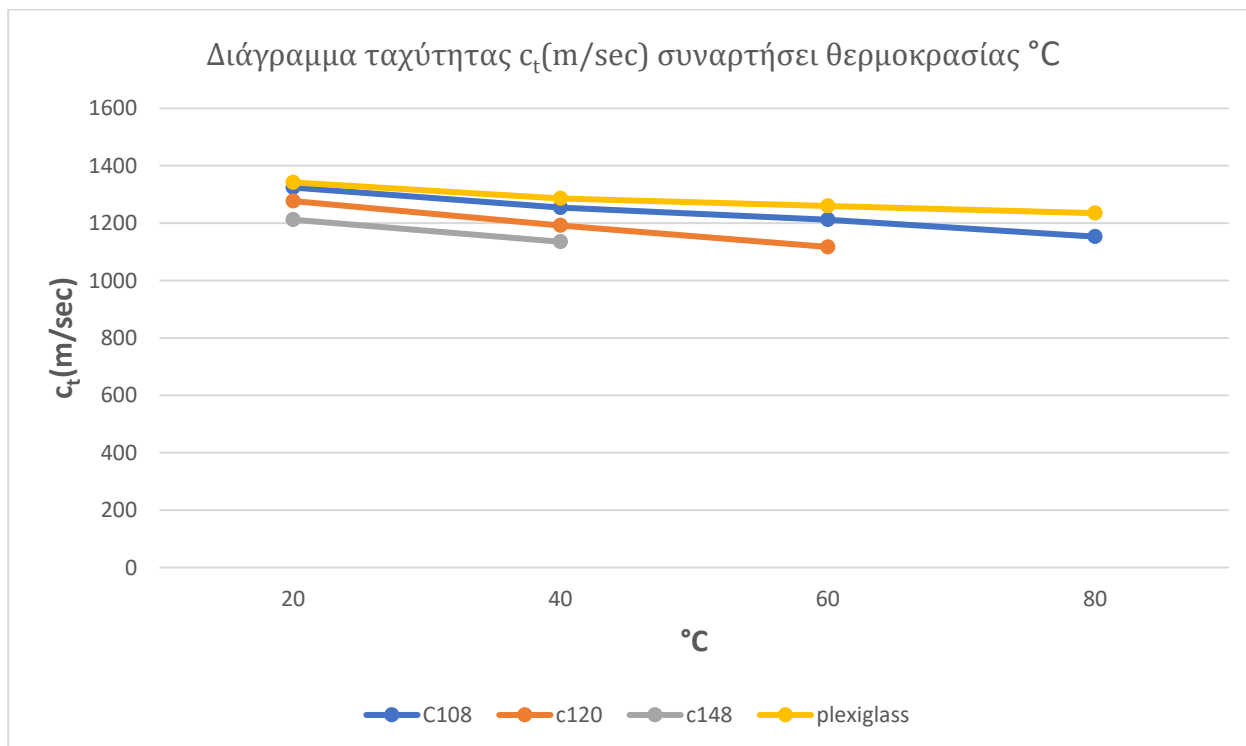
$T^{\circ}\text{C}$	Υλικό	C-108	C-120	C-148	Plexiglas	aluminium
20°C	$C_l$ (m/sec)	2894	2844	2771	2556	6232
	$C_t$ (m/sec)	1324	1277	1212	1342	3824
40°C	$C_l$ (m/sec)	2713	2658	2457	2500	6232
	$C_t$ (m/sec)	1254	1192	1135	1286	3824
60°C	$C_l$ (m/sec)	2605	2457	2207	2445	6232
	$C_t$ (m/sec)	1212	1117	-	1260	3824
80°C	$C_l$ (m/sec)	2505	2285	2101	2393	6232
	$C_t$ (m/sec)	1153	-	-	1235	3824

**Πίνακας 5.10** Υπολογισμός των ελαστικών σταθερών  $E'$ ,  $G'$ ,  $\nu'$ .

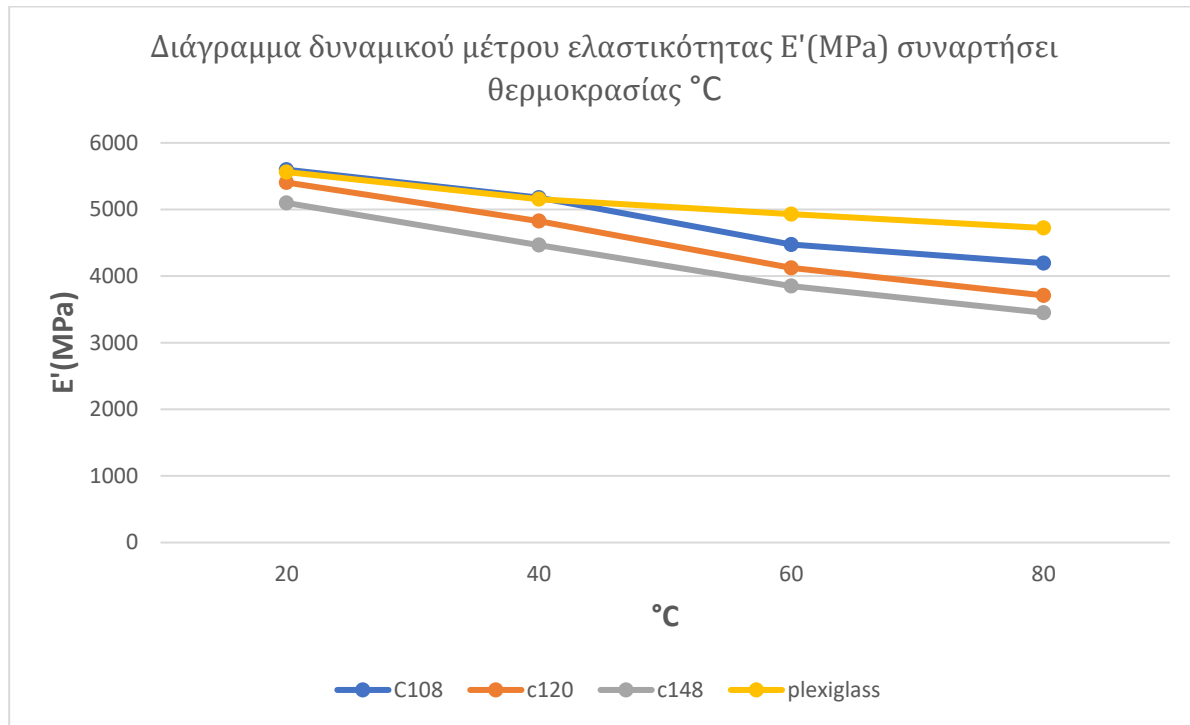
$T^{\circ}\text{C}$	Υλικό	C-108	C-120	C-148	Plexiglas	aluminium
<b>20°C</b>	$E'$ (MPa)	5597	5405	5098	5562	94376
	$G'$ (MPa)	2072	1970	1826	2125	39482
	$\nu'$	0.37	0.38	0.38	0.31	0.2
<b>40°C</b>	$E'$ (MPa)	5177	4825	4465	5154	94376
	$G'$ (MPa)	1859	1716	1601	1952	39482
	$\nu'$	0.36	0.37	0.36	0.32	0.2
<b>60°C</b>	$E'$ (MPa)	4473	4123	3850	4930	94376
	$G'$ (MPa)	1736	1507	1830	1873	39482
	$\nu'$	0.36	0.37	-	0.32	0.2
<b>80°C</b>	$E'$ (MPa)	4194	3710	3450	4722	94376
	$G'$ (MPa)	1571	1810	1620	1800	39482
	$\nu'$	0.37	-	-	0.32	0.2



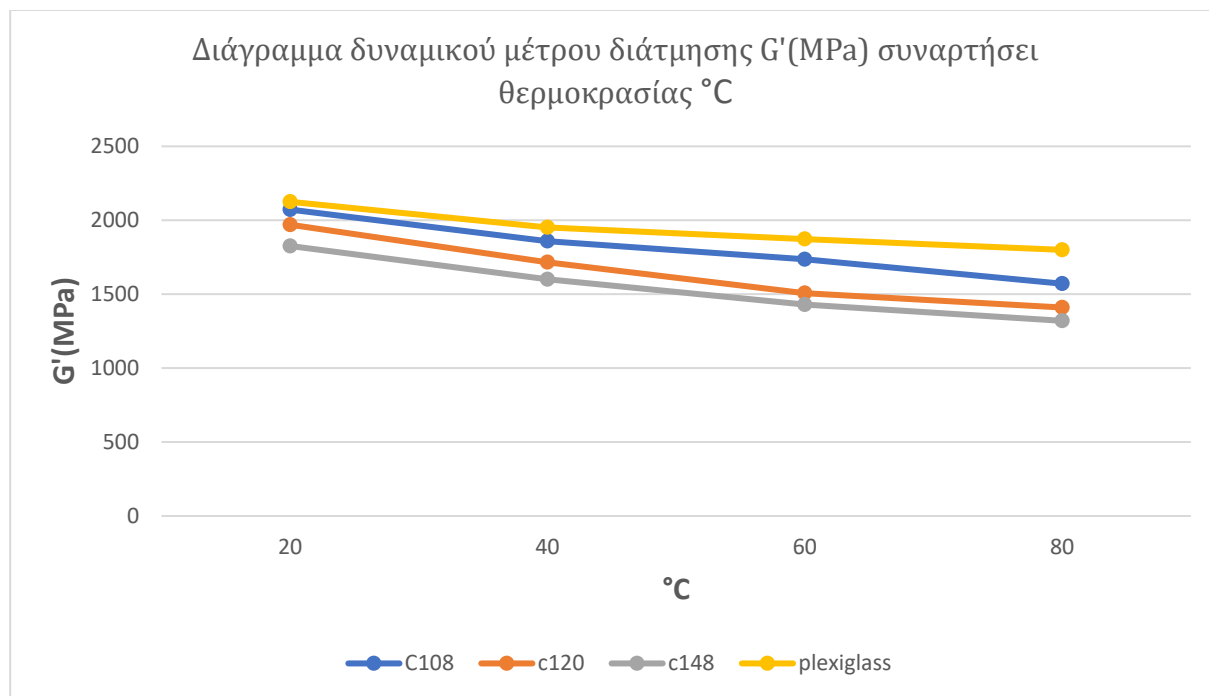
**Διάγραμμα 5.11** Μεταβολή ταχύτητας  $c_l$ (m/sec) συναρτήσει θερμοκρασίας για όλα τα υλικά



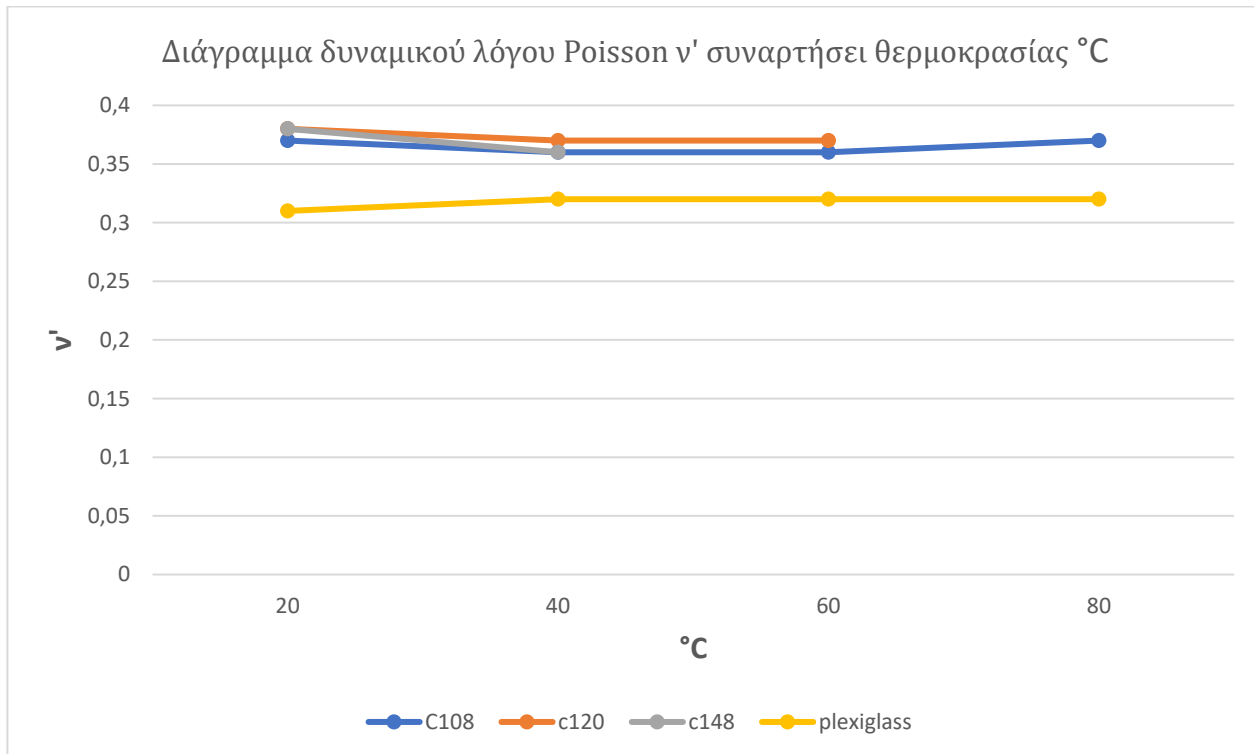
**Διάγραμμα 5.12** Μεταβολή ταχύτητας  $c_t$ (m/sec) συναρτήσει θερμοκρασίας για όλα τα υλικά



**Διάγραμμα 5.13** Μεταβολή δυναμικού μέτρου ελαστικότητας  $E'$  (MPa) συναρτήσει θερμοκρασίας



**Διάγραμμα 5.14** Μεταβολή δυναμικού μέτρου διάτμησης  $G'$  (MPa) συναρτήσει θερμοκρασίας



**Διάγραμμα 5.15** Μεταβολή δυναμικού λόγου Poisson  $\nu'$  συναρτήσει θερμοκρασίας

## 5.6 Συμπεράσματα

Στους Πίνακες 5.9 και 5.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής, βασισμένα στην αντίστοιχη θεωρία. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων. Από τους παραπάνω Πίνακες παρατηρούμε τα εξής:

1. Τα εγκάρσια κύματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόσβεση απ' ό,τι τα διαμήκη κύματα. Είναι πολλές φορές αδύνατη η μέτρηση της απόσβεσης των εγκάρσιων κυμάτων καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει. Συγκεκριμένα για  $P > 40\%$  η μέτρηση της απόσβεσης των εγκάρσιων κυμάτων είναι σχεδόν αδύνατη.
2. Η ταχύτητα των διαμήκων  $c_l$  καθώς και εγκάρσιων κυμάτων  $c_t$  μειώνεται καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει. Η μείωση αυτή δεν είναι γραμμική. Επίσης από όλες τις ακουστικές ποσότητες των εποξειδικών ρητινών η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων  $c_l$  είναι μεγαλύτερης ακρίβειας και περισσότερο απλή από τις άλλες ποσότητες.
3. Στις εποξειδικές ρητίνες οι ταχύτητες διάδοσης τόσο των διαμήκων  $c_l$  όσο και των εγκάρσιων  $c_t$  κυμάτων, όταν αυτά διέρχονται μέσα από ένα σώμα, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας σε  $\omega = \text{σταθερό}$ .
4. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας  $E'$  μειώνεται καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει και επίσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας [ $E' = f(T^{\circ}\text{C})$ ]. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη βισκοελαστική τους συμπεριφορά και στους σύντομους χρόνους χαλάρωσης (μεγάλες θερμοκρασίες,  $T_0$ ) με αποτέλεσμα τα στοιχειώδη σωματίδια να προλαβαίνουν να επιστρέφουν στη θέση ισορροπίας στο μικρό χρόνο που γίνεται η μέτρηση.

5. Με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και με την αύξηση του ποσοστού του πλαστικοποιητή  $P$ , το δυναμικό μέτρο διάτμησης  $G'$  μειώνεται [ $G' = f(T^{\circ}\text{C})$ ].
6. Με βάση την αντίστοιχη θεωρία κατά την οποία, μία μείωση στη συχνότητα και μια αύξηση στη θερμοκρασία επιδρά στις ακουστικές ιδιότητες των πολυμερών με τον ίδιο τρόπο, παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα συναρτήσεως της συχνότητας είναι αντικατοπτρικά μ' εκείνα συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

Έτσι γνωρίζοντας τη μορφή του διαγράμματος του δυναμικού λόγου Poisson  $\nu'$  συναρτήσεως της συχνότητας, προέκυψε η μορφή του διαγράμματος του  $\nu'$  συναρτήσεως της θερμοκρασίας. Αυτό γιατί οι μετρήσεις δεν ήταν αρκετές για να μας δώσουν την ακριβή μορφή του διαγράμματος [ $\nu' = f(T^{\circ}\text{C})$ ]. Με βάση το διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι ο δυναμικός λόγος Poisson  $\nu'$  αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας, φθάνοντας σε μια οριακή τιμή. Επίσης ο λόγος Poisson παρουσιάζει μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία για όλα τα υλικά.

7. Ειδικότερα, για το Plexiglass παρατηρούμε επίσης ότι για τις εποξειδικές ρητίνες:
  - a. Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται τόσο η ταχύτητα των διαμήκων  $c_l$  όσο και των εγκάρσιων  $c_t$  κυμάτων.
  - b. Μείωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας  $E'$  και διάτμησης με την αύξηση της θερμοκρασίας.
  - c. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει ο δυναμικός λόγος Poisson  $\nu'$  αυξάνει φθάνοντας σε μια οριακή τιμή [ $\nu_{\text{οριακή}} = 0,32$ ]. Παρατηρούμε γενικά, ότι οι μεταβολές στα παραπάνω μεγέθη δεν είναι αξιοσημείωτες σε θερμοκρασίες  $20^{\circ}\text{C}$ – $80^{\circ}\text{C}$ , για το Plexiglass λόγω της λιγότερο έντονης βισκοελαστικής του συμπεριφοράς συγκριτικά με τις εποξειδικές ρητίνες.

Τα υλικά εκείνα που η συμπεριφορά τους είναι ελαστική και μπορεί να εξομοιωθεί με τη συμπεριφορά του ελατηρίου, ονομάζονται ελαστικά. Βέβαια στην πραγματικότητα ιδανικά ελαστικά στερεά σώματα δεν υπάρχουν. Όλα τα στερεά έχουν μαζί ελαστικές και ιξώδεις ιδιότητες μέχρι ένα ορισμένο μέγεθος. Η ιξώδης συμπεριφορά όμως σε κάποια από αυτά εκδηλώνεται τόσο αδύναμα, ώστε πρακτικά αυτά τα υλικά να θεωρούνται ιδανικά ελαστικά. Ένα τέτοιο υλικό είναι το αλουμίνιο. Στο αλουμίνιο έγιναν οι ίδιες μετρήσεις που έγιναν και για τα άλλα υλικά τα οποία εμφανίζουν μαζί με την ελαστική συμπεριφορά, σε σημαντικό βαθμό με την ιξώδη (βισκοελαστικά υλικά). Έτσι σύμφωνα με την αντίστοιχη θεωρία, στα υλικά αυτά (όπως το αλουμίνιο), όπου ο χρόνος χαλάρωσης  $t = 0$ , η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων (διαμήκων  $c_l$  και εγκάρσιων  $c_t$ ) είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Οι δυναμικές σταθερές  $E'$ ,  $G'$  και  $\nu'$  παραμένουν αμετάβλητες με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για το αλουμίνιο προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τη μεταβολή της θερμοκρασίας από  $20^{\circ}\text{C}$ – $80^{\circ}\text{C}$  ( $\omega$ =σταθερά)

$$E'_{\text{αλουμ.}} = 94,376 \text{ GPa}$$

$$G'_{\text{αλουμ.}} = 39,482 \text{ GPa}$$

$$\nu'_{\text{αλουμ.}} = 0,2$$

οι οποίες είναι αρκετά διαφορετικές από τις στατικές τιμές.

# Εσωτερική μηχανική φθορά

## 6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται επεξήγηση στο μέγεθος «εσωτερική φθορά» (damage) των υλικών, στη χρησιμότητά του και την άμεση σχέση με το μέτρο ελαστικότητας των υλικών. Παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της. Το κεφάλαιο κλείνει με τα αποτελέσματα από τα πειράματα που προηγήθηκαν σε μορφή διαγραμμάτων.

Η εσωτερική μηχανική φθορά  $D$  είναι ένα μέγεθος που συνδέεται με την έννοια της καταπόνησης. Ορίζεται ως ιδιότητα εκείνη κατά την οποία η αντοχή των υλικών μειώνεται μέχρι την αστοχία. Αυτό οφείλεται κυρίως στη δημιουργία και ανάπτυξη ατελειών στα στερεά υλικά όπως μικρορωγμών (micro-cracks) ή μικροκοιλιοτήτων (micro-cavities), θραύση αλυσίδων στα πολυμερή κ.ά. Υπάρχουν επίσης διάφορα είδη εσωτερικής φθοράς εξαρτώμενα από τον μηχανισμό φόρτισης όπως όγκιμη, ερπυσμού και κόπωσης. Ο κλασικός ορισμός της παραμέτρου της εσωτερικής φθοράς είναι (Chi-Hung Shen and G.S. Springer, vol10):

$$D = \frac{\delta S_0}{\delta S} \quad (6.1)$$

όπου  $\delta S_0$  το τμήμα της διατομής που καταλαμβάνεται από ατέλειες και  $\delta S$  η συνολική διατομή. Η τιμή  $D = 0$  αναφέρεται στο αρχικό υλικό (ακαταπόνητο) ενώ η τιμή  $D = 1$  σε υλικό που έχει αστοχήσει. Με βάση τον ορισμό αυτό της εσωτερικής μηχανικής φθοράς μπορεί να προκύψουν διάφορες σχέσεις προσδιορισμού της. Υπολογισμός του damage είναι δυνατόν να γίνει μέσω του μέτρου ελαστικότητας, του ρυθμού διάχυσης, της ηλεκτρικής αντίστασης, των υπερηχητικών κυμάτων κ.ά. Η συνηθέστερη μέθοδος στηρίζεται στον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας. Από τον νόμο του Hooke έχουμε:

$$\sigma = Ee \quad (6.2)$$

όμως

$$\sigma = \frac{\sigma'}{(1 - D)} = Ee \quad (6.3)$$

$$\sigma' = E_0(1 - D)e \quad (6.4)$$

Ο όρος  $E_0(1 - D) = E_1$  μπορεί να θεωρηθεί σαν το νέο μέτρο ελαστικότητας μετά την καταπόνηση. Αφού λοιπόν γνωρίζουμε το καινούριο μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  (μετά την καταπόνηση) μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μηχανική φθορά από τον τύπο:

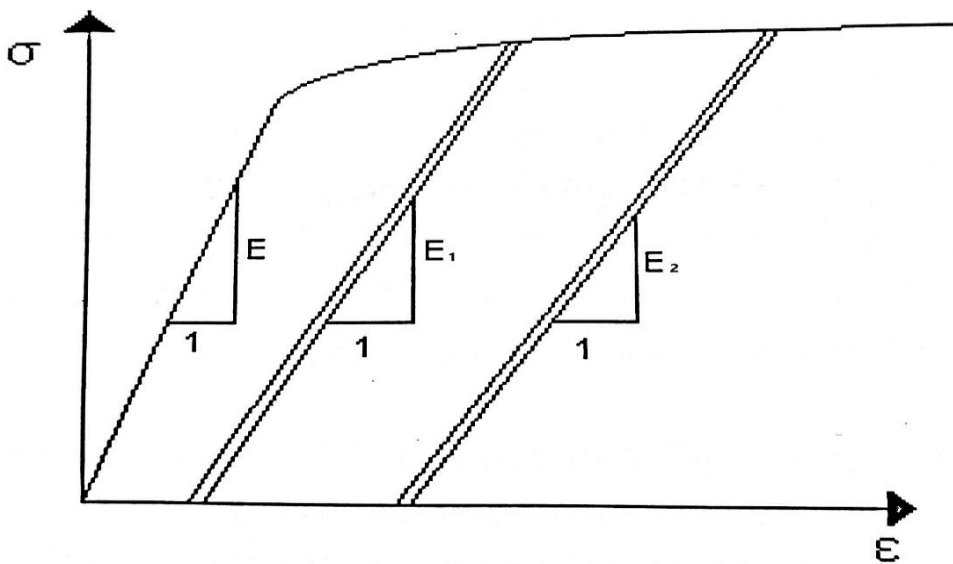
$$D_0 = \frac{1 - E_1}{E_0} \quad (6.5)$$

Α η καταπόνηση συνεχιστεί, η νέα μηχανική φθορά θα υπολογιστεί από τον τύπο:

$$D_1 = \frac{1 - E_2}{E_1} \quad (6.6)$$

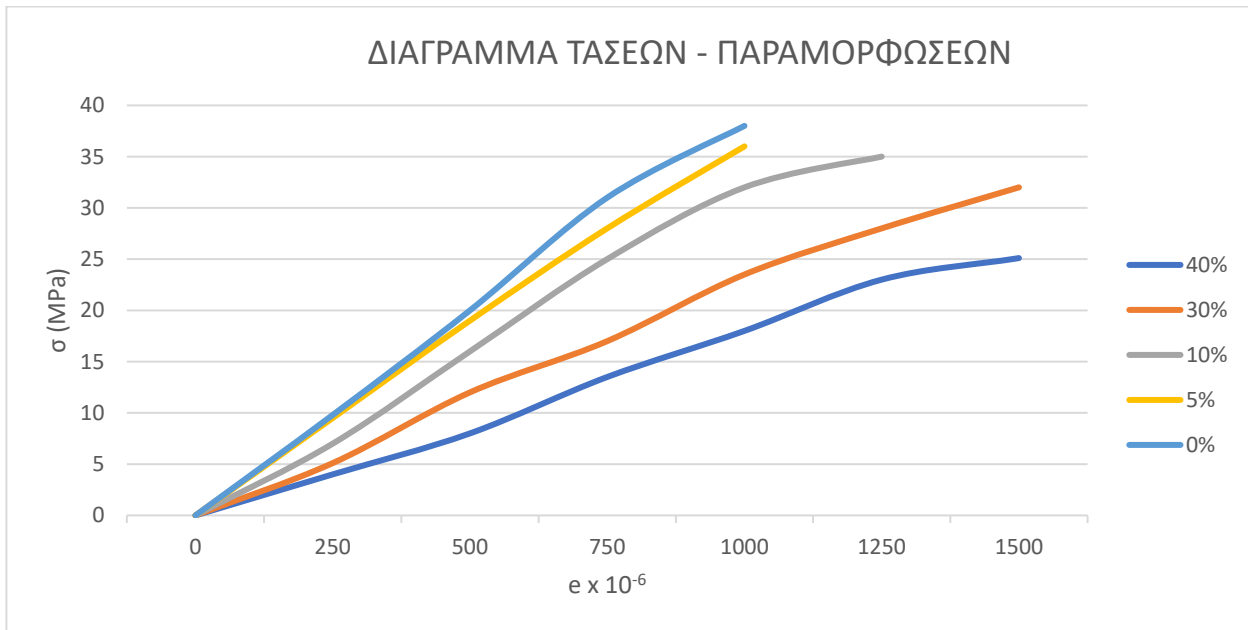
$$D_2 = \frac{1 - E_3}{E_2} \quad (6.7)$$

,όπου  $E_2, E_3$  τα νέα μέτρα ελαστικότητας μετά από κάθε καταπόνηση. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Έτσι, γνωρίζουμε σε κάθε στάδιο την εσωτερική μηχανική φθορά.

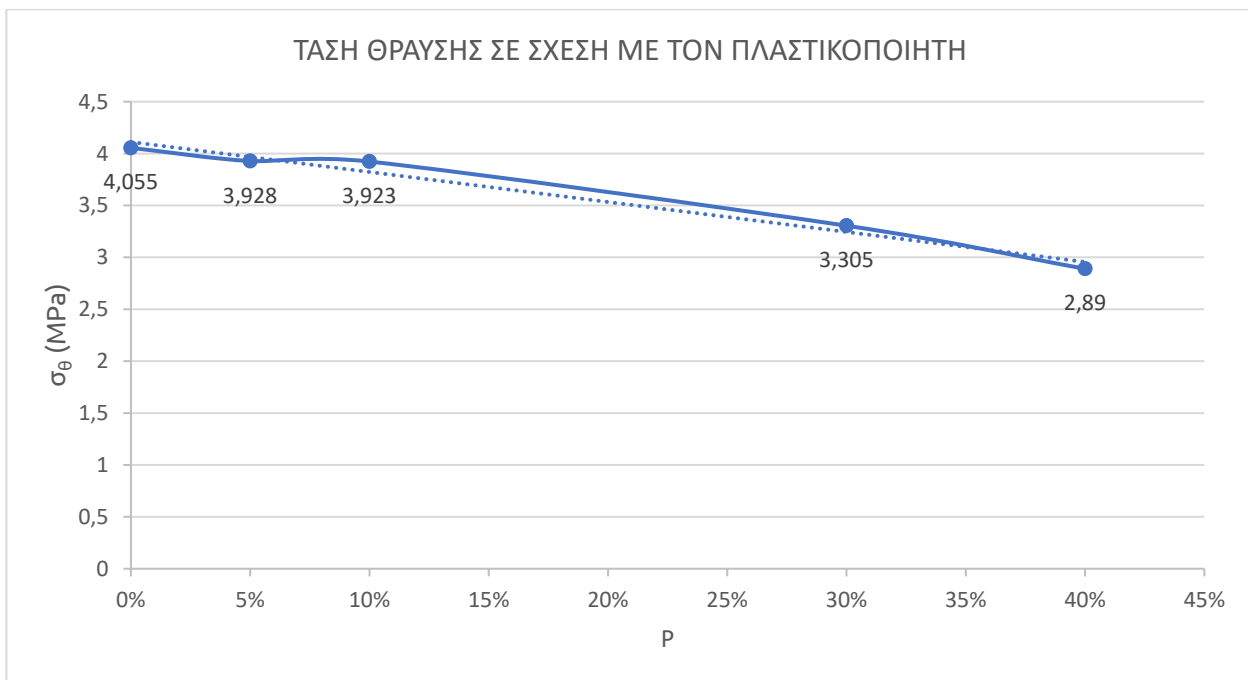


**Εικόνα 6.1** Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων με επαναληπτική φόρτιση-αποφόρτιση.





**Διάγραμμα 6.2** Τάσεων-Παραμορφώσεων ανάλογα με το ποσοστό πλαστικοποιητή



**Διάγραμμα 6.3** Μεταβολή της τάσης θραύσης  $\sigma_{\theta}$  σε σχέση με το ποσοστό πλαστικοποιητή

Προσδιορισμός της εσωτερικής φθοράς μπορεί να γίνει όμως και μέσω της υπερηχητικής μεθόδου. Έτσι, εάν η ταχύτητα των διαμήκων υπερηχητικών ελαστικών κυμάτων, στο υγιές ακαταπόνητο ελεγχόμενο υλικό είναι  $c_{I0}$  και στο ίδιο φθαρμένο υλικό, μετά την επιβολή καταπόνησης, η ίδια ταχύτητα αλλάξει και γίνει  $c_{I1}$ , τότε η εσωτερική φθορά  $D$  του υλικού αποδεικνύεται ότι δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{1 - (\rho c_1)^2}{(\rho_0 c_{10})^2} \quad (6.7)$$

Εάν στο ίδιο υλικό, αντί για την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων θεωρηθεί η μεταβολή του ύψους  $H$  της ηχούς στην CRT-οθόνη, για τις δύο καταστάσεις του υλικού, μη φθαρμένη  $H_1$  και φθαρμένη  $H_2$ , τότε η εσωτερική φθορά  $D$  του υλικού αποδεικνύεται ότι παρέχεται από τη σχέση (I.N. Πρασιανάκης, γ' έκδοση, 1993):

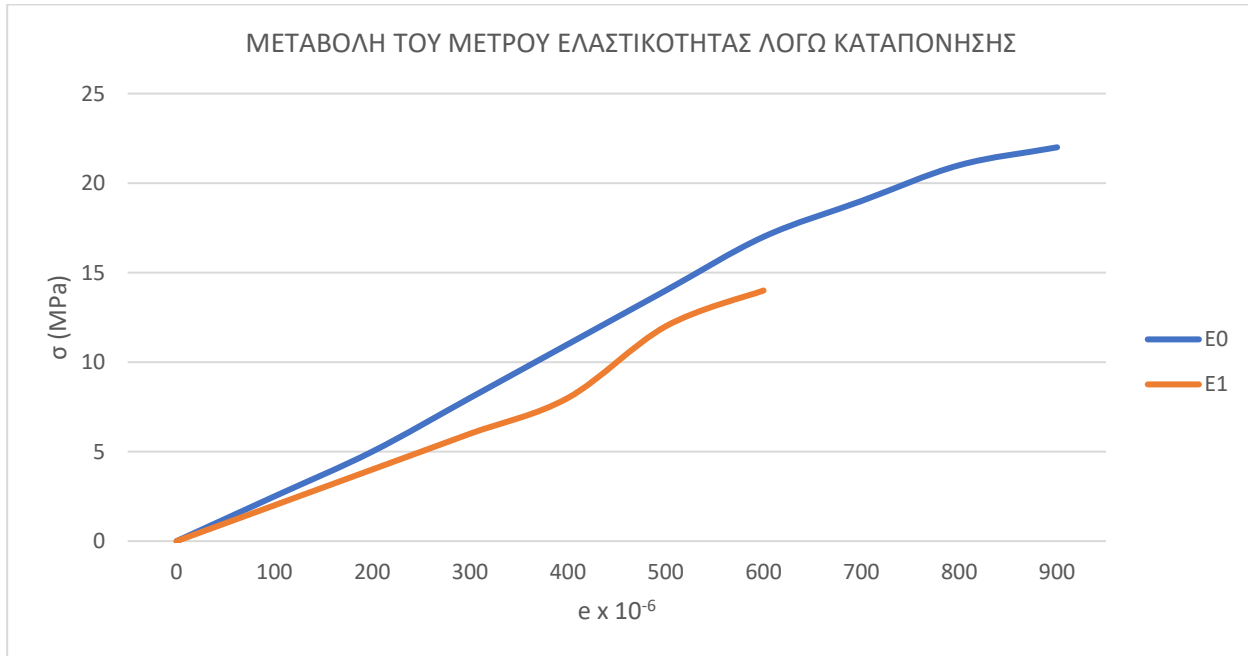
$$D = \frac{1 - H_2}{H_1} \quad (6.8)$$

Όταν  $H_2 = H_1$  (ακαταπόνητο υλικό), τότε  $D = 0$ , ενώ όταν  $H_2 = 0$ , δηλαδή έχει αποχωρισθεί πλήρως το υλικό, τότε  $D = 1$ . Η σχέση αυτή παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της εσωτερικής φθοράς ενός υλικού από τη μεταβολή της ηχητικής αποσβέσεως και είναι περισσότερο ευαίσθητη από τον προσδιορισμό της με την μεταβολή της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων. Η μεγάλη αξία της μεθόδου αυτής, δηλαδή του προσδιορισμού της εσωτερικής φθοράς  $D$  ενός υλικού με την ΜΚΜ των υπερήχων, σε αντίθεση με άλλες γνωστές μεθόδους, οφείλεται στο ότι δεν απαιτούνται δοκίμια ούτε καταστροφικοί έλεγχοι.

## 6.2 Εκτίμηση της εσωτερικής μηχανικής φθοράς (internal damage)

Το δοκίμιο 2 (0% πλαστικοποιητής) καταπονήθηκε σε εφελκυσμό χωρίς να φτάσει μέχρι το σημείο θραύσης του για περίπου 2,5 ώρες. Με την πρώτη αυτή καταπόνηση υπολογίσαμε το μέτρο ελαστικότητας και το οποίο ονομάζουμε  $E_0$ . Το δοκίμιο καταπονήθηκε πάλι σε εφελκυσμό κι έτσι υπολογίσαμε το νέο μέτρο ελαστικότητας  $E_1$ . Οι συνεχείς καταπονήσεις προκαλούν εσωτερική μηχανική φθορά στο δοκίμιο όπως άλλωστε απεικονίζεται στα επόμενα διαγράμματα ( $E_0 > E_1$ ). Στο διάγραμμα 6.3 φαίνονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων όπου διαπιστώνουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας (κλίση της καμπύλης) είναι μειωμένο μετά την καταπόνηση του υλικού.

<b>ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΦΘΟΡΑΣ</b>		
<b>(INTERNAL DAMAGE)</b>		
<b>ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ</b>		
<b><math>E_0</math>(MPa)</b>	<b><math>E_i</math>(MPa)</b>	<b>Damage (<math>D = 1 - E_i / E_0</math>)</b>
2916	2345	<b>0,196</b>



**Διάγραμμα 6.4** Τάσεων-Παραμορφώσεων για δοκίμιο με 0% πλαστικοποιητή

# Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

## 7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται λεπτομερής αναφορά στην υπολογιστική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στη χρησιμότητα της μεθόδου για την επίλυση σύνθετων μηχανολογικών προβλημάτων. Αναφέρεται το πρόγραμμα με το οποίο πραγματοποιήσαμε τη μελέτη (ANSYS) ο τρόπος διεξαγωγής της μελέτης και σχεδιασμού του τεμαχίου. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα που είχαμε συλλέξει προηγουμένως, και στοιχεία των οποίων χρησιμοποιήσαμε και για τη διεξαγωγή της μελέτης με τα πεπερασμένα στοιχεία. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων υπό μορφή συγκεντρωτικών πινάκων και διαγραμμάτων.

## 7.2 Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία

Η μηχανική συμπεριφορά ειδικά των πολυμερών και των σύνθετων υλικών είναι πολύπλοκο να λυθεί σε μία κλειστή μορφή. Η χρήση αριθμητικών μεθόδων επιτρέπει την προσέγγιση των λύσεων των εξισώσεων σε τυχαίες γεωμετρίες, με σημαντικότερη τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα δημοφιλής κυρίως για τρεις λόγους. Πρώτον, λόγω της μεγάλης γενικότητας και αποτελεσματικότητάς της, δηλαδή της δυνατότητας που παρέχει για επίλυση με ικανοποιητική ακρίβεια προβλημάτων από πολλές διαφορετικές περιοχές της μαθηματικής φυσικής και των τεχνολογικών εφαρμογών. Δεύτερον, λόγω της σχετικής απλότητας στην ανάπτυξή της (στη βασική της διατύπωση) καθώς μπορεί να χωριστεί σε μια αλληλουχία από λογικά βήματα και τρίτον, στη δυνατότητα εισαγωγής των προαναφερθέντων «βημάτων» σε κάποιο πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή με αποτέλεσμα την ταχύτατη επίλυση ενός ευρέος φάσματος προβλημάτων απλώς αλλάζοντας κάποιες από τις εισαχθέντες παραμέτρους (στοιχεία που ορίζουν τον χώρο, φυσικές ιδιότητες υλικού, αρχικές και συνοριακές συνθήκες). Επίσης δύο ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής: Ο χώρος προσομοιώνεται ως ένας κάνναβος Πεπερασμένων Στοιχείων. Γίνεται λοιπόν μία διακριτοποίηση του χώρου σε μη επικαλυπτόμενους απλούς υποχώρους, δηλαδή τα Π.Σ. Η μέθοδος των Π.Σ. επινοήθηκε από μηχανικούς [Zinkiewicz, Argyris κ.α.] και διαμορφώθηκε αρχικά με βάση κυρίως φυσικές αρχές για την αντιμετώπιση απαιτητικών κατασκευαστικών προβλημάτων αεροναυπηγικής, εφαρμόστηκε δε με επιτυχία για αρκετές δεκαετίες χωρίς αυστηρή μαθηματική θεμελίωση. Στη συνέχεια, η μαθηματική ανάλυση και θεμελίωσή της, κατέστησε δυνατή την επέκταση της χρήσης της, πέραν της στατικής και δυναμικής ανάλυσης των κατασκευών, για την επίλυση προβλημάτων που ανακύπτουν σε πλειάδα διαφορετικών επιστημονικών κλάδων όπως η

εμβιομηχανική, η κβαντομηχανική. Η μηχανική των ρευστών, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η μηχανική των συζευγμένων πεδίων κ.λπ.

### **7.3 Ανάλυση των Πεπερασμένων Στοιχείων με το ANSYS**

Η μοντελοποίηση των πειραμάτων και η επίλυσή των με Π.Σ. έγινε μέσω του λογισμικού πακέτου ANSYS Student, το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα δωρεάν χρήσης για φοιτητές, εισάγοντας ωστόσο ορισμένους περιορισμούς οι οποίοι δεν δυσκόλεψαν την παρούσα μελέτη. Το Ansys είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα με Π.Σ. παγκοσμίως και εκτός από τη στατική δομική ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά στην παρούσα εργασία, διαθέτει και πληθώρα άλλων εργαλείων, ικανά να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις πτυχές της επιστήμης του μηχανικού και όχι μόνο. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης έγινε χρήση αποκλειστικά του υποπακέτου Ansys Mechanical APDL. Λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καταλήξαμε στη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Το μοντέλο αυτό θα έχει σαν στοιχεία τα SOLID 185 τα οποία χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατα μοντέλα, με τρεις βαθμούς ελευθερίας για κάθε κόμβο. Η κατασκευή του μοντέλου έγινε με αναλόγως των διαστάσεων πάχους, πλάτους και μήκους οπότε κάθε φορά μπορεί να έχουμε διαφορές στο Meshing. Η επιλογή του αριθμού των στοιχείων έγινε με την ακόλουθη διεργασία.

### **7.4 Ανάλυση Ποιότητας Διακριτοποίησης για εφελκυσμό**

Για λόγους πληρότητας της μελέτης, παρουσιάζεται μια σύντομη ανάλυση της επάρκειας της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που παρέχει η διακριτοποίηση που επιλέξαμε για την παρούσα εργασία. Γενικά, ως λογικό συμπέρασμα της θεωρίας των Π.Σ. προκύπτει πως όσο πιο πυκνή είναι η διακριτοποίηση ενός μοντέλου (όσο περισσότερα Π.Σ. και αντίστοιχα κόμβοι υπάρχουν στο μοντέλο), τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί έτσι προσεγγίζεται όλο και περισσότερο η συνεχής λύση, η οποία θεωρητικά (αν και θα ήταν δυνατό να βρεθεί) θα ήταν η ακριβέστερη. Η αύξηση όμως των στοιχείων και κόμβων οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση του αριθμού και της πολυπλοκότητας των εξισώσεων που πρέπει να λύσει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής. Επομένως, θα απαιτηθεί περισσότερος χρόνος και επεξεργαστική ισχύς για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Συμπερασματικά, πριν από κάθε ανάλυση με Π.Σ. θα πρέπει να γίνεται αντιστοίχιση της απαιτούμενης ακρίβειας των αποτελεσμάτων με τους διαθέσιμους πόρους του υπολογιστικού συστήματος και τον χρόνο ο οποίος δύναται να αναλωθεί.

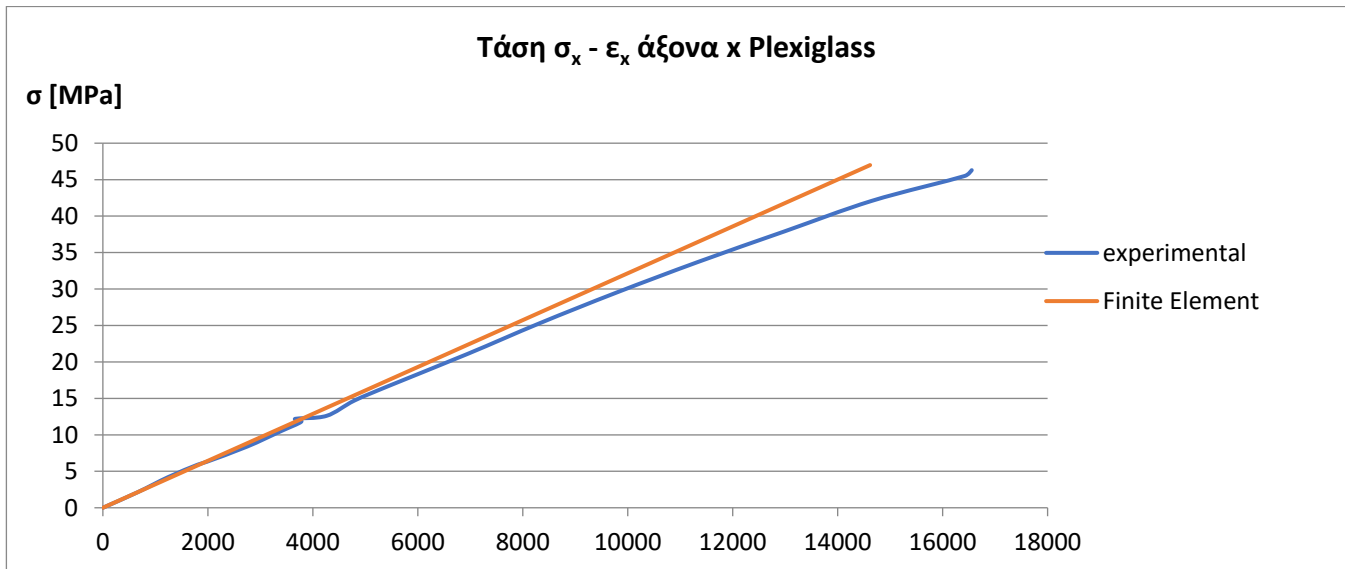
### **7.5 Εξαγωγή Αποτελεσμάτων από την ανάλυση με Π.Σ.**

Αφού κάνουμε τη μοντελοποίηση του προβλήματος εντός του λογισμικού ANSYS και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ολοκληρώσει τη λύση του, έχουμε διάφορες επιλογές σχετικά με την παρουσίαση των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Η πρώτη επιλογή που θα κάνει συνήθως ο μηχανικός, θα είναι να ζητήσει ένα χρωματικό διάγραμμα (Contour Plot) έτσι ώστε να πάρει μια πρώτη εικόνα της κατανομής του μεγέθους που τον ενδιαφέρει. Έπειτα, μας δίνεται η δυνατότητα να ζητήσουμε την τιμή του μεγέθους που μας ενδιαφέρει στον κόμβο της επιλογής μας (Query Result). Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι αν ζητήσουμε την τιμή ενός μεγέθους σε

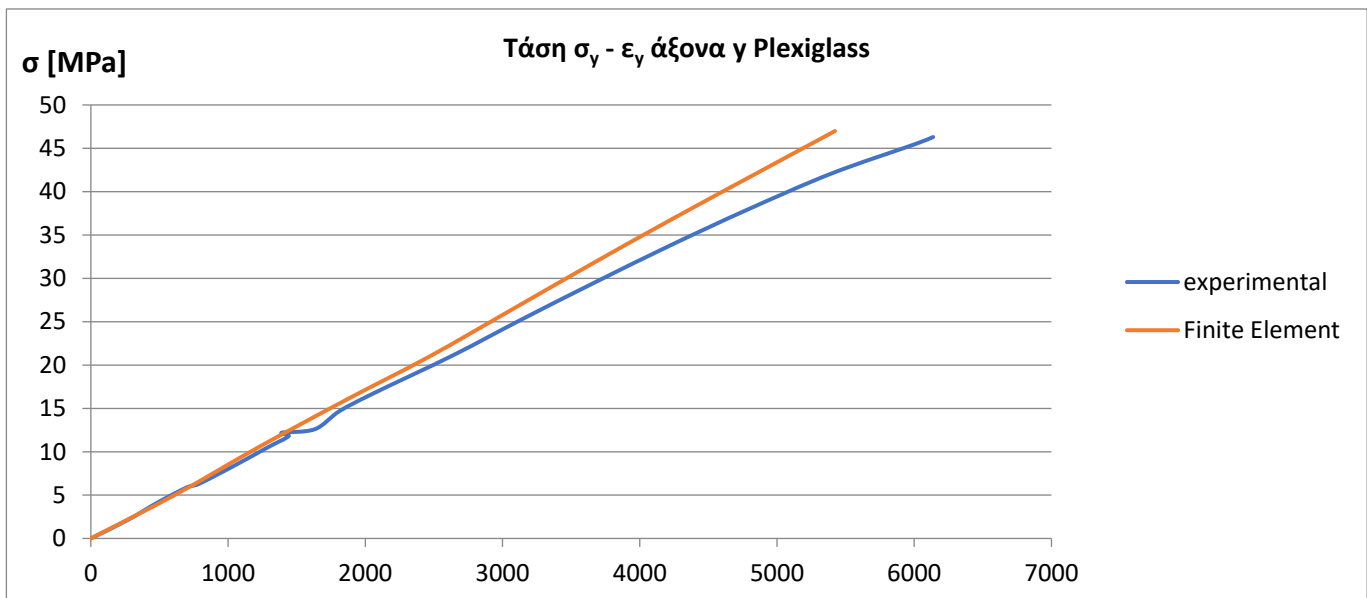
έναν συγκεκριμένο κόμβο στο επίπεδο x-y για όλο το πάχος ξεχωριστά, τότε θα μπορέσουμε να σχηματίσουμε την κατανομή του ως προς το πάχος του σύνθετου. Ακολουθούν οι Πίνακες και τα αντίστοιχα διαγράμματα από τα δεδομένα και αποτελέσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση με το ANSYS. Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων που προκύπτουν από τη μελέτη με πεπερασμένα στοιχεία με αυτά που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα, δείχνει αρκετή σύγκλιση. Το μέτρο ελαστικότητας του πολυμερούς (Plexiglas) από τα πεπερασμένα στοιχεία είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από εκείνο που προκύπτει από τα πειράματα, ενώ στο αλουμίνιο συμβαίνει το αντίθετο.

PLEXIGLASS						
α/α	Πειραματικά			Πεπερασμένα Στοιχεία		
	$\sigma$ (MPa)	$\varepsilon_x 10^{-6}$	$-\varepsilon_y 10^{-6}$	$\sigma$ (MPa)	$\varepsilon_x 10^{-6}$	$-\varepsilon_y 10^{-6}$
1	0	0	0	0	0	0
2	2,1	654	265	5,0672	1574,2	617,716
3	4,2	1243	493	10,566	3283,1	1227,05
4	5,9	1803	701	15,99	4969,4	1860,76
5	6,3	1978	788	20,97	6519,2	2465,76
6	8,4	2752	1046	26,258	8163,6	3052,72
7	10,5	3391	1288	31,63	9835,8	3645,95
8	11,8	3780	1441	36,816	11450	4233,35
9	12,2	3667	1392	41,826	13009	4817,01
10	12,6	4260	1632	46,994	14618	5422,67
11	14,7	4792	1813			
12	16,8	5478	2068			
13	21,1	6949	2636			
14	25,3	8320	3144			
15	29,5	9782	3669			
16	33,7	11335	4209			
17	37,9	12985	4781			
18	42,1	14655	5398			
19	45,5	16419	6010			
20	46,3	16555	6138			

**Πίνακας 7.1 Τάση  $\sigma_x$  ανά άξονα για Plexiglass**



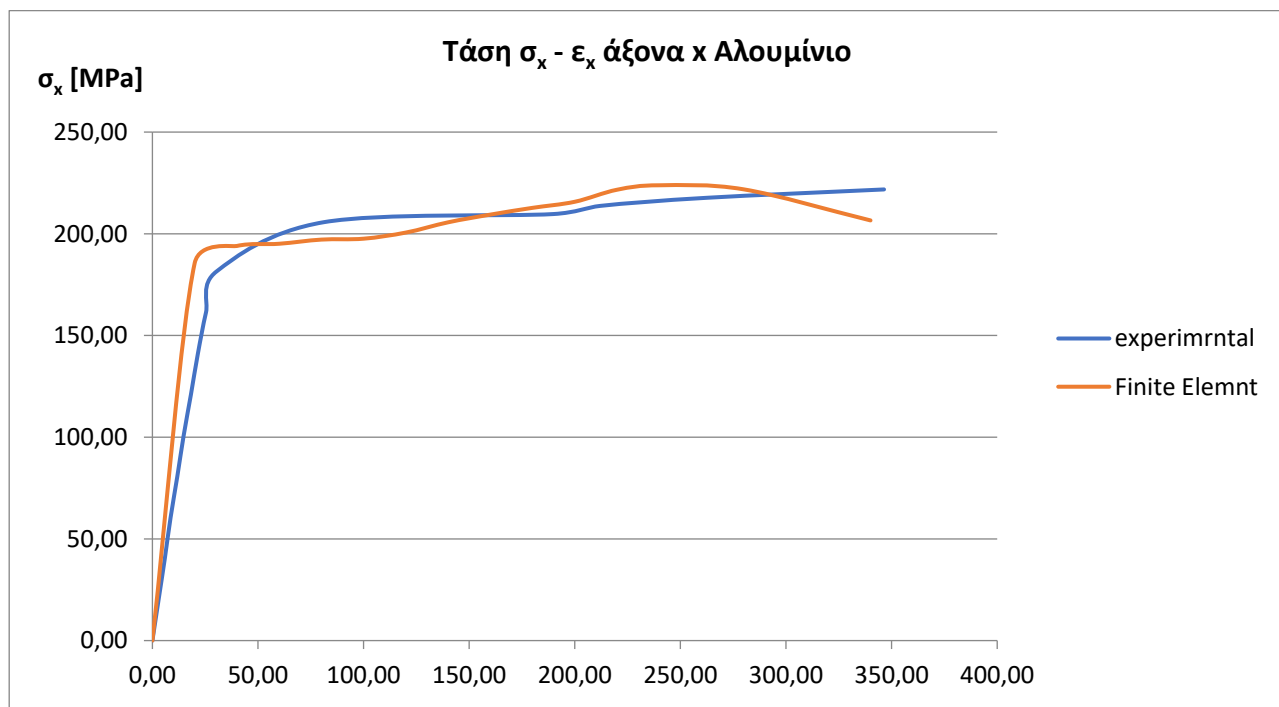
**Διάγραμμα 7.2  $\sigma_x - \epsilon_x 10^{-6}$  Plexiglass**



**Διάγραμμα 7.3  $\sigma_y - \epsilon_y 10^{-6}$  Plexiglass**

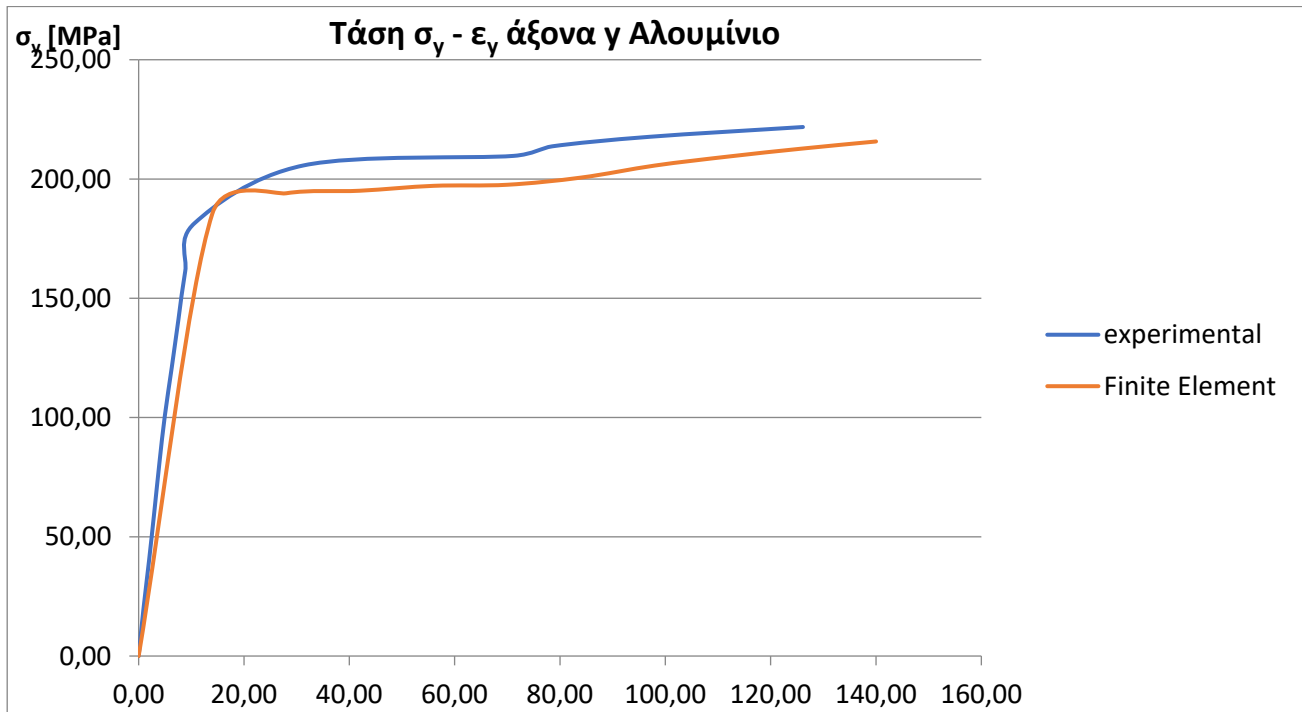
ALUMINIUM						
	Πειραματικά			Πεπερασμένα Στοιχεία		
$\alpha/\alpha$	$\sigma(\text{MPa})$	$\varepsilon_x 10^{-6}$	$-\varepsilon_y 10^{-6}$	$\sigma(\text{MPa})$	$\varepsilon_x 10^{-6}$	$-\varepsilon_y 10^{-6}$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	20,20	294,00	94,00	185,56	2001,15	700.40
2,00	40,30	587,00	199,00	194,01	4000,50	1400.17
3,00	60,50	861,00	298,00	195,09	6001,50	2100.52
4,00	80,70	1180,00	393,00	197,14	8000,50	2800.17
5,00	100,80	1480,00	498,00	197,59	10000,00	3500.00
6,00	121,00	1825,00	629,00	200,60	12001,00	4200.35
7,00	141,20	2156,00	756,00	205,64	14000,50	4900.17
8,00	161,30	2537,00	884,00	209,43	16001,50	5600.52
9,00	181,50	3039,00	1063,00	212,76	18001,00	6300.35
10,00	205,70	8116,00	3130,00	215,74	20001,00	7000.35
11,00	209,70	18987,00	7121,00	221,65	22000,50	
12,00	213,70	21193,00	7852,00	223,85	24000,50	
13,00	217,70	26255,00	9705,00	221,84	28000,50	
14,00	221,80	34641,00	12613,00	206,56	34001,00	

Πίνακας 7.4 Τάση  $\sigma$  ανά άξονα για Αλουμίνιο



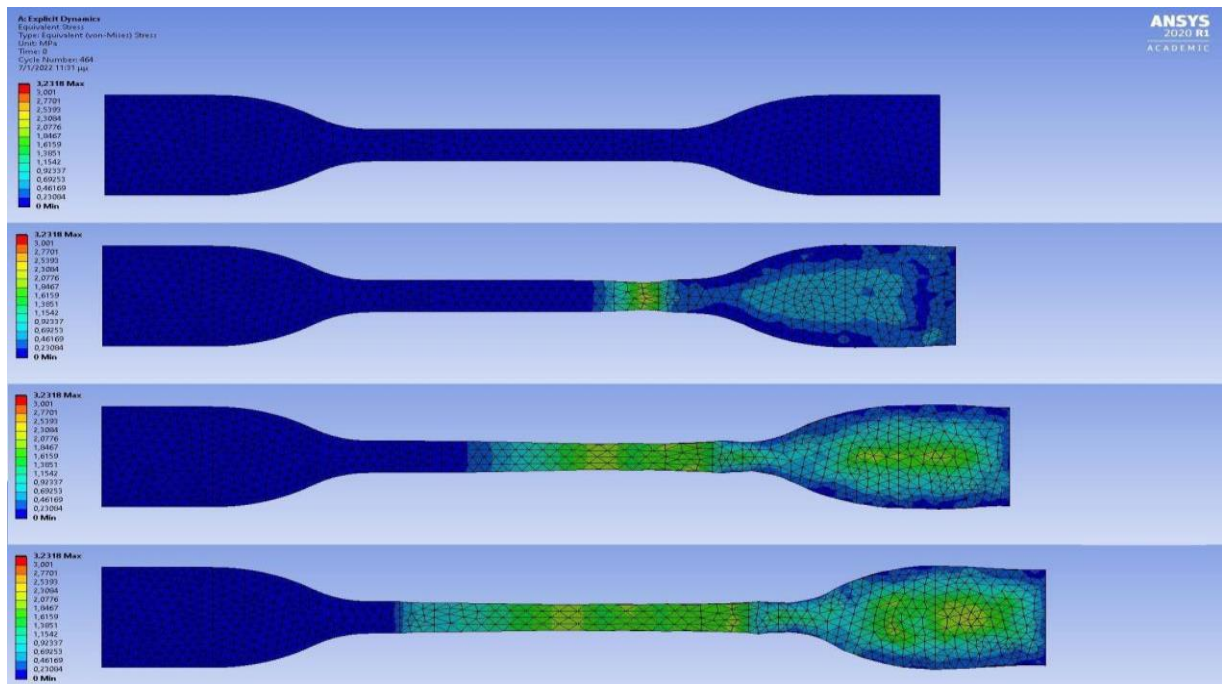
Διάγραμμα 7.5  $\sigma_x - \varepsilon_x 10^{-4}$  Αλουμίνιο





**Διάγραμμα 7.6  $\sigma_y$ - $\epsilon_y$   $10^{-4}$  Αλουμίνιο**

Παρακάτω φαίνεται στην **Εικόνα 7.7** το δοκίμιο με τη διακριτοποίησή του, η παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού μέχρι το σημείο θραύσης:



**Εικόνα 7.7. Στάδια παραμόρφωσης πολυμερούς.**

## Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήσαμε πειραματική μελέτη στις εποξειδικές ρητίνες, σε ένα χαρακτηριστικό πολυμερές υλικό, το plexiglass και σε ένα μέταλλο, το αλουμίνιο, προκειμένου να διαπιστώσουμε εάν μεταβάλλονται οι ελαστικές τους σταθερές κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε καταπόνησης, με τι τρόπο (γραμμικά ή μη γραμμικά) και από τι εξαρτάται η μεταβολή τους. Στο τέλος συγκρίναμε τα πειραματικά αποτελέσματα με την υπολογιστική Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα:

1. Το μέτρο ελαστικότητας του πολυμερούς plexiglass, έχει γραμμική συμπεριφορά ανάλογη με την τάση εφελκυσμού, σε αντίθεση με του αλουμινίου που μετά από ένα χαρακτηριστικό σημείο (σημείο διαρροής) έχει μη γραμμική συμπεριφορά.
2. Τα εγκάρσια κύματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόσβεση απ' ό,τι τα διαμήκη κύματα. Είναι πολλές φορές αδύνατη η μέτρηση της απόσβεσης των εγκάρσιων κυμάτων καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει. Συγκεκριμένα για  $P > 40\%$  η μέτρηση της απόσβεσης των εγκάρσιων κυμάτων είναι σχεδόν αδύνατη.
3. Η ταχύτητα των διαμήκων  $c_l$  καθώς και εγκάρσιων κυμάτων  $c_t$  μειώνεται καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει. Η μείωση αυτή δεν είναι γραμμική. Επίσης από όλες τις ακουστικές ποσότητες των εποξειδικών ρητινών η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων  $c_l$  είναι μεγαλύτερης ακρίβειας και περισσότερο απλή από τις άλλες ποσότητες.
4. Στις εποξειδικές ρητίνες οι ταχύτητες διάδοσης τόσο των διαμήκων  $c_l$  όσο και των εγκάρσιων  $c_t$  κυμάτων, όταν αυτά διέρχονται μέσα από ένα σώμα, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας σε  $\omega$ -σταθερό.
5. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας  $E'$  μειώνεται καθώς το ποσοστό του πλαστικοποιητή  $P$  αυξάνει και επίσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας [ $E' = f(T^\circ\text{C})$ ]. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη βισκοελαστική τους συμπεριφορά και στους σύντομους χρόνους χαλάρωσης (μεγάλες θερμοκρασίες,  $T_0$ ) με αποτέλεσμα τα στοιχειώδη σωματίδια να προλαβαίνουν να επιστρέφουν στη θέση ισορροπίας στο μικρό χρόνο που γίνεται η μέτρηση.
6. Με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και με την αύξηση του ποσοστού του πλαστικοποιητή  $P$ , το δυναμικό μέτρο διάτμησης  $G'$  μειώνεται [ $G' = f(T^\circ\text{C})$ ].
7. Με βάση την αντίστοιχη θεωρία κατά την οποία, μία μείωση στη συχνότητα και μια αύξηση στη θερμοκρασία επιδρά στις ακουστικές ιδιότητες των πολυμερών με τον ίδιο

τρόπο, παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα συναρτήσεως της συχνότητας είναι αντικατοπτρικά μ' εκείνα συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

8. Ειδικότερα, για το Plexiglass παρατηρούμε επίσης ότι για τις εποξειδικές ρητίνες:
9. Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται τόσο η ταχύτητα των διαμήκων  $c_l$  όσο και των εγκάρσιων  $c_t$  κυμάτων.
10. Μείωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας  $E'$  και διάτμησης με την αύξηση της θερμοκρασίας.
11. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει ο δυναμικός λόγος Poisson  $\nu'$  αυξάνει φθάνοντας σε μια οριακή τιμή [ $\nu_{\text{οριακή}} = 0,32$ ]. Παρατηρούμε γενικά, ότι οι μεταβολές στα παραπάνω μεγέθη δεν είναι αξιοσημείωτες σε θερμοκρασίες 20°C–80°C, για το Plexiglass λόγω της λιγότερο έντονης βισκοελαστικής του συμπεριφοράς συγκριτικά με τις εποξειδικές ρητίνες.
12. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας  $E'$ , το δυναμικό μέτρο διάτμησης  $G'$  και ο δυναμικός λόγος Poisson  $\nu$  του αλουμινίου, δεν μεταβάλλονται ανεξαρτήτως διαφοράς θερμοκρασίας.
13. Μετά από συνεχείς καταπονήσεις, το μέτρο ελαστικότητας και το όριο θραύσης των υλικών μειώνεται όπως διαπιστώθηκε και από τις μετρήσεις.
14. Επίσης, όσο αυξάνεται το ποσοστό του πλαστικοποιητή, τόσο μειώνεται και το όριο θραύσης του υλικού.
15. Με την υπολογιστική μέθοδο με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, καταλήξαμε σε ιδιαίτερα μεγάλη σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα με τη μόνη διαφορά ότι το μέτρο ελαστικότητας του plexiglass στα πεπερασμένα στοιχεία είναι ελαφρώς μεγαλύτερο σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα ενώ στο αλουμίνιο συμβαίνει το αντίθετο.
16. Τέλος, ως μελλοντική εργασία η οποία θα μπορούσε να γίνει, προτείνεται η αντίστοιχη μελέτη σε σύνθετα υλικά με εποξειδική ρητίνη και κόκκους αλουμινίου όπως επίσης και η μελέτη σύνθετων υλικών με πολυμερές και κόκκους αλουμινίου τυχαίας διεύθυνσεως.

# Βιβλιογραφία

1. Ε. Κοντού, 'Σχέση Δομής και Θερμομηχανικής Συμπεριφοράς Εποξειδικής Ρητίνης Τροποποιημένης με Μηχανικά και Χημικά Πρόσθετα', Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 1985
2. Ι.Ν. Πρασιανάκης, 'Μη καταστρεπτικός έλεγχος των υλικών-Η μέθοδος των υπερήχων', Αθήνα 1993
3. Ι.Ν. Πρασιανάκης, 'Μη καταστρεπτικές Μέθοδοι Ελέγχου των Υλικών-Η Μέθοδος των Υπερήχων, γ' έκδοση', Αθήνα 1993
4. Ι.Ν. Πρασιανάκης, 'Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών', Αθήνα 1990
5. Chi-Hung Shen and G.S. Springer, 'Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials', J. Composite Materials, Vol.10
6. L.W. Cai and Y. Neitsman, 'Non Fickian Moisture Diffusion in Polymeric Composites', J. Composite Materials, Vol.28
7. Παναγιώτου Κ., 'Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών', Εκδόσεις Πήγασος, Θεσσαλονίκη.