

ΕΚΤΑΚΤΟΣ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 25ΗΣ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 1996

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΙΩΑΝΝΟΥ ΠΕΣΜΑΖΟΓΛΟΥ

---

ΙΑΤΡΙΚΗ.— *Ἡ μεταβολὴ τῆς μηχανικῆς Συμπεριφορᾶς Ἀρτηριακῶν Τοιχωμάτων ἀπὸ τὴν Ἀθηρωματικὴ Νόσον, ὑπὸ τοῦ Ἀκαδημαϊκοῦ Π. Σ. Θεοχάρη, τῶν Χ. Μπουντούλα, Π. Ε. Καραγιαννάκου, Δ. Σοκόλη, Γ. Ἐλευθερίου, Φ. Μητροπούλου, Γ. Η. Παπαλάμπρου, Δ. Περρέα, Ι. Δοντᾶ, καὶ τοῦ Ἀκαδημαϊκοῦ Γρ. Δ. Σκαλκέα\*.*

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ἡ ἀθηρωματικὴ νόσος ἀποτελεῖ τὴν κύρια αἰτία τῶν καρδιακῶν προσβολῶν, τῶν ἐγκεφαλικῶν ἐπεισοδίων καὶ τῆς γάγγραινας τῶν κάτω ἁκρων. Εὐθύνεται γιὰ τὸ 50 % τῆς συνολικῆς θνησιμότητος στὴν Εὐρώπη, τὴν Ἀμερικὴ καὶ τὴν Ἰαπωνία, ἐνῶ ἡ νοσηρότητά της προκαλεῖ μεγάλα ἱατρικά, κοινωνικά καὶ οἰκονομικά προβλήματα.

Ἡ ἀθηρωματικὴ ἀλλοίωση ἔχει μελετηθεῖ ἐκτενῶς ἀπὸ ἀπόψεως ἱστοχημικῆς, παθολογοανατομικῆς καὶ γενετικῆς. Ἡ ἀθηρωματικὴ βλάβη ὅμως ἀποτελεῖ σύνθετη δομικὴ ἀλλοίωση καὶ κάθε στοιχεῖο ποὺ τὴν ἀποτελεῖ ἔχει διαφορετικὴ μηχανικὴ συμπεριφορὰ. Γιὰ τὸν λόγον αὐτόν, ρήξεις τῆς πλάκας ἢ τοῦ ἀθηρωματικοῦ τμήματος τοῦ ἀγγείου ἔχουν ἀποδοθεῖ εἴτε σὲ αἰμοδυναμικὴ διατμητικὴ τάση, εἴτε σὲ στροβιλώδη ροή, σὲ παροδικὴ συμπίεση, σὲ ἀπότομὴ αὐξηση τῆς ἐνδοαυλικῆς πίεσης, σὲ ρήξη τῶν *vasa vasorum* κ.ἄ.

Ἡ μηχανικὴ συμπεριφορὰ τοῦ ἀθηρωματικοῦ ἀγγείου ἔχει συγκεντρώσει τὸ ἐνδιαφέρον τῶν ἐρευνητῶν, ἀλλὰ τὰ ἀποτελέσματα τῶν ἐρευνῶν εἶναι πολλὲς φορὲς ἀντικρουόμενα, λόγῳ τῶν διαφόρων τεχνικῶν ποὺ ἔχουν κατὰ καιροὺς χρησιμοποιοθεῖ. Τὸ 1873, ὁ Rindfleisch [1] ἐμελέτησε περιπτώσεις ρήξης τῆς θωρακικῆς ἀορτῆς, ἐνῶ ὁ Roy [2], τὸ 1880, παρουσίασε πρῶτος τὶς σχέσεις τάσης μήκους, καὶ

---

\* P. THEOCARIS, GR. D. SKALKEAS, H. BOUDOULAS, P. E. KARAYANNACOS, D. SOKOLIS, G. ELEFTERIOU, F. MITROPOULOS, G. PAPALAMBROU, D. PERREA, I. DONTA, *Mechanical properties of the aorta duct, during the evolution of experimentally induced atherosclerosis.*

πίεσης-όγκου για την άορτη του ανθρώπου και των ζώων. 'Ο Greendyke [3] υπολόγισε ότι περίπου το  $1/6$  των θανάτων από αγγειακά επεισόδια μπορεί να αποδοθεί σε μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών του αγγείου. 'Από το 1873 μέχρι σήμερα έχουν δημοσιευθεί πολλές μελέτες που διαπραγματεύονται την μηχανική συμπεριφορά των αρτηριών, πολλές από τις οποίες όμως έχουν αναθεωρηθεί τα τελευταία χρόνια [4-11].

'Η μηχανική συμπεριφορά του αρτηριακού τοιχώματος παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της συμβολής της στην αιμοδυναμική ομοιοστασία και στην ανάπτυξη και εξέλιξη των αγγειακών αλλοιώσεων, από τις οποίες εξαρτώνται οι συνθήκες ροής και μεταφορές μάζας μέσα στο αγγείο. 'Επιπλέον, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα τοιχώματα των αγγείων αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την κατανόηση της φυσιολογίας, αλλά και της παθοφυσιολογίας, της μηχανικής του καρδιαγγειακού συστήματος.

### Μηχανικά Χαρακτηριστικά του 'Αρτηριακού Τοιχώματος

Το αρτηριακό τοίχωμα χαρακτηρίζεται από απόψεως δομικής και μηχανικής ως άνομοιογένης, ανισότροπον και άσυμπιεστον υλικόν. 'Επιπλέον, το τοίχωμα παρουσιάζει μη-γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, ιδιαιτέρως σε ύψηλες παραμορφώσεις. 'Από έκτενεις μελέτες έχουν διευκρινισθεί τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά του αγγειακού τοιχώματος όπως ή άνομοιογένεια, το άσυμπιεστο, ή όρθοτροπία, και ή μη-γραμμικότητα της μηχανικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων. Μία ικανή προσέγγιση της άνισοτροπίας των τοιχωμάτων αποτελεί ή παραδοχή ότι αυτά συμπεριφέρονται μηχανικώς ως έγκαρσίως ισότροπα υλικά.

Το αρτηριακό τοίχωμα είναι σύνθετο υλικό, το οποίο αποτελείται κυρίως από πρωτεΐνες, λεϊα μυϊκά κύτταρα, καθώς και ίνες έλαστικής και κολλαγόνου. Τα τελευταία δύο συστατικά αποτελούν τις κύριες αίτιες των παθητικών μηχανικών ιδιοτήτων των τοιχωμάτων. Πράγματι, ή έλαστική σχηματίζει χαλαρό δίκτυο ίνων που φέρει τις τάσεις σε μικρές παραμορφώσεις, ενώ αντιθέτως το κολλαγόνο, και ιδιαιτέρως το κολλαγόνο του μέσου χιτώνας φέρει τις τάσεις σε μεγάλες παραμορφώσεις. 'Η δομική άκαμψία του τοιχώματος του αγγείου καθορίζεται από το βαθμό της ενεργοποίησης των ίνων του κολλαγόνου και εξαρτάται από την δομική άρχιτεκτονική της έλαστικής και του κολλαγόνου.

Το αρτηριακό τοίχωμα είναι έπομένως σύνθετο βιολογικό υλικό που παρουσιάζει άνομοιογένεια. Πράγματι, οι μηχανικές ιδιότητες των αρτηριών μεγάλης διαμέτρου δέν είναι ίδιες με αυτές των μικρότερων κλάδων τους. 'Εν τούτοις, γίνεται αποδεκτό ότι ή όμοιογένεια συναντάται σε μικρά τμήματα του άορτικού δένδρου

κατὰ τὸν ἐπιμήκη ἄξονά του, ιδιότης ποὺ ἐπιτρέπει τὴν παραδοχὴ τῆς συμπεριφορᾶς του ὡς ἐγκαρσίως ισότροπου μέσου.

Ἡ ὑπόθεση τοῦ ἀσυμπιέστου ἐπιτρέπει τὴν παραδοχὴ ὅτι σὲ ὁποιαδήποτε μηχανικὴ μεταβολὴ τοῦ ἀρτηριακοῦ ἱστοῦ, ὁ ὄγκος τοῦ τοιχώματος παραμένει σταθερός. Ἡ ἀποδοχὴ αὐτῆς τῆς ὑπόθεσης διευκολύνει σὲ μεγάλο βαθμὸ τὴν ἀνάλυση τῶν σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων, ἐπειδὴ ἡ παραμόρφωση σὲ ἓνα ἀπὸ τοὺς τρεῖς ἄξονες καθορίζεται πλήρως ἀπὸ τὶς παραμορφώσεις στοὺς ὑπόλοιπους δύο ἄξονες.

Ἡ γεωμετρικὴ συμμετρία στὴν ἐσωτερικὴ δομὴ ἑνὸς σώματος ἔχει ὡς ἀποτέλεσμα τὴν ἐμφάνιση συμμετρίας καὶ στίς μηχανικὲς ιδιότητές του, ὅποτε τοῦτο ὀνομάζεται ισोटροπικό. Ὄταν δὲν ὑπάρχει συμμετρία, τότε τὸ σῶμα ὀνομάζεται ἀνισοτροπικό. Στὸ ισότροπον σῶμα, τὸ σύστημα τῶν κυρίων ἄξόνων ἀποτελεῖ ἄξονες συμμετρίας, καὶ παρατηροῦνται οἱ αὐτὲς ιδιότητες εἰς οἵανδήποτε τῶν κυρίων διευθύνσεων.

Ἡ ιστολογικὴ ἀνάλυση τῆς δομῆς τοῦ ἀρτηριακοῦ τοιχώματος ἀποδεικνύει ὅτι ἀποτελεῖται ἀπὸ κολλαγόνο, ἐλαστίνη καὶ λεῖα μυϊκὰ κύτταρα, τὰ ὅποια εἶναι προσανατολισμένα κυρίως κατὰ τὸν ἐπιμήκη καὶ τοὺς ἐγκαρσίους ἄξονες. Ἀποτέλεσμα τῆς κυτταρικῆς ἀρχιτεκτονικῆς τοῦ ἀρτηριακοῦ τοιχώματος εἶναι οἱ ἐλαστικὲς ιδιότητές του νὰ θεωροῦνται ὡς ἐγκαρσίως ισότροποι, δηλαδὴ συμμετρικὲς ὡς πρὸς τὸν περιφερειακὸ καὶ ἐπιμήκη ἄξονα.

Τὸ ἀρτηριακὸ τοίχωμα ὑποβαλλόμενον εἰς τυχούσας καταπονήσεις παρουσιάζει μεγάλες, μὴ-γραμμικὲς παραμορφώσεις, ἐπομένως δὲν ὑπακούει εἰς τὸν γραμμικὸν νόμον παραμόρφωσης τῶν ἐλαστικῶν σωμάτων (νόμος τοῦ Hooke). Κατὰ συνέπεια, ἡ μηχανικὴ περιγραφή τῆς παραμορφώσεως τοῦ ἀρτηριακοῦ ἱστοῦ δὲν μπορεῖ νὰ πραγματοποιηθεῖ μὲ τὴν κλασσικὴ θεωρίαν ἐλαστικότητος τῶν μικρῶν παραμορφώσεων.

Τέλος, ἡ διάμετρος τῆς ἀορτῆς, ὅσο ἀπομακρυνόμαστε ἀπὸ τὴν ἀορτικὴ βαλβίδα πρὸς τὸν διχασμὸ τῶν λαγονίων ἀγγείων, παρουσιάζει σταδιακὴ μείωση. Ἡ μείωση αὕτῃ ὀνομάζεται γεωμετρικὴ λέπτυνση. Ὄταν ὅμως γίνεται ἀναφορὰ στὸ ἀορτικὸ δένδρo, τότε δὲν λαμβάνεται ὑπόψη ἡ μεταβολὴ αὕτῃ καὶ θεωρεῖται ὅτι τὸ ἀγγεῖο ἔχει κυκλικὴ διατομὴ μὲ σταθερὴ διάμετρο καὶ πάχος σὲ ὅλο τὸ μῆκος του. Πρέπει νὰ σημειωθεῖ ὅμως ὅτι ὅσο ἐλαττώνεται ἡ διάμετρος τοῦ ἀγγείου, τόσο μειώνεται τὸ πάχος τοῦ τοιχώματος μὲ ἀποτέλεσμα ὁ λόγος τῶν δύο αὐτῶν μεγεθῶν νὰ παραμένει σταθερός.

### Ὑλικά δοκιμῶν-Μέθοδοι

Γιὰ τὴν μελέτη αὕτῃ χρησιμοποιήθηκαν 24 λευκὰ ἀρσενικὰ κουνέλια Νέας Ζηλανθίας μέσου σωματικοῦ βάρους  $2550 \pm 110$  gr. Τὰ πειραματόζωα χωρίστηκαν σὲ 3 ὁμάδες. Στὴν ὁμάδα Α (n=4), ποὺ ἀποτέλεσε τὴν ὁμάδα ἐλέγχου, ἡ διατροφή τους



έγινε με κανονική τροφή έμπορίου. Στις ομάδες Β ( $n=10$ ) και Γ ( $n=10$ ), η τροφή των πειραματοζώων είχε εμπλουτιστεί με 2% χοληστερόλη και 6% καλαμποκέλαιο. Πριν από την έναρξη της μελέτης έγινε αίμοληψία σε όλα τα πειραματοζώα για τον προσδιορισμό των επιπέδων των λιπιδίων του αίματος. 'Ανάλογη αίμοληψία έγινε στο τέλος της μελέτης κάθε ομάδας. 'Η πειραματική μελέτη των πειραματοζώων των ομάδων Α και Γ έγινε μετά από δύο μήνες και της ομάδας Β μετά από ένα μήνα. Μετά την διάνοιξη, με επιμήκη τομή, της θωρακικής και κοιλιακής κοιλότητας, παρασκευάστηκε το αορτικό δένδρο από την αορτική βαλβίδα μέχρι τον διχασμό των λαγονίων άγγείων, αφαιρέθηκε όλος ο συνδετικός ιστός και το άγγείο διανοίχτηκε κατά τον επιμήκη άξονά του. 'Η θωρακική και κοιλιακή αορτή χωρίστηκαν σε δύο ήμιμόρια, ένα κεντρικό και ένα περιφερειακό. Τα παρασκευάσματα τοποθετήθηκαν σε φυσιολογικό όρο και διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία 4°C μέχρι την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους που έγινε μέχρι και 36 ώρες μετά την εθανασία.

'Η μηχανική ανάλυση της τάσης-παραμόρφωσης των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με την συσκευή έφελκυσμού Vitrodyne 1000 Universal Tester Machine (Liveco Inc., Vermont, U.S.A.), ενώ το πάχος του άγγειακού τοιχώματος προσδιορίστηκε με ειδική μικρομετρική συσκευή ακτίνων laser εύαισθησίας 1  $\mu\text{m}$  (laser scan micrometer, Model LS-3100, Keyence Corp., Osaka, Japan). Κατά την διάρκεια των μετρήσεων το αορτικό δείγμα ήταν μέσα σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 37°C. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες δωματίου, με θερμοκρασία περιβάλλοντος χώρου  $20 \pm 1^\circ \text{C}$ .

Στις άρπάγες της συσκευής έφελκυσμού είχαν τοποθετηθεί μικρά τεμάχια από αντιολισθητικό χαρτί, ώστε να συγκρατούνται τα δείγματα κατά την διάρκεια του έφελκυσμού. Είς την συσκευήν χρησιμοποιήθηκε ή κλίμαξ μέγιστου 10 kg για την μέτρηση της έντατικής κατάστασης της αορτής. 'Η συσκευή έφερε επίσης ένσωματωμένο μετρητή παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονταν στην μνήμη ηλεκτρονικού υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.

Το πρωτόκολλο της μελέτης των αορτικών δειγμάτων περιελάμβανε την προετοιμασία τους, τις μετρήσεις δύναμης-επιμήκυνσης και την μέτρηση του πάχους. 'Η προετοιμασία του ύλικού γινόταν με 10 μονοαξονικούς έντατικούς κύκλους, με σταθερά τελικά επίπεδα παραμορφώσεων, που αποσκοπούσαν στην μελέτη των βισκοελαστικών ιδιοτήτων του δείγματος. 'Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη για την σταθεροποίηση του δείγματος και την εξάλειψη πιθανών φαινομένων υστέρησης. 'Ακολούθησαν μετρήσεις δύναμης-επιμήκυνσης με τις όποιες μελετήθηκαν οι έλαστικές ιδιότητες του άρτηριακού τοιχώματος.

Κατά την διάρκεια του μονοαξονικού έφελκυσμού [12, 13] μετρήθηκαν: ή έπι-

μήκης δύναμη  $F$ , τὸ ἀρχικὸ μῆκος  $l_0$ , τὸ πλάτος  $w_0$  καὶ τὸ πάχος  $t_0$  τοῦ δείγματος. Ἐπίσης, τὸ τελικὸ μῆκος  $l$ , τὸ πλάτος  $w$  καὶ τὸ πάχος  $t$ . Μὲ βάση τὰ στοιχεῖα αὐτὰ ἔγινε ὁ ὑπολογισμὸς τῆς τάσης, τῆς παραμόρφωσης καὶ τοῦ μέτρου ἐλαστικότητας στὸν ἐπιμήκη ἄξονα. Ἡ παραμόρφωση Green [14],  $\gamma$ , ὑπολογίστηκε μέσω τοῦ τύπου

$$\gamma = 1/2(\lambda^2 - 1) \quad (1)$$

ὅπου  $\lambda = l/l_0$  εἶναι ἡ ἐπιμήκυνση τοῦ δείγματος.

Ἡ τάση ὑπολογίστηκε ἀπὸ τὸν τύπο  $\sigma = F/wt$ , ὅπου  $F$  εἶναι ἡ ἀσκούμενη δύναμη. Τὰ ἀρτηριακὰ δείγματα ἐθεωρήθηκαν μὲ μεγάλη προσέγγιση ὡς ἀσυμπίεστα ὕλικά καὶ ἐπομένως ἡ τάση ὑπολογίστηκε ἀπὸ τὸν ἐξῆς τύπο:

$$\sigma = \frac{Fl}{w_0 t_0 l_0} = \frac{F}{w_0 t_0} \lambda \quad (2)$$

Τέλος, ἀπὸ τὸ ἐμβαδὸν τῆς ἐπιφάνειας ποὺ περικλείεται ἀπὸ τὴν καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης καὶ τὸν ἄξονα τῆς παραμόρφωσης ὑπολογίστηκε ἡ ἐλαστικὴ ἐνέργεια.

Ἡ στατιστικὴ ἐπεξεργασία τῶν δεδομένων ἔγιναν μὲ τὴν ἐφαρμογὴ τῆς δοκιμασίας τῆς ἀνάλυσης τῆς μεταβλητότητας ANOVA (analysis of variance). Σὲ ὅλους τοὺς ὑπολογισμοὺς μία τιμὴ  $p < 0.05$  θεωρήθηκε ὡς στατιστικῶς σημαντικὴ. Τὰ τελικὰ ἀποτελέσματα παρουσιάζονται ὡς μέση τιμὴ μὲ τὴν προσθήκη τοῦ σταθεροῦ σφάλματος.

### Ἀποτελέσματα

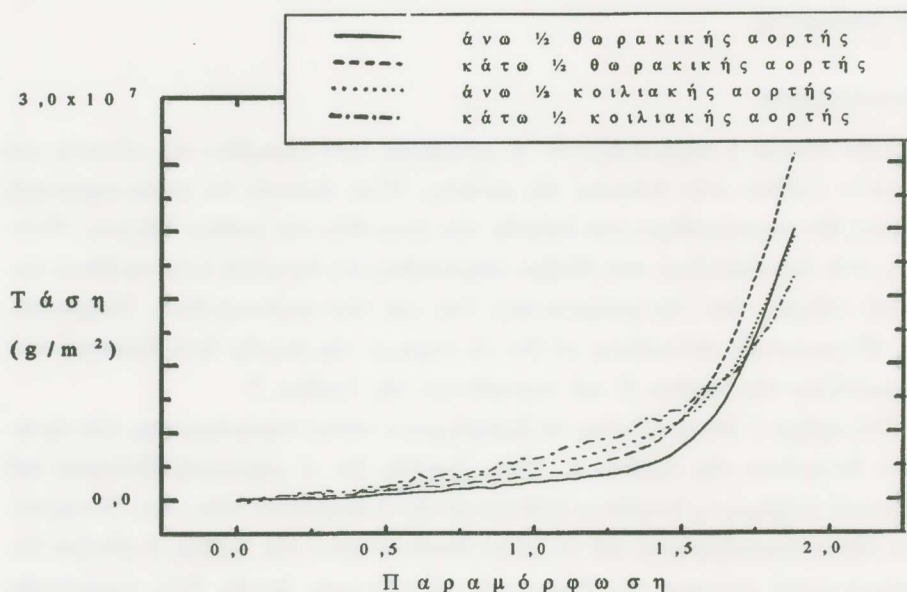
Στὸν πίνακα 1 παρουσιάζονται οἱ μεταβολές τῶν λιποειδῶν τοῦ αἵματος καὶ τῶν τριῶν ομάδων στὴν διάρκεια τῆς μελέτης. Εἶναι ἐμφανές ὅτι καμία σημαντικὴ μεταβολὴ δὲν παρατηρήθηκε στὰ ἐπίπεδα τῶν λιποειδῶν τῆς ομάδας ἐλέγχου. Ἀντιθέτως, στὰ πειραματόζωα ποὺ ἔλαβαν ὑπερλιπιδαιμικὴ διατροφή παρατηρήθηκε σημαντικὴ αὐξηση τόσο τῆς χοληστερίνης, ὅσο καὶ τῶν τριγλυκεριδίων. Μακροσκοπικὲς ἀθροωματικὲς ἀλλοιώσεις, σὲ ὅλο τὸ τοίχωμα τῆς ἀορτῆς ἦταν ἐμφανεῖς στὰ πειραματόζωα τῆς ομάδας Β καὶ περισσότερο τῆς ομάδας Γ.

Στὸ σχῆμα 1 ἀπεικονίζονται τὰ διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης τῶν ἀρτηριακῶν δειγμάτων τῆς ομάδας Α. Εἶναι ἐμφανές ὅτι οἱ μηχανικὲς ιδιότητες τοῦ ἀρτηριακοῦ τοιχώματος διαφέρουν ἀνάλογα μὲ τὴν τοπογραφικὴ θέση τους. Οἱ καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης καὶ τὸ μέτρο ἐλαστικότητας τῆς ομάδας Α ἔδειξαν ὅτι τὰ περιφερειακὰ τμήματα τῆς θωρακικῆς καὶ κοιλιακῆς ἀορτῆς ἦταν σημαντικῶς πιὸ ἄκαμπτα ἀπὸ τὰ κεντρικὰ ἡμimόρια ( $p < 0.05$ ).

Είναι γνωστό εις τήν ἔμβιον ὕλην ὅτι τὸ μέτρο ἐλαστικότητος ἐξαρτᾶται ἐκ τοῦ ὕψους τῆς παραμόρφωσης καὶ τῆς τάσης καθὼς ἡ σχέση τάσης-παραμόρφωσης εἶναι μὴ-γραμμική. Γιὰ τὸν λόγον αὐτὸν ὁ ὑπολογισμὸς τῶν μέτρων ἐλαστικότητος θεωρήθηκε ἀπαραίτητο νὰ γίνῃ σὲ τέσσερα διαφορετικὰ ἐπίπεδα παραμόρφωσης, ποὺ προσδιόριζαν τὴν σχέση μετὰξὺ μέτρου ἐλαστικότητος καὶ παραμόρφωσης. Ὅπως

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 : Μεταβολὲς τῶν λιποειδῶν τοῦ αἵματος (mgdl) (μέση τιμὴ  $\pm$  σταθερὸ σφάλμα)

	ΧΟΛΗΣΤΕΡΙΝΗ			ΤΡΙΓΛΥΚΕΡΙΔΙΑ		
	ΕΝΑΡΞΗ	1ος ΜΗΝΑΣ	2ος ΜΗΝΑΣ	ΕΝΑΡΞΗ	1ος ΜΗΝΑΣ	2ος ΜΗΝΑΣ
ΟΜΑΔΑ Α	35 $\pm$ 4	----	39 $\pm$ 6	59 $\pm$ 6	----	63 $\pm$ 4
ΟΜΑΔΑ Β	64 $\pm$ 10	2481 $\pm$ 241	----	51 $\pm$ 5	224 $\pm$ 27	----
ΟΜΑΔΑ Γ	49 $\pm$ 5	----	2945 $\pm$ 46	58 $\pm$ 4	----	261 $\pm$ 31



Σχήμα 1: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης τῶν ἀορτικῶν δειγμάτων τῆς ὁμάδας Α.



φαίνεται από τον πίνακα 2, σε χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης, τα μέτρα ελαστικότητας των τεσσάρων ήμιμορίων της θωρακικής και της κοιλιακής αορτής διαφέρουν μεταξύ τους ( $p < 0.05$ ), ενώ αντίθετως σε υψηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης δεν εντοπίζονται στατιστικώς σημαντικές διαφοροποιήσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 : Μέτρο Έλαστικότητας ( $\times 10^5 \text{g/m}^2$ ) (μέση τιμή  $\pm$  σταθερό σφάλμα) των αορτικών ήμιμορίων της ομάδας Α.

### ΟΜΑΔΑ Α

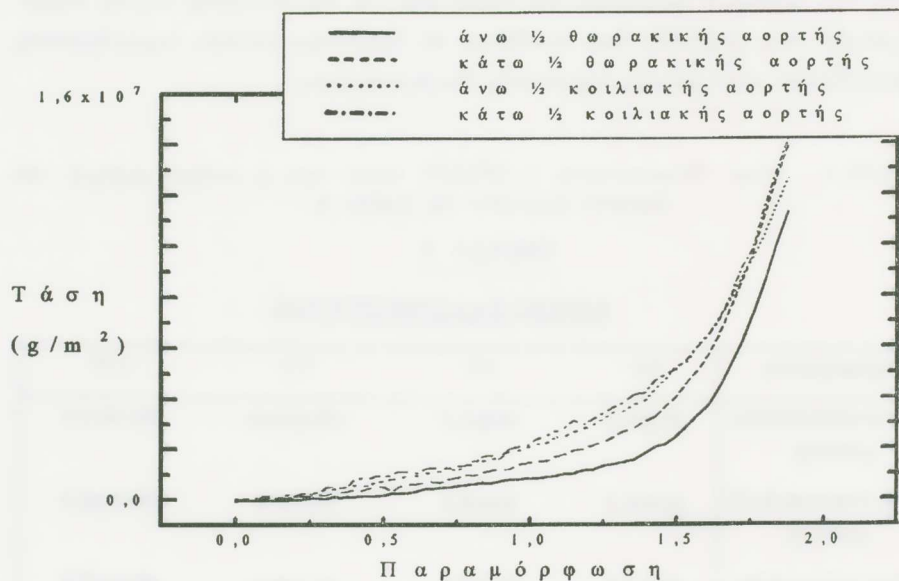
#### ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΟΣ

Παραμόρφωση	0.5	1.0	1.5	1.75
ΑΝΩ ½ ΘΩΡΑΚΙΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	17.5 $\pm$ 1.2	14.6 $\pm$ 1.5	170.5 $\pm$ 34.8	566.7 $\pm$ 115.3
ΚΑΤΩ ½ ΘΩΡΑΚΙΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	23.9 $\pm$ 1.5	23.0 $\pm$ 0.3	211.9 $\pm$ 6.2	590.3 $\pm$ 48.5
ΑΝΩ ½ ΚΟΙΛΙΑΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	33.9 $\pm$ 2.8	36.7 $\pm$ 2.4	61.2 $\pm$ 8.3	430.9 $\pm$ 157.5
ΚΑΤΩ ½ ΚΟΙΛΙΑΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	44.3 $\pm$ 4.3	52.3 $\pm$ 6.3	119.7 $\pm$ 23.4	294.6 $\pm$ 102.3

Στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τα αρτηριακά δείγματα από τα δείγματα της ομάδας Β, (σχήμα 2), όλες οι καμπύλες διαφέρουν μεταξύ τους. Είναι εμφανές ότι οι μηχανικές ιδιότητες των αρτηριακών τοιχωμάτων διαφοροποιούνται αναλόγως με την τοπογραφική τους θέση, γεγονός που είχε παρατηρηθεί και στην ομάδα Α.

Στον πίνακα 3 αναφέρονται τα μέτρα ελαστικότητας των αορτικών δειγμάτων σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα παραμορφώσεων. Διά μικράς παραμορφώσεως της τάξης του 0.5 και 1.0 οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας των ήμιμορίων της θωρακικής και της κοιλιακής αορτής διαφέρουν σημαντικώς μεταξύ τους. Οι διαφορές όμως του μέτρου ελαστικότητας σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις της θωρακικής και κοιλιακής αορτής δεν είναι σημαντικές ( $p > 0.05$ ).

Στο σχήμα 3 απεικονίζεται η σχέση τάσης-παραμόρφωσης των αορτικών δειγμάτων της ομάδας Γ. Είναι εμφανές εις την ομάδα αυτήν ότι η ελαστική συμπεριφορά του αρτηριακού τοιχώματος καθορίζεται από την τοπογραφική του θέση. Το μέτρο ελαστικότητας του άνω ήμιμορίου της θωρακικής αορτής διά επίπεδα παραμορφώσεως της τάξεως 0.5, διαφέρει σημαντικά από το αντίστοιχο της κοι-



Σχήμα 2: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των αορτικών δειγμάτων της ομάδας Β.

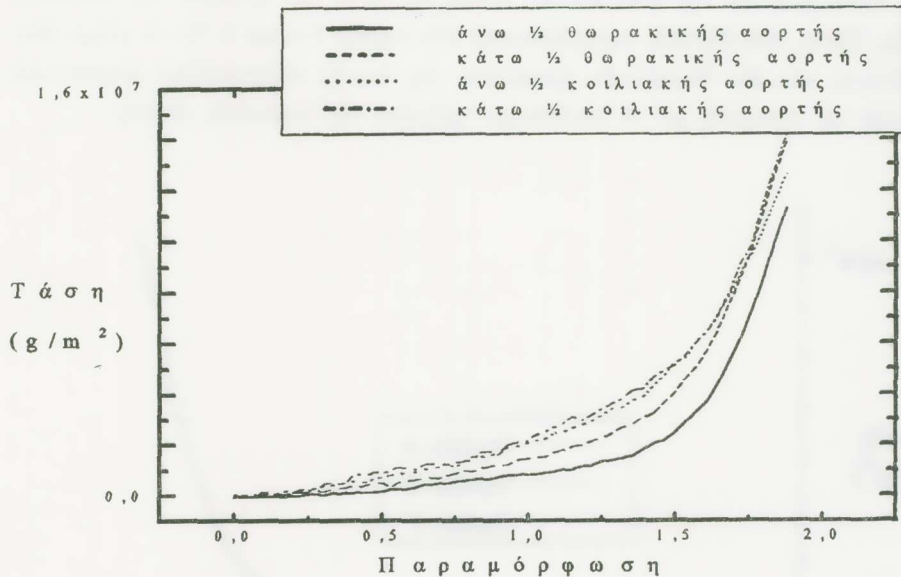
### ΟΜΑΔΑ Β

#### ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΟΣ

Παραμόρφωση	0.5	1.0	1.5	1.75
ΑΝΩ ½ ΘΩΡΑΚΙΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	12.7±2.0	13.6±1.1	105.3±27.1	327.9±72.4
ΚΑΤΩ 1/2 ΘΩΡΑΚΙΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	16.3±0.75	25.1±4.1	138.7±12.5	362.3±34.2
ΑΝΩ ½ ΚΟΙΛΙΑΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	24.7±2.93	36.1±2.2	121.1±24.9	284.4±78.4
ΚΑΤΩ 1/2 ΚΟΙΛΙΑΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	26.1±1.9	43.1±3.4	121.9±15.1	298.9±77.68

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Μέτρο Έλαστικότητας ( $\times 10^5 \text{g/m}^2$ ) (μέση τιμή  $\pm$  σταθερό σφάλμα) των αορτικών ήμμοριων της ομάδας Β.





Σχήμα 3: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των αορτικών δειγμάτων τής ομάδας Γ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Μέτρο Έλαστικότητας ( $\times 10^5 \text{g/m}^2$ ) (μέση τιμή  $\pm$  σταθερό σφάλμα) των αορτικών ήμιμορίων τής ομάδας Γ.

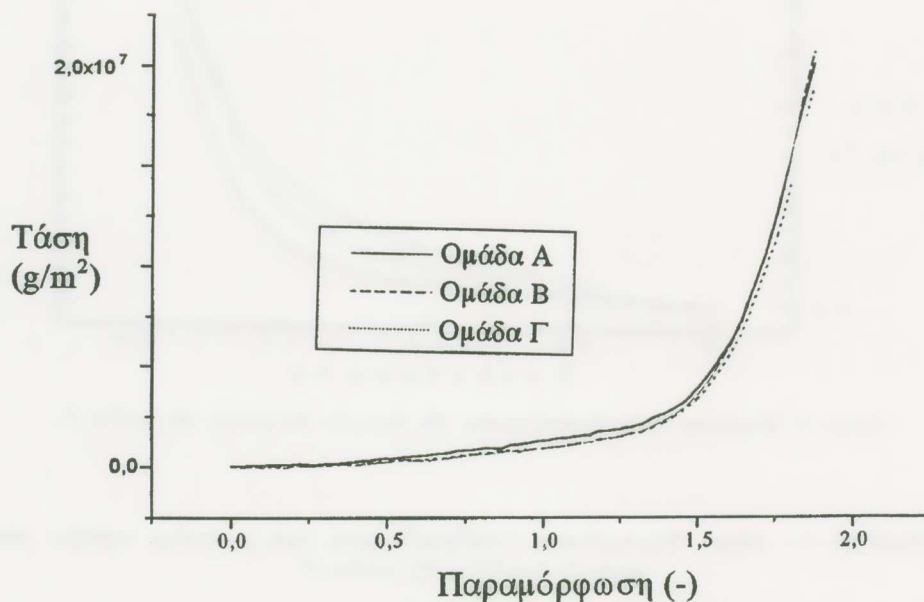
#### ΟΜΑΔΑ Γ

##### ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΟΣ

Παραμόρφωση	0.5	1.0	1.5	1.75
ΑΝΩ 1/2 ΘΩΡΑΚΙΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	13.3 $\pm$ 0.7	12.0 $\pm$ 0.7	166.5 $\pm$ 24.6	538.9 $\pm$ 78.2
ΚΑΤΩ 1/2 ΘΩΡΑΚΙΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	17.3 $\pm$ 1.9	21.9 $\pm$ 2.8	140.0 $\pm$ 26.6	385.2 $\pm$ 63.7
ΑΝΩ 1/2 ΚΟΙΛΙΑΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	21.6 $\pm$ 1.4	29.2 $\pm$ 1.8	65.5 $\pm$ 11.3	167.2 $\pm$ 35.2
ΚΑΤΩ 1/2 ΚΟΙΛΙΑΚΗΣ ΑΟΡΤΗΣ	18.9 $\pm$ 1.9	31.9 $\pm$ 3.54	63.0 $\pm$ 10.9	125.9 $\pm$ 30.1

λιακής αορτής (πίνακας 4). Διά ύψηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης τής τάξεως 1.0, παρουσιάζεται στατιστική διαφορά μεταξύ του άνω ήμιμορίου τής θωρακικής

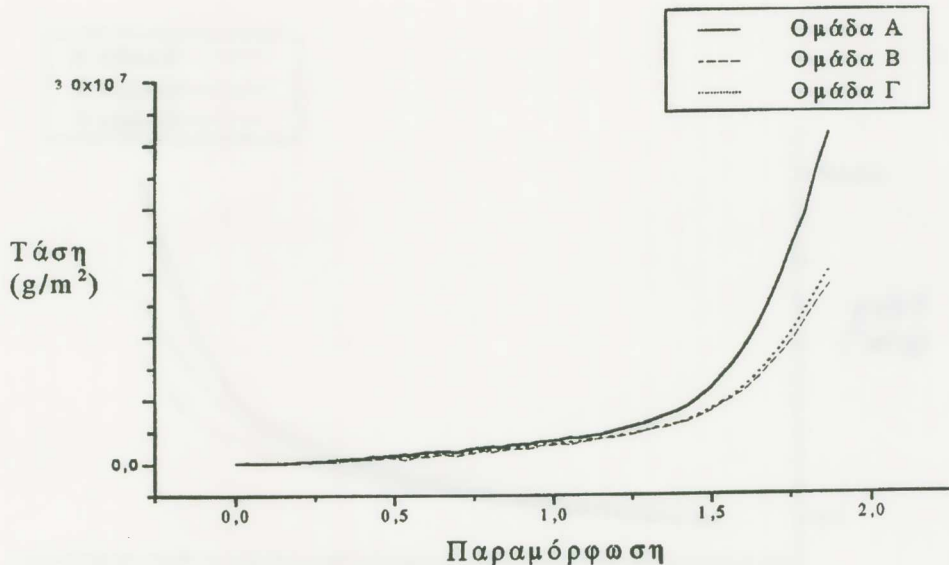
μέ τὸ κάτω ἡμιμόριο τῆς ἴδιας μοίρας, καθὼς καὶ μετὰ τὰ δύο ἡμιμόρια τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς. Τέλος, στὰ ἐπίπεδα παραμόρφωσης τῶν τάξεων 1.5 καὶ 1.75, τὰ μέτρα ἐλαστικότητος τῶν δύο θωρακικῶν ἡμιμορίων τῆς ἀορτῆς παρουσιάζουν στατιστικὲς διαφορὲς σὲ σύγκριση μετὰ ἀντίστοιχα τμήματα τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς.



Σχῆμα 4: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης τοῦ ἄνω ἡμίσσεος τῆς θωρακικῆς ἀορτῆς ἀπὸ τὲς τρεῖς ομάδες.

Στὸ σχῆμα 4, ἀπεικονίζονται οἱ καμπύλες τῆς τάσης-παραμόρφωσης τοῦ ἄνω ἡμιμορίου τῆς θωρακικῆς ἀορτῆς καὶ τῶν τριῶν ομάδων τῶν πειραματοζώων. Εἶναι ἐμφανὲς ὅτι δὲν ὑπάρχουν μηχανικὲς διαφοροποιήσεις τοῦ τοιχώματος τῶν τριῶν ομάδων, καθὼς ὅλες οἱ καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σχεδὸν συμπίπτουν. Ὅσον ἀφορᾷ τὸ μέτρο ἐλαστικότητος, στατιστικὴ ἀξιολόγηση ἔδειξε ὅτι δὲν ὑπάρχουν διαφοροποιήσεις μεταξὺ τῶν τριῶν ομάδων στὸ ἡμιμόριο αὐτὸ τῆς θωρακικῆς ἀορτῆς.

Οἱ καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης τοῦ κάτω ἡμιμορίου τῆς θωρακικῆς ἀορτῆς, γιὰ τὲς τρεῖς ομάδες τῶν πειραματοζώων, ἐμφανίζονται στὸ σχῆμα 5. Ἀπὸ τὸν πρῶτο μῆνα τῆς σίτισης τῶν ζώων μετὰ ὑπερλιπιδαιμικὴ τροφή (ομάδα Β) παρουσιάζεται διαφοροποίηση τῆς μηχανικῆς συμπεριφορᾶς τῶν ἀγγείων σὲ σύγκριση μετὰ τὰ φυσιολογικά ζῶα ποὺ γίνεται πλέον ἐκδηλητὸν δεύτερο μῆνα (ομάδα Γ). Οἱ μεταβολὲς αὐτὲς παρουσιάζονται ἔντονες σὲ ὑψηλὰ ἐπίπεδα παραμορφώσεων, ὅπου τὰ ἀντίστοιχα



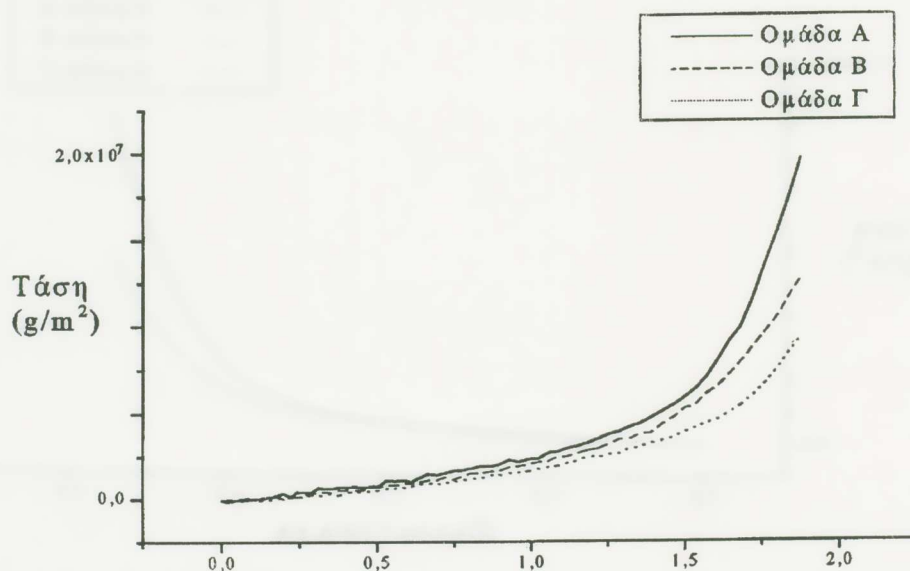
Σχήμα 5: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του κάτω ήμισους της θωρακικής άορτης από τις τρεις ομάδες.

επίπεδα τάσεων είναι στατιστικώς διαφορετικά μεταξύ της ομάδας Α και των ομάδων Β και Γ, ενώ δεν υπάρχει στατιστική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο υπερλιπιδαιμικών ομάδων Β και Γ. Τέλος, στατιστική διαφορά παρατηρείται στα μέτρα ελαστικότητας σε όλα τα επίπεδα παραμόρφωσης μεταξύ της ομάδας των φυσιολογικών και των δύο ομάδων των υπερλιπιδαιμικών κουνελιών.

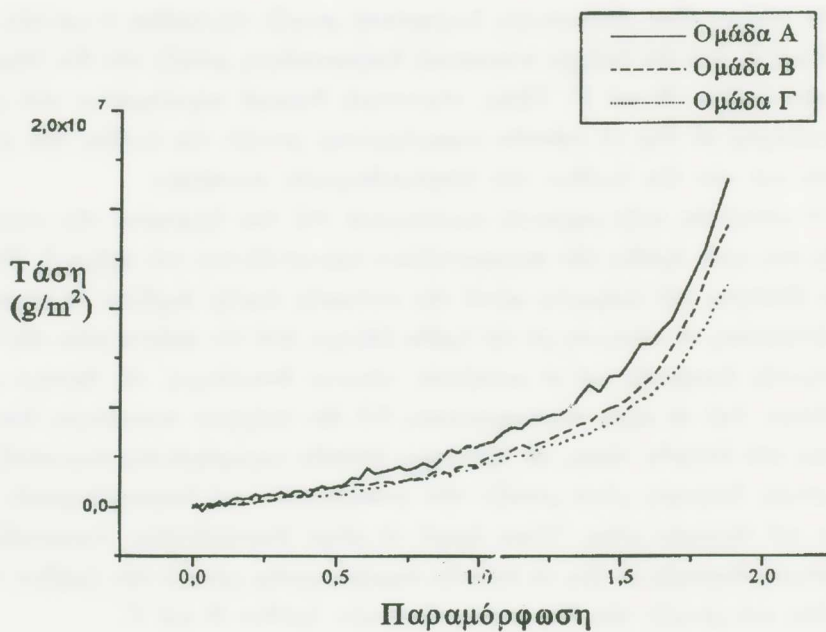
Οι μεταβολές στην μηχανική συμπεριφορά του άνω ήμιμορίου της κοιλιακής άορτης στις τρεις ομάδες των πειραματοζώων παρουσιάζονται στο σχήμα 6. Οι ελαστικές ιδιότητες του τμήματος αυτού της κοιλιακής άορτης αρχίζουν να παρουσιάζουν αποκλίσεις, σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου, από τον πρώτον μήνα της υπερλιπιδαιμικής διατροφής και οι μεταβολές γίνονται έντονότερες τον δεύτερο μήνα. Ειδικότερα, ενώ σε τιμές παραμορφώσεως 0.5 δεν υπάρχουν στατιστικές διαφοροποιήσεις στα επίπεδα τάσης, σε υψηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης παρουσιάζονται στατιστικές διαφορές μόνον μεταξύ των φυσιολογικών και υπερλιπιδαιμικών κουνελιών του δεύτερου μήνα. "Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, παρουσιάζονται στατιστικές διαφορές σε όλα τα επίπεδα παραμόρφωσης μεταξύ των ομάδων Α και Γ καθώς και μεταξύ των δύο υπερλιπιδαιμικών ομάδων Β και Γ.

Στο σχήμα 7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης του κάτω ήμιμορίου της κοιλιακής άορτης των τριών ομάδων των πειραματοζώων. Παρατη-





Σχῆμα 6: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης τοῦ ἄνω ἡμίσεος τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς ἀπὸ τὶς τρεῖς ομάδες.



Σχῆμα 7: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης τοῦ κάτω ἡμίσεος τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς ἀπὸ τὶς τρεῖς ομάδες

ρεϊται ότι οι μηχανικές ιδιότητες μεταβάλλονται από τον πρώτο μήνα τής υπερλιπιδαιμικής διατροφής, ενώ οι διαφορές γίνονται εντονότερες τον δεύτερο μήνα. Σε χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης δεν παρουσιάζονται στατιστικές διαφορές μεταξύ των τριών ομάδων. Με την αύξηση όμως τής στάθμης παραμόρφωσης, ή ομάδα Γ διαφοροποιείται από τις ομάδες Α και Β. "Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, στατιστικές διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται σε όλα τα επίπεδα παραμορφώσεων μεταξύ και των τριών ομάδων.

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται οι τιμές για την ενέργεια ελαστικότητας των διαφόρων ήμιμορίων τής θωρακικής και κοιλιακής άορτῆς των τριών ομάδων. Από

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: 'Ενέργεια 'Ελαστικότητας (KJ/m<sup>3</sup>) (μέση τιμή ± σταθερό σφάλμα) των άορτικών ήμιμορίων των τριών ομάδων

#### ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΟΣ

	ΑΝΩ ΗΜΙΜΟΡΙΟ ΘΩΡ. ΑΟΡΤΗΣ	ΚΑΤΩ ΗΜΙΜΟΡΙΟ ΘΩΡ. ΑΟΡΤΗΣ	ΑΝΩ ΗΜΙΜΟΡΙΟ ΚΟΙΛ. ΑΟΡΤΗΣ	ΚΑΤΩ ΗΜΙΜΟΡΙΟ ΚΟΙΛ. ΑΟΡΤΗΣ
ΟΜΑΔΑ Α	57±9	63±9	71±7	76±7
ΟΜΑΔΑ Β	52±8	48±7	58±8	59±7
ΟΜΑΔΑ Γ	47±6	51±8	41±5	47±7

τον πίνακα αυτόν παρατηρείται ότι στην ομάδα φυσιολογικών πειραματοζώων, ή ενέργεια ελαστικότητας αυξάνεται από το άνω ήμιμόριο τής θωρακικής άορτῆς προς το τελικό ήμιμόριο τής κοιλιακής άορτῆς. 'Επίσης, είναι έμφανές ότι με την χορήγηση υπερλιπιδαιμικής διατροφής παρατηρείται μείωση στην ενέργεια ελαστικότητας, που είναι περισσότερο έμφανής στην κοιλιακή άορτή, λιγότερο έμφανής στο κάτω ήμιμόριο τής θωρακικής άορτῆς και δέν ύποσημειώνεται στο άνω ήμιμόριο τής θωρακικής άορτῆς. Οι διαφορές αυτές στις τιμές ενέργειας ελαστικότητας δέν παρουσιάζουν στατιστικές διαφορές.

#### Διερεύνηση τών αποτελεσμάτων

'Η έναπόθεση χοληστερίνης και λιποειδών στον έσω χιτώνα του άρτηριακού τοιχώματος έπιφέρει ιστοχημικές παθολογοανατομικές και μορφολογικές μεταβολές, οι όποιες κυρίως εϋθύνονται για τις άθηρωματικές αλλοιώσεις, με κύριον εκπρόσωπο την άθηρωματική πλάκα. 'Η σταδιακή αύξηση του μεγέθους τής πλάκας οδηγεί σε στένωση του αϋλου του άγγείου προκαλώντας λόγω τής ελάττωσης τής αίματικής

ροῆς ἰσχυαίμια ἢ καὶ νέκρωση τῶν ἰστῶν. Ἐπιπλέον, ρήξη τῆς ἀθηρωματικῆς πλάκας εὐθύνεται, κατὰ τὸ μεγαλύτερο ποσοστό, γιὰ τὴν αἰφνίδια ἀπόφραξη τῶν στεφανιαίων ἀρτηριῶν καὶ τὴν αὐξημένη θνητότητα ἀπὸ ὀξὺ ἔμφραγμα τοῦ μυοκαρδίου, ἐνῶ ρήξεις τῶν ἀνευρυσμάτων ἀποτελοῦν ἐπιπλοκὴ μὲ ἐξαιρετικὰ ὑψηλὴ θνητότητα. Κατὰ συνέπεια, ἡ μελέτη τῶν μηχανικῶν χαρακτηριστικῶν στὶς διάφορες τοπογραφικὲς περιοχὲς τῆς θωρακικῆς καὶ κοιλιακῆς ἀορτῆς καθὼς καὶ ἡ παρακολούθηση τῶν μεταβολῶν τῶν χαρακτηριστικῶν αὐτῶν ποὺ ἐπέρχονται στὴν ἐξελικτικὴ πορεία τῆς ἀθηρωματικῆς νόσου παρουσιάζει ἰδιαίτερο ἐνδιαφέρον.

Στὴν ἐργασία αὕτη μελετήθηκαν τὰ μηχανικὰ χαρακτηριστικὰ τῶν διαφόρων ἡμιμορίων τῆς θωρακικῆς καὶ κοιλιακῆς ἀορτῆς σὲ φυσιολογικὰ πειραματόζωα, ἀλλὰ καὶ σὲ ζωικὰ πρότυπα στὰ ὁποῖα ἡ ἀθηρωματικὴ νόσος ἦταν σὲ ἐξελικτικὴ πορεία. Ἀπὸ τὴν μελέτη τῆς τάσης-παραμόρφωσης τῶν τοιχωμάτων παρατηρήθηκε ὅτι ἡ μηχανικὴ συμπεριφορὰ τῶν διαφόρων ἀορτικῶν τμημάτων διαφέρει ἀναλόγως μὲ τὴν τοπογραφικὴ τους θέση. Στὴν ὁμάδα τῶν φυσιολογικῶν πειραματοζώων, τὰ δύο ἡμιμόρια τῆς θωρακικῆς καὶ τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς παρουσίασαν διαφορὲς στὶς μηχανικὲς τους ιδιότητες, μὲ στατιστικὲς διαφοροποιήσεις ὅχι τόσο στὰ μετὰξὺ τους γειτονικὰ τμήματα, ὅσο μετὰξὺ τῶν ἡμιμορίων τῆς θωρακικῆς καὶ τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς. Συγκεκριμένως, παρατηρήθηκε ἐλάττωση τῆς δομικῆς ἀκαμψίας κατὰ τὴν διαδρομὴ τοῦ ἀγγείου ἀπὸ τὴν ἀορτικὴ βαλβίδα πρὸς τὸ σημεῖο διχασμοῦ τῶν λαγόνων, ὅπως αὐτὸ ἐκφράζεται ἀπὸ τὸ μέτρο τῆς ἐλαστικότητος, γεγονὸς ποὺ σημαίνει ὅτι τὰ περιφερικὰ τμήματα τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς ἔχουν μεγαλύτερη ἐλαστικότητα ἀπὸ τὰ κεντρικὰ τῆς θωρακικῆς ἀορτῆς. Ἡ διαπίστωση αὕτη, ποὺ πιθανὸν νὰ εὐρίσκεται σὲ ἀντίφαση μὲ τὶς γνώσεις ἀπὸ τὴν συμμετοχὴ τῆς ἀνιούσας θωρακικῆς ἀορτῆς στὴν ρύθμιση τῆς αἱματικῆς ροῆς στὴν διαστολικὴ φάση τῆς καρδιακῆς λειτουργίας, ὀφείλεται, κατὰ πᾶσα πιθανότητα, στὶς μεγάλες διαφορὲς τοῦ πάχους τοῦ ἀορτικοῦ τοιχώματος στὸ συγκεκριμένο ζωικὸ πρότυπο ποὺ χρησιμοποιήθηκε γιὰ τὴν μελέτη αὕτη. Ὡς γνωστό, στὸν ὑπολογισμὸ τοῦ μέτρου ἐλαστικότητος ἡ παράμετρος πάχους τοῦ τοιχώματος ὑπαισέρχεται στὸν παρονομαστή.

Ὁ ἐμπλουτισμὸς τῆς τροφῆς τῶν πειραματοζώων μὲ χοληστερόλη καὶ ἡ συνέπεια τοῦ γεγονότος αὐτοῦ, πρόκλησις ἀθηρωματικῶν ἀλλοιώσεων στὸ τοίχωμα τῶν ἀγγείων τους, προκάλεσε μεταβολὲς τῶν μηχανικῶν χαρακτηριστικῶν τῶν ἀγγείων ποὺ ἦταν ἐκδηλές ἀπὸ τὸν πρῶτο μῆνα καὶ ἔγιναν πλεόν ἔντονες τὸν δεῦτερο μῆνα. Τὰ δύο ἡμιμόρια τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς ἐπηρεάστηκαν περισσότερο ἀπὸ τὸ κάτω ἡμιμόριο τῆς θωρακικῆς ἀορτῆς, ἐνῶ τὸ ἄνω τμήμα αὐτῆς ἔμεινε ἀνεπηρέαστο. Ἡ ἐκλεκτικὴ αὕτη μεταβολὴ τῶν μηχανικῶν χαρακτηριστικῶν τῆς κοιλιακῆς ἀορτῆς μπορεῖ νὰ ἀποδοθεῖ σὲ αἰμοδυναμικοὺς παράγοντες, ὅπως εἶναι ἡ δημιουργία δια-



τμητικών τάσεων και ή στροβιλώδης ροή στην περιοχή αυτή, αλλά και σέ μηχανισμούς απορρόφησης λιποειδών μέσα στο αρτηριακό τοίχωμα, στοιχειά τὰ ὁποῖα εἶναι συχνά συνδεδεμένα με τήν ἐξελικτική πορεία τῆς ἀθηρωματικῆς νόσου.

Οἱ δομικές και οἱ μηχανικές μεταβολές τοῦ ἀορτικοῦ τοιχώματος πού παρατηρήθηκαν ἔχουν ἐπιπτώσεις σέ ὁρισμένες παράμετρους ὅπως εἶναι ή ἐνέργεια ἐλαστικότητας και ή δομική δυσκαμψία τοῦ ἀρτηριακοῦ τοιχώματος. Ἡ ἐνέργεια ἐλαστικότητας ἀντιπροσωπεύει τήν ἐλαστική ἐνέργεια πού συσσωρεύεται στά δομικά στοιχειά τοῦ ἀγγειακοῦ τοιχώματος κατὰ τήν διάρκεια τῆς παραμόρφωσης, ἐνῶ ή δομική δυσκαμψία ἀποτελεῖ μέτρο πού ἐκφράζει τήν σκληρότητα τοῦ τοιχώματος.

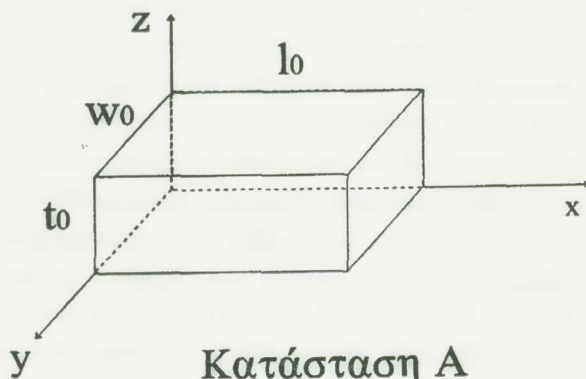
Ἀπό τήν παρούσα μελέτη βρέθηκε ὅτι ή δομική και μηχανική δυσκαμψία τοῦ ἀορτικοῦ τοιχώματος μειώνεται σέ ὅλα τὰ ἐπίπεδα παραμόρφωσης, στην ἐξελικτική πορεία τῆς πειραματικῆς ἀθηρωμάτωσης. Ἐπιπλέον, παρατηρήθηκε ὅτι και ή ἐνέργεια ἐλαστικότητας ἐλαττώθηκε στίς δύο ὁμάδες τῶν ὑπερλιπιδαιμικῶν πειραματοζῶων. Ἡ ὑπολογιζόμενη ἐλαστική ἐνέργεια στην ὁμάδα Α αὐξάνεται κατὰ τήν διαδρομή ἀπό τήν ἀορτική βαλβίδα ( $57.1 \text{ KJ/m}^3$ ) πρὸς τήν περιοχή διχαλώσεως τῶν λαγόνιων ἀγγείων ( $75.7 \text{ KJ/m}^3$ ). Με τήν ἐξέλιξη τῆς νόσου, ή ἐλαστική ἐνέργεια μειώνεται περισσότερο στην κοιλιακή (39 %) ἀπὸ ὅ,τι στην θωρακική ἀορτή (18.7%). Αὐτό, προφανῶς ἐρμηνεύεται ἀπὸ τὸ γεγονός ὅτι κατὰ τήν διάρκεια τῆς ὑπερλιπιδαιμικῆς διατροφῆς, ἐπέρχονται σημαντικές μεταβολές στην ἀρχιτεκτονική δομή τοῦ ἀγγείου καὶ ὡς ἀποτέλεσμα αὐτῶν αὐτὴ δομική συστατικά του.

Ἡ ἐναπόθεση λιποειδῶν και ή ὑπερπλασία τῶν λείων μυϊκῶν κυττάρων τῆς ἀορτῆς ἐπιφέρει μεταβολές στίς μηχανικές ιδιότητες τῶν δύο βασικῶν ἐλαστικῶν συστατικῶν τοῦ ἀγγειακοῦ τοιχώματος πού εἶναι ή ἐλαστίνη και τὸ κολλαγόνο. Οἱ μεταβολές αὐτὲς φαίνεται ὅτι μειώνουν τήν ἐπιμέρους ἐλαστικότητα τῶν δύο αὐτῶν βασικῶν δομικῶν στοιχείων και ἐπηρεάζουν κατ' ἐπέκταση τήν συνολική ἐλαστικότητα τοῦ ἀγγειακοῦ τοιχώματος. Εἶναι ἀξιοσημείωτο, σέ ἀντίθεση με ὅ,τι συμβαίνει στά φυσιολογικά ζῶα, ὅτι ή κοιλιακή ἀορτή τῶν ὑπερλιπιδαιμικῶν ζῶων ἐπιβαρύνεται περισσότερο με ἀπώλεια τῶν ἐλαστικῶν χαρακτηριστικῶν της, γεγονός πού ἀποτελεῖ μίαν τῶν κυρίων αἰτιῶν διὰ τήν μεγαλύτερη συχνότητα ἐμφάνισης ἀνευρυσμάτων στην περιοχή αὐτήν.

Ἀπὸ τὰ ἀποτελέσματα τῆς παρούσης μελέτης συνάγεται ὅτι στά φυσιολογικά πειραματόζῳα τὸ τοίχωμα τοῦ ἀορτικοῦ δένδρου δὲν παρουσιάζει ὁμοίμορφες μηχανικές ιδιότητες. Ἡ πρόκληση ὅμως ἀθηρωματικῶν ἀλλοιώσεων, ἔστω και στά πρῶιμα και ἀρχικά στάδια ἐξέλιξης τῆς νόσου, προκαλεῖ σημαντικές μεταβολές στην μηχανική συμπεριφορά τοῦ τοιχώματος, με ἀποτέλεσμα ή κοιλιακή ἀορτή νὰ παρουσιάζει σημαντική ἀπώλεια τῶν ἐλαστικῶν της χαρακτηριστικῶν και νὰ ὑπόκειται εὐκολότερα σέ παραμορφώσεις ἀπὸ τίς ἐνδοαυλικές και ἐξωτερικές αἰμοδυναμικές και μηχανικές ἐπιβαρύνσεις.

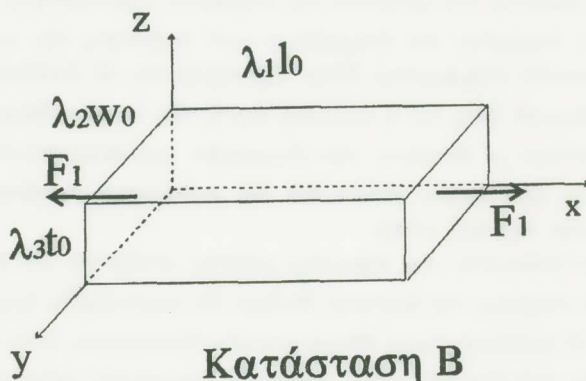
## Παράρτημα

Θεωρούμε την φυσική κατάσταση Α ενός σώματος με τη μορφή ενός παραλληλεπιπέδου διαστάσεων  $l_0, w_0, t_0$  τοποθετημένο σε ένα σύστημα ὀρθογωνίων καρτεσιανῶν συντεταγμένων  $(x, y, z)$  ὅπως φαίνεται στο σχῆμα 8α. Ἐστω, ὅτι δύναμη  $F_1$ , κατὰ τὴν διεύθυνση τοῦ ἄξονα  $x$  ἀσκεῖται στὸ σῶμα. Ἡ δύναμη αὐτὴ προκαλεῖ ἐπι-



(α)

μήκυνση τοῦ σώματος κατὰ τὸν ἄξονα  $x$  ὅπως φαίνεται στὸ σχῆμα 8β. Στὴν κατάσταση αὐτὴ (Β) τὸ σῶμα ἔχει διαστάσεις  $\lambda_1 l_0, \lambda_2 w_0, \lambda_3 t_0$  ὅπου  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , εἶναι οἱ ἐπιμηκύνσεις οἱ ὁποῖες περιγράφουν τὴν παραμόρφωση ἀπὸ τὴν φάση Α στὴν Β. Ἐὰν οἱ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  διαφέρουν ἐλάχιστα ἀπὸ τὴν μονάδα, τότε ἡ παραμόρφωση ὀνομά-



(β)

Σχῆμα 8. Οἱ δύο καταστάσεις ἑνὸς σώματος. Ἡ κατάσταση Α (8α) εἶναι ἡ φυσικὴ κατάσταση τοῦ σώματος. Στὴν κατάσταση (8β) ἀσκεῖται δύναμη  $F_1$ .

ζεται πεπερασμένη. Ο άρτηριακός ιστός όμως παρουσιάζει μεγάλες παραμορφώσεις, και η σχέση μεταξύ της δύναμης  $F_1$  και της επιμήκυνσης  $\lambda_1$  είναι μη-γραμμική.

Στην κατάσταση B τοῦ σώματος μπορούν να όριστούν οι ακόλουθες τάσεις και παραμορφώσεις. Σημειώνουμε ως  $s_1$  την τάση Kirchhoff, ή όποία ίσούται με τὸ λόγο της δύναμης  $F_1$  με την επιφάνεια της διατομής τοῦ σώματος στην κατάσταση A, έτσι ώστε

Όμοίως σημειώνουμε ως  $\sigma_1$  την τάση Cauchy, ή όποία ίσούται με τὸ λόγο της δύναμης  $F_1$  με την επιφάνεια της διατομής τοῦ σώματος στην κατάσταση B. Έτσι,

Στην κλασσική θεωρία τῶν μη-πεπερασμένων παραμορφώσεων ὁ διαχωρισμός μεταξύ τῶν δύο παραπάνω τάσεων δέν είναι απαραίτητος. Έπειδή η άρχική επιφάνεια της διατομής είναι ευκολότερο να υπολογιστεῖ, για τὰ μηχανολογικά ὑλικά χρησιμοποιεῖται κυρίως η τάση Kirchhoff. Όταν εμφανίζονται μεγάλες μεταβολές στην επιφάνεια της διατομής κατά την παραμόρφωση, τότε υπολογίζεται συνήθως η τάση Cauchy.

Όσον άφορᾷ την παραμόρφωση τοῦ σώματος μεταξύ τῶν καταστάσεων A και B χρησιμοποιούνται ένας μεγάλος αριθμός όρισμῶν. Οί ίδιες οί επιμήκυνσεις απεικονίζουν τὸν βαθμὸ παραμόρφωσης τοῦ σώματος. Οί τιμές τους είναι ἴσες με την μονάδα στην κατάσταση A. Στην κλασσική θεωρία ἐλαστικότητας, η πραγματική παραμόρφωση όρίζεται ως

Στην γενικευμένη θεωρία ἐλαστικότητας, χρησιμοποιούνται ἄλλοι όρισμοί ὅπως η παραμόρφωση Hencky, η παραμόρφωση Green-St. Venant και η παραμόρφωση Almansi-Hamel, οί όποιοι στην περίπτωση τῶν πεπερασμένων παραμορφώσεων συμπίπτουν με τὸν όρισμὸ της πραγματικῆς παραμόρφωσης. Ο όρισμὸς της παραμόρφωσης Green-St. Venant  $\gamma_1$  δίνεται ἀπὸ την σχέση:

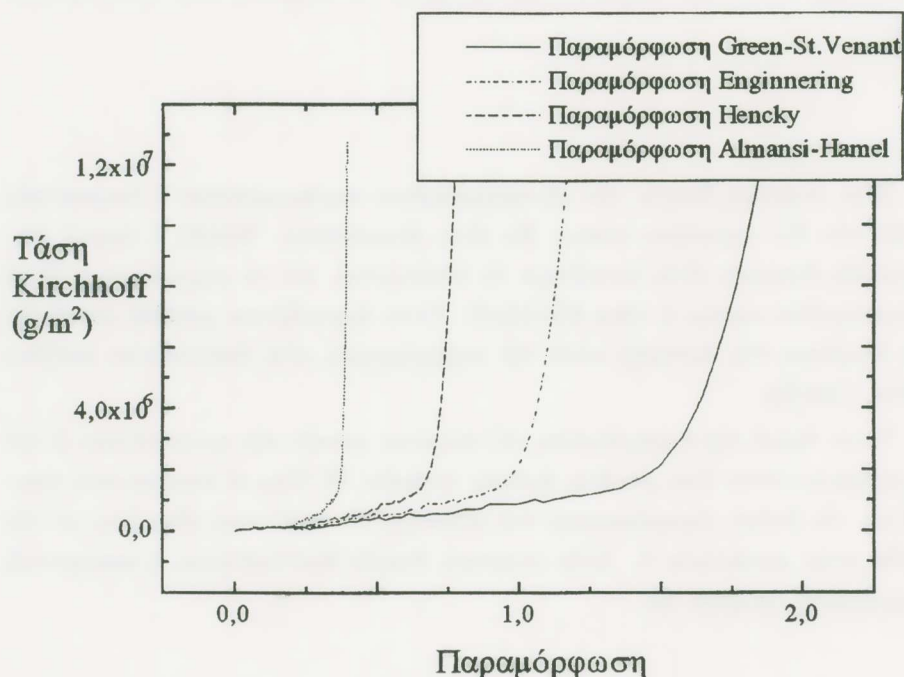


ἐνῶ ἡ παραμόρφωση Almansi-Hamel  $\mu_1$  καὶ ἡ παραμόρφωση Hencky  $\nu_1$  ὀρίζονται ὡς ἑξῆς

$$\mu_1 = \frac{1}{2}(1 - \lambda_1^{-2})$$

$$\nu_1 = \ln \lambda_1$$

Μὲ βάση τοὺς δύο ὁρισμοὺς γιὰ τὴν τάση, καὶ τοὺς τέσσερις ὅσον ἀφορᾷ τὴν παραμόρφωση, μπορεῖ κανεὶς νὰ διαμορφώσει ὁκτὼ διαφορετικοὺς συνδυασμοὺς διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης. Τὸ σύνολο αὐτῶν τῶν συνδυασμῶν ἀπεικονίζεται στὰ σχήματα 9 καὶ 10 στὴν περίπτωση πειράματος μονοαξονικοῦ ἐφελκυσμοῦ.



Σχῆμα 9: Μία ομάδα ἀπὸ καμπύλες τάσης Kirchhoff-παραμόρφωσης, προερχόμενη ἀπὸ πείραμα μονοαξονικοῦ ἐφελκυσμοῦ μὲ βάση διαφορετικὲς ἐκλογές γιὰ τὴν παραμόρφωση.

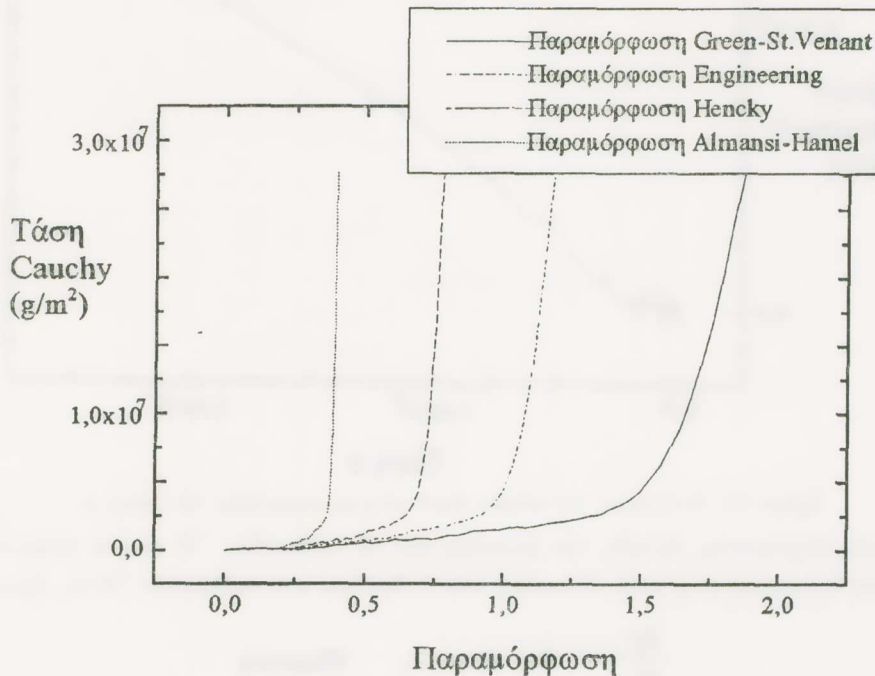
Ὅπως παρατηρεῖται, οἱ καμπύλες αὐτὲς εἶναι ξεχωριστές, καὶ ἀπὸ αὐτὲς προκύπτουν οἱ διάφοροι συντελεστὲς ἐλαστικότητος.

Τὰ δεδομένα τάσης-παραμόρφωσης μποροῦν νὰ ἀπεικονιστοῦν φαινομενολογικῶς μὲ μαθηματικὲς συναρτήσεις, ὅπως τὰ πολυώνυμα. Τὰ ἀποτελέσματα τῶν

δοκιμῶν με διαφορετικές τάξεις πολυωνύμων ἔδειξαν ὅτι τὰ καλύτερα ἀποτελέσματα δίνονται ἀπὸ συναρτήσεις τετάρτου βαθμοῦ τῆς μορφῆς

$$\sigma = A + B\gamma + C\gamma^2 + D\gamma^3 + F\gamma^4$$

ὅπου A, B, C, D, F εἶναι σταθερές.



Σχῆμα 10: Μία ομάδα ἀπὸ καμπύλες τάσης Cauchy-παραμόρφωσης, προερχόμενη ἀπὸ πείραμα μονοαξονικοῦ ἐφελκυσμοῦ με βάση διαφορετικές ἐκλογές γιὰ τὴν παραμόρφωση.

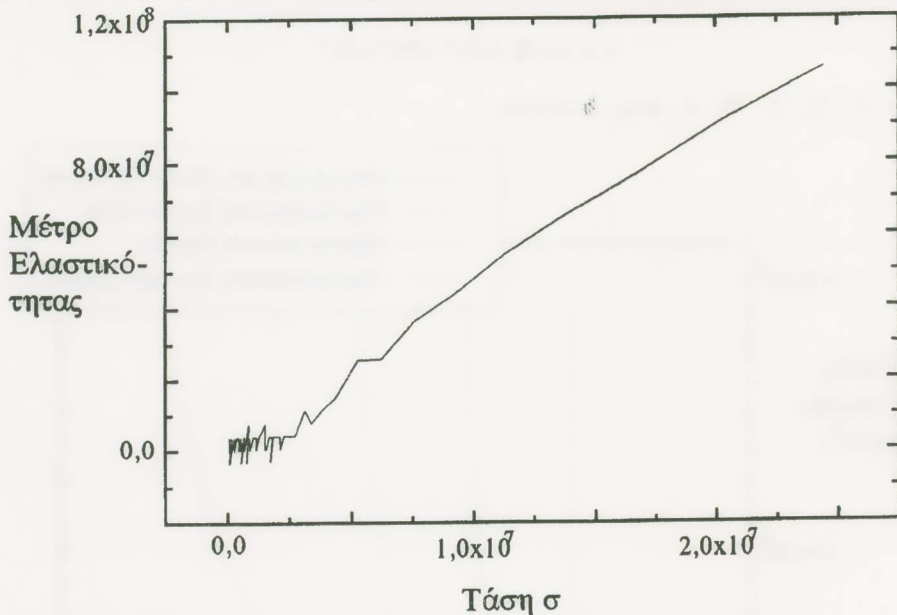
Ἀπὸ τὶς καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης προκύπτουν με παραγωγή, καμπύλες μέτρου ἐλαστικότητος-παραμόρφωσης, σύμφωνα με τὴν σχέση

$$E = \frac{d\sigma}{d\gamma} = E(\gamma)$$

$$E(\gamma) = B + 2C\gamma + 3D\gamma^2 + 4F\gamma^3$$

Ἀπὸ τὴν παραπάνω σχέση προκύπτει ὅτι τὸ μέτρο ἐλαστικότητος εἶναι συνάρτηση τῆς τάσης, δηλαδὴ  $E = E(\sigma)$ . Διαγράμματα μέτρου ἐλαστικότητος-τάσης τὰ ὁποῖα ὑπολογίστηκαν ἔδειξαν ὅτι ἡ σχέση τῶν δύο εἶναι γραμμική, ὅπως φαίνεται

στο σχῆμα 11. Ουσιαστικῶς, τὸ σχῆμα 11 ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο γραμμικὲς σχέσεις, ἡ καθεμία ἀπὸ τὲς ὁποῖες ἀντιστοιχεῖ σὲ ἓνα ἀπὸ τὰ δύο ἐνεργὰ συστατικὰ τοῦ ἄρτη-



Σχῆμα 11: Διάγραμμα τοῦ μέτρου ἐλαστικότητος συναρτῆσαι τῆς τάσης σ.

ριακοῦ τοιχώματος, δηλαδὴ τὴν ἐλαστίνη καὶ τὸ κολλαγόνον. Ἡ πρώτη γραμμικὴ σχέση ἀνταποκρίνεται στὴν ἐλαστίνη, ἐνῶ ἡ δεύτερη στὸ κολλαγόνον. Ἔτσι, ἔχουμε

$$\frac{d\sigma}{d\gamma} = A + B\sigma, \quad 0 < \gamma < \gamma_1, \quad \text{Ἐλαστίνη}$$

$$\frac{d\sigma}{d\gamma} = C + D\sigma, \quad \gamma_1 < \gamma < \gamma_f, \quad \text{Κολλαγόνον}$$

ὅπου A, B, C, D εἶναι σταθερές,  $\gamma_1$  εἶναι τὸ ἐπίπεδο παραμόρφωσης μετὰ τὸ ὁποῖο εἰσερχόμαστε στὴν περιοχὴ δράσης τοῦ κολλαγόνου, καὶ  $\gamma_f$  εἶναι ἡ παραμόρφωση πὺ ἀντιστοιχεῖ σὲ ἀστοχία τοῦ ὕλικου. Ὁλοκλήρωση τῶν παραπάνω σχέσεων ὁδηγεῖ στὰ ἑξῆς ἀποτελέσματα.

$$\sigma = \frac{A}{B}(e^{B\gamma} - 1), \quad 0 < \gamma < \gamma_1, \quad \text{Ἐλαστίνη}$$

$$\sigma = \frac{C}{D}(e^{D\gamma} - 1), \quad \gamma_1 < \gamma < \gamma_f, \quad \text{Κολλαγόνον}$$

Παρατηρεῖ λοιπὸν κανεὶς ὅτι τὰ δεδομένα τάσης-παραμόρφωσης μποροῦν νὰ ἀπεικονιστοῦν καὶ σὲ ἐκθετικὴ μορφή σύμφωνα μὲ τὲς παραπάνω μαθηματικὲς σχέσεις.



## S U M M A R Y

**Mechanical properties of the aorta duct, during the evolution of experimentally induced atherosclerosis**

The elastic properties of the aorta are influenced by atherosclerosis. The stress-strain relationship, the elastic energy and the local alterations of the aortic wall are not well known. Twenty four white male New Zealand rabbits were divided into three groups. Regular food was provided in group A ( $n=4$ ) and food enriched with cholesterol in groups B ( $n=10$ ) and C ( $n=10$ ). Animals in groups B and C were sacrificed after 1 and 2 months respectively. The aorta, from the aortic valve to the iliac bifurcation, was removed and divided into two thoracic and two abdominal segments. Mechanical analysis was performed with Vitrodyne V1000 uniaxial tension machine. The stress-strain curves and the estimated elastic modulus in group A showed that the distal parts of the thoracic and abdominal aorta were significantly stiffer than the proximal ones ( $p < 0.05$ ). With the progression of atherosclerosis in groups B and C, the same distribution of elastic modulus was noticed along with a significant decrease in the stiffness of the distal abdominal segment ( $p < 0.05$ ). The elastic energy in group A increased from the aortic valve ( $57.1 \text{ KJ/m}^3$ ) to the iliac bifurcation ( $75.7 \text{ KJ/m}^3$ ). With the progression of the disease in groups B and C the elastic energy decreased more in the abdominal (39%) than in the thoracic aorta (18.7%). It is, thus, concluded that the mechanical behaviour of the wall of the aortic tree varied within the different topographical regions, with the distal parts of the thoracic and abdominal aorta being stiffer than the proximal ones. Progression of the atherosclerotic disease impaired the elastic properties of the aorta significantly more in the distal segment of the abdominal aorta, than in the other segments.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Rindfleisch E. Zur entstehung und heilung des Aneurysma Dissecans Aortae. Virchows Arch Path Anat Physiol. 1873; 131:374.
2. Roy CS. Elastic properties of arterial wall. J Physiol. Lond. 1880; 3: 125-159.
3. Greendyke RM. Traumatic rupture of the aorta. J Am Med Ass. 1966; 195: 527-530.
4. Bergel DH. Static elastic properties of the arterial wall. J Physiol. Lond. 1961; 156: 445-457.
5. Patel DJ and Vaishnav RN. Basic Hemodynamics and Its Role in Disease Processes, University Park Press, Baltimore, 1980.

6. Fung YC. Biomechanics. Motion, Flow, Stress, and Growth, Springer, New York, 1990, 353-381.
7. Fung YC. Biomechanics. Mechanical Properties of Living Tissues, Springer, New York, 1981, 261-301.
8. Milnor WR. Properties of the Vascular Wall. In Hemodynamics. 2nd ed., Williams and Wilkins, Baltimore, 1990: 58-95.
9. Nichols WW and O'Rourke MF, Properties of the arterial wall. In Blood Flow in Arteries 3rd ed., Lee and Febiger, Philadelphia, 1990: 77-114.
10. Hayashi K. Experimental Approaches on Measuring the Mechanical Properties and Constitutive Laws of Arterial Walls. ASME J. Biomech. Eng. 1993; 115: 481-488.
11. Hayashi K., Rato M., Handa H, Moritake K. Biomedical Study of Constitutive Laws of Vascular Walls. Experimental Mechanics. 1974; 14: 440-444.
12. Loree HM, Grodzinsky AJ, Park SY, Gibson LJ, Lee RT. Static Circumferential Tangential Modulus of Human Atherosclerotic Tissue. J Biomechanics. 1994; 27: 195-204.
13. Mohan D, Melvin JW. Failure properties of passive human aortic tissue I-uniaxial tension tests. J Biomechanics. 1982; 15: 887-902.
14. Green AE and Zerna W., Theoretical Elasticity. Oxford University Press, 1954, London.