

# Σκελετικές Θεωρήσεις για την Κίνηση

## ΣΤΟΧΟΙ

Μετά τη μελέτη αυτού του κεφαλαίου, ο αναγνώστης θα είναι σε θέση:

- ▶ Να γνωρίζει το πώς οι μηχανικές ιδιότητες μιας δομής (κατασκευής) μπορούν να εκφραστούν με βάση τη σχέση τάση-τροπή.
- ▶ Να γνωρίζει την τάση, την τροπή, την ελαστική περιοχή, την πλαστική περιοχή, το σημείο διαρροής, το σημείο θραύσης και το συντελεστή ελαστικότητας.
- ▶ Να περιγράφει τη διαφορά μεταξύ ενός ελαστικού και ιξωδοελαστικού υλικού.
- ▶ Να αντιλαμβάνεται τις διαφορές μεταξύ των εύθραυστων υλικών, δύσκαμπτων υλικών και υλικών υποχώρησης.
- ▶ Να απαριθμεί τις λειτουργίες του οστικού ιστού που αποτελεί το σκελετικό σύστημα.
- ▶ Να περιγράφει τη σύνθεση του οστικού ιστού και τα χαρακτηριστικά του φλοιώδους και σπογγώδους οστού.
- ▶ Να ορίζει τους τύπους των οστών του σκελετικού συστήματος και να περιγράφει το ρόλο που παίζει κάθε τύπος οστού στην ανθρώπινη κίνηση ή στήριξη.
- ▶ Να περιγράφει πως σχηματίζεται ο οστικός ιστός και τις διαφορές μεταξύ μοντελοποίησης και αναδιαμόρφωσης.
- ▶ Να εξηγεί την επίδραση της κινητικής δραστηριότητας και της αδράνειας στο σχηματισμό των οστών.
- ▶ Να εξηγεί την οστεοπόρωση και να σχολιάζει την ανάπτυξη της οστεοπόρωσης.
- ▶ Να περιγράφει τη δύναμη και τη σκληρότητα του οστού, καθώς και τις ανισότροπες και ιξωδοελαστικές ιδιότητες των οστών.
- ▶ Να αναφέρει τους ακόλουθους τύπους φορτίων που πρέπει να δεχτεί το ανθρώπινο οστό και να δίνει παράδειγμα για κάθε είδος φορτίου στο σκελετικό σύστημα: σύνθλιψης, τάσης, διάτμησης, κάμψης, στρέψης.
- ▶ Να περιγράφει τα κατάγματα τάσης και άλλους γνωστούς τραυματισμούς του σκελετικού συστήματος και να εξηγεί τα φορτία πρόκλησης των τραυματισμών.
- ▶ Να περιγράφει τους τύπους των χόνδρων και τις λειτουργίες τους στο σκελετικό σύστημα.
- ▶ Να περιγράφει τη λειτουργία των συνδέσμων του σκελετικού συστήματος.
- ▶ Να περιγράφει όλα τα χαρακτηριστικά της διαρθρικής άρθρωσης, όπως και τους παράγοντες που επιδρούν στη σταθερότητα της άρθρωσης και ορισμένα παραδείγματα τραυματισμού.
- ▶ Να απαριθμεί τους επτά διαφορετικούς τύπους διαρθρικών αρθρώσεων και να εξηγεί παραδείγματα για τον καθένα τύπο.

**ΣΤΟΧΟΙ** *συνέχεια*

- ▶ Να περιγράφει τα χαρακτηριστικά των συναρθρώσεων και των αμφιαρθρώσεων και να εξηγεί αντίστοιχα παραδείγματα.
- ▶ Να περιγράφει την οστεοαρθρίτιδα και να σχολιάζει την ανάπτυξή της.
- ▶ Να περιγράφει τη χρήση cross-friction massage, με σκοπό τη βελτίωση της κυκλοφορία στις μυϊκές ίνες και στους τένοντες
- ▶ Να περιγράφει τα χαρακτηριστικά του συνδρόμου Ehlers–Danlos και να απαριθμεί ορισμένους τρόπους με τους οποίους να διαχειρίζεται η κατάσταση.

**ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ****ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΙΣΤΩΝ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ**

Βασική δομική ανάλυση

**ΒΙΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΟΣΤΟΥ**

Λειτουργία οστικού ιστού

Σύνθεση οστικού ιστού

Μακροσκοπική δομή του οστού

Σχηματισμός οστού

Bone Formation

**ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΟΣΤΩΝ**

Δύναμη και σκληρότητα του οστού

Φορτία που εφαρμόζονται στα οστά

Κατάγματα κόπωσης

**ΧΟΝΔΡΟΣ**

Αρθρικός χόνδρος

Ινώδης χόνδρος

**ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ****ΟΣΤΕΩΔΕΙΣ ΑΡΘΡΩΣΕΙΣ**

Διαρθρώσεις

Άλλοι τύποι αρθρώσεων

Οστεοαρθρίτιδα

**ΚΛΙΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Cross - Friction Massage

Ehlers–Danlos Syndrome

**ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΙΣΤΩΝ ΤΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ**

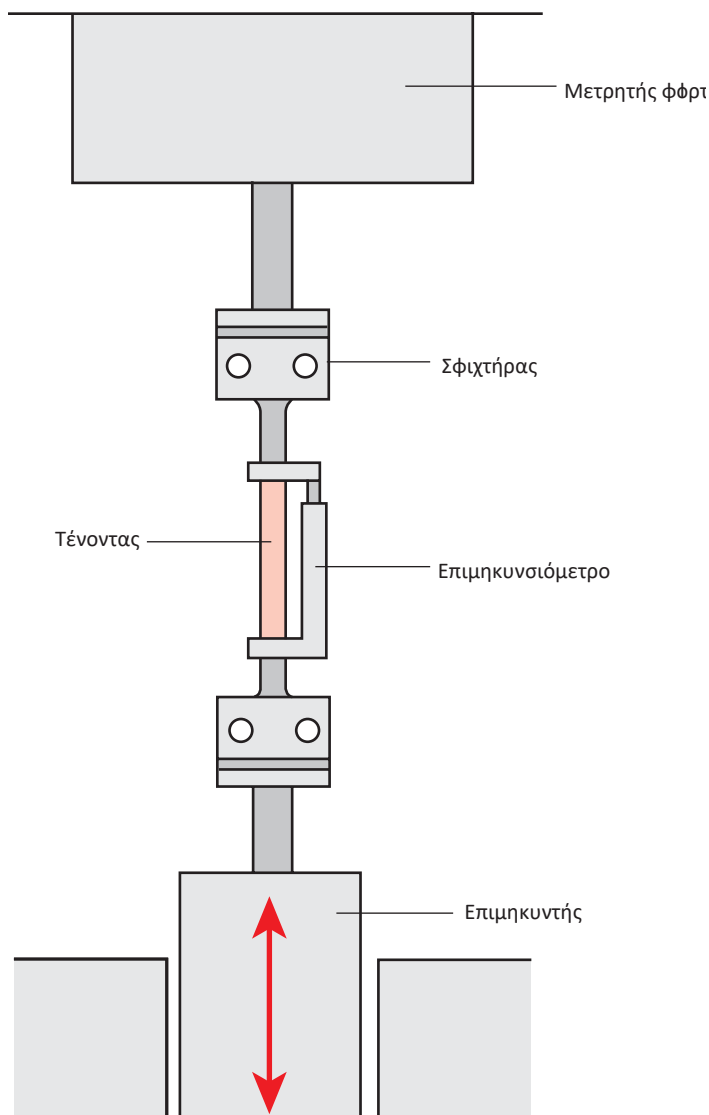
Τα οστά, οι τένοντες, οι σύνδεσμοι και μύες είναι ορισμένα από τα βασικά δομικά στοιχεία που συνθέτουν το ανθρώπινο σώμα. Μεγάλο ενδιαφέρον για τους ειδικούς της Βιο-μηχανικής παρουσιάζουν οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των ιστών. Γενικώς, κατά την ανάλυση των μηχανικών ιδιοτή-

των αυτών των δομών, διακρίνονται οι εξωτερικές δυνάμεις που εφαρμόζονται πάνω στις δομές και η σχέση με τις προκύπτουσες παραμορφώσεις αυτών των βιολογικών δομών. Η ικανότητα μιας δομής να αντιστέκεται στην παραμόρφωση εξαρτάται από την υλική του οργάνωση και το σχήμα της. Επομένως, αυτός ο τύπος ανάλυσης είναι σημαντικός επειδή εξασφαλίζει εκείνες τις πληροφορίες των μηχανικών ιδιοτήτων μιας δομής, οι οποίες μπορούν τελικώς να επηρεάσουν τη λειτουργία της.

## Βασική Δομική Ανάλυση

### Τάση - Τροπή

Η δύναμη που εφαρμόζεται για να παραμορφώσει μια δομή και η προκύπτουσα παραμόρφωση αναφέρονται ως **τάση** και **τροπή**, αντιστοίχως. Για να μπορέσει να εξασφαλιστεί η σύγκριση δομών διαφορετικών μεγεθών, η τάση και η τροπή αξιοποιούνται ως σχετικές ποσότητες της δύναμης που εφαρμόζεται και της παραμόρφωσης της δομής, αντιστοίχως. Οι τιμές της τάσης και της τροπής μετριοούνται με ειδικό όργανο, που μπορεί να λειτουργήσει είτε σε έλξη (τάση έλξης - εφελκυσμός) είτε σε συμπίεση (τάση σύνθλιψης) της δομής. Στο Σχήμα 2-1 φαίνεται



έναν μετρητή φορτίου που μετρά την τάση ή τη δύναμη έλξης, που εφαρμόζεται στον τένοντα, ενώ το επιμηκυσσιόμετρο μετρά το μήκος στο οποίο διατείνεται ο τένοντας.

Το επιμηκυσσιόμετρο είναι ένα όργανο που δημιουργεί την έλξη στον τένοντα. Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται μια παρόμοια πειραματική διαδικασία, για τον προσδιορισμό της συμπίεστικής τάσης σε ένα ακρωτηριασμένο πόδι. Η γραφική παράσταση που συνδέει την τάση και την τροπή δίνεται με την **καμπύλη** τάσης-τροπής μιας δομής.

Μια ανάλυση τάσης-τροπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να αξιολογηθεί εάν ένα υλικό μεταβάλλεται με το χρόνο ή ακόμη την αντίδραση των υλικών σε διαφορετικές εφαρμογές δύναμης και τέλος πώς ένα υλικό αντιδρά σε έλξη καθημερινής τάσης. Το Σχήμα 2-3 εξηγεί τη σχέση τάσης-τροπής των σπονδύλων των φυσιολογικών πιθήκων (Ινδιών) συγκριτικά με εκείνους που βρίσκονται σε ακινητοποίηση (35). Η ανάλυση τάσης-τροπής μπορεί να εφαρμοστεί είτε με μια δύναμη έλξης (εφελκυσμό), είτε με μια δύναμη ώθησης (σύνθλιψης), είτε ακόμη με μια δύναμη διάτμησης (ώθηση ή έλξη κατά μήκος της επιφάνειας του υλικού). Στο παρόν σύγγραμμα περιγράφονται μόνον σχέσεις τάσης-τροπής των μορφών έλξης και συμπίεσης.

Σ' αυτό το είδος τη δοκιμασία, η **τάση** εμφανίζεται ως δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας και παριστάνεται με το γράμμα σίγμα ( $\sigma$ ). Η τάση υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

**Σχήμα 2-1** | Όργανο μέτρησης που ορίζει τις ιδιότητες τάσης-τροπής ενός τένοντα. Το επιμηκυσσιόμετρο διατείνει τον τένοντα και στη συνέχεια αφήνεται να οπισθοχωρήσει. (Ανατυπωμένο με την άδεια από τον Alexander, R. McN. (1992). *The Human Machine*. New York: Columbia University Press.)

**Σχήμα 2-2** | Όργανο μέτρησης που ορίζει τις ιδιότητες τάσης-τροπής ενός ακρωτηριασμένου ποδιού. (Ανατυπωμένο με την άδεια από τον Alexander, R. McN. (1992). *The Human Machine*. New York: Columbia University Press.)

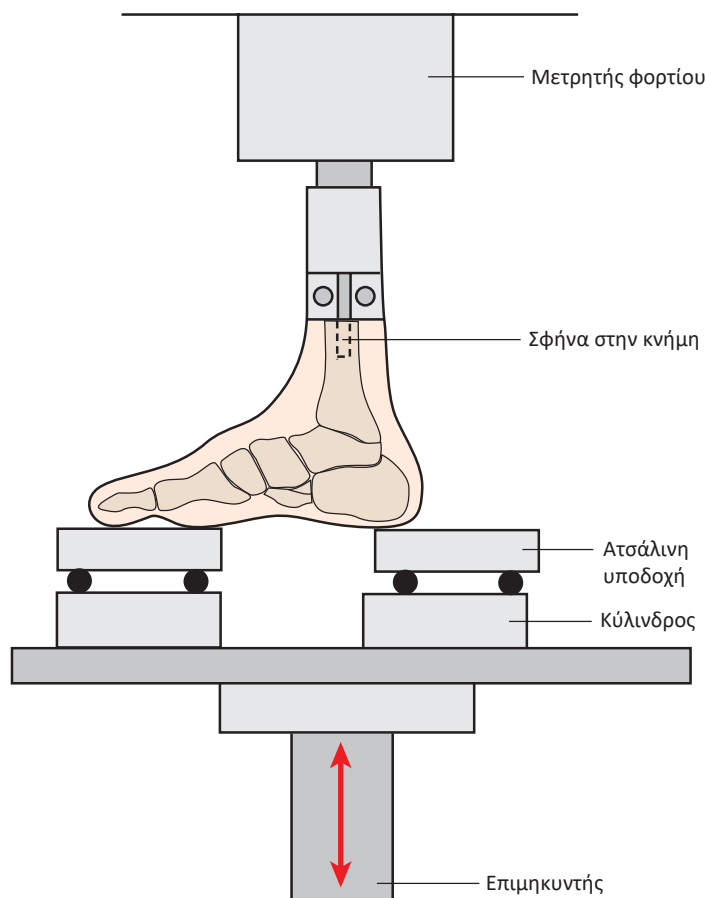
όπου  $F$ - η δύναμη εφαρμογής και  $A$ - η μονάδα επιφάνειας πάνω στην οποία εφαρμόζεται η δύναμη. Η δύναμη εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια της της δομής και σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Η μονάδα μέτρησης της δύναμης είναι το Newton (N). Η μονάδα μέτρησης της επιφάνειας (εμβαδόν) είναι το τετραγωνικό μέτρο ( $m^2$ ). Κατά συνέπεια, η μονάδα της τάσης είναι το Newton ανά τετραγωνικό μέτρο ( $N/m^2$ ), ή το Pascal ( $P_a$ ).

Η παραμόρφωση ή **τροπή** σχετικοποιείται επίσης ως προς το αρχικό μήκος της δομής που εξετάζεται. Δηλαδή, η παραμόρφωση που προκαλείται εξαιτίας της τάσης που εφαρμόζεται συγκρίνεται με το αρχικό ή το μήκος ηρεμίας του υλικού, όταν δηλαδή δεν εφαρμοζόταν καμία δύναμη. Η **τροπή**, που συμβολίζεται με το γράμμα έψιλον ( $\epsilon$ ), ορίζεται ως η αναλογία της μεταβολής του τελικού μήκους προς το μήκος ηρεμίας. Έτσι:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

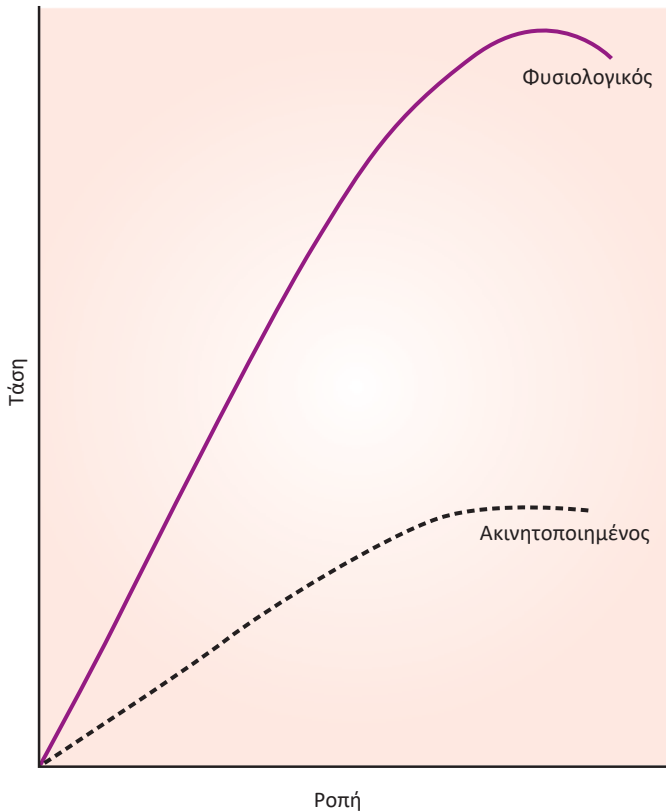
όπου  $\Delta L$ - η μεταβολή του μήκους της δομής και  $L$ - το αρχικό μήκος. Επειδή στη σχέση διαίρεται μήκος προς μήκος, δεν υπάρχει μονάδα μέτρησης και έτσι η τροπή είναι ένα μέγεθος χωρίς διαστάσεις.

Μια ενδεικτική καμπύλη **τάσης-τροπής** παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-4. Συγκεκριμένα, ορισμένα σημεία σ' αυτήν την καμπύλη είναι σημαντικά στην τελική λειτουργία της δομής. Ειδικότερα, η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης είναι ο **συντελεστής ελαστικότητας**, ή μέτρο ελαστικότητας (ή σκληρότητας) του υλικού. Το μέτρο ελαστικότητας (ή σκληρότητας) υπολογίζεται ως εξής:



$$k = \frac{\text{Τάση}}{\text{Τροπή}} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Όσο μεγαλύτερη δύναμη εφαρμόζεται στη δομή, τόσο μειώνεται τελικώς η κλίση της καμπύλης. Σ' αυτό το σημείο, η δομή θεωρείται ότι είναι σε **θέση διαρροής** ή σε σημείο διαρροής. Μέχρι το σημείο διαρροής, η δομή θεωρείται ότι βρίσκεται στην **ελαστική περιοχή**. Εάν αφαιρεθεί η τάση, ενώ το υλικό εξακολουθεί και βρίσκεται σ' αυτήν την περιοχή, τότε αυτό θα επιστρέψει στο αρχικό του μήκος χωρίς δομική βλάβη. Μετά από το σημείο διαρροής, τα μοριακά συστατικά του υλικού μετατοπίζονται μόνιμα ως προς την αρχική τους θέση και εάν η εφαρμοζόμενη δύναμη αφαιρεθεί, το υλικό δεν θα επιστρέψει στο αρχικό του μήκος (Σχήμα 2-5). Η διαφορά μεταξύ του αρχικού μήκους του υλικού και του μήκους (ηρεμίας), μετά το αποτέλεσμα της τάσης στην πλαστική περιοχή, ονομάζεται **εναπομένουσα τροπή**.



**Σχήμα 2-3** | Καμπύλες τάσης-τροπής για τα σπονδυλικά τμήματα σε ένα φυσιολογικό και ένα ακίνητοποιημένο ρήσο πίθηκο (Ινδιών) (Προσαρμοσμένο από τους Kazarian, L. E., Von Gierke, H. E. [1969]. Bone loss as a result of immobilization and chelation. *Preliminary results in Macaca mulatta. Clinical Orthopaedics*, 65:67-75.).

εφαρμόζεται γενικά στις καθημερινές δραστηριότητες. Είναι σαφές και έχει σχετικά τεκμηριωθεί ότι, τα βιολογικά υλικά και οι βιολογικές δομές πρέπει να έχουν έναν σημαντικά υψηλό παράγοντα ασφάλειας. Είναι προφανές, ότι οι τάσεις που ασκούνται σε μια βιολογική δομή κατά τις καθημερινές δραστηριότητες είναι πολύ μικρότερες απ' αυτές που μπορεί να αντέξει η δομή. Το Σχήμα 2-6 εξηγεί την καμπύλη τάσης-τροπής για μια κνήμη ενός ενήλικα και την πραγματική σχέση τάσης-τροπής, κατά τη διάρκεια του δρομικού τρεξίματος αναψυχής.

Όταν μια δομή παραμορφώνεται εξαιτίας μιας δύναμης που εφαρμόζεται σ' αυτή, η τροπή που αναπτύσσεται στο υλικό σχετίζεται με τη μηχανική ενέργεια που απορροφάται από το υλικό. Το μέγεθος της μηχανικής ενέργειας που αποθηκεύεται είναι ανάλογο προς την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη τάσης-τροπής (Σχήμα 2-7). Δηλαδή η αποθηκευμένη μηχανική ενέργεια είναι:

$$ME = \frac{1}{2} \sigma \epsilon$$

Η περιοχή, εκτός του σημείου διαρροής, είναι η **πλαστική περιοχή**. Για τα άκαμπτα υλικά, όπως το οστό, η περιοχή διαρροής ή πλαστική περιοχή είναι σχετικά μικρή, ενώ για άλλα υλικά μπορεί να είναι σχετικά μεγάλη. Εάν η δύναμη που εφαρμόζεται στο υλικό συνεχιστεί και εκτός της πλαστικής περιοχής, η δομή θα φθάσει τελικά στη **θραύση-αστοχία**, σημείο στο οποίο γρήγορα μηδενίζεται η τάση. Η μέγιστη τάση που παρατηρείται όταν εμφανίζεται η θραύση-αστοχία ορίζει τη δύναμη θραύσης-αστοχίας και την αντίστοιχη τροπή του υλικού.

Σε φυσιολογικές λειτουργικές δραστηριότητες, η τάση που εφαρμόζεται δεν προκαλεί τροπή, η οποία να μπορεί να φθάσει στο σημείο διαρροής. Όταν τώρα οι δομές που σχεδιάζονται από έναν μηχανικό, τότε εξετάζεται και ο **παράγοντας ασφάλειας**, ο οποίος καθορίζει μ' αυτό τον τρόπο τη σχέση τάσης-τροπής της δομής. Αυτός ο παράγοντας ασφάλειας κινείται σε ένα εύρος 5 έως 10 φορές της τάσης, που εφαρμόζεται στη δομή υπό φυσιολογικές συνθήκες. Δηλαδή, η δύναμη που απαιτείται για να φθάσει στο σημείο διαρροής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη δύναμη που

Όταν η δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα υλικό αφαιρείται, τότε απελευθερώνεται η αποθηκευμένη ενέργεια. Για παράδειγμα, ένα λάστιχο μπορεί να διαταθεί με την έλξη που θα υποστεί και από τις δύο άκρες. Όταν η μία άκρη απελευθερώνεται, το λάστιχο επανέρχεται στο αρχικό του μήκος, αλλά μ' αυτό τον τρόπο απελευθερώνει την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί, κατά τη διάρκεια της διάτασης. Πρακτικά το ίδιο παρατηρείται εννοιολογικά και σε ένα τραμπολίνο. Το βάρος του ατόμου που