

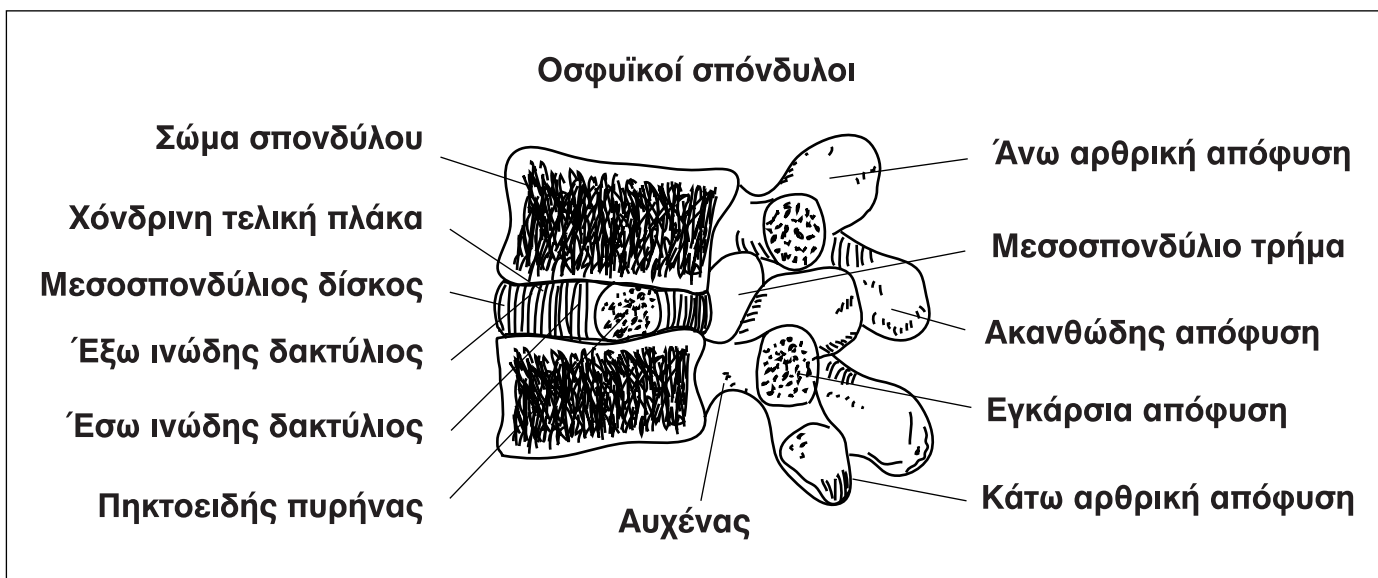
## ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

Γ.Χ. ΜΠΑΜΠΗΣ  
Η.Χ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ  
Γ. ΣΑΠΚΑΣ

Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος (ΜΔ) έχει μοναδική δομή και σύσταση που του επιτρέπουν μηχανικές λειτουργίες υψηλής εξειδίκευσης. Κατά τη μακροσκοπική ανάλυσή του είναι εμφανές ότι πρόκειται για ένα όργανο που είναι κατασκευασμένο αφενός για να απαλύνει και αφετέρου για να εξομαλύνει και να μεταφέρει μεταδιδόμενες δυνάμεις από κάθε πιθανή κατεύθυνση. Η εκτίμηση και η κατανόηση της λειτουργικής ικανότητάς του αυξάνεται με την ανάλυση της δομής του στα διάφορα επίπεδα της οργάνωσής του. Ο πηκτοειδής πυρήνας περιβάλλεται από τον ινώδη δακτύλιο, που αποτελείται από δύο διαφορετικής σύστασης και λειτουργίας μοίρες, την έσω και την έξω. Άνωθεν και κάτωθεν των σχηματισμών αυτών βρίσκονται οι τελικές πλάκες (εικόνα 1). Κολлагόνες ίνες εξορμώμενες από τον ινώδη δακτύλιο εισέρχονται στα σπονδυλικά σώματα, με αποτέλεσμα την ισχυρή πρόσδεση των ΜΔ επί αυτών και κατά συνέπεια των παρακείμενων σπονδυλικών σωμάτων μεταξύ τους, συνεισφέροντας στην τελική σταθερότητα της ΣΣ. Φαίνεται ότι κάθε ανατομικό στοιχείο του ΜΔ έχει ιδιαίτερη δομή και λειτουργία, αλλά είναι η αρμονική τους συνεργασία που προσφέρει στη ΣΣ την ευέλικτη κινητικότητα της καθώς και τη σταθερότητά της.

Η διακίνηση του ύδατος είναι βασικό χαρακτηριστικό της πολύπλοκης λειτουργικότητας του ΜΔ. Σε παρατεταμένη συμπίεση του δίσκου, όπως για παράδειγμα κατά την ορθοστασία, ποσότητα διαμέσου υγρού εξέρχεται από τους ιστούς του, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ύψος του. Αντίθετα, κατά την αποσυμπίεσή του, όπως κατά τη διάρκεια του ύπνου, διάμεσο υγρό εισέρχεται στους ιστούς του και το ύψος του επανέρχεται. Η ιδιότητα αυτή του ΜΔ, της επανάκτησης δηλαδή του ύδατος, οφείλεται στην ωσμωτική πίεση των πρωτεογλυκανών (ουσιαστικά των ιόντων  $\text{Na}^+$ , που εξουδετερώνουν τα υψηλά αρνητικά φορτία των πρωτεογλυκανών) και στην ελαστικότητα της πωρογενούς και διαπερατής θεμέλιας ουσίας, που την αποτελούν οι πυκνές κολλαγόνες ίνες και οι πρωτεογλυκάνες.

Ο ινώδης δακτύλιος και ο πηκτοειδής πυρήνας έχουν διαφορετικούς εμβιομηχανικούς ρόλους. Ο εξωτερικός ινώδης δακτύλιος ανθίσταται στις δυνάμεις τάσεως, ενώ, όπως αναφέρθηκε, περικλείοντας τον εσωτερικό ινώδη δακτύλιο και τον πηκτοειδή πυρήνα, τους προστατεύει από τις παραμορφώσεις. Τα τελευταία στοιχεία, λόγω της χόνδρινης φύσης τους και της υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, συνεισφέρουν στη γλοιοελαστική συμπεριφορά του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Η γλοιοελαστική αυτή συμπεριφορά ερμηνεύεται με τη διφασική θεωρία, βάσει της οποίας αποδίδεται στην τριβώδη κίνηση του διαμέσου υγρού κατά τη μετακίνησή του δια της πωρογενούς συμπαγούς θεμέλιας ουσίας του ΜΔ. Με άλλα λόγια, η χαλαρή κολλαγόνος θεμέλια ουσία επιτρέπει, ως ανταπόκριση στο φορτίο, μεγάλες παραμορφώσεις του εσωτερικού ινώδους δακτυλίου και του πηκτοειδούς πυρήνα, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη διασπορά της ενέργειας. Κατά την ανάλυση του



**Εικόνα 1.** Εγκάρσια διατομή μιας σπονδυλικής μονάδας. Αναγνωρίζονται η χόνδρινη τελική πλάκα (CEP), ο έσω και ο έξω ινώδης δακτύλιος (OA και IA αντίστοιχα) και ο ηκτοειδής πυρήνας (NP).

φορέα των δυνάμεων προκύπτει ότι οι στροφικές δυνάμεις της ΣΣ διαταράσσουν το σχήμα του ινώδους δακτυλίου χωρίς συνέπειες στον όγκο του ΜΔ, ενώ η συμπίεση και η κάμψη προκαλούν ογκομετρικές αλλαγές και τελικά παραμόρφωση του δίσκου και των τελικών πλακών (εικόνα 2).

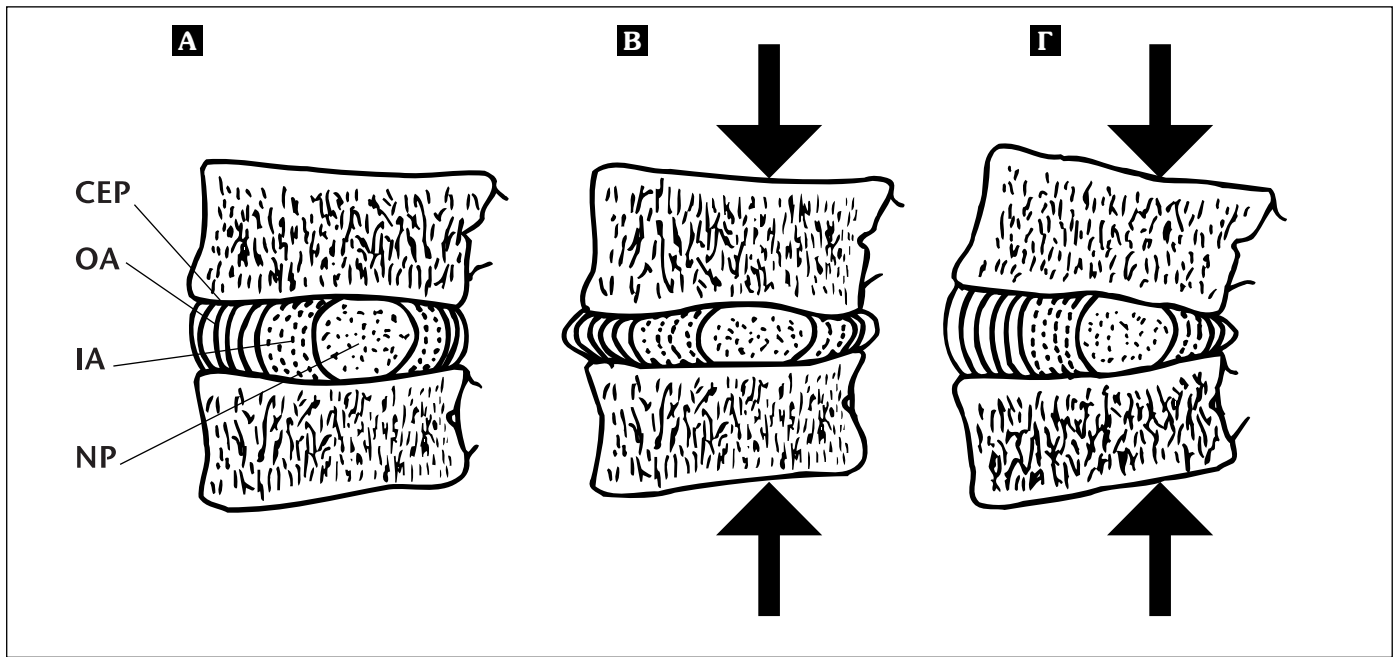
Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί υποστήριξης του φορτίου στο μεσοσπονδύλιο δίσκο: α) η υδροστατική πίεση του διάμεσου υγρού, β) η ωσμωτική πίεση και, τέλος, γ) οι δυνάμεις που αναπτύσσονται επί της συμπαγούς θεμέλιας ουσίας, δηλαδή των ινών του κολλαγόνου και των πρωτεογλυκανών. Η υψηλή περιεκτικότητα του φυσιολογικού ηκτοειδούς πυρήνα σε νερό και πρωτεογλυκάνες του επιτρέπει σε φυσιολογικές συνθήκες να συμπεριφέρεται ως υγρό υψηλού ιξώδους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κατά τη φόρτιση υψηλών υδροστατικών πιέσεων. Η ωσμωτική πίεση οφείλεται στη διαφορά της συγκέντρωσης των ιόντων μεταξύ του διάμεσου υγρού του ΜΔ και του υγρού που βρίσκεται εκτός του ΜΔ. Η απαραίτητη για τη δημιουργία της ωσμωτικής πίεσης ημιδιαπερατή μεμβράνη είναι ο εξωτερικός ινώδης δακτύλιος. Η υψηλή ενδοδισκική ωσμωτική πίεση οφείλεται, όπως αναφέρθηκε, στα ιόντα  $\text{Na}^+$ , που εξουδετερώνουν τα υψηλά αρνητικά φορτία των πρωτεογλυκανών. Η τάση παραμόρφωσης του ΜΔ από την ωσμωτική πίεση εξουδετερώνεται από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από τις ίνες του κολλαγόνου του εξωτερικού ινώδους δακτυλίου. Κατά τις δοκιμασίες φόρτισης οι εκφυλισμένοι μεσοσπονδυλίοι δίσκοι έχουν συμπεριφορά συμπαγούς υλικού, ανάλογη αυτής που παρατηρείται μετά από συνεχή ή δυναμική φόρτιση. Κοινός παρανομαστής είναι η απώλεια

της ικανότητας του δίσκου για τη δημιουργία και τη διατήρηση των παραπάνω δυνάμεων.

Αν αφαιρεθεί ο ηκτοειδής πυρήνας, η κίνηση κατά το επίπεδο αυτό αυξάνεται, όπως και η παραμόρφωση του ινώδους δακτυλίου. Αντίθετα, το ύψος του ΜΔ και η ακαμψία του ελαττώνονται. Στην περίπτωση που ενεθεί φυσιολογικός ορός εντός του ΜΔ, η ενδοδισκική πίεση αυξάνεται και ελαττώνεται η τμηματική κίνηση. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η διαταραχή της ενδοδισκικής πίεσης, είτε λόγω αφαίρεσης του ηκτοειδούς πυρήνα είτε λόγω τραύματος του ινώδους δακτυλίου, έχει ως αποτέλεσμα τη διαταραχή της παραμόρφωσης κατά τις μηχανικές φορτίσεις όλου του ΜΔ.

Από την ανάλυση των εμβιομηχανικών ιδιοτήτων του ινώδους δακτυλίου διαφαίνεται ότι η αντίσταση στις αναπτυσσόμενες μεγάλες τάσεις οφείλεται στον υψηλό συντελεστή τάσης και στην ακαμψία του. Ιδιαίτερα ο εξωτερικός ινώδης δακτύλιος, έχοντας τον υψηλότερο συντελεστή τάσης, είναι ιδανικός για την αντίσταση στις παραμορφώσεις του ΜΔ και στις δυνάμεις που δημιουργούνται κατά τις κινήσεις της ΣΣ. Αντίθετα, ο χαμηλός συντελεστής τάσης του εσωτερικού ινώδους δακτυλίου επιτρέπει τη γλοιοελαστική απορρόφηση των δυνάμεων, όπως αυτή ερμηνεύεται με τη διφασική θεωρία, και αποτελεί ακόμα ένα πρωταρχικό μηχανισμό απορρόφησης των συμπιεστικών δυνάμεων.

Η εμβιομηχανική συμπεριφορά του ΜΔ εξαρτάται, τέλος, από την αρμονική λειτουργία των χόνδρινων τελικών πλακών. Από διάφορες μελέτες έχει φανεί ότι οι τελικές πλάκες με την εφαρμογή φορτίου υφίστανται σημαντική και άμεση παραμόρφωση, επιτρέποντας την ομαλή κατανομή



**Εικόνα 2. Α.** Σχηματική αναπαράσταση μιας σπονδυλικής μονάδας όπου κατά την αξονική συμπίεση **(Β)** συμπιεστικές δυνάμεις αναπτύσσονται στον ηνκτοειδή πυρήνα, ενώ οι δυνάμεις τάσης αναπτύσσονται επί του ινώδους δακτυλίου. Οι υψηλές πιέσεις του διάμεσου υγρού είναι η συνισταμένη της υδροστατικής πίεσης και της ωσμωτικής πίεσης. Η έκκεντρη συμπίεση του ΜΔ **(Γ)** προκαλεί έκκεντρη παραμόρφωση αυτού, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται επιπλέον δυνάμεις διάτμησης, οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν αποκόλληση των σιβάδων του ινώδους δακτυλίου και ρήξη αυτού.

των φορτίων στον ηνκτοειδή πυρήνα και στον ινώδη δακτύλιο. Η εξομάλυνση των πιέσεων καθ' όλη την έκταση του ΜΔ είναι απότοκη της αυξημένης διαβατότητας του ύδατος δια των τελικών πλακών, η οποία επιπλέον διευκολύνει την ανταλλαγή των θρεπτικών ουσιών και των προϊόντων αποδόμησης του μεταβολισμού.

Η κατανόηση των εμβιομηχανικών ιδιοτήτων της ΣΣ έχει αρκετούς περιορισμούς. Η χρήση μηχανικών και μαθηματικών προτύπων ίσως είναι ικανή στο μέλλον να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά του ΜΔ και της σπονδυλικής μονάδας, καθώς επίσης και των βιολογικών υλικών, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η πραγματοποίηση πειραματικών μελετών δεν είναι εφικτή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Acaroglu ER, Iatridis JC, Setton LA, Foster RJ, Mow VC, Weidenbaum M. Degeneration and aging affect the tensile behavior of the human annulus fibrosus. *Spine* 1995; 20:2690-2701.
2. Anderson GB, Schultz AB. Effects of fluid injection on mechanical properties of intervertebral discs. *J Biomech* 1979; 12:453-458.
3. Best BA, Guilak F, Setton LA et al. Compressive mechanical

- properties of the human annulus fibrosus and their relationship to biomechanical composition. *Spine* 1994; 19:212-221.
4. Ebara S, Iatridis JC, Setton LA, Foster RJ, Mow VC, Weidenbaum M. Tensile properties of nondegenerate human lumbar fibrosus. *Spine* 1996; 21:452-461.
5. Goel VK, Nishiyama K, Weinstein JN, Liu YK. Mechanical properties of lumbar spinal motion segments as affected by partial disc removal. *Spine* 1986; 11:1008-1012.
6. Iatridis JC, Weidenbaum M, Setton LA, Mow VC. Is the nucleus pulposus a solid or a fluid? Mechanical behaviors of the nucleus pulposus of the human intervertebral disc. *Spine* 1996; 21:1174-1184.
7. Setton LA, Zhu W, Weidenbaum M, Ratcliffe A, Mow VC. Compressive properties of the cartilaginous end-plate of the baboon lumbar spine. *J Orthop Res* 1993; 11:228-239.
8. Skaggs DL, Weidenbaum M, Iatridis JC, Ratcliffe A, Mow VC. Regional variation in the tensile properties and biomechanical composition of the human lumbar annulus fibrosus. *Spine* 1994; 19:1310-1319.
9. Urban JP, Maroudas A. Swelling of the intervertebral disc in vitro. *Connect Tissue Res* 1981; 9:1-10.
10. Weidenbaum M, Iatridis JC, Setton LA, Foster RJ, Mow VC. Mechanical behavior of the intervertebral disk and the effects of degeneration. In: Weinstein JN, Gordon SL (eds): *Low Back Pain: A Scientific and Clinical Overview*. Rosemont, IL, American Academy of Orthopaedic Surgeons 1996, pp. 557-582.