

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

**Ε. ΣΤΥΛΙΑΝΕΣΗ
Γ. ΣΑΠΚΑΣ
Σ. ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ**

Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος είναι ένα πολυλειτουργικό στοιχείο, το οποίο υποβάλλεται διαρκώς σε αξιοσημείωτες μεταβολές τάσης και ορμής. Μαζί με τις σπονδυλικές διαρθρώσεις είναι υπεύθυνος για τη μεταφορά όλων των συμπιεστικών τάσεων που δρουν στον κορμό του ανθρώπου.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο μεσοσπονδύλιο δίσκο διακρίνονται σε:

1. Θλιπτικές (συμπιεστικές) τάσεις: αναπήδηση, τραυματισμός.
2. Διατατικές τάσεις: κάμψη, έκταση, πλάγιες κλίσεις.
3. Διατμητικές τάσεις: αξονική περιστροφή της ΣΣ.
4. Συνδυασμό διατατικών - θλιπτικών και διατμητικών δυνάμεων.

Ο ρυθμός καταπόνησης (επιβολής τάσης) μπορεί να έχει:

- α) Βραχεία διάρκεια και υψηλή τάση, όπως κατά την αναπήδηση.
- β) Μακρά διάρκεια και χαμηλή τάση, όπως στις καταπονήσεις της καθημερινής δραστηριότητας.

Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος εμφανίζει τις εξής χαρακτηριστικές ιδιότητες:

- α) Ιξωδοελαστικές ιδιότητες. Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος ανήκει στην κατηγορία των βιοσκοελαστικών υλικών, των οποίων η συμπεριφορά είναι άμεσα εξαρτώμενη από το ρυθμό καταπόνησης. Οι ιδιότητες αυτές χαρακτηρίζονται από τις εξής παραμέτρους:

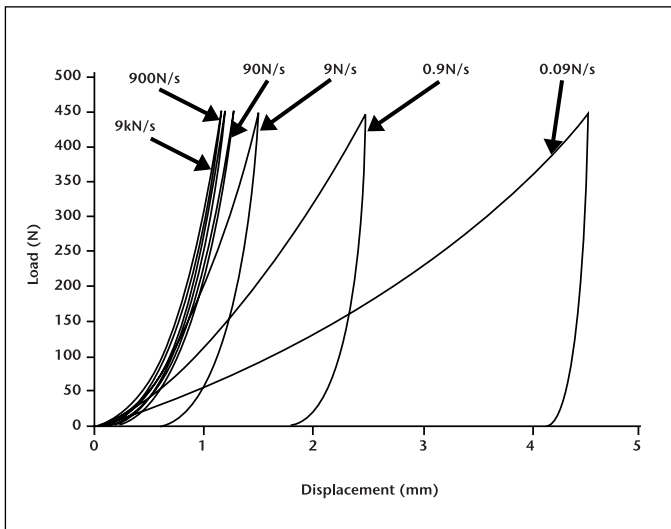
1. Ευαισθησία
2. Ολίσθηση
3. Ερπυσμό-χαλάρωση
4. Υστέρηση

- β) Χρονοεξαρτώμενες ιδιότητες (εξαρτώνται από τη διάρκεια επιβολής τάσεων)^{1,2}.

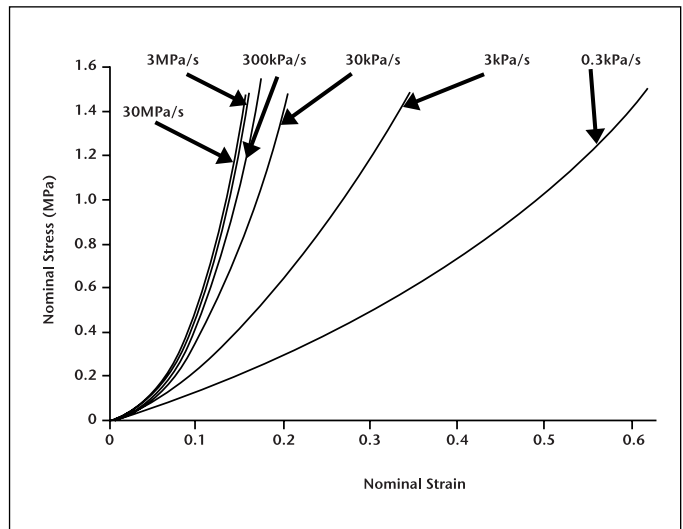
Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος αποτελεί το 20-33% του ύψους της ΣΣ. Αποτελείται από τον πηκτοειδή πυρήνα που αντιστοιχεί στο 30-50% του εμβαδού του δίσκου, από τον ινώδη δακτύλιο και από τις τελικές χόνδρινες πλάκες. Η περιεκτικότητά του σε νερό είναι 70-90%.

Η εμβιομηχανική συμπεριφορά του μεσοσπονδύλιου δίσκου εξαρτάται από το βαθμό εκφύλισής του και από τη βιολογική ηλικία του ατόμου. Στους άνδρες η εκφύλιση ξεκινά από τη δεύτερη δεκαετία, ενώ στις γυναίκες από την τρίτη δεκαετία της ζωής τους. Έτσι, σε άτομα ηλικίας 50 ετών το 97% των μεσοσπονδύλιων δίσκων της ΟΜΣΣ (Ο3-Ο4, Ο4-Ο5, Ο5-Ι1) παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό εκφύλιση.

Από τις αναφορές της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφαίνεται ότι δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα που να δίνουν σαφείς πληροφορίες για τη μηχανική συμπεριφορά του μεσοσπονδύλιου δίσκου σε μια περιοχική τιμών ρυθμού καταπόνησής του, σε συνάρτηση με τις συνθήκες ενυδάτωσής του. Ωστόσο, είναι γνωστή η χρήση μαθηματικών προσομοιω-



Εικόνα 1. Γραφική παράσταση των καμπυλών φορτίου (N) – μετατόπισης (mm) για τους πλήρως ενυδατωμένους μεσοσπονδύλιους δίσκους (ομάδα Α) σε έξι διαφορετικές τάξεις μεγέθους επιβολής φορτίου ($3 \times 10^1 \text{ kPa/sec}$ έως $3 \times 10^5 \text{ kPa/sec}$). Η σιβαρότητα του ΜΔ αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου και την αύξηση του ρυθμού καταπόνησης. Το ποσοστό της ενέργειας που διαχέεται κατά τη φάση της υστέρησης ήταν μικρότερο στους υψηλούς ρυθμούς καταπόνησης.



Εικόνα 2. Τα ίδια αποτελέσματα όπως στο διάγραμμα της εικόνας 1, μετά από μετατροπή των συντεταγμένου φορτίου – παραμόρφωσης σε γράφημα «τάσης – παραμόρφωσης». Η γραφική παράσταση αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας (M) του ΜΔ. Το μέτρο ελαστικότητας εκφράζει τη δυσκολία παραμόρφωσης ενός υλικού και είναι ανεξάρτητο από τη μορφολογία του (επιφάνεια και ύψος).

μάτων με σκοπό την κατανόηση της απόκρισης (των ιδιοτήτων) του δίσκου, όταν βρίσκεται υπό συνθήκες αξονικής φόρτισης και ερπυσμού υπό στατικές³⁻⁷ και δυναμικές συνθήκες^{8,9,10}.

Τα μαθηματικά μοντέλα συνδύαζαν ιξώδεις και ελαστικές ιδιότητες. Ένα από αυτά ήταν το βισκοελαστικό μοντέλο των τριών παραμέτρων του Kelvin, το οποίο περιγράφει τη συμπεριφορά του δίσκου σε συνθήκες στατικού ερπυσμού (φαινόμενο κατά το οποίο αυξάνεται η παραμόρφωση με την πάροδο του χρόνου υπό σταθερή τάση-φορτίο). Όμως, αυτό το μοντέλο δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στη συμπεριφορά του μεσοσπονδύλιου δίσκου σε καταπόνηση υπό αξονική φόρτιση.

Αυτά τα μαθηματικά μοντέλα δεν μπορούν να εξηγήσουν ή να υπολογίσουν τις αλληλεπιδράσεις των άλλων πειραματικών φαινομένων στο μεσοσπονδύλιο δίσκο, όπως:

α) την ποροελαστική ροή του νερού, που παρατηρήθηκε κατά το φαινόμενο του ερπυσμού στο μεσοσπονδύλιο δίσκο^{1,11}

β) την υπολογίσιμη αντιδραστική πίεση που αναπτύσσει ο πηκτοειδής πυρήνας (πίεση διόγκωσης)^{14,15}.

Τα επόμενα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν λάμβαναν υπόψη τη ροή του νερού μέσα στο μεσοσπονδύλιο δίσκο, ο οποίος προσομοιαζόταν με ποροελαστική κατασκευή, βασισμένη σε ένα γραμμικό ε-

λαστικό υλικό, για την οποία ίσχυε ο νόμος του Hook:

$$\sigma = \epsilon E$$

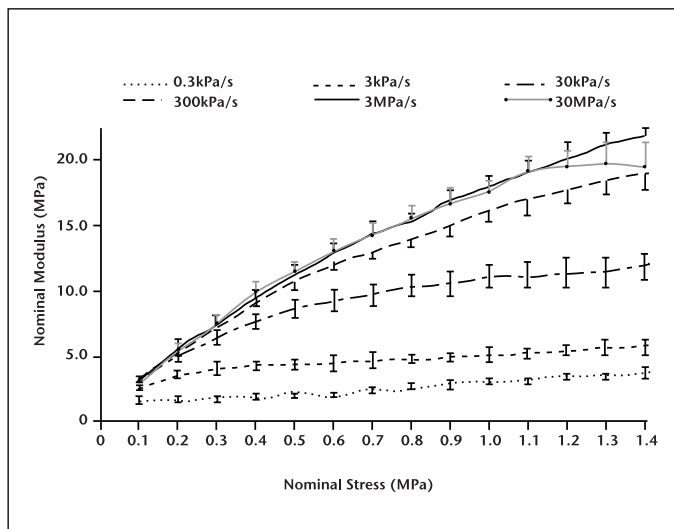
Τα ποροελαστικά μοντέλα έγιναν πιο περίπλοκα όταν άρχισε να υπολογίζεται και η αντιδραστική πίεση διόγκωσης που αναπτύσσει ο πηκτοειδής πυρήνας^{16,17}.

Είναι γνωστή η μεγάλη σημασία του επιπέδου ενυδάτωσης του μεσοσπονδύλιου δίσκου και του ρυθμού επιβολής του φορτίου (καταπόνησης), αλλά μέχρι τώρα δεν υπήρξαν έγκυρες μελέτες που να λαμβάνουν συστηματικά υπόψη αυτές τις παραμέτρους.

Πραγματοποιήθηκε μια περιορισμένου εύρους μελέτη για την εμβιομηχανική του μεσοσπονδύλιου δίσκου σε θλίψη (συμπίεση), στην οποία μεταβαλλόταν ο ρυθμός μετατόπισης του δίσκου από το επίπεδο ενυδάτωσής του¹⁶.

Μια πρόσφατη πειραματική μελέτη¹⁷ έχει ως αντικείμενο την επίδραση τόσο του επιπέδου ενυδάτωσης, όσο και του ρυθμού επιβολής φορτίων (καταπόνησης) στη μηχανική συμπεριφορά (ανταπόκριση) του μεσοσπονδύλιου δίσκου, όταν αυτός υποβάλλεται σε θλιπτική τάση. Χρησιμοποιήθηκαν ζωικά μοντέλα (βοοειδή), τα οποία ταξινομήθηκαν σε τέσσερις πειραματικές ομάδες (Α, Β, C και D).

Στην πρώτη ομάδα (Α) ανήκαν οι πλήρως ενυδατωμένοι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι (5 δοκίμια), οι οποίοι υποβλήθηκαν σε θλιπτικά φορτία έξι τάξεων μεγέθους, από $3 \times 10^{-1} \text{ kPa/sec}$ έως $3 \times 10^4 \text{ kPa/sec}$.



Εικόνα 3. Διάγραμμα «μέτρου ελαστικότητας – τάσης» για τους πλήρως ενυδατωμένους ΜΔ (ομάδα Α). Το μέτρο ελαστικότητας (σιβαρότητα) αυξάνει με την αύξηση φόρτισης (τάσης) και την αύξηση του ρυθμού καταπόνησης. Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας ήταν πιο έντονη στους υψηλούς ρυθμούς καταπόνησης.

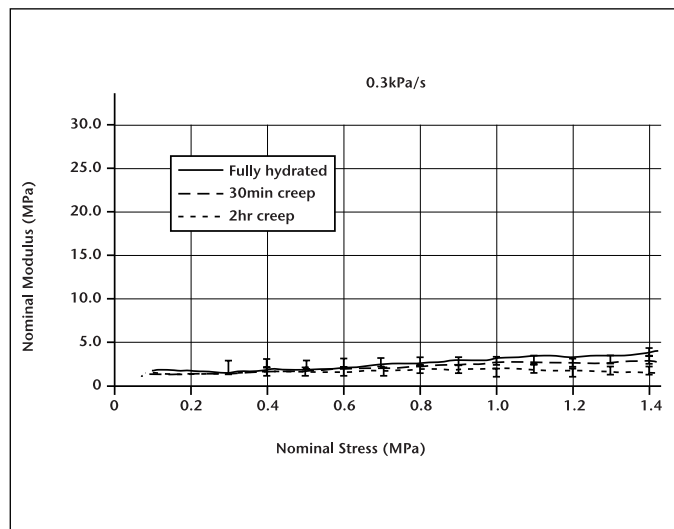
Στη δεύτερη ομάδα (Β) συμπεριλήφθηκαν οι μερικώς ενυδατωμένοι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι (4 δοκίμια) οι οποίοι αφυδατώθηκαν με το φαινόμενο του ερπυσμού, δηλαδή επιβολή επί αυτών αξονικού στατικού φορτίου 1MPa, για 30 λεπτά της ώρας. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε στατικά φορτία τριών τάξεων μεγέθους, $3 \times 10^{-1} \text{kPa/sec}$, $3 \times 10 \text{kPa/sec}$ και $3 \times 10^3 \text{kPa/sec}$.

Στην τρίτη ομάδα (C) ανήκαν οι μερικώς ενυδατωμένοι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι (4 δοκίμια) οι οποίοι αφυδατώθηκαν από την επιβολή στατικού ερπυστικού φορτίου της τάξης του 1MPa για χρονικό διάστημα 2 ωρών. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε στατικά φορτία 3 τάξεων μεγέθους: $3 \times 10^{-1} \text{kPa/sec}$, $3 \times 10 \text{kPa/sec}$ και $3 \times 10^3 \text{kPa/sec}$.

Στην τέταρτη ομάδα (D) συμπεριλήφθηκαν οι αφυδατωμένοι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι (3 δοκίμια) που προέκυψαν μετά από οκτάωρη επιβολή στατικού ερπυστικού φορτίου του 1MPa, με διαλείμματα των 5 λεπτών. Αυτή η ομάδα υποβλήθηκε σε ρυθμό καταπόνησης της τάξης των $3 \times 10 \text{kPa/sec}$.

Τα αποτελέσματα της μελέτης ανέδειξαν ότι:

- Η σιβαρότητα του μεσοσπονδύλιου δίσκου (ΜΔ) -το μέτρο ελαστικότητάς του- είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνονται τα φορτία και όσο πιο υψηλός είναι ο ρυθμός επιβολής αυτών των φορτίων.
- Η απώλεια ενέργειας, το ποσοστό δηλαδή της ενέργειας που διαχέεται κατά τη φάση της υστέρησης, αυξάνεται στους χαμηλούς ρυθμούς επιβολής φόρτισης, ενώ μειώνεται κατά τους υψηλούς ρυθμούς φόρτισης.



Εικόνα 4. Διάγραμμα «μέτρου ελαστικότητας – τάσης» για τις ομάδες ΜΔ Α, Β και C. Για χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης ($0,3 \text{MPa/sec}$) η σιβαρότητα (M) του ΜΔ ήταν περίπου ίδια στις δύο ομάδες Α και Β, λίγο μεγαλύτερη από εκείνη της ομάδας C.

γ) Για τους μέσους ρυθμούς επιβολής φόρτισης ($< 3 \times 10^3 \text{kPa/sec}$):

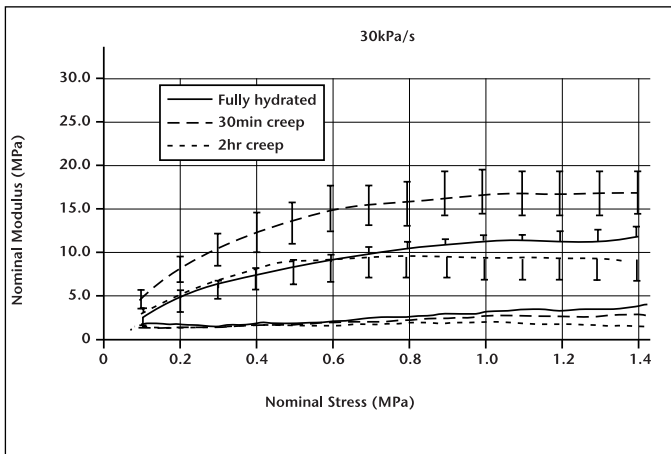
- Η σιβαρότητα -το μέτρο ελαστικότητας- των μερικώς αφυδατωμένων μετά από 30 λεπτά στατικού ερπυσμού ΜΔ ήταν μεγαλύτερη από τη σιβαρότητα των πλήρως ενυδατωμένων ΜΔ.
- Η σιβαρότητα των μερικώς αφυδατωμένων μετά από 2 ώρες στατικού ερπυσμού ΜΔ ήταν ίση με τη σιβαρότητα των πλήρως ενυδατωμένων ΜΔ.
- Η σιβαρότητα των μερικώς αφυδατωμένων μετά από 2 ώρες στατικού ερπυσμού ΜΔ ήταν μικρότερη από τη σιβαρότητα των μερικώς αφυδατωμένων ΜΔ μετά από 30 λεπτά στατικού ερπυσμού.

δ) Για τους υψηλούς ρυθμούς επιβολής φόρτισης (1.1MPa/sec):

- Η σιβαρότητα των μερικώς αφυδατωμένων μετά από 30 λεπτά στατικού ερπυσμού ΜΔ ήταν μεγαλύτερη από τη σιβαρότητα των πλήρως ενυδατωμένων ΜΔ.
- Η σιβαρότητα των μερικώς αφυδατωμένων μετά από 2 ώρες στατικού ερπυσμού ΜΔ ήταν μικρότερη από τη σιβαρότητα των πλήρως ενυδατωμένων ΜΔ.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές απόκρισης του μεσοσπονδύλιου δίσκου σε θλιπτική (αξονική) φόρτιση υπό αλλαγές τόσο του ρυθμού καταπόνησης, όσο και του



Εικόνα 5. Διάγραμμα «μέτρου ελαστικότητας – τάσης» για τις ομάδες ΜΔ Α (πλήρως ενυδατωμένοι ΜΔ), Β (μερικώς ενυδατωμένοι ΜΔ – ερπυστικό φορτίο 1MPa για 30 λεπτά) και C (μερικώς ενυδατωμένοι ΜΔ – ερπυστικό φορτίο 1MPa για 2 ώρες). Για τους μέσους ρυθμούς φόρτισης (30KPa/sec): 1) Η σιβαρότητα (M) του ΜΔ της ομάδας Β ήταν μεγαλύτερη από εκείνη της ομάδας Α. 2) Η σιβαρότητα (M) του ΜΔ της ομάδας C ήταν ίση με εκείνη της ομάδας Α. 3) Η σιβαρότητα (M) του ΜΔ της ομάδας C ήταν μικρότερη από εκείνη της ομάδας Β.

επιπέδου ενυδάτωσης αυτού. Οι παράγοντες αυτοί είναι πρωτίστης σημασίας για τη μελέτη των εμβιομηχανικών ιδιοτήτων του μεσοσπονδύλιου δίσκου.

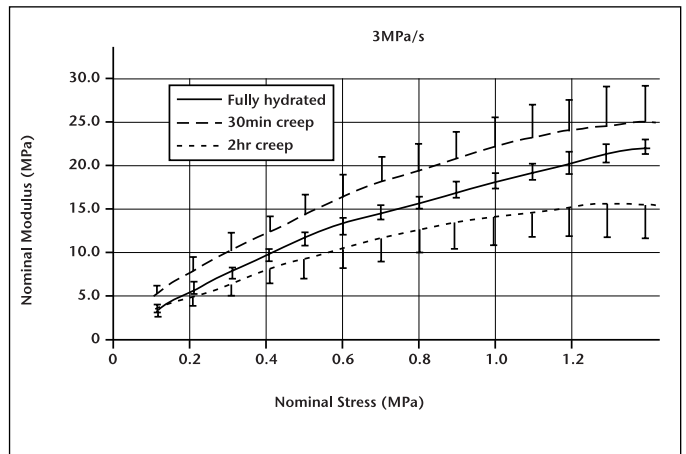
Αυτά τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τις ιδιότητες των μαλακών μορίων, που έχουν επαναληψιμότητα στη συμπεριφορά τους μέσω προρρυθμίσης. Όταν εφαρμόζεται κυκλική φόρτιση στο μεσοσπονδύλιο δίσκο, σε κάθε κύκλο φόρτισης μεταβάλλονται οι μηχανικές του ιδιότητες λόγω της απώλειας νερού από τον πυρήνα του. Για την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων στις μηχανικές καταπονήσεις του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι απαραίτητη η ρυθμική διατήρηση του επιπέδου ενυδάτωσης αυτού.

Επίδραση του ρυθμού καταπόνησης

Ο ρυθμός καταπόνησης επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική απόκριση του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Σε χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις της απόκρισης του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης η απόκριση του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι σχεδόν ανεπηρέαστη.

Επίδραση του επιπέδου ενυδάτωσης

1. Η ελάττωση του βαθμού ενυδάτωσης επιφέρει σημαντική μείωση του μέτρου ελαστικότητας του μεσοσπονδύ-



Εικόνα 6. Διάγραμμα «μέτρου ελαστικότητας – τάσης» για τις ομάδες Α, Β και C. Για τους υψηλούς ρυθμούς φόρτισης (3MPa/sec): 1) Η σιβαρότητα (M) του ΜΔ της ομάδας Β ήταν μεγαλύτερη από εκείνη της ομάδας Α. 2) Η σιβαρότητα (M) του ΜΔ της ομάδας Α ήταν μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της ομάδας C.

λιου δίσκου, δηλαδή ο δίσκος υφίσταται μεγαλύτερες παραμορφώσεις υπό το ίδιο εξωτερικό φορτίο. 2. Η ελάττωση του βαθμού ενυδάτωσης επιφέρει ελάττωση του ύψους του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Τα ανωτέρω δύο φαινόμενα δρουν ανταγωνιστικά - και ιδιαίτερα η ελάττωση του ύψους του μεσοσπονδύλιου δίσκου εξισορροπεί πλήρως την ελάττωση του μέτρου ελαστικότητας (μετά από 30 λεπτά στατικού ερπυσμού).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Virgin WJ. Experimental investigations into the physical properties of the intervertebral disc. *J Bone Joint Surgery(Br)* 1951; 33:607-611.
2. Markolf KL. Deformation of the thoracolumbar intervertebral joints in the response to external loads: A biomechanical study using autopsy material. *J Bone Joint Surgery (Am)* 1972; 54:511-533.
3. Kazarian LE. Creep characteristics of the human spinal column. *Orthop Clin North Am* 1975; 6:3-18.
4. Burns ML, Kaleps I, Kazarian LE. Analysis of compressive creep behavior of the intervertebral unit subjected to a uniform axial loading using exact parametric solution equations of Kelvin models. Part I: Human intervertebral joints. *J Biomech* 1984; 17:113-130.
5. Keller TS, Spregler DM, Hansson TH. Mechanical behavior of the human spine. I: Creep analysis during static compressive loading. *J Orthop Res* 1987; 5:467-478.
6. Keller TS, Hansson TH, Holma SH, Pope MM, Spregler DM.

- In vivo creep behavior of the normal and degenerated porcine intervertebral disk: A preliminary report. *J Spinal Disord* 1989; 1:267-278.
7. Keller TS, Holm SH, Hanson TH, Spregler DM. Volvo Award in experimental studies: The dependence of intervertebral disc mechanical properties on physiologic conditions. *Spine* 1990; 15:751-761.
 8. Koeller W, Funke F, Hartmann F. Biomechanical behavior of human intervertebral discs subjected to long lasting axial loading. *Biorheology* 1984; 21:675-686.
 9. Koeller W, Meier W, Hartmann F. Biomechanical properties of human intervertebral discs subjected to axial dynamic compression: A comparison of lumbar and thoracic discs. *Spine* 1984; 9:725-733.
 10. Koeller W, Muehlhaus S, Meier W, Hartmann F. Biomechanical properties of human intervertebral discs subjected to axial dynamic compression: Influence of age and degeneration. *J Biomech* 1986; 19:807-816.
 11. Adams MA, Hutton WC. The effect of fatigue on the lumbar intervertebral disc. *J Bone Joint Surg (Br)* 1983; 65:199-203.
 12. Charnley J. The inhibition of fluid as a cause of herniation of the nucleus pulposus. *Lancet* January 1952; 19:124-127.
 13. Henry NGC. The hydration of the nucleus pulposus and its relation to intervertebral disc derangement. *J Bone Joint Surg (Br)* 1958; 40:132-144.
 14. Laible JP, Pflaster DS, Krag MH, Simon BR, Haugh LD. A poroelastic-swelling finite element model with application to the intervertebral disc. *Spine* 1993; 18:659-670.
 15. Simon BR, Liable JP, Pflaster D, Yuan Y, Krag MH. A poroelastic finite element formulation including transport and swelling in soft tissue structures. *J Biomech Eng* 1996; 118:1-9.
 16. Ohshima H, Tsuji H, Hirano N, Ishihara H, Katoh Y, Yamada H. Water diffusion pathway, swelling pressure, and biomechanical properties of the intervertebral disc during compression load. *Spine* 1989; 14:1234-1244.
 17. Race A, Broom N, Robertson P. Effect of Loading Rate and Hydration on the Mechanical Properties of the Disc. *Spine* 2000; 25:662-669.