

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΚΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΠΗΚΤΟΕΙΔΟΥΣ ΠΥΡΗΝΑ ΣΤΗΝ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΣΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Α.Α. ΠΑΡΤΣΙΝΕΒΕΛΟΣ
Γ. ΣΑΠΚΑΣ

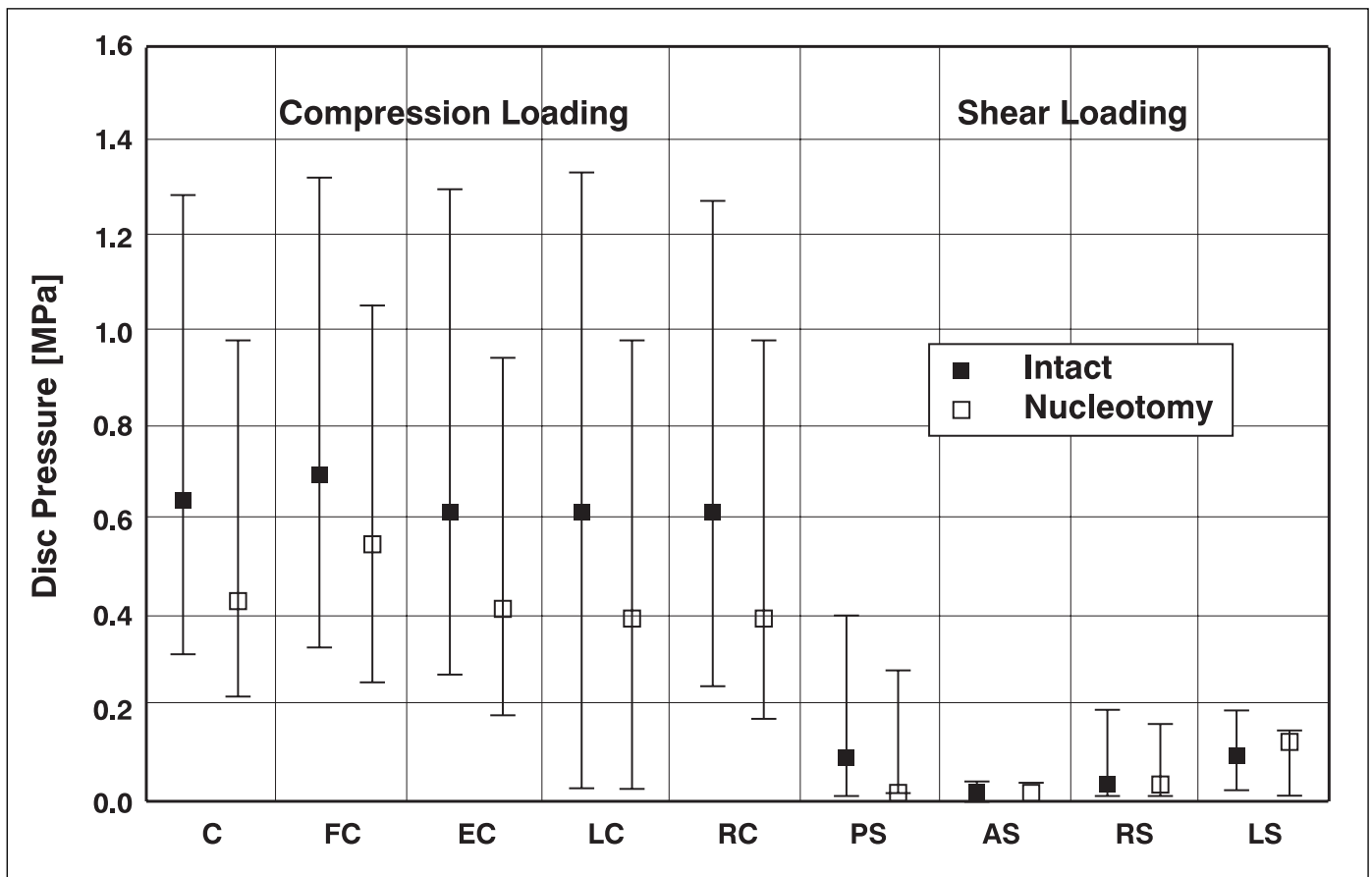
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος, σε συνδυασμό με τις διαρθρώσεις των αρθρικών αποφύσεων, είναι υπεύθυνος για την απορρόφηση όλων των συμπιεστικών φορτίσεων στις οποίες υπόκειται ο κορμός. Η καθιστική ή η όρθια θέση και οι καθημερινές εργασιακές ή αθλητικές δραστηριότητες αυξομειώνουν υπέρμετρα τις δυνάμεις αυτές. Κατά τη διάρκεια των φυσιολογικών κινήσεων κάμψης, έκτασης και πλάγιας κάμψης αναπτύσσονται διατακτικές δυνάμεις σε ορισμένες περιοχές του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Η αξονική περιστροφή της ΣΣ σε σχέση με την πύελο προκαλεί φορτίσεις στρέψης, οι οποίες εξελίσσονται σε διατμητικές δυνάμεις. Σε κάθε δυναμική καταπόνηση της σπονδυλικής στήλης υπάρχει ο συνδυασμός των παραπάνω φορτίσεων. Οι επαναλαμβανόμενοι μικροτραυματισμοί, σε συνάρτηση με το γενετικό υπόστρωμα ή φυσικούς παράγοντες, είναι δυνατό να προάγουν την πρόωμη γήρανση του δίσκου.

Φαίνεται λοιπόν ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της φόρτισης του ΜΔ και των εκφυλιστικών αλλοιώσεων της ΟΜΣΣ. Οι αλλοιώσεις αυτές είναι πιθανό να ξεκινούν μέσα στο ΜΔ και, πιο συγκεκριμένα, μέσα στον πυρήνα. Αν και δεν έχουν διευκρινισθεί οι μηχανισμοί μέσω των οποίων προκαλούνται και εξελίσσονται αυτές οι αλλαγές, εντούτοις έχει διαπιστωθεί ότι ο σημαντικότερος αιτιοπαθογενετικός παράγοντας για την εκφύλιση του ΜΔ είναι η κακή θρέψη του.

Η τελική πλάκα μεταξύ του σπονδυλικού σώματος και του ΜΔ αποτελεί σημαντική ανατομική δομή για τη μεταφορά θρεπτικών ουσιών στο δίσκο και η παραμόρφωσή της είναι συνάρτηση της φόρτισης που δέχεται. Επιπλέον, η κατευθυντήρια δύναμη για τη διάχυση θρεπτικών ουσιών εξαρτάται πιθανώς από τη φόρτιση. Επομένως, η παραμόρφωση της τελικής πλάκας έχει ως αποτέλεσμα την κακή θρέψη του δίσκου, είτε λόγω μηχανικών παραγόντων και διαταραχής των πιέσεων στην τελική πλάκα είτε λόγω διαταραχής της λειτουργίας της πλάκας ως μεμβράνη. Εφόσον η εκφύλιση του ΜΔ σχετίζεται τόσο με την κακή του θρέψη όσο και με τη φόρτιση που δέχεται, η τελική πλάκα σχετίζεται άμεσα με την εκφυλιστική διαδικασία στο ΜΔ.

Η μηχανική συμπεριφορά του δίσκου στη συμπίεση έχει μελετηθεί λεπτομερώς. Η εκφύλιση του δίσκου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου του πηκτοειδούς πυρήνα, λόγω της μείωσης της συγκέντρωσης των πρωτεογλυκανών και του ύδατος και/ή δομικών αλλαγών στις τελικές πλάκες. Οι μεταβολές αυτές προκαλούν ελάττωση των φορτίων που δέχεται ο πυρήνας κάτω από την επίδραση των συμπιεστικών δυνάμεων και ανισομερή κατανομή των φορτίων προς τον έσω ινώδη δακτύλιο. Ωστόσο, δεν έχει καθοριστεί εάν αυτή η συγκέντρωση της πίεσης αντιστοιχεί σε αυξημένη φόρτιση του ινώδους δακτυλίου. Σε προχωρημένο στάδιο, κάποιοι δίσκοι δε δέχονται σχεδόν καθόλου πίεση στον πυρήνα,



Εικόνα 1. Μέσες τιμές και εύρος πιέσεων κάτω από διαφορετικούς τύπους συμπιεστικών και διατμητικών φορτίων σε ακέρατους ΜΔ και σε ΜΔ που υποβλήθηκαν σε αφαίρεση του ηκτοειδούς πυρήνα. Τα εφαρμοζόμενα φορτία ήταν καθαρή συμπίεση (C0), κάμψη-συμπίεση (FC), έκταση-συμπίεση (EC), αριστερή συμπίεση (LC), δεξιά συμπίεση (RC), οπίσθια διάτμηση (PS), πρόσθια διάτμηση (AS), δεξιά διάτμηση (RS) και αριστερή διάτμηση (LS). Σημειώνεται ότι η συμπιεστική φόρτιση δημιουργεί πολύ μεγαλύτερες πιέσεις από τη διατμητική φόρτιση. Για τα συμπιεστικά φορτία οι μεγαλύτερες πιέσεις παρατηρήθηκαν σε κάμψη και οι μικρότερες σε έκταση και πλάγια συμπίεση. Η αφαίρεση του ηκτοειδούς πυρήνα οδήγησε σε σημαντικά μικρότερες πιέσεις σε σύγκριση με τον ακέρατο ΜΔ σε συμπίεση. Αντίθετα, μόνο η οπίσθια διατμητική φόρτιση φαίνεται να επηρεάζει την πίεση στο δίσκο μετά από την εκτομή του πυρήνα.

γεγονός που αναδεικνύει ότι ο ινώδης δακτύλιος και τα οπίσθια στοιχεία πρέπει να δέχονται ουσιαστικά όλα τα ασκούμενα φορτία.

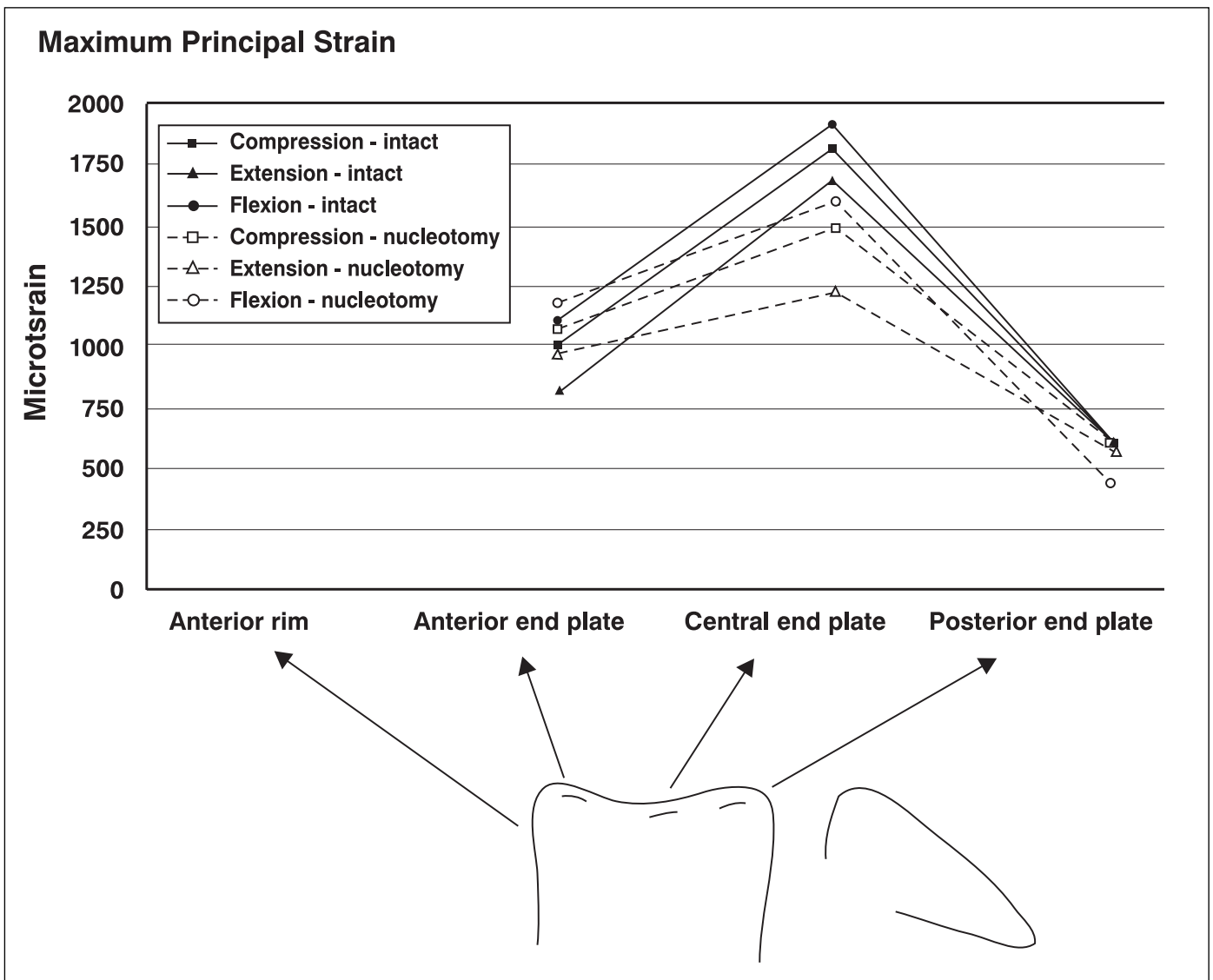
Είναι ευρέως γνωστό ότι η φόρτιση σε οποιοδήποτε μεσοσπονδύλιο δίσκο της ΟΜΣΣ αποτελεί πιο σύνθετο φαινόμενο από την απλή συμπίεση. Η διατμητική φόρτιση, τόσο η προσθιοπίσθια όσο και η πλάγια, έχει μελετηθεί λιγότερο από τη συμπίεση, παρά το γεγονός ότι είναι δυνατό να έχει σοβαρές επιπτώσεις στον τραυματισμό της κατώτερης ΟΜΣΣ.

Πρόσφατα αποδείχθηκε ότι οι ασύμμετρες μετακινήσεις του κορμού αυξάνουν σημαντικά τις διατμητικές δυνάμεις στους ΜΔ. Υπό την επίδραση τέτοιων δυνάμεων στη ΘΟΜΣΣ, η περιφέρεια του σπονδυλικού σώματος, και πιθανώς ο ινώδης δακτύλιος, μεταφέρει μεγαλύτερο ποσοστό φορτίων από ό,τι η τελική πλάκα. Τελευταία

έχουν γίνει μελέτες που περιγράφουν την εμβιομηχανική συμπεριφορά της λειτουργικής σπονδυλικής μονάδας στην ΟΜΣΣ, και ιδιαίτερα την παραμόρφωση της τελικής πλάκας πριν και μετά την αφαίρεση του ηκτοειδούς πυρήνα, κάτω από την επίδραση δυνάμεων συμπίεσης και διάτμησης. Η αφαίρεση του ηκτοειδούς πυρήνα έγινε για να προσομοιώσει τις αλλοιώσεις του πυρήνα που συμβαίνουν κατά την εκφύλιση του ΜΔ.

ΣΥΜΠΙΕΣΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Είναι γνωστό ότι κάτω από συμπίεση ο φυσιολογικός δίσκος αναπτύσσει μια μεγάλη εσωτερική υδροστατική πίεση, η οποία επεκτείνεται ομοιόμορφα στον ινώδη δακτύλιο. Υπό την επίδραση ομοιόμορφης πίεσης στην τελική πλάκα δημιουργούνται μεγαλύτερες πιέσεις στην κε-



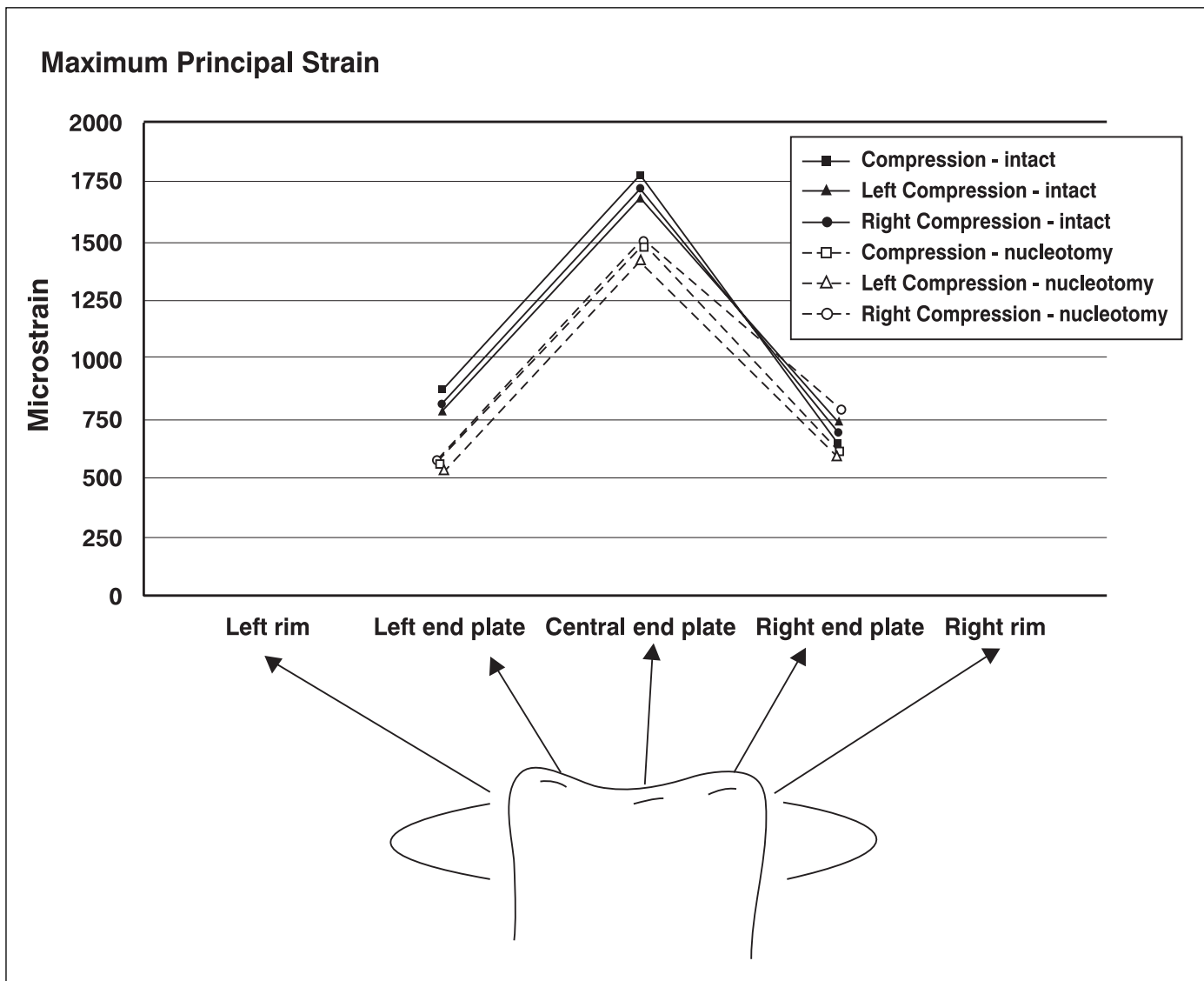
Εικόνα 2. Διάγραμμα των μέσων τιμών των μέγιστων κύριων παραμορφώσεων στις θέσεις τοποθέτησης των ηλεκτροδίων μέτρησης των φορτίσεων σε οβελιαίο επίπεδο μετά από συμπίεση, κάμψη-συμπίεση και έκταση-συμπίεση σε ακέραιους δίσκους και σε δίσκους μετά από εκτομή του πυρήνα. Το διάγραμμα ήταν παρόμοιο για τις μέγιστες παραμορφώσεις σε διατμητική φόρτιση. Σημειώνεται ότι υπήρχαν κατά κύριο λόγο σημαντικές διαφορές πριν και μετά την εκτομή του πυρήνα στο κεντρικό και το οπίσθιο τμήμα της τελικής πλάκας.

ντρική περιοχή και μικρότερες πιέσεις περιφερικά. Αυτά τα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σταθερά τόσο με την εφαρμογή κεντρικής όσο και έκκεντρης συμπίεσης. Οι Horst και Brinckmann παρατήρησαν ότι η έκκεντρη συμπίεση του φυσιολογικού ΜΔ δεν μετέβαλλε την κατανομή των πιέσεων κάτω από το δίσκο, επομένως ούτε στην τελική πλάκα. Σε πρόσφατη μελέτη διαπιστώθηκε ότι οι πιέσεις στο κεντρικό τμήμα της τελικής πλάκας και οι πιέσεις στους ΜΔ ήταν μέγιστες κατά την εφαρμογή συμπίεσης-κάμψης και μικρότερες κατά τη συμπίεση-έκταση (εικόνα 1). Τα ευρήματα αυτά ήταν σύμφωνα με εκείνα προηγούμενων ερευνητών, οι οποίοι υποστήριξαν ότι η επίδραση

αυτή είναι αποτέλεσμα της αυξημένης επαφής των σπονδυλικών αρθρώσεων σε έκταση.

Στη σπονδυλική στήλη με εκφυλιστικές αλλοιώσεις οι Horst και Brinckmann παρατήρησαν ομοιόμορφη κατανομή των πιέσεων στο δίσκο κατά την κεντρική συμπίεση και μια ιδιαίτερα ασύμμετρη κατανομή κάτω από έκκεντρη φόρτιση. Από την άλλη πλευρά, οι McNally και Adams διαπίστωσαν τη σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των πιέσεων μέσα στον πυρήνα κατά τη μέτρια εκφύλιση της ΣΣ και κατέγραψαν τις μέγιστες πιέσεις μέσα στον 1-νώδη δακτύλιο.

Σε πρόσφατη έρευνα σημειώθηκε μειωμένη παρα-

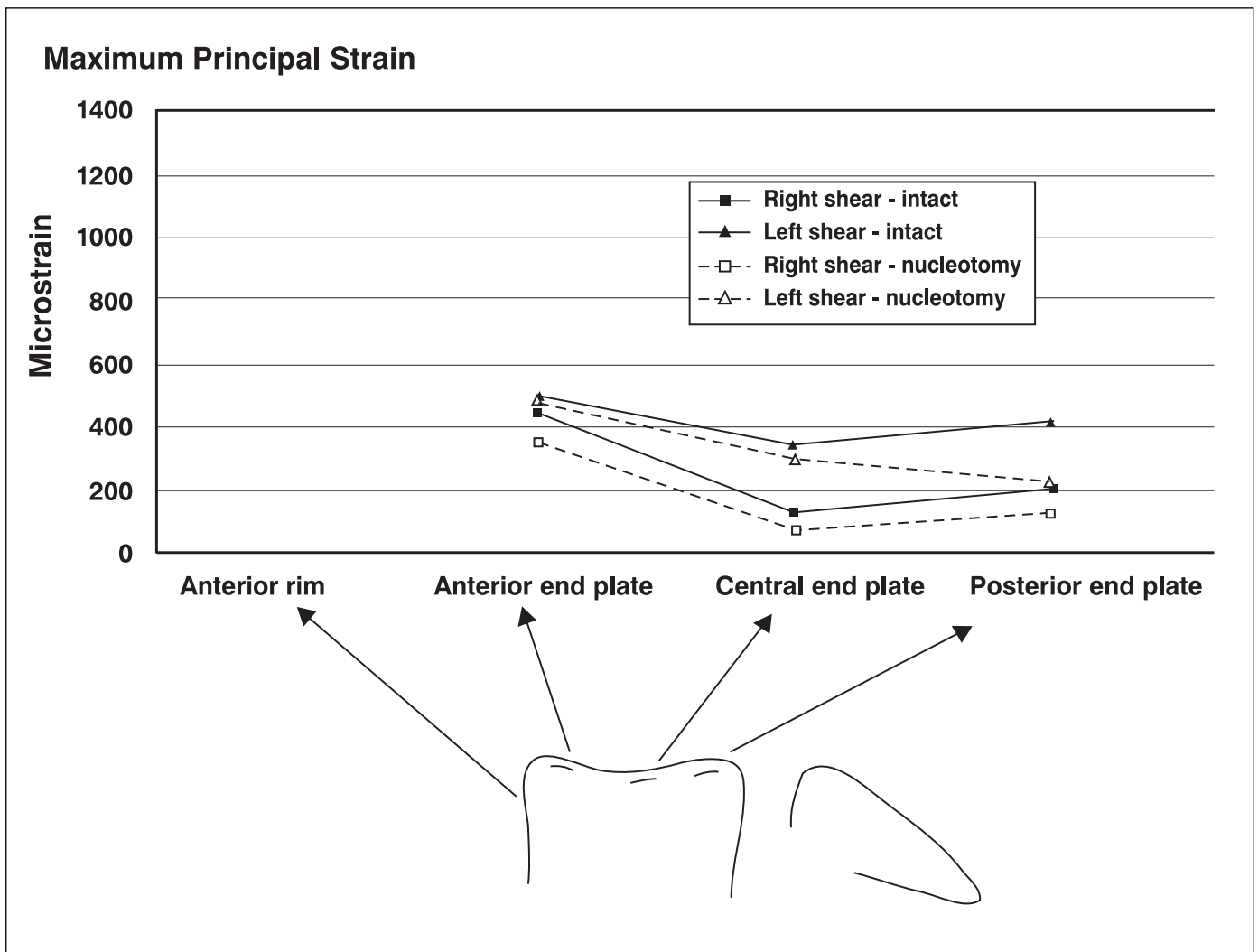


Εικόνα 3. Διάγραμμα των μέσων τιμών των μέγιστων κύριων παραμορφώσεων στις θέσεις των ηλεκτροδίων σε μετωπιαίο επίπεδο μετά από κεντρική συμπίεση, αριστερή συμπίεση και δεξιά συμπίεση σε ακέραιους δίσκους και σε δίσκους μετά από εκτομή του πυρήνα. Το διάγραμμα ήταν παρόμοιο για τις μέγιστες παραμορφώσεις σε διατμητική φόρτιση. Σημειώνεται ότι υπήρχαν κατά κύριο λόγο σημαντικές διαφορές πριν και μετά την εκτομή του πυρήνα στο κεντρικό και στο αριστερό τμήμα της τελικής πλάκας.

μόρφωση της τελικής πλάκας κατά την κεντρική και την έκκεντρη συμπίεση μετά από την εκτομή του ημικυκλικού πυρήνα (εικόνες 2, 3). Αντίθετα με άλλες μελέτες, μερικά δείγματα παρουσίασαν αυξημένες πιέσεις υπό την επίδραση της φόρτισης, ενώ σε άλλα παρατηρήθηκε αντίθετη συμπεριφορά. Αυτή η έλλειψη σταθερών αποτελεσμάτων μπορεί να οφείλεται στη διαφορετική κινητικότητα του εναπομείναντος τμήματος του ημικυκλικού πυρήνα, το οποίο είναι γνωστό ότι κινείται υπό την επίδραση έκκεντρων φορτίων.

Οι μειωμένες πιέσεις που δέχονται οι ΜΔ και η μικρότερη παραμόρφωση των τελικών πλακών μετά από την εκτομή του πυρήνα υποδηλώνει την ανακατανομή των

φορτίων στη λειτουργική σπονδυλική μονάδα, λόγω της αυξημένης φόρτισης των σπονδυλικών αρθρώσεων ή του ινώδους δακτυλίου. Η μέτρηση των πιέσεων στην περιφέρεια των σπονδυλικών σωμάτων έδειξε ότι αυτές μεταβλήθηκαν με την εκτομή του πυρήνα, ενώ οι πιέσεις στις τελικές πλάκες μειώθηκαν. Αυτό σημαίνει ότι τα φορτία κατανέμονται περιφερικότερα προς τον ινώδη δακτύλιο, αλλά όχι τόσο ώστε να αυξηθεί η φόρτιση στην περιφέρεια των σπονδυλικών σωμάτων. Οι σπονδυλικές αρθρώσεις είναι δυνατόν επίσης να δέχονται μεγαλύτερα φορτία σε περίπτωση εκφύλισης, αλλά αυτή η μεταβολή δεν αναμένεται να είναι δραματική, εφόσον η περιστροφή και η έκταση δε μεταβάλλονται σημαντικά με την εκτομή.



Εικόνα 4. Διάγραμμα των μέσων τιμών των μέγιστων κύριων παραμορφώσεων στις θέσεις των ηλεκτροδίων σε οβελιαίο επίπεδο σε αριστερή και δεξιά διατμητική φόρτιση σε ακέραιους δίσκους και σε δίσκους μετά από εκτομή του πυρήνα. Το διάγραμμα ήταν παρόμοιο για τις μέγιστες παραμορφώσεις σε διατμητική φόρτιση.

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Υπάρχουν πολύ λίγες βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με τη συμπεριφορά της λειτουργικής σπονδυλικής μονάδας στη διάτμηση. Έχει παρατηρηθεί ότι οι πιέσεις που αναπτύσσονται κατά τη διατμητική φόρτιση είναι πολύ μικρότερες απ' ό,τι στη συμπίεση.

Οι Frey και συν. παρατήρησαν ότι στη ΘΟΜΣΣ η περιφέρεια των σπονδυλικών σωμάτων δέχεται το μεγαλύτερο μέρος των διατμητικών δυνάμεων που εφαρμόζονται στη σπονδυλική στήλη, πιθανώς λόγω της δράσης του ινώδους δακτυλίου. Σε μια πιο πρόσφατη μελέτη του ίδιου ερευνητή δεν υπήρξε ουσιαστικά καμιά αλλαγή στη λειτουργία της σπονδυλικής μονάδας μετά από την εκτομή του πηκτοειδούς πυρήνα (εικόνα 4).

Τη μόνη εξαίρεση αποτέλεσε η εφαρμογή οπίσθιας διά-

τμησης, κατά την οποία τα φορτία στους ΜΔ μειώθηκαν σημαντικά, όπως και η παραμόρφωση του κεντρικού τμήματος της τελικής πλάκας. Τα φορτία που δέχονται τα σπονδυλικά σώματα παρέμειναν πολύ υψηλά μετά από την εκτομή του πυρήνα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκτομή του πηκτοειδούς πυρήνα, η οποία αντιστοιχεί σε ΣΣ με μέτριου βαθμού εκφυλιστικές αλλοιώσεις, προκαλεί μείωση της πίεσης στο δίσκο, μικρότερη παραμόρφωση της τελικής πλάκας κάτω από συμπίεση και αυξημένη φόρτιση στην περιφέρεια, ενώ οι παραμορφώσεις στην περιφέρεια των σπονδυλικών σωμάτων δε μεταβάλλονται.

Σε διατμητική φόρτιση, οι παραμορφώσεις στην περιφέρεια των σπονδυλικών σωμάτων και την τελική πλάκα δε μεταβάλλονται, με εξαίρεση την οπίσθια διάτμηση (μείωση των παραμορφώσεων στην τελική πλάκα).

Ένας ήπια εκφυλισμένος δίσκος αναμένεται να έχει παρόμοια συμπεριφορά, αλλά όχι τόσο έντονες συνέπειες. Η πίεση στο ΜΔ είναι μικρότερη σε διατμητική απ' ό,τι σε συμπιεστική φόρτιση. Μικρότερες παραμορφώσεις της τελικής πλάκας προκαλούν μικρότερη μείωση στη μεταφορά των θρεπτικών ουσιών που απαιτούνται για τη διατήρηση της φυσιολογικής λειτουργίας του δίσκου.

Ο συνδυασμός υψηλής συμπιεστικής φόρτισης του ινώδους δακτυλίου και αυξημένης διατμητικής φόρτισης μπορεί να επιφέρει πρώιμη βλάβη του ινώδους δακτυλίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adams MA, Hutton WC. Gradual disc prolapse. *Spine* 1985; 10:524-531.
2. Adams MA, Freeman JC, Morris HP et al. Mechanical initiation or intervertebral disc degeneration. *Spine* 2000; 25:1625-1636.
3. Adams MA, McNally DS, Dolan P. "Stress" distribution inside intervertebral discs: the effects of age and degeneration. *J Bone Joint Surg [Br]* 1996; 78B:965-972.
4. Berkson MH, Nachemson A, Schultz AB. Mechanical properties of human lumbar spine motion segments: Part II: responses in compression and shear; influence of gross morphology. *J Biomech Eng* 1979; 101:53-57.
5. Brinckmann P, Frobin W, Hierholzer E et al. Deformation of the vertebral end plate under axial loading of the spine. *Spine* 1983; 8:851-856.
6. Brinckmann P, Grootenboer H. Change of disc height, radial disc bulge, and intradiscal pressure from discectomy. *Spine* 1991; 16:641-646.
7. Buckwalter JA. Spine update: Aging and degeneration of the human intervertebral disc. *Spine* 1995; 20:1307-1314.
8. Eyre D, Benya P, Buckwalter J et al. The intervertebral disk: basic science perspectives. In: Frymoyer JW, Gordon SL. (eds): *New Perspectives on Low Back Pain*. Park Ridge, IL: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1989, pp147-207.
9. Fathallah FA, Marras WS, Parnianpour M. An assessment of complex spinal loads during dynamic lifting tasks. *Spine* 1998; 23:706-716.
10. Frei HP, Oxiand TR, Slomczykowski, Nolte LP. Vertebral body deformations contrasted under compression and shear loading. *Proc ISSLS* 1997:57.
11. Frei HP, Oxland TR, Rathonyi GC, Nolte LP. The effect of nucleotomy on lumbar spine mechanics in compression and shear loading. *Spine* 2001; 26:2080-2089.
12. Holm S. Pathophysiology of disc degeneration. *Acta Orthop Scand Suppl* 1993; 251.
13. Holmes AD, Hukins DW, Freemont AJ. Endplate displacement during compression of lumbar vertebra-disc-vertebra segments and the mechanism of failure. *Spine* 1993; 18:128-135.
14. Hongo M, Abe E, Shimada Y, et al. Surface strain distribution on thoracic and lumbar vertebrae under axial compression: the role in burst fractures. *Spine* 1999; 24:1197-1202.
15. Horst M, Brinckmann P. Measurement of the distribution of axial stress on the endplate of the vertebral body. *Spine* 1981; 6:217-232.
16. Krag MH, Seroussi RE, Wilder DG et al. Internal displacement distribution from in vitro loading of human thoracic and lumbar spinal motion segments: experimental results and theoretical predictions. *Spine* 1987; 12:1001-1007.
17. Kurowski P, Kubo A. The relationship of degeneration of the intervertebral disc to mechanical loading conditions on lumbar vertebrae. *Spine* 1986; 11:726-731.
18. Lorz JC, Colliou OK, Chin JR et al. Compression-induced degeneration of the intervertebral disc: an in vivo mouse model and finite element study. *Spine* 1998; 23:2493-2506.
19. Marras WS, Granaia KP. Changes in trunk dynamics and spine loading during repeated trunk exertions. *Spine* 1997; 22:2564-2570.
20. McGill SM, Norman RW. Partitioning of the L4-L5 dynamic moment into disc, ligamentous, and muscular components during lifting. *Spine* 1986; 11:666-678.
21. McNally DS, Adams MA. Internal intervertebral disc mechanics as revealed by stress profilometry. *Spine* 1992; 17:66-73.
22. McNally DS, Shackelford IM, Goodship AE et al. In vivo stress measurement can predict pain on discography. *Spine* 1996; 21:2580-2587.
23. Nachemson A. The load on the lumbar discs in different positions of the body. *Clin Orthop* 1966; 45:7-12.
24. Nachemson A, Schultz AB, Berkson MH. Mechanical properties of human lumbar spine motion segments. *Spine* 1979; 4:1-8.
25. Pery O. Fracture of the vertebral endplate: a biomechanical investigation. *Acta Orthop Scand* 1957; (suppl 25) 1:100.
26. Rolander SD, Blair WE. Deformation and fracture of the lumbar vertebral end plate. *Orthop Clin North Am* 1975; 6:75-81.
27. Shah JS, Hampson WG, Jayson MI. The distribution of surface strain in the cadaveric lumbar spine. *J Bone Joint Surg [Br]* 1978; 60B:246-251.
28. Shames IH. *Introduction to Solid Mechanics*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1975.
29. Shirazi-Adl SA, Shrivastava SC, Ahmed AM. Stress analysis of the lumbar disc-body unit in compression: a three-dimensional nonlinear finite element study. *Spine* 1984; 9:120-134.
30. Shirazi-Adl SA. Finite-element simulation of changes in the fluid content of human lumbar discs: mechanical and clinical implications. *Spine* 1992; 17:206-212.
31. Urban JP, McMullin JF. Swelling pressure of the lumbar intervertebral discs: influence of age, spinal level, composition, and degeneration. *Spine* 1988; 13:179-187.
32. Urban JPG. The effect of physical factors on disc cell metabolism. In: Buckwalter JA, Goldberg VM, Woo SL-Y (eds) *Musculoskeletal: Soft Tissue Aging: Impact on Mobility*. Rosemont, IL: American Academy of Orthopaedic Surgeons 1993, pp. 391-412.
33. White A, Panjabi M. *Clinical Biomechanics of the Spine*. 2nd ed. JB Lippincott, Philadelphia 1990.
34. Yang KH, King AI. Mechanism of facet load transmission as a hypothesis for low back pain. *Spine* 1984; 9:557-565.