



**ΤΕΙ Κρήτης**  
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

# ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ



ΣΥΝΤΑΚΤΗΣ: ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ ΙΩΑΝΝΑ-ΜΑΡΙΑ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΠΕΤΟΥΣΗΣ ΜΑΡΚΟΣ, ΔΡ. ΒΑΪΡΗΣ  
ΑΧΙΛΛΕΑΣ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2016

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ	
1.1 ΟΣΤΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ.....	6
1.2 ΚΟΙΝΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ ΓΝΗΣΙΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ .....	7
1.3 ΙΔΙΑΙΤΕΡΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ ΓΝΗΣΙΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ .....	9
1.4 ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ .....	14
1.5 ΑΡΘΡΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ .....	15
1.5.1 ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΕΣ ΣΥΓΧΟΝΔΡΩΣΕΙΣ .....	15
1.5.2 ΣΥΝΔΕΣΜΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ .....	19
1.5.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ.....	20
1.6 Η ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΩΣ ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΙ ΟΙ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΗΣ.....	20
1.6.1 ΚΥΡΤΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ.....	20
1.6.2 ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ .....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ	
2.1 ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ.....	24
2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ.....	25
2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΥΡΤΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ .....	28
2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ .....	29
2.5 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ.....	30
2.6 ΕΥΡΟΣ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΤΑ ΤΟ ΟΒΕΛΙΑΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ .	40
2.7 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ .....	41
2.8 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ Ο5, Ο3 ΚΑΙ Θ12 ΣΠΟΝΔΩΛΩΝ .....	44
2.9 ΠΑΘΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΤΗ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ	
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	48
3.1.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΤΗΝ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ .....	49
3.1.2 ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΣΗ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ .....	50
3.1.3 ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝ ΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΟΣΦΥΙΚΗ ΜΟΙΡΑ .....	51
3.1.4 ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΔΗΛΩΝΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ.....	52
3.1.5 Η ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ.....	52
3.1.6 ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ .....	52
3.2 ΕΚΦΥΛΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ .....	55
3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	56
3.3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ .....	58

3.3.2 ΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	59
3.3.3 ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΠΟ ΥΓΙΗ ΤΜΗΜΑΤΑ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	60
3.3.4 ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΩΝ ΕΚΦΥΛΙΣΜΕΝΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	62
3.3.5 ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	63
3.3.6 ΦΟΡΤΙΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	64
3.3.7 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ	
4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΓΙΗΣ ΚΑΙ ΕΚΦΥΛΙΣΤΙΚΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΘΕΡΑΠΕΙΑ UNDERWATER.....	65
4.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΦΥΛΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΣΧΕΤΙΖΕΤΑΙ ΕΜΕΣΑ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ ΤΗΣ.....	68
4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΑΦΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΦΥΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	72
4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	75
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ ΣΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ.....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΩΣ ΣΥΝΟΛΟ	
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	87

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σπονδυλική στήλη αποτελεί ένα από τα πιο βασικά μέρη του σώματος κάθε ζωντανού οργανισμού. Με τη βοήθεια της στηρίζεται και δημιουργείται η δομή του σώματος. Έτσι, με τον τρόπο που είναι κατασκευασμένη επιτρέπει την κίνηση του σώματος και συμβάλλει στην προστασία των σωματικών οργάνων, αφού πολλά από αυτά περικλείονται από εκείνη. Τη συνθέτουν διάφορων ειδών μέρη όπως και εκείνη με την σειρά της προστατεύεται από άλλα.

Η ανθρώπινη σπονδυλική στήλη καθημερινά δέχεται διαφορετικά φορτία, λόγω των διάφορων κινήσεων που πραγματοποιούν τα σώματα. Η λανθασμένη στάση του ανθρώπινου σώματος ή οι υπερβολικές καταπονήσεις του, μπορούν να οδηγήσουν σε παθήσεις, όπως η σκολίωση, η κύφωση αλλά και παθήσεις όπως η δισκοπάθεια, η εκφυλιστική σπονδυλαρθρίτιδα, η οσφυαλγία-ισχιαλγία και άλλες.

Για το λόγο αυτό πλήθος υπολογιστικών μοντέλων που προσομοιάζουν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή τη συμπεριφορά της ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης έχουν αναπτυχθεί, τα οποία συντελούν στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης και στη μελέτη σε ένα ασφαλές περιβάλλον των παραμέτρων που την επηρεάζουν και μπορεί να συντελέσουν στην ανάπτυξη παθήσεων.

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας σε σχέση με τις απαιτήσεις και τις παραμέτρους για τη μοντελοποίηση της ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης σε λογισμικό σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα διερευνηθούν οι φορτίσεις που δέχεται η ανθρώπινη σπονδυλική στήλη, οι ιδιότητες των υλικών των μερών της σπονδυλικής στήλης, οι παθήσεις της σπονδυλικής στήλης, ο τρόπος αντιμετώπισης τους και τα σχετικά μοντέλα σε υπολογιστή που έχουν παρουσιαστεί έως τώρα στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία.

Για όλα αυτά θα γίνει περιγραφή, κατάλληλη βιβλιογραφική αναφορά και κριτική αξιολόγηση, με βάση την εγκυρότητα, το χρόνο παρουσίασης και την επίδραση κάθε μελέτης στην επιστημονική κοινότητα.

Τέλος, στα πλαίσια της εργασίας θα γίνει εκτενής περίληψη της εργασίας στα αγγλικά.

## **SUMMARY**

The spine is one of the most essential parts of the body of every living organism. The body structure is created with the very help of the spine. So with the way it is constructed allows the movement of the body and helps to protect the body organs, since many of them are surrounded by her. The spine is comprised of various kinds of parts and is protected by some others.

The human spine receives different loads on a daily basis, because of the different movements operating bodies. Faulty posture of the human body or the excessive strain can lead to conditions such as scoliosis, kyphosis and diseases such as slipped disc, degenerative spondylitis, back pain-sciatica and other.

For this reason, numerous computer models that simulate the computer behavior of the human spine have been developed, which contribute to a better understanding of the behavior of the human spine and study in a safe environment of the parameters which affect her and may contribute to development conditions.

The subject of this final work is to investigate the international scientific literature in relation to the requirements and parameters for modeling the human spine in software on a computer. In this project the loads that human spine receives will be investigated, the material properties of the parts of the spine, the spine disorders, the way to deal with them and related models on a computer that has been presented so far in the international scientific bibliography.

For the above mentioned there will be a detailed description, proper citation and critical assessment, based on the validity, the presentation time and the effect of each study in the scientific community.

Finally, as part of the work will be extensive summary in English.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Με τον όρο μοντελοποίηση ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία κατασκευάζονται μοντέλα φυσικών δομών και διεργασιών με κύριο σκοπό την μετέπειτα μελέτη τους. Προσπαθώντας να μελετήσει κάποιος το εσωτερικό του ανθρωπίνου σώματος, γίνεται αντιληπτό πως είναι απαραίτητη η χρήση κάποιου μοντέλου ώστε να μην έρχονται σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Η προηγούμενη διαδικασία είναι επίσης και εξαιρετικά δαπανηρή. Οι δομές οι οποίες κατασκευάζονται μπορούν να είναι δύο κατηγοριών. Στη πρώτη κατηγορία περιγράφονται τα φυσικά μοντέλα των οποίων τα χαρακτηριστικά μπορούν να αλλάζουν ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη και τις επιλογές που δίνονται από το εκάστοτε λογισμικό. Στην δεύτερη κατηγορία βρίσκονται μοντέλα χωρίς ουσιαστικό σχήμα, θεωρητικά μοντέλα τα οποία αποτελούν αφηρημένες έννοιες, τα οποία, όμως, σε συνεργασία με λογικές προτάσεις καθίστανται ικανά ώστε να περιγράψουν μια δομή ή διεργασία.

Στις μέρες μας, όπου η τεχνολογία έχει κάνει τεράστια βήματα, οποιοσδήποτε είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, μπορεί με τη χρήση των κατάλληλων λογισμικών να φτιάξει κι ο ίδιος ένα μοντέλο. Στη συνέχεια μπορεί να μελετήσει τόσο το ίδιο όσο και τη λειτουργία του. Αυτός είναι και ο τρόπος με τον οποίο πολλές μεγάλες εταιρείες, εδραιωμένες ή καινούργιες μπορούν να προβλέψουν με σιγουριά αν τα προϊόντα που κατασκευάζονται ηλεκτρονικά είναι ικανά να ευδοκμήσουν σε πραγματικές συνθήκες.

Η περισσότερο, κατά κοινή ομολογία, διαδεδομένη μέθοδος μομοντελοποίησης είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων. Τα λογισμικά που κατασκευάστηκαν βασιζόμενα στη συγκεκριμένη φιλοσοφία, αποτελούνται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα, το οποίο ασχολείται με τα χαρακτηριστικά του μοντέλου και το δεύτερο, το οποίο ασχολείται με τον τρόπο που συμπεριφέρονται τα μοντέλα αυτά σε συνεργασία με άλλα μοντέλα και με το περιβάλλον. Παράδειγμα του πρώτου τμήματος θα μπορούσε να είναι ένα ρευστό, ενώ του δεύτερου τμήματος η κίνηση κάποιου ρευστού. Για πολλά χρόνια, τα δύο αυτά τμήματα δεν μπορούσαν να υλοποιηθούν από ένα μόνο λογισμικό. Πλέον, υπάρχουν προϊόντα τα οποία απευθύνονται σε όλες τις αγορές καθώς οι επιλογές των κατασκευών είναι πλέον απεριόριστες [20].

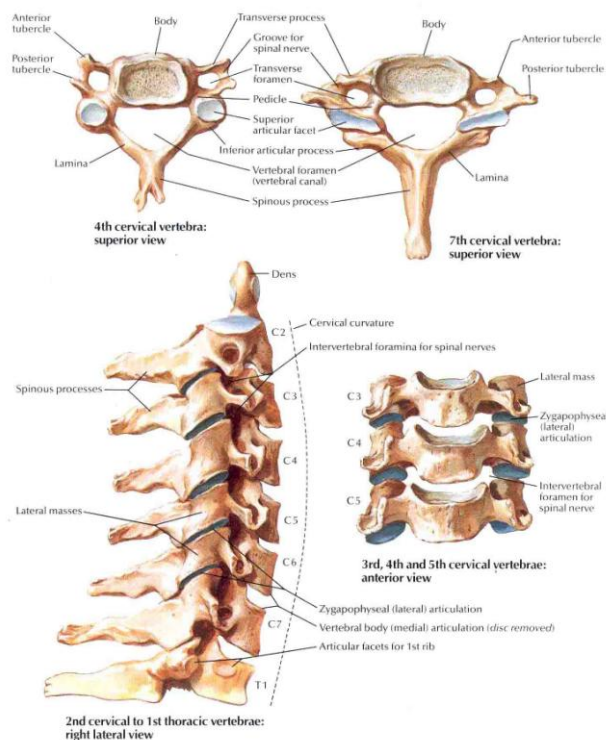
Παρ' ότι τα λογισμικά αυτά χρησιμοποιούνταν ευρέως δεν είχαν αναπτυχθεί παρά μέχρι πριν λίγα χρόνια, λογισμικά σχεδιασμένα έτσι ώστε να κατασκευάζουν μοντέλα βασισμένα στο ανθρώπινο σώμα. Αυτό, φυσικά, ήταν αποτέλεσμα έντονου προβληματισμού για τον πραγματικά ατέλειωτο αριθμό μεταβλητών που καλούνταν να αντιμετωπίσουν καθώς, ο κάθε άνθρωπος αποτελεί μία μοναδική περίπτωση την οποία και θα έπρεπε να συμπεριλάβουν στην έρευνα τους. Την κατασκευή ενός τέτοιου λογισμικού όπως είναι φυσικό ανέλαβαν κυρίως πανεπιστήμια.

## ❖ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ

### 1.1 ΟΣΤΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ

Η σπονδυλική στήλη, η οποία αποτελεί το κύριο όργανο στήριξης του σώματος, βρίσκεται στο πίσω μέρος του μέσου οβελιαίου επιπέδου του, αρχίζοντας από τη βάση του κρανίου, με το οποίο ενώνεται και τερματίζει στον κόκκυγα.

Επίσης, πέραν του ότι αποτελεί στηρικτικό σκελετικό άξονα για την κεφαλή και τον κύριο κορμό, μεταβιβάζει με τη βοήθεια των ανώνυμων οστών τόσο το βάρος τους όσο και τις μηχανικές επιδράσεις πάνω τους, στα κάτω άκρα. Όσων αφορά το ανθρώπινο σώμα, την σπονδυλική στήλη αποτελούν 33 με 34 μικρού μήκους οστά κυλινδρικού σχήματος. Συνολικά, οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι, αποτελούν το ένα τέταρτο του μήκους της σπονδυλικής στήλης.



Σχήμα 1.1 Γενική δομή σπονδυλικής στήλης.

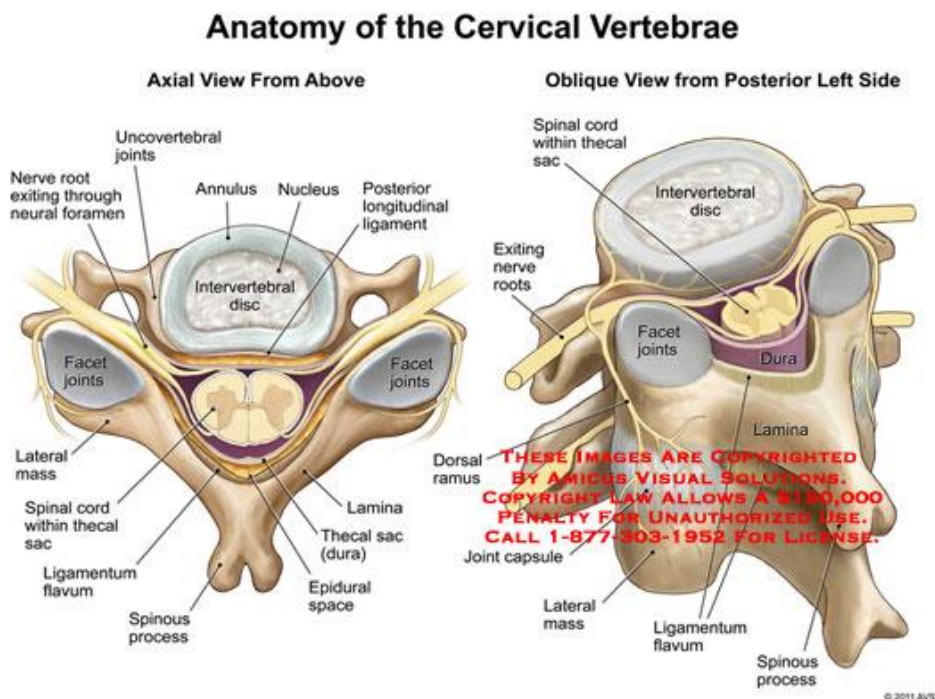
Η εικόνα απεικονίζει τα μέρη της σπονδυλικής στήλης μέσα από την ανατομία της. Κάποια από τα μέρη που την αποτελούν είναι η περιοχή του πηκτοειδή πυρήνα, ο ινώδης δακτύλιος, ο σπόνδυλος και ο νωτιαίος μυελός που η θέση του είναι στο κέντρο της σπονδυλικής στήλης [58].

Η σπονδυλική στήλη αποτελείται από 7 αυχενικούς, 12 θωρακικούς, 5 οσφυϊκούς και 4 με 5 κοκκυγικούς σπονδύλους. Όλοι οι σπόνδυλοι, εξαιρουμένων των ιερών και κοκκυγικών,

ονομάζονται γνήσιοι σπόνδυλοι ενώ οι ιεροί και οι κοκκυγικοί ονομάζονται νόθοι σπόνδυλοι λόγω του ότι συμφύονται και συνοστεώνονται πρώιμα.

## 1.2 ΚΟΙΝΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ ΓΝΗΣΙΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ

Κάθε ένας γνήσιος σπόνδυλος ξεχωριστά, (Σχήμα 1.2) εμφανίζει τέσσερα κύρια μέρη: το σώμα, το τόξο, τις αποφύσεις και το σπονδυλικό τμήμα.



Σχήμα 1.2 Ανατομία μεσοσπονδύλιου δίσκου.

Τα μέρη που τον συντελούν από την εσωτερική προς την εξωτερική στρώση. Με τα βελάκια φαίνεται ξεκάθαρα η περιοχή κάθε οργάνου [59].

### Σώμα σπονδύλου

Πρόκειται για το ογκωδέστερο τμήμα του σπονδύλου, το οποίο είναι κυλινδροειδές και εμφανίζει άνω και κάτω επιφάνεια καθώς και μία περιφέρεια. Οι επιφάνειες συντάσσονται με τον υποκείμενο και τον υπερκείμενο σπόνδυλο με την παρεμβολή του μεσοσπονδύλιου δίσκου ενώ η περιφέρεια ορίζει από μπροστά το σπονδυλικό τμήμα.

### Σπονδυλικό τόξο

Το σπονδυλικό τόξο φέρεται σαν κρίκος πίσω από το σώμα και σε συνεργασία αυτών των δύο, ορίζεται το σπονδυλικό τμήμα. Το σπονδυλικό τόξο εκφύεται, δεξιά-αριστερά, από το σώμα με ένα στενότερο κομμάτι το οποίο ονομάζεται αυχέννας, ενώ προς την πίσω πλευρά του, καταλήγει σε ένα πιο πλατύ μέρος, το πέταλο, με αποτέλεσμα οπτικά να μπορεί να παραλληλιστεί με ένα τόξο. Πάνω και κάτω από τον αυχένα σχηματίζεται η άνω και η κάτω



σπονδυλική εντομή (η κάτω βαθύτερη από την άνω). Μεσοσπονδύλιο τμήμα, ονομάζεται το τμήμα που σχηματίζουν δύο συναπτοί σπόνδυλοι. Δημιουργείται μια εγκοπή, αφού ενώνονται η κάτω σπονδυλική εγκοπή του ενός σπονδύλου και η πάνω του διπλανού του και από την εγκοπή αυτή διέρχονται τόσο το νωτιαίο νεύρο όσο τα νωτιαία αγγεία. Το σπονδυλικό τόξο είναι εκείνο από το οποίο εκφύονται οι αποφύσεις των σπονδύλων.

## Σπονδυλικές αποφύσεις

Οι σπονδυλικές αποφύσεις είναι επτά (7) , που χωρίζονται σε:

- Τρεις μυϊκές: μία ακανθώδη και δύο εγκάρσιες, και
- Τέσσερις αρθρικές: δύο άνω και δύο κάτω, για την άρθρωση με τον υποκείμενο και τον υπερκείμενο σπόνδυλο.

Η ακανθώδης απόφυση εκφύεται από το μέσο της οπίσθιας επιφάνειας του πετάλου και φέρεται οβελιαία προς τα πίσω. Εμφανίζει διαφορετική ανάπτυξη, σχήμα και φορά στις διάφορες μοίρες της σπονδυλικής στήλης.

Οι εγκάρσιες αποφύσεις (δεξιά - αριστερή) εκφύονται από το όριο αυχένα –πετάλου και φέρονται εγκάρσια προς τα πλάγια ή προς τα πίσω και έξω.

Η φορά των αρθρικών αποφύσεων είναι σχεδόν κάθετη, καταλήγουν στο πίσω μέρος της σπονδυλικής εγκοπής. Φέρουν ανάλογες αρθρικές επιφάνειες για την άρθρωση τους με τον υπερκείμενο και τον υποκείμενο σπόνδυλο.

## Σπονδυλικό τμήμα

Το σπονδυλικό τμήμα περικλείεται από το σπονδυλικό σώμα και το σπονδυλικό τόξο έχοντας ως μπροστά όριο το πρώτο και ως πίσω και πλάγιο όριο το δεύτερο. Τόσο το σχήμα όσο και το μέγεθος του σπονδυλικού τμήματος ποικίλει ανάλογα με το σημείο της σπονδυλικής στήλης στο οποίο βρίσκεται. Όταν οι σπόνδυλοι είναι στην ανατομική τους θέση από τα διαδοχικά σπονδυλικά τμήματα, που βρίσκονται σε σειρά, σχηματίζεται ο σπονδυλικός σωλήνας, μέσα στον οποίο βρίσκεται ο νωτιαίος μυελός με τις μήνιγγες, τα αγγεία και τα νεύρα. Στα τοιχώματα του σπονδυλικού σωλήνα διαπιστώνεται και η ύπαρξη διάκενων τα οποία φράσσονται με συνδέσμους (μεσοσπονδύλιους και μεσοτόξιους).

Πολλοί παράγοντες, όπως η ηλικία, το φύλο, κάποια κυρτώματα της σπονδυλικής στήλης, ο δείκτης της σπονδυλικής στήλης (σχέσεις μήκους και ύψους) κατά μοίρες και συνολικά , η πυκνότητα και ο βαθμός τιάνωσης των σπονδύλων, η μείωση ή η αύξηση του αριθμού των σπονδύλων κατά τις διάφορες μοίρες, η μηχανική δράση των μυών στις προσφύσεις τους και άλλα μπορούν να συντελέσουν στην ανάπτυξη οστεοφύτων, φαινόμενο που συμβαίνει μετά τη μέση ηλικία. Η μορφολογία των σπονδύλων και η λειτουργική ικανότητα κατά μοίρες της σπονδυλικής στήλης διαφοροποιούνται από την ύπαρξη των οστεοφύτων μετά από την μέση ηλικία και τον τρόπο που αυτά διατάσσονται τοπογραφικά στις διάφορες θέσεις κάθε

σπονδύλου και στις διάφορες μοίρες της σπονδυλικής στήλης, ώστε κάθε μοίρα της σπονδυλικής στήλης μπορεί να προκαλέσει ανάλογες διαταραχές λειτουργικές και κλινικά συμπτώματα.

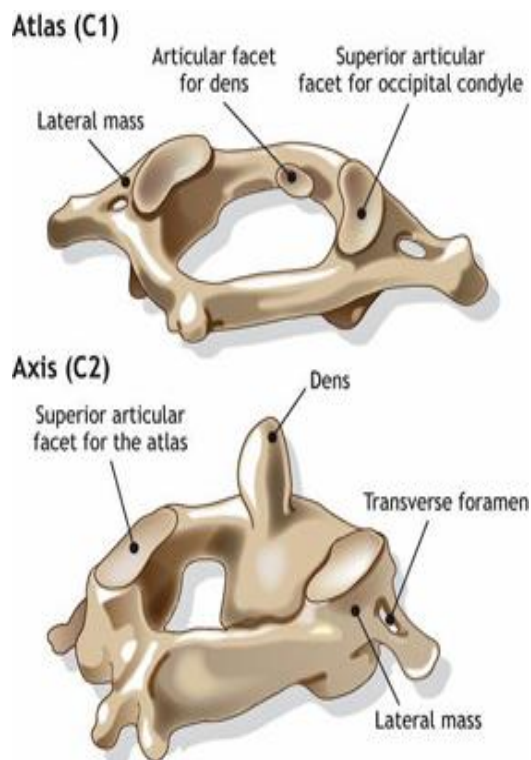
### **1.3 ΙΔΙΑΙΤΕΡΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ ΓΝΗΣΙΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ**

Οι γνήσιοι σπόνδυλοι, εκτός από κοινά, μεταξύ τους, γνωρίσματα, έχουν και ιδιαίτερα μορφολογικά γνωρίσματα τα οποία βοηθούν στη διάκριση των σπονδύλων κάθε μοίρας Σ.Σ.

#### **Αυχενικοί σπόνδυλοι**

Εκτός από τον έβδομο σπόνδυλο, στον οποίο το τρήμα δεν υπάρχει πάντα, κάθε ένας αυχενικός σπόνδυλος εμπεριέχει στην εγκάρσια απόφυσή του ένα τρήμα, το εγκάρσιο τρήμα. Το σύνολο των τρημάτων αυτών αποτελεί τον εγκάρσιο σωλήνα ο οποίος εμφανίζει ατελή τοιχώματα τα οποία, όμως, συμπληρώνονται με μαλακά μόρια. Μέσα από τον εγκάρσιο σωλήνα, συχνότερα από του 6ου αυχενικού σπονδύλου και πάνω, πορεύεται η σπονδυλική αρτηρία, η οποία έπειτα, εισχωρεί στο κύτος του κρανίου μέσω του ινιακού τρήματος. Ο μικρότερος από όλους τους σπόνδυλους, είναι το σώμα των αυχενικών σπονδύλων. Η ακανθώδης απόφυση προς το τέλος της χωρίζεται σε δύο ξεχωριστά τμήματα. Το σχήμα του σπονδυλικού τρήματος είναι τριγωνικό και αρκετά μεγάλο ενώ όσων αφορά τις αρθρικές επιφάνειες, εκείνες των πάνω αρθρικών αποφύσεων βλέπουν προς τα πίσω και πάνω, ενώ εκείνες των κάτω αρθρικών αποφύσεων προς τα μπροστά και κάτω. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3.

Εκτός από τα παραπάνω γνωρίσματα των αυχενικών σπονδύλων, ο 1ος, ο 2ος και ο 7ος έχουν δική τους μορφολογία. Ο 1ος αυχενικός σπόνδυλος ή άτλαντας δε διαθέτει σώμα ούτε ακανθώδη απόφυση.



Σχήμα 1.3 Αυχενικοί σπόνδυλοι

Η διαφοροποίηση του πρώτου και του δεύτερου αυχενικού σπονδύλου [60].

Έχει μορφή κρίκου σχηματιζόμενου από δύο πλάγια ογκώματα, που συνδέονται μεταξύ τους με ένα μπροστά και ένα πίσω τόξο. Η άνω επιφάνεια του κάθε πλαιγίου ογκώματος εμφανίζει κοίλη αρθρική επιφάνεια, την γληνοειδή κοιλότητα. Με αυτήν αρθρώνεται ο άτλαντας με το σύστοιχο ινιακό κόνδυλο και σχηματίζουν την άνω κεφαλική ή ατλαντοϊνιακή διάρθρωση. Η κάτω επιφάνεια κάθε πλαιγίου ογκώματος εμφανίζει αρθρική επιφάνεια που συντάσσεται με την σύστοιχη αρθρική επιφάνεια του 2ου αυχενικού σπονδύλου. Η οπίσθια επιφάνεια του προσθίου τόξου εμφανίζει το βοθρίο του οδόντα, που χρησιμεύει για την άρθρωση με τον οδόντα του άξονα.

Ο 2ος αυχενικός σπόνδυλος ή άξονας, εμφανίζει κυλινδρικό εξόγκωμα προς τα πάνω, ο οποίος λέγεται οδόντας του άξονα. Ο οδόντας του άξονα είναι το κομμάτι εκείνο του άτλαντα το οποίο έχει ενarthρωθεί στον άξονα. Συντάσσεται με το βοθρίο του οδόντος προς σχηματισμό μέρους της κάτω κεφαλικής ή ατλαντοαξονικής διάρθρωσης, της οποίας η επιστημονική ονομασία είναι πρόσθια μέση ατλαντοαξονική.

Κύριο χαρακτηριστικό του έβδομου αυχενικού σπονδύλου είναι η μακρά και άσχιστη ακανθώδη του απόφυση, η οποία, λόγω του ότι προεξέχει, ονομάζεται προέχον σπόνδυλος. Μια άλλη χρήση της συγκεκριμένης απόφυσης είναι ότι αποτελεί σημείο αναφοράς στη ράχη για την αρίθμηση των σπονδύλων και των πλευρών [80].

## Θωρακικοί σπόνδυλοι

Χαρακτηριστικά των θωρακικών σπονδύλων (Σχήμα 1.4) είναι:

- το σώμα, σε πορεία από τους πρώτους μέχρι τους τελευταίους σπονδύλους, αυξάνεται με μέγεθος μεγαλύτερο των αυχενικών και μικρότερο των οσφυϊκών,
- το σπονδυλικό τρήμα, που είναι στρόγγυλο και μικρό,
- τις ακανθώδεις αποφύσεις, οι οποίες είναι μακρές και έχουν σχεδόν κατακόρυφη διεύθυνση, καλύπτοντας τις υποκείμενες, όπως τα κεραμίδια.

Αυτό όμως που χαρακτηρίζει τους θωρακικούς σπόνδυλους είναι οι πρόσθετες αρθρικές επιφάνειες που παρουσιάζουν στο σώμα και στις εγκάρσιες αποφύσεις.

Οι αρθρικές επιφάνειες στα πλάγια του σώματος (άνω, κάτω, δεξιά και άνω, κάτω αριστερά) ονομάζονται πλευρικά ημιγλήνια. Οι αρθρικές επιφάνειες στις εγκάρσιες αποφύσεις (μια δεξιά και μία αριστερά) ονομάζονται εγκάρσιες γλήνες



Σχήμα 1.4 Θωρακικός σπόνδυλος

Σε πλάγια όψη από δεξιά και κάτοψη από αριστερά [65].

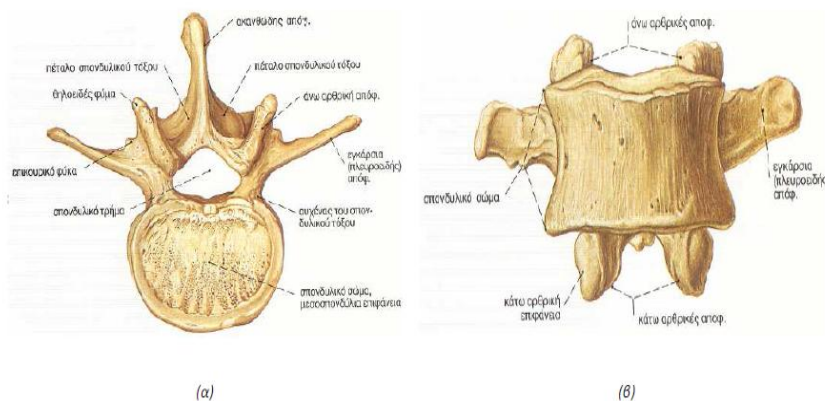
Τα πλευρικά ημιγλήνια του κάθε ημιμορίου του σώματος βρίσκονται ακριβώς μπροστά από τις σπονδυλικές εντομές με την ονομασία άνω και κάτω πλευρικό ημιγλήνιο. Στην συντεταγμένη σπονδυλική στήλη τα πλευρικά ημιγλήνια των επαλλήλων σπονδύλων σχηματίζουν τέλεια γλήνη, που συντάσσεται με την κεφαλή της πλευράς. Η εγκάρσια γλήνη συντάσσεται με το φύμα της πλευράς. Με αυτό τον τρόπο από κάθε πλευρά η κεφαλή συντάσσεται με την τέλεια γλήνη των δύο επαλλήλων σπονδύλων και το φύμα της με την εγκάρσια απόφυση του υποκειμένου από τους δύο σπονδύλους.

Λόγω του ότι οι αντίστοιχες πλευρές δεν έχουν φύμα, ο ενδέκατος και δωδέκατος σπόνδυλος δεν έχουν εγκάρσια γλήνη.

Ο πρώτος θωρακικός σπόνδυλος έχει προς τα άνω τέλεια πλευρική γλήνη για τη σύνταξη με την κεφαλή της 1ης πλευράς και ένα πλευρικό ημιγλήνιο προς τα κάτω για την σύνταξη με το άνω μισό της κεφαλής της 2ης πλευράς.

## Οσφυϊκοί σπόνδυλοι

Οι οσφυϊκοί σπόνδυλοι (Σχήμα 1.5) χαρακτηρίζονται από: το ογκώδες σώμα τους, που μπορεί να παραλληλιστεί σχηματικά με νεφρό, το μεγάλο πάχος του αυχένα και του πετάλου τους, τις εγκάρσιες αποφύσεις, οι οποίες, έχουν εξωτερική φορά και είναι λεπτές καθώς και μακρές. Την ακανθώδη απόφυση η οποία έχει άμεσα φορά προς τα πίσω ενώ είναι, επίσης, παχιά, τετράπλευρη και δεν έχει μεγάλο μήκος. Επίσης, στους οσφυϊκούς σπόνδυλους το επικουρικό φύμα εμφανίζεται στην εγκάρσια απόφυση ενώ το θηλοειδές στην άνω αρθρική απόφυση. Τέλος, χαρακτηρίζονται από τις αρθρικές επιφάνειες των αρθρικών αποφύσεων οι οποίες έχουν δύο διαφορετικές φορές. Οι άνω, προς τα μέσα και οι κάτω προς τα έξω.



Σχήμα 1.5 4ος οσφυϊκός σπόνδυλος

Σε κάτοψη (α) και σε πρόσοψη (β) [57].

## Ιερό οστό

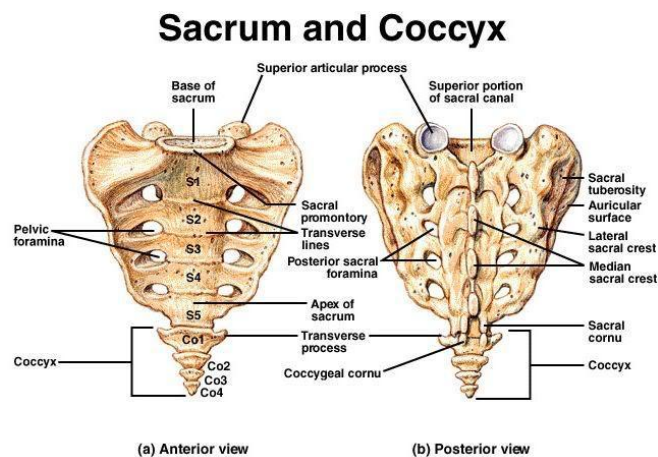
Το ιερό οστό αποτελείται από τους ιερούς σπόνδουλους συνοστεωμένους μεταξύ τους σε ένα ενιαίο οστό (Σχήμα 1.6). Το σχήμα του ιερού οστού μπορεί να παραλληλιστεί με αυτό μιας τετράπλευρης πυραμίδας, αποπλατυσμένης με φορά από μπροστά προς τα πίσω. Περιγραφικά εμφανίζει βάση, κορυφή και τέσσερις επιφάνειες πρόσθια, οπίσθια και δύο πλάγιες. Η πύελος, γνωστή στη πλειοψηφία με το όνομα λεκάνη σχηματίζεται από το ιερό οστό το οποίο περιβάλλεται μεταξύ των ανώνυμων οστών με τα οποία και αρθρώνεται.

Η βάση του ιερού οστού συντάσσεται με τον τελευταίο οσφυϊκό σπόνδυλο σχηματίζοντας γωνία με αυτόν, που προέχει με κατεύθυνση προς τα μπροστά, ονομάζεται ακρωτήριο των μαιευτήρων και έχει ιδιαίτερη σημασία στην μαιευτική. Δεξιά και αριστερά από την άνω αρθρική επιφάνεια του σώματος του 1ου ιερού σπονδύλου παρατηρείται η ύπαρξη των άνω αρθρικών αποφύσεων, η άνω σπονδυλική εντομή και στην εξωτερική πλευρά τους, τα ιερά πτερύγια. Πίσω από το σώμα βρίσκεται το άνω στόμιο του ιερού σωλήνα. Η κορυφή του ιερού οστού συναρθρώνεται με τον κόκκυγα και πίσω της υπάρχει το ιερό σχίσμα, του οποίου τα σκέλη καταλήγουν στα ιερά κέρατα. Το ιερό σχίσμα σχηματίζεται γιατί δεν υπάρχει

πέταλο στον 5ο και σπανιότερα και στον 4ο ιερό σπόνδυλο. Η πρόσθια επιφάνεια του ιερού οστού είναι υπόκοιλη και εμφανίζει τα πρόσθια ιερά τρήματα, τα οποία ανά τέσσερα δεξιά και αριστερά, χρησιμεύουν για την διέλευση των προσθίων κλάδων των ιερών νεύρων. Ανάμεσα στους δύο στοίχους των προσθίων ιερών τρημάτων περιλαμβάνεται η περιοχή των συνοστεωθέντων σωμάτων των ιερών σπονδύλων, η οποία εμφανίζει τέσσερις εγκάρσιες γραμμώσεις που αντιστοιχούν στις θέσεις συνοστέωσης. Όσο για την πίσω πλευρά του ιερού οστού, η επιφάνειά του είναι μη ομαλή και υπόκυρτη.

Αποτελείται από την μέση ιερή ακρολοφία, η οποία δημιουργείται από τα υπολείμματα των ακανθωδών αποφύσεων των ιερών σπονδύλων και προς τα κάτω καταλήγει στο ιερό σχίσμα. Εξωτερικά της μέσης ιερής ακρολοφίας, βρίσκεται η αρθρική ιερή ακρολοφία η οποία αποτελεί ένα οστέινο κράμα των αρθρικών αποφύσεων και των ιερών σπονδύλων. Αυτά, με τη σειρά τους, εξωτερικά, έχουν τα οπίσθια ιερά τρήματα που χωρίζονται σε δεξιά ιερά τρήματα και αριστερά ιερά τρήματα και αποτελούν τα σημεία διέλευσης των οπίσθιων κλάδων των ιερών νεύρων. Αποτελείται επίσης από την πλάγια ή εγκάρσια ιερή ακρολοφία, που βρίσκεται δεξιά και αριστερά, επί τα εκτός των οπίσθιων ιερών τρημάτων, η οποία, δημιουργείται από την ένωση των οστών των εγκαρσίων αποφύσεων των ιερών σπονδύλων [76].

Κάθε πλάγια πλευρά του ιερού οστού εμφανίζει την ωτοειδή αρθρική επιφάνεια, που χρησιμεύει για την σύνταξη του ιερού οστού με ανάλογη αρθρική επιφάνεια του ανώνυμου οστού για τον σχηματισμό της ιερολαγόνιας διάρθρωσης. Πίσω από αυτήν τη θέση υπάρχει το ιερό κύρτωμα στο οποίο προσφύεται ο μεσόστεος ιερολαγόνιος σύνδεσμος.



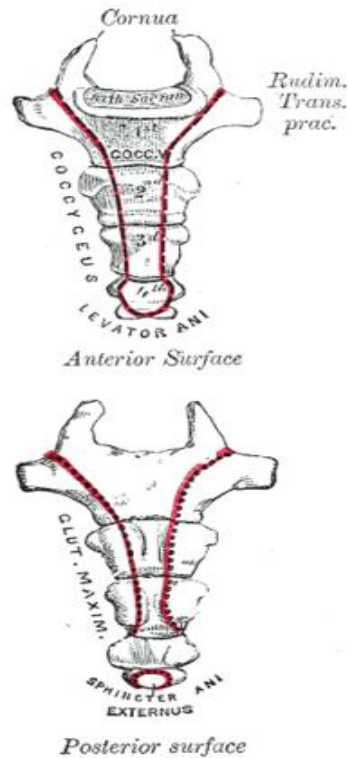
Σχήμα 1.6 Ιερό οστό και κόκκυγας

Σε πρόσθια (α) και σε οπίσθια (β) όψη [67].

## Κόκκυγας

Ο κόκκυγας (Σχήμα 1.7) το σχήμα του οποίου μπορεί να παραλληλιστεί με αυτό της πυραμίδας, δημιουργείται από τη συνοστέωση των κοκκυγικών σπονδύλων, οι οποίοι μπορεί

να είναι είτε τέσσερις είτε πέντε. Η βάση του αρθρώνεται με την κορυφή του ιερού οστού. Από την βάση του κόκκυγα αναπτύσσονται δεξιά και στις δύο πλευρές, τα πλάγια κέρατα, τα οποία σε συνεργασία με το ιερό οστό δημιουργούν σπή απ' όπου διέρχεται το τελευταίο ιερό νεύρο. Η κορυφή του κόκκυγα καταλήγει σε μικρό φύμα το οποίο είναι υπόλειμμα του σώματος του τελευταίου κοκκυγικού [76].



Σχήμα 1.7 Κοκκυγικοί σπόνδυλοι και κοκκυγικό κέρας.

Στην πρώτη περίπτωση αναλύεται η πρόσθια επιφάνεια του κοκκυγικού σπονδύλου, ενώ στην δεύτερη η οπίσθια επιφάνεια [62].

#### 1.4 ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ

Οι σπόνδυλοι μπορεί να εμφανίσουν παραλλαγές ως προς τον αριθμό τους σε κάποια μοίρα της σπονδυλικής στήλης ή ανωμαλίες στη μορφολογία τους.

Οι παραλλαγές του αριθμού των σπονδύλων κάποιας μοίρας οφείλονται στην εμφάνιση στους οριακούς σπονδύλους αυτής της μοίρας χαρακτηριστικών γνωρισμάτων σπονδύλων της παρακείμενης μοίρας. Έτσι

- Όταν υπάρχει υπεράριθμη αυχενική πλευρά ο 7ος αυχενικός σπόνδυλος παίρνει χαρακτήρες θωρακικού σπονδύλου ή όταν υπάρχει οσφυϊκή πλευρά ο πρώτος οσφυϊκός σπόνδυλος παίρνει χαρακτήρες θωρακικού σπονδύλου.
- Όταν ο πρώτος ιερός σπόνδυλος δε συνοστεωθεί με το υπόλοιπο ιερό οστό, τότε παίρνει χαρακτήρα οσφυϊκού σπονδύλου ή αντίθετα σε περίπτωση συνοστώσεως του 5ου οσφυϊκού λαμβάνει χώρα ιεροποίηση οσφυϊκού σπονδύλου.

Οι παραλλαγές που μπορεί να εμφανιστούν στο σώμα των σπονδύλων είναι:

- Το σώμα να αποτελείται από δύο ανεξάρτητα μέρη ή ανεπτυγμένα κατά το ήμισυ (ημισπόνδυλος).
- Τα δύο ημιπέταλα του τόξου δεν συνοστεώνονται κατά την ακανθώδη απόφυση [80].

## 1.5 ΑΡΘΡΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι αρθρώσεις της σπονδυλικής στήλης κι αυτές είναι οι αρθρώσεις μεταξύ των σπονδύλων και αρθρώσεις της σπονδυλικής στήλης ως σύνολο με κοντινά τμήματα του σκελετού όπως είναι το κρανίο, η πνευλική ζώνη κ.α.

Στη διαδικασία κατά την οποία αρθρώνονται οι σπόνδυλοι μεταξύ τους απαντώνται όλα τα είδη των αρθρώσεων. Έτσι:

- Τα σώματα των σπονδύλων αρθρώνονται με ενώσεις δεσμών καθώς και με ενώσεις χόνδρων, οι οποίες ονομάζονται μεσοσπονδύλιες συγχονδρώσεις.
- Τα τόξα και οι μυϊκές αποφύσεις αρθρώνονται με συνδεσμώσεις (μεσοτόξιοι, μεσεγκάρσιοι, μεσακάνθιοι και επακάνθιος σύνδεσμος).
- Οι αρθρικές αποφύσεις αρθρώνονται με διαρθρώσεις.

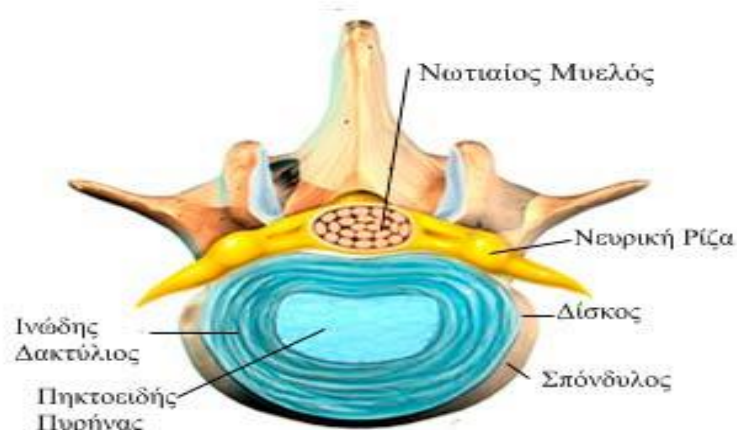
Οι αρθρώσεις της σπονδυλικής στήλης με τα παρακείμενα μέρη του σκελετού διακρίνονται:

- Στις αρθρώσεις του κρανίου με την σπονδυλική στήλη (με τον πρώτο και τον δεύτερο αυχενικό σπόνδυλο), δηλαδή τις κρανιοσπονδυλικές διαρθρώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε ατλαντοϊνιακή ή άνω κεφαλική και ατλαντοαξονική ή κάτω κεφαλική διάρθρωση.
- Στις αρθρώσεις της θωρακικής μοίρας της σπονδυλικής στήλης με τις πλευρές, δηλαδή τις σπονδυλοπλευρικές διαρθρώσεις, οι οποίες διακρίνονται στις αρθρώσεις της κεφαλής της πλευράς με τα πλευρικά ημιγλήνια και στις αρθρώσεις του φύματος της πλευράς με την εγκάρσια γλήνη.
- Στις αρθρώσεις του ιερού οστού με τα οστά της πνευλικής ζώνης η οποία ονομάζεται ιερολαγόνια διάρθρωση [80]

### 1.5.1 ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΕΣ ΣΥΓΧΟΝΔΡΩΣΕΙΣ

Για να αρθρωθούν τα σώματα των σπονδύλων μεταξύ τους, γίνεται χρήση ινοχόνδρινων δίσκων, οι οποίοι ονομάζονται μεσοσπονδύλιοι δίσκοι (Σχήμα 1.8). Οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι, των οποίων το σχήμα είναι αυτό του αμφίκυρτου φακού και με τις δύο επιφάνειες τους αρθρώνονται με τις αντίστοιχες επιφάνειες των δύο επάλληλων σπονδύλων, μεταξύ των οποίων έχουμε την παρεμβολή του δίσκου. Η περιφέρεια των δίσκων, μπροστά και πίσω συνδέεται με τους επιμήκεις συνδέσμους της σπονδυλικής στήλης.





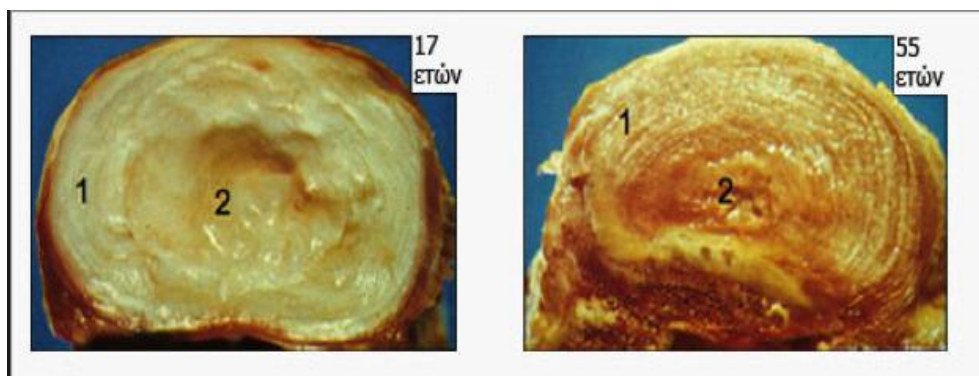
Σχήμα 1.8 Μεσοσπονδύλιος δίσκος.

Ο πηκτοειδής πυρήνας στο κέντρο και τα επίπεδα του ινώδους δακτυλίου περιφερικά [63].

Το πάχος των μεσοσπονδυλίων δίσκων είναι διαφορετικό στην εκάστοτε μοίρα της σπονδυλικής στήλης, λόγω των μηχανικών επιδράσεων αλλά και της διαφορετικότητας του εύρους των κινήσεων που εκτελούν οι μοίρες της σπονδυλικής στήλης. Το συνολικό πάχος τους σχεδόν υπερβαίνει το ένα τέταρτο του συνολικού μήκους της σπονδυλικής στήλης. Είναι γεγονός ότι οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι τείνουν να είναι παχύτεροι στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης.

Οι δίσκοι ένεκα του ότι είναι ελαστικοί και διαθέτουν συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες, απορροφούν τις δονήσεις και επιτρέπουν τη σχετική κίνηση του ενός σπονδύλου ως προς τον άλλο. Όσο περνάει ο χρόνος, οι φυσικές ιδιότητες που διαθέτουν οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι, χάνονται. Κάθε μεσοσπονδύλιος δίσκος αποτελείται από το περιφερικό μέρος, τον ινώδη δακτύλιο και από το κεντρικό μέρος, τον πηκτοειδή πυρήνα.

Ο ινώδης δακτύλιος αποτελείται από ινώδη και ελαστικό χόνδρο με ίνες κολλαγόνου σε διάταξη ομόκεντρων πεταλίων. Οι δεσμίδες των κολλαγόνων ινών εισέρχονται με πλάγια διεύθυνση στους σπονδύλους με τους οποίους γεινιάζουν και οι εξωτερικές δεσμίδες προσφύονται στερεά στον επιμήκη σύνδεσμο που βρίσκεται μπροστά καθώς και σ' αυτόν που βρίσκεται πίσω. Το σύμπλεγμα κολλαγόνων και ελαστικών ινών με μια μικρή ποσότητα χονδροκυττάρων, ονομάζεται πηκτοειδής πυρήνας και το σχήμα του είναι ωοειδές. Σε κανονικές συνθήκες, ο πυρήνας αυτός, βρίσκεται υπό πίεση.



Σχήμα 1.9 Το εσωτερικό του δίσκου

Στην αριστερή εικόνα είναι η εικόνα ενός υγιή ατόμου σε ηλικία 17 χρόνων με ινώδη δακτύλιο (1) και πηκτοειδή πυρήνα (2). Αντίθετα στην δεξιά εικόνα έχει διαπιστωθεί έλλειψη στην περιεκτικότητα του νερού με συνέπεια να χάνει την ελαστικότητά του. Στην εικόνα φαίνεται το εσωτερικό μέρος του δίσκου ενός ατόμου με ηλικία 55 χρόνων [75].

Η ακριβής του θέση είναι στο πίσω χείλος του μεσοσπονδύλιου δίσκου και όχι στο μέσο του δίσκου. Η δυνατότητα την οποία έχει ένας σπόνδυλος να μετακινείται στον άλλο κατά την κατάσταση κάμψης και εκτάσεως της σπονδυλικής στήλης, οφείλεται στην ημίρρευστη φύση του πηκτοειδούς πυρήνα που κάνει το σχήμα του ευμετάβλητο ελαστικό. Όταν η συμπίεση κατά μήκος της σπονδυλικής στήλης αυξηθεί απότομα, τότε ο πηκτοειδής σωλήνας αποπλατύνεται περιορισμένα. Το στοιχείο που περιορίζει τον πηκτοειδή σωλήνα από το να αποπλατύνεται είναι ο ινώδης δακτύλιος, ο οποίος, όμως, αν η πίεση είναι ισχυρότερη ή συντελούνται κάποιοι άλλοι λόγοι μπορεί να τραυματισθεί και να προκαλέσει μια ιδιαίτερα σοβαρή πάθηση, η οποία ονομάζεται κήλη του μεσοσπονδύλιου δίσκου ή πρόπτωση του πηκτοειδούς πυρήνα.

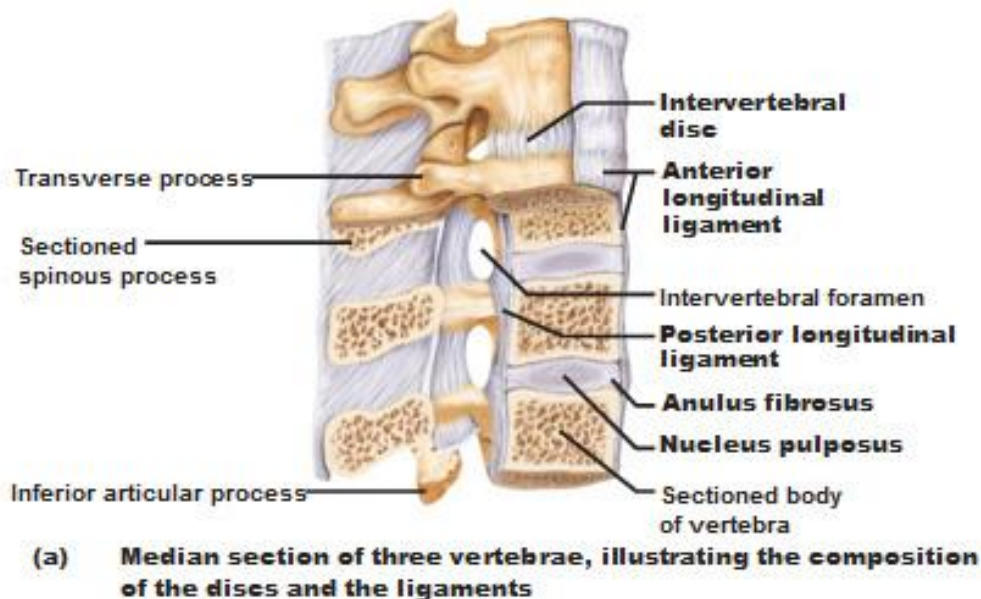
Η κήλη αυτή γίνεται συνηθέστερα προς τα πίσω δηλαδή ο πηκτοειδής πυρήνας προσπίπτει μέσα στον σπονδυλικό σωλήνα και προκαλεί συμπτωματολογία από την πίεση των νωτιαίων νεύρων και σπανιότερα από πίεση του νωτιαίου μυελού.

Όσο μεγαλύτερος είναι κάποιος ηλικιακά τόσο μικρότερη είναι η ποσότητα του νερού στον πηκτοειδή πυρήνα και σιγά-σιγά ο ινώδης χόνδρος παίρνει τη θέση του νερού. Έτσι, ο πηκτοειδής πυρήνας αλλάζει το σχήμα του με αποτέλεσμα να είναι πιο μικρός, να έχει λιγότερη ελαστικότητα και να είναι πιο ευαίσθητος στη θραύση με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να το ξεχωρίσει από τον ινώδη δακτύλιο [53].

### **Σύνδεσμοι των μεσοσπονδυλίων συγχονδρώσεων**

Οι μεσοσπονδύλιες αρθρώσεις, ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως στους μεσοσπονδύλιους δίσκους, ενισχύονται από μπροστά και από πίσω με συνδέσμους που φέρονται κατά μήκος και συνεχώς μεταξύ των σωμάτων των σπονδύλων (Σχήμα 1.10).

## Ligaments of the Spine



Σχήμα 1.10 Σύνδεσμοι σπονδύλων [66].

Οι σύνδεσμοι αυτοί, ονομάζονται πρόσθιος και οπίσθιος επιμήκης σύνδεσμος, οι οποίοι αμφότεροι ξεκινούν από το ινιακό οστό και καταλήγουν ο ένας κατά μήκος της πρόσθιας και ο άλλος κατά μήκος της οπίσθιας επιφάνειας των σωμάτων των σπονδύλων.

Ο επιμήκης σύνδεσμος ο οποίος βρίσκεται στο μπροστά μέρος έχει αρχή την βάση του κρανίου και καταλήγει στο μπροστά τμήμα της επιφάνειας του δεύτερου ιερού σπονδύλου και το κατάντι τμήμα του με κατεύθυνση κατακόρυφη προς τα κάτω ονομάζεται πρόσθιος ιεροκοκκυγικός σύνδεσμος. Κατά τη διάρκεια της πορείας του αυτής ο πρόσθιος επιμήκης σύνδεσμος προσφύεται στερεά με τους μεσοσπονδυλίους δίσκους και με τα χείλη των σωμάτων των σπονδύλων. Τα χαρακτηριστικά του γνωρίσματα, όπως το πάχος και το πλάτος, είναι διαφορετικά σε κάθε μία από τις μοίρες της σπονδυλικής στήλης και σε γενικές γραμμές ο μπροστά επιμήκης σύνδεσμος είναι πιο δυνατός από τον πίσω επιμήκη σύνδεσμο.

Ο οπίσθιος επιμήκης σύνδεσμος, που βρίσκεται μέσα στον σπονδυλικό σωλήνα, προσφύόμενος στην οπίσθια επιφάνεια των σωμάτων των σπονδύλων, εκτείνεται από την βάση του κρανίου μέχρι τον 2ο ιερό σπόνδυλο. Η συνέχεια του προς τα κάτω αποτελεί τον οπίσθιο στο βάθος ιεροκοκκυγικό σύνδεσμο. Ο οπίσθιος επιμήκης σύνδεσμος είναι λεπτότερος και ασθενέστερος από τον πρόσθιο.

### 1.5.2 ΣΥΝΔΕΣΜΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ

Υπάρχουν δύο είδη συνδέσμων οι οποίοι ενώνουν τους σπονδύλους μεταξύ τους, οι μακριοί και οι βραχείς.

Ο πρόσθιος και ο οπίσθιος επιμήκης σύνδεσμος για τους οποίους έγινε λόγος σε προηγούμενο τμήμα της εργασίας ανήκουν στους μακριούς συνδέσμους. Αντίθετα, όταν γίνεται λόγος για τους μεσοτόξιους, μεσεγκάρσιους, μεσακάνθιους συνδέσμους, καθώς και τον επακάνθιο και τον αυχενικό σύνδεσμο, ανήκουν στους βραχείς συνδέσμους.

Ανάμεσα στα τόξα που διαθέτουν οι σπόνδυλοι, βρίσκονται οι μεσοτάξιοι σύνδεσμοι οι οποίοι ονομάζονται και ωχροί σύνδεσμοι λόγω της υποκίτρινης χροιάς που τους δίνουν οι ελαστικές ίνες. Οι ελαστικότητα τους αυτή είναι και το στοιχείο που επιτρέπει στην σπονδυλική στήλη να κινείται προς τα μπροστά και έπειτα να επανέρχεται στη θέση της. Η συνέχεια των μεσοτάξιων συνδέσμων που έχει φορά προς την ιερή και κοκκυγική μοίρα της σπονδυλικής στήλης, δηλαδή, φορά προς τα κάτω, αποτελεί τον οπίσθιο επιπολής ιεροκοκκυγικό σύνδεσμο ο οποίος φράζει μερικά το ιερό σχίσμα. Οι μεσεγκάρσιοι σύνδεσμοι βρίσκονται ανάμεσα στις εγκάρσιες αποφύσεις δύο συνεχόμενων σπονδύλων. Στην οσφυϊκή μοίρα βρίσκονται στην πλήρη ανάπτυξη τους ενώ στις υπόλοιπες μοίρες της σπονδυλικής στήλης η ανάπτυξή τους είναι μικρότερη. Υπολείμματα του τελευταίου ιερού μεσεγκάρσιου συνδέσμου είναι ο πλάγιος ιεροκοκκυγικός σύνδεσμος, ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα στο κάτω άκρο της πλάγιας ιερής ακρολοφίας και στο πλάγιο κέρασ του κόκκυγα. Μ' αυτό τον τρόπο αλλάζει η εντομή που υπάρχει και από τις δύο πλευρές της κορυφής του ιερού οστού σε τμήμα (5ο ιερό τμήμα) της οποίας η χρήση είναι η διέλευση του 5ου ιερού νεύρου.

Οι μεσακάνθιοι σύνδεσμοι φέρονται στο διάστημα μεταξύ των ακανθωδών αποφύσεων δύο επάλληλων σπονδύλων. Είναι, όπως και στην περίπτωση των μεταγκάρσιων συνδέσμων, πλήρως ανεπτυγμένοι στην οσφυϊκή μοίρα και υποτυπώδεις στις υπόλοιπες μοίρες. Η δημιουργία του επικάνθιου συνδέσμου, οφείλεται στην πάχυνση του οπίσθιου ελεύθερου χείλους των μεσακάνθιων συνδέσμων. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα ανεπτυγμένη ινώδη ταινία σε μορφή κυλίνδρου, η οποία ξεκινάει από τη ακανθώδη απόφυση του 7ου αυχενικού σπονδύλου και καταλήγει στο ιερό οστό, προσφύεται στις κορυφές των ακανθωδών αποφύσεων των σπονδύλων.

Ο επικάνθιος σύνδεσμος είναι αυτός που εμποδίζει την σπονδυλική στήλη να κάμπτεται προς τα πίσω χωρίς μέτρο. Ο αυχενικός σύνδεσμος έχει σχήμα τριγωνικό και είναι ένα ινώδες πέταλο που βρίσκεται οβελιαίως στη μέση γραμμή του αυχένα και διαχωρίζει τους μους σε κάθε ημιμόριο της περιοχής αυτής. Προς τα άνω προσφύεται στην έξω ινιακή ακρολοφία μέχρι το έξω ινιακό όγκωμα και προς τα πίσω στις κορυφές των ακανθωδών αποφύσεων των αυχενικών σπονδύλων. Το πίσω άκρο του συνδέσμου είναι ελεύθερο και ουσιαστικά πρόκειται για το κομμάτι του επικάνθιου συνδέσμου που συνεχίζει προς τα πάνω. Όσο για τον αυχενικό σύνδεσμο, αυτός είναι ανεπτυγμένος σε πολλά θηλαστικά και με τη

βοήθεια των μυών είναι υπεύθυνοι για την στήριξη της κεφαλής καθώς και για τις κινήσεις που αυτή πραγματοποιεί.

### 1.5.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Οι διαρθρώσεις είναι πρακτικά το στοιχείο εκείνο που ενώνει τις αρθρικές επιφάνειες δύο συνεχόμενων σπονδύλων. Η κινητικότητα της σπονδυλικής στήλης είναι διαφορετική στις διάφορες μοίρες της για δύο λόγους που λειτουργούν συνδυαστικά. Ο πρώτος λόγος είναι ότι οι αρθρικές επιφάνειες των αρθρικών αποφύσεων, οι οποίες καλύπτονται από υαλοειδή χόνδρο, μεταβάλουν το σχήμα και τη φορά τους ανάλογα τη μοίρα της σπονδυλικής στήλης στην οποία βρίσκονται. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι, ξανά, ανάλογα με τη μοίρα της σπονδυλικής στήλης, ο αρθρικός θύλακας είναι περισσότερο ή λιγότερο χαλαρός.

### 1.6 Η ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΩΣ ΣΥΝΟΛΟ ΚΑΙ ΟΙ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ

Η σπονδυλική στήλη στο σύνολο της, αποτελείται από δυο άκρα, το άνω ή κεφαλικό και το κάτω ή ουραίο και τέσσερις επιφάνειες, οι οποίες είναι, η μπροστά, η πίσω καθώς και οι δύο εκατέρωθεν επιφάνειες. Συνδυαστικά, με τις αρθρώσεις των σπονδύλων καθώς και το σύνολο των σπονδυλικών τρημάτων, σχηματίζουν τον σπονδυλικό σωλήνα.

Τα σώματα των σπονδύλων, οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι και ο μπροστά επιμήκης σύνδεσμος σχηματίζουν όλα μαζί τη μπροστά επιφάνεια της σπονδυλικής στήλης.

Σε κάθε πλάγια επιφάνεια της σπονδυλικής στήλης βρίσκονται τα μεσοσπονδύλια τμήματα, των οποίων η χρήση είναι η διέλευση των νωτιαίων νεύρων και σχηματίζονται από τις σπονδυλικές εντομές δύο συνεχόμενων σπονδύλων.

Η οπίσθια επιφάνεια εμφανίζει, στη μέση γραμμή, τις ακανθώδεις αποφύσεις το σύνολο των οποίων, αποτελεί την νωτιαία άκανθα. Ανάμεσα στη νωτιαία άκανθα και στις εγκάρσιες αποφύσεις σχηματίζεται εκατέρωθεν της οπίσθιας επιφάνειας η μικρή νωτιαία αύλακα. Ο πυθμένας της αύλακας σχηματίζεται από τα πέταλα των τόξων και από τα μεσοτόξια διαστήματα που φράσσονται από τους μεσοτόξιους συνδέσμους. Τα μεσοτόξια διαστήματα χαρακτηρίζονται ως στενά στην αυχενική και θωρακική μοίρα και φαρδύτερα ανάμεσα στο ινιακό οστό και στον άτλαντα καθώς και, όπως έχει προαναφερθεί, στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης.

#### 1.6.1 ΚΥΡΤΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Η σπονδυλική στήλη στο σύνολο της εμφανίζει κυρτώματα τα οποία φέρονται κατά το οβελιαίο καθώς και κατά το μετωπιαίο επίπεδο.

##### Κυρτώματα κατά το οβελιαίο επίπεδο

Αν κάποιος μελετήσει τη σπονδυλική στήλη από την πλάγια πλευρά της, μπορεί να παρατηρήσει τέσσερα κυρτώματα. Αυτά είναι:

- το αυχενικό

- το θωρακικό
- το οσφυϊκό και
- το ιεροκοκκυγικό.

Η φορά που έχει το κύρτωμα του αυχενικού και του οσφυϊκού είναι προς τα μπροστά, ενώ, αντίθετα, το θωρακικό και το ιεροκοκκυγικό κύρτωμα έχει διεύθυνση προς τα πίσω. Στη συνέχεια, περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας των κυρτωμάτων της σπονδυλικής στήλης.

Τα κυρτώματα αυτό δημιουργούνται ως εξής:

Κατά την εμβρυική φάση του ανθρώπου, η σπονδυλική στήλη παρουσιάζει ένα κύρτωμα με το κοίλο προς τα μπροστά. Προς το τέλος της εμβρυϊκής ζωής η οσφυϊκή και η ιερά μοίρα «κάνουν γωνία» που στρέφει το κυρτό της προς τα εμπρός. Το αυχενικό κύρτωμα δημιουργείται αφού γεννηθεί το μωρό και αφού γίνει η ανύψωση της κεφαλής του νεογνού δημιουργείται το αυχενικό κύρτωμα. Όταν το παιδί πλησιάζει το τέλος του πρώτου έτους ζωής και συνήθως ξεκινάει η φάση της όρθιας στάσεως, εμφανίζεται το οσφυϊκό κύρτωμα. Στη γένεση των κυρτωμάτων μετά την γέννηση συμβάλλει η ανάλογη προσαρμογή του πάχους του σώματος των σπονδύλων και των μεσοσπονδυλίων δίσκων.

Στον ενήλικα οι μεταβλητές που επιδρούν στο ρυθμό ανάπτυξης των κυρτωμάτων είναι το βάρος που σηκώνει η σπονδυλική στήλη, το επάγγελμα του καθενός καθώς και οι ατομικές του συνήθειες. Κύφωση είναι η χωρίς μέτρο ανάπτυξη του θωρακικού κυρτώματος, ενώ η υπέρμετρη ανάπτυξη του οσφυϊκού αποτελεί τη λόρδωση. Εφήμερη λόρδωση μπορεί να παρατηρηθεί στις διπόρους κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της κύησης. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης τόσο του μεγέθους όσο και του βάρους του εμβρύου, πράγμα που τις υποχρεώνει να αυξήσουν οσφυϊκό κύρτωμα προς την άλλη πλευρά με σκοπό το κέντρο βάρους του σώματος τους να είναι τέτοιο, ώστε να μην κινδυνεύουν από ανισορροπίες. Στους ανθρώπους αρκετά μεγάλης ηλικίας, αντίθετα, λόγω του ότι ατροφούν οι μεσοσπονδυλίοι δίσκοι, εμφανίζεται με την πάροδο του χρόνου επαναφορά στο ενιαίο κυρτό της σπονδυλικής στήλης που παρατηρείται στο εμβρυακό στάδιο [53].

### **Κυρτώματα κατά το μετωπιαίο επίπεδο**

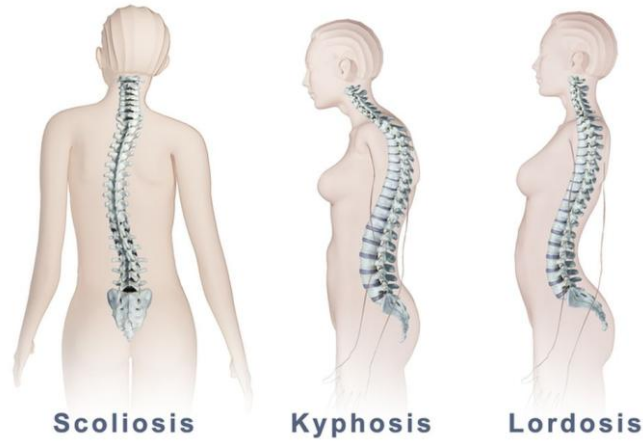
Προς το πέρας της παιδικής ηλικίας μέχρι, οριακά, την αρχή του εφηβικού σταδίου η σπονδυλική στήλη, εμφανίζει τρία, λιγότερο εμφανή, πλάγια κυρτώματα

- το αυχενικό
- το θωρακικό και
- το οσφυϊκό.

Περισσότερο εμφανές από τα τρία είναι το θωρακικό. Τα κυρτώματα αυτά οφείλονται κυρίως στο ποιο από τα δύο άκρα χρησιμοποιεί ο καθένας, αν δηλαδή είναι αριστερόχειρας ή δεξιόχειρας.

Στους δεξιόχειρες το θωρακικό κύρτωμα στρέφει το κυρτό του προς τα δεξιά και τα άλλα δύο προς τα αριστερά.

Όταν αυτά τα δύο κυρτώματα αναπτυχθούν υπέρ του δέοντος, τότε έχουμε την εμφάνιση της σκολίωσης της σπονδυλικής στήλης.



Σχήμα 1.11 Παθήσεις σπονδυλικής στήλης

Στην πρώτη περίπτωση το σπονδυλικό σώμα πάσχει από σκολίωση. Η αλλοίωση της σπονδυλικής στήλης που λαμβάνει χώρα στην δεύτερη περίπτωση είναι συνέπεια κύφωσης, ενώ το κύρτωμα στην οσφυϊκή περιοχή προκαλεί λόρδωση στο σπονδυλικό σώμα [64].

### 1.6.2 ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί επιγραμματικά σε προηγούμενα σημεία της εργασίας το ποσοστό της σπονδυλικής στήλης που έχει την δυνατότητα να εξαρτάται από:

- τη χαλαρότητα του αρθρικού θυλάκου,
- το πάχος και τη φυσική κατάσταση των μεσοσπονδυλίων δίσκων,
- το σχήμα και την φορά των αρθρικών επιφανειών, και
- τον βαθμό ανάπτυξης και την φυσική κατάσταση των διαφόρων συνδέσμων.

Η κίνηση μεταξύ δύο επάλληλων σπονδύλων είναι ιδιαίτερα μικρή. Έχει όμως σημαντικό βαθμό κινητικότητας, λόγω της συνάθροισης των κινήσεων κάθε μοίρας ξεχωριστά αλλά και σε όλη τη σπονδυλική στήλη, συνολικά. Οι κινήσεις που γίνονται είναι :

- κάμψη,
- έκταση,
- πλάγια κάμψη και
- στροφή.

Η κάμψη και η έκταση είναι πιο εύκολες στην αυχενική και την οσφυϊκή μοίρα. Σε γενικά πλαίσια η έκταση είναι πιο ελεύθερη σε σχέση με την κάμψη. Η προς τα πίσω μεγάλη κάμψη

του κορμού αποδίδεται κυρίως στην κάμψη της κεφαλής και του κορμού στην διάρθρωση του ισχίου.

Κατά την κάμψη πραγματοποιείται συμπίεση των μεσοσπονδύλιων δίσκων στο μπροστά τμήμα τους και διατείνονται στο πίσω, ενώ όταν το σώμα προβεί σε έκταση, συμπιέζεται η πίσω πλευρά και εφελκύεται η μπροστά. Επίσης, διατείνονται ο πρόσθιος και ο οπίσθιος επιμήκης σύνδεσμος, όπου δουλειά τους είναι να προλαμβάνουν την υπέρμετρη έκταση ο μπροστά ενώ ο πίσω την χωρίς μέτρο κάμψη. Η πλάγια κάμψη είναι πιο εύκολη στην αυχενική και οσφυϊκή μοίρα, ενώ στη θωρακική περιορίζεται από τις πλευρές που συμπιέζονται.

Στην αυχενική μοίρα, επίσης, είναι πιο εύκολο να συμβεί η στροφή ενώ η πιο ισχυρή στροφή του κορμού ενός ανθρώπου ο οποίος είναι όρθιος γίνεται, αντίθετα με την κοινή πεποίθηση, με στροφή της πυέλου στους μηρούς και όχι με στροφή της σπονδυλικής στήλης [80].



## ❖ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

### 2.1 ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Για να θεωρηθεί η σπονδυλική στήλη υγιώς λειτουργική θα πρέπει να έχει δύο χαρακτηριστικά τα οποία είναι άκρως αντίθετα μεταξύ τους. Θα πρέπει, λοιπόν, να διαθέτει τόσο πλαστικότητα όσο και στερεότητα. Για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός, υπάρχουν οι σύνδεσμοι σταθεροποίησης. Σε όλα τα επίπεδα της σπονδυλικής στήλης υπάρχουν συνδέσεις από συνδέσμους και μύες από την σπονδυλική στήλη προς την πύελο από την μία πλευρά και ενώ από την άλλη πλευρά έχει κατεύθυνση τις δύο ωμοπλάτες. Με τον τρόπο αυτό, έχοντας δηλαδή ισορροπία δυνάμεων από αμφότερες τις πλευρές είναι εφικτό το να παραμείνει η σπονδυλική στήλη σταθερή και να μην αποκλίνει από την καθετή της, θέση.

Όταν κάποιος στηρίζεται στο ένα μόνο άκρο του και κρατάει το άλλο ελεύθερο οι δυνάμεις αυτές προσαρμόζονται ανάλογα κι υπάρχει κλίση της πυέλου προς της πλευρά του ανασηκωμένου άκρου. Η πρώτη μοίρα της σπονδυλικής στήλης, η οποία υπόκειται σε κάμψη είναι η οσφυϊκή μοίρα με το κυρτό να φέρεται προς το σηκωμένο άκρο, έπειτα κάμπτεται η θωρακική μοίρα με το κοίλο, επίσης, προς το ελεύθερο άκρο( όχι το άκρο της στάσης) και τελευταία μοίρα κάμψης, είναι η αυχενική μοίρα με το κοίλο, και σε αυτή τη περίπτωση, προς το ανασηκωμένο άκρο. Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο μιας πτώσης, γίνεται η χρήση των μυών ως προεντατήρες. Για την ρύθμιση της όρθιας στάσης του σώματος υπεύθυνη είναι η μυϊκή ομάδα που συντονίζεται από το εξωπυραμιδικό σύστημα. Η πλαστικότητα της σπονδυλικής στήλης επιτυγχάνεται μέσω της αρθρωτής δομής της με πολλαπλά στοιχεία τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο και συνδεδεμένα από συνδέσμους και μύες. Η δομή της μπορεί να αλλάξει ενώ διατηρείται η στερεότητα μέσω των μυϊκών εντατήρων.

Όπως, ήδη, έχει επισημανθεί η σπονδυλική στήλη φέρει τρία κυρτώματα στο οβελιαίο επίπεδο:

- το αυχενικό με το κοίλο προς τα πίσω,
- το θωρακικό με το κυρτό προς τα πίσω και το
- οσφυϊκό με το κοίλο προς τα πίσω.

Το πίσω μέρος της κεφαλής, η πλάτη και οι γλουτοί βρίσκονται στο ίδιο κάθετα εφαιπτόμενο επίπεδο.

Κατά την πορεία της εξέλιξης, έλαβε χώρα η εναλλαγή από τα τέσσερα άκρα που ήταν απαραίτητα για το βάδισμα, στα μέχρι και τη στιγμή που γράφεται αυτή η εργασία, στα δύο. Η τεράστια αυτή αλλαγή, είναι υπεύθυνη για τον ευθειασμό και έπειτα για την αντιστροφή της κυρτότητας στην οσφυϊκή μοίρα.



Σχήμα 2.1 Κυρτώματα σπονδυλικής στήλης

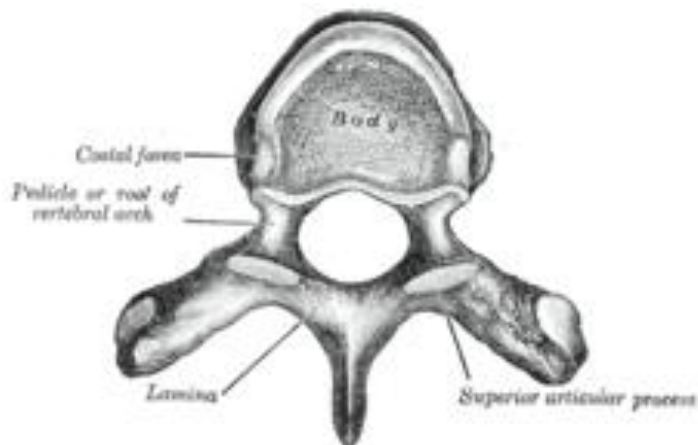
Ανθρώπινα αγκάθια και σπονδύλους που της ασκούν αξονική συμπίεση, αλλά και προσθήκες σε ορισμένες περιοχές που τους φορτίζουν οπίσθια διάτμητικά φορτία (βέλη σε κόκκινο), άλλοι σε πρόσθια φορτία διάτμησης (πράσινα βέλη), ανάλογα με τον προσανατολισμό τους. Στα πίσω κατευθυνόμενα φορτία διάτμησης είναι το τμήμα λιγότερο σταθερό όπως η σύγκριση με τα πρόσθια φορτία διάτμησης [23].

Αυτό που ισχύει στην πραγματικότητα είναι ότι η ανόρθωση του σώματος δεν έχει απορροφηθεί πλήρως από την προς τα πίσω κλίση της πυέλου και στην ανόρθωση αυτή υπάρχει ανάμιξη ως ένα βαθμό και της οσφυϊκής μοίρας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο το μέγεθος της λόρδωσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την κλίση της πυέλου. Όπως αναφέρεται και στο [53]. Κατά την διάρκεια της οντογένεσης (δηλαδή της ανάπτυξης ενός εμβρύου) παρατηρούνται τα ίδια στάδια ανάπτυξης. Την πρώτη μέρα της γέννησης η οσφυϊκή μοίρα είναι κοίλη προς τα εμπρός, στους πέντε μήνες είναι ελάχιστα κοίλη και αυτό εξαφανίζεται στο 13ο μήνα της ζωής. Η λόρδωση αρχίζει να εμφανίζεται στον τρίτο χρόνο της ζωής, γίνεται προφανής στον 8ο χρόνο της ζωής και εμφανίζει την εικόνα ενήλικα γύρω στην ηλικία των δέκα. Ως εκ τούτου, οι φυλογενετικές αλλαγές ανακεφαλαιώνονται κατά την οντογένεση.

## 2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ

Όταν κληθεί κάποιος να μελετήσει το σπονδυλικό σώμα, θα του γίνει αμέσως αντιληπτό ότι πρόκειται για ένα οστό μικρής επιφάνειας αλλά και μήκους, με κυλινδρικό σχήμα. Το

μεγαλύτερο ποσοστό του όγκου του καταλαμβάνεται από σπογγώδες οστό, αποτελούμενο από ένα σύστημα με δοκίδες. Η μάζα του σπογγώδους οστού περιβάλλεται από ένα εξωτερικό περίβλημα το οποίο είναι πιο ανθεκτικό, καθώς και με πιο πυκνό φλοιώδες από ένα συμπαγές οστό (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Σπονδυλικό σώμα σε μετωπιαία τομή [70].

Σε μία οβελιαία τομή, επίσης, παρατηρεί κανείς το σύστημα των δοκίδων που προαναφέρθηκε όμως επιπλέον είναι φανερό ακόμη ένα σύστημα λοξών δοκίδων που σχηματίζεται από δέσμες με την μορφή θυσάνου. Δύο τέτοιες δέσμες με την αρχή στην άνω και στην κάτω επιφάνεια συγκλίνουν προς τον αυχένα του σπονδυλικού τόξου και μετά επεκτείνονται προς τις άνω και κάτω αρθρικές αποφύσεις και την ακανθώδη απόφυση [16].

Αυτές οι δύο δέσμες, οι οποίες έχουν μορφή θυσάνου συνδυάζονται μεταξύ τους αποτελέσματα να δημιουργούνται περιοχές οι οποίες εκλαμβάνουν τα μεγαλύτερα φορτία ενώ ταυτόχρονα σχηματίζεται και μία περιοχή ελάχιστης αντοχής η οποία απαρτίζεται αμιγώς από κάθετες δοκίδες και το σχήμα της είναι τριγωνικό. Αυτός είναι, άλλωστε και ο λόγος για τον οποίο μετά από κάποιο συμπιεστικό κάταγμα, στο σπονδυλικό σώμα επέρχεται σφηνοειδής παραμόρφωση.

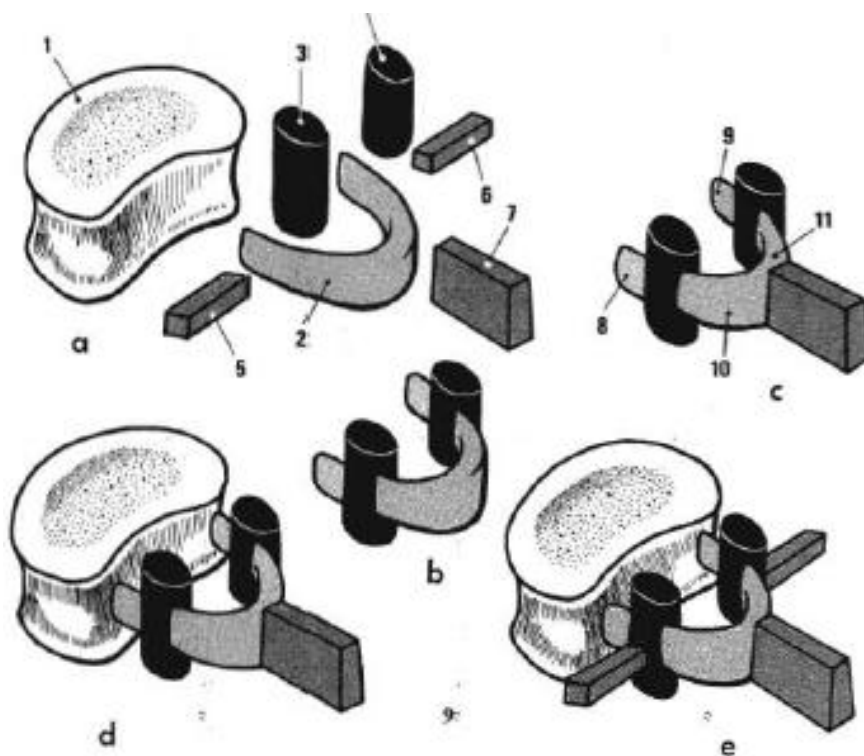
Επιγραμματικά, αξίζει να αναφερθούν κάποιες οριακές τιμές φορτίων που μπορεί να παραλάβουν τα διάφορα τμήματα της σπονδυλικής στήλης. Παραδείγματος χάρη, το μπροστά τμήμα του σπονδυλικού σώματος αστοχεί σε φορτίο ίσο και μεγαλύτερο των 600 κιλών τη στιγμή μάλιστα που μια φόρτιση 800 κιλών είναι ικανή να κάνει ολόκληρο το σώμα του σπονδύλου να καταρρεύσει.

Συνολικά, στα προηγούμενα κομμάτια της παρούσας εργασίας, έχει αναλυθεί λεπτομερώς ο τρόπος δόμησης του σπονδύλου.

Αυτό το άκρως ενδιαφέρον τμήμα της, η θεώρηση του σπονδύλου δίνει έμφαση στη λειτουργία του σπονδύλου καθώς και στη μηχανική με τις κύριες δομές του. Όπως αναφέρεται στην μεταπτυχιακή εργασία με θέμα «ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΣΦΥΙΚΟΥ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥΥΠΟ

ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ» ΕΚΠΟΝΗΣΗ: ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ ΜΑΡΗΣ ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΣ ΠΡΟΒΑΤΙΔΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2013 [77].

Ένας σπόνδυλος αποτελείται από δύο μεγάλα κομμάτια: το σώμα μπροστά και το τόξο πίσω. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η σχηματική αποσυναρμολόγηση ενός σπονδύλου. Στο κομμάτι (α) παρουσιάζονται τα τμήματα από τα οποία αποτελείται με πρώτο το σώμα (1) το οποίο εμφανίζει κυλινδρική δομή. Το τόξο (2), με πεταλοειδές σχήμα, φέρει στις δύο πλευρές, όπως φαίνεται στην αποσυναρμολόγηση (c) τις αρθρικές αποφύσεις που διαιρούν το σπονδυλικό τόξο σε δύο τμήματα: τον αυχένα μπροστά (8, 9) και το πέταλο πίσω (10, 11). Η ακανθώδης απόφυση προβάλλει προς τα πίσω από την μέση γραμμή (7). Το σπονδυλικό τόξο συνδέεται με το σώμα από τους αυχένες. Ο σπόνδυλος φέρει επίσης και τις εγκάρσιες αποφύσεις (5, 6).



Σχήμα 2.3 Σχηματική αποσυναρμολόγηση σφαιρικού σπονδύλου [69].

Όπως μπορεί να γίνει ευκολότερα αντιληπτό στο σχήμα 2.3: η σπονδυλική στήλη παρουσιάζει τρεις πυλώνες λόγω του ότι οι δομές από τις οποίες αποτελείται είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες οι οποίοι είναι:

- ένας μεγάλος πυλώνας ο οποίος αποτελείται από τα σπονδυλικά σώματα και βρίσκεται στο μπροστά μέρος και
- δύο μικρότερους πυλώνες στο πίσω μέρος, αποτελούμενοι από τις αρθρικές αποφύσεις. Τα σπονδυλικά σώματα συνδέονται μεταξύ τους με τους μεσοσπονδύλιους δίσκους.



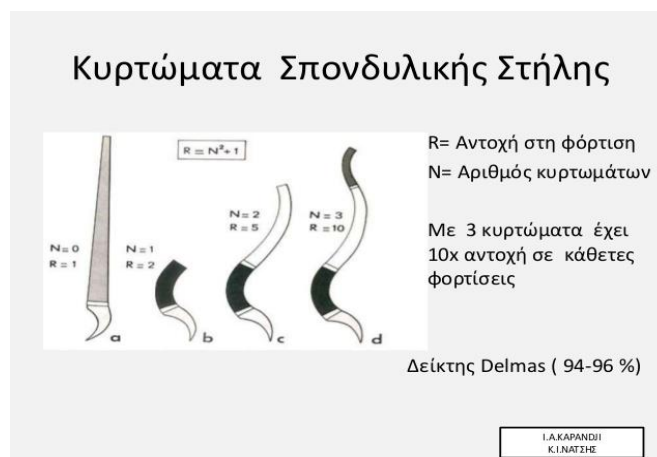
Σχήμα 2.4 Πυλώνες σπονδυλικής στήλης [72].

### 2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΥΡΤΩΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Τα κυρτώματα της σπονδυλικής στήλης αυξάνουν την αντοχή στις δυνάμεις αξονικής συμπίεσης. Υπολογίζεται ότι η αντοχή σε αξονική φόρτιση της σπονδυλικής στήλης είναι 10 φορές μεγαλύτερη από την αντοχή σε περίπτωση που δεν θα είχε τα κυρτώματα αυτά (Σχήμα 2.5).

Ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα που διαθέτει η σπονδυλική στήλη είναι τα κυρτώματα της κι αυτό γιατί με την παρουσία τους αυξάνουν την ποσότητα του αξονικού φορτίου που μπορεί να παραλάβει. Για να αντιληφθεί κάποιος το μέγεθος της βοήθειας που παρέχει, αρκεί να αναλογισθεί πως αν δεν υπήρχαν τα κυρτώματα η αντοχή σε αξονική δύναμη θα ήταν 10 φορές μικρότερη.

Άλλο ένα δείγμα της σημασίας τους είναι ο δείκτης Delmas. Ο δείκτης αυτός ισούται με το ποσοστιαίο πηλίκο του μήκους της σπονδυλικής στήλης με τα κυρτώματα προς το μήκος της σπονδυλικής στήλης χωρίς τα κυρτώματα.



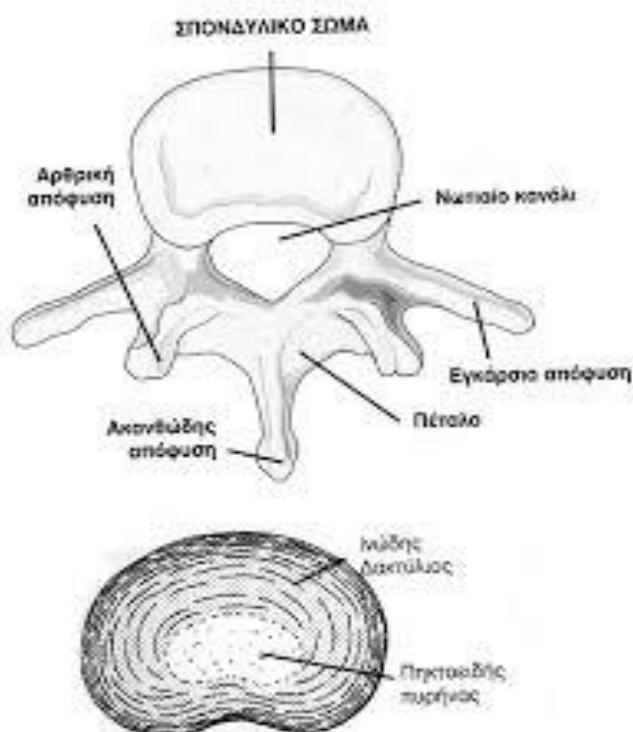
Σχήμα 2.5 Μηχανική σημασία των κυρτωμάτων [74].

Η μέτρηση του δείκτη αυτού μπορεί να γίνει μόνο σε σκελετούς. Μία μέση φυσιολογική τιμή είναι 95% με διακύμανση 94%-96%. Ο A Delmas έδειξε ότι η ανατομική αυτή

κατηγοριοποίηση έχει λειτουργική σημασία. Μια σπονδυλική στήλη με δείκτη κάτω του 94% έχει αυξημένη κυρτότητα και χαρακτηρίζεται ως δυναμικού τύπου, ενώ μια σπονδυλική στήλη με δείκτη άνω του 96% έχει μειωμένη κυρτότητα και χαρακτηρίζεται ως στατικού τύπου [50].

## 2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Σε μια θεώρηση της σπονδυλικής στήλης από το οβελιαίο επίπεδο διακρίνονται τα λειτουργικά στοιχεία της σπονδυλικής στήλης Σχήμα 2.6. Στο μπροστά μέρος, βρίσκεται η πρόσθια κολώνα η οποία είναι και κυρίως υπεύθυνη για την στήριξη ενώ στο πίσω διακρίνεται η οπίσθια κολώνα η οποία ουσιαστικά αποτελείται από δύο κολώνες μικρότερου μεγέθους. Εν αντιθέσει με τη μπροστά κολώνα της οποίας όπως προαναφέρθηκε, ο ρόλος είναι να αποτελεί μια στηρικτική δομή, η πίσω κολώνα έχει ένα δυναμικό ρόλο.

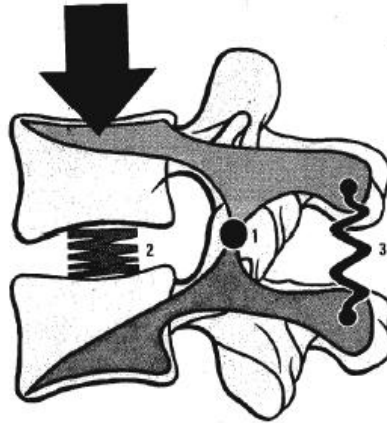


Σχήμα 2.6 Λειτουργικά στοιχεία σπονδυλικής στήλης [71].

Στο κατακόρυφο επίπεδο, με τη βοήθεια της συχνής μετάβασης ανάμεσα στα οστικά στοιχεία και τους συνδέσμους είναι εύκολο να ξεχωρίσουν δύο ζώνες. Η μία ζώνη ονομάζεται παθητική και δημιουργείται από το σπονδυλικό σώμα. Η δεύτερη ζώνη, ονομάζεται ενεργητική. Μπορεί, επίσης να διακριθεί και η ύπαρξη μιας λειτουργικής σύνδεσης μεταξύ των κολώνων που βρίσκονται στο μπροστά και στο πίσω μέρος.

Εάν παρατηρηθεί το δοκιδώδες σύστημα του σπονδυλικού σώματος φαίνεται η ύπαρξη ενός συστήματος μοχλών πρώτου βαθμού με κάθε σπόνδυλο να αποτελεί τον έναν μοχλό και με υπομόχλιο, οι οποίες ονομάζονται άνω και κάτω αρθρικές αποφύσεις.

Με τη χρήση του συγκεκριμένου συστήματος μοχλών, είναι δυνατόν να απορροφηθούν οι συμπιεστικές δυνάμεις που δρουν στην σπονδυλική στήλη (Σχήμα 2.7) σε παθητική και άμεση απορρόφηση στο επίπεδο του μεσοσπονδύλιου δίσκου και ενεργητική και έμμεση απορρόφηση από τους παρασπονδυλικούς μύες τον επακάνθιο και μεσακάνθιους (ωχρούς) συνδέσμους [12]. Επομένως, όσων αφορά τον κατακόρυφο άξονα σε μία σπονδυλική στήλη, ο τύπος απορρόφησης των συμπιεστικών είναι αυτός της ενεργητικής και παθητικής απορρόφησης.



Σχήμα 2.7 Λειτουργικά στοιχεία σπονδυλικής στήλης [77].

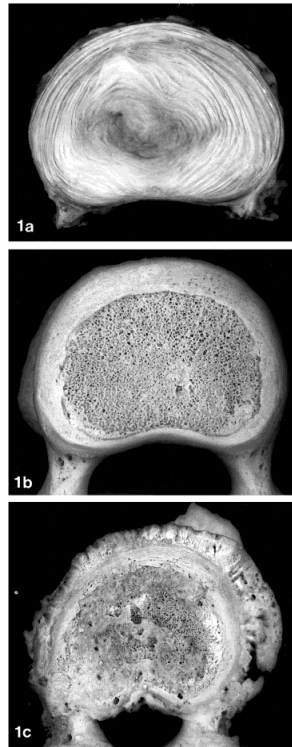
## 2.5 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Με το συνδυασμό των άνω και κάτω επιφανειών και των δύο σπονδύλων αλλά και των μεσοσπονδύλιων δίσκων, έχουμε την δημιουργία της σύμφυσης, η οποία όπως εξηγήθηκε, αποτελεί την σύνδεση μεταξύ δύο σπονδύλων.

Ο τρόπος σύνδεσης γίνεται καλύτερα αντιληπτός στο σχήμα 2.9 που ακολουθεί.

Η δομή του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι αρκετά χαρακτηριστική και συνιστάται από δύο μέρη.

Το κεντρικό σημείο, το οποίο ονομάζεται πηκτοειδής πυρήνας και είναι ένα υλικό με σχήμα γέλης Σχήμα 2.8. Πρόκειται για μία άχρωμη ουσία με βάση το νερό, του οποίου το ποσοστό στη σύσταση του, είναι 88%. Τα υπόλοιπα στοιχεία που το αποτελούν είναι ιδιαίτερα υδροφιλικά μακρομόρια μουκοπολυσακχαρίτων όπως, υαλουργικό οξύ, θειική χονδροϊτίνη και θειική κερατίνη. Ιστολογικά αποτελείται από ίνες κολλαγόνου, χονδροκύτταρα, κύτταρα συνεκτικού ιστού και ελάχιστα ώριμα κύτταρα αρθρικού χόνδρου. Αξίζει να σημειωθεί πως στον πηκτοειδή πυρήνα δεν περιέχονται αιμοφόρα αγγεία ή νεύρα.



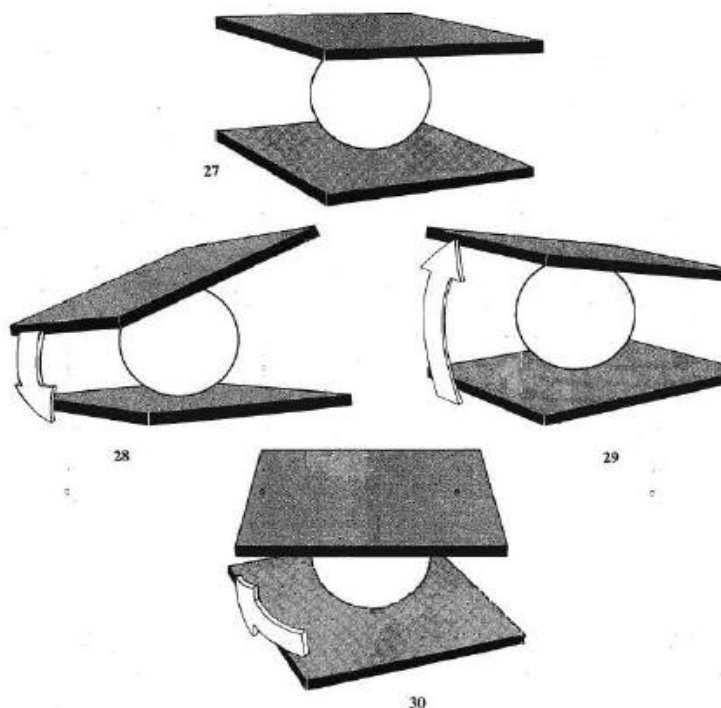
Σχήμα 2.8 Μεσοσπονδύλιος δίσκος.

α) Η οριζόντια τομή ενός κανονικού μεσοσπονδύλιου δίσκου απεικονίζει τις ομόκεντρες με απανωτές στρώσεις ινώδους δακτυλίου. Στην εικόνα κάνει αισθητή την παρουσία της μια αλλοίωση του σχήματος στον πηκτοειδή πυρήνα του. (β) Κανονική οστεώδη σπονδυλικής τελικής πλάκας παρουσιάζει μια πορώδη επιφάνεια και μια ομαλή αποστεωμένη γέλη. Μια μικρή διαφορά μπορεί να δει κανείς μεταξύ αυτών δύο περιοχές (36 ετών, θηλυκό). (γ) Έμφαση δίνουν στις διαρθρωτικές αλλαγές του οστίτη σπονδυλικής τελικής πλάκας και η αποστεωμένη γέλη λόγω της οστεοαρθρίτιδας. Πολλά μικρά εξογκώματα υπάρχουν που προκαλούν ανωμαλίες στην επιφάνεια (79 χρόνος, θηλυκό) [7].

Συνίσταται επίσης από ένα περιφερικό μέρος που ονομάζεται ινώδης δακτύλιος ο οποίος με τη σειρά του αποτελείται από ομόκεντρες ίνες που εμπλέκονται μεταξύ τους λοξά. Οι φορά των ινών διαφέρει ανάλογα με το σημείο στο οποίο βρίσκονται. Οι ίνες στην περιφέρεια φέρονται σχεδόν κάθετα ενώ στο κέντρο όπου έρχονται σε επαφή με τον πηκτοειδή πυρήνα έχουν σχεδόν οριζόντια διεύθυνση και περιβάλλουν τον πηκτοειδή πυρήνα σε έναν σάκο του οποίου το σχήμα είναι ελλειπτικό. Μ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο εγκλεισμός του πηκτοειδούς πυρήνα σ' ένα περίβλημα τόσο ισχυρό ώστε στα νέα άτομα, δεν επιτρέπεται καθόλου η έξοδος του. Ο τελευταίος βρίσκεται υπό πίεση στον χώρο του, με αποτέλεσμα ακόμη και να τρυπήσει ο ινώδης δακτύλιος να προβάλλει προς τα έξω η ζελατινώδης ουσία του. Για κάποιον παρατηρητή, ο πηκτοειδής πυρήνας μπορεί να περιγραφεί ως ένα σφαιρικό υλικό που έχει τοποθετηθεί ανάμεσα σε δύο επίπεδα, καθώς παρ' ότι όπως αναφέρθηκε το



σχήμα του είναι ελλειπτικό, όντας υπό πίεση ανάμεσα στις επιφάνειες των σπονδυλικών σωμάτων αποκτάει σχήμα σχεδόν σφαιρικό.



Σχήμα 2.9 Κινηματική των συνδεσμών δύο διαδοχικών σπονδύλων [81].

Αυτού του είδους η σύνδεση, η οποία είναι γνωστή ως περιστροφική (swivel) σύνδεση επιτρέπει τριών ειδών κινήσεων όπως περιγράφεται παρακάτω:

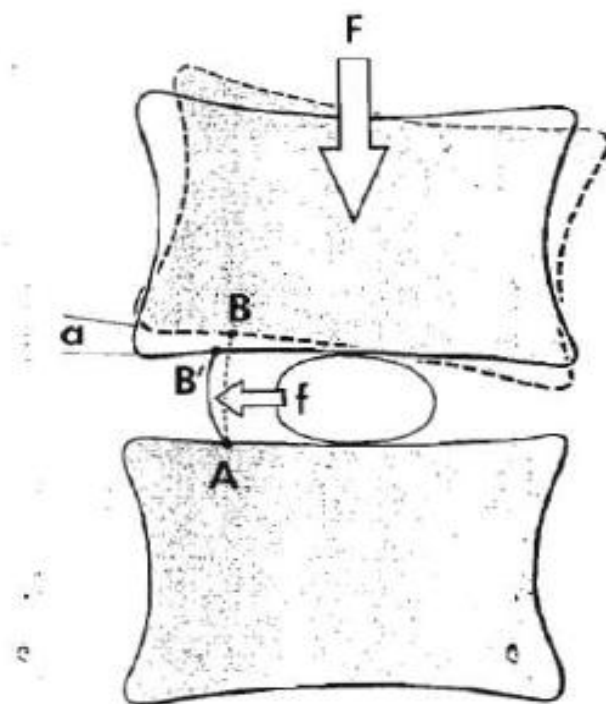
- Κλίση στον οβελιαίο επίπεδο, δηλαδή κάμψη ή έκταση
- Κλίση στο μετωπιαίο επίπεδο, δηλαδή πλάγια κάμψη.
- Στροφή του ενός σπονδύλου σε σχέση με τον άλλον
- Επίπεδη κίνηση – ολίσθηση του ενός σπονδύλου σε σχέση με τον άλλον

Γίνεται, λοιπόν, αμέσως αντιληπτό πως η συγκεκριμένη σύνδεση έχει έξι βαθμούς ελευθερίας: κάμψη και έκταση, πλάγια κάμψη, ολίσθηση σε μετωπιαίο, οβελιαίο επίπεδο και εγκάρσιο, δεξιά και αριστερά στροφή. Κάθε μια από τις κινήσεις είναι, όπως είναι λογικό, μικρές σε έκταση και για να είναι οι κινήσεις εφικτές θα πρέπει να υπάρξει η συμμετοχή πολλών σπονδυλικών αρθρώσεων.

Πλησιάζοντας προς την πύελο, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι δυνάμεις που ασκούνται στην σπονδυλική στήλη. Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος τους γίνει μια αναφορά στις συμπιεστικές δυνάμεις με κατακόρυφη φορά. Ο πηκτοειδής πυρήνας υπόκειται στα  $\frac{3}{4}$  του φορτίου, ενώ ο ινώδης δακτύλιος φέρει το υπόλοιπο  $\frac{1}{4}$ . Παρ' όλα αυτά όταν γίνεται αναφορά για το οριζόντιο επίπεδο, ένα μέρος του φορτίου μεταφέρεται από τον πηκτοειδή πυρήνα και καταλήγει στον ινώδη δακτύλιο. Ο πηκτοειδής πυρήνας βρίσκεται πάντα σε θετική πίεση και

δεν είναι ποτέ μηδενική, είτε ο δίσκος υπόκειται σε φόρτιση την στιγμή της μέτρησης, είτε όχι. Αυτό είναι κάτι που συμβαίνει λόγω της ικανότητας που έχει ο πηκτοειδής πυρήνας να απορροφά το νερό. Η κατάσταση αυτή μπορεί να παραλληλιστεί με αυτή της προέντασης των δομικών στοιχείων στη μηχανική. Με τη βοήθεια της προέντασης του μεσοσπονδύλιου δίσκου του προσδίδεται μεγαλύτερη αντοχή τόσο κατά την αξονική φόρτιση όσο και την πλάγια κάμψη. Στους ηλικιωμένους η ικανότητα που έχει ο πηκτοειδής πυρήνας να απορροφά και να κρατά το νερό μειώνεται και, έτσι, η προένταση χάνεται. Έχοντας κάποιος την προηγούμενη παραδοχή στο μυαλό του, μπορεί να εξηγήσει τον λόγο που από κάποια ηλικία και μετά μειώνεται η ευλυγισία της σπονδυλικής στήλης.

Όταν στο δίσκο εφαρμοσθεί κάποιο φορτίο το οποίο είναι ασύμμετρο, τότε ο σπόνδυλος που βρίσκεται από πάνω σχηματίζει γωνία με τον σπόνδυλο που βρίσκεται από κάτω. (Σχήμα 2.10). Έπειτα, λόγω της αύξησης της πίεσης του πηκτοειδούς πυρήνα ο σπόνδυλος επανέρχεται στην θέση που είχε πριν δεχθεί την πίεση. Αυτός ο μηχανισμός αυτό - σταθεροποίησης σχετίζεται με την προένταση του πηκτοειδούς πυρήνα. Εάν η πίεση του πηκτοειδούς πυρήνα μειωθεί ή φθαρεί ο ινώδης δακτύλιος αυτός ο λειτουργικός συνδυασμός παύει να υπάρχει [51].

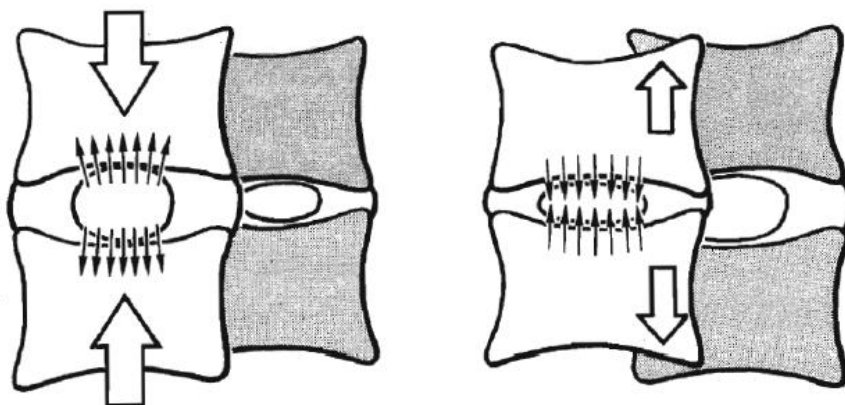


Σχήμα 2.10 Ασύμμετρη φόρτιση μεσοσπονδύλιου δίσκου και επαναφορά [81].

Για την επίτευξη της προέντασης στον μεσοσπονδύλιο δίσκο, πολύ σημαντικό ρόλο, παίζουν οι ελαστικές ιδιότητες τις οποίες διαθέτει. Ενώ, παράλληλα, αποτελεί και έρπον μέσο πράγμα που σημαίνει πως μπορεί να φέρει και ελαστικές και πλαστικές ιδιότητες ταυτόχρονα. Θα μπορούσε κάποιος να παραλληλίσει τη συμπεριφορά του μεσοσπονδύλιου δίσκου με αυτή

ενός ελατηρίου. Παρατηρείται, λοιπόν, ένας μηχανισμός ο οποίος κατά την διακεκομμένη αξονική φόρτιση της σπονδυλικής στήλης, προλαμβάνει οποιονδήποτε τραυματισμό απορροφώντας και αποσβένοντας οποιονδήποτε κραδασμό με τον οποίο θα επιβαρύνονταν η σπονδυλική στήλη.

Για να επιτευχθεί η απόσβεση γίνεται χρήση του νερού που έχει απορροφήσει ο πηκτοειδής πυρήνας, καθώς όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο τμήμα της εργασίας, υπάρχουν μικροσκοπική πόροι στον ινώδη δακτύλιο μέσα από τους οποίους περνάει το νερό και καταλήγει στο σπογγώδες ιστό. Για να μετακινηθεί, όμως, το νερό είναι απαραίτητη η χρήση ενέργειας την οποία προσλαμβάνει από την δράση της δύναμης φόρτισης. Κατά την εφαρμογή μίας στατικής δύναμης στην όρθια θέση η ποσότητα του νερού που προσροφάτε στο πηκτοειδή πυρήνα είναι τέτοια που η δύναμη προέντασης που ασκεί εξισορροπείται από την εξωτερική δύναμη. Αυτό μεταφράζεται στις διαστάσεις του δίσκου (Σχήμα 2.11).



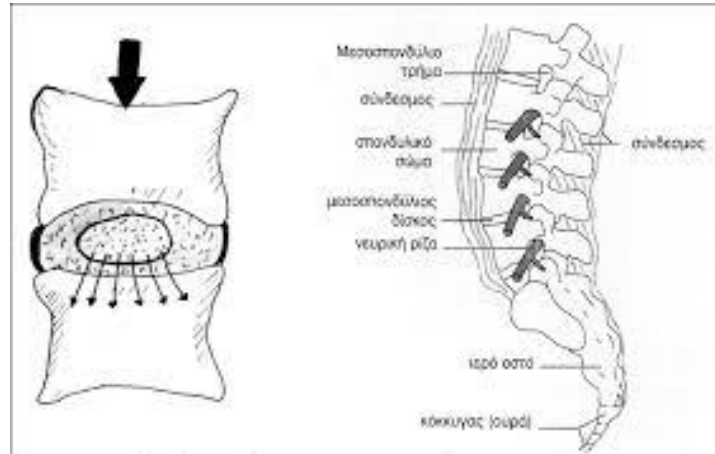
Σχήμα 2.11 Μηχανισμός απόσβεσης (ιξωδοελαστικότητα) μεσοσπονδύλιου δίσκου [52].

Υπάρχει κοινή παραδοχή ότι δύο μετρήσεις του ύψους του ίδιου ανθρώπου, μία το πρωί και μία το βράδυ, διαφέρουν κατά ένα μικρό ποσοστό. Αυτό οφείλεται στο ότι ο μεσοσπονδύλιος δίσκος λεπταίνει μετά από το πέρας μια μέρας κατά την οποία ο άνθρωπος είναι όρθιος. Αξιοσημείωτο είναι πως στο σύνολο της σπονδυλικής στήλης η διαφορά μπορεί να είναι μέχρι και 20 χιλιοστά. Κατά την αξονική φόρτιση του δίσκου η απώλεια του ύψους που επέρχεται είναι εκθετική, το ίδιο και η ανάκτηση της.

## ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΔΙΣΚΟ

Η απόσταση του δίσκου ο οποίος δέχεται δυνάμεις συμπίεσης από το ιερό οστό έχει μεγάλη σημασία, καθώς όσο μικρότερη είναι η απόσταση αυτή, τόσο μεγαλύτερη σημασία αποκτούν οι δυνάμεις αυτές. Έτσι, είναι λογικό, οι συμπιεστικές δυνάμεις που μας αφορούν περισσότερο είναι αυτές που ασκούνται στον μεσοσπονδύλιο δίσκο που βρίσκεται ανάμεσα στους σπόνδυλους O5-I1.

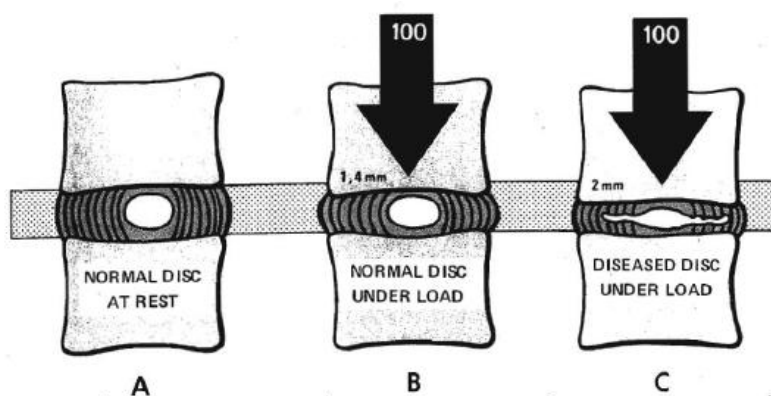
Στο παράδειγμα που δίνεται στο ανάλογο κεφάλαιο του [52] , για ένα άτομο το οποίο ζυγίζει 80 kg, το κεφάλι έχει βάρος 3 kg , τα άνω άκρα 14 kg και το σώμα 60 kg. Εάν υποθεθεί ότι στο επίπεδο των Ο5-Ι1 φέρονται τα 2/3 του βάρους τότε στο επίπεδο αυτό ασκείται δύναμη (P) 37 kg, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Εδώ, πρέπει να προστεθεί και η δύναμή που ασκείται από τον μυϊκό τόνο των παρασπονδυλικών μυών (M1 και M2) προϋπόθεση για την όρθια στάση του σώματος στην ηρεμία.



Σχήμα 2.12 Δυνάμεις ασκούμενες στην οσφυϊκή μοίρα [71].

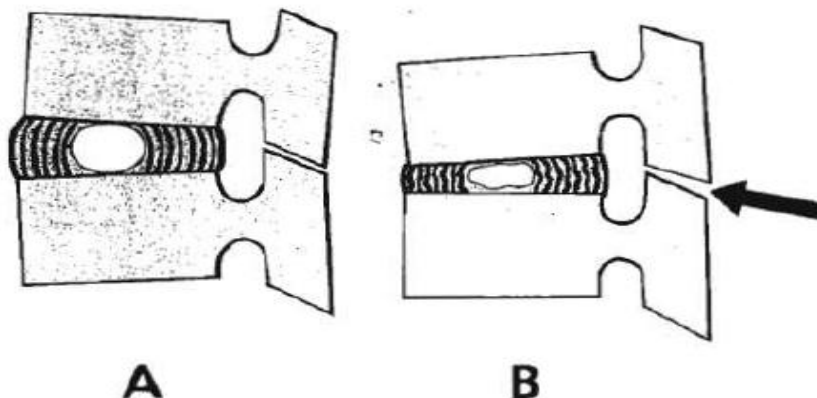
Στη περίπτωση που προστεθεί μια εξωτερική δύναμη (E) ή μια βίαιη φόρτιση (S) εύκολα η αντοχή του δίσκου μπορεί να ξεπεραστεί, κυρίως στους ηλικιωμένους.

Η απώλεια του ύψους σε έναν δίσκο εξαρτάται από την κατάσταση του. Σε έναν υγιή δίσκο (A) η απώλεια του ύψους σε απόκριση εφαρμογής δύναμης 100 kg είναι 1,4 mm (B). Σε έναν εκφυλισμένο δίσκο η απώλεια του ύψους είναι 2mm και αποτυγχάνει να αποκτήσει του ύψους του ξανά (C) (Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.13 Απώλεια ύψους σε υγιή και εκφυλισμένο μεσοσπονδύλιο δίσκο κατά τη συμπιεστική φόρτιση [52].

Η προοδευτική επιπέδωση του δίσκου η οποία γίνεται αντιληπτή στο σχήμα 2.14 έχει επιπτώσεις και στις αρθρικές επιφάνειες των σπονδύλων. Με φυσιολογικό πάχος του δίσκου, οι αρθρικές επιφάνειες είναι σε φυσιολογική απόσταση (Α) ενώ σε εκφυλισμένο δίσκο διαταράσσεται η δομή και τα μεσάρθρια διαστήματα ανοίγουν προς τα πίσω(Β).

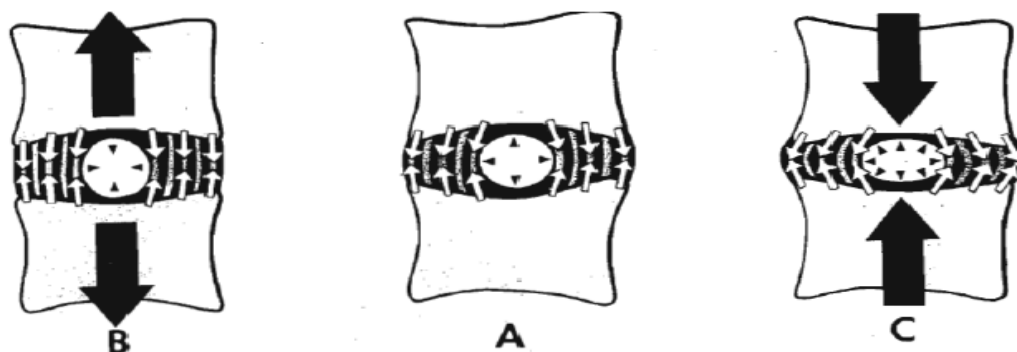


Σχήμα 2.14 Προοδευτική επιπέδωση του δίσκου [52].

## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΑΠΛΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ

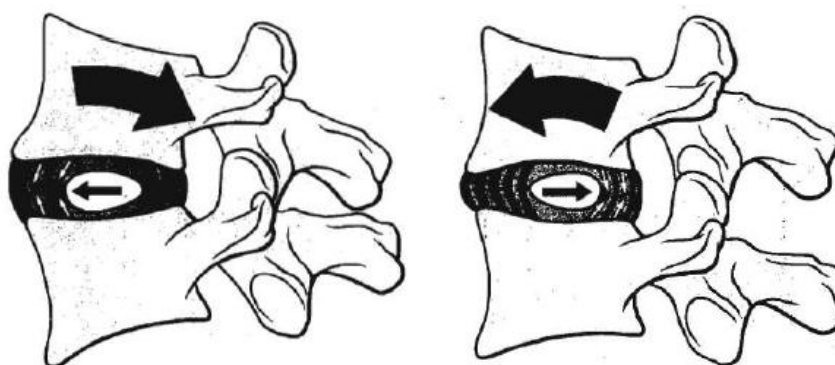
Σε προηγούμενο κομμάτι του παρόντος εγγράφου, έχει ειπωθεί, πως ενώ η κατάσταση του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι αυτή της ηρεμίας, ισχύει ακόμη η προένταση του καθώς υφίσταται και τάση οι ίνες που βρίσκονται στον ινώδη δακτύλιο.

Με την εφαρμογή ελκτικών δυνάμεων στον επιμήκη άξονα της σπονδυλικής στήλης, όπως είναι ήδη γνωστό από την μηχανική, τα σώματα των σπονδύλων, τείνουν να απομακρυνθούν το ένα από το άλλο και ο εφελκυσμός αυτός, αυξάνει το ύψος του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Ταυτόχρονα έχουμε αλλαγές στην τάση του ινώδους δακτυλίου, στο εύρος του, καθώς και στο σχήμα του καθώς και τα τρία αυτά χαρακτηριστικά του, μεγαλώνουν. Αντιθέτως, κάποιο άλλο χαρακτηριστικό του μεσοσπονδύλιου δίσκου, η πίεση του, μειώνεται και πάνω σε αυτό βασίζεται το σκεπτικό της έλξης της σπονδυλικής στήλης που εφαρμόζεται ως αγωγή της πρόπτωσης του πηκτοειδούς πυρήνα. Κατά την έλξη η πίεση μειώνεται και η ουσία του πηκτοειδούς πυρήνα εισέρχεται στον χώρο της στο κέντρο του δίσκου. Κατά την αξονική συμπίεση (Σχήμα 2.15) η διάμετρος του δίσκου αυξάνεται ενώ το ύψος του μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται τόσο πίεση που υφίσταται ο πηκτοειδής σωλήνας, όσο και η τάση του ινώδους δακτυλίου. Με αυτό τον τρόπο οι κατακόρυφες δυνάμεις αλλάζουν φορά και γίνονται οριζόντιες αυξάνοντας την τάση στον ινώδη δακτύλιο.



Σχήμα 2.15 Μεταβολή σχήματος πηκτοειδούς πυρήνα κατά την αξονική συμπίεση της σπονδυλικής στήλης [50].

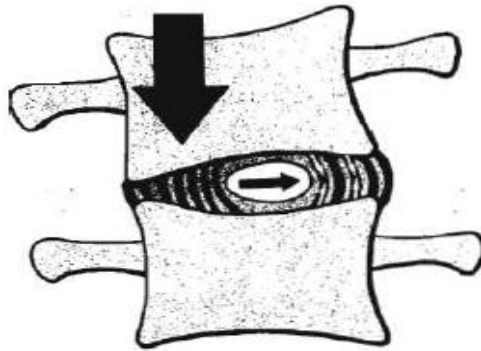
Σε περίπτωση έκτασης της σπονδυλικής στήλης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.16, υπάρχει μετακίνηση του άνω σπονδύλου με φορά προς τα πίσω καθώς και του πηκτοειδούς πυρήνα με φορά προς τα μπροστά. Οι ίνες, και κυρίως οι μπροστά, στον ινώδη δακτύλιο πιέζονται από τον πυρήνα, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της τάσης τους. Αυτή η δράση με τη σειρά της οδηγεί σε μία αντίδραση που τείνει να τις επαναφέρει στην αρχική του θέση. Όταν η σπονδυλική στήλη κάμπτεται, υπάρχει μετακίνηση του πάνω σπονδύλου προς τα μπροστά, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να μετακινηθεί ο πηκτοειδής πυρήνας προς τα πίσω. Βρισκόμαστε πάλι στην ίδια κατάσταση όπως στην περίπτωση της έκτασης με τη σημαντική διαφορά πως στην περίπτωση αυτή, πιέζονται οι πίσω ίνες άρα η δύναμη επαναφοράς θα έχει κατεύθυνση προς τα μπροστά ώστε να επαναφέρει τις ίνες στην αρχική τους θέση. Το γεγονός αυτό επαληθεύει για ακόμη μία φορά στη παρούσα εργασία την ικανότητα που έχει ο μεσοσπονδύλιος δίσκος να διατηρεί τη σταθερότητα του μόνος του μέσω, φυσικά, της προέντασης στο σύμπλεγμα του πηκτοειδούς πυρήνα με τον ινώδη δακτύλιο.



Σχήμα 2.16 Μεταβολή σχήματος πηκτοειδούς πυρήνα κατά την έκταση και την κάμψη της σπονδυλικής στήλης [51].

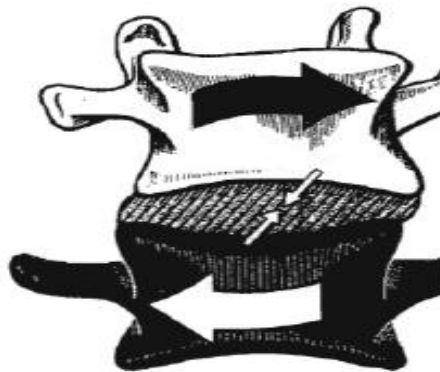
Στην περίπτωση όπου η σπονδυλική στήλη κάμπτεται (Σχήμα 2.16) ο πάνω σπόνδυλος αποκτά κλίση όμοια με αυτή της πλευράς της κάμψης και υπάρχει άμεση μετακίνηση του

πηκτοειδούς πυρήνα προς την αντίθετη κατεύθυνση με σκοπό την σταθεροποίηση της σπονδυλικής στήλης.



Σχήμα 2.17 Πλάγια κάμψη σπονδυλικής στήλης [81]

Κατά την αξονική στροφή οι λοξές ίνες ευθυγραμμισμένες με τη διεύθυνση της στροφής τεντώνουν εν αντιθέσει με τις ίνες που έχουν αντίθετη κατεύθυνση, οι οποίες, χαλαρώνουν. Παράλληλα παρατηρείται αύξηση της πίεσης του πηκτοειδούς πυρήνα καθώς η τάση των κεντρικών ινών, οι οποίες είναι αισθητά πιο λοξές, είναι μέγιστη.



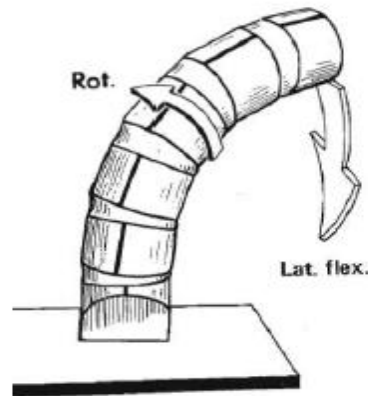
Σχήμα 2.18 Στροφή σπονδυλικής στήλης [81].

Ο μηχανισμός της στροφής εξαρτάται από δύο μηχανισμούς:

- τη συμπίεση του μεσοσπονδύλιου δίσκου και
- τη διάταση των συνδέσμων.

Οι μηχανισμοί αυτοί, λειτουργούν συνδυαστικά και είναι κι αυτοί υπεύθυνοι για την ικανότητα που έχουν οι σπόνδυλοι να στρίβουν. Με τον τρόπο αυτό, αποκτά εξήγηση το γιατί η κάμψη και η στροφή τείνουν να διαρρήξουν τον ινώδη δακτύλιο και να σπρώχνουν τον πηκτοειδή πυρήνα με φορά προς τα πίσω μέσω των διαρρηγμένων ινών του ινώδους δακτυλίου. Κάτι

άλλο που χρήζει προσοχής είναι η αυτόματη περιστροφή της σπονδυλικής στήλης κατά την πλάγια κάμψη αυτής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.19 Μηχανισμός στροφής σπονδυλικής στήλης [54].

Οι συμπιεστικές δυνάμεις στον δίσκο λόγω της πλάγιας κάμψης, ωθούν τον πηκτοειδή πυρήνα να μετακινηθεί από τα πλάγια όπου βρίσκονταν προς τα μπροστά, εκεί όπου και η πίεση είναι μικρότερη. Η κίνηση αυτή αναγκάζει το σώμα του σπονδύλου να στρίψει. Στην αντίπερα όχθη, η πλάγια κάμψη τεντώνει τους συνδέσμους από την αντίθετη πλευρά με αποτέλεσμα την κίνηση τους με κατεύθυνση προς τα εμπρός κατά την προσπάθεια τους να μειωθεί το μήκος τους πράγμα που οδηγεί και στην μείωση της τάσης τους. Σε περίπτωση που υπάρχει κάποια διαταραχή της ανάπτυξης ή/ και ανισομέρεια στην ανάπτυξη των συνδέσμων, παρ' ότι η διαδικασία που περιγράφηκε πριν είναι απόλυτα φυσιολογική, υπάρχει πιθανότητα σταθεροποίησης των σπονδύλων σε θέση στροφής. Η διαταραχή αυτή, έχει ως αποτέλεσμα την σκολίωση, μία ανωμαλία η οποία συνδυάζει σταθερή πλάγια κάμψη της σπονδυλικής στήλης και στροφή των σωμάτων των σπονδύλων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.20 Μόνιμη παραμόρφωση σπονδυλικής στήλης σε θέση στροφής [68].



Αυτή η μη φυσιολογική στροφή μπορεί να αναδειχθεί κλινικά. Σε φυσιολογική σπονδυλική στήλη (δεξιά) κατά την κάμψη η σπονδυλική στήλη είναι συμμετρική κατά την οπίσθια προβολή. Αν υπάρχει σκολίωση (αριστερά) τότε έχουμε ασυμμετρία στην μπροστά κάμψη της σπονδυλικής στήλης. Ο θώρακας έχει σχήμα που παρομοιάζεται με αυτό του τόξου και η σπονδυλική στήλη παρουσιάζει μόνιμη πλάγια καμπτική παραμόρφωση. Αυτό είναι αποτέλεσμα την μόνιμης στροφής των σωμάτων των σπονδύλων. Μ αυτό τον τρόπο, μία κατά τα άλλα φυσιολογική και προσωρινή στροφή μπορεί να καταλήξει ως παθολογική, καθώς συνδέεται με την μόνιμη πλάγια κάμψη της σπονδυλικής στήλης [53].

## 2.6 ΕΥΡΟΣ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΤΑ ΤΟ ΟΒΕΛΙΑΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Παρατηρώντας κάποιος τη σπονδυλική στήλη μπορεί να αντιληφθεί πως πρόκειται για μία άρθρωση με τρεις περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας: κάμψη και έκταση, πλάγια κάμψη δεξιά και αριστερά και στροφή δεξιά και αριστερά. Σε κάθε επίπεδο το ποσοστό κίνησης είναι ελάχιστο, αλλά παρατηρώντας το συνολικά, γίνεται ιδιαίτερα σημαντικό.

Η κάμψη και η έκταση λαμβάνουν χώρα στο οβελιαίο επίπεδο και είναι δυνατό να φθάσουν σε συνολικό εύρος τις 250 μοίρες σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Αυτή η τιμή προφανώς αναφέρεται σε υγιή άτομα και είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να αποκτηθεί.



Σχήμα 2.21 Εύρος κίνησης της σπονδυλικής στήλης [54].

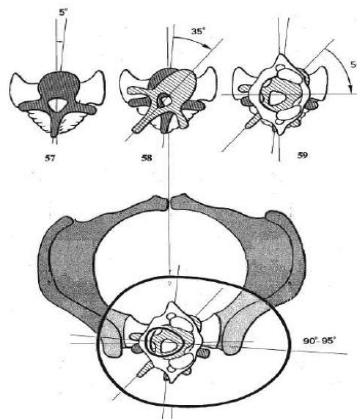
Για να μετρηθεί το πόσο συνεισφέρει η κάθε μοίρα της σπονδυλικής στήλης σε έκταση και κάμψη μπορεί να γίνει χρήση πλάγιων ακτινογραφιών

- Στην οσφυϊκή μοίρα κάμψη 60° και έκταση 35°
- Στην θώρακο-οσφυϊκή περιοχή ως σύνολο κάμψη 105° και έκταση 75°
- Στη αυχενική μοίρα κάμψη 40° και έκταση 75°

Συνολικά, η κάμψη είναι  $110^\circ$  και η έκταση  $140^\circ$ . Αυτό που πρέπει να γίνει σαφές είναι πως όχι μόνο οι τιμές που συζητήθηκαν παραπάνω είναι προσεγγιστικές αλλά διαφοροποιούνται έντονα ανάλογα τόσο με την ηλικία όσο και με τη φυσική κατάσταση. Πρέπει, επίσης, να τονιστεί ότι δεν υπάρχει απόλυτη συμφωνία μεταξύ των υπαρχουσών βιβλιογραφικών δεδομένων. Παρ' όλα αυτά οι τιμές που αναφέρθηκαν θεωρούνται αποδεκτές. Η πλάγια κάμψη συμβαίνει κατά το μετωπιαίο επίπεδο. Ο βαθμός της κάμψης κατά τις διάφορες μοίρες της σπονδυλικής στήλης μπορεί να μετρηθεί με ακτινογραφίες σε μετωπιαίο επίπεδο (Σχήμα 2.22).

- Η πλάγια κάμψη της οσφυϊκής μοίρας είναι  $20^\circ$
  - Η πλάγια κάμψη της θωρακικής μοίρας είναι  $20^\circ$
  - Η πλάγια κάμψη της αυχενικής μοίρας είναι  $35^\circ - 40^\circ$
- Επομένως, η πλάγια κάμψη της σπονδυλικής στήλης ως σύνολο είναι της τάξης των  $75^\circ - 85^\circ$ .
- Η αξονική στροφή της οσφυϊκής μοίρας είναι  $5^\circ$
  - Η αξονική στροφή της θωρακικής μοίρας είναι  $35^\circ$
  - Η αξονική στροφή της αυχενικής μοίρας είναι  $45^\circ - 50^\circ$

Η στροφή στην θωρακική μοίρα αυτό διευκολύνεται από την διάταξη των αρθρικών αποφύσεων ενώ το μεγαλύτερο εύρος αξονικής στροφής έχει η αυχενική μοίρα της σπονδυλικής στήλης λόγω της ατλαντοαξονικής άρθρωσης. Συνολικά, η αξονική στροφή της σπονδυλικής στήλης είναι της τάξεως του λίγο μεγαλύτερο των  $90^\circ$  (Σχήμα 2.22) [49].



Σχήμα 2.22 Στροφή ανά μοίρες της σπονδυλικής στήλης [78].

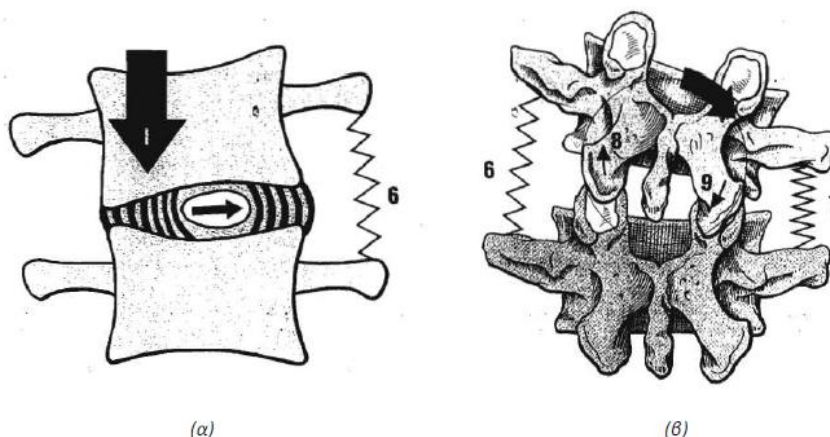
## 2.7 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Σε μια προσθοπίσθια ακτινογραφία, η οσφυϊκή μοίρα είναι ευθεία και συμμετρική ως προς τη μέση γραμμή. Το σχήμα των σπονδυλικών σωμάτων και των εγκαρσίων αποφύσεων

μειώνεται προς την κεφαλή. Μια οριζόντια γραμμή μεταξύ των υψηλότερων σημείων της λαγόνιας ακρολοφίας περνά ανάμεσα στους σπόνδουλους Ο4 και Ο5.

Σε μία πλάγια ακτινογραφία γίνονται αντιληπτές οι ιδιότητες τόσο της οσφυϊκής λόρδωσης όσο και της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης, όταν αυτή βρίσκεται σε ηρεμία. Η γωνία που σχηματίζεται στο ιερό οστό μεταξύ της οριζόντιας και της ευθείας που περνά από την άνω επιφάνεια του Ι1 είναι 30ο, κατά μέσο όρο. Η οσφυοϊερά γωνία, μεταξύ του άξονα του Ο5 και του άξονα του Ι1 είναι κατά μέσο όρο 140ο. Η γωνία της πυελικής κλίσης που σχηματίζεται από την οριζόντια και μια ευθεία που περνά από το πάνω όριο της ηβικής σύμφυσης είναι κατά μέσο όρο 60ο. Ο δείκτης της οσφυϊκής λόρδωσης μπορεί να οριστεί από την κάθετη σε μία γραμμή που ενώνει το οπίσθιο- άνω όριο του Ο1 και το οπίσθιο κάτω όριο του Ο5. Συνήθως αυτή η απόσταση είναι μέγιστη στο επίπεδο του Ο3 και ορίζει την οσφυϊκή λόρδωση. Είναι μεγαλύτερη όσο η λόρδωση είναι πιο εμφανής και εξαφανίζεται όταν υπάρχει ευθειασμός. Η οπίσθια προβολή είναι η απόσταση μεταξύ του οπίσθιου κάτω ορίου του Ο5 και της κάθετης. Στην περίπτωση όπου η οσφυϊκή μοίρα βρίσκεται σε έκταση, τότε η οπίσθια προβολή έχει θετική τιμή. Αντιθέτως, αν βρίσκεται σε κάμψη η απόσταση αυτή έχει αρνητική τιμή. Στην διαδικασία της κάμψης το υπερκείμενο σπονδυλικό σώμα αποκτά μια μικρή κλίση προς τα εμπρός, μικραίνοντας έτσι το πάχος που έχει ο μεσοσπονδύλιος δίσκος στην μπροστά περιοχή και αυξάνοντας το προς τα πίσω. (Σχήμα 2.23). Έπειτα, υπάρχει αύξηση της τάσης στις ίνες του ινώδους δακτυλίου λόγω του ότι ο μεσοσπονδύλιος δίσκος αλλάζει σχήμα και έχουμε έτσι μετακίνηση και του πηκτοειδή πυρήνα προς τα πίσω. Παράλληλα, οι αρθρικές αποφύσεις του υπερκείμενου σπονδύλου ολισθαίνουν προς τα πάνω και έχουν την τάση να απομακρύνονται από τις άνω αρθρικές αποφύσεις του κάτω σπονδύλου. Αυτό, με τη σειρά του οδηγεί τους συνδέσμους των αρθρώσεων να αποκτούν μέγιστη τάση. Το ίδιο συμβαίνει και με τους άλλους συνδέσμους του σπονδυλικού τόξου. Τελικά, η μέγιστη τάση των συνδέσμων αυτών περιορίζει την κάμψη [79].

Κατά την πλάγια κάμψη της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης το σώμα του υπερκείμενου σπονδύλου κλίνει προς το σύστοιχο πλάι, ο μεσοσπονδύλιος δίσκος αποκτά σφηνοειδή παραμόρφωση με τη βάση προς το αντίστοιχο πλάι με τον πηκτοειδή πυρήνα να μετακινείται αντίστοιχα. Ο αντίστοιχός μεσεγκάρσιος σύνδεσμος τεντώνεται ενώ ο σύστοιχος σύνδεσμος χαλαρώνει. Οι απέναντι εγκάρσιες αποφύσεις απομακρύνονται και πλησιάζουν ανά δύο. Σαν αποτέλεσμα ο αρθρικός θύλακος τεντώνει και χαλαρώνει ανάλογα την πλευρά που βρίσκεται.



Σχήμα 2.23 Πλάγια κάμψη διαδοχικών σπονδύλων οσφυϊκής μοίρας (α) σε διάγραμμα και (β) σε σχηματική αναπαράσταση [73].

Για να περιστραφεί η οσφυϊκή μοίρα, γίνεται χρήση του κέντρου του κάτω σπονδύλου ενώ ο υπερκείμενος σπόνδυλος ολισθαίνει πάνω στον υποκείμενο. Στον υπερκείμενο σπόνδυλο, το κέντρο περιστροφής βρίσκεται πολύ κοντά στη γραμμή που ενώνει τα όρια των αρθρικών αποφύσεων ενώ στην περίπτωση του υποκείμενου σπόνδυλου το κέντρο βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το συγκεκριμένο όριο. Επίσης, το κέντρο αυτού του κυλίνδρου με το κέντρο των επιφυσιακών πλακών δεν είναι το ίδιο .

Οι αρθρικές επιφάνειες των άνω αρθρικών αποφύσεων είναι προσανατολισμένες προς τα πίσω και έσω. Η επιφάνεια τους είναι κοίλη στο εγκάρσιο επίπεδο και ευθεία στο κάθετο άξονα με αποτέλεσμα να δημιουργούν τμήμα κυλίνδρου με το κέντρο του πολύ κοντά στην βάση της ακανθώδους απόφυσης.

Το εύρος της περιστροφής περιορίζεται κατά κύριο λόγο, λόγω των διατμητικών δυνάμεων που δρουν στο μεσοσπονδύλιο δίσκο. Το μέσο εύρος αξονικής περιστροφής της σπονδυλικής στήλης είναι περίπου  $10^\circ$ , πράγμα που σημαίνει πως για κάθε επίπεδο η περιστροφή είναι 2 μοίρες. Άρα γίνεται αντιληπτό πως η οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης δεν έχει σχεδιασθεί με τρόπο τέτοιο, ώστε να προσδίδει αξονική περιστροφή, η οποία περιορίζεται από τον προσανατολισμό των αρθρικών επιφανειών των άνω και κάτω αρθρικών αποφύσεων.

Οι δύο τελευταίοι σπόνδυλοι συνδέονται απευθείας με τα λαγόνια οστά μέσω των οσφυολαγόνιων συνδέσμων. Οι σύνδεσμοι αυτοί αποτελούνται από δύο μοίρες, την άνω μοίρα που ξεκινάει από την κορυφή της Ο4 εγκάρσιας απόφυσης με κατακόρυφη κατεύθυνση προς τα κάτω, προς τα έξω και προς τα πίσω και καταλήγει στην λαγόνια ακρολοφία και την κάτω μοίρα η οποία ξεκινάει από την κορυφή της Ο5 εγκάρσιας απόφυσης και κατευθύνεται προς τα κάτω και έξω και καταφύεται στην λαγόνια ακρολοφία εμπρός και έσω της κατάφυσης της υπερκείμενης μοίρας.

Κατά την πλάγια κάμψη της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης οι σύνδεσμοι αυτοί τεντώνουν από τη μία πλευρά με αποτέλεσμα να περιορίζεται η πλάγια κάμψη του Ο4 στις 8 μοίρες σε σχέση με το ιερό οστό.

Κατά την κάμψη και έκταση της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης οι σύνδεσμοί διατείνονται και χαλαρώνουν επιλεκτικά: η άνω μοίρα διατείνεται κατά την κάμψη και χαλαρώνει στην έκταση ενώ η κάτω μοίρα διατείνεται στην έκταση και χαλαρώνει στην κάμψη. Ως σύνολο η κίνηση της οσφυοϊέρας συμβολής περιορίζεται από τους συνδέσμους αυτούς με τον μέγιστο περιορισμό στην πλάγια κάμψη [50].

## **2.8 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ Ο5, Ο3 ΚΑΙ Θ12 ΣΠΟΝΔΩΛΩΝ**

Συγκεκριμένοι σπόνδυλοι παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο να είναι το σώμα όρθιο. Τέτοιος σπόνδυλος είναι και ο Ο5 ο οποίος υποβοηθούμενος από το ιδιαίτερο σχήμα του αποτελεί το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στο ιερό οστό και την σπονδυλική στήλη. Ο ρόλος του εκεί είναι ιδιαίτερα σημαντικός λόγω της αξονικής διάταξης των δύο αυτών στοιχείων, αφού το ένα φέρεται κάθετα προς το άλλο.

Ο Ο3 σπόνδυλος αποτελεί έναν ενδιάμεσο σταθμό ώστε να αγκυρωθούν οι μύες. Αυτός ο σπόνδυλος έχει πολύ καλά ανεπτυγμένο σπονδυλικό τόξο και από τη μία πλευρά έλκεται και σταθεροποιείται από μύες που ξεκινούν από το ιερό οστό και από την άλλη είναι σταθμός για μύες που ξεκινούν από κει προς την θωρακική μοίρα σπονδυλικής στήλης. Επομένως, είναι σημαντικός για τη μηχανική της σπονδυλικής στήλης, όταν αυτή βρίσκεται σε ηρεμία, αφού συμπίπτει με την κορυφή της καμπύλης της οσφυϊκής μοίρας και οι επιφυσιακές πλάκες της είναι οριζόντιες και παράλληλες. Είναι ο πρώτος κινητός οσφυϊκός σπόνδυλος καθώς οι δύο υποκείμενοι του είναι ισχυρά σταθεροποιημένοι στο ιερό και αποτελούν μία στατική παρά δυναμική γέφυρα με την υπόλοιπη σπονδυλική στήλη. Από την άλλη πλευρά ο Θ12 σπόνδυλος είναι το μεταβατικό σημείο στην καμπυλότητα μεταξύ της οσφυϊκής μοίρας και της θωρακικής μοίρας και δρα ως το κύριο σημείο περιστροφής (Σχήμα 2.24).



Σχήμα 2.24 Θέση σπονδύλων Ο3 και Θ12 [61].

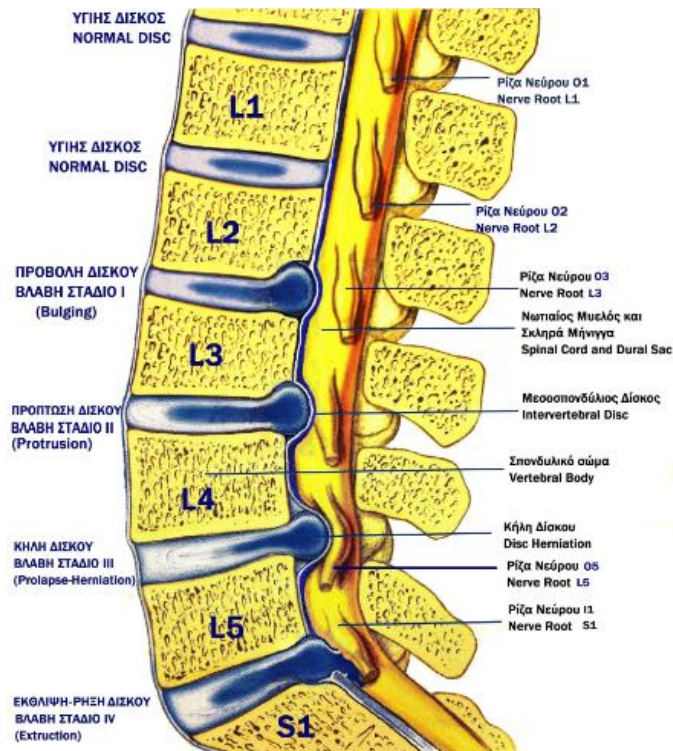
## 2.9 ΠΑΘΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

Οι συχνότερες από τις παθήσεις της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης είναι :

- Προβλήματα δίσκου & οσφυαλγία
- Ισχιαλγία & ριζοπάθεια ΟΜΣΣ
- Σπονδυλική στένωση
- Άλλες μυοσκελετικές παθήσεις (παθήσεις μαλακών μορίων, κλινική τμηματική αστάθεια ΟΜΣΣ)

Τα βασικά επιδημιολογικά στοιχεία της οσφυαλγίας είναι πως το 60 – 90% των ενηλίκων θα έχει οσφυαλγία σε κάποια φάση της ζωής του, ενώ το ποσοστό συχνότητας σε ηλικίες 35-55 είναι περίπου 80-90% εκ του οποίου μόλις το 7-10% γίνονται χρόνιοι οσφυαλγικοί ασθενείς.

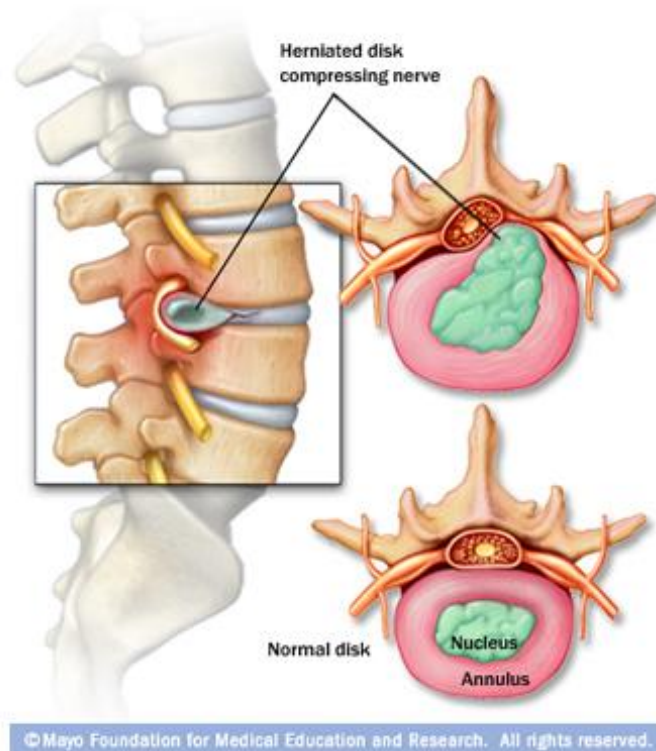
Πρόκειται, για την πρώτη (στη σειρά) δυσλειτουργία σε εργατικά ατυχήματα και αποτελεί κυρίαρχο αίτιο για την αποχή από την εργασία καθώς και του αυξημένου κόστους υγειονομικής περίθαλψης (ιδιαίτερα σε προηγμένες κοινωνίες). Η οσφυαλγία αν και συχνά οφείλεται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις της οσφυϊκής μοίρας, με τα χρόνια (‘εκφύλιση’), πολλές φορές ένας οξύς τραυματισμός μπορεί να είναι η αιτία έναρξης του πόνου.



Σχήμα 1.25 Αλλοίωση σπονδυλικής στήλης

Η πάροδος του χρόνου κάθε ατόμου επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην δομή των μεσοσπονδύλιων δίσκων. Εδώ κάνουν την εμφάνιση τους κάποιες χαρακτηριστικές αλλοιώσεις που μπορούν να παρουσιαστούν.

Ισχιαλγία είναι ένας ενικός όρος αναφερόμενος σε οποιαδήποτε φλεγμονή +/- ερεθισμό μηχανικής φύσεως του ισχιακού νεύρου. Ο ερεθισμός νεύρου δημιουργεί νευρολογική σημειολογία είτε μέσω συμπίεσης νεύρου (π.χ. λόγω ΜΣΔ, δομικών ανωμαλιών, μυϊκού σπασμού απιοειδή), είτε λόγω τάσης νεύρου μέσω 'υπερδιάτασης'. Συνήθη σημεία συμπτώματα είναι η υπαισθησία, μούδιασμα στον οπίσθιο έσω μηρό, κατά μήκος ισχιακού νεύρου. Ο όρος Ριζοπάθεια ΟΜΣΣ αναφέρεται σε μηχανικό ερεθισμό νευρικής ρίζας της ΟΜΣΣ όταν αυτή εξέρχεται από το μεσοσπονδύλιο τρήμα. Πιο συνηθισμένη ριζοπάθεια οφείλεται σε κήλη ΜΣΔ και συμβαίνει στους μεσοσπονδύλιους δίσκους Ο3, Ο4, Ο5 & Ι1. Η συμπτωματολογία που εμφανίζεται σε τέτοιες περιπτώσεις αφορά την ριζική κατανομή του συγκεκριμένου νεύρου Σε περιπτώσεις πρόπτωσης δίσκου μπορεί να υπάρχει μονάχα συμπτωματολογία στο κάτω άκρο (χωρίς συμπτώματα στην ΟΜΣΣ). Μεγάλες κεντρικές ΜΣΔ δημιουργούν αμφοτερόπλευρες ριζοπάθειες ή ιππουρική συνδρομή (που παραπέμπει σε πολύ σοβαρή σημειολογία & έκτακτη χειρουργική επέμβαση).



Σχήμα 1.26 Αλλοίωση ινώδη δακτυλίου [56].

Η Σπονδυλική στένωση αναφέρεται σε στένωση του κεντρικού (νωτιαίου) σωλήνα ή του μεσοσπονδύλιου τρήματος είτε λόγω κήλης του μεσοσπονδύλιου δίσκου, είτε λόγω οστικής προεξοχής (π.χ. οστεόφυτου) ενώ άλλες αιτίες είναι η διόγκωση άρθρωσης facet και η υπερτροφία του ωχρού συνδέσμου. Τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι:

- Συχνή παθολογία σε ασθενείς άνω 60 ετών (όχι πάντα συμπτωματική)
- Αμφοτερόπλευρα συμπτώματα στα 2/3 των ασθενών (αλλά συχνά συνυπάρχει ασυμμετρία)
- Επιδείνωση & έναρξη συμπτωμάτων: κατά την όρθια στάση /βάδιση
- Ανακούφιση συμπτωμάτων: καθιστή θέση, κατάκλιση, καμπτικές στάσεις
- Βάδιση σε κάμψη (αντί όρθια στάση)
- Συμπτώματα πόνου, υπαισθησίας, αιμωδίας, αδυναμίας μπορεί να υπάρχουν
- Φυσιολογική πορεία κατάστασης: 60-70% των ασθενών είναι σταθεροί, 15- 20% χειροτερεύουν (ένδειξη για χειρουργείο) & 15-20% βελτιώνονται
- Διακρίνεται σε κεντρική σπονδυλική στένωση (στένωση του νωτιαίου σωλήνα-κεντρικά) & πλάγια σπονδυλική στένωση (στένωση του μεσοσπονδύλιου τρήματος- μονόπλευρα).



## ❖ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΤΗ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αριθμητικές αναλύσεις είναι σε θέση να προσομοιώνουν τις διαδικασίες κατά την εξέλιξη τους και θεωρητικά είναι αδύνατο να μετρηθούν πειραματικά. Τέτοιες διαδικασίες είναι η γήρανση, η φθορά της σπονδυλικής στήλης και τα φορτία που εφαρμόζονται σε εκείνη. Οι 3D προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων (FE) είναι ικανές να μας παρουσιάσουν τέτοιου είδους αριθμητικές αναλύσεις.

Στόχος αυτής της μελέτης είναι να προσδιοριστεί η επίδραση των κύριων μηχανικών παραμέτρων εκφυλισμού σχετικά με την παραμόρφωση και την κατάσταση πίεσης της οσφυϊκής μοίρας με βάση το λειτουργικό (FSU) κατά τη διάρκεια των διαδικασιών longand με προσωρινό εκφυλισμό της στήλης. Επιπλέον, αριθμητική ανάλυση του αποτελέσματος αποτελεί μια ειδική μέθοδος υποβρύχιας έλξης, η λεγόμενη weightbath θεραπεία έλξης υδροηλεκτρικά (TI) για την αντιμετώπιση εκφυλισμένων τμημάτων της οσφυϊκής μοίρας.

Περίπου το 60 με 85% του πληθυσμού έχει προσβληθεί από ασθένειες που αφορούν τους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Τέτοιες ασθένειες προκαλούν πόνους χαμηλά στην πλάτη (LBP). Τα περισσότερα περιστατικά έχουν παρατηρηθεί σε νεαρές ηλικίες από 40-45 ετών, λόγω του εκφυλισμού των τμημάτων οσφυϊκής μοίρας. Εκφύλιση είναι μια ζημιογόνος αλλαγή στη δομή και την λειτουργία της FSU, η οποία είναι συνέπεια της φυσιολογικής γήρανσης του ατόμου ή της ξαφνικής και έντονης μηχανικής υπερφόρτωσης.

Η εκφύλιση ξεκινά από τον μεσοσπονδύλιο δίσκο και πιο συγκεκριμένα από το κεντρικό τμήμα του πυρήνα του, τον πηκτοειδή πυρήνα. Η γήρανση του δίσκου κάνει την εμφάνιση της με την έλλειψη ενυδάτωσης του δίσκου, την ξήρανση και ακαμψία του εσωτερικού του πυρήνα. Η σκλήρυνση του δακτυλίου συνοδεύεται άμεσα με την εμφάνιση ακαμψίας του δίσκου, βλάβες, τραυματισμούς, φθορά των ινών στην στεφάνη ή αναστάτωση των τελικών πλακών, κατάρρευση των οστεοπορωτικών τμημάτων του σπογγώδες οστού [4]. Όταν η εκφύλιση είναι αποτέλεσμα της υπερφόρτωσης του δίσκου έχει ως αποτέλεσμα την άμεση απώλεια της υδροστατικής πίεσης στον πυρήνα.

Πρόσφατες μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μια ανεπαίσθητη φθορά σε νεαρής ηλικίας δίσκους, οδήγησαν στην αλλοίωση της οσφυϊκής μοίρας [4], [47]. Επιπλέον η έντονη και απρόσμενη φόρτιση του δίσκου μπορεί επίσης να προκαλέσει αλλοίωση σε νεαρής ηλικίας δίσκους. Με την μελέτη αυτή, στόχος είναι, να γίνει κατανοητή η εμβιομηχανική λειτουργία αυτών των διεργασιών εκφυλισμού. Ο πρώτος στόχος αυτής της μελέτης ήταν να γίνουν αντιληπτά τα αριθμητικά συμπεράσματα που οδηγούν στις μηχανικές επιπτώσεις σχετικά με την ηλικία και την εκφύλιση της οσφυϊκής μοίρας την στιγμή που βρίσκεται υπό φορτία πίεσης. Ένα άλλο ερώτημα που μπορεί να απαντηθεί μέσα από την μελέτη αυτή είναι

το γεγονός ότι σε νεαρές ηλικίες περίπου 40-45 χρόνων, οι δίσκοι είναι πιο ευάλωτοι, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακαμψία των οσφυϊκών τμημάτων μετά την γήρανση.

Θεραπείες έλξης ήταν γνωστές για μεγάλο χρονικό διάστημα, ωστόσο, όπως συμβαίνει συχνά, αντί να υπάρχει χαλάρωση από την πίεση υπήρξαν αυξήσεις στην συμπίεση των δίσκων, λόγω της δραστηριότητας των μυών [8], [83], [47]. Οι παρατηρήσεις αυτές επαληθεύουν τη σημασία της ειδικής μεθόδου έλξης, η λεγόμενη weightbath θεραπεία έλξης (WHT), που θεσπίστηκε από τους [39], [40], βασισμένη σε ενδείξεις που περιγράφονται από τους [11]. Ασθενείς κάνοντας την θεραπεία WHT εναιωρούνται σε νερό με αυχενικό κολάρο για μια περίοδο 20 λεπτών, στην συνέχεια φορτώνεται από επιπλέον βάρη μολύβδου στους αστραγάλους, όταν οι ασθενείς είναι σχεδόν σε θέση ύπνου στο χλιαρό νερό με εντελώς χαλαρούς τους μύες.

Όσον αφορά τους συγγραφείς γνωρίζουν ότι, οι αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων της οσφυϊκής FSU σε καθαρή αξονική τάση χωρίς την επίδραση των μυών δεν υπάρχει αναλυτικά στη βιβλιογραφία. Οι [83], [10] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι τάσεις εφελκυσμού και παραμόρφωσης που αναλύθηκαν συνδέονται άμεσα με την κάμψη, χωρίς να αναφέρουν την αξονική τάση ως αποτέλεσμα έντονης φόρτισης. Έτσι, σε αυτή τη μελέτη, αναλύεται η τελευταία περίπτωση. Μέσω αυτής της μελέτης του WHT, οι ευεργετικές επιδράσεις της θεραπείας υποστηρίζονται από τις ενδείξεις αριθμητικών αποτελεσμάτων.

### **3.1.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΤΗΝ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ**

Η οσφυϊκή μοίρα είναι το τμήμα της σπονδυλικής στήλης μεταξύ του θώρακα και του ιερού οστού. Πέντε σπόνδυλοι που ονομάζεται L1 έως L5 με τα οπίσθια στοιχεία τους και τους αρθρωτικούς συνδέσμους της πλευράς αυτής, τους μεσοσπονδύλιους δίσκους, τους συνδέσμους και τους γύρω μύες, αποτελούν το τμήμα της σπονδυλικής στήλης. Η κλινική ανατομία της οσφυϊκής μοίρας μπορεί να μελετηθεί στην βιβλιογραφία των [15], [83], [14], [15] και [4].

Οι οσφυϊκοί σπόνδυλοι έχουν σχεδόν κυλινδρικό σχήμα με ένα πλευρικό πλάτος 40-50 mm και σε οβελιαίο επίπεδο βάθος 30-35 mm. Το ύψος του οσφυϊκού σπονδύλου είναι περίπου 25-30 mm. Οι σπόνδυλοι της οσφυϊκής μοίρα είναι παχύτεροι στο μπροστινό τους μέρος σε σύγκριση με το πίσω, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια καμπυλότητα στην πρόσθια επιφάνεια της σπονδυλικής στήλης που είναι γνωστή ως οσφυϊκή λόρδωση.

Το εξωτερικό κέλυφος σπονδυλικού σώματος αποτελείται από ένα δίκτυο, υψηλής αντοχής φλοιώδες οστού και το εσωτερικό του από σπογγώδες οστό κάθετων και οριζόντιων στηριγμάτων που ονομάζονται δοκίδες. Η ανώτερη και η κατώτερη επιφάνεια του σπονδυλικού σώματος καλύπτεται από τις τελικές πλάκες με στρώσεις διάτρητου υλικού,

από πολλές μικρές οπές φλοιώδης οστού, με σκοπό το πέρασμα των ενεργειών από τα οστά στους δίσκους.

Οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι διαχωρίζουν τους γειτονικούς σπονδύλους. Το σχήμα τους είναι σχεδόν κυλινδρικό, με ένα πλευρικό πλάτος 40-45 mm και οβελιαίο βάθος 35-40 mm. Το ύψος του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι περίπου 10 mm. Ο δίσκος αποτελείται από τρία τμήματα: τον πηκτοειδή πυρήνα, τον ινώδη δακτύλιο και τις ανώτερες και κατώτερες τελικές πλάκες.

Ο πηκτοειδής πυρήνας είναι δομημένος από μια ενυδατωμένη γέλη, μια μάζα ημίρρευστου υλικού, είναι δηλαδή ένα ασυμπίεστο τμήμα που ασκεί πίεση σε όλες τις κατευθύνσεις. Ο ινώδης δακτύλιος αποτελείται από 15-25 ομόκεντρα στρώματα ελασμάτων κολλαγόνου, στενά συνδεδεμένα το ένα με το άλλο περιμετρικά μεταξύ τους γύρω από την περιφέρεια του δίσκου. Κάθε έλασμα αποτελείται από μια βασική ουσία και ίνες κολλαγόνου. Μέσα σε κάθε πέταλο οι ίνες κολλαγόνου είναι διατεταγμένες παράλληλα, σε μια μέση κατεύθυνση των  $30^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο των δίσκων. Τα γειτονικά πέταλα οδηγούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις και είναι προσανατολισμένες σε  $120^\circ$  μεταξύ τους. Οι τελικές πλάκες διαχωρίζουν τον πυρήνα και τον ινώδη δακτύλιο από τα σπονδυλικά σώματα, καθώς καλύπτουν σχεδόν ολόκληρη την επιφάνεια των γειτονικών σπονδυλικών των τελικών πλακών. Οι τελικές πλάκες έχουν μέσο όρο πάχους των 0,6 mm.

Επτά είδη των συνδέσμων διακρίνονται στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης. Ο πρόσθιος διαμήκης σύνδεσμος καλύπτει τις επιφάνειες στο πρόσθιο τμήμα των σπονδυλικών σωμάτων και των δίσκων και είναι ισχυρά συνδεδεμένος με το σπονδυλικό οστό και λιγότερο με τους δίσκους. Ο οπίσθιος επιμήκης σύνδεσμος καλύπτει την οπίσθια όψη του σπονδυλικού σώματος και των δίσκων, ο οποίος αντίθετα συνδέεται ισχυρά με τους δίσκους και λιγότερο με το οστό. Ο σύνδεσμος flavum, είναι ο πιο ελαστικός σύνδεσμος της σπονδυλικής στήλης έχει τις άκρες του συνδεδεμένες στο κατώτερο και ανώτερο άκρο των εσωτερικών επιφανειών των γειτονικών στρώσεων. Οι μεσεγκάρσιοι σύνδεσμοι συνδέουν τις εγκάρσιες αποφύσεις με λεπτά φύλλα από ίνες κολλαγόνου. Οι interspinous σύνδεσμοι συνδέουν τις αντιτιθέμενες άκρες των ακανθωδών αποφύσεων από ίνες κολλαγόνου, ενώ οι supraspinous σύνδεσμοι συνδέουν τις κορυφές των γειτονικών ακανθωδών αποφύσεων από τενοντώδες ίνες.

### **3.1.2 ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ**

Η σπονδυλική στήλη είναι η κύρια δομή που φέρει το φορτίο του ανθρώπινου μυοσκελετικού συστήματος. Έτσι έχει τρεις βασικές εμβιομηχανικές λειτουργίες: να εξασφαλίζει τη μεταφορά φορτίου κατά μήκος της σπονδυλικής στήλης χωρίς να προκληθούν τραυματισμοί, να προσφέρει επαρκή και φυσιολογική κινητικότητα, αλλά και ευελιξία και τέλος, να παρέχει

προστασία στην ευαίσθητη περιοχή του νωτιαίου μυελού από τις επιβλαβείς δυνάμεις και κινήσεις.

Η οσφυϊκή μοίρα είναι το πιο σημαντικό μέρος της σπονδυλικής στήλης, δεδομένου ότι αυτό το τμήμα φιλοξενεί το μέγιστο φορτίο κατά την διάρκεια κινήσεων, με αποτέλεσμα να τραυματίζεται εύκολα και ταυτόχρονα, να συγκεντρώνει μέγιστη κινητικότητα, αφού, το τμήμα αυτό έχει την μικρότερη υποστήριξη από τα όργανα που το περιβάλλουν.

### **3.1.3 ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝ ΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΟΣΦΥΪΚΗ ΜΟΙΡΑ**

Τα φορτία της σπονδυλικής στήλης με βάση τις βιομηχανικές μελέτες συνοψίζονται από [25]. Τα φορτία που δρουν πάνω στη σπονδυλική στήλη κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: σε εκείνα τα φορτία που ασκούνται φυσιολογικά και άλλα που της προκαλούν καταπονήσεις. Τα φυσιολογικά φορτία λόγω της κοινής, φυσιολογικής δραστηριότητας της σπονδυλικής στήλης κατηγοριοποιούνται και με βάση τα φορτία που δέχονται: τα βραχυπρόθεσμα φορτία (σε κάμψη, έκταση), τα μακροχρόνια φορτία (σε καθιστή, όρθια), επαναλαμβανόμενά ή τα κυκλικά φορτία (στο βάδισμα, πόδια), τα δυναμικά φορτία (στο τρέξιμο, άλμα). Τα τραυματικά φορτία συνήθως ασκούνται ξαφνικά, απροσδόκητα και έχουν μεγάλο πλάτος (τράνταγμα).

Κάθε μέρος του σώματος υποβάλλεται σε βαρυτικά φορτία, αναλογικά με τη μάζα του. Τα συμπιεστικά βαρυτικά φορτία αυξάνουν προς την κατεύθυνση της στήριξης του σώματος. Το φορτίο αυτό μπορεί να πολλαπλασιάσει την επιτάχυνση της δύναμης του, κατά τη διάρκεια μιας πτώσης.

Τα φορτία των μυών εξαρτώνται από τη μυϊκή δραστηριότητα. Οι μύες είναι ενεργοί ιστοί που μπορούν να συνθλιβούν και η ικανότητά τους αυτή προέρχεται από το νευρικό σύστημα. Οι μύες στην πλάτη και στην κοιλιά σταθεροποιούν τη σπονδυλική στήλη σε όρθια στάση. Επιπλέον, προστατεύουν την σπονδυλική στήλη από επιβλαβείς κινήσεις. Την ίδια στιγμή, η σύσπασση των μυών προκαλεί υψηλή συμπιεστική δύναμη στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης. Οι [42] και οι [49] υπολόγισαν σε διάφορες στάσεις του σώματος την μυϊκή δύναμη.

Η ενδοκοιλιακή πίεση μειώνει γενικά την συμπίεση του νωτιαίου μυελού λόγω της μυϊκής δραστηριότητας στην κοιλιακή περιοχή. Το εύρος των ζωνών στην κοιλιακή περιοχή συμβάλει στη μείωση των συμπιεστικών δυνάμεων του νωτιαίου.

Τα εργονομικά φορτία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την οσφυϊκή μοίρα. Με την άρση βαρών υποβάλλεται σε φορτία υψηλής συμπιεστικής δύναμης στην οσφυϊκή μοίρα ανάλογα με την οριζόντια απόσταση της φόρτωσης από την οσφυϊκή μοίρα. Τα φορτία μεγάλης διάρκειας και οι επαναλαμβανόμενοι κραδασμοί μπορούν να αυξήσουν τη συμπίεση στην οσφυϊκή μοίρα οδηγώντας την σε δομικές αλλαγές και κόπωση των ιστών του δίσκου και του σπόνδυλου.

Η υπερφόρτωση της σπονδυλικής στήλης μπορεί να προκαλέσει διάφορα είδη παθήσεων στους δίσκους και τις αρθρώσεις της σπονδυλικής στήλης. Οι μύες μπορούν να σώσουν την

σπονδυλική στήλη από τα υπερβολικά ζημιογόνα φορτία και τις επικίνδυνες κινήσεις, σε περιπτώσεις όπου το νευρικό σύστημα έχει αρκετό χρόνο για την ενεργοποίηση των μυών.

### **3.1.4 ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΔΗΛΩΝΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ.**

Η κύρια εσωτερική δύναμη που δρα στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης είναι η θλιπτική δύναμη που ενεργεί κάθετα προς το μέσο επίπεδο των δίσκων, προκαλώντας την συμπίεση των δίσκων. Συνοδεύεται κυρίως από οβελιαίες και λιγότερο πλευρικές διατμητικές δυνάμεις που δρουν στο μεσαίο επίπεδο του δίσκων, προκαλώντας μια κλίση του ενός δίσκου με τον άλλο. Οι δυνάμεις που επιτρέπουν την κίνηση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω κάμψη (κάμψη/ επέκταση) και την πλευρική κάμψη της σπονδυλικής στήλης είναι οι οβελιαίες και πλευρικές ροπές κάμψης, αντίστοιχα. Η ροπή στρέψης επιτρέπει την περιστροφή της σπονδυλικής στήλης γύρω από τον επιμήκη άξονά της. Η δύναμη εφελκυσμού από την άλλη ενεργεί κάθετα προς το μέσο επίπεδο των δίσκων προκαλώντας την επιμήκυνση του.

Το γεγονός ότι τα φορτία που δρουν κανονικά πάνω στην σπονδυλική στήλη, δεν προκαλούν καμιά δύναμη εφελκυσμού, επειδή ενεργούν συνήθως μόνο σε ένα μέρος των δίσκων ως το αποτέλεσμα των άλλων εσωτερικών δυνάμεων, ο στόχος της θεραπείας έλξη είναι ακόμα να εφαρμόσει καθαρή δύναμη εφελκυσμού στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης.

### **3.1.5 Η ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ**

Το εύρος των κινήσεων της σπονδυλικής στήλης μπορεί να μετρηθεί τόσο *in vivo* όσο και *in vitro*. Η κίνηση της στήλης αποτελείται από έξι συνιστώσες: τρεις εκτροπές και τρεις περιστροφές. Οι φυσιολογικές κινήσεις στο οβελιαίο επίπεδο είναι η κάμψη και η έκταση, ενώ στο μετωπιαίο επίπεδο είναι η πλευρική κάμψη και η περιστροφή γύρω από τον μεγάλο άξονα της σπονδυλικής στήλης. Οι κινήσεις της σπονδυλικής στήλης χαρακτηρίζεται από τρεις παραμέτρους: την ουδέτερη ζώνη στην οποία η σπονδυλική στήλη δεν παρουσιάζει αντίσταση, την ελαστική ζώνη στην οποία η στήλη παρουσιάζει αντίσταση και το εύρος της κίνησης, με το σύνολο των δύο τελευταίων ζωνών.

Η κινητικότητα της σπονδυλικής στήλης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Εξαρτάται πρωτίστως από την κατάσταση των μεσοσπονδύλιων δίσκων: την γεωμετρία, την ακαμψία, την περιεκτικότητα σε υγρό, τον εκφυλισμό και την γήρανση του. Η περιοχή της οσφυϊκής μοίρας παρουσιάζει μεγαλύτερη κινητικότητα από την περιοχή της θωρακικής μοίρας. Το εύρος της κίνησης επηρεάζεται επίσης από την κατάσταση των συνδέσμων, των αρθρικών αρθρώσεων και τα οπίσθια οστεώδη στοιχεία. Οι Ιξωδοελαστικές ιδιότητες των δίσκων και των συνδέσμων παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην κινητικότητα.

### **3.1.6 ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ**

Η 3D FSU έχει συνιστώσες, έξι δυνάμεις και έξι κινήσεις που βασίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις μηχανικές ιδιότητες του κάθε δομικού συστατικού του τμήματος της κίνησης, την ικανότητα ακαμψίας ή ευκινησίας. Όλες οι παραπάνω συνιστώσες εξαρτώνται από την γήρανση και την κατάσταση του εκφυλισμού των τμημάτων.

Τα οσφυϊκά σπονδυλικά σώματα παρουσιάζουν αντίσταση κατά των θλιπτικών δυνάμεων που ενεργούν κατά μήκος του μεγάλου άξονα της σπονδυλικής στήλης. Τα περισσότερα από αυτά τα φορτία βρίσκουν μεγαλύτερη αντίσταση από το πυκνό δίκτυο των δοκίδων και λιγότερο από το φλοιώδες κέλυφος. Η κατάσταση της σπογγώδους οστού είναι ο κύριος παράγοντας αντοχής των σπονδύλων σε θλιπτικές δυνάμεις [37]. Επιπλέον, το σπογγώδες οστό των σπονδύλων ενεργεί ως αμορτισέρ της σπονδυλικής στήλης σε ξαφνικές ζημιογόνες περιπτώσεις. Η ικανότητα αυτή του σπονδύλου εξαρτάται από τη γεωμετρία, την μάζα, την οστική πυκνότητα (BMD) και την δομή του οστού του σπονδύλου, τα οποία όλα βρίσκονται σε συσχέτιση με τη γήρανση και εκφυλισμό. Οι [41] έδειξαν ότι η ηλικία είναι ο βασικός και πιο καθοριστικός παράγοντας της αντοχής των οστών, της μάζας, και της δομής της σπονδυλικής στήλης.

Τα οπίσθια στοιχεία της σπονδυλικής στήλης παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη ικανότητα που έχει να αντιμετωπίσει τα φορτία και να επιτρέψει την κινητικότητα των τμημάτων της. Η σημασία των αρθρώσεων είναι να δρουν ως μέσα που μπορούν να περιορίσουν τις κινήσεις της σπονδυλικής στήλης. Επιτρέπει την σταθεροποίηση της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης κατά την συμπίεση. Επιπλέον την αποτρέπει από την υπερβολική κάμψη και προκαλεί την μεταφορά της δύναμης μεταξύ των γειτονικών σπονδύλων, προστατεύοντας τον δίσκο και το νωτιαίο μυελό από διάφορες παθήσεις.

Οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι επιτυγχάνουν την μεταφορά των φορτίων μεταξύ των δύο γειτονικών σπονδύλων, και ταυτόχρονα επιτρέπουν την κινητικότητα και την ευελιξία τους. Οι ίνες κολλαγόνου στον ινώδη δακτύλιο απορροφούν τις τάσεις που παράγονται από την κατάσταση υδροστατικής πίεσης του πηκτοειδούς πυρήνα όταν βρίσκεται σε αξονική φόρτιση ο δίσκος. Για αυτό παίζουν σημαντικό ρόλο στον περιορισμό της αξονικής περιστροφής της σπονδυλικής στήλης. Η ακαμψία που παρουσιάζεται στον δίσκο είναι υψηλότερη στις εξωτερικές και οπίσθιες περιοχές της σε σχέση με τις εσωτερικές και πρόσθιες περιοχές. Η ανοχή ακαμψίας είναι υψηλότερη στο πρόσθιο και οπίσθιο μέρος σε σχέση με τις πλευρικές και εσωτερικές περιοχές. Έτσι, η εσωτερική στεφάνη κοντά στον πυρήνα φαίνεται να είναι η πιο ευάλωτη περιοχή του δακτυλίου, με το εξωτερικό και οπίσθιο τμήμα του, το πιο ισχυρό. Σε συνθήκες παρατεταμένης φόρτισης η σπονδυλική στήλη παρουσιάζει ιξωδοελαστικά χαρακτηριστικά. Σε κατάσταση στατικής συμπίεσης η ολίσθηση του δίσκου είναι 5-7 φορές εντονότερη από το ερπυσμό στις οστικές δομές του τμήματος. Η κίνηση του δίσκου εξαρτάται από τη περιεκτικότητα του σε υγρό, η οποία μειώνεται κατά την διάρκεια των καθημερινών

δραστηριοτήτων και ανακτάται την βραδινή περίοδο κατά την διάρκεια της ξεκούρασης του σώματος.

Οι σύνδεσμοι είναι παθητικοί ιστοί που δρουν κατά της έντασης. Η κύρια δράση του νωτιαίου συνδέσμου που βρίσκεται πίσω από το κέντρο του οβελιαίου επιπέδου περιστροφής είναι η προστασία της σπονδυλικής στήλης, αποτρέποντας την οσφυϊκή περιοχή από την υπερβολική κάμψη. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια αυτής της προστασίας των συνδέσμων μπορεί να αυξηθεί η συμπίεση του δίσκου κατά 100% ή κατά πολύ περισσότερο. Πράγματι, η αποτελεσματικότητα ενός συνδέσμου εξαρτάται κυρίως από το βραχίονα ροπής μέσω του οποίου ενεργεί. Ο πιο ελαστικός σύνδεσμος, ο flavum είναι υπό προένταση σε όλα τα επίπεδα της κάμψης με σκοπό να αποτρέπει οποιοσδήποτε μορφές κάμψης της σπονδυλικής στήλης. Οι supraspinous σύνδεσμοι μπορούν να την προστατεύσουν από την υπερβολική κάμψη.

Οι μύες είναι ενεργοί ιστοί που διέπονται από έναν νευρομυϊκό ελέγχου που απαιτείται για την παροχή δυναμικής σταθερότητας της σπονδυλικής στήλης στη δεδομένη δραστηριότητα και στάση του σώματος, και παρέχουν κινητικότητα κατά τη διάρκεια της φυσιολογικής δραστηριότητας, αλλά και προστασία της σπονδυλικής στήλης κατά τη διάρκεια τραυματισμού στην μετά-τραυματισμό φάση. Δύο μηχανικά χαρακτηριστικά είναι απαραίτητα για την παροχή αυτών των φυσιολογικών λειτουργιών:

- οι μύες πρέπει να δημιουργήσουν ισομετρικές δυνάμεις και
- η αλλαγή του μήκους (συστολή και επιμήκυνση), που χρειάζονται για την αύξηση δυσκαμψία του σπονδυλικού συστήματος.

Η μηχανική συμπεριφορά του συνόλου των λειτουργικών μονάδων της σπονδυλικής στήλης (FSU) εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των συστατικών τους, κυρίως σχετικά με την συμπεριφορά του μεσοσπονδύλιου δίσκου, των συνδέσμων και των αρθρικών αρθρώσεων. Η μέση ανοχή σε φορτίο των τμημάτων της οσφυϊκής υπό στατική φόρτιση είναι περίπου 5000 N για τη συμπίεση, 2800 N για την ένταση, 150 N για διάτμηση και 20 Nm για αξονική περιστροφή [10]. Η ευελιξία της FSU είναι η ικανότητα της δομής να παραμορφώνεται υπό το εφαρμοζόμενο φορτίο. Αντιστρόφως, η ακαμψία είναι η ικανότητα να αντιστέκεται στην δύναμη αποτρέποντας την παραμόρφωση της.

Η ακαμψία των τμημάτων της σπονδυλικής στήλης αυξάνει από την αυχενική στην οσφυϊκή περιοχή σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης. Στην οσφυϊκή περιοχή η ακαμψία είναι περίπου 2000-2500 N/ mm για συμπίεση, 800-1000N/ mm για ένταση, 200-400 N/ mm για πλευρική και 120-200 N/ mm για πρόσθια/ οπίσθια διάτμηση. Η στροφική δυσκαμψία είναι περίπου 1,4-2,2 Nm/ βαθμό για κάμψη, 2,0- 2,8 Nm/ βαθμό για την επέκταση, 1,8-2,0 Nm / βαθμό για πλευρική κάμψη και 5 Nm/ βαθμό για αξονική στρέψη [83], [10]. Η ακαμψία της οσφυϊκής περιοχής της σπονδυλικής στήλης εξαρτάται από την ηλικία και τον εκφυλισμό. Σε

προχωρημένη εκφύλιση η ακαμψία είναι υψηλότερη. Η ακαμψία επηρεάζεται από τις ιδιότητες ισώδους των τμημάτων και τα φορτία.

Περιορισμοί κίνησης								
Λειτουργικότητα σπονδυλικών τμημάτων (FSU)	συμπίεση	πίεση	πλάγιος	πρόσθια/ οπίσθια διάτμηση	κάμψη	προέκταση	πλευρική κάμψη	αξονική στρέψη
Δυσκαμψία κατά την περιστροφή	-	-	-	-	1.4-2.2 Nm/degree	2.8 Nm/degree	1.8-2.0 Nm/degree	5 Nm/degree
Ακαμψία οσφυϊκής περιοχής	2000-2500 N/mm	800-1000 N/mm	200-400 N/mm	120-200 N/mm	-	-	-	-

Τα φορτία κίνησης που ασκούνται στα τμήματα της οσφυϊκής μοίρας εξαρτώνται από τους στόχους της ανάλυσης. Το τμήμα της στηρίζεται σταθερά κατά μήκος της κάτω τελικής πλάκας του κάτω σπονδύλου, γι' αυτό, τα φορτία εφαρμόζονται γενικά για την άνω τελική πλάκα του άνω σπονδύλου. Τα φορτία μπορούν να εφαρμοστούν σαν στατική ή δυναμική ή επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Σταθερά στατικά φορτία ή με σταδιακή αλλαγή των φορτίων εφαρμόζονται σε αναλύσεις της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης. Τα βασικά είδη φόρτωσης είναι η δύναμη ή μετατόπιση της δύναμης, σε ένα φορτίο ή μια μετατόπιση.

Πίνακας 1 Περιορισμοί κινήσεων της εργασίας.

### 3.2 ΕΚΦΥΛΙΣΗ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Το τμήμα της οσφυϊκής είναι το πιο ευάλωτο τμήμα της σπονδυλικής στήλης δεδομένου ότι τόσο τα θλιπτικά φορτία και η κινητικότητα είναι μέγιστες στην περιοχή αυτή. Κατά συνέπεια, οι δίσκοι της οσφυϊκής απειλούνται με την αλλοίωση τους που επηρεάζουν τον τρόπο που κατανέμεται στα τμήματα. Εκφυλισμός είναι μια ζημιογόνος μεταβολή στη λειτουργία και τη δομή του δίσκου, που προκαλείται από γήρανση ή αλλαγές στο περιβάλλον τους, όπως η μηχανική υπερφόρτωση [3].

Εκφύλιση της FSU ξεκινά γενικά στους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Η πρώτη σχετίζεται με τις αλλαγές του δίσκου λόγω γήρανσης που συμβαίνουν εντός του πυρήνα. Αλλαγές σε οποιοδήποτε τμήμα του ιστού του δίσκου μεταβάλλουν σημαντικά τους μηχανισμούς της μεταφοράς φορτίου και τη σταθερότητα ολόκληρου του τμήματος [27]. Οι μηχανικές ιδιότητες του τμήματος εξαρτώνται επίσης από την κατάσταση των οστικών δομών, πρώτα από όλα σχετικά με τη δομή των δοκίδων στο εσωτερικό του σπονδύλου, το σπογγώδες οστό. Οι οστεοπορωτικές αλλαγές μπορούν επίσης να μειώσουν την φέρουσα ικανότητα της FSU.

Μακροπρόθεσμα η γήρανση του δίσκου εκδηλώνεται με την απώλεια της ενυδάτωσης του και την έλλειψη ελαστικότητας προκαλώντας ακαμψία στην σύσταση του πυρήνα [38], [4], [21]. Οι λειτουργικές συνέπειες της γήρανσης κατά κύριο λόγο είναι ότι ο ινώδης στον πυρήνα γίνεται ξηρός και σκληρός. Ο όγκος του πυρήνα και η περιοχή που ασκείται η υδροστατική πίεση μειώνεται, κατά συνέπεια, τα θλιπτικά φορτία του δίσκου περνούν στο δακτύλιο. Οι αλλαγές που σχετίζονται με την γήρανση του δίσκου μπορεί να συνοδεύονται με



την εμφάνιση καταγμάτων, βλαβών, διακοπή των ινών στον δακτύλιο ή διαταραχές των τελικών πλακών, κατάρρευση των οστεοπορωτικών σπονδυλικών σπογγώδους οστού.

Ο δακτύλιος γίνεται πιο ευάλωτος κατά την διαδικασία γήρανσης, έτσι η υπερφόρτωση του μπορεί να οδηγήσει σε κάταγμα προς τα μέσα της εσωτερικής περιοχής της στεφάνης, περιφερειακά και ακτινικά κατάγματα, σπάσιμο ινών στην στεφάνη, πρόπτωση δίσκου ή κήλη. Σε μεγάλη ακτινική διόγκωση του εξωτερικού δακτυλίου, τη μείωση του ύψους του δίσκου, ή τέλος την καταστροφή των τελικών πλακών [43]. Η κύρια αιτία όλων αυτών των προβλημάτων είναι ότι ενώ ο υγιής δίσκος έχει έναν υδροστατικό πυρήνα, κατά τη διάρκεια της γήρανσης, αφυδατώνεται με αποτέλεσμα να είναι πλέον ένα πεπεσμένο ρευστό. Αρκετές πρόσφατες μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο ελαφρύς εκφυλισμός των νέων δίσκων οδήγησε στην αστάθεια της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης, ενώ η σταθερότητα μπορεί αποκατασταθεί με περαιτέρω γήρανση [4].

Ένας αιφνίδιος και συχνά απροσδόκητος τραυματισμός οδηγεί τον σπόνδυλο σε βλάβη ή εκφυλισμό λόγο της υπερφόρτωσης και της απώλεια της υδροστατικής συμπίεσης στον πυρήνα, συνοδευόμενη και με άλλες αστοχίες που αναφέρονται παραπάνω. Γι' αυτό το λόγο, ένας ξαφνικός τραυματισμός μπορεί να είναι επίσης επικίνδυνος σε νεαρότερη ηλικία.

Η πειραματική ανάλυση της σπονδυλικής εκφύλισης είναι πολύ δύσκολο να μελετηθεί, και μερικές φορές αδύνατη. Ωστόσο, μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης μπορεί να αναλυθεί η επίδραση των κύριων μηχανικών παραγόντων του εκφυλισμούς.

### 3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ

Η μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων κάθε κατασκευής βασίζεται σε πέντε βασικά βήματα: την γεωμετρία, το υλικό, τον τύπο του στοιχείου και τη μοντελοποίηση του φορτίου, και, τέλος, την επαλήθευση του μοντέλου.

Συγγραφείς	Χώρα	Χρονολογία	Μοντέλα	Παρατηρήσεις
<i>Andersson, et al G.B., (43)</i>	Chicago, USA	2004	Several types of finite element model were developed in understanding relationship between disc degeneration and associated changes in biomechanical properties	The study showed that disc height loss was larger after considerable number of cyclic loadings both in normal and degenerated discs. Cyclic loading also showed that Grade I discs were much more flexible than Grade IV discs. The disc stiffness also decreased as the load cycle increased.
<i>Noailly et al (44)</i>	Barcelona, Spain	2007	L3–L5 lumbar spine bi-segmental finite-element model	It was found that the geometrical parameters affected the stress distribution and strain energy in the zygapophysial joints, the ligaments, and the intervertebral disc, changing qualitatively and quantitatively their relative role in resisting the imposed loads.
<i>Rohlmann et al (48)</i>	Berlin	2006	nonlinear finite element model of the	A mildly degenerated disc increases intersegmental rotation for all loading

			L3/L4 functional unit	cases. With further increasing disc degeneration intersegmental rotation is decreased. For axial rotation the decrease takes place in the final stage. Intradiscal pressure is lower while facet joint force and maximum von Mises stress in the annulus are higher in a degenerated compared to a healthy disc.
<i>Kurutz et al (30)</i>	Budapest	2010	3D finite element models of human lumbar functional spinal units (FSU) were used for numerical analysis of weightbath hydrotraction therapy (WHT) applied for treating degenerative diseases of the lumbar spine	Five grades of age-related degeneration were modeled by material properties. Tensile material parameters of discs were obtained by parameter identification based on in vivo measured elongations of lumbar segments during regular WHT, compressive material constants were obtained from the literature. WHT consists of indirect and direct traction phases. Discs show a bilinear material behaviour with higher resistance in indirect and smaller in direct traction phase. Consequently, although the direct traction load is only 6% of the indirect one, direct traction deformations are 15-90% of the indirect ones, depending on the grade of degeneration.
<i>Dolan et al (25)</i>	Bristol, UK	2001	Incorporating this information into mathematical models will make them better able to identify which activities are most likely to injure the lumbar spine in life.	Lordotic postures increase loading of the posterior annulus and apophyseal joints, whereas moderately flexed postures tend to equalise compressive stress across the disc, and unload the apophyseal joints. Sustained compression reduces the volume and pressure of the nucleus pulposus, while increasing compressive stresses in the annulus and neural arch. Sustained compression also reduces disc height, giving some slack to collagen fibres in the intervertebral disc and ligaments, and causing them to resist bending less. Disc degeneration has a similar effect on disc height, and stress distributions
<i>Denoziere, G et al (24)</i>	Budapest, Hungary	2004	3D FE models of a typical FSU of lumbar part L3-S1 were developed extended to several nonlinear and nonsmooth unilateral features of intervertebral discs, ligaments, articular facet joints and attachments. The FE model was validated both for compression and tension, by comparing the numerical calculations with experimental results	The aim of this study was doubled: to model and simulate numerically the age-related and accidental degenerations of lumbar functional spinal units (FSU) and to simulate the mechanical answer of the more or less degenerated lumbar segments for the hydro-traction treatment, by using FE method
<i>Cheung et al (22)</i>	China	2003	A three-dimensional finite element model was established using	The finite element model showed that the loads carried by the annulus and the facets increased with time under

			the actual geometry of the L4-L5 lumbar motion segment. Nonlinear poroelastic properties were assigned to the intervertebral disc and cancellous bone	static loading. The fluid flow and deformation of the intervertebral disc were dependent on the loading frequency.
<i>Andersson et al (8)</i>	-	1983	Pressures in the third lumbar discs were measured in vivo during active and passive traction.	During active traction an increase in pressure was always recorded, with larger increases corresponding to larger traction forces. During passive traction the pressure remained close to the resting pressure; sometimes slight increases were recorded, sometimes slight decreases. It is concluded that when traction is applied so that the back muscles contract, then disc pressures will increase
<i>Shirazi-Adl (17)</i>		2006	a novel wrapping cable element is used in a nonlinear finite element model of the lumbosacral spine (L1-S1) to investigate the role of moderate to large compression loads on the lumbar stiffness in flexion and axial moments/rotations. The compression loads up to 2.700 N was applied with no instability or artefact loads	The presence of compression preloads significantly stiffened the load-displacement response under flexion and axial moments/rotations. This stiffening effect was much more pronounced under larger preloads and smaller moments/rotations. Compression preloads also increased intradiscal pressure, facet contact forces, and maximum disc fibre strain at different levels. Forces in posterior ligaments were, however, diminished with compression preload
<i>Chen C.-S et al (18)</i>	Taiwan	2001	After anterior interbody fusion in the lumbar spine, the accelerated degeneration of the disc adjacent to the fusion levels was clinically observed. To understand the stress distribution of the adjacent disc, this study created a finite element model of the lumbar spine from L1–L5 vertebral body. The fusion model modified from the intact model was used to simulate the anterior interbody fusion	Various loading conditions, which included flexion, extension, lateral bending, and torsion, were applied to the finite element model to study the corresponding stress distribution. From the finite element model calculation, at a lower fusion site or more fusion levels, the stress of the disc adjacent to interbody fusion increased more than upper fusion site or single fusion level under flexion, torsion and lateral bending. Larger stress increase was estimated at the upper disc adjacent to interbody fusion than the lower disc adjacent to interbody fusion. In stress distribution, the upper disc adjacent to interbody fusion had a little alteration under torsion.

Πίνακας 2 Συγκεντρωτικός πίνακας ερευνών από βιβλιογραφία.

### 3.3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ

Η γεωμετρική μοντελοποίηση της FUS πρέπει να εξετάζεται με βάση την ανατομία του τμήματος. Εκτός από τα τυπολογία χρησιμοποιούνται και πρόσθετα στοιχεία, όπως είναι η πυκνότητα του όγκου, την υφή της επιφάνειας κ.λπ. Επιπλέον, διαφορετικοί μέθοδοι ανάλυσης ιατρικών ενεργειών μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως σαρωτές, αξονική τομογραφία ή μέθοδοι απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού.

Στη γεωμετρική μοντελοποίηση του σπονδυλικού σώματος γίνεται η εξέταση των διαφόρων τμημάτων που το αποτελούν, όπως, του φλοιού του κελύφους, τον πυρήνα, τα οπίσθια οστεώδη του στοιχεία και τις τελικές πλάκες. Οι τιμές που έχουν επιλεχτεί για το πλάτος του κυλινδρικού σπονδυλικού σώματος, είναι 40-45 mm, για το βάθος 30-35 mm και για το ύψος 25-29 mm. Για το πάχος του φλοιώδες τοιχώματος της σπονδυλικής επιλέχθηκαν τιμές περίπου 1-1,5 mm, και για το πάχος των χόνδρινων τελικών πλακών 0,5-1 mm, και για το πάχος των στρωμάτων του χόνδρου στην πλευρά των αρθρώσεων 0,2 mm, και τέλος για την περιοχή χρησιμοποιήθηκε εμβαδόν περίπου ίσο με 1,6 cm<sup>2</sup>.

Στη γεωμετρική μοντελοποίηση ο μεσοσπονδύλιος δίσκος, το ύψος του είναι περίπου 8-12 mm, ανάλογα με το φύλο και το ύψος του σώματος που εξετάζεται. Στο μοντέλο του δίσκου τα τμήματα είναι τα εξής: ο πυρήνας, η βασική ουσία που είναι δομημένος ο δακτύλιος, οι ίνες της στεφάνης και οι τελικές πλάκες. Για την ογκομετρική σχέση μεταξύ δακτυλίου και του πυρήνα, η αναλογία που θα χρησιμοποιηθεί είναι 3:7 γενικά για την οσφυϊκή μέρος L1-S1, και η περιοχή του πυρήνα αναλογικά αντιστοιχεί στο 30-50% της συνολικής έκτασης του δίσκου σε εγκάρσια τομή. Το μήκος της οβελιαίας διαμέτρου του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι περίπου 36 mm, ενώ το πλευρικό μήκος είναι περίπου 44 mm. Για την διάταξη των ινών δακτυλίου στο μέση επιφάνεια της διατομής του δίσκου είναι περίπου 30 °.

Όσον αφορά την επιφάνεια διατομής των συνδέσμων, για τον πρόσθιο διαμήκη σύνδεσμο είναι 30-70 mm<sup>2</sup>, για το οπίσθιο επιμήκη συνδέσμων χρησιμοποιούνται οι τιμές 10-20 mm<sup>2</sup>, για τον σύνδεσμο flavum 40-100 mm<sup>2</sup>, για τον capsular σύνδεσμο περίπου 30-60 mm<sup>2</sup>, για μεσεγκάρσιους συνδέσμους 2-10 mm<sup>2</sup>, για τους ενδο-σπονδυλικούς συνδέσμους 30-40 mm<sup>2</sup>, για τους supraspinous συνδέσμους 25-40 mm<sup>2</sup>.

Στην μοντελοποίηση των εκφυλισμένων τμημάτων της στήλης, το ύψος των δύο σπονδύλων και αλλά και του δίσκου είναι μειωμένο. Αλλά και η μείωση του όγκου του πυρήνα κατά τη διάρκεια της γήρανσης λαμβάνεται υπόψη.

### **3.3.2 ΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ**

Παρά το γεγονός ότι το FSU είναι μια εξαιρετικά ετερογενής ένωση δομής, τα υλικά μοντελοποίησης πρέπει να σχετίζονται με τις συνιστώσες του. Τα πρώτα υλικά των μοντέλων που εξετάστηκαν έχουν παρθεί από υγιή σπονδυλική στήλη.

Αναλυτικά στοιχεία των υλικών μοντελοποίησης με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία μπορούν να μελετηθούν σε [30].

### 3.3.3 ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΠΟ ΥΓΙΗ ΤΜΗΜΑΤΑ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ

Τα υλικά των μοντέλων και οι σταθερές από τις συνιστώσες της FSU γενικά προκύπτουν με πειραματικές μηχανικές δοκιμές ορισμένων δειγμάτων που λαμβάνονται από το συγκεκριμένο στοιχείο.

Η υψηλή αντοχή του φλοιώδους κελύφους της σπονδυλικής θεωρείται γενικά γραμμικά ελαστικό ισότροπο ή εγκάρσια ισότροπο, ορθοτροπικό υλικό. Σε γραμμική ελαστική ισότροπη περίπτωση το μέτρο Young θεωρείται περίπου 5000 έως 12.000 MPa με την αναλογία Poisson περίπου  $\nu = 0,2-0,3$ . Σε γραμμική ελαστική, εγκάρσια ισότροπη περίπτωση τα στοιχεία αυτά είναι  $E = 12.000$  με  $22.000$  MPa και  $G = 3000-5000$  MPa με  $\nu = 0,2-0,4$  στην συμπιεστική κατεύθυνση, και  $E = 8000-12000$  MPa και  $G = 3000-5000$  MPa με  $\nu = 0,4-0,5$  κάθετα.

Φλοιώδες οστό	E [MPa]	$\nu$	G [MPa]	Αναφορές
linear elastic, isotropic	12 000	0,3	-	Shirazi-Adl et al. 1984, Cassidy et al. 1989, Lavaste et al. 1992, Goel et al. 1995a, 2002, Lu et al. 1996b, Smit et al. 1997, Wang et al. 2000, Chen et al. 2001, 2008, Baroud et al. 2003, Zhong et al. 2006, Denoziere and Ku, 2006, Williams et al. 2007, Ruberté et al. 2009, Zhang et al. 2009, Kurutz and Oroszváry 2010
linear elastic transversely isotropic	22 000	0,2	5400	Lu et al. 1996a, Schmidt et al. 2009

Πίνακας 3 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση του φλοιώδους οστού.

Το σπονδυλικό σπογγώδες οστό διαμορφώνεται και ως γραμμικό ελαστικό ισότροπο ή εγκάρσιο ισότροπο ή ορθοτροπικό υλικό. Σε περίπτωση γραμμική ελαστική ισότροπη το μέτρο Young θεωρείται περίπου 10-500 MPa με την αναλογία Poisson περίπου  $\nu = 0,2-0,3$ . Στην γραμμική ελαστική, εγκάρσια ισότροπη περίπτωση τα στοιχεία αυτά είναι  $E = 200-250$  MPa και  $G = 50-80$  MPa με  $\nu = 0,3$  έως  $0,35$  στην συμπιεστική κατεύθυνση, και  $E = 100-150$  MPa και  $G = 50-80$  MPa με  $\nu = 0,3-0,45$  κάθετα.

Σπογγώδες οστό	E [MPa]	$\nu$	G [MPa]	Αναφορές
linear elastic, isotropic	10	0,2		Shirazi-Adl et al. 1984, Cassidy et al. 1989, Lu et al. 1996b, Smit et al. 1997, Goel et al. 1995a, 2002, Wang et al. 2000, Chen et al. 2001, 2008, Denoziere and Ku 2006, Zhong et al. 2006, Ruberté et al. 2009
linear elastic transversely isotropic	50	0,3		Rohlmann et al. 2006a
	80	0,35		Baroud et al., 2003,

Πίνακας 4 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση του σπογγώδους οστού.

Η υψηλή αντοχή των οστεώδων των τελικών πλακών των σπονδύλων και η χαμηλή περιεκτικότητα χόνδρινου τελικών πλακών του δίσκου δύσκολα μπορεί να διακριθεί με τον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών. Τόσο οι οστεώδης όσο και οι χόνδρινες τελικές πλάκες

θεωρούνται γραμμικό ελαστικό ιστροπικό υλικό, με  $E = 100$  έως  $12.000$  MPa και  $\nu = 0,3-0,4$ , και  $E = 20-25$  MPa με  $\nu = 0,4$ , αντίστοιχα.

Τελικές πλάκες	E [MPa]	$\nu$	Αναφορές
οστεώδη linear elastic, isotropic	100	0,4	Kurutz and Oroszváry 2010
	12 000	0,3	Denoziere and Ku 2006
χόνδρινες cartiliginous, linear elastic, isotropic	20	0,4	Williams et al. 2007

Πίνακας 5 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση των τελικών πλακών.

Το στοιχείο του οπίσθιου οστού θεωρείται γραμμικό ελαστικό ισότροπο υλικό, γενικά με τον ίδιο συντελεστή Young  $E = 2500-3000$  MPa και συντελεστή Poisson  $\nu = 0,2-0,25$ .

Ο δίσκος του πηκτοειδή πυρήνα είναι το πιο σημαντικό στοιχείο για την συμπιεστική ακαμψία του δίσκου: η υδροστατική συμπίεση σε αυτό εγγυάται την σταθερότητα του των τμημάτων και κατά συνέπεια συνόλου του.

Ο υγιής πυρήνας γενικά διαμορφώνεται ως ένα ασυμπίεστο ρευστό. Στην περίπτωση του ρευστού, όπως γραμμικό ελαστικό ισότροπο στερεό υλικό οι συντελεστές είναι  $E = 1-4$  MPa με  $\nu = 0,49 - 0,499$ . Αρκετοί συγγραφείς εξετάζουν το μοντέλο του πυρήνα ως ασυμπίεστο ρευστό, σχεδόν ασυμπίεστο ρευστό, hyperelastic neo-Hookean, ή υλικό τύπου Mooney-Rivlin, Επιπλέον, poroelastic ή viscoelastic ή osmoniscoelastic στερεά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των δεδομένων [30].

Nucleus pulposus			
Material model	E [MPa]	$\nu$	References
Fluid-like solid, linear elastic, isotropic	1	0.499	Shirazi-Adl et al. 1984, 1986, Goel et al. 1995a, Chen et al. 2001, Zhong et al. 2006, Denoziere and Ku 2006, Zhang et al. 2009, Ruberté et al. 2009, Kurutz and Oroszváry 2010,
	4	0.499	Shirazi-Adl et al. 1984, Lavaste et al. 1992, Goel et al. 1995b, Fagan et al, 2002.
	10	0.4	Chen et al., 2008,
Incompressible fluid			Lu et al. 1996, Little et al. 2008, Zander et al. 2006, Rohlmann et al. 2006a, 2006b, 2006c
Quasi incompressible			Rohlmann et al. 2007
Hyperelastic, neo-Hookean			Moramarco et al. 2010,
Mooney-Rivlin incompressible			Smit et al. 1997, Noailly et al. 2007, Baroud et al. 2003, Schmidt et al. 2007, 2009,
Poroelastic	varied	0.17	Malandrino et al. 2009,
	1	0.45	Williams et al. 2007,
	1.5	0.1	Argoubi and Shirazi-Adl 1996,
	1,5	0.17	Ferguson et al. 2004,

Πίνακας 6 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στον πυρήνα.

Το υλικό του ινώδους δακτυλίου είναι ένα τυπικό σύνθετο υλικό που μοιάζει με μια επιφάνεια πολλών στρώματα και ενισχυμένων ινών. Το μέτρο ελαστικότητας του της βασικής ουσίας που τον αποτελούν είναι  $E = 2-10 \text{ MPa}$  με  $\nu = 0,4-0,45$ , και των ινών είναι  $E = 300-500 \text{ MPa}$  σε σχέση με την ακτινική τους θέση, με  $\nu = 0,3$ .

Ινώδης δακτύλιος	Ground	Substance	Fibers		
Linear elastic, isotropic matrix, tension only elastic fibers	E [MPa]	$\nu$	E [MPa]	$\nu$	Αναφορές
	2	0,45	500		Lavaste et al. 1992,
	10	0,4	360/385/420/ 440/495/550	0,3	Chen et al. 2008,

Πίνακας 7 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στον ινώδη δακτύλιο.

Η αριθμητική μοντελοποίηση των συνδέσμων, με σκοπό την σκλήρυνση των μαλακών ιστών δεν είναι απλό έργο. Γενικά, οι επτά σύνδεσμοι ενσωματώνονται στα μοντέλα FE ως φόρτιση μόνο των στοιχείων. Σε αντίθεση με την ισχυρή μη γραμμική συμπεριφορά του [83], οι περισσότερες μελέτες των αναφερόμενων FEM έχουν υιοθετήσει γραμμικά ή διγραμμικά ελαστικά μοντέλα.

### 3.3.4 ΥΛΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΩΝ ΕΚΦΥΛΙΣΜΕΝΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ

Η εκφύλιση λόγω γήρανσης ξεκινά συνήθως στον πυρήνα. Το υγρό ενός υγιή πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση υδροστατικής πίεσης. Κατά τη διάρκεια της γήρανσης, ο πυρήνας χάνει την ικανότητα του και γίνεται ακόμα πιο σκληρός, καθώς αλλάζει από υγρό σε στερεό υλικό. Αυτό το είδος εκφυλισμού του πυρήνα μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη μείωση της αναλογίας του Poisson και την αύξηση του μέτρου Young. Αυτή η συμπεριφορά συνοδεύεται από τη διαδικασία σκλήρυνσης του δίσκου ως σύνολο και από τη μείωση του όγκου του πυρήνα και την επέκταση του όγκου του δακτυλίου, με επιπλέον, την μείωση του ύψους του δίσκου.

Επιπλέον, την ίδια στιγμή, είναι πιθανό να προκύψουν διάφορες φθορές όπως, η σχισμή της στεφάνης ή το εσωτερικό κάταγμα του δακτύλιου, η φθορά της δακτυλιοειδούς ινών, ζημιές και η ρήξη των τελικών πλακών, οστεοπορωτικά ελαττώματα στο σπογγώδες οστό. Κατά συνέπεια, η μοντελοποίηση της FSU με βάση την εκφύλιση λόγω γήρανση πρέπει να εξελίσσεται με βάση την πορεία της ζωής.

Σε αντίθεση με τον εκφυλισμό λόγω γήρανσης, ένας ξαφνικός και συχνά απροσδόκητος ζημιογόνος εκφυλισμός, μπορεί να προκαλέσει στον πυρήνα ακαμψία. Στην περίπτωση αυτή, στον πυρήνα μπορεί να προκληθεί μερική ρήξη και η υδροστατική πίεση να σταματάει σε αυτόν. Αυτό το είδος του εκφυλισμού του πυρήνα μπορεί να μοντελοποιηθεί με ξαφνικά φθίνουσα πορεία του δείκτη Poisson με αμετάβλητο το μέτρο Young του πυρήνα [32].

Αυτή η συμπεριφορά προκαλείται ή συνοδεύεται από την ρήξη ή σπάσιμο του εσωτερικού του δακτυλίου, την καταστρέφει των δακτυλιοειδών ινών, τα κάταγμα των τελικών πλακών, ή την κατάρρευση του σπογγώδες οστού, ανάλογα με την ηλικία κατά την οποία συμβαίνει η υπερφόρτιση. Δηλαδή, ξαφνικές αστοχίες μπορούν να συμβούν σε ένα νεαρό δίσκο, καθώς, ή σε οποιαδήποτε ηλικία και φάση εκφυλισμού λόγω γήρανσης. Αυτές οι επιπτώσεις μπορεί να μοντελοποιηθούν με ξαφνική βλάβη των ιστών των συστατικών του τμήματος. Σε αντίθεση με τον μακροπρόθεσμο εκφυλισμό λόγω γήρανσης, αυτά τα είδη της βλάβης εμφανίζεται ξαφνικά και συνήθως οφείλονται σε μηχανικά υπερφόρτωση [5].

Τα υλικά μοντελοποίησης των τμημάτων εκφυλισμού μπορούν να μελετηθούν σε [30].

### 3.3.5 ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ

Τα στοιχεία του πυρήνα και των οπίσθιων οστεώδη σπονδύλων μπορούν να μοντελοποιηθούν ως 3D στερεά συνεχή στοιχεία, όπως isoparametric στοιχεία hexahedral 8-node, ή ως 20- ή 27-noded πτεροειδή στοιχεία, άλλωστε, όπως 10-noded τετραδικά στοιχεία. Το φλοιώδες κέλυφος και οι τελικές πλάκες μπορεί να μοντελοποιηθεί ως στοιχεία λεπτού κελύφους, όπως στοιχεία κελύφους 4-κόμβο. Quasi-άκαμπτο στοιχεία δοκού να συνδέσετε το οπίσθιο σπόνδυλο με τις μεσαίες εγκάρσιες αποφύσεις (Αυχένες) και τις μεσαίες εγκάρσιες αποφύσεις στην μεσαία ακανθώδη απόφυση (έλασμα). Στοιχεία Beam μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αντιπροσωπεύουν τις εγκάρσιες και ακανθώδες αποφύσεις. Η πλευρά της οστικής επιφάνειας των αρθρώσεων μπορεί να αντιπροσωπευτεί από τα στοιχεία κελύφους όπου συνδέουν στοιχεία δοκού, αυτές οι πλευρές στο έλασμα, προσομοίωσης των ανώτερων και κατώτερων διαδικασίες αρθρικού. Η πλευρά άρθρωσης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως 3D-8 noded στοιχεία.

Η βασική ουσία του δακτυλίου του δίσκου διαμορφώνεται ως στοιχεία 3D συνεχές. Οι ίνες κολλαγόνου μπορούν να μοντελοποιηθούν ως στοιχεία δικτυώματος ή ως ενισχυμένο bar (οπλισμού), στοιχεία ενσωματωμένα σε 3D στερεά στοιχεία. Ο πηκτοειδής πυρήνας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως υδροστατικό ρευστό στοιχείο όγκου. Οι πρόσθιοι και οπίσθιοι διαμήκη σύνδεσμοι μπορούν να μοντελοποιηθούν ως λεπτά στοιχεία κελύφους, ή, οι σύνδεσμοι μπορούν να μοντελοποιηθούν ως 2-noded αξονικά στοιχεία.

Μέρη σπονδύλου	Στοιχεία υλικών μοντελοποίησης
φλοιώδες κέλυφος & τελικές πλάκες	3D solid continuum elements, as isoparametric 8-node hexahedral elements, or as 20- or 27-noded brick elements
πυρήνα & οπίσθιων οστεώδη σπονδύλων	thin shell elements, like 4-node shell elements
εγκάρσιες & ακανθώδης αποφύσεις	Beam elements
πλευρά άρθρωσης	3D 8-noded surface-to-surface contact elements
βασική ουσία δακτυλίου	3D continuum elements
ίνες κολλαγόνου	3D solid elements

Πίνακας 8 Τύποι στοιχείων μοντελοποίησης των τμημάτων του δίσκου.



### 3.3.6 ΦΟΡΤΙΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ

Τα φορτία κίνησης που ασκούνται στα τμήματα της οσφυϊκής μοίρας εξαρτώνται από τους στόχους της ανάλυσης. Το τμήμα εφαρμόζεται αυστηρά κατά μήκος της κάτω τελικής πλάκας του κάτω σπονδύλου, έτσι, τα φορτία να ασκούνται στην άνω τελική πλάκα του άνω σπονδύλου. Τα φορτία μπορούν να εφαρμοστούν σαν στατική ή δυναμική ή επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Σταθερά στατικά φορτία ή με σταδιακή αλλαγή των φορτίων εφαρμόζονται σε αναλύσεις της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης. Τα βασικά είδη φόρτωσης είναι η δύναμη ή μετατόπιση της δύναμης, σε ένα φορτίο ή μια μετατόπιση.

Διαφορετικές φορτίσεις, προ-συμπίεσης που εφαρμόζεται επίσης για την μοντελοποίηση του ανώτερου σωματικού βάρους όπως 700-1000N, προσομοιώνοντας την πίεση του μεσοσπονδύλιου σε όρθια θέση και πρόσθετες συμπιεστικές δυνάμεις οι οποίες εφαρμόζονται σε κατάλληλες περιοχές των τελικών πλακών για την προσομοίωση τραυματικών κινήσεων: 2000 N για την ανύψωση ενός φορτίου με ίσια πόδια πραγματοποιώντας το σώμα πλήρη κάμψη. Με 1000 N για πλήρη έκταση και με 1300 N για πλήρη πλευρική κάμψη. Για την κάμψη και την επέκταση και την αξονική στρέψη εφαρμόζονται 10- 15 Nm.

Τα συστήματα φόρτωσης της αριθμητικής προσομοίωσης εφαρμόστηκαν από διάφορους συγγραφείς και μπορούν να μελετηθούν σε [30].

Η θλιπτική αντοχή της οσφυϊκής μοίρας κυμαίνεται μεταξύ 2 kN και 14 kN, ανάλογα με το φύλο, την ηλικία και την μάζα του σώματος [4]. Για μια τυχαία και ζημιογόνο εκφύλιση το φορτίο συμπίεσης είναι περίπου 5 kN για τους νέους, και περίπου 3 kN για πιο ηλικιωμένους. Οι πλευρές των αρθρώσεις της οσφυϊκής μπορούν να αντισταθούν σε περίπου 2 kN πριν προκύψει κάταγμα. Κατά την στρέψη, η βλάβη ξεκινάει όταν η εφαρμοζόμενη ροπή αυξάνεται σε περίπου 10-30 Nm. Ένας συνδυασμός μιας πλήρους προς τα πίσω κάμψης και 1 kN θλιπτικού φορτίου μπορεί να προκαλέσει βλάβη στην επιφάνεια. Σε μια πλήρη κάμψη προς τα εμπρός, αν αυξηθεί η ροπή κάμψης σε 50-80 Nm, είναι πιθανό να προκληθεί σοβαρή βλάβη.

Author	Year	Axial Preload	Disc level	Pressure (Mpa)	limit	Results
Adams et al. (2)	(1996) Bristol, United Kingdom	-	L2-L5	0.12-0.24	In this study, 38 cadaveric lumbar motion segments (mean age, 51 years) were subjected to complex mechanical loading to simulate typical activities in vivo while the distribution of compressive stress in the disc matrix was measured using a pressure transducer mounted in a needle 1.3 mm in diameter. "Stress profiles" were repeated after a controlled compressive overload injury had reduced motion segment height by approximately 1%. Moderate repetitive loading, appropriate for the simulation of light manual	We investigated the distribution of compressive 'stress' within cadaver intervertebral discs, using a pressure transducer mounted in a 1.3 mm diameter needle. The needle was pulled along the midsagittal diameter of a lumbar disc with the face of the transducer either vertical or horizontal while the disc was subjected to a constant compressive force. The resulting 'stress profiles' were analysed in order to characterise the distribution of vertical and horizontal compressive stress within each disc. A total of 87 discs from subjects aged between 16 and 87 years was examined. Our results showed that age-related degenerative changes reduced the diameter of the central hydrostatic region of each disc (the 'functional nucleus') by approximately 50%, and the pressure within this region fell by 30%. The width of the functional annulus increased by 80% and the height of compressive 'stress peaks' within it by 160%. The effects of age and degeneration were greater at L4/L5 than at L2/L3, and the posterior annulus was affected more than the anterior. Age and degeneration were themselves

					labor, then was applied to the damaged specimens for approximately 4 hours, and stress profilometry was repeated a third time. Discs then were sectioned and photographed.	closely related, but the stage of degeneration had the greater effect on stress distributions. We suggest that structural changes within the annulus and endplate lead to a transfer of load from the nucleus to the posterior annulus. High 'stress' concentrations within the annulus may cause pain, and lead to further disruption.
Adams et al. (3)	(1992) Bristol, England	1200N	L2-L5	1.09	In this study, 38 cadaveric lumbar motion segments (mean age, 51 years) were subjected to complex mechanical loading to simulate typical activities in vivo while the distribution of compressive stress in the disc matrix was measured using a pressure transducer mounted in a needle 1.3 mm in diameter. "Stress profiles" were repeated after a controlled compressive overload injury had reduced motion segment height by approximately 1%. Moderate repetitive loading, appropriate for the simulation of light manual labor, then was applied to the damaged specimens for approximately 4 hours, and stress profilometry was repeated a third time	Discs then were sectioned and photographed. Endplate damage reduced pressure in the adjacent nucleus pulposus by 25% +/- 27% and generated peaks of compressive stress in the annulus, usually posteriorly to the nucleus. Discs 50 to 70 years of age were affected the most. Repetitive loading further decompressed the nucleus and intensified stress concentrations in the annulus, especially in simulated lordotic postures. Sagittal plane sections of 15 of the discs showed an inwardly collapsing anulus in 9 discs, extreme outward bulging of the anulus in 11 discs, and complete radial fissures in 2 discs, 1 of which allowed posterior migration of nucleus pulposus. Comparisons with the results from tissue culture experiments indicated that the observed changes in matrix compressive stress would inhibit disc cell metabolism throughout the disc, and could lead to progressive deterioration of the matrix.
Panjabi et al. (83)	(1988) New Haven, Connecticut	-	L1-S1	0.04-0.12	Intradiscal pressure and volume measurements were made in 84 fresh cadaveric lumbar spine disc spaces. The nucleus was injected with a roentgenographic contrast agent under fluoroscopic examination	. The intrinsic pressure, the pressure at which the agent entered the disc, and the maximum pressure that the disc could hold were measured
McNally et al. (38)	(1992) Bristol, England	500N	L2-L5	2.3	A technique was developed for measuring the distribution of stress within loaded cadaveric intervertebral discs. A strain-gauged membrane mounted on the side of a 1.3-mm diameter needle was pulled through the disc at constant speed. The orientation of the membrane was changed by rotating the needle, so that profiles of vertical and horizontal components of compressive stress could be obtained.	The measurements were reproducible and did not perturb the tissue to any significant extent. Stress profiles varied considerably between discs and were highly dependent on the severity of degenerative changes. They also showed that the mechanical behavior of individual disc tissues was dependent not only on their location, but also on the loading and loading history of the disc. The new insight into internal disc mechanics revealed by stress profilometry may lead to a greater understanding of the mechanisms of disc function and failure
		2000N	L2-L5	0.5		
Nachemson et al. (42)	1981	0N	L4-L5,	0.11	By measurement of intradiscal pressure in vitro, the hydrostatic properties of the nucleus pulposus of normal lumbar intervertebral disc were proven. The hydrodynamic properties seem to exist also in the somewhat degenerated disc, but not in the more severely deranged ones. Intravitaly-performed measurements of disc pressure over the last 20 years in more than 100 individuals have demonstrated how the load on the lumbar disc varies with the position of the subject's body and during the performance of various tasks, both in standing and in sitting..	Compared with the pressure of load in the upright standing position, reclining reduces the pressure by 50-80%, while unsupported sitting increases the load by 40%, forward leaning and weight lifting by more than 100%, and the position of forward flexion and rotation by 400%. Large augmentations in pressure were also observed in subject performing various commonly prescribed strengthening exercises.
		400N	L5-S1	0.34		
Ramos et al (47)	(1994) San Antonio, Texas	-	L4-L5	0.12	The object of this study was to examine the effect of vertebral axial decompression on pressure in the nucleus pulposus of lumbar discs. Intradiscal pressure measurement was	The patient was placed in a prone position on a VAX-D therapeutic table and the tensionometer on the table was attached via a pelvic harness. Changes in intradiscal pressure were recorded at resting state and while controlled tension was applied by the equipment to the pelvic harness. Intradiscal pressure demonstrated an inverse relationship to the tension applied. Tension in the

					performed by connecting a cannula inserted into the patient's L4-5 disc space to a pressure transducer.	upper range was observed to decompress the nucleus pulposus significantly, to below -100 mm Hg.
--	--	--	--	--	---	---

Πίνακας 10 Συγκεντρωτικός πίνακας φορτίων.

### 3.3.7 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ

Με τη χρήση μοντέλων FE σε μια αριθμητική προσομοίωση, τα αποτελέσματα πρέπει να είναι αξιόπιστα. Για αυτό τον λόγο, πρέπει να ελέγχονται τα μοντέλα που θα εφαρμοστούν. Η συσχέτιση μεταξύ FE και πειραματικών αποτελεσμάτων οδηγεί σε ακριβείς προβλέψεις για το μοντέλο FE.

Σε αριθμητικές προσομοιώσεις της εμβιομηχανικής, για την αξιολόγηση της ακρίβειας της πρόβλεψης FE, ένα πρότυπο μπορεί να είναι η πειραματική επιβεβαίωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Αυτό το πρότυπο δίνει στον αναλυτή την ικανότητα επιβεβαίωσης της ποιότητας και της αξιοπιστίας του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και τη μεθοδολογία μοντελοποίησης. Αν υπάρχει μεγάλη αστοχία μεταξύ των αναλυτικών και πειραματικών δεδομένων, με τη χρήση ορισμένων αριθμητικών τεχνικών για το μοντέλο, ο χρήστης είναι σε θέση να δημιουργήσει βελτιωμένα μοντέλα που αντιπροσωπεύουν σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα.

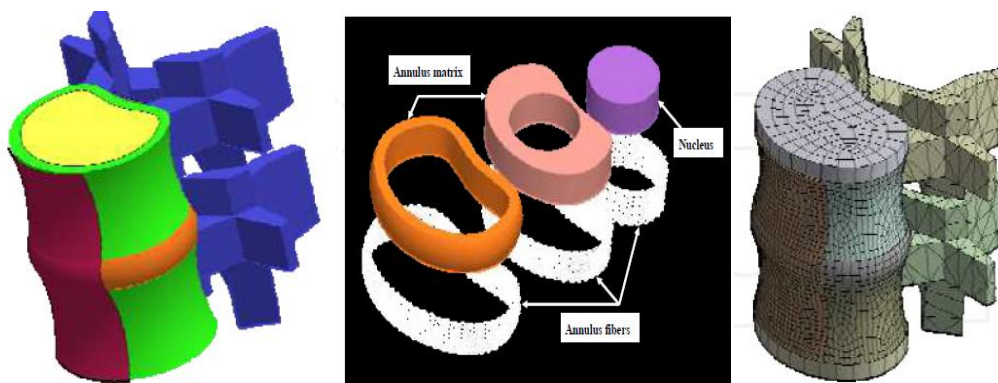
Οι [30] επικύρωσαν το μοντέλο του τμήματος της οσφυϊκή τόσο για φορτία συμπίεσης όσο και για φορτία έντασης που εφαρμόζονται σε υγιή αλλά και σε εκφυλισμένο δίσκο. Η κατανομή των δυνάμεων κατά την διάρκεια κάθετων συμπιεστικών φορτίων σε υγιή και εκφυλισμένο δίσκο στο μεσοβελιαίο οριζόντιο τμήμα του δίσκου συγκρίθηκε με τα πειραματικά αποτελέσματα των [4], [2]. Στην αξονική τάση, οι υπολογισμένες επιμηκύνσεις του δίσκου συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των επιμηκύνσεων σε in vivo διαδικασία των [30] και [28] για υγιή και εκφυλισμένα τμήματα σε θεραπεία έλξης [31].

## ❖ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ

### 4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΓΙΗΣ ΚΑΙ ΕΚΚΛΥΣΤΙΚΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΘΕΡΑΠΕΙΑ UNDERWATER

Οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων είναι σε θέση να προσομοιώνουν αναλυτικά τις εξελίξεις της διαδικασίας που είναι αδύνατο να μετρηθούν πειραματικά, όπως οι διαδικασίες εκφυλισμού της σπονδυλικής. Οι 3D FE προσομοιώσεις των μακροπρόθεσμων και αιφνίδιων διαδικασιών εκφυλισμού των τμημάτων της ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης παρουσιάζονται για τις αναλύσεις διαδικασιών εκφυλισμού λόγω συμπίεσης. Επιπλέον, έχουν σκοπό να αναλύσουν την αποτελεσματικότητα της θεραπείας έλξης λεγόμενη ως weightbath.

Ένα 3D γεωμετρικό μοντέλο ενός τυπικού οσφυϊκού τμήματος L4-L5 δημιουργήθηκε (Σχήμα 4.1α). Τα γεωμετρικά στοιχεία του τμήματος ελήφθησαν από τα ανατομικά μέτρα ενός τυπικού οσφυϊκού τμήματος [24]. Για την δημιουργία του φλοιού και του σπογγώδους οστού των σπονδύλων χρησιμοποιήθηκαν ξεχωριστά πρότυπα, στα οποία συμπεριλήφθηκαν στοιχεία οπίσθιων οστών. Το πάχος του φλοιού των σπονδυλικών τοιχωμάτων και των τελικών πλακών ήταν 0,35 και 0,5 mm, αντίστοιχα. Για αυτό το απλό μοντέλο, το ύψος του δίσκου παρέμεινε σταθερό, με εφαρμογή ύψους 10 mm. Ο ινώδης δακτύλιος αποτελείται από την βασική ουσία και τις ελαστικές ίνες (Σχήμα 4.1β). Ο δακτύλιος χωρίστηκε σε εσωτερικά και εξωτερικά τμήματα με τρεις στρώσεις ινών δακτυλίου έχοντας διατομή 0,1 mm<sup>2</sup>. Η γεωμετρία και η κατεύθυνση της επιφάνειας των αρθρώσεων επιλέχθηκαν σύμφωνα με [46]. Το πλέγμα FE δημιουργήθηκε σε τρία στάδια (Σχ. 1γ). Πρώτα το γεωμετρικό μοντέλο της FSU δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας Pro / Engineer code. Στη συνέχεια το πλέγμα FE δημιουργήθηκε από ANSYS Workbench. Τέλος, τα διάφορα στοιχεία ενσωματώθηκαν στο μοντέλο FE από ANSYS Classic.



Σχήμα 4.1 Το γεωμετρικό μοντέλο α) του τμήματος και β) του μεσοσπονδύλιου δίσκου και γ) του τμήματος των πεπερασμένων στοιχείων [82].

Τα μέτρα των υλικών του υγιούς τμήματος (Πίνακας 2) ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία [48], [4], [24], [22], [28], [44], [50], [51], [52], [35]. Για τα στοιχεία των οστών και των τελικών πλακών επιλέχθηκαν γραμμικά ελαστικά ισότροπα υλικά τόσο για την πίεση και την συμπίεση. Η βασική ουσία που επιλέχθηκε για την κατασκευή του δακτυλίου και του πυρήνα ήταν ένα γραμμικό ελαστικό υλικό και για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης, σε συμπίεση και την ένταση. Για το ρευστό υγιή πυρήνα όπως και για την στεφάνη χρησιμοποιήθηκε γραμμικό ελαστικό υλικό.

Components of FSU	Young's mod [MPa]	Poisson's ratio
Vertebral cortical bone	12000	0,3
Vertebral cancellous bone	150	0,3
Posterior elements, facet	3500	0,3
Endplate	100	0,4
Annulus ground substance	4	0,45
Annulus fibers	500/400/300*	-
Nucleus	1	0,499
Anterior longitud. ligament	8**	0,35
Posterior longitud. ligament	10**	0,35
Other ligaments	5**	0,35

Πίνακας 9 Τα υλικά των τμημάτων που αποτελούν την σύσταση ενός υγιή μεσοσπονδύλιου δίσκου [82].

Οι ίνες κολλαγόνου της στεφάνης θεωρήθηκαν ως γραμμικά ελαστικά ισότροπα υλικά κατά την διάρκεια της έντασης. Για την προσομοίωση της ακτινικής μεταβολής των ινών του κολλαγόνου, η ακαμψία τους ήταν αυξημένη προς τα έξω. Οι επτά σύνδεσμοι εντάχθηκαν στο μοντέλο με διγραμμικό ελαστικό υλικό κατά την πίεση. Για τα αριθμητικά πειράματα, τα βασικά στοιχεία του Πίνακα 2 τροποποιήθηκαν.

## 4.2 Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΦΥΛΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ ΣΧΕΤΙΖΕΤΑΙ ΕΜΕΣΑ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ ΤΗΣ

Ο εκφυλισμός ξεκινά συνήθως στον πυρήνα. Ένας υγιής νεαρός πυρήνας είναι σε κατάσταση υδροστατικής πίεσης. Κατά τη διάρκεια της γήρανσης, ο πυρήνας χάνει την ικανότητα του αυτή εξαιτίας της σταδιακής αλλαγής του ρευστού του σε στερεό υλικό. Αυτό το είδος εκφυλισμού του πυρήνα μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη μείωση του μέτρου Poisson και την αύξηση του μέτρου Young. Αυτή η συμπεριφορά συνοδεύεται από την διαδικασία σκλήρυνσης του δίσκου ως σύνολο και με φθορά, κατάγματα ή διάλυση των ινών του

δακτυλίου, ρήξη των τελικών πλακών ή του σπογγώδες οστού. Τα δεδομένα των πέντε βαθμών της φυσιολογικής διαδικασίας εκφυλισμού λόγω γήρανσης από υγιή σε πλήρη εκφυλισμένο δίσκο φαίνονται στον Πίνακα 3, μειώνοντας βαθμιαία το μέτρο Poisson και αυξάνοντας βαθμιαία το μέτρο Young του πυρήνα, η οποία συνοδεύεται από τη γήρανση στους ιστούς του FSU.

Grades of age-related degeneration* (Young's mod/Poisson's ratio)	grade 1 (healthy)	grade 2	grade 3	grade 4	grade 5 (fully deg.)
nucleus	1/0.499	3/0.45	9/0.4	27/0.35	81/0.3
annulus ground substance	4/0.45	4.5/0.45	5/0.45	5.5/0.45	6/0.45
cancellous bone	150/0.3	125/0.3	100/0.3	75/0.3	50/0.3
endplate	100/0.4	80/0.4	60/0.4	40/0.4	20/0.4

\* Bony elements and annulus fibers are seen in Table 1

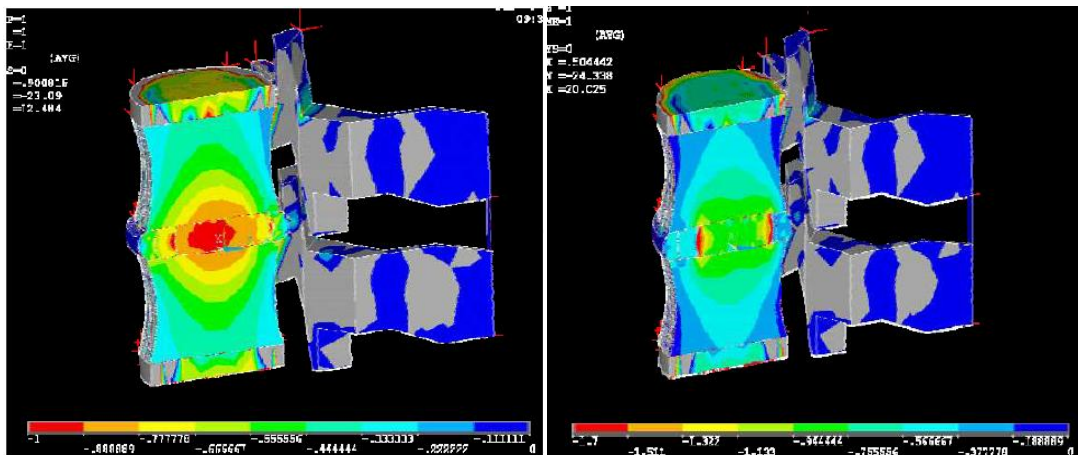
Πινάκας 11 Μοντελοποίηση σχετίζεται με την ηλικία εκφυλισμού: υλικά των συστατικών για την δημιουργία των τμημάτων ενός υγιή δίσκου (1) μέχρι να δεχτεί η πλήρη αλλοίωση του(5) [82].

Για την προσομοίωση της διαδικασίας εκφυλισμού εξαιτίας της γήρανσης, εφαρμόστηκε φορτίο αξονικής συμπίεσης ίση με 1000 N, θεωρώντας ότι το φορτίο της οσφυϊκής συμπίεσης είναι περίπου το 60% του συνολικού του σωματικού βάρους, το οποίο συμπληρώνεται με τις μυϊκές δυνάμεις οι οποίες είναι σχεδόν ίσες [42], [49]. Το φορτίο συμπίεσης κατανέμεται κατά μήκος της άνω και κάτω επιφάνειας του άνω και κάτω σπόνδυλο της FSU, με την εφαρμογή σκλήρυνσης των πλακών κατά την διανομή φορτίου στις δυο επιφάνειες.

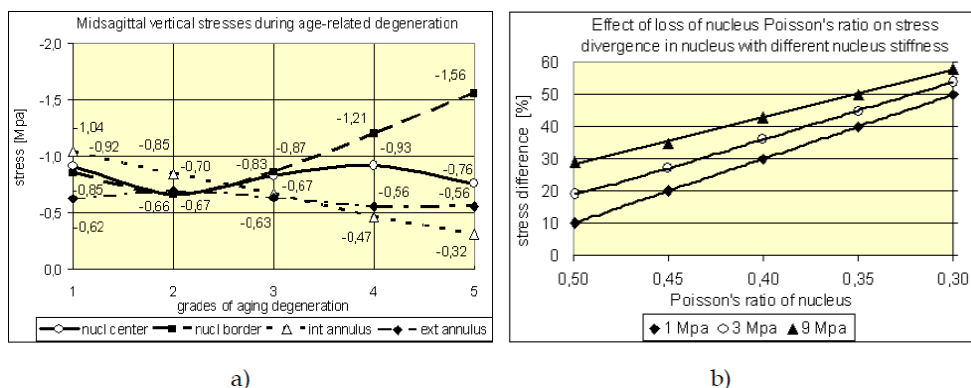
Το Σχήμα.4.3 απεικονίζει την μέγιστη αναδιάταξη της πίεσης σε τομή του μέσου οβελιαίου επιπέδου του δίσκου κατά τη διαδικασία εκφυλισμού. Ενώ σε έναν υγιή δίσκο στο Σχ. 4.3α, λόγω της υδροστατικής πίεσης υπό φορτίο συμπίεσης, οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις λαμβάνουν χώρα στη μέση του πυρήνα, σε πλήρως εκφυλισμένο δίσκο στο Σχ. 4.3b, λόγω της χαμένης υδροστατική πίεση, η κατανομή διαφέρει. Σε αυτήν την περίπτωση οι μέγιστες συμπιεστικές τάσεις θα κινηθούν προς τα άκρα του πυρήνα, προς τον δακτύλιο της στεφάνης.

Το Σχήμα 4.4α φαίνεται η μεταβολή των συμπιεστικών τάσεων κάθετα του μεσοβελιαίο κατά την διάρκεια εκφυλισμού λόγω γήρανσης του μοντέλου του Πίνακα 3, στη μέση και στα όρια του πυρήνα και στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του πυρήνα, για αξονικό φορτίο συμπίεσης 1000 N. Οι κατακόρυφες καταπονήσεις στο κέντρο και στα όρια του πυρήνα αρχικά μειώθηκαν και στη συνέχεια αυξήθηκαν κατά την γήρανση, παρέχοντας την ελάχιστη τάση στον πυρήνα σε ήπια εκφυλισμένη κατάσταση. Στην εσωτερική στεφάνη παρατηρήθηκε

μονότονη μείωση της πίεσης, αποδεικνύοντας την πιθανότητα εσωτερικού κατάγματος του δακτυλίου. Στον εξωτερικό δακτύλιο οι τάσεις αλλάζουν ελαφρώς.



Σχήμα 4.3 Σε οβελιαίο επίπεδο διαβαθμίσεις εκφύλισης του μεσοσπονδύλιου δίσκου έπειτα από κάθετες συμπιεστικές δυνάμεις: α) για υγιή και β) δίσκο με αλλοιώσεις [82].

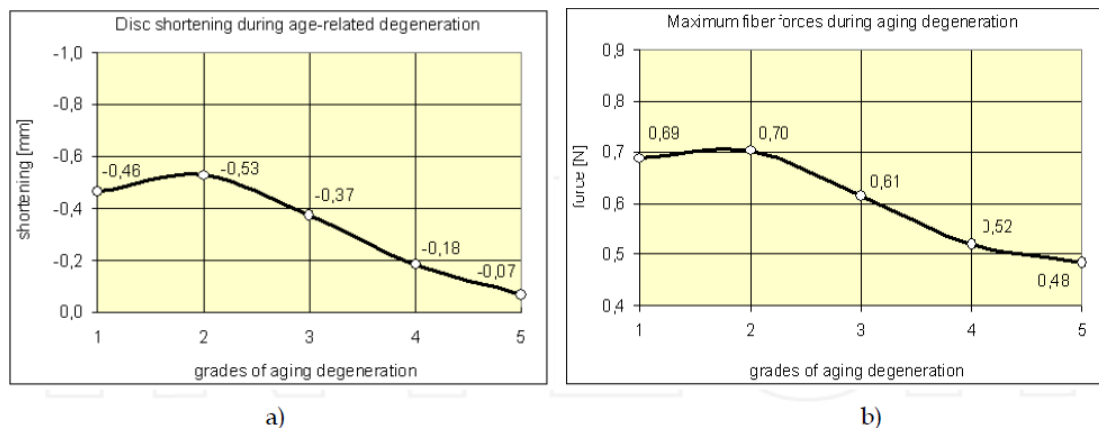


Σχήμα 4.4 α) Μεσοβελιαία κάθετες τάσεις συμπίεσης σε συστατικά του δίσκου κατά τη διάρκεια της γήρανσης και β) η απόκλιση της πίεσης στο κέντρο του πυρήνα κατά τη διάρκεια της απώλειας της υδροστατικής συμπίεσης στον πυρήνα [10], [82].

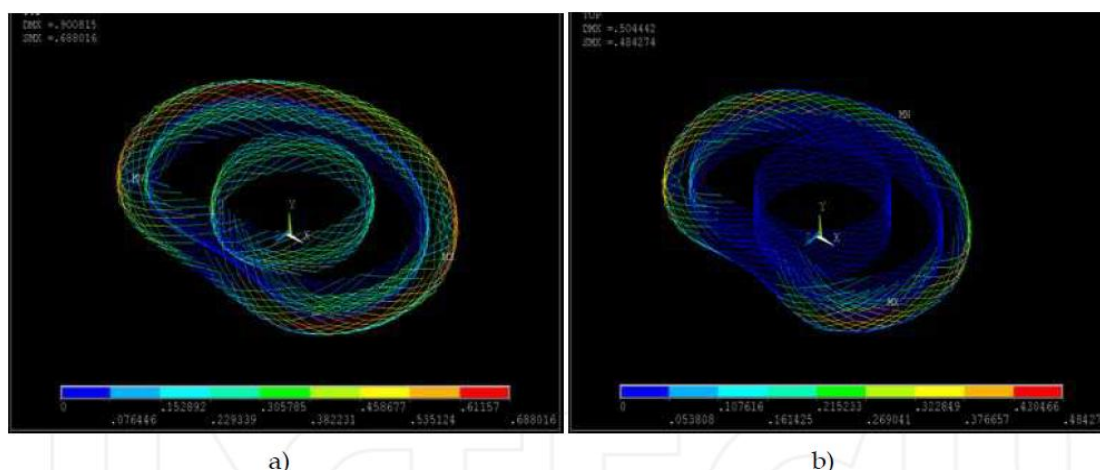
Σε εκφυλισμένο δίσκο όπου η πίεση στον πυρήνα δεν είναι υδροστατική πια, θεωρείται μη ομοιόμορφη. Στο Σχήμα 4.4β η απόκλιση της πίεσης φαίνεται στον κέντρο του πυρήνα μεταξύ των κάθετων και οριζόντιων τάσεων, όπου αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς και σχεδόν γραμμικά η απώλεια της υδροστατικής πίεσης στον πυρήνα. Η αρχική απόκλιση της πίεσης μεταξύ των κάθετων και οριζόντιων καταπονήσεων σε υδροστατική πίεση με  $\nu = 0,499$  του υγρού του πυρήνα  $E = 1 \text{ MPa}$  ήταν 8-10%, και φυσικά, η ακαμψία του πυρήνα ήταν υψηλότερη. Με την εφαρμογή πιο ρευστού υλικού του πυρήνα ( $E = 0.1 \text{ MPa}$ ), η αρχική υδροστατική απόκλιση της πίεσης θα μπορούσε να μειωθεί σε 1-2%.

Στο Σχήμα 4.5α απεικονίζεται η απώλεια ύψους του δίσκου με τη γήρανση, αποδεικνύοντας ότι η μέγιστη παραμόρφωση στον δίσκο συνέβη κατά την διάρκεια μικρού εκφυλισμού. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε για τις μέγιστες δυνάμεις εφελκυσμού στις πιο

απομακρυσμένες πλαγιοπίσθιες ίνες στον δακτύλιο στο σχήμα 4β, δηλαδή, η μέγιστες δυνάμεις ινών ανήκουν επίσης στην ήπια κατάσταση εκφυλισμού. Στο Σχήμα 4.6α και 4.6β απεικονίζονται οι δυνάμεις εφελκυσμού σε υγιή και πλήρως εκφυλισμένες ίνες δακτυλίου, αντίστοιχα.



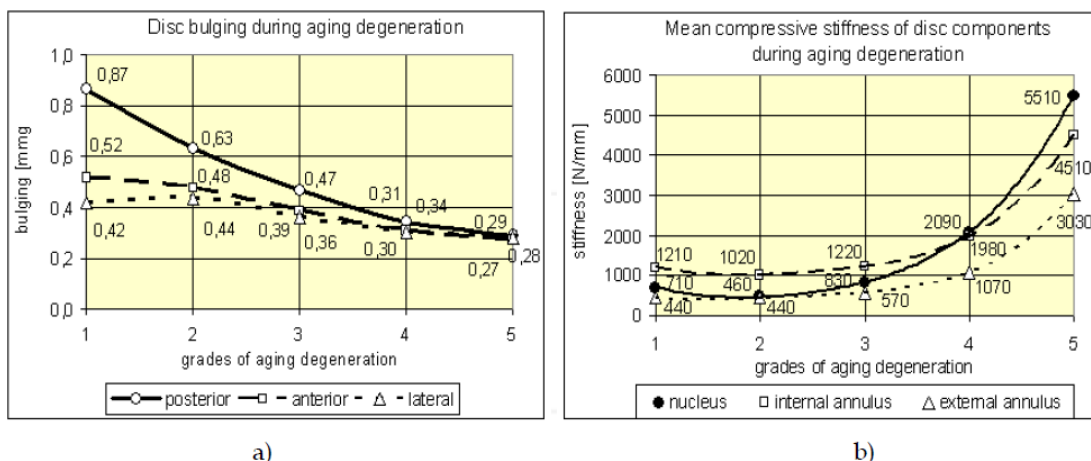
Σχήμα 4.5 α) η απώλεια ύψους του δίσκου και β) οι μέγιστες δυνάμεις ινών κατά τη γήρανση [10], [82].



Σχήμα 4.6 Δυνάμεις ινών δακτυλίου για α) υγιή και β) πλήρως εκφυλισμένη περίπτωση [82].

Στο Σχήμα 4.7α απεικονίζονται οι αλλαγές διόγκωσης της οπίσθιας, πρόσθιας και πλάγιας επιφάνειας του δίσκου κατά τη διαδικασία εκφυλισμού, αποδεικνύοντας ότι η παραμόρφωση είναι μέγιστη σε νέες ηλικίες ή σε ήπια εκφύλιση, και μειώνεται με τη γήρανση. Στο Σχήμα 4.7β φαίνεται η μεταβολή της μέσης κάθετης συμπίεστικής ακαμψίας των κατασκευαστικών στοιχείων του δίσκου κατά τη διάρκεια της γήρανσης σε διαδικασία εκφυλισμού. Κατά συνέπεια, τα τμήματα της οσφυϊκής μοίρας είναι πιο εύκαμπτα σε νεαρή ηλικία, και η σταθερότητα των τμημάτων αυξάνει περαιτέρω τη γήρανση και τον εκφυλισμό.





Σχήμα 4.7 α) Μεταγενέστερη, πρόσθια και πλευρική διόγκωση του δίσκου και β) ακαμψία συστατικών του δίσκου κατά τη γήρανση [64], [82].

### 4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΞΑΦΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΦΥΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ

Σε αντίθεση με τη διαδικασία εκφυλισμού που σχετίζεται με την γήρανση εξαιτίας του πέρασα του χρόνου, ο ξαφνικός εκφυλισμός έχει πολύ μικρές, απρόβλεπτες, στιγμιαίες επιπτώσεις. Η μέθοδος μοντελοποίησης ξαφνικής εκφύλισης συνοδεύεται από άλλα επιβλαβή φαινόμενα, τα στοιχεία των ιστών αυτών τροποποιήθηκαν στον Πίνακα 2 και Πίνακα 3, ανάλογα με την πραγματική φάση εκφυλισμού στην οποία συνέβη η ξαφνική φόρτιση, θεωρώντας επίσης, πέντε φάσεις στην οποίες πραγματοποιείται η διαδικασία ξαφνικού εκφυλισμού.

Για Παράδειγμα, τα δεδομένα στον Πίνακα 4 δείχνουν το μοντέλο το οποίο έχει υποστεί ξαφνικό εκφυλισμό σε νεαρή ηλικία με ίνες δακτυλίου με σπασίματα και τραυματισμούς. Στην περίπτωση αυτή ο ξαφνικός εκφυλισμός συνέβη στην πρώτη φάση του Πίνακα 4, όταν η ξαφνική απώλεια της υδροστατικής πίεσης, διαμορφώθηκε από την γρήγορη και άμεση μείωση του δείκτη Poisson του πυρήνα με αμετάβλητη το μέτρο Young. Τα ανοίγματα του δακτυλίου και η φθορά των ινών μοντελοποιούνται με βάση ένα πρότυπο εξασθενημένου δακτυλίου και ινών, αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.

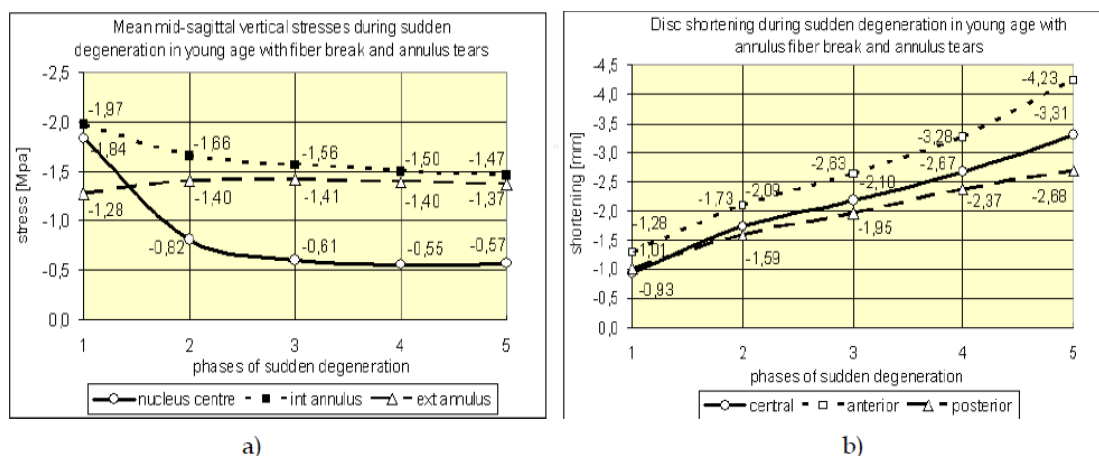
Phases of sudden degeneration* (Young's mod/Poisson's ratio)	grade 1	grade 2	grade 3	grade 4	grade 5
nucleus	1/0.499	1/0.45	1/0.40	1/0.35	1/0.3
annulus ground substance	4/0.45	3.5/0.45	3/0.45	2.5/0.45	2/0.45
annulus fibers	500/400/300	375/300/225	250/200/150	125/100/75	5/4/3

\* Bony elements are seen in Table 1

Πινάκας 12 Μοντελοποίηση της ξαφνικής διαδικασία εκφυλισμού με ανοίγματα του δακτυλίου και σπάσιμο των ινών σε νεαρή ηλικία: τροποποιημένο μέτρο υλικού των συστατικών των τμημάτων [82].

Η προσομοίωση της ξαφνικής και της τυχαίας διαδικασίας εκφυλισμού, με φορτίο αξονικής συμπίεσης 1000 N που ολοκληρώθηκε από την απροσδόκητη και ξαφνική υπερφόρτωση του 1000 N, με 2000 N αξονικό φορτίο συμπίεσης.

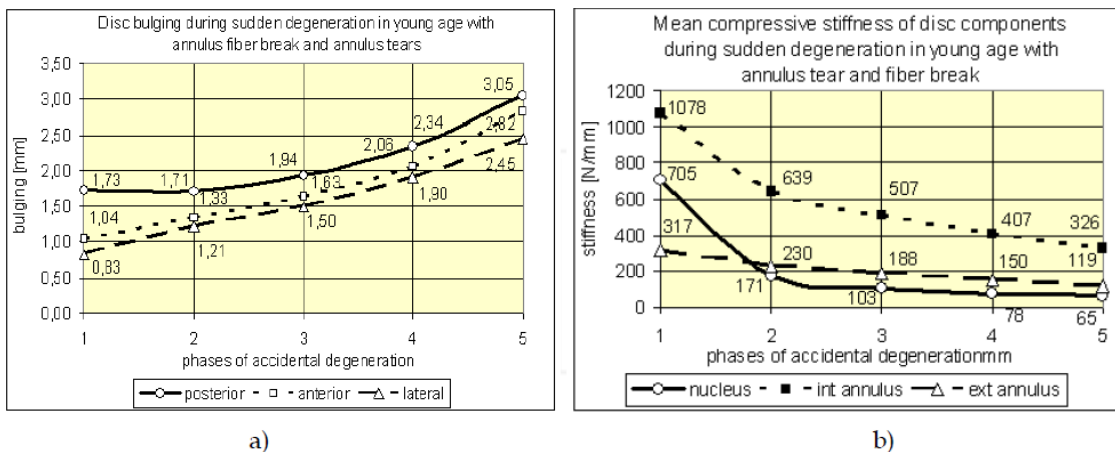
Στο Σχήμα 4.7α δείχνει την ξαφνική αλλαγή της κάθετης συμπιεστικής τάσης του μέσου οβελιαίου επιπέδου στο δίσκο, το Σχήμα 4.7β απεικονίζει τις ξαφνικές αλλαγές που προκλήθηκαν στο μέσο οβελιαίο, οπίσθιο και πρόσθιο επίπεδο, συντομεύοντας τη διάρκεια της διαδικασίας ξαφνικού εκφυλισμού σε νεαρή ηλικία με ανοίγματα στον δακτύλιο και στασίματα ινών (Πίνακας 4). Η μέση πίεση μειώθηκε έντονα στον πυρήνα (κατά 70%), και μέτρια στην εσωτερική στεφάνη (κατά 25%), ενώ αυξήθηκε ελαφρά στην εξωτερική στεφάνη (κατά 8-10%). Η μείωση του δίσκου αυξήθηκε ριζικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής από περίπου 200- 230%.



δυνάμεις [Μρα]/ φάσεις γήρανσης	1	2	3	4	5
εσωτερική στεφάνη	-1,97	-1,66	-1,56	-1,5	-1,47
πυρήνας	-1,84	-0,82	-0,61	-0,55	-0,57
εξωτερική στεφάνη	-1,28	-1,4	-1,41	-1,4	-1,37

μείωση του δίσκου [mm]/ φάση γήρανσης	1	2	3	4	5
οπίσθια	-1,28	-2,09	-2,63	-3,28	-4,23
πρόσθια	-1,01	-1,59	-1,95	-2,37	-2,68
κέντρο	-0,93	-0,73	-2,1	-2,67	-3,31

Σχήμα 4.7 α) Μέσο-οβελιαίες κάθετες συμπιεστικές τάσεις στα συστατικά του δίσκου και β) συντόμευση κατά τη διάρκεια ξαφνικής διαδικασίας εκφυλισμού [82].



Διόγκωση [mm]/ φάση γήρανσης	1	2	3	4	5
οπίσθια	0,87	0,63	0,47	0,34	0,29
πρόσθια	0,52	0,48	0,39	0,31	0,28
πλάγια	0,42	0,44	0,36	0,3	0,27

ακαμψία [N/mm]/ φάση γήρανσης	1	2	3	4	5
εσωτερική στεφάνη	1210	1020	1220	1980	4510
πυρήνας	710	460	830	2090	5510
εξωτερική στεφάνη	440	440	570	1070	3030

Σχήμα 4.8 α) Μεταγενέστερη, πρόσθια και πλευρική διόγκωση του δίσκου και β) η ακαμψία των συστατικών του δίσκου κατά τη διάρκεια ξαφνικού εκφυλισμού [82].

Στο Σχήμα 4.8α απεικονίζεται η ξαφνική μεσοβελιαία πρόσθια, οπίσθια και πλάγια διόγκωση του δίσκου. Στο Σχήμα 4.8β φαίνεται η μέση θλιπτική ακαμψία των κατασκευαστικών στοιχείων του δίσκου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξαφνικού εκφυλισμού. Η διόγκωση του δίσκου αυξήθηκε σταδιακά σε όλες τις κατευθύνσεις (κατά 80-200%), λόγω των σπασμάτων των ινών με σταδιακή μείωση της μέγιστης δύναμης ινών από 1.38 N έως 0,06 N. Σημαντική απώλεια ακαμψίας παρατηρήθηκε για τα συστατικά του δίσκου (ο πυρήνας 91%, η εσωτερική στεφάνη 70%, η εξωτερική στεφάνη 62%). Η απώλεια ακαμψίας του συνόλου του δίσκου ήταν 76%.

Κατά τη διάρκεια διαδικασίας ξαφνικού εκφυλισμού η κατακόρυφη μεταφορά θλιπτικού φορτίου πραγματοποιείται από μέσα προς τα έξω, δηλαδή από τον πυρήνα προς την εξωτερική στεφάνη κατά την διαδικασία του εκφυλισμού. Στην περίπτωση του εσωτερικού κατάγματος του δακτυλίου, η ξαφνική υπερφόρτωση του εξωτερικού δακτυλίου μπορεί να οδηγήσει σε κάταγμα του δίσκου και άλλες βλάβες. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις η εσωτερική στεφάνη υπερφορτώνεται.

Σε αντίθεση με τις μεθόδους εκφυλισμού που σχετίζονται με την ηλικία όπου η παραμόρφωση του δίσκου (διόγκωση, κ.τ.λ) μειώνεται κατά τη διάρκεια του επαγγελματικού βίου, σε ξαφνικό εκφυλισμό χάνει την ικανότητα του και η παραμόρφωση του αυξάνεται έντονα και έτσι μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμό και πόνο κυρίως σε νεαρότερη ηλικία. Επίσης σε αντίθεση οι διαδικασίες εκφυλισμού που σχετίζονται με την ηλικία, όπου η κάθετη συμπιεστική ακαμψία των δίσκων αυξάνει κατά τη διάρκεια της γήρανσης, στον ξαφνικό εκφυλισμό οδηγεί σε τμηματική αστάθεια και βλάβη.

Με βάση την βιβλιογραφία που υπάρχει από αριθμητικές προσομοιώσεις της εκφύλισης λόγω ηλικίας, σε ήπια μορφή εκφυλισμού τα τμήματα της παρουσιάζουν μικρότερη ακαμψία που αργότερα αυξάνεται αμέσως [4], [48]. Ομοίως υπάρχει περίπτωση, ένας τυχαίος εκφυλισμός να είναι πιο επικίνδυνος σε νεαρή ηλικία, λόγω της ξαφνικής απώλειας υδροστατικής πίεσης, ξεκινώντας με μικρότερο επίπεδο ακαμψίας, κατά συνέπεια, η μείωση του δίσκου και η διόγκωση μπορούν να προκαλέσουν ξαφνικό τραυματισμό και χαμηλό πόνο στην πλάτη σε νεαρή ηλικία.

#### **4.4 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ**

Οι [10] αναλύουν την επίδραση μιας υποβρύχιας ειδικής θεραπείας με FE προσομοίωση που εφαρμόζεται για τη θεραπεία εκφυλιστικών παθήσεων της οσφυϊκής μοίρας στην σπονδυλική στήλη, όταν οι ασθενείς βρίσκονται σε κατακόρυφη θέση μέσα στο νερό, φορώντας ένα κολάρο και έχοντας επιπλέον βάρος μολύβδου στα πόδια. Τα εμβιομηχανικά αποτελέσματα της WHT έχουν αναφερθεί πρώτη φορά από τους [13]. Οι επιμηκύνσεις που παρουσιάζονται στα τμήματα της οσφυϊκής κατά τη διάρκεια WHT έχουν μετρηθεί in vivo με [11]. Οι κλινικές επιπτώσεις της WHT έχουν αναλυθεί από τον [42]. Το σύνολο της περιγραφή της WHT κατά την εφαρμογή της, είναι βασισμένη σε εμβιομηχανικά και κλινικά αποτελέσματα που έχουν δοθεί από [30]. Αυτή η αριθμητική μελέτη έχει ως στόχο τον καθορισμό της επιμήκυνσης του δίσκου, την πίεση και τη χαλάρωση των ινών, δηλαδή τι επιπτώσεις θα προκύψουν κατά τη διάρκεια εφαρμογής της WHT, η οποία θα σχετίζεται με την ηλικία εκφύλισης.

Σε αυτό το υποβρύχιο εναιώρημα του αυχένα, το φορτίο που ασκείται, αποτελείται από δύο μέρη: (1) την απομάκρυνση της θλιπτικής φόρτισης του βάρους και των δυνάμεων των μυών του σώματος σε νερό, που ονομάζεται έμμεσο φορτίο έλξης και (2) τη δύναμη έλξης της άνωσης με επιπλέον εφαρμοζόμενα φορτία λόγω της χρήσης μολύβδου, που ονομάζεται άμεσο φορτίο έλξης. Με βάση τους μηχανικούς υπολογισμούς, για το πρότυπο του σωματικού βάρους των 700 N, και την εφαρμογή επιπλέον μολύβδου με βάρος 40 N, οι έμμεσες και άμεσες τιμές φορτίσεων έλξης είναι 840 N και 50 N, αντίστοιχα. Έτσι, για την αριθμητική ανάλυση του της WHY θα εφαρμοστεί έμμεσο φορτίο 840 N και άμεσο 50 N.

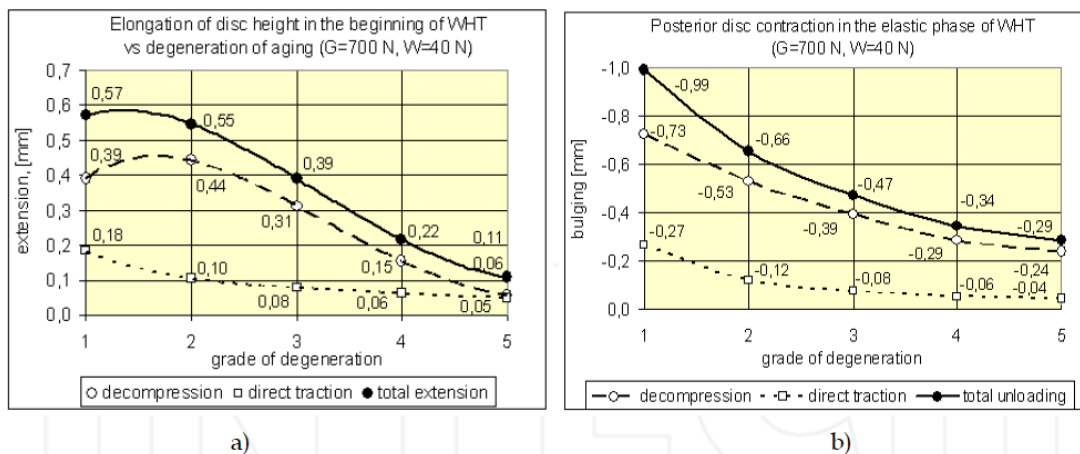
Η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων των WHT έγιναν με την χρήση των παραπάνω λεπτομερών αναλύσεων των γεωμετρικών στοιχείων των μοντέλων. Η βασική ουσία του δακτυλίου και του πυρήνα θεωρήθηκε γραμμική ελαστική στην διαδικασία θλίψης, και διγραμμική ελαστική στην πρόσφυση. Έτσι, κατά την διάρκεια των πέντε φάσεων εκφυλισμού που σχετίζονται με την ηλικία, οι συντελεστές των συμπιεστικών υλικών στην έμμεση φάση της έλξης που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 3, ενώ για την άμεση φάση της έλξης, ειδικά σε εφελκυσμό εφαρμόστηκαν συντελεστές του μέτρου Young, που λαμβάνονται με ταυτοποίηση των παραμέτρων [33], όπως φαίνεται στον Πίνακα 5. Για υγιή πυρήνα εφαρμόζεται ασυμπίεστο ρευστό υλικό για την πίεση και τη συμπίεση.

Grades of age-related degeneration for direct traction*	grade 1 (healthy)	grade 2	grade 3	grade 4	grade 5 (fully deg.)
<b>(Young's mod/Poisson's ratio)</b>					
nucleus	0.4/0.499	1.0/0.45	1.6/0.4	2.2/0.35	2.8/0.3
annulus ground substance	0.4/0.45	1.0/0.45	1.6/0.45	2.2/0.45	2.8/0.45
cancellous bone	150/0.3	125/0.3	100/0.3	75/0.3	50/0.3
endplate	100/0.4	80/0.4	60/0.4	40/0.4	20/0.4

\* Bony elements and annulus fibers are seen in Table 1

Πίνακας 13 Μοντελοποίηση της διαδικασίας εκφυλισμού που σχετίζεται με την ηλικία για την άμεση πρόσφυση του μέτρου των συστατικών των τμημάτων από υγιή (1) έως πλήρως εκφυλισμένο δίσκο(5) [82].

Η επίδραση εκφόρτωσης της WHY σε άμεση ελαστική φάση απεικονίζεται στο Σχ. 4.9 και 4.10 σε όρους της γήρανσης του εκφυλισμού. Ο όρος «εκφόρτωση» είναι σε σχέση με την κατάσταση συμπίεσης των τμημάτων λίγο πριν από τη θεραπεία. Λόγω της διγραμμικής συμπεριφοράς του δίσκου κατά τη διάρκεια της hydrotraction, τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης και εκφόρτωσης της πίεσης διακρίνονται σε εκείνα που προκαλούνται από έμμεσα και άμεσα φορτία έλξης.



<i>επιμήκυνση του ύψους [mm]/ φάση γήρανσης</i>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<i>αποσυμπίεση</i>	0,39	0,44	0,31	0,15	0,06
<i>άμεση έλξη</i>	0,18	0,1	0,08	0,06	0,05
<i>συνολική επέκταση</i>	0,57	0,55	0,39	0,22	0,11

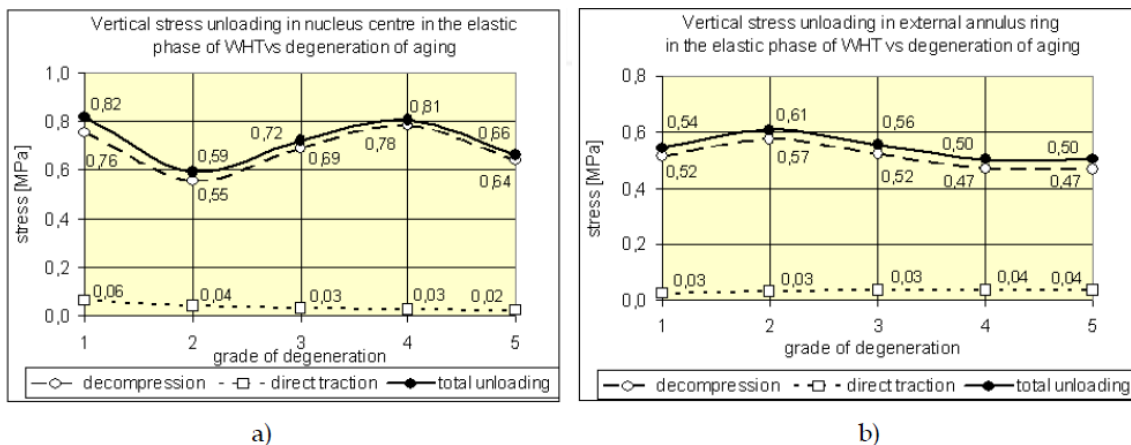
<i>διόγκωση [mm]/ φάση γήρανσης</i>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<i>αποσυμπίεση</i>	-0,73	-0,53	-0,39	-0,29	-0,24
<i>άμεση έλξη</i>	-0,27	-0,12	-0,08	-0,06	-0,04
<i>συνολική αποφόρτωση</i>	-0,99	-0,66	-0,47	2,45	-0,29

Σχήμα 4.9 Τα αποτελέσματα εκφόρτωσης α) του συμπιεσμένου δίσκου και β) της διόγκωσης του οπίσθιου τμήματος του δίσκου [10], [82].

Στο Σχήμα 4.9α φαίνονται οι σχετικές επιμηκύνσεις των δίσκων σε σύγκριση με την κατάσταση συμπίεσης πριν από τη θεραπεία. Η αρχική ελαστική επιμήκυνση θα είναι σχεδόν διπλάσια στην κατάσταση ερπυσμού WHT [29]. Η αναλογία των άμεσων επεκτάσεων έλξης έναντι των συνολικών επεκτάσεων είναι 32%, 19%, 20%, 28% και 47% για τον εκφυλισμό των τάξεων 1 έως 5, αντίστοιχα. Οι αναλογίες των άμεσων / έμμεσων επεκτάσεων είναι: 47%, 24%, 25%, 39% και 89%. Η ελάχιστη τιμή ανήκει στην ήπια κατάσταση εκφυλισμού και αυξάνεται ραγδαία με την προχωρημένη εκφύλιση και την γήρανση. Η μέγιστη τιμή ανήκει στις περιπτώσεις πλήρους εκφυλισμένου.

Η εκφόρτωση του οπίσθιου εξογκώματος, δηλαδή, οι σχετικές συσπάσεις του δίσκου μπορούν να φανούν στο Σχήμα 4.9β. Η αναλογία των άμεσων/ συνόλου των συσπάσεων στην έλξη μειώνεται απότομα από 27% έως 15% για την οπίσθια διόγκωση με βαθμούς εκφυλισμού 1 έως 5. Η αναλογία των άμεσων/ έμμεσων συσπάσεων αλλάζει από 37% σε 18% στην οπίσθια διόγκωση. Η μέγιστη τιμή ανήκει στις περιπτώσεις πλήρους εκφυλισμού.

Στο Σχήμα 4.10α και 4.10β απεικονίζεται η κάθετη χαλάρωση της πίεσης στο κέντρο του πυρήνα και στην εξωτερική επίστρωση του δακτυλίου. Η αναλογία των άμεσων /συνολική και άμεση/ έμμεση εκφόρτωση της πίεσης είναι εξίσου μικρή, 7-8% σε υγιείς και 2-4% σε περιπτώσεις πλήρους εκφυλισμού. Έτσι, σε κατάσταση αποσυμπίεσης το κυρίαρχο αποτέλεσμα είναι το έμμεσο φορτίο έλξης.



συμπίεση [Μpa]/ φάση γήρανσης	1	2	3	4	5
αποσυμπίεση	0,76	0,55	0,69	0,78	0,64
άμεση έλξη	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02
συνολική αποφόρτωση	0,82	0,59	0,72	0,81	0,66

συμπίεση [Μpa]/ φάση γήρανσης	1	2	3	4	5
αποσυμπίεση	0,52	0,57	0,52	0,47	0,47
άμεση έλξη	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
συνολική αποφόρτωση	0,54	0,61	0,56	0,5	0,5

Σχήμα 4.10 Η επίδραση του WHT κατά την διαδικασία εκφόρτωσης της πίεσης α) στο κέντρο του πυρήνα και β) στην εξωτερική στεφάνη [64], [82].

Το συμπέρασμα είναι ότι η άμεση φόρτιση έλξης με επιπλέον βάρη μολύβδου έχει επιπτώσεις κυρίως στις παραμορφώσεις που είναι υπεύθυνες για την αποδέσμευση των νεύρων, ενώ η χαλάρωση πίεσης επηρεάζεται κυρίως από την έμμεση φόρτιση έλξης. Η επίδραση έλξης μπορεί να αυξηθεί με την εφαρμογή μεγαλύτερου βάρους μολύβδου.

#### 4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΡΑΠΕΙΑΣ ΣΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΟΣΦΥΙΚΗΣ ΜΟΙΡΑΣ

Μετά από μια σύντομη έρευνα της δομικής και της εμβιομηχανικής ανατομίας μιας υγιούς και μιας εκφυλισμένης οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης, η FE μοντελοποίηση και η συστηματική αριθμητική ανάλυση των κύριων μηχανικών χαρακτηριστικών της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής σε εκφυλισμό χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της γήρανσης και διεργασίες ξαφνικού εκφυλισμού της. Το γεγονός ότι τα τμήματα με την μικρότερη εφαρμογή φορτιού, παρουσιάζουν τη μικρότερη ακαμψία τόσο στη γήρανση όσο και στην ξαφνική

διαδικασία εκφυλισμού, με βάση την αριθμητική ανάλυση είναι η απάντηση στο ερώτημα γιατί το πρόβλημα οσφυαλγίας ταλαιπωρεί συχνά τους νέους.

Μοντέλο	Δυνάμεις	Περιλαμβάνει	Μελέτα	Αποτελέσματα
εκφυλισμένης λόγος γήρανσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Σωματικό βάρος όπως 700-1000N</li> <li>➤ Για την προσομοίωση της διαδικασίας εκφυλισμού εξαιτίας της γήρανσης, εφαρμόστηκε φορτίο αξονική συμπίεση ίση με 1000 N, θεωρώντας ότι το φορτίο της οσφυϊκής συμπίεσης είναι περίπου το 60% του συνολικού σωματικού βάρους.</li> </ul>	Αυτό το είδος εκφυλισμού του πυρήνα μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη μείωση της αναλογίας του Poisson και την αύξηση του μέτρου Young. Αυτή η συμπεριφορά συνοδεύεται από τη διαδικασία σκλήρυνσης του δίσκου ως σύνολο και από τη μείωση του όγκου του πυρήνα και του όγκου επέκτασης του δακτυλίου, με επιπλέον, την μείωση του ύψους του δίσκου.	διάφορες φθορές όπως, εσωτερικό κάταγμα του δακτυλίου, τραυματισμούς και η ρήξη των τελικών πλακών κ.τ.λ	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Οι κατακόρυφες καταπονήσεις στο κέντρο και στα όρια του πυρήνα αρχικά μειώθηκαν και στη συνέχεια αυξήθηκαν κατά την γήρανση, παρέχοντας ελάχιστη τάση στον πυρήνα σε ήπια περίπτωση εκφυλισμού. Στην εσωτερική στεφάνη παρατηρήθηκε μείωση της πίεσης, αποδεικνύοντας την πιθανότητα εσωτερικού κατάγματος του δακτυλίου.</li> <li>➤ Σε έναν εκφυλισμένο δίσκο, ο πυρήνας χάνει την υδροστατική πίεση.</li> <li>➤ Η διόγκωση της οπίσθιας, πρόσθιας και πλάγιας επιφάνειας του δίσκου κατά τη διαδικασία εκφυλισμού</li> <li>➤ Μεταβολή της μέσης κάθετης συμπίεστικής ακαμψίας των κατασκευαστικών στοιχείων του δίσκου κατά τη διάρκεια της γήρανσης.</li> <li>➤ Κατά συνέπεια, τα τμήματα της οσφυϊκής είναι πιο ευάλωτα σε νεαρή ηλικία.</li> </ul>
εκφυλισμένης λόγος απότομων φορτίων	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Η προσομοίωση της ξαφνικής και της τυχαίας διαδικασίας εκφυλισμού, με φορτίο αξονικής συμπίεσης 1000 N που ολοκληρώθηκε από την απροσδόκητη και ξαφνική υπερφόρτωση του 1000 N, με 2000 N αξονικό φορτίο συμπίεσης.</li> </ul>	Αυτό το είδος του εκφυλισμού του πυρήνα μπορεί να μοντελοποιηθεί με ξαφνικά πορεία του δείκτη Poisson με αμετάβλητο το μέτρο Young του πυρήνα	διάφορες φθορές και παθήσεις εξαιτίας αιφνίδιων και μεγάλων φορτίων.	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Η μέση πίεση μειώθηκε έντονα στον πυρήνα (κατά 70%), και μέτρια στην εσωτερική στεφάνη (κατά 25%), ενώ αυξήθηκε ελαφρά στην εξωτερική στεφάνη (Κατά 8-10%). Η μείωση του δίσκου αυξήθηκε ριζικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής από περίπου 200- 230%.</li> <li>➤ Η έλλειψη ακαμψίας του συνόλου του δίσκου ήταν 76%.</li> <li>➤ Σε αντίθεση με τις μεθόδους εκφυλισμού που σχετίζονται με την ηλικία όπου η παραμόρφωση του δίσκου (διόγκωση) μειώνεται κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων, σε ξαφνικό εκφυλισμό χάνει την ικανότητα του με αποτέλεσμα η παραμόρφωση αυξάνεται έντονα και έτσι μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμό και πόνο κυρίως σε νεαρότερη ηλικία. Σε αντίθεση με διαδικασίες εκφυλισμού που σχετίζονται με την ηλικία, όπου η κάθετη συμπίεστική ακαμψία των δίσκων αυξάνει κατά τη διάρκεια της γήρανσης, σε ξαφνικό εκφυλισμό μειώνεται με αποτέλεσμα να προκαλείται τμηματική αστάθεια και της ζημία.</li> </ul>



<p>WHY θεραπεία αποσυμπίεσης του δίσκου</p>	<p>βάρους των 700 N, και την εφαρμογή επιπλέον μολύβδου με βάρος 40 N, οι έμμεσες και άμεσες τιμές φορτίσεων έλξης είναι 840 N και 50 N, αντίστοιχα. Έτσι, για την αριθμητική ανάλυση του της WHY θα εφαρμοστεί έμμεσο φορτίο 840 N και άμεσο 50 N</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• την απομάκρυνση της θλιπτικής φόρτισης του βάρους και των δυνάμεων των μυών του σώματος σε νερό, που ονομάζεται έμμεση φορτίο έλξης και</li> <li>• τη δύναμη της άνωσης με επιπλέον εφαρμοζόμενα φορτία λόγω της χρήσης μολυβδίου</li> </ul>	<p>Θεραπεία και πρόληψη στήλης από διάφορες φθορές όπως, τραυματισμούς, κατάγματα κ.τ.λ</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ επιμηκύνσεις των δίσκων(Η ελάχιστη τιμή ανήκει στην ήπια κατάσταση εκφυλισμό και αυξάνεται ραγδαία με την προχωρημένη εκφύλιση και την γήρανση. Η μέγιστη</li> <li>➢ τιμή ανήκει στις περιπτώσεις πλήρους εκφυλισμένου)</li> <li>➢ για διόγκωση (Η μέγιστη τιμή ανήκει στις περιπτώσεις πλήρους εκφυλισμένου)</li> <li>➢ Το συμπέρασμα είναι ότι η άμεση φόρτιση έλξης με επιπλέον βάρος μολύβδου έχει επιπτώσεις κυρίως στις παραμορφώσεις, ενώ η χαλάρωση πίεσης επηρεάζεται κυρίως από την έμμεση φόρτιση έλξης</li> </ul>
---	--	---	---	--

Πίνακας 14 Συγκεντρωτικός πίνακας δυνάμεων, μοντέλων και αποτελεσμάτων.

Κατά την έναρξη της διαδικασίας εκφυλισμού η απώλεια της υδροστατικής πίεσης του πυρήνα, προκαλεί την σκλήρυνση του, αποδίδοντας μια ελαφριά συμπιεστική ακαμψία στον δίσκο που βρίσκεται σε ήπια κατάσταση εκφυλισμού. Τα N/ mm ακαμψία 2100 ξαφνικά μειώθηκαν κατά 75-80% σε 400-500 N/ mm για ήπια, και το 3600 N/ mm ακαμψία μειώθηκε κατά 60-65% σε 1300 N/ mm για σοβαρή περίπτωση εκφυλισμού. Οι κάθετες ενδοδισκιακές τάσεις παρουσιάζουν μια σημαντική αλλαγή κατά τη γήρανση εκφύλιση, μεταξύ 0,6 - 1,6 MPa. Η παραμόρφωση και η διόγκωση του δίσκου ήταν μέγιστες σε ήπιο εκφυλισμό και μειώθηκαν κατά τη διάρκεια της γήρανσης κατά 30-85%, ενώ στον ξαφνική εκφυλισμό αυξήθηκαν απότομα κατά 200-300%.

Συμπεράσματα			
φάσεις ακαμψίας	ακαμψία N/mm		ποσοστό %
ήπια ακαμψία 1η φάση	2100	400-500	75-80%
έντονη ακαμψία 5η φάση	3600	1300	60-65%

Πίνακας 15 Αποτελέσματα ακαμψίας υγιή και εκφυλισμένου δίσκου.

Συμπεράσματα		
κάθετες τάσεις	διόγκωση- παραμόρφωση %	
ήπια ακαμψία 1η φάση	30%	85%
έντονη ακαμψία 5η φάση	200%	300%

Πίνακας 16 Αποτελέσματα τάσεων υγιή και εκφυλισμένου δίσκου.

Οι FE προσομοιώσεις των διαδικασιών εκφύλισης των τμημάτων της οσφυϊκής και των δίσκων μπορούν να βοηθήσουν τους ιατρούς να κατανοήσουν την έναρξη και την πρόοδο

του εκφυλισμού του δίσκου που θα συμβάλει στη βελτίωση των μεθόδων πρόληψης και θεραπείας, με σκοπό την αναγέννηση των ιστών του δίσκου.

Σε WHT, το διγραμμικό υλικό του δίσκου παρουσιάζει μια συμπεριφορά με μεγαλύτερη αντοχή στις έμμεσες και μικρότερες σε άμεσες φάσεις έλξης. Κατά συνέπεια, αν και το άμεσο φορτίο έλξης είναι μόνο 6% της έμμεσης, οι άμεσες παραμορφώσεις έλξης είναι 15-90% των έμμεσων, ανάλογα σχετικά με το βαθμό του εκφυλισμού. Επιπλέον, ο λόγος της άμεσης χαλάρωσης της πίεσης παραμένει περίπου 6-8%. Ως εκ τούτου, η άμεση έλξη που ελέγχεται από επιπλέον βάρη μολύβδου επιρροές ως επί το πλείστον από τις παραμορφώσεις που είναι υπεύθυνες για την αποδέσμευση των νεύρων, ενώ η χαλάρωση πίεσης επηρεάζεται κυρίως από το έμμεσο φορτίο έλξης που προέρχονται από την αφαίρεση του συμπιεστικού βάρους του σώματος και των μυών των δυνάμεων μέσα στο νερό. Μια ήπια μορφή εκφυλισμού στον δίσκο στο WHT δείχνει 0,15 mm άμεση, έμμεση 0,45 mm και 0,6 mm συνολικής επέκτασης, 0,2 mm άμεσες, έμμεσες 0,6 χιλιοστά και 0,8 mm σύνολο οπίσθια συστολή. Ένας σοβαρά εκφυλισμένος δίσκος παρουσιάζει άμεση 0,05mm, 0,05 mm έμμεση και 0,1 mm σύνολο επέκτασης 0,05 mm άμεση, 0,25 mm έμμεσο και συνολικό 0,3 mm οπίσθια συρρίκνωση. Αυτές οι παραμορφώσεις που σχετίζονται με την στιγμιαία ελαστική φάση της θεραπείας WHT διπλασιάστηκαν κατά τη διάρκεια της περιόδου ερπυσμού.

<b>Συμπεράσματα θεραπείας</b>		
<b>εκφύλιση/ μετατόπιση [mm]</b>	1η φάση επέκτασης	1η φάση συρρίκνωσης
<b>Άμεση</b>	0,15	0,2
<b>Έμμεση</b>	0,45	0,6
<b>συνολική έκταση</b>	0,6	-
<b>συνολική οπίσθια</b>	-	0,8

Πίνακας 17 Συμπεράσματα θεραπείας εκφύλισης υγιούς σπονδυλικής στήλης.

<b>Συμπεράσματα θεραπείας</b>		
<b>εκφύλιση/μετατόπιση [mm]</b>	5η φάση επέκτασης	5η φάση συρρίκνωσης
<b>Άμεση</b>	0,05	0,05
<b>Έμμεση</b>	0,05	0,25
<b>συνολική έκταση</b>	0,1	-
<b>συνολική οπίσθια</b>	-	0,3

Πίνακας 18 Συμπεράσματα θεραπείας εκφύλισης σπονδυλικής στήλης.

Σε περιπτώσεις συμπίεσης, η αποτυχία ξεκινάει να εμφανίζεται στην περιοχή των φλοιωδών και σπογγωδών οστών του μέσου σπονδυλικού σώματος. Η προσομοίωση έδειξε πως η πιο ευάλωτη περιοχή του σπονδυλικού σώματος για την περίπτωση τραυματισμού είναι κατά κύριο λόγο η άνω οστεώδη τελική πλάκα από τη μεσαία γραμμή προς το πρόσθιο τμήμα της στήλης.

Εκτός από τα ποσοτικά αποτελέσματα αποτυχίας, οι προσομοιώσεις ήταν επίσης σε θέση να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με μια πιθανή θραύση κατά την διάρκεια κάμψης, επέκτασης

και συμπίεσης. Σε περίπτωση παράτασης της εφαρμογής φορτίου, ξεκινούσε κάταγμα στο οπίσθιο τμήμα της. Την στιγμή πριν από το κάταγμα το μοντέλο παρουσίασε μια υψηλή πίεση στη θέση αυτή. Εκτός από αυτά τα τμήματα, άλλες περιοχές που παρουσιάστηκαν κατάγματα κατά την κάμψη και την επέκταση ήταν η ακανθώδης απόφυση, και το πρόσθιο σώμα.

Επιπλέον, τόσο στην κάμψη όσο και την επέκταση οι προσομοιώσεις έδειξαν αυξημένα επίπεδα πίεσης πριν και αμέσως μετά την αποτυχία. Παρόμοια αποτελέσματα βρέθηκαν και στην περίπτωση συμπίεσης. Το κάταγμα ξεκίνησε από την ανώτερη οστεώδη τελική πλάκα του C6, όπου, και πάλι, το μοντέλο παρουσίασε υψηλή πίεση αμέσως πριν από το κάταγμα.

Η έναρξη του κατάγματος για αυτές τις περιπτώσεις εμφανίζονται σε διάφορες περιοχές του σπονδυλικού σώματος και σε συνδυασμό με την αυξημένη πίεση πριν και μετά το κάταγμα, οι τελικές πλάκες είναι οι περιοχές που δέχονται τα υψηλότερα φορτία πίεσης.

Άλλες περιπτώσεις προσομοιώσεων έγιναν με σκοπό να προσδιοριστεί η εμβιομηχανική ανοχή των τμημάτων L1 L2 σε περιπτώσεις συμπίεσης και στρέψης και να απεικονιστούν τα πεδία που αναπτύσσεται η πίεση. Τα επίπεδα της πίεσης παρουσιάζονται με βάση τις δυνάμεις εφαρμογής συμπίεσης 150 N φορτώνεται περαιτέρω με 10 Nm. Στο φλοιώδες οστό παρουσιάζεται ισοδύναμη κατανομή τάσης, που διαφέρει στο σπογγώδες οστό.

Παρά το γεγονός ότι τόσο στο φλοιό και όσο και στο σπογγώδες οστό, τα εκθέματα παρουσιάζουν παρόμοια κατανομή πίεσης, με τις μέγιστες τάσεις να διαφέρουν από δύο μεγέθη (25.177 MPa για το φλοιώδες οστό και 0,372 MPa για το σπογγώδες οστό). Ωστόσο, οι τάσεις που αναπτύχθηκαν και στις δύο περιπτώσεις είναι κατώτερες από τα όρια κατάγματος των οστών.

L1-L2 vertebrae under compression [30]		C5-C6-C7 response in compression [17]			vertical compressive stress distribution in the mid-sagittal horizontal section healthy [32]			long-term disc [32]		Suddenly degenerated disc [32]	
Δύναμη (N)	Μετατόπιση (mm)	Δύναμη (N)	Μετατόπιση (mm)		Θλιπτική τάση (Mpa)	Μετατόπιση (mm)		Μετατόπιση (mm)		Μετατόπιση (mm)	
1000	0,7	500	0,6	-	0,5	2	34	2	34	2	30
2000	1,3	1000	1,1	-	1	3,9	32	3,9	32	3,9	11,3
3000	1,8	1500	1,5	-	1,5	5,6	27	7	20	4	11
4000	2,4	2000	1,7	2,7	2	9	18	8,2	13	8	9
5000	2,9	2500	1,9	2,4	2,5	9,3	-	8,3	12	-	-
6000	3,1	3000	2,2		3	-	-	8,4	11	-	-
7000	3,4	3500			3,5	-	-	9	-	-	-
8000	3,7	4000									

Πίνακας 19 Αποτελέσματα μετατοπίσεων σπονδυλικής στήλης.

Αυτή η τάση μπορεί να παρατηρηθεί σαφώς στο αναπτυσσόμενο πεδίο πίεσης εντός του μεσοσπονδύλιου δίσκου, ως την μέγιστη πίεση λόγω του συνδυασμένου φορτίου που εφαρμόζεται κυρίως στην στεφάνη στα στρώματα του ινώδη.

Το γεγονός ότι η αναπτυγμένη πίεση στους σπονδύλους είναι κατά πολύ υψηλότερη σε σύγκριση με εκείνη του μεσοσπονδύλιου δίσκου, μπορεί να εξηγήσει στην αυξημένη ακαμψία του οστού σε σύγκριση με τη ελαστική του μεσοσπονδύλιου δίσκου, στο οποίο παρουσιάζεται αυξημένες παραμορφώσεις που προκύπτουν από την εφαρμοζόμενη δύναμη. Η θεραπεία WHT αποφορτίζει το συμπιεσμένο δίσκο: επεκτείνει το ύψος του δίσκου, μειώνεται η διόγκωση, οι πιέσεις και οι δυνάμεις των φυτικών ινών, αυξάνει η ελαστικότητα των αρθρώσεων, χαλαρώνει τους μυς, ανακουφίζει από τον πόνο και μπορεί να αποτρέψει σοβαρότερα προβλήματα. Η θεραπεία WHT είναι μια αποτελεσματική και μη επεμβατική μέθοδος για τη θεραπεία οσφυϊκής δισκοπάθειας.

## ❖ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΩΣ ΣΥΝΟΛΟ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχουν πολλές αιτίες από τις οποίες μπορεί να προκληθεί πόνος στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης, όπως οι ίδιοι οι δίσκοι, τα οστά και οι μύες, μπορεί όλα να είναι μια πηγή του πόνου.

Πολλές από αυτές τις αιτίες του πόνου στην οσφυϊκή μοίρα της σπονδυλικής στήλης είναι αλληλένδετες μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η αστάθεια της άρθρωσης μπορεί να οδηγήσει σε εκφύλιση του δίσκου, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να ασκήσει πίεση στις ρίζες νεύρων, κ.λπ.

Έτσι, με την χρήση της τεχνικής μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων που αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες μπορεί να επιτευχθεί η ανακατασκευή οποιουδήποτε τμήματος της σπονδυλικής στήλης με σκοπό την μελέτη της. Αυτή η τεχνική δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να προσομοιώσει με ακρίβεια τα τμήματα της σπονδυλικής στήλης τα οποία υποβάλλονται σε διάφορες συνθήκες φόρτισης που στόχο έχει να εξεταστεί πως αντιδρούν σε αυτά.

Στις προσομοιώσεις κατά τις συνθήκες φόρτωσης μπορεί να προκληθεί αστοχία κατά την διαδικασία της έντασης, κάμψης, επέκτασης και της συμπίεσης, τα οποία εφαρμόζονται με πολλών ειδών τρόπων φόρτισης, τα αποτελέσματα των οποίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην μελέτη της κίνησης και της δομής της σπονδυλικής στήλης. Οι προσομοιώσεις αναπτύσσονται με βάση τα γεωμετρικά δεδομένα και τα διαθέσιμα στοιχεία υλικών από την κάθε βιβλιογραφία. Οι ιδιότητες των υλικών και τα κριτήρια αστοχίας των τμημάτων της σπονδυλικής στήλης εφαρμόζονται σύμφωνα με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα και εξετάζεται η εγκυρότητά τους.

Από παρατηρήσεις που προκύπτουν από τα πειράματα μοντέλων, των περιοχών της σπονδυλικής στήλης που δέχονται αυξημένα επίπεδα φόρτισης, δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να εντοπίσουν τις ακριβείς θέσεις των περιοχών της σπονδυλικής στήλης που κινδυνεύουν από πιθανά κατάγματα.

Σε περιπτώσεις υψηλής πίεσης στο κέντρο των εσωτερικών στρωμάτων του δακτυλίου η πίεση που ασκείται από το εσωτερικό τμήμα του μπορεί να διαχειριστεί τα φορτία αυτά χωρίς να παρουσιαστεί κάποιος τραυματισμός στον δίσκο. Ωστόσο, όταν ο δίσκος χάσει την πίεση του, τα εσωτερικά στρώματα του δακτυλίου γίνονται πιο ευάλωτα, με αποτέλεσμα το πρόσθιο τμήμα του σπονδύλου να παραμορφώνεται κατά την κάμψη. Η μεταφορά του φορτίου από τον άνω σπόνδυλο στο γειτονικό του πραγματοποιείται διαμέσου των οπίσθιων στοιχείων κατά την κάμψη και την έκταση.

Τα έντονα και ακτινικά φόρτια που ασκούνται στις πρόσθιες και οπίσθιες πλευρές του σπονδύλου μπορούν να προκαλέσουν την μείωση της πίεσης. Η απώλεια της πίεσης του δίσκου κατά την κάμψη και την επέκταση μπορεί να προκαλέσει περιφερικά σχισμές μεταξύ των στρώματα του δακτυλίου και η πιθανότητα εμφάνισης των σχισμών αυξάνεται με την ηλικία.

Το σπογγώδες οστό στον δίσκο όταν υποβάλλεται σε μεγάλα αξονικά φορτία κατά την κάμψη και μεγάλες αξονικές τάσεις στην επέκταση έχει ως συνέπεια την απώλεια της πίεσης του δίσκου. Η απώλεια πίεσης έχει αμελητέα επίδραση στις τιμές των τάσεων κατά την κάμψη, ενώ η μείωσή της προκαλεί μεγάλες καταπονήσεις σε αξονική θλίψη κατά την έκταση. Ως εκ τούτου, η αστοχία του σπογγώδες οστού σε κάμψη και έκταση είναι σύνηθες φαινόμενο.

Η αστοχία κατά την διάρκεια της συμπίεσης μπορεί να ξεκινήσει από τις σπονδυλικές τελικές πλάκες του σπονδύλου. Ομοίως, η αποτυχία κατά την επέκταση, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το ξεκίνημα κατάγματος στο οπίσθιο τμήμα της αυχενικής μοίρας, όπως αναφέρεται και σε βιβλιογραφίες.

Οι παθήσεις των δίσκων είναι συχνότεροι στην περιοχή της οσφυϊκής μοίρας της σπονδυλικής στήλης. Πρόκειται για το μέρος της σπονδυλικής στήλης που βρίσκεται μεταξύ του θώρακα και της λεκάνης. Οι τραυματισμοί του κάτω μέρους της πλάτης αποτελούν περίπου το 20% όλων των τραυματισμών και ασθενειών που συμβαίνουν στους χώρους εργασίας.

Με την αύξηση της ηλικίας, οι δίσκοι γίνονται πιο επίπεδοι και αδύνατοι. Το εξωτερικό περιφερικό τους μέρος (ινώδης δακτύλιος), μπορεί να υποστεί ρήξη, να προβάλλει ο κεντρικός πυρήνας του δίσκου (πηκτοειδής πυρήνας) και να πιέζει τα νεύρα.

Η δισκοπάθεια που εκφράζεται με οσφυαλγία δηλαδή πόνο στη μέση, επηρεάζει 80% των ενηλίκων, τουλάχιστο μία φορά στη ζωή τους. Το 90% αυτών που παρουσιάζουν μία φορά δισκοπάθεια, θα υποτροπιάσουν δηλαδή θα ταλαιπωρηθούν ξανά από τη νόσο. Στη δισκοπάθεια ο μεσοσπονδύλιος δίσκος προβάλλει και πιέζει τα νεύρα της σπονδυλικής στήλης προκαλώντας πόνο.

Οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι βρίσκονται μεταξύ των σπονδύλων. Παίζουν σημαντικό ρόλο στη στατική και δυναμική των κινήσεων της σπονδυλικής στήλης. Όταν ένας δίσκος υποστεί βλάβη, η ρήξη και προβάλλει προς τα έξω, δημιουργεί μια πάθηση η οποία ονομάζεται δισκοκήλη.

Οι δισκοπάθειες λόγω δισκοκήλης είναι συχνότερες στις ηλικίες μεταξύ 30 και 40 ετών. Μαζί με τον κεφαλόπονο αποτελούν τις σημαντικότερες αιτίες περιορισμού των δραστηριοτήτων και απώλειας παραγωγικότητας.

Η ορθή ενημέρωση και η λήψη μερικών βασικών μέτρων μπορούν να αποτελέσουν μια πρόληψη που είναι δυνατόν να αποτρέψει το μεγαλύτερο ποσοστό των τραυματισμών της πλάτης και ως εκ τούτου το πρόβλημα των πόνων στην πλάτη.

Τα μέτρα πρόληψης μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε μορφής δραστηριότητας είτε στο σπίτι είτε στην εργασία ή κατά την ψυχαγωγία.

Ένα πρόγραμμα τακτικής σωματικής εξάσκησης με ιδιαίτερη έμφαση στην ενδυνάμωση και το γύμνασμα των μυών της κοιλιάς και της πλάτης είναι ένα μέτρο πρόληψης των παθήσεων της σπονδυλικής στήλης. Οι μυς αυτοί όταν είναι γυμνασμένοι, υποστηρίζουν και προστατεύουν καλύτερα την πλάτη και τη σπονδυλική στήλη.

Η στάση του σώματος κατά τις διάφορες δραστηριότητες, έχει μεγάλη σημασία στην πρόληψη των πόνων της μέσης και τη δυσκοπάθεια.

- ✓ Το βάρος σώματος όταν είναι υπερβολικό, προκαλεί επιπρόσθετη ταλαιπωρία στη σπονδυλική μας στήλη. Εκείνο που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή είναι τα περιττά κιλά που συσσωρεύονται γύρω από τη μέση, πράγμα το οποίο παρατηρείται συχνά στους άνδρες. Τα περιττά κιλά αλλάζουν τη στατική του σώματος με αποτέλεσμα να καταπονείται η σπονδυλική στήλη και να προκαλούνται τραυματισμοί με πόνους.
- ✓ Ακόμα και ο τρόπος με τον οποίο κοιμάται ένα άτομο μπορεί να παίξει ρόλο στην πρόληψη.
- ✓ Οι συνήθειες διαβίωσης στους χώρους εργασίας παίζουν καθοριστικό ρόλο.
- ✓ Μια από τις συνηθέστερες αιτίες τραυματισμού είναι η ανύψωση και μεταφορά βαριών αντικειμένων. Τα άτομα που πρέπει να σκύβουν, να ανυψώνουν και να μεταφέρουν φορτία ή αντικείμενα, διατρέχουν το μεγαλύτερο κίνδυνο να υποστούν τραυματισμούς και βλάβες στην πλάτη με πρόκληση πόνων. Οι πόνοι αυτοί μπορεί να εμφανιστούν με οξύ απότομο τρόπο ή να γίνουν χρόνια.

Σε περιπτώσεις που οι παθήσεις στην περιοχή της σπονδυλικής στήλης είναι σε προχωρημένο στάδιο η φυσικοθεραπείες και έπειτα η χειρουργικές επεμβάσεις μπορούν να την επαναφέρουν αν όχι πλήρως, σε μεγάλο βαθμό. Η χειρουργική επέμβαση επιφυλάσσεται μόνο για πολύ σοβαρές και υποτροπιάζουσες περιπτώσεις.

Οι FE προσομοιώσεις των διαδικασιών εκφύλισης των τμημάτων της οσφυϊκής μοίρας και των δίσκων αποτελούν ένα σημαντικό βήμα σχετικά με την μελέτη και την θεραπεία των τμημάτων αυτών, το οποίο παρέχει στους ιατρούς την δυνατότητα να κατανοήσουν την έναρξη και την πρόοδο του εκφυλισμού του δίσκου που θα συμβάλει στη βελτίωση των μεθόδων πρόληψης και θεραπείας, με σκοπό την αναγέννηση των ιστών του δίσκου.

## Βιβλιογραφία

1. *A Comparative Study of the Mechanical Response of Various Numerical Models of the Human Lumbar Intervertebral Disc* M. Satraki, S. K. Kourkoulis Department of Mechanics, National Technical University of Athens, Greece E. A. Magnissalis First Orthopaedic Department of the University of Athens, Greece G. Ferentinos Kostas Liontos and associates, ANSYS Channel Partner Greece, 2006
2. Adams, M.A., McNally, D.S., Dolan, P. (1996). Stress distributions inside intervertebral discs. The effects of age and degeneration. *J. Bone Joint Surg. Br.* 78(6), 965-972
3. Adams, M.A., Freeman, B.J., Morrison, H.P., Nelson, I.W., Dolan, P. (2000), Mechanical initiation of intervertebral disc degeneration, *Spine*, 25(13), 1625-1636.
4. Adams, M.A., Bogduk, N., Burton, K., Dolan, P. (2002). *The Biomechanics of Back Pain*, Churchill Livingstone, London
5. Acaroglu, E.R., Iatridis, J.C., Setton, L.A., Foster, R.J., Mow, V.C., Weidenbaum, M. (1995). Degeneration and aging affect the tensile behaviour of human lumbar annulus fibrosus, *Spine*, 20(24), 2690-2701.
6. *Analysis of large compression loads on lumbar spine in flexion and in torsion using a novel wrapping element* A. Shirazi-Adl\_ Department of Mechanical Engineering, Division of Applied Mechanics, Ecole Polytechnique de Montreal, P.O. Box 6079, Station Centre-Ville, Montreal, Que, Canada H3C 3A7 Accepted 23 November 2004
7. *Anatomy and pathology of the aging spine*1 Andreas Prescher Institut für Anatomie, Uniöersitaötsklinikum der RWTH Aachen, 52057 Aachen, Germany Received 12 November 1997; accepted 14 November 1997.
8. Andersson, G.B., Schultz, A.B., Nachemson, A.L., (1983). Intervertebral disc pressures during traction, *Scand. J. Rehabil. Med. Suppl.* 9, 88-91 28
9. Antosik, T., Awrejcewicz, J., (1999). Numerical and Experimental Analysis of Biomechanics of Three Lumbar Vertebrae, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 37(3). 413-434.
10. Bader, D.L., Bouten, C. (2000). Biomechanics of soft tissues. In: Dvir, Z. (Ed.), *Clinical Biomechanics*, Churchill Livingstone, New York, Edinburgh, London, Philadelphia, 35-64
11. Bene, I., (1988). Das Gewichtbad, *Zeitschrift für Physikalische Medizin, Balneolog Medizinische Klimatologie.* 17, 67-71. 46
12. Beaton DE, Schemitsch E. Measures of health-related quality of life and physical function. *Clin Orthop.* Aug;(413):90-150, 2003.
13. Bene I., Kurutz, M., (1993). Weightbath and its biomechanics, (in Hungarian), *Orvosi Hetilap*, 134. 21. 1123-1129.



14. Benzel, E.C.: *Biomechanics of Spine Stabilization*, (2001). American Association of Neurological Surgeons, Rolling Meadows, Illinois.
15. Bogduk, N., Twomey, L.T. (1987). *Clinical Anatomy of the Lumbar Spine*, ChurchillLivingstone, New York.
16. Carlucci, Chiu, Clifford. *Spinal mouse for assessment of spinal mobility. J Minim Invasive Spinal Tech.* 20
17. *Cervical spine segment finite element model for traumatic injury prediction* Jennifer A. DeWit, Duane S. Cronin\* University of Waterloo, Mechanical Engineering, Waterloo, Ontario, Canada
18. Chen C.-S., Cheng C.-K., Liu C.-L., Lo W.-H., "Stress Analysis of the Disc Adjacent to Interbody Fusion in Lumbar Spine", *Medical Engineering and Physics*, vol 23, 483-491, 2001.
19. Connolly JF, Guse R, Lippiello L, et al: *Development of an osteogenic bone marrow preparation. J Bone Joint Surg* 71A:684-691,1989.
20. Cuello JC, *Engineering to biology and biology to engineering, The bi-directional connection between engineering and biology in biological engineering design, Int J Engng Ed* 2005, 21, 1-7.
21. Cassinelli, E., Kang, J.D. (2000). *Current understanding of lumbar disc degeneration, Operative Techniques in Orthopaedics*, 10(4), 254-262.
22. Cheung, J.T.M., Zhang, M., Chow, D.H.K., (2003). *Biomechanical Responses of the Intervertebral Joints to Static and Vibrational Loading: a Finite Element Study, Clinical Biomechanics*, 18(9), 790-799.
23. *Differences in early sagittal plane alignment between thoracic and lumbar adolescent idiopathic scoliosis* Tom P.C. Sch€osser, MDa, Suken A. Shah, MDb, Samantha J. Reichardb, Kenneth Rogers, PhD, ATCb, Koen L. Vincken, PhDc, Ren\_e M. Castelein, MD, PhDa, *The Spine Journal* 14 (2014) 282–290).
24. Denoziere, G., (2004). *Numerical Modeling of Ligamentous Lumbar Motion Segment*, Master thesis, Georgia Institute of Technology, 148 p. Denoziere, G., Ku, D.N., (2006). *Biomechanical Comparison Between Fusion of Two Vertebrae and Implantation of an Artificial Intervertebral Disc, Journal of Biomechanics*, 39(4), 766-775.
25. Dolan, P., Adams, M.A. (2001). *Recent advances in lumbar spinal mechanics and their significance for modelling, Clinical Biomechanics*, 16(Suppl.), S8-S16.
26. Dvir, Z. (2000). *Clinical Biomechanics*, Churchill Livingstone, New York, Edinburgh, London, Philadelphia.
27. Ferguson, S.J., Steffen, T. (2003). *Biomechanics of the aging spine, European Spine Journal*, Suppl 2, S97-S103.

28. Kurutz, M. (2006a). Age-sensitivity of time-related in vivo deformability of human lumbar motion segments and discs in pure centric tension, *Journal of Biomechanics*, 39(1), 147-157.
29. Kurutz, M., (2006b). In vivo age- and sex-related creep of human lumbar motion segments and discs in pure centric tension, *Journal of Biomechanics*, 39(7), 1180-9
30. Kurutz, M. (2010). Finite element modeling of the human lumbar spine, In: Moratal, D. (ed.): *Finite Element Analysis, SCIYO, Rijeka*, 690 p., 209-236.
31. Kurutz, M, Bender, T. (2010). Weightbath hydrotraction treatment: application, biomechanics and clinical effects, *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, 2010(3), 19-
32. Kurutz, M., Oroszvary, L. (2010). Finite element analysis of weightbath hydrotraction treatment of degenerated lumbar spine segments in elastic phase, *Journal of Biomechanics*, 43(3), 433-441.
33. Kurutz, M., Tornyo, A., (2004). Numerical simulation and parameter identification of human lumbar spine segments in traction, In: Bojtar I. (ed.): *Proc. of the First Hungarian Conference on Biomechanics, Budapest, Hungary, June 10-11, 2004, ISBN 963 420 799 5*, 254-263.
34. Kurutz, M., Bene I., Lovas, A., (2003). In vivo deformability of human lumbar spine segments in pure centric tension, measured during traction bath therapy, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 5(1), 67-92.
35. Lavaste, F., Skalli, W., Robin, S., Roy-Camille, R., Mazel, C., (1992). Three-dimensional Geometrical and Mechanical Modelling of Lumbar Spine, *Journal of Biomechanics*, 25(10), 1153-1164.
36. Lekhnitskii S. G., *Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body*, Holden-Day Inc, San Francisco, 1963.
37. McGill, S.M. (2000). Biomechanics of the thoracolumbar spine, In: Dvir, Z. (Ed.), *Clinical Biomechanics*, Churchill Livingstone, New York, Edinburgh, London, Philadelphia, 103-139.
38. McNally, D.S., Adams, M.A. (1992). Internal intervertebral disc mechanics as revealed by stress profilometry, *Spine*, 17(1), 66-73.
39. Moll, K., (1956). Die Behandlung der Discushernien mit den sogenannten "Gewichtsbadem", *Contempl. Rheum.*, 97, 326-329.
40. Moll, K., (1963). The role of traction therapy in the rehabilitation of discopathy, *Rheum. Balneol. Allerg.*, 3, 174-177.
41. Mosekilde, L. (2000). Age-related changes in bone mass, structure, and strength effects of loading, *Zeitschrift für Rheumatologie*, 59(Suppl. 1), 1-9.
42. Nachemson, A.L. (1981). Disc pressure measurements, *Spine*, 6(1), 93-97.

43. Natarajan, R.N., Williams, J.R., Andersson, G.B., (2004). *Recent advances in analytical modelling of lumbar disc degeneration. Spine, 29(23), 2733-2741.*
44. Noailly, J., Wilke, H.J., Planell, J.A., Lacroix, D., (2007). *How Does the Geometry Affect the Internal Biomechanics of a Lumbar Spine Bi-segment Finite Element Model? Consequences on the Validation Process, Journal of Biomechanics, 40(11), 2414-2425.*
45. Olah, M., Molnar, L., Dobai, J., Olah, C., Fehér, J., Bender, T., (2008). *The effects of weightbath traction hydrotherapy as a component of complex physical therapy in disorders of the cervical and lumbar spine: a controlled pilot study with follow-up, Rheumatology International, 28(8), 749-756.*
46. Panjabi, M.M., Oxland, T., Takata, K., Goel, V., Duranceau, J., Krag, M., (1993). *Articular Facets of the Human Spine, Quantitative Three-dimensional Anatomy, Spine, 18(10), 1298-1310.*
47. Ramos, G., Martin, W., (1994). *Effects of vertebral axial decompression on intradiscal pressure, Journal of Neurosurgery. 81(3), 350-353.*
48. Rohlmann, A., Zander, T., Schmidt, H., Wilke, H.J., Bergmann, G., (2006). *Analysis of the influence of disc degeneration on the mechanical behaviour of a lumbar motion segment using the finite element method, Journal of Biomechanics, 39(13), 2484-2490.*
49. Sato, K., Kikuchi, S., Yonezawa, T. (1999). *In vivo intradiscal pressure measurement in healthy individuals and in patients with ongoing back problems, Spine, 24(23), 2468-2474.*
50. Schultz S, Maximillian L. *Measurement of shape and mobility of spinal column validation of the spinal mouse by comparison with functional radiographs. University, 1999 Munich Germany.*
51. Shirazi-Adl, *Analysis of large compression loads on lumbar spine in flexion and in torsion using a novel wrapping element, Journal of Biomechanics, Volume 39, Issue 2, 2006, 267-275*
52. Shirazi-Adl, M. Parnianpour, *Load-bearing and stress analysis of the human spine under a novel wrapping compression loading, Clinical Biomechanics 15 (2000) 718-725.*
53. *The Pediatric Spine Development and the Dysraphic State, Anthony J. Raimondi M.D. Maurice Choux M.D. in principles of Pediatric Neurosurgery (1989).*
54. T. Pitzén, F. H. Geisler, D. Matthis, H. Müller-Storz, K. Pedersen, W. Steudel, *The influence of cancellous bone density on load sharing in human lumbar spine: a comparison between an intact and a surgically altered motion segment, European Spine Journal (2001) 10 :23–29.*
55. Wu J.S.S., Chen J.H., *“Clarification of the Mechanical Behaviour of Spinal Motion Segments through a Three Dimensional Poroelastic Mixed Finite Element Model”, Medical Engineering and Physics, vol 18(3), 215-224, 1996*

56. [https://www.google.gr/search?q=%CE%B9%CF%83%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%B3%CE%B9%CE%B1&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEWjt6M3DiLnKAhUJXiWkHadoAQYQ\\_AUIBygB&biw=1366&bih=631#tbm=isch&q=%CE%B9%CF%83%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%B3%CE%B9%CE%B1+%CF%83%CF%80%CE%BF%CF%89%CE%B4%CE%B8%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%B7+%CE%BC%CE%BF%CE%B9%CF%81%CE%B1&imgrc=iiErL37VlwJJ2M%3A](https://www.google.gr/search?q=%CE%B9%CF%83%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%B3%CE%B9%CE%B1&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEWjt6M3DiLnKAhUJXiWkHadoAQYQ_AUIBygB&biw=1366&bih=631#tbm=isch&q=%CE%B9%CF%83%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%B3%CE%B9%CE%B1+%CF%83%CF%80%CE%BF%CF%89%CE%B4%CE%B8%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%B7+%CE%BC%CE%BF%CE%B9%CF%81%CE%B1&imgrc=iiErL37VlwJJ2M%3A)
57. [http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1190/1/Nimertis\\_Petropoulou.pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1190/1/Nimertis_Petropoulou.pdf)
58. [https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ\\_AUIBygB&biw=1366&bih=631#imgrc=CUs9GeTolPVFTM%3A](https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ_AUIBygB&biw=1366&bih=631#imgrc=CUs9GeTolPVFTM%3A)
59. [https://www.google.gr/search?q=%CE%BC%CE%B5%CF%83%CE%BF%CF%83%CF%80%CE%BF%CE%BD%CE%B4%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CF%82+%CE%B4%CE%B9%CF%83%CE%BA%CE%BF%CF%82&biw=1366&bih=631&source=Inms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEWjH0p3RwazKAhUKCCwKHUVoAwQQ\\_AUIBigB#tbm=isch&q=intervertebral+disc+ANATOMY&imgdii=UXnrr2iN0OEDuM%3A%3BUXnrr2iN0OEDuM%3A%3BCzL\\_ytaVEwIwbM%3A&imgrc=UXnrr2iN0OEDuM%3A](https://www.google.gr/search?q=%CE%BC%CE%B5%CF%83%CE%BF%CF%83%CF%80%CE%BF%CE%BD%CE%B4%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CF%82+%CE%B4%CE%B9%CF%83%CE%BA%CE%BF%CF%82&biw=1366&bih=631&source=Inms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEWjH0p3RwazKAhUKCCwKHUVoAwQQ_AUIBigB#tbm=isch&q=intervertebral+disc+ANATOMY&imgdii=UXnrr2iN0OEDuM%3A%3BUXnrr2iN0OEDuM%3A%3BCzL_ytaVEwIwbM%3A&imgrc=UXnrr2iN0OEDuM%3A)
60. [https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ\\_AUIBygB&biw=1366&bih=631#imgrc=4q0uJKBWBpJrTM%3A](https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ_AUIBygB&biw=1366&bih=631#imgrc=4q0uJKBWBpJrTM%3A)
61. <http://www.creteplus.gr/news/osfualgia--isxialgia---lower-back-pain-sciatica-128686.html>
62. [https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ\\_AUIBygB&biw=1366&bih=631#tbm=isch&q=+coccyx+&imgrc=H0lek-wUnqcyam%3A](https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ_AUIBygB&biw=1366&bih=631#tbm=isch&q=+coccyx+&imgrc=H0lek-wUnqcyam%3A)
63. [http://www.backpainstop.gr/home/back\\_pain.html](http://www.backpainstop.gr/home/back_pain.html)
64. [https://www.google.gr/search?q=%CE%BA%CF%85%CF%81%CF%84%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1+%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BB%CE%B7%CF%82&biw=1366&bih=631&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEWjXz9Cvr6zKAhUG\\_SwKHQ5KC7kQ\\_AUIBygC#imgrc=eycnaQ96nM3O-M%3A](https://www.google.gr/search?q=%CE%BA%CF%85%CF%81%CF%84%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1+%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BB%CE%B7%CF%82&biw=1366&bih=631&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEWjXz9Cvr6zKAhUG_SwKHQ5KC7kQ_AUIBygC#imgrc=eycnaQ96nM3O-M%3A)
65. <http://www.neurocenter.gr/spondyliki-stili.html>
66. [https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ\\_AUIBygB&biw=1366&bih=631#tbm=isch&q=+ligaments+of+spine&imgrc=4vIMmB5buHBJQM%3A](https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ_AUIBygB&biw=1366&bih=631#tbm=isch&q=+ligaments+of+spine&imgrc=4vIMmB5buHBJQM%3A)
67. [https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ\\_AUIBygB&biw=1366&bih=631#tbm=isch&q=+sacrum+coccyx+ANATOMY&imgrc=6okXpxlyP5\\_awM%3A](https://www.google.gr/search?q=2+cervical&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwioy9LfwqzKAhUmw3IKHeIUCFoQ_AUIBygB&biw=1366&bih=631#tbm=isch&q=+sacrum+coccyx+ANATOMY&imgrc=6okXpxlyP5_awM%3A)
68. <http://www.boro.gr/98770/lordwsh-kai-skoliwsh-aitia-kai-askhseis>

69. [http://www.sapkasgeorge.gr/books/Emviomixaniki\\_Emfitevmaton\\_SS/1-A-KEFALAIO/6A.pdf](http://www.sapkasgeorge.gr/books/Emviomixaniki_Emfitevmaton_SS/1-A-KEFALAIO/6A.pdf)
70. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%80%CE%BF%CE%BD%CE%B4%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE\\_%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BB%CE%B7](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%80%CE%BF%CE%BD%CE%B4%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BB%CE%B7)
71. <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse2/seyp/nos/2004/Bitsou/attached-document/2004Bitsou.pdf>
72. <http://www.4disabled.gr/archives/9043>
73. <http://www.eurospine.org/motionpreservation-greek.htm>
74. <http://www.slideshare.net/AlexanderBardis/062013-39130539>
75. [https://www.google.gr/search?q=%CE%B9%CE%BD%CF%89%CE%B4%CE%B7%CF%83+%CE%B4%CE%B1%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CF%82&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwil8BdgbnKAhVHZCwKHfPxDB8Q\\_AUICCGC&biw=1366&bih=631#imgsrc=yI4WeF35QSzB8M%3A](https://www.google.gr/search?q=%CE%B9%CE%BD%CF%89%CE%B4%CE%B7%CF%83+%CE%B4%CE%B1%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CF%82&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwil8BdgbnKAhVHZCwKHfPxDB8Q_AUICCGC&biw=1366&bih=631#imgsrc=yI4WeF35QSzB8M%3A)
76. Α. Χατζηπαύλου, Μ. Τζερμιαδιανός, Ι. Γαϊτάνης. Σπονδυλική Στήλη: Τι πρέπει να γνωρίζετε. Ιατρικές Εκδόσεις Πασχαλίδης: 2005.
77. «αναλυση οσφυικου σπονδυλουυπο πραγματικες φορτισεις» εκπονηση: αλκιβιαδης μαρης επιβλεπων καθηγητης: χριστοφορος προβατιδης, καθηγητης ε.μ.π αθινα, σεπτέμβριος 2013
78. επειγοντολογία μπαλτοπουλος παναγιωτης καθηγητης παν/μιου αθινων συντονιστης δ/ντης α ορθοπαιδικη κλινικη «κατ» αναγνωστακος κων/νος ειδικευομενος ιατρος.
79. εμβιομηχανικες ιδιοτητες ανατομικων δομων σπονδυλικης στηλης, νικολαος α. σταυροπουλος, ειδικευομενος α' ορθοπεδικης κλινικης ιατρικης σχολης εκπα)
80. Παπαδόπουλος Νικόλαος Ι., Κατρίσης Επαμεινώνδας, Ανατομική του ανθρώπου, Τόμος 1, Ανατομική του ανθρώπου, 2002.
81. Χρ. Προβατίδης, (2000) Βιοιατρική Τεχνολογία, πρόχειρες σημειώσεις του μαθήματος, τεύχος 1, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
82. Finite Element Modeling and Simulation of Healthy and Degenerated Human Lumbar Spine Marta Kurutz<sup>1</sup> and Laszlo Oroszvary<sup>2</sup> <sup>1</sup>Budapest University of Technology and Economics, <sup>2</sup>Knorr-Bremse Hungaria Ltd, Budapest, Hungary
83. White, A. A., Panjabi, M. M. (1990). *Clinical Biomechanics of the Spine*, Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, etc