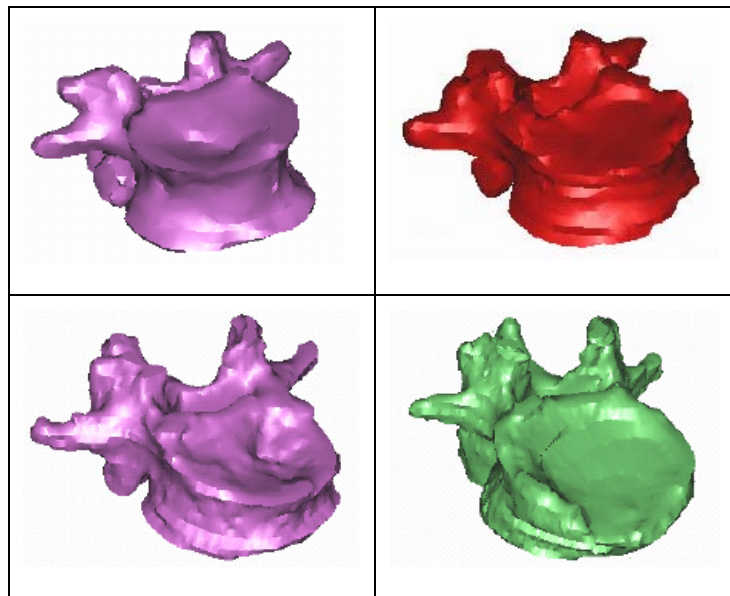




Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς σπονδύλων
διαφορετικού βαθμού κατάγματος με τη μέθοδο των
πεπερασμένων στοιχείων»**



Μαρούγκας Σπυρίδων

Επιβλέπων: Χρ. Προβατίδης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2007

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η οστεοπόρωση αποτελεί τη συχνότερη μεταβολική νόσο των οστών και ταλαιπωρεί παγκοσμίως μεγάλο αριθμό ανθρώπων – ιδιαίτερα ηλικιωμένες γυναίκες. Η νόσος αυτή είναι η βασική αιτία δημιουργίας καταγμάτων. Τα κατάγματα ευθραστότητας (fragility), όπως διεθνώς αναφέρονται, κοστίζουν ετησίως 1,5 δισεκατομμύρια λίρες στη Μεγάλη Βρετανία και 13 δισεκατομμύρια δολάρια στις ΗΠΑ. Τα κατάγματα του ισχίου είναι τα συνηθέστερα από πλευράς κλινικής εμφανίσεως της νόσου και ακολουθούν τα κατάγματα των σπονδύλων. Υπολογίζεται ότι ο αριθμός των καταγμάτων αυξάνεται περίπου κατά 2000 ανά πενταετία, δίνοντας έτσι εικόνα επιδημικής εκρήξεως.

Η Βιοϊατρική Τεχνολογία είναι μια από τις πιο σύγχρονες επιστήμες, που αναπτύχθηκε μόλις τις τελευταίες δεκαετίες. Είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της συνεργασίας δύο επιστημών, της ιατρικής και της μηχανολογίας. Συγκεκριμένα, ο κλάδος της Εμβιομηχανικής ασχολείται με τη μελέτη ποικίλων νοσημάτων, συμπεριλαμβανομένης και της οστεοπόρωσης.

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η δημιουργία τεσσάρων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων του δωδέκατου θωρακικού σπονδύλου ηλικιωμένων γυναικών και η ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων σε αυτούς. Το ιδιαίτερο γνώρισμα όμως, των τριών από τους τέσσερεις σπονδύλους, είναι ότι δεν είναι υγιείς αλλά εμφανίζουν διαφορετικού βαθμού οστεοπορωτικό κάταγμα. Έτσι μελετάται η επίδραση του βαθμού κατάγματος στα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης των τεσσάρων σπονδύλων.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., κύριο Χριστόφορο Προβατίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ΥΔ του Τομέα κα Κλειώ Βόσου για την πολύτιμη βοήθεια, τη συνεργασία και τη στήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας όπως επίσης τους ΥΔ κ.κ. Ιωάννη Κουκούλη και Δημήτρη Βενετσάνο για τη συναδελφικότητα και υποστήριξη που μου έδειξαν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στην κα Ευαγγελία Πετροπούλου για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε.

Τέλος, ευχαριστώ τον Ιατρό του Κ.Α.Τ. κ. Γεώργιο Λυρίτη καθώς και την Ακτινολόγο Ιατρό κα Αλεξία Μπαλανίκα για την παροχή των δεδομένων των ιατρικών εξετάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
Κεφάλαιο 1ο ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ ΣΤΗΛΗΣ	2
1.1 Οστά της Σπονδυλικής Στήλης.....	6
1.1.1 Κοινά Γνωρίσματα των Γνησίων Σπονδύλων	7
1.1.2 Ιδιαίτερα Γνωρίσματα των Γνησίων Σπονδύλων	9
1.2 Αρθρώσεις της Σπονδυλικής Στήλης.....	14
1.3 Μεσοσπονδύλιες Συγχονδρώσεις	15
1.3.1 Μορφή Μεσοσπονδύλιου Δίσκου	15
1.3.2 Σύνδεσμοι των Μεσοσπονδύλιων Συγχονδρώσεων.....	16
1.4 Η Σπονδυλική Στήλη Συνολικά και οι Κινήσεις της.....	17
1.4.1 Κυρτώματα της Σπονδυλικής Στήλης.....	18
1.4.2 Κινήσεις της Σπονδυλικής Στήλης	18
1.5 Μηχανική της Σπονδυλικής Στήλης.....	19
Κεφάλαιο 2ο ΝΟΣΟΣ ΤΗΣ ΟΣΤΕΟΠΟΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΟΣΤΙΚΑ ΚΑΤΑΓΜΑΤΑ .	23
2.1 Η Σύσταση Των οστών.....	24
2.2 Οστική Ανακατασκευή.....	25
2.3 Κορυφαία Οστική Πυκνότητα.....	26
2.4 Ορισμός Οστεοπόρωσης.....	27
2.5 Παράγοντες Κινδύνου	28
2.6 Μηχανισμός Εμφάνισης Οστεοπόρωσης.....	29
2.7 Τύποι Οστεοπόρωσης.....	29
2.8 Οστικά Κατάγματα	30
Κεφάλαιο 3ο ΛΗΨΗ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	31
3.1 Εισαγωγή	32
3.2 Είδη τομογραφίας	32
3.3 Υπολογιστική Αξονική Τομογραφία	32
3.3.1 Αρχεία τύπου DICOM.....	34
3.4 Αναπαραγωγή Εικόνας Υπολογιστικής Αξονικής Τομογραφίας.....	34

Κεφάλαιο 4ο ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
37

4.1	Εισαγωγή.....	38
4.2	Γενικές Αρχές Πεπερασμένων Στοιχείων	38
4.3	Σύντομη Περιγραφή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων	40

Κεφάλαιο 5ο ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ
& ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ..... 43

5.1	Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	44
5.2	Επεξεργασία Των Αξονικών Τομογραφιών.....	45
5.3	Μοντελοποίηση του Σπονδύλου με Πεπερασμένα Στοιχεία.....	50
5.3.1	Εισαγωγή Μοντέλου στο Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων.....	50
5.3.2	Απόδοση των Υλικών	51
5.4	Μέτρο Ελαστικότητας και Λόγος Poisson.....	54
5.4.1	Μέτρο ελαστικότητας.....	54
5.4.2	Λόγος Poisson	56
5.5	Ολοκλήρωση του Μοντέλου	56
5.5.1	Δημιουργία του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου	56
5.5.2	Απόδοση Υλικών στον Μεσοσπονδύλιο Δίσκο.....	58

Κεφάλαιο 6ο ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ, ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΑ ΥΛΙΚΩΝ
ΣΤΟΥΣ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥΣ..... 61

6.1	Εισαγωγή.....	62
6.2	Ανάλυση της Γεωμετρίας.....	62
6.3	Φορτίσεις και Στηρίξεις	63
6.3.1	Φορτίσεις για την Προσομοίωση της Θλίψης.....	64
6.3.2	Φορτίσεις για την Προσομοίωση της Κάμψης και της Έκτασης.....	64
6.4	Αποτελέσματα της Απόδοσης των Υλικών.....	67
6.4.1	Υγιής Σπόνδυλος.....	67
6.4.2	Ασθενής 1.....	69
6.4.3	Ασθενής 2.....	70
6.4.4	Ασθενής 3.....	72

6.5	Σύγκριση Κατανομής των Όγκων ανά Υλικό.....	74
Κεφάλαιο 7ο	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΧΩΡΙΣ ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΟΥΣ ΔΙΣΚΟΥΣ	77
7.1	Εισαγωγή	78
7.2	Υγιής Σπόνδυλος	78
7.2.1	Θλίψη.....	78
7.2.2	Κάμψη.....	80
7.2.3	Έκταση.....	82
7.3	Ασθενής 1	83
7.3.1	Θλίψη.....	83
7.3.2	Κάμψη.....	85
7.4	Ασθενής 2	86
7.4.1	Θλίψη.....	86
7.4.2	Κάμψη.....	88
7.5	Ασθενής 3	89
7.5.1	Θλίψη.....	89
7.5.2	Κάμψη.....	90
7.6	Σύγκριση επίδρασης είδους φόρτισης	92
7.7	Σύγκριση επίδρασης βαθμού κατάγματος.....	92
7.7.1	Σύγκριση μέγιστων Τάσεων & Παραμορφώσεων ανά υλικό.....	92
7.7.2	Σύγκριση του Ποσοστού του συνολικού όγκου με Παραμόρφωση Μεγαλύτερη από 5000 μStrains.....	95
7.7.3	Σύγκριση των Αποτελεσμάτων μετά την Αφαίρεση των Υλικών 1 και 2..	96
Κεφάλαιο 8ο	ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕ ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΟΥΣ ΔΙΣΚΟΥΣ 103	
8.1	Εισαγωγή	104
8.2	Υγιής Σπόνδυλος	104
8.2.1	Θλίψη.....	104
8.2.2	Κάμψη.....	105
8.2.3	Έκταση.....	106

8.3	Ασθενής 1	108
8.3.1	Θλίψη	108
8.3.2	Κάμψη	109
8.4	Ασθενής 2	110
8.4.1	Θλίψη	111
8.4.2	Κάμψη	112
8.5	Ασθενής 3	113
8.5.1	Θλίψη	113
8.5.2	Κάμψη	114
8.6	Γενικά Συμπεράσματα από την Μεταξύ των Φορτίσεων Σύγκριση	116
8.7	Σύγκριση των Σπονδύλων Μεταξύ τους	117
8.7.1	Σύγκριση των μέγιστων Τάσεων & Παραμορφώσεων ανά Υλικό	117
8.7.2	Σύγκριση του Ποσοστού του συνολικού όγκου με Παραμόρφωση Μεγαλύτερη από 5000μStrains	119
8.7.3	Σύγκριση των Αποτελεσμάτων Μετά Την Αφαίρεση Των Υλικών 1 Και 2 121	
Κεφάλαιο 9ο ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΡΟΠΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		127
9.1	Εισαγωγή	128
9.2	Αποτελέσματα της Σύγκρισης	128
9.3	Γενικά Συμπεράσματα	133
	Βιβλιογραφία	135

Κεφάλαιο 1ο **ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗΣ**
ΣΤΗΛΗΣ

1.1 Οστά της Σπονδυλικής Στήλης

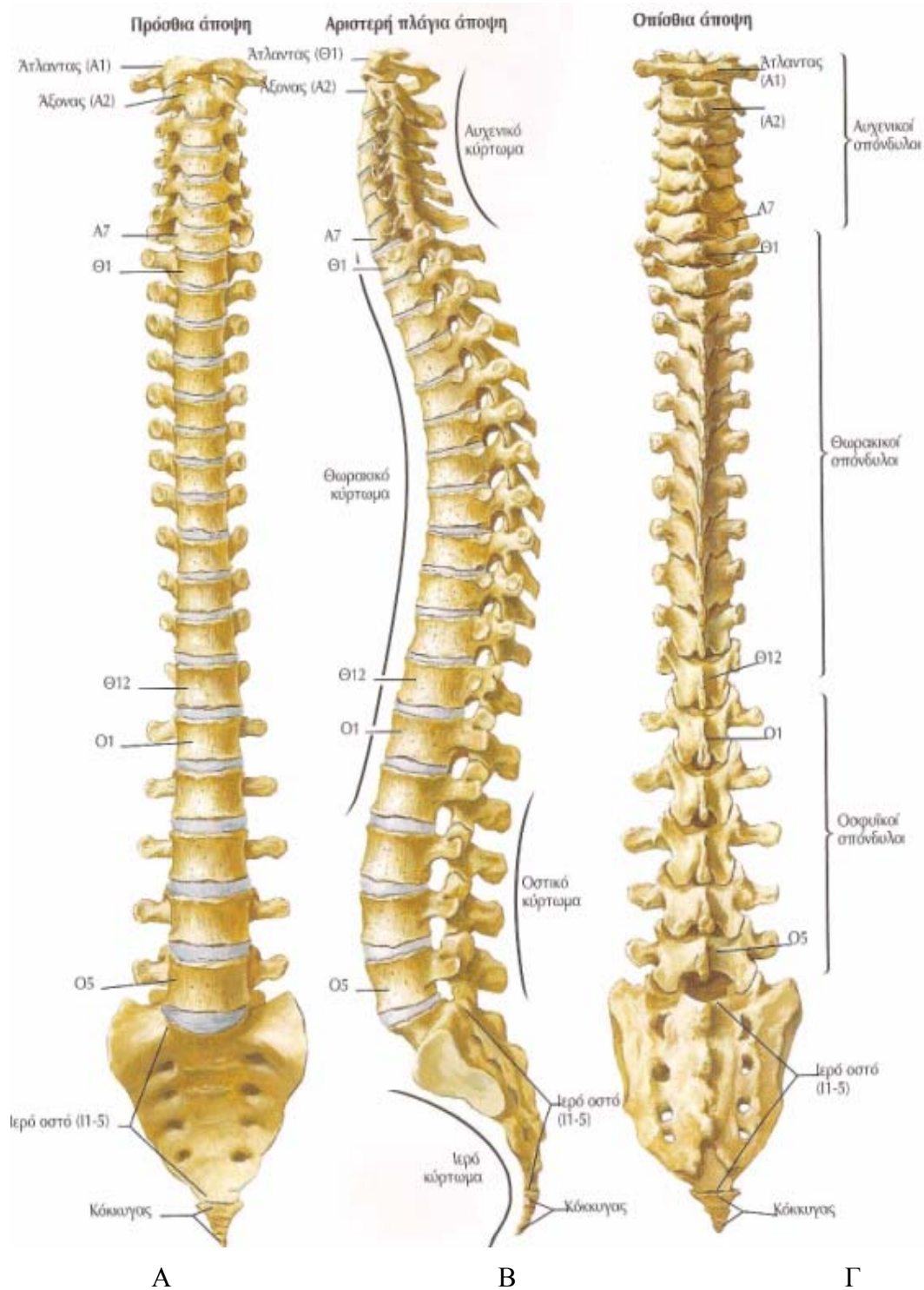
Η σπονδυλική στήλη βρίσκεται στο πίσω μέρος του μέσου οβελιαίου επιπέδου του σώματος και αποτελεί τον κύριο στηρικτικό σκελετικό άξονα του σώματος. Με αυτή, στηρίζεται η κεφαλή και ο κυρίως κορμός, το δε βάρος τους και τις μηχανικές επιδράσεις επάνω τους, τις μεταβιβάζει με τα ανώνυμα οστά στα κάτω άκρα. Εξ άλλου, στο εσωτερικό της σπονδυλικής στήλης (Σ.Σ.) (σπονδυλικό σωλήνα) φιλοξενείται, προστατευόμενος απ' αυτή, ο νωτιαίος μυελός.

Η σπονδυλική στήλη αποτελείται από 33-34 βραχέα οστά, τους σπονδύλους, οι οποίοι φέρονται επάλληλα και χωρίζονται μεταξύ τους με τους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι, στο σύνολό τους, αποτελούν το ένα τέταρτο του ολικού μήκους της σπονδυλικής στήλης.

Η σπονδυλική στήλη εμφανίζει πέντε μοίρες: την *αυχενική*, τη *θωρακική*, την *οσφυϊκή*, την *ιερή* και την *κοκκυγική*, κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από ορισμένο αριθμό σπονδύλων. Έτσι, ανάλογα με τη μοίρα, διακρίνουμε: επτά αυχενικούς, δώδεκα θωρακικούς, πέντε οσφυϊκούς, πέντε ιερούς και τρεις-τέσσερις κοκκυγικούς σπονδύλους. Οι αυχενικοί, θωρακικοί και οσφυϊκοί σπόνδυλοι είναι ανεξάρτητοι και ονομάζονται *γνήσιοι* σπόνδυλοι. Οι ιεροί και κοκκυγικοί έχουν συνοστεωθεί μεταξύ τους και σχηματίζουν αντίστοιχα ενιαία οστά, το ιερό οστό και τον κόκκυγα, γι' αυτό και ονομάζονται *νόθιοι* σπόνδυλοι.

Κατά τη μορφολογική περιγραφή των γνήσιων σπονδύλων διακρίνουμε σ' αυτούς κοινά μορφολογικά χαρακτηριστικά, που απαντώνται σε όλους τους γνήσιους σπονδύλους αλλά και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά με τα οποία διακρίνονται οι σπόνδυλοι των διαφόρων μοιρών.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σπονδυλική στήλη από μπροστινή, πλάγια και πίσω όψη. (Σχήμα 1.1)



Σχήμα 1.1 (Α) Εμπρόσθια, (Β) Πλάγια, (Γ) Οπίσθια όψη της σπονδυλικής στήλης

1.1.1 Κοινά Γνωρίσματα των Γνήσιων Σπονδύλων

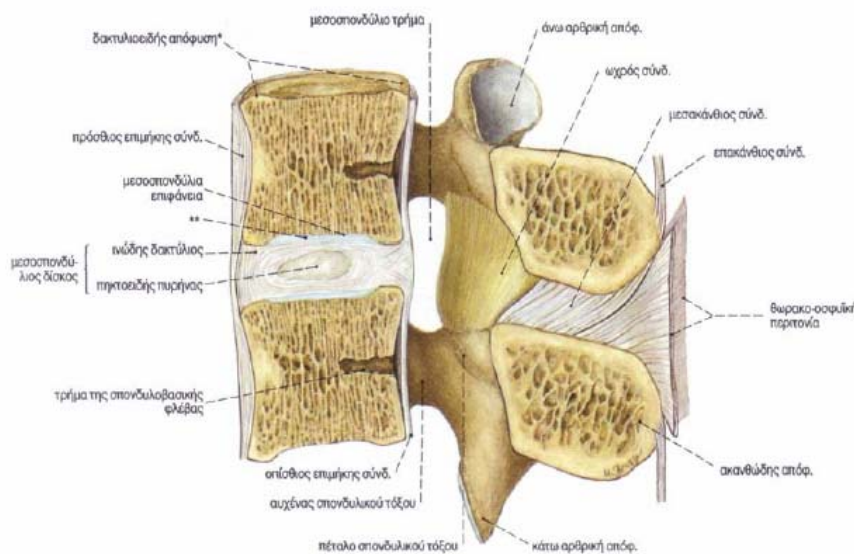
Κάθε γνήσιος σπόνδυλος εμφανίζει τα εξής κύρια μέρη: το σώμα, το τόξο, τις αποφύσεις και το σπονδυλικό τμήμα. (Σχήμα 1.2)

α) Το σώμα του σπονδύλου

Το σώμα του σπονδύλου είναι κυλινδροειδές και αποτελεί το παχύτερο μέρος του. Εμφανίζει άνω και κάτω επιφάνεια και περιφέρεια. Οι επιφάνειες συντάσσονται με τον υποκείμενο και τον υπερκείμενο σπόνδυλο, με την παρεμβολή του μεσοσπονδύλιου δίσκου, ενώ η περιφέρεια αφορίζει από μπροστά το σπονδυλικό τρήμα.

β) Το σπονδυλικό τόξο

Το σπονδυλικό τόξο φέρεται σαν κρίκος πίσω από το σώμα και αφορίζει με αυτό το σπονδυλικό τρήμα. Το σπονδυλικό τόξο εκφύεται, δεξιά – αριστερά, από το σώμα με στενότερο μέρος που λέγεται αυχένας, προς τα πίσω δε μεταβαίνει σε πλατύτερο μέρος, το πέταλο, έτσι, ώστε συνολικά να εμφανίζει σχήμα τόξου. Πάνω και κάτω από τον αυχένα σχηματίζεται η άνω και η κάτω σπονδυλική εντομή (η κάτω βαθύτερη από την άνω).



Σχήμα 1.2 Πλάγια όψη σε τομή δύο εν σειρά τυπικών σπονδύλων

γ) Οι αποφύσεις των σπονδύλων

Από κάθε σπόνδυλο εκφύονται επτά (7) αποφύσεις, που διακρίνονται σε τρεις *μυϊκές*: μία ακανθώδη και δύο *εγκάρσιες*, και τέσσερις *αρθρικές*: δύο άνω και δύο κάτω, για την άρθρωση με τον υπερκείμενο και τον υποκείμενο σπόνδυλο.

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

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

Οι αρθρικές αποφύσεις φέρονται λίγο – πολύ κάθετα και εκφύονται πίσω από τη σπονδυλική εντομή. Φέρουν ανάλογες αρθρικές επιφάνειες για την άρθρωσή τους με τον υπερκείμενο και τον υποκείμενο σπόνδυλο.

δ) Το σπονδυλικό τρήμα

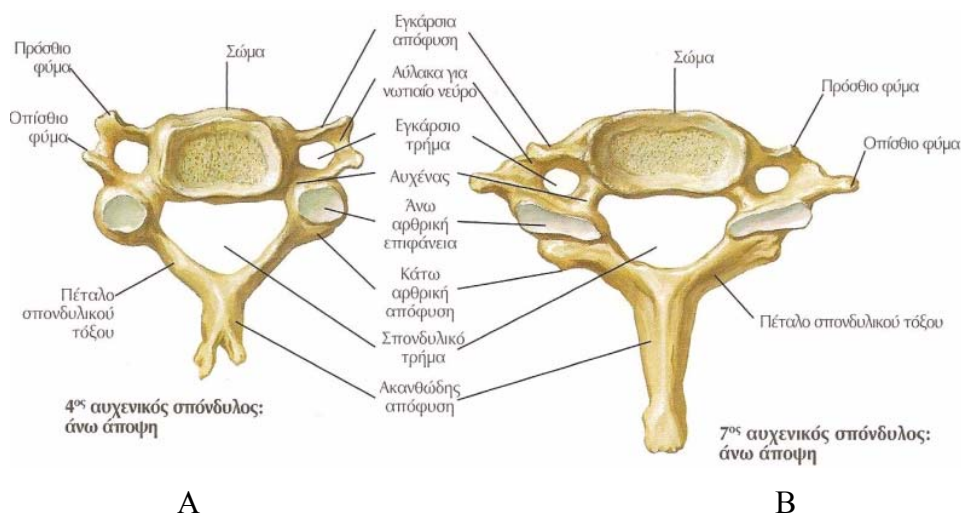
Το σπονδυλικό τρήμα αφορίζεται μπροστά από το σώμα και κατά τα πλάγια και πίσω από το σπονδυλικό τόξο. Στη συντεταγμένη σπονδυλική στήλη το σύνολο των σπονδυλικών τρημάτων απαρτίζει το σπονδυλικό (ή νωτιαίο) σωλήνα, μέσα στον οποίο βρίσκεται ο νωτιαίος μυελός με τις μήνυγγές του, αγγεία και νεύρα. Ο σπονδυλικός σωλήνας εμφανίζει σχήμα και εύρος διαφορετικό στις διάφορες μοίρες της Σ.Σ. Τα διάκενα του τοιχώματος του σπονδυλικού σωλήνα ανάμεσα στους σπονδύλους φράσσονται με συνδέσμους (μεσοσπονδύλιους και μεσοτόξιους).

1.1.2 Ιδιαίτερα Γνωρίσματα των Γνησίων Σπονδύλων

Οι γνήσιοι σπόνδυλοι, εκτός από τα κοινά μεταξύ τους γνωρίσματα, έχουν και ιδιαίτερα γνωρίσματα με τα οποία διακρίνονται οι σπόνδυλοι κάθε μοίρας της Σ.Σ.

α) Οι αυχενικοί σπόνδυλοι

Κάθε αυχενικός σπόνδυλος έχει στην εγκάρσια απόφυσή του ένα τρήμα, το εγκάρσιο τρήμα (εκτός από τον 7ο αυχενικό σπόνδυλο που το τρήμα υπάρχει μερικές φορές). Το σύνολο των εγκαρσίων τρημάτων της αυχενικής μοίρας της Σ.Σ., απαρτίζει τον εγκάρσιο σωλήνα (δεξιά – αριστερά), ο οποίος εμφανίζει ατελή τοιχώματα συμπληρούμενα με μαλακά μόρια. (Σχήμα 1.3)



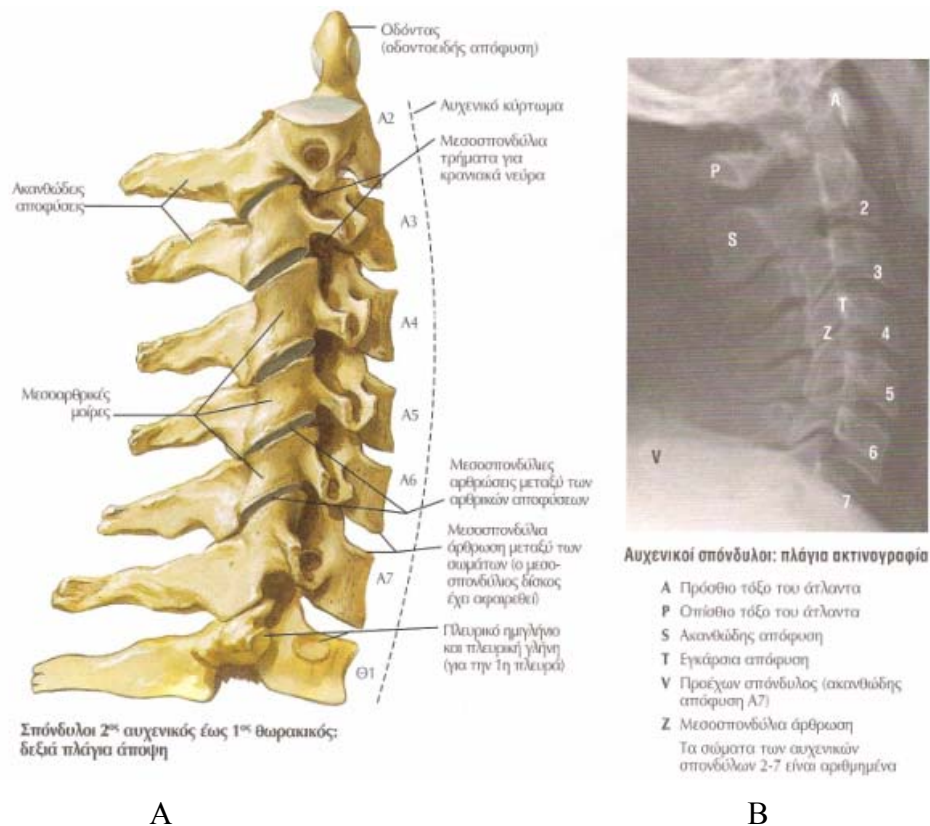
Σχήμα 1.3 Άνω όψη (A) του 4ου αυχενικού (B) του 7ου αυχενικού σπονδύλου

Το σώμα των αυχενικών σπονδύλων είναι το μικρότερο από όλους τους σπονδύλους και έχει μεγαλύτερη την εγκάρσια διάμετρο. Η ακανθώδης απόφυση εμφανίζει δισχιδές άκρο.

Το σπονδυλικό τρήμα είναι ευρύ και τριγωνικού σχήματος. Οι αρθρικές επιφάνειες των άνω αρθρικών αποφύσεων βλέπουν προς τα πίσω και άνω, ενώ των κάτω αρθρικών αποφύσεων βλέπουν προς τα πρόσω και κάτω.

Εκτός από τα παραπάνω γνωρίσματα των αυχενικών σπονδύλων, ο πρώτος, ο δεύτερος και ο έβδομος αυχενικός σπόνδυλος έχουν δική τους μορφολογία. (Σχήμα 1.4)

Ο πρώτος αυχενικός σπόνδυλος ή άτλαντας δεν έχει σώμα ούτε ακανθώδη απόφυση. Έχει μορφή κρίκου σχηματιζόμενου από δύο πλάγια ογκώματα, που συνδέονται μεταξύ τους με ένα πρόσθιο και ένα οπίσθιο τόξο. Η άνω επιφάνεια κάθε πλάγιου ογκώματος εμφανίζει κοίλη αρθρική επιφάνεια, τη γληνοειδή κοιλότητα.



Σχήμα 1.4 Πλάγια όψη του συνόλου των αυχενικών σπονδύλων (A) σε αναπαράσταση (B) σε τομογραφία

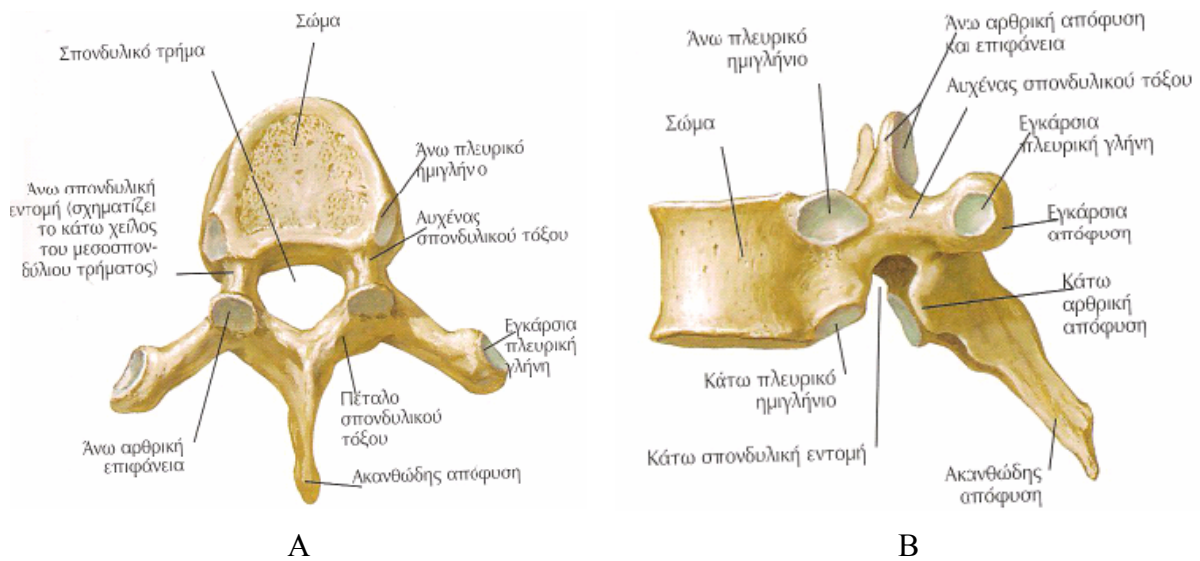
δεύτερος αυχενικός σπόνδυλος ή άξονας, εμφανίζει κυλινδρική προσεκβολή προς τα άνω, που λέγεται οδός του άξονα. Αποτελεί το ενσωματωθέν στον άξονα σώμα του άτλαντα. Συντάσσεται με το βοθρίο του οδόντος προς σχηματισμό μέρους της κάτω κεφαλικής ή αντλαντοαξονικής διάρθρωσης (πρόσθια μέση ατλαντοαξονική).

Ο έβδομος αυχενικός σπόνδυλος χαρακτηρίζεται από τη μακρά και άσχιστη ακανθώδη απόφυση, η οποία προέχει και γι' αυτό ονομάζεται προέχων σπόνδυλος. Η απόφυση αυτή χρησιμεύει σαν οδηγό σημείο στη ράχη για την αρίθμηση των σπονδύλων και των πλευρών. (Σχήμα 1.4)

β) Οι θωρακικοί σπόνδυλοι

Οι θωρακικοί σπόνδυλοι χαρακτηρίζονται από:

το σώμα τους, του οποίου το μέγεθος είναι μεγαλύτερο των αυχενικών και μικρότερο των θωρακικών και αυξάνει από τους πρώτους προς τους τελευταίους σπονδύλους,

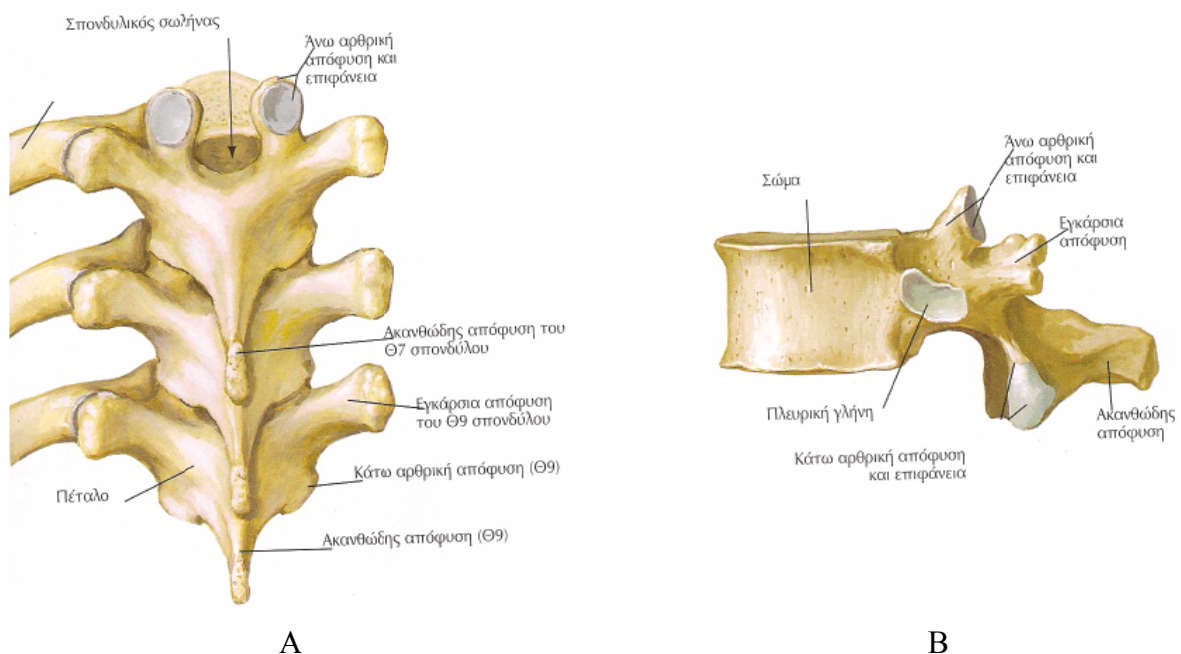


Σχήμα 1.5 Ο 6ος θωρακικός σπόνδυλος σε (Α) άνω όψη (Β) πλάγια όψη

το σπονδυλικό τρήμα τους, το οποίο είναι μικρού σχετικά εύρους και στρογγυλό οι ακανθώδεις αποφύσεις, οι οποίες είναι μακρές και φέρονται σχεδόν κάθετα προς τα κάτω, επικαλύπτουσες τις υποκείμενες, όπως τα κεραμίδια. (Σχήμα 1.5)

Το ιδιαίτερο όμως χαρακτηριστικό των θωρακικών σπονδύλων είναι ότι παρουσιάζουν πρόσθετες αρθρικές επιφάνειες 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 (μία δεξιά και μία αριστερά) ονομάζονται *εγκάρσιες γλήνες*.



Σχήμα 1.6 (Α) Οπίσθια όψη του 7ου , 8ου , 9ου Θωρακικού σπονδύλου , (Β) Πλάγια όψη του 12ου θωρακικού σπονδύλου

Εγκάρσια γλήνη δεν έχουν ο 11ος και ο 12ος θωρακικός σπόνδυλος γιατί και οι αντίστοιχες πλευρές δεν έχουν φύμα. 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 τη σύνταξη με το άνω μισό της κεφαλής της 2ης πλευράς. (Σχήμα 1.6)

γ) Οι οσφυϊκοί σπόνδυλοι

Οι οσφυϊκοί σπόνδυλοι χαρακτηρίζονται από:

το σώμα τους είναι ογκώδες, νεφροειδούς σχήματος,

ο αυχένας και το πέταλό τους είναι παχιά,

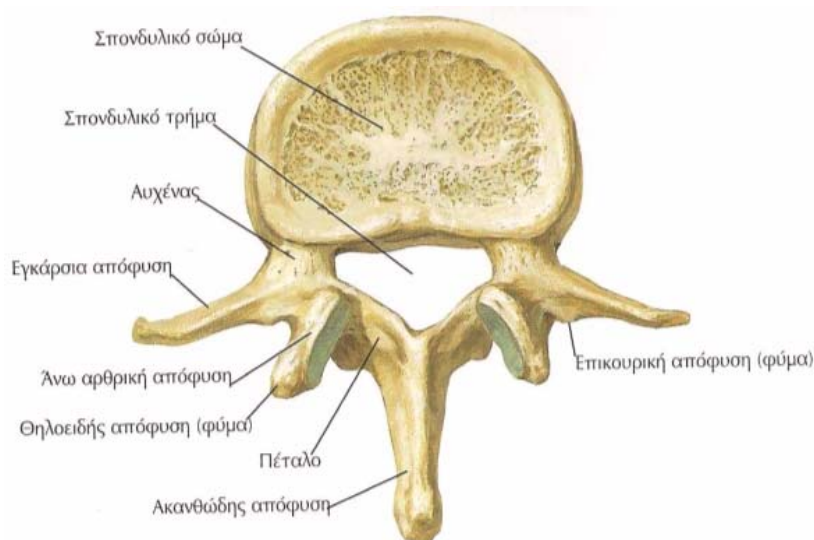
το σπονδυλικό τρήμα είναι τριγωνικού σχήματος,

οι εγκάρσιες αποφύσεις είναι μακρές, λεπτές και φέρονται προς τα έξω

η ακανθώδης απόφυση είναι παχιά, βραχεία και τετράπλευρη και φέρεται κατευθείαν προς τα πίσω,

εμφανίζουν το επικουρικό φύμα στην εγκάρσια απόφυση και το θηλοειδές φύμα στην άνω αρθρική απόφυση,

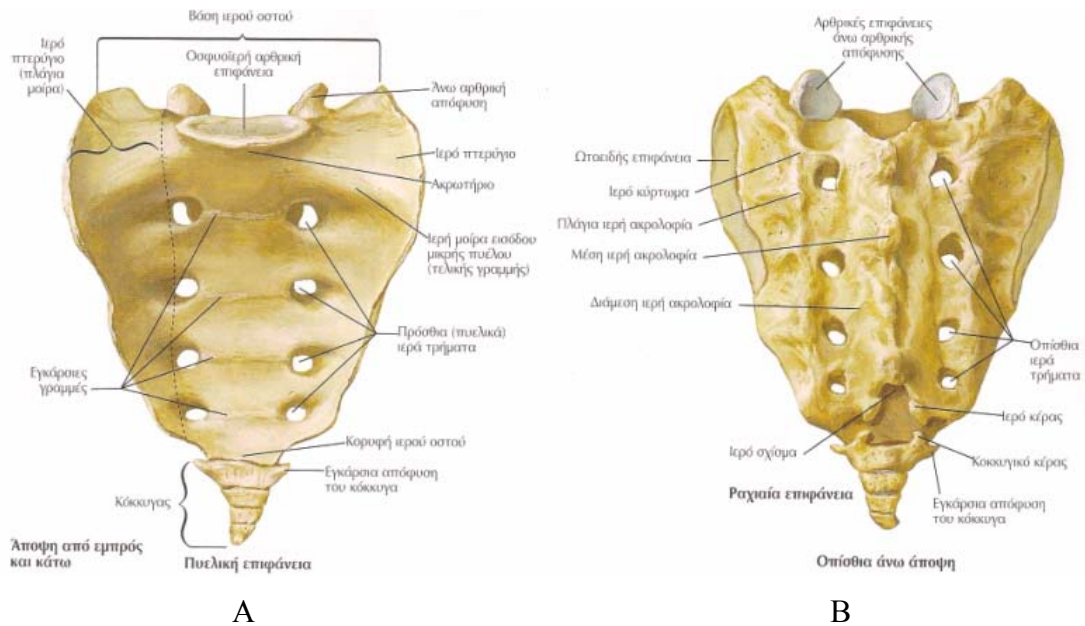
οι αρθρικές αποφύσεις έχουν αρθρικές επιφάνειες που φέρονται σε οβελιαίο επίπεδο και οι μεν άνω βλέπουν προς τα έσω, οι δε κάτω βλέπουν προς τα έξω. (Σχήμα 1.7)



Σχήμα 1.7 Άνω όψη του 2ου οσφυϊκού σπονδύλου

δ) Το ιερό οστό

Οι ιεροί σπόνδυλοι συνοστεωθέντες μεταξύ τους αποτελούν ενιαίο οστό, το ιερό οστό.



Σχήμα 1.8 Το ιερό οστό σε (Α) Εμπρόσθια κάτω όψη, (Β) Οπίσθια πάνω όψη

Έχει σχήμα τετράπλευρης πυραμίδας, αποπλατυσμένης από εμπρός προς τα πίσω. Περιγραφικά εμφανίζει βάση, κορυφή, και τέσσερις επιφάνειες πρόσθια, οπίσθια και δύο πλάγιες. Το ιερό οστό, παρεμβαλλόμενο μεταξύ των ανωνύμων οστών με τα οποία αρθρώνεται, σχηματίζει με αυτά την πύελο ή λεκάνη. (Σχήμα 1.8) Έχει σχήμα τετράπλευρης πυραμίδας, αποπλατυσμένης από εμπρός προς τα πίσω. Περιγραφικά εμφανίζει βάση, κορυφή, και τέσσερις επιφάνειες πρόσθια, οπίσθια και δύο πλάγιες. Το ιερό οστό, παρεμβαλλόμενο μεταξύ των ανωνύμων οστών με τα οποία αρθρώνεται, σχηματίζει με αυτά την πύελο ή λεκάνη. (Σχήμα 1.8)

Η βάση του ιεροῦ οστού συντάσσεται με τον τελευταίο οσφυϊκό σπόνδυλο και σχηματίζει με αυτόν γωνία, που προέχει προς τα πρόσω, που λέγεται ακρωτήριο των μαιευτήρων και έχει εξαιρετική κλινική σημασία στη μαιευτική. Δεξιά και αριστερά από την άνω αρθρική επιφάνεια του σώματος του Ιου ιεροῦ σπονδύλου βρίσκονται οι άνω αρθρικές αποφύσεις του, η άνω σπονδυλική εντομή και επί τα εκτός αυτών τα ιερά πτερύγια. Πίσω από το σώμα βρίσκεται το άνω στόμιο του ιεροῦ σωλήνα.

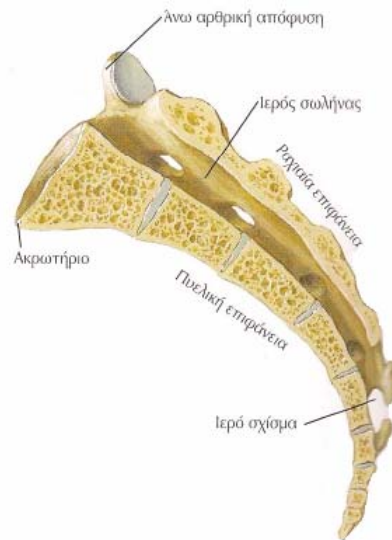
Η κορυφή του ιεροῦ οστού αρθρώνεται με τον κόκκυγα και πίσω της υπάρχει το ιερό σχίσμα, του οποίου τα σκέλη καταλήγουν στα ιερά κέρατα.

ε) Ο κόκκυγας

Ο κόκκυγας, που έχει πυραμοειδές σχήμα, προέρχεται από τη συνοστέωση των τεσσάρων – πέντε κοκκυγικών σπονδύλων.

Η βάση του αρθρώνεται με την κορυφή του ιεροῦ οστού. Από τη βάση του κόκκυγα εκφύονται, δεξιά – αριστερά, τα πλάγια κέρατα, τα οποία αφορίζουν με το ιερό οστό εντομή για τη διέλευση του τελευταίου ιεροῦ νεύρου. Η κορυφή του κόκκυγα καταλήγει

σε μικρό φύμα που αποτελεί υπόλειμμα του σώματος του τελευταίου κοκκυγικού σπονδύλου.(Σχήμα 1.8)



Σχήμα 1.8 Πλάγια όψη σε τομή του κόκκυγα

1.2 Αρθρώσεις της Σπονδυλικής Στήλης

Οι αρθρώσεις της σπονδυλικής στήλης διακρίνονται: α) σε αρθρώσεις μεταξύ των σπονδύλων και β) σε αρθρώσεις της σπονδυλικής στήλης ως σύνολο με παρακείμενα μέρη του σκελετού (κρανίο, πλευρές, πυελική ζώνη).

α) Κατά την άρθρωση των σπονδύλων μεταξύ τους απαντώνται τα ακόλουθα είδη των αρθρώσεων:

Τα σώματα των σπονδύλων αρθρώνονται με συνδεσμούς και συγχονδρώσεις (μεσοσπονδύλιες συγχονδρώσεις)

Τα τόξα και οι μυϊκές αποφύσεις αρθρώνονται με συνδεσμούς (μεσοτόξιοι, μεσεγκάρσιοι, μεσακάνθιοι και επακάνθιος σύνδεσμος), και

Οι αρθρικές αποφύσεις με διαρθρώσεις.

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

Στις αρθρώσεις του κρανίου με τη σπονδυλική στήλη (με τον πρώτο και 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 (πλευρεγκάρσια διάρθρωση). Οι σπονδυλοπλευρικές διαρθρώσεις περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο στις αρθρώσεις του θώρακα.

Στις αρθρώσεις του ιερού οστού με τα οστά της πυελικής ζώνης (ιερολαγόνια διάρθρωση).

1.3 Μεσοσπονδύλιες Συγγονδρώσεις

Τα σώματα των σπονδύλων αρθρώνονται μεταξύ τους με την παρεμβολή ινοχόνδρινων δίσκων, των μεσοσπονδύλιων συνδέσμων ή μεσοσπονδύλιων δίσκων.

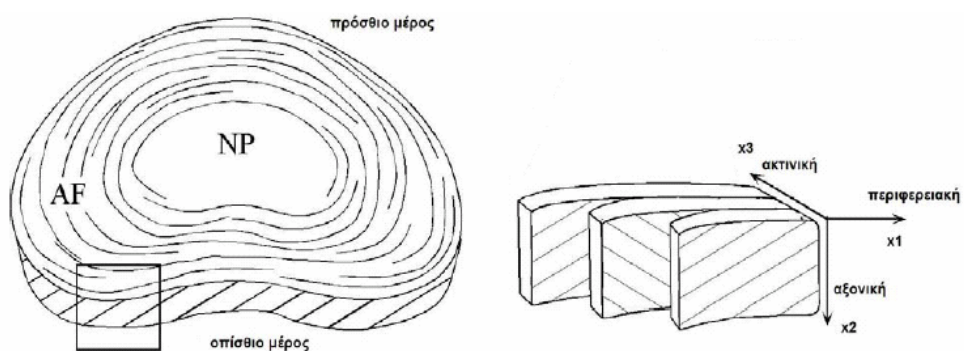
Οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι, σχήματος αμφίκυρτου φακού, με τις επιφάνειές τους (άνω και κάτω) αρθρώνονται με τις επιφάνειες των δύο επάλληλων σπονδύλων, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται ο δίσκος. Η περιφέρεια των δίσκων, μπροστά και πίσω, συνδέεται με τους επιμήκεις συνδέσμους της Σ.Σ.

Το πάχος των μεσοσπονδύλιων δίσκων διαφέρει στις διάφορες μοίρες της Σ.Σ., εξ αιτίας μηχανικών επιδράσεων και του διαφορετικού εύρους των κινήσεων των μοιρών της Σ.Σ. Το συνολικό πάχος τους ανέρχεται στο $\frac{1}{4}$ του μήκους της Σ.Σ. Γενικά, οι δίσκοι είναι παχύτεροι στην οσφυϊκή μοίρα της Σ.Σ.

Λόγω των φυσικών ιδιοτήτων τους και της ελαστικότητάς τους οι δίσκοι λειτουργούν ως απορροφητές των δονήσεων και ταυτόχρονα επιτρέπουν τη σχετική κίνηση του ενός σπονδύλου στον άλλο. Οι φυσικές αυτές ιδιότητες χάνονται με την πάροδο του χρόνου.

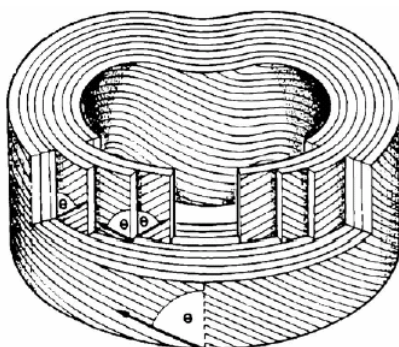
1.3.1 *Μορφή Μεσοσπονδύλιου Δίσκου*

Κάθε μεσοσπονδύλιος δίσκος αποτελείται από περιφερικό μέρος, τον ινώδη δακτύλιο, και από κεντρικό μέρος, τον πηκτοειδή πυρήνα. (Σχήμα 1.9)



Σχήμα 1.9 Τα μέρη που αποτελούν το μεσοσπονδύλιο δίσκο

Ο ινώδης δακτύλιος αποτελείται από ινώδη και ελαστικό χόνδρο με κολλαγόνους ίνες σε διάταξη ομόκεντρων πεταλιών. Οι δεσμίδες των κολλαγόνων ινών εισδύουν κατά λοξή φορά στους παρακείμενους σπονδύλους και οι περιφερικότερες απ' αυτές προσφύονται στερεά στον πρόσθιο και οπίσθιο επιμήκη σύνδεσμο της Σ.Σ. (Σχήμα 1.10)



Σχήμα 1.10 Σχήμα που δείχνει τη φορά των κολλαγόνων ινών στον ινώδη δακτύλιο

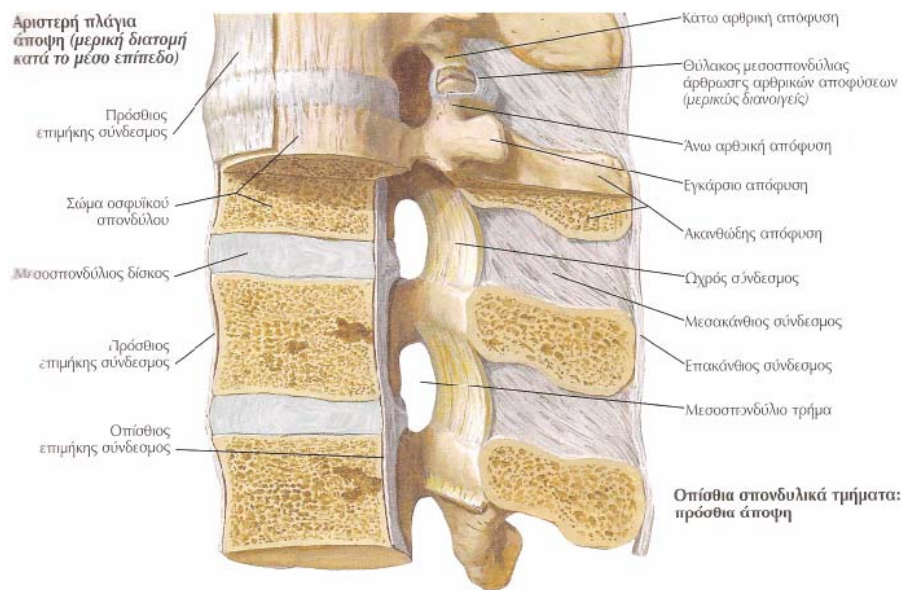
Ο πηκτοειδής πυρήνας είναι ωοειδής μάζα, αποτελούμενη από δίκτυο κολλαγόνων και ελαστικών ινών με λίγα χονδροκύττατρα. Φυσιολογικά βρίσκεται υπό πίεση. Δεν βρίσκεται ακριβώς στο μέσο του μεσοσπονδύλιου δίσκου αλλά πιο κοντά στο οπίσθιο χείλος του δίσκου. Η ημίρευστη φύση του πηκτοειδή πυρήνα κάνει το σχήμα του ευμετάβλητο και με την ελαστικότητά του κάνει σχετικά εύκολη τη μετακίνηση του ενός σπονδύλου στον άλλο κατά τις κινήσεις κάμψης και έκτασης της Σ.Σ.

Σε απότομη αύξηση της συμπίεσης κατά μήκος της Σ.Σ. ο πηκτοειδής πυρήνας αποπλάτνεται. Η αποπλάτνωση αυτή περιορίζεται από τον ινώδη δακτύλιο. Μερικές φορές όμως, λόγω ισχυρότερης πίεσης ή από άλλους λόγους, η αποπλάτνωση αυτή μπορεί να προκαλέσει ρήξη του ινώδους δακτυλίου και προβολή δια μέσου αυτής του πηκτοειδή πυρήνα. Η σοβαρή αυτή πάθηση λέγεται κήλη του μεσοσπονδύλιου δίσκου ή ακριβέστερα πρόπτωση του πηκτοειδή πυρήνα. Η κήλη αυτή, γίνεται συνηθέστερα προς τα πίσω δηλαδή ο πηκτοειδής πυρήνας προπίπτει μέσα στο σπονδυλικό σωλήνα και προκαλεί συμπτωματολογία από την πίεση των νωτιαίων νεύρων (οσφυαλγία – ισχιαλγία) και σπανιότερα από πίεση του νωτιαίου μυελού.

Η περιεκτικότητα του πηκτοειδή πυρήνα σε νερό ελαττώνεται με την πάροδο της ηλικίας και προοδευτικά αντικαθίσταται με ινώδη χόνδρο. Έτσι ο πηκτοειδής πυρήνας γίνεται μικρότερος, λιγότερο ελαστικός και εύθραυστος και είναι δύσκολο να διακριθεί από τον ινώδη δακτύλιο.

1.3.2 Σύνδεσμοι των Μεσοσπονδύλιων Συγχονδρώσεων

Εκτός από τους μεσοσπονδύλιους συνδέσμους (δίσκους) οι μεσοσπονδύλιες συγχονδρώσεις ενισχύονται από μπροστά και από πίσω με συνδέσμους που φέρονται επιμήκως και συνεχώς μεταξύ των σωμάτων των σπονδύλων. Είναι ο πρόσθιος και ο οπίσθιος επιμήκης σύνδεσμος.



Σχήμα 1.11 Πλάγια όψη σε μερική τομή τυχαίων σπονδύλων όπου φαίνονται το σύνολο των συνδέσμων των μεσοσπονδύλιων συγχονδρώσεων

Και οι δύο αρχίζουν από το ινιακό οστό και φέρονται αντίστοιχα κατά μήκος της πρόσθιας και της οπίσθιας επιφάνειας των σωμάτων των σπονδύλων. (Σχήμα 1.11)

Ο πρόσθιος επιμήκης σύνδεσμος εκτείνεται από τη βάση του κρανίου μέχρι την πρόσθια επιφάνεια του 2ου ιερού σπονδύλου και η συνέχειά του προς τα κάτω αποτελεί τον πρόσθιο ιεροκοκκυγικό σύνδεσμο. Κατά την πορεία του αυτή ο πρόσθιος επιμήκης σύνδεσμος προσφύεται στερεά με τους μεσοσπονδύλιους δίσκους και με τα χείλη των σωμάτων των σπονδύλων. Στις διάφορες μοίρες της σπονδυλικής στήλης εμφανίζει διαφορετικό πλάτος και πάχος και γενικά είναι ισχυρότερος από τον οπίσθιο επιμήκη σύνδεσμο.

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

1.4 Η Σπονδυλική Στήλη Συνολικά και οι Κινήσεις της

Οι αρθρικές αποφύσεις δύο επάλληλων σπονδύλων συντάσσονται μεταξύ τους με διαρθρώσεις. Οι αρθρικές επιφάνειες των αρθρικών αποφύσεων, καλυπτόμενες από υαλοειδή χόνδρο, εμφανίζουν διαφορετική φορά και σχήμα στις διάφορες μοίρες της σπονδυλικής στήλης. Γι' αυτό το λόγο και επειδή υπάρχει διαφορετικού βαθμού χαλαρότητα του αρθρικού θυλάκου των διαρθρώσεων η κινητικότητα της σπονδυλικής στήλης ποικίλλει στις διάφορες μοίρες της.

Περιγραφικά η Σ.Σ. στο σύνολό της εμφανίζει: δύο άκρα, το άνω ή κεφαλικό και το κάτω ή ουραίο και τέσσερις επιφάνειες, την πρόσθια, την οπίσθια και δύο πλάγιες. Τέλος, με τις αρθρώσεις των σπονδύλων, το σύνολο των σπονδυλικών τρημάτων της Σ.Σ. απαρτίζουν το σπονδυλικό σωλήνα. Ο σπονδυλικός σωλήνας ο οποίος περικλείει το νωτιαίο μυελό με τις μήνιγγές του, εκβάλλει προς τα άνω, δια του ινιακού τρήματος στο κύτος του κρανίου, ενώ προς τα κάτω φτάνει μέχρι το ιερό σχίσμα. Στα πλάγια του εμφανίζει τα μεσοσπονδύλια τμήματα (προσοχή, δεν πρέπει να συγχέονται με τα σπονδυλικά τμήματα), δια των οποίων εξέρχονται τα νωτιαία νεύρα.

Η πρόσθια επιφάνεια της Σ.Σ. σχηματίζεται από τα σώματα των σπονδύλων, από τους μεσοσπονδύλιους δίσκους και από τον πρόσθιο επιμήκη σύνδεσμο. Κάθε πλάγια επιφάνεια της Σ.Σ. εμφανίζει τα μεσοσπονδύλια τμήματα, που χρησιμεύουν για τη διέλευση των νωτιαίων νεύρων και σχηματίζονται από τις σπονδυλικές εντομές δύο επάλληλων σπονδύλων. Η οπίσθια επιφάνεια εμφανίζει, κατά τη μέση γραμμή, τις ακανθώδεις αποφύσεις, των οποίων το σύνολο αποτελεί τη νωτιαία άκανθα. Μεταξύ της νωτιαίας άκανθας και των εγκάρσιων αποφύσεων σχηματίζεται, δεξιά και αριστερά της, η μικρή νωτιαία αύλακα. Ο πυθμένας της αύλακας σχηματίζεται από τα πέταλα των τόξων και από τα μεσοτόξια διαστήματα που φράζονται με τους μεσοτόξιους (ωχρούς) συνδέσμους. Τα μεσοτόξια διαστήματα είναι στενά στην αυχενική και τη θωρακική μοίρα και ευρύτερα μεταξύ ινιακού οστού και άτλαντα και στην οσφυϊκή μοίρα της Σ.Σ.

1.4.1 Κυρτώματα της Σπονδυλικής Στήλης

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

α) Κυρτώματα κατά το οβελιαίο επίπεδο

Όταν βλέπουμε τη σπονδυλική στήλη από τα πλάγια, εμφανίζει τέσσερα κυρτώματα, το αυχενικό, το θωρακικό, το οσφυϊκό και το ιεροκοκκυγικό. Το αυχενικό και το οσφυϊκό στρέφουν το κυρτό τους προς τα εμπρός, ενώ το θωρακικό και το ιεροκοκκυγικό προς τα πίσω.

β) Κυρτώματα κατά το μετωπιαίο επίπεδο

Περί το τέλος της παιδικής ηλικίας και την αρχή της εφηβείας, η Σ.Σ. εμφανίζει τρία, λιγότερο εμφανή, πλάγια κυρτώματα, το αυχενικό, το θωρακικό και το οσφυϊκό. Το θωρακικό είναι πιο εμφανές. Τα κυρτώματα αυτά οφείλονται στην επικρατούσα χρήση των άνω άκρων (δεξιοχειρία – αριστεροχειρία). Στους δεξιόχειρες το θωρακικό κύρτωμα στρέφει το κυρτό του προς τα δεξιά και τα άλλα δύο προς τα αριστερά.

1.4.2 Κινήσεις της Σπονδυλικής Στήλης

Η κινητικότητα της Σ.Σ. ποικίλλει πολύ στις διάφορες μοίρες της και εξαρτάται:

- α) από τη χαλαρότητα του αρθρικού θυλάκου,
- β) από το πάχος και τη φυσική κατάσταση των μεσοσπονδύλιων δίσκων
- γ) από το σχήμα και τη φορά των αρθρικών επιφανειών και
- δ) από το βαθμό ανάπτυξης και φυσικής κατάστασης των διαφόρων συνδέσμων.

Η κίνηση μεταξύ δύο συνεχόμενων σπονδύλων είναι πολύ μικρή. Η συνολική όμως άθροιση των κινήσεων κατά μοίρες ή και σε όλη τη σπονδυλική στήλη της παρέχει σημαντικό βαθμό κινητικότητας. 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. Η έκταση, γενικά, είναι πιο ελεύθερη παρά η κάμψη. Η προς τα πρόσω μεγάλη κάμψη του κορμού αποδίδεται κυρίως στην κάμψη της κεφαλής (κρανιοσπονδυλικές διαρθρώσεις) και του κορμού στη διάρθρωση του ισχίου. Κατά την κάμψη οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι συμπιέζονται κατά το πρόσθιο τμήμα τους και διατείνονται κατά το οπίσθιο, ενώ κατά την έκταση συμβαίνουν τα αντίθετα. Επίσης, διατείνονται ο πρόσθιος και ο οπίσθιος επιμήκης σύνδεσμος, περιορίζοντας αντίστοιχα την υπέρμετρη έκταση ο πρόσθιος και την υπέρμετρη κάμψη ο οπίσθιος.

Η πλάγια κάμψη είναι πιο εύκολη στην αυχενική και οσφυϊκή μοίρα, ενώ στη θωρακική μοίρα περιορίζεται από τις συμπιεζόμενες πλευρές.

Η στροφή είναι ευχερέστερη στην αυχενική μοίρα. Η ισχυρή στροφή του κορμού όρθιου ατόμου γίνεται με στροφή της πυέλου στους μηρούς και όχι με στροφή της Σ.Σ. [9]

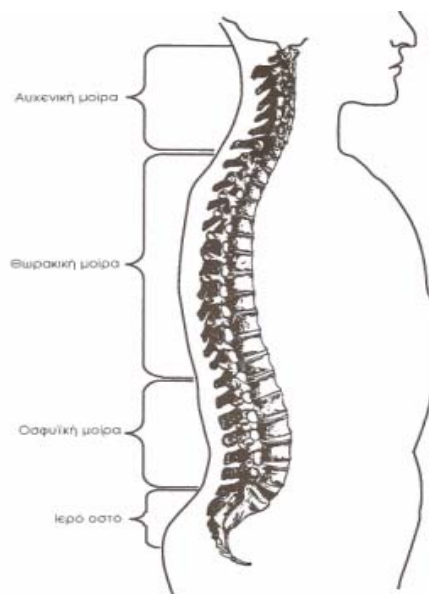
1.5 Μηχανική της Σπονδυλικής Στήλης

Τα οστά αποτελούν την κύρια δομική στήριξη του ανθρώπινου σώματος. Η επιφάνεια διατομής των οστών που στηρίζουν το ανθρώπινο σώμα, γενικά αυξάνει από το κεφάλι ως τα άκρα των ποδιών. Τα οστά αυτά παρέχουν τη στήριξη του επιπρόσθετου βάρους των μυών και των ιστών. Οι αρχές της μηχανικής για την κατασκευή κτιρίων εφαρμόζονται και στην περίπτωση του ανθρώπινου σώματος: η μεγαλύτερη δύναμη στήριξης απαιτείται στη βάση. (Σχήμα 1.12)

Τα οστά που στηρίζουν μέρος του βάρους του σώματος είναι βελτιστοποιημένα για να εκτελούν το έργο στήριξης. Το εξωτερικό ή συμπαγές οστό είναι κατασκευασμένο για να αντέχει σε φορτία που το συμπιέζουν. Το εσωτερικό σπογγώδες ή πορώδες οστό, στα άκρα των μακρών οστών και τους σπονδύλους, αποτελείται από νηματοειδή ινίδια (δοκίδες) που παρέχουν δύναμη όντας ταυτόχρονα ελαφριές. Παραδείγματα τέτοιου είδους κατασκευών από τη μηχανική είναι οι κυψελοειδείς κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την ενδυνάμωση των φτερών ενός αεροπλάνου, η χρήση μικρού βάρους ινών από γραφίτη σε σύνθετα υλικά, και ο σκελετός των κτιρίων.

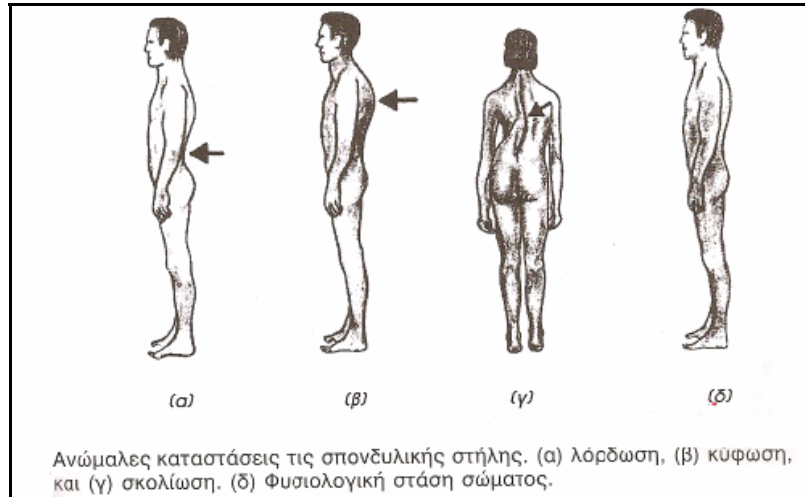
Οι σπόνδυλοι αποτελούν παράδειγμα οστών που σηκώνουν αρκετό φορτίο. Το πάχος και το εμβαδόν της διατομής των σπονδύλων αυξάνει από τον αυχένα (αυχενική μοίρα) προς την οσφυϊκή μοίρα. Για τη στήριξη της επιπλέον μάζας που βρίσκεται πάνω από το διαδοχικό σπόνδυλο απαιτείται επιφάνεια με μεγαλύτερο εμβαδόν. Μεταξύ των σπονδύλων υπάρχουν οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι οι οποίοι απορροφούν τις ασκούμενες προς τα κάτω δυνάμεις και άλλες προσκρούσεις στη σπονδυλική στήλη. Εντούτοις, η πίεση (δύναμη/επιφάνεια) είναι σχεδόν η ίδια για όλους τους δίσκους. Οι δίσκοι διαρρηγνύονται σε πίεση περίπου 10 N/m^2 (10 Pa , 100 atm).

Το μήκος της σπονδυλικής στήλης, σε σχέση με τη φυσιολογική της τιμή, περίπου $0,7 \text{ m}$ (άνδρας), μειώνεται ελαφρά κατά $0,015 \text{ m}$ ($1,5 \text{ cm}$) όταν σηκωνόμαστε από τον ύπνο. Η σπονδυλική στήλη επανέρχεται στο αρχικό της μήκος μετά το νυχτερινό ύπνο. Επίσης, το μήκος της σπονδυλικής στήλης μειώνεται με την ηλικία, συνήθως ως αποτέλεσμα οστεοπόρωσης και συμπίεσης των δίσκων, καταστάσεις που παρουσιάζονται συνήθως σε ηλικιωμένες γυναίκες. Η οστεοπόρωση προκαλεί εξασθένηση του οστού και τελικά τη συμπίεσή του. Η οστεοπόρωση εξετάζεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 1.12 Πλάγια αναπαράσταση της σπονδυλικής στήλης που δείχνει την θέση αυτής στο ανθρώπινο σώμα

Η σπονδυλική στήλη, για την ευστάθεια του σώματος, παρουσιάζει μια φυσιολογική καμπύλωση. Βλέποντάς την από τη δεξιά πλευρά, το χαμηλότερο μέρος της σχηματίζει ένα “S” (Σχήμα 1.12). Αποκλίσεις από το φυσιολογικό σχήμα της σπονδυλικής στήλης προκαλούν λόρδωση, κύφωση και σκολίωση. Η λόρδωση, είναι μία μεγάλη καμπύλωση της σπονδυλικής στήλης που συνήθως παρατηρείται στην περιοχή της οσφυϊκής μοίρας. Άτομο σε αυτήν την κατάσταση παρουσιάζει μία κλίση προς τα πίσω. Η κύφωση, είναι μία ανώμαλη καμπύλωση της σπονδυλικής στήλης όπως αυτή φαίνεται από τα πλάγια και συνήθως προκαλεί κύρτωση (καμπούρα) στην πλάτη. [10]



Σχήμα 1.13 Ανώμαλες καταστάσεις της σπονδυλικής στήλης (α) λόρδωση, (β) κύφωση, (γ) σκολίωση (δ) φυσιολογική στάση σώματος

Η σκολίωση είναι μία κατάσταση στην οποία η σπονδυλική στήλη έχει σχήμα “S” όταν την βλέπουμε από πίσω. (Σχήμα 1.13)

Κεφάλαιο 2ο ΝΟΣΟΣ ΤΗΣ
ΟΣΤΕΟΠΟΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΟΣΤΙΚΑ
ΚΑΤΑΓΜΑΤΑ

2.1 Η Σύσταση Των οστών

Υπάρχουν τεσσάρων ειδών κύτταρα που είναι υπεύθυνα για τον σχηματισμό, συντήρηση – επιδιόρθωση και προσαρμογή του οστίτου ιστού. Τα *αδιαφοροποίητα οστεοκυττάρα*, τα *οστεοκύτταρα*, οι *οστεοβλάστες* και οι *οστεοκλάστες*.

Τα αδιαφοροποίητα κύτταρα ευρίσκονται στα κανάλια των οστών, το ενδόστεο και το περίοστεο, και αν δεχθούν κατάλληλο ερέθισμα διαφοροποιούνται σε οστεοβλάστες. Παρόμοια κύτταρα, που μπορούν να παράγουν οστόν, ευρίσκονται και σε άλλους ιστούς.

Οι οστεοβλάστες είναι κυβοειδή κύτταρα με ένα συνήθως έκκεντρο πυρήνα, περιέχουν μεγάλο αριθμό συνθετικών οργανιδίων, εκτεταμένο ενδοπλασματικό δίκτυο και μεμβράνες του Golgi. Ευρίσκονται πάνω στις ελεύθερες οστικές επιφάνειες και όταν διεγερθούν αλλάζουν σχήμα (στρογγυλό, ελλειψοειδές ή πολυεδρικό), σχηματίζουν νέα οστική οργανική θεμέλιο ουσία και ρυθμίζουν την αποτιάνωση. Παρουσιάζουν κυτταροπλασματικές προσεκβολές που επεκτείνονται μέσα στην αποτιτανωμένη θεμέλιο ουσία και φέρνουν σε επικοινωνία τους οστεοβλάστες με τα οστεοκύτταρα. Όταν απενεργοποιηθούν, είτε λαμβάνουν επίπεδο σχήμα και σχηματίζουν τα επενδυματικά κύτταρα των ελεύθερων οστικών επιφανειών, είτε αυτοπεριβάλλονται από αποτιτανωμένη θεμέλιο ουσία και μετατρέπονται σε οστεοκύτταρα.

Οι οστεοκλάστες σχηματίζονται από συνένωση πολλαπλών μονοπύρηνων κυττάρων που προέρχονται από τον μυελό των οστών (αιμοποιητικό σύστημα). Είναι μεγάλα, ανώμαλου σχήματος κύτταρα με πολλούς πυρήνες, των οποίων το κυτταρόπλασμα περιέχει πολλά μιτοχόνδρια. Τα μιτοχόνδρια δίνουν την ενέργεια που είναι απαραίτητη για την βασική λειτουργία των οστεοκλαστών, δηλαδή την απορρόφηση οστού. Ανευρίσκονται στις οστικές επιφάνειες του ενδόστεου, του περιοστέου και των Αβέρσειων συστημάτων (Harvesian System) και κάθονται πάνω στη θεμέλιο ουσία. Μόλις τελειώσουν την απορροφητική τους δραστηριότητα έχουν την δυνατότητα είτε να μετακινηθούν σε παρακείμενη οστική επιφάνεια, είτε να διαιρεθούν σε πολλαπλά μονοκύτταρα κύτταρα. Το πιο σημαντικό μορφολογικό χαρακτηριστικό των ενεργών οστεοκλαστών είναι η σύνθετος αναδίπλωση της κυτταροπλασματικής μεμβράνης τους προς την πλευρά της απορροφούμενης θεμέλιας ουσίας. Αυτή η αναδίπλωση σχηματίζει ένα σύνθετο όξινο μικροπεριβάλλον όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου και πρωτεολυτικά ένζυμα. Σε αυτό το περιβάλλον αφαιρούνται τα μεταλλικά ιόντα από την θεμέλιο ουσία η οποία εν συνεχεία διαλύεται από τα ένζυμα. Στα σπογγώδη οστά, από μια οστεοκλάστη, σχηματίζεται μια χαρακτηριστική κοιλότητα (Howship lacunae), ενώ στα φλοιώδη, από πολλαπλές οστεοκλάστες σχηματίζεται ο κοπτικός κώνος (cutting cone) του Αβέρσειου συστήματος.

Τα οστεοκύτταρα αποτελούν το 90% των κυττάρων του ώριμου σκελετού. Έχουν ελλειψοειδές σχήμα και παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό κυτταροπλασματικών

προσεκβολών. Αυτό το δίκτυο των προεκβολών τους δίνει τη δυνατότητα επικοινωνίας με τα άλλα οστεοκύτταρα της αποτιτανωμένης θεμελίου ουσίας και με τους οστεοβλάστες των ελεύθερων επιφανειών και της οργανικής θεμελίου ουσίας. Αυτή η επικοινωνία είναι σημαντική για την ομοιοστασία του ασβεστίου στον οργανισμό και για την διακίνηση και ροή των υγρών μέσα στον οστίτη ιστό (γλοιοελαστικές ιδιότητες του οστού, ηλεκτρικά φαινόμενα). Σήμερα πιστεύεται ότι τα οστεοκύτταρα έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν «μηνύματα» που έχουν σχέση με αλλαγές του μηχανικού περιβάλλοντος και των καταπονήσεων που δέχονται τα οστά.

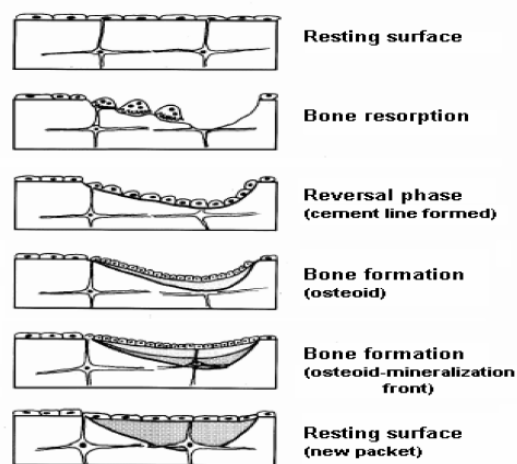
Η οστική θεμέλιος ουσία αποτελείται από οργανικά μακρομόρια (20% του συνολικού οστικού βάρους), ανόργανα άλατα – κυρίως υδροξυαπατίτης – (70%) και τα υγρά της θεμέλιας ουσίας (8-10%). Το οργανικό τμήμα της δίνει στο οστό το σχήμα του και συμβάλει στην αντοχή του σε εφελκυσμό. Το ανόργανο τμήμα της συμβάλει στην αντοχή του οστού σε συμπίεση. Εάν αφαιρεθεί ένα από τα δύο τμήματα, δεν επέρχεται καμία αλλαγή στο σχήμα του οστού. Αντίθετα είναι εμφανείς οι μεταβολές της μηχανικής συμπεριφοράς του. Όταν αφαιρεθεί το ανόργανο τμήμα, τα οστά γίνονται ιδιαίτερα εύκαμπτα και δύναται να στρεβλωθούν ή να καμφθούν χωρίς να συμβεί κάταγμα. Όταν αφαιρεθεί το οργανικό τμήμα, τα οστά γίνονται ιδιαίτερα εύθρυπτα. [1]

2.2 Οστική Ανακατασκευή

Το οστό είναι μία δυναμική μορφή ιστού, που είναι μεταβολικά ενεργό σε όλη τη διάρκεια της ζωής ενός ατόμου. Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, οι οστεοβλάστες παράγουν οστίτη ιστό, ενώ οι οστεοκλάστες απορροφούν. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η σωστή ανάπτυξη των οστών, η επιδιόρθωση μικρών ζημιών που προκύπτουν από την καθημερινή καταπόνηση του σκελετού και η διατήρηση της λειτουργικότητας του σώματος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *οστική ανακατασκευή*.

Η διαδικασία οστικής ανακατασκευής ξεκινάει με ένα σήμα που στέλνουν οι οστεοβλάστες στους οστεοκλάστες. Επακόλουθο της ενεργοποίησης των οστεοκλαστών είναι η προσκόλλησή τους πάνω στην επιφανειακή κυτταρική σειρά του οστού και η αποδόμηση των συγκεκριμένων κυττάρων. Έπειτα, μέσω οξέων και ενζύμων, όπως κολλαγόνάσες, που εκκρίνονται από τους οστεοβλάστες, προκαλείται αποδόμηση του οστίτη ιστού. Το τέλος της οστικής απορρόφησης σηματοδοτείται από το σχηματισμό μικρών κοιλοτήτων με μέγιστο βάθος 50 – 60 μm . Στη συνέχεια, οστεοβλάστες συγκεντρώνονται στις σχηματισθείσες κοιλότητες και αποθέτουν ίνες κολλαγόνου και θεμέλια ουσία, δηλαδή παράγουν το οστεοειδές, με ρυθμό 0,50 – 1,00 μm τη μέρα. Με τον όρο οστεοειδές χαρακτηρίζεται το πρωτεϊνικό μίγμα που εκκρίνεται από τους οστεοβλάστες και αποτελείται κυρίως από κολλαγόνο τύπου I. Όταν πλέον ο οστεοκλάστης περιβάλλεται από το οστεοειδές και καθιλώνεται μέσα σε αυτό, τότε γίνεται ένα ακίνητο οστεοκύτταρο (το πάχος του οστεοειδούς έχει φτάσει τα 12 – 15 μm).

Τέλος, ξεκινάει από κάτω προς τα πάνω η επιμετάλλωση, δηλαδή η εναπόθεση ανόργανων στοιχείων πάνω στην οργανική ύλη – οστεοειδές – και ο σχηματισμός κρυστάλλων υδροξυαπατίτη. Στο τέλος κάθε κύκλου οστικής ανακατασκευής, η επιφάνεια του οστού καλύπτεται ξανά από ένα στρώμα επιφανειακών κυττάρων. Η ανακατασκευή γενικά χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των μονάδων που βρίσκονται σε ανακατασκευή, τον ρυθμό ανακύκλυσής της, δηλαδή την διάρκεια ενός πλήρους κύκλου ανακατασκευής, από το βάθος των κοιλοτήτων που σκάβουν οι οστεοκλάστες και το πάχος του νέου οστού που παράγουν οι οστεοβλάστες. Ένας κύκλος οστικής ανακατασκευής διαρκεί συνήθως 3–4 μήνες για το σπογγώδες οστό και 7 μήνες για το φλοιώδες. Κάθε χρόνο, σχεδόν το 20% του σκελετού ενός ενήλικα ανακατασκευάζεται. (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1. Τα στάδια της οστικής ανακατασκευής.

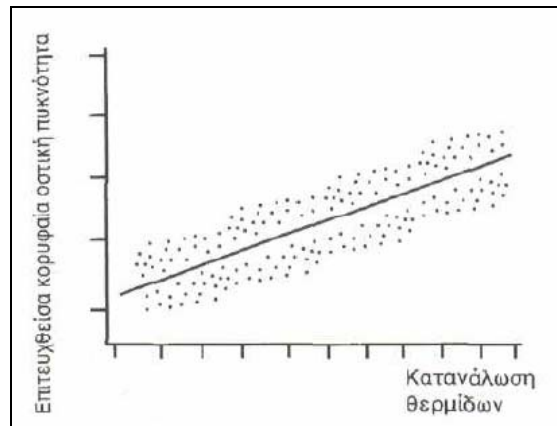
2.3 Κορυφαία Οστική Πυκνότητα

Κορυφαία οστική πυκνότητα (ΚΟΣ) είναι η μέγιστη επιτυγχανόμενη οστική πυκνότητα που μπορεί να αποκτήσει ένα άτομο έως την ηλικία των 30-35. (Σχήμα 2.2A) Την κορυφαία οστική πυκνότητα επηρεάζουν οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Κληρονομική προδιάθεση (περίπου το 80% της ΚΟΣ εξαρτάται από γονιδιακά αίτια)
- Ορμονικοί παράγοντες
- Κυήσεις και γαλουχία γυναικών μικρής ηλικίας (μικρότερης των 18 ετών)
- Διατροφή (Σχήμα 2.2B)
- Άσκηση



(A)



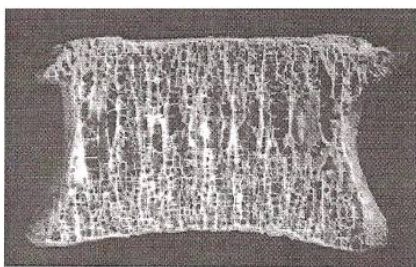
(B)

Σχήμα 2.2 (A) Διαγραμματική αναπαράσταση της ΚΟΣ και (B) Η εξάρτηση της ΚΟΣ από τη διατροφή.

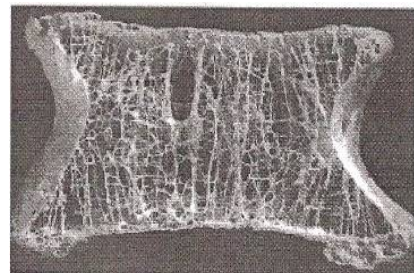
Η επίτευξη πολύ υψηλής ΚΟΣ καθιστά ελάχιστη την πιθανότητα εμφάνισης οστεοπόρωσης στην μετέπειτα ζωή, ενώ το αντίθετο οδηγεί κατά πάσα πιθανότητα σε οστεοπόρωση, συνήθως μετά την τέταρτη δεκαετία της ζωής.

2.4 Ορισμός Οστεοπόρωσης

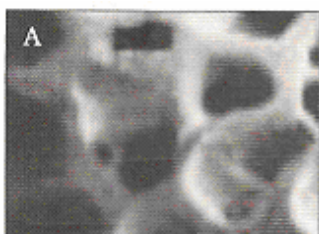
Οστεοπόρωση είναι η παθολογική κατάσταση, κατά την οποία η ελάττωση της οστικής πυκνότητας με τη συνύπαρξη ελαττωμένης μηχανικής αντοχής του οστού λόγω διαταραχής της μικροαρχιτεκτονική του, οδηγεί σε αυξημένη ευθραστότητα του οστού και συνεπώς σε αυξημένο κίνδυνο κατάγματος. (Σχήμα 2.3)



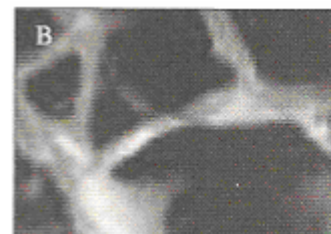
A



B



Γ



Δ

Σχήμα 2.3. Τομή σπονδύλου σε (A, Γ) Φυσιολογικό και (B, Δ) Οστεοπορωτικό άτομο.

Η στατιστική έννοια “T-score” παρουσιάζει το πόσο αποκλίνει η τιμή της οστικής πυκνότητας του ασθενή από το μέσο όρο που προκύπτει κατά την μέτρηση της οστικής πυκνότητας των οστών υγιών ατόμων, ηλικίας 20-30 χρόνων (πληθυσμός αναφοράς). Η διαφορά δίδεται σαν την τυπική απόκλιση (standard deviation, SD) από τη μέση τιμή του πληθυσμού αναφοράς. Συγκεκριμένα, ο τύπος από τον οποίο υπολογίζεται η τιμή του T-score είναι ο ακόλουθος:

$$T\text{-score} = \frac{\text{Μετρηθείσα BMD} - \text{Μέση τιμή BMD πληθυσμού αναφοράς}}{1 \text{ SD της BMD του πληθυσμού αναφοράς}}$$

Σύμφωνα με τον Οργανισμό Παγκόσμιας Υγείας (World Health Organization, WHO), απώλεια οστικής μάζας έως μία (1) σταθερή απόκλιση (SD) θεωρείται φυσιολογική, ενώ η ανεύρεση t-score 2,5 είναι ενδεικτική οστεοπόρωσεως και χρήζει θεραπείας.

2.5 Παράγοντες Κινδύνου

Οι σπουδαιότεροι παράγοντες κινδύνου για την εμφάνιση οστεοπόρωσης είναι η πρόωρη εμμηνόπαυση, η πτωχή διατροφή σε ασβέστιο, η πλούσια διατροφή σε λευκώματα, η κατάχρηση καφέ, τσαγιού και οινοπνευματωδών, το κάπνισμα, η αποφυγή ασκήσεως καθώς και διάφορα νοσήματα και φάρμακα. (Σχήμα 2.4)

Παράγοντες κινδύνου για εμφάνιση οστεοπόρωσεως. (Τροποποιημένο από τό βιβλίο: Τά μεταβολικά νοσήματα των οστών και διαταραχές τού μεταβολισμού των μετάλλων, Αθήνα 1998, Γ. Λυρίτης).

1. Φύλο
2. Προεμμηνόπαυσιακή ανεπάρκεια οιστρογόνων
3. Πρόωρη εμμηνόπαυση
4. Δίαιτα χαμηλή σε ασβέστιο
5. Δίαιτα πλούσια σε πρωτεΐνες
6. Γήρας
7. Κάπνισμα
8. Αλκοόλ
9. Λευκή ή Ασιατική φυλή
10. Καθιστική ζωή. Φαρμακευτικής αιτιολογίας π.χ. κορτιζόνη, θυροξίνη, ηπαρίνη
11. Νοσήματα, π.χ. ρευματοειδής αρθρίτις, υπερθυρεοειδισμός, πολλαπλούν μυέλωμα, νεοπλασμάτα, ηπατική και νεφρική ανεπάρκεια, αιτέλης οστεονέωση

Σχήμα 2.4 Βασικοί παράγοντες για την εμφάνιση οστεοπόρωσης

2.6 Μηχανισμός Εμφάνισης Οστεοπόρωσης

Ο κύριος μηχανισμός που οδηγεί στην εμφάνιση της νόσου της οστεοπόρωσης είναι η δημιουργία ενός μακροχρονίου αρνητικού οστικού ισοζυγίου. Το αρνητικό ισοζύγιο προκαλείται όταν διαταραχτεί ένας από τους δύο κύκλους της οστικής ανακατασκευής. Δηλαδή όταν παρατηρηθεί αυξημένη οστεοκλαστική δραστηριότητα ή μειωμένη οστεοβλαστική. Το αποτέλεσμα τελικά είναι η περιορισμένη παραγωγή οστίτη ιστού.

2.7 Τύποι Οστεοπόρωσης

Διακρίνονται δύο τύποι οστεοπόρωσης: Η πρωτοπαθής και η δευτεροπαθής.

Η πρωτοπαθής οστεοπόρωση διακρίνεται σε *τύπου I* (μετεμμηνοπαυσιακή) και *τύπου II* (γεροντική), βάσει της παθογενέσεως και του είδους των καταγμάτων. Η διάκριση, όμως, σήμερα δεν είναι μόνον ηλικιο-εξαρτωμένη και έτσι είναι ορθότερο να διακρίνεται σε τύπου I και τύπου II.

Τύπος I

Η ανεπάρκεια των οιστρογόνων αποτελεί την κύρια αιτία οστικής απώλειας περιεμμηνοπαυσιακά και στα πρώτα χρόνια μετά την εμμηνόπαυση. Ο τύπος I εμφανίζεται κυρίως σε οστά με περισσότερο σπογγώδες οστό, όπως είναι οι σπόνδυλοι και περιφερικά άκρα της κερκίδος και ωλένης. Ειδικότερα, στην περίπτωση των σπονδυλικών καταγμάτων, παρατηρείται σημαντική αραίωση των οστεοδοκίδων, και ιδιαίτερα των οριζόντιων. Αποτέλεσμα της οστικής απώλειας των σπονδυλικών σωμάτων και των επακόλουθων καταγμάτων είναι η εμφάνιση ραχιαλγίας, η προοδευτική απώλεια αναστήματος και η κύφωση.

Τύπος II

Η οστεοπόρωση τύπου II εμφανίζεται και στα δύο φύλα και οφείλεται κυρίως στο αρνητικό ισοζύγιο οστικής ανακατασκευής. Παρουσιάζεται κυρίως στο σπογγώδες, αλλά και στο φλοιώδες οστό. Τα κατάγματα ισχίου και τα σπονδυλικά κατάγματα είναι τα συνηθέστερα κατάγματα που προκαλούνται από την οστεοπόρωση αυτού του τύπου και αποτελούν βασική αιτία νοσηρότητας και θνησιμότητας στους ηλικιωμένους ασθενείς, ηλικίας μεγαλύτερης των 70 ετών. Χαρακτηριστική εμφάνιση έχουν τα σπονδυλικά κατάγματα. Χαρακτηρίζονται από προοδευτική σφηνοειδή παραμόρφωση, χωρίς έντονο πόνο, ο οποίος παρατηρείται στα κατάγματα του τύπου I, οπότε υπάρχει πλήρης καθίζηση των σπονδυλικών σωμάτων και πόνος, ο οποίος μπορεί να διαρκέσει έως και 2 μήνες.

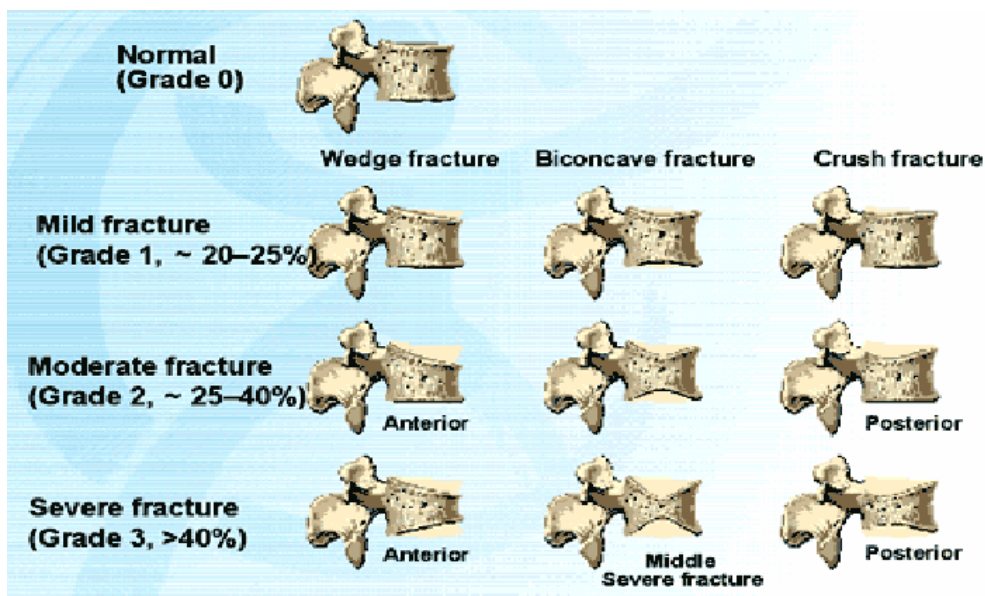
Δευτεροπαθής οστεοπόρωση: Η δευτεροπαθής οστεοπόρωση προκαλείται πάντοτε από κάποια πάθηση, όπως ο σακχαρώδης διαβήτης, ο υπερπαραθυρεοειδισμός, η χρήση κορτιζόνης και από άλλες παθήσεις ή φάρμακα. Στην κατηγορία αυτή αρκεί

επιστήμονες κατατάσσουν και την ανδρική οστεοπόρωση, αν και πρακτικά οι περισσότερες περιπτώσεις ανδρικής οστεοπορώσεως είναι ιδιοπαθείς.

2.8 Οστικά Κατάγματα

Όσον αφορά τους σπονδύλους η πιο συνηθισμένη μορφή καταγμάτων είναι τα κατάγματα λόγω θλίψης (compression vertebral fractures). Τα κατάγματα αυτά παρατηρούνται όταν τα μπροστινά τμήματα των σπονδύλων πιέζονται μεταξύ τους. Στην ύπαρξη αυτών των καταγμάτων οφείλονται οι μακροχρόνιοι πόνοι, οι αλλαγές στη στάση του σώματος, η απώλεια ύψους, η αδυναμία μυών και η παραμόρφωση της επηρεασμένης περιοχής. Στη σπονδυλική στήλη, οστεοπορωτικά κατάγματα εμφανίζονται κυρίως στους σπονδύλους της οσφυϊκής μοίρας καθώς και στους τελευταίους της θωρακικής μοίρας.

Ο Dr Harry K. Genant ασχολήθηκε με το βαθμό σοβαρότητας και την μορφή των σπονδυλικών καταγμάτων. Όσον αφορά το βαθμό σοβαρότητας διέκρινε τρεις τύπους σπονδυλικών καταγμάτων: α. μέτριου (mild) ή βαθμού 1 β. ενδιάμεσου (moderate) ή βαθμού 2 και γ. μεγάλου (severe) ή βαθμού 3 (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Ο κατά Genant διαχωρισμός των καταγμάτων λόγω θλίψης με βάση το βαθμό και την μορφή κατάγματος

Όσον αφορά τη μορφή τους, τα διαχώρισε σε τρεις κυρίως τύπους (Σχήμα 2.5), βάση της τελικής μορφής που παίρνει ο σπόνδυλος. Έτσι κατατάσσονται στα α. κατάγματα σφηνοειδούς μορφής (Wedge Fracture) όπου ο σπόνδυλος αποκτά σφηνοειδή μορφή στο μπροστινό ή στο πίσω μέρος του σπονδυλικού σώματος (σφηνοειδούς μορφής σπόνδυλος), β. κατάγματα αμφίκιου φακού (Biconcave Fracture) όπου ο σπόνδυλος παραμορφώνεται στο κέντρο του σπονδυλικού σώματος και στα γ. συντριπτικά κατάγματα (Crush Fracture) όπου το σπονδυλικό σώμα υφίσταται καθίζηση.

**Κεφάλαιο 3ο ΛΗΨΗ ΑΞΟΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ**

3.1 Εισαγωγή

Τομογραφία είναι η διαδικασία απεικόνισης ενός τριδιάστατου αντικειμένου με μία σειρά από διαδοχικές εικόνες. Ο τομογράφος μετακινείται γύρω από το σώμα και με τη βοήθεια ακτίνων X λαμβάνονται εικόνες από διαφορετικές γωνίες οι οποίες στη συνέχεια με τη βοήθεια υπολογιστή δίνουν την τελική τρισδιάστατη απεικόνιση.

3.2 Είδη τομογραφίας

Τα κυριότερα είδη των τομογραφιών είναι:

- Αξονικές Τομογραφίες και Υπολογιστικές Αξονικές τομογραφίες (CT και QCT)
- Μαγνητικές τομογραφίες (MRI)
- Εκπομπής ποζιτρονίων (PET)
- Ανίχνευσης φωτονίου μοναδικής ενέργειας (SPECT)
- Ηλεκτρικής αντίστασης (EIT)

3.3 Υπολογιστική Αξονική Τομογραφία

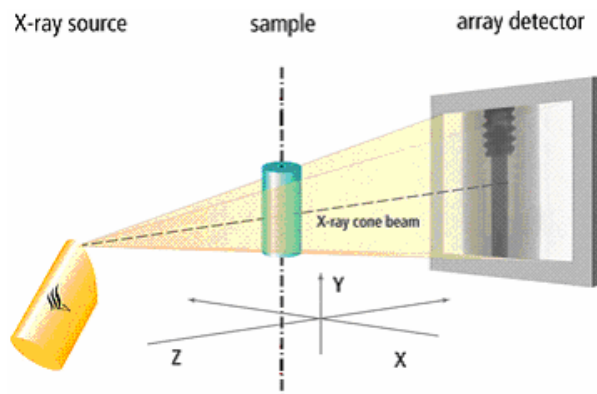
Οι αξονικές τομογραφίες (CT scans) εξάγονται από υπολογιστικούς αξονικούς τομογράφους. (Σχήμα 3.1A)

Η αρχή λειτουργίας του αξονικού τομογράφου βασίζεται στην εξασθένηση ή την απορρόφηση ακτίνων-X από τα οστά. (Σχήμα 3.1B) Τα οστά, ανάλογα με το πάχος τους και την περιεκτικότητά τους σε ανόργανη ύλη, απορροφούν ή εξασθενούν κατά ανάλογο τρόπο τη δέσμη ακτίνων-X που εκπέμπεται από την πηγή του αξονικού τομογράφου. Αντιδιαμετρικά της πηγής, είναι τοποθετημένο το σύστημα των ανιχνευτών, στους οποίους φτάνουν οι εξασθενημένες ακτίνες-X που έχουν διαπεράσει το σώμα. Στην τελική εικόνα που λαμβάνουμε από τον υπολογιστή του συστήματος, το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί σε ακτινοβολία που δεν απορροφήθηκε από τα οστά, αλλά προσέπεσε στο κενό. Το λιγότερο μαύρο χρώμα αντιπροσωπεύει την απορρόφηση των μαλακών ιστών, ενώ το πιο άσπρο την απορρόφηση των οστών. Η QCT είναι η μέθοδος που απεικονίζει αποτελεσματικότερα το σπογγώδες οστό ως τριδιάστατο αντικείμενο. Επομένως, χρησιμοποιείται ευρέως για την απεικόνιση οστών με μεγάλο λόγο σπογγώδους προς φλοιώδες οστό, όπως είναι οι σπόνδυλοι.

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη δόση ακτινοβολίας που δέχεται ο ασθενής, καθώς και ο τεχνικός. Τέλος, μεταξύ των διαφορετικών τομογράφων του εμπορίου και των διαφορετικών ιατρικών κέντρων παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα των μετρήσεων και το χρόνο που διαρκεί η εξέταση.



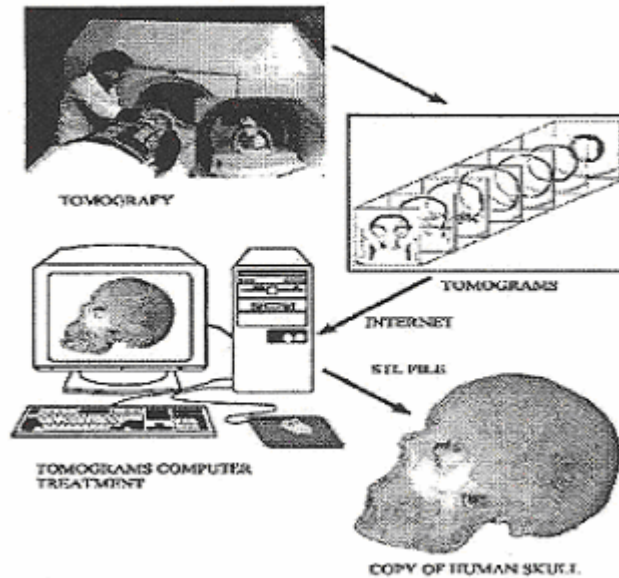
A



B

Σχήμα 3.1 (Α) Διάταξη δύο υπολογιστικών αξονικών τομογράφων (QCT) και (Β) Αρχή λειτουργίας της αξονικής τομογραφίας.

Οι αξονικές τομογραφίες προέρχονται από μια περίπλοκη μαθηματική διαδικασία με χρήση μετασχηματισμού Fourier και είναι από τη φύση τους ψηφιακές εικόνες. Η προσωρινή αποθήκευσή τους γίνεται στον μαγνητικό δίσκο του αξονικού τομογράφου ενώ η μονιμότερη σε μαγνητο-οπτικούς. Κάθε οπτικός δίσκος μιας συγκεκριμένης εταιρίας αξονικών τομογράφων (υπάρχουν διεθνώς περί τις 10) είναι προσπελάσιμος μόνο από ειδικό οδηγό. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλα μέσα δικτυακής επικοινωνίας καθώς και άλλοι τρόποι αποθήκευσης. Η τυποποίηση που έχει επικρατήσει συνίσταται στη χρήση αρχείου DICOM. Παρόλο που δεν είναι εντελώς απαραίτητο, τα αρχεία DICOM λαμβάνονται ευκολότερα όταν ο αξονικός τομογράφος διαθέτει μια δεύτερη κονσόλα, οπότε είναι πολλές φορές δυνατή η εξαγωγή των ιατρικών εικόνων ακόμη και σε άλλες εναλλακτικές μορφές όπως TIFF και BMP. Σήμερα πλέον, οι αξονικοί τομογράφοι έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν όλες τις προηγούμενες αναφερθείσες μορφές αρχείων ακόμη και σε ένα απλό CD ή και να τις μεταφέρουν μέσω Internet. (Εικόνα 3.2) [1]



Σχήμα 3.2 Λήψη αξονικής τομογραφίας, αποθήκευση σε H/Y και μεταφορά μέσω Internet

3.3.1 Αρχεία τύπου DICOM

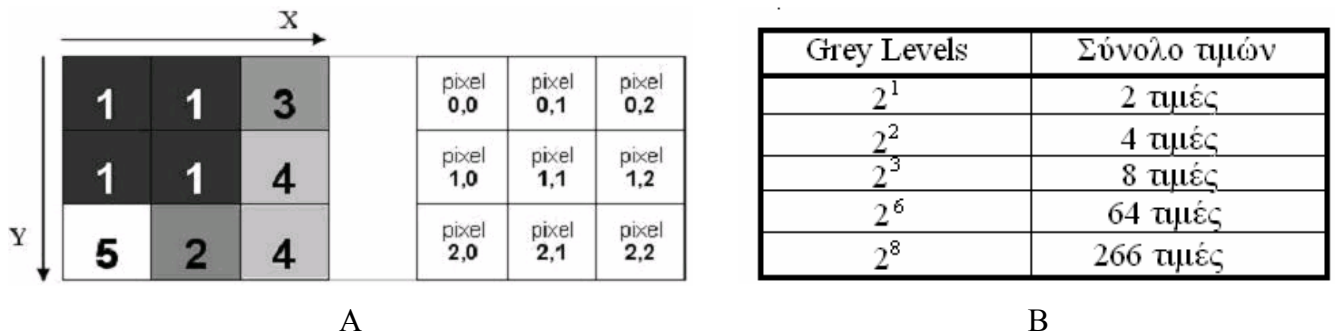
Μερικά χρόνια πριν, το κύριο πρόβλημα της αρχειοθέτησης ψηφιακών εικόνων από διάφορες μονάδες (μηχανήματα) ενός ακτινολογικού εργαστηρίου σε μία κοινή βάση δεδομένων ήταν η ασυμβατότητα του πρωτοκόλλου διαχείρισης της ψηφιακής εικόνας ανάμεσα σε διαφορετικά μηχανήματα και διαφορετικούς κατασκευαστές. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε πρόσφατα όταν οι κατασκευαστές υιοθέτησαν ένα κοινό πρωτόκολλο διαχείρισης της ψηφιακής εικόνας και το ονόμασαν ψηφιακή απεικόνιση και επικοινωνία στην ιατρική (Digital Imaging and Communication in Medicine [DICOM]). Το πρωτόκολλο DICOM είναι μια ομάδα κανόνων που αφορούν την ιατρική εικόνα και της δίνουν την δυνατότητα να μεταφέρεται από μηχανήμα σε μηχανήμα, από υπολογιστή σε υπολογιστή και από νοσοκομείο σε νοσοκομείο. Υιοθετήθηκε έτσι μια κοινή γλώσσα η οποία εξασφαλίζει ότι η ιατρική εικόνα που παράχθηκε αρχικά θα συνοδεύεται από δεδομένα αναγνώρισης και παραγωγής τα οποία θα είναι αναγνωρίσιμα από όποιον τα χειρίζεται [19].

3.4 Αναπαραγωγή Εικόνας Υπολογιστικής Αξονικής Τομογραφίας

Κάθε αξονική τομογραφία αποτελεί μία ασπρόμαυρη φωτογραφία κλιμακωτών αποχρώσεων του γκρι, με ακραίες τιμές του λευκού και του μαύρου, διαμορφώνοντας έτσι μία εικόνα συνεχούς τόνου. Η μετατροπή της εικόνας συνεχών τόνων σε ψηφιακή γίνεται τεμαχίζοντάς την σε ανεξάρτητα σημεία πληροφοριών ή αλλιώς εικονοστοιχεία (pixels).

Κάθε εικονοστοιχείο χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος συντεταγμένων (x, y) που καθορίζει τη θέση του στην εικόνα. (Εικόνα 3.2.1A) Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από μία τιμή φωτεινότητας που κυμαίνεται από το μαύρο ως το λευκό περνώντας από ενδιάμεσες τιμές

του γκρι που ονομάζονται grey levels. Ο αριθμός των grey levels επιλέγεται για υπολογιστικούς λόγους να είναι μία δύναμη του δύο. Οπότε το κάθε σημείο της εικόνας έχει τιμή φωτεινότητας g όπου $0 \leq g \leq 2l - 1$, και l είναι ένας ακέραιος αριθμός. (Σχήμα 3.3B)



Σχήμα 3.3.1: A. Αντιστοίχιση σε κάθε pixel συγκεκριμένης τιμής φωτεινότητας και ζεύγους συντεταγμένων και B. Το πλήθος των διαφορετικών τιμών φωτεινότητας που μπορεί να πάρει το κάθε pixel για διάφορες τιμές του l .

Κατά τη διακριτοποίηση μιας εικόνας υπάρχει πάντα η αμφιβολία του πόσο καλή είναι η αναπαράσταση της φυσικής αρχικής εικόνας που είχαμε. Για να καθορίσουμε αυτό χρησιμοποιούμε τον όρο ανάλυση (resolution) ψηφιακής εικόνας. Η ανάλυση εικόνας διαιρείται σε τρεις κατηγορίες. Η χωρική ανάλυση περιγράφει τον αριθμό των pixel στον οποίο έχει διακριτοποιηθεί η ψηφιακή εικόνα. Η ανάλυση φωτεινότητας περιγράφει την ακρίβεια με την οποία η φωτεινότητα ενός pixel συγκρίνεται με τη φωτεινότητα ενός σημείου της αρχικής εικόνας στη θέση που θέλουμε. Τέλος ο αριθμός πλαισίου έχει να κάνει αποκλειστικά με τη δυνατότητα του επεξεργαστή στην παρουσίαση μιας ψηφιακής εικόνας.

**Κεφάλαιο 4ο ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ
ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

4.1 Εισαγωγή

Με τον όρο «Εμβιομηχανική» εννοούμε τη εφαρμογή διαφόρων κλάδων της μηχανικής στο ανθρώπινο σώμα. Από θεματική άποψη η εμβιομηχανική καλύπτει διάφορες περιοχές, όπως είναι η προσομοίωση της φυσιολογίας του ανθρώπινου οργανισμού (physiological processes), ρεολογικά φαινόμενα (αίμα, ούρα) και μηχανική ανάπλαση των οστών (ορθοπεδική). Σκοπός της εμβιομηχανικής είναι η μελέτη του ανθρώπινου σώματος και η αποκατάσταση της λειτουργικότητας του είτε με ενίσχυση των δομικών μελών του είτε με ολοκληρωτική αντικατάσταση τους.

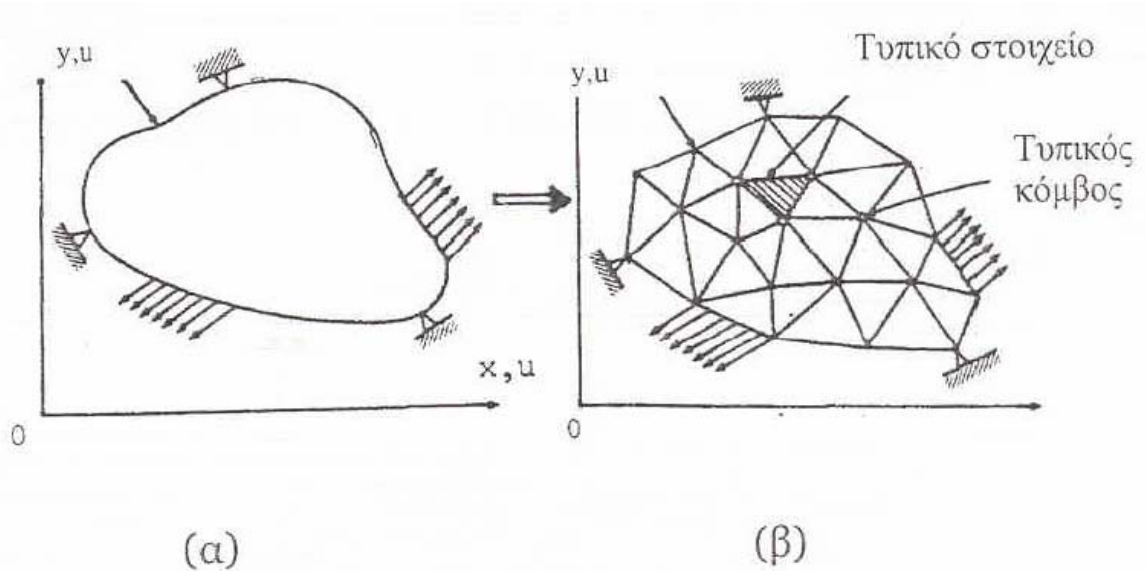
Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '70 έχει αρχίσει να εκδηλώνεται μία έντονη ενασχόληση με την εφαρμογή των υπολογιστικών μεθόδων στην ανωτέρω ευρύτερη περιοχή της εμβιομηχανικής. Πλέον, βασικό υπολογιστικό εργαλείο του τομέα της εμβιομηχανικής αποτελεί η θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών.

4.2 Γενικές Αρχές Πεπερασμένων Στοιχείων

Η δυναμικότητα των προσεγγιστικών μεθόδων που βασίζονται στα ενεργειακά θεωρήματα είναι πολύ μεγάλη και δίνει λύσεις σε σημεία που οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν μπορούν να δώσουν. Κύριο χαρακτηριστικό των προσεγγιστικών μεθόδων είναι η ανάγκη προσδιορισμού ενός παραδεκτού πεδίου (π.χ. μετατοπίσεων) με τη βοήθεια συναρτήσεων, που ορίζονται σε όλο το σώμα και ικανοποιούν ορισμένες συνθήκες στα σύνορα. Με τον τρόπο αυτό το αρχικό πρόβλημα του προσδιορισμού του πεδίου των μετατοπίσεων σε κάθε σημείο του σώματος (άπειρος βαθμός ελευθερίας κίνησης) μετασχηματίζεται σε ένα υποκατάστατο πρόβλημα προσδιορισμού πεπερασμένου αριθμού άγνωστων συντελεστών (πεπερασμένος βαθμός ελευθερίας). Το υποκατάστατο πρόβλημα δίνει μια προσεγγιστική λύση στο αρχικό πρόβλημα.

Η κατασκευή των συναρτήσεων, που ικανοποιούν τις συνθήκες στα σύνορα είναι μια σχετικά εύκολη υπόθεση όταν το σύνορο του σώματος είναι απλό. Όταν όμως το σύνορο γίνεται πολύπλοκο η ικανοποίηση των οριακών συνθηκών γίνεται σχεδόν αδύνατη. Αυτές ακριβώς οι δυσκολίες αποφεύγονται με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Σύμφωνα με αυτή, το σώμα (Σχήμα 4.1) χωρίζεται σε έναν αριθμό περιοχών που ονομάζονται στοιχεία. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται μέσα σε κάθε στοιχείο είναι απλές και συνήθως πολυωνμικής έκφρασης. Έτσι, χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων γίνεται δυνατό να αποκτηθεί μια καλή προσέγγιση της πραγματικής

κατάστασης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι να αναχθεί πάλι το αρχικό πρόβλημα σ' ένα πρόβλημα με πεπερασμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας κίνησης. Η μεθοδολογία αυτή, αν και μπορεί να υπαχθεί στις μεθοδολογίες Ritz ή Galerkin (προσεγγιστικές ενεργειακές μέθοδοι που βασίζονται στην αρχή του ελάχιστου της δυναμικής ενέργειας ή στην αρχή των δυνατών έργων), παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:



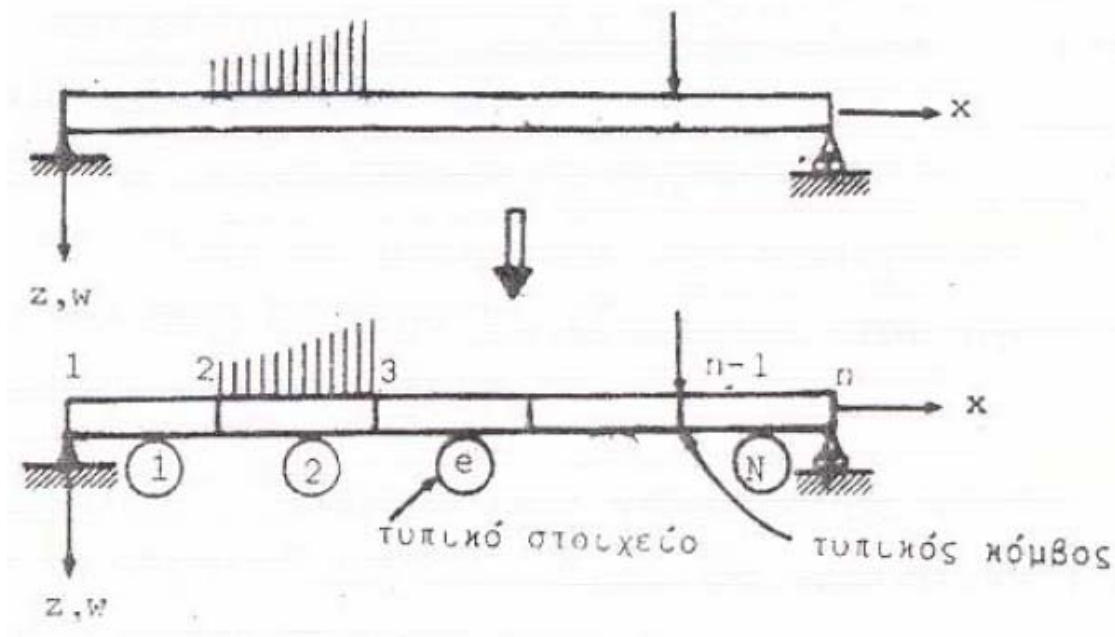
Σχήμα 4.1 Τεμαχισμός του σώματος σε πεπερασμένα στοιχεία

- i. Οι συναρτήσεις είναι απλούστερες και δεν απαιτείται η ικανοποίηση κάποιων συνθηκών στα σύνορα του σώματος.
- ii. Οι ολοκληρώσεις γίνονται σε κάθε στοιχείο χωριστά (οι συναρτήσεις είναι μηδέν έξω από το στοιχείο). Έτσι, στις απλές περιπτώσεις το αποτέλεσμα προκύπτει εύκολα με αναλυτικό τρόπο, ενώ στις πιο σύνθετες μπορεί να χρησιμοποιηθεί αριθμητική ολοκλήρωση.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια από τις πιο ισχυρές μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση οριακών προβλημάτων. Πραγματικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε από τους μηχανικούς στην προσπάθειά τους να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα κατασκευών. Ο στόχος τους είναι να χρησιμοποιηθεί μια τεχνική ανάλογη με αυτή που χρησιμοποιείται στις ραβδωτές κατασκευές. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε σαν εξέλιξη της μητρικής ανάλυσης των κατασκευών. Έτσι, σήμερα η μητρική ανάλυση των κατασκευών περιλαμβάνεται στις ειδικές εφαρμογές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

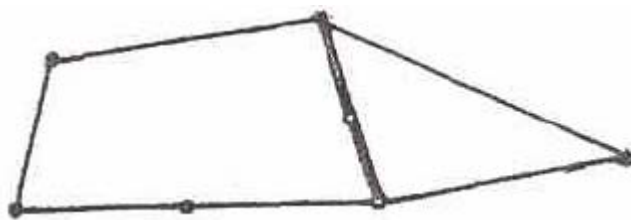
4.3 Σύντομη Περιγραφή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Έστω ότι δίνεται ένα ελαστικό σώμα που καταλαμβάνει το χώρο D και ο χώρος αυτός χωρίζεται με έναν κάρναβο ιδεατών επιφανειών ή γραμμών σε έναν αριθμό περιοχών, τα πεπερασμένα στοιχεία (Σχήμα 4.2). Στην περίπτωση που ο D είναι τρισδιάστατος τα πεπερασμένα στοιχεία είναι επίσης τρισδιάστατα, ενώ όταν το σώμα είναι διδιάστατο τα στοιχεία είναι διδιάστατα. Στην περίπτωση των ραβδωτών κατασκευών χρησιμοποιούνται τα μονοδιάστατα στοιχεία. Σε μια κατασκευή είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και τα τρία είδη στοιχείων.



Σχήμα 4.2 Πεπερασμένα στοιχεία και κόμβοι

Τα στοιχεία υποτίθεται πως συνδέονται σ' έναν πεπερασμένο αριθμό σημείων, τους κόμβους (Σχήμα 4.2 και Σχήμα 4.3). Κόμβοι βέβαια μπορεί να υπάρχουν και στο εσωτερικό κάποιου στοιχείου, που δε 'συνδέονται' με τα γειτονικά στοιχεία. Κάθε κόμβος, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, έχει κάποιες δυνατότητες μετατόπισης, κάποιους δηλαδή βαθμούς ελευθερίας κίνησης. Οπότε, σε μια τρισδιάστατη κατασκευή κάθε σημείο, άρα και κάθε κόμβος, έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας, στη διδιάστατη δύο και στα δικτυώματα μια. Εμπλοκή εμφανίζεται στις καμπτόμενες κατασκευές, όπου για να προσδιορισθεί η θέση του στοιχείου δεν επαρκεί το βέλος αλλά χρειάζεται και η κλίση. Έτσι, για παράδειγμα, στις επίπεδες πλαισιωτές κατασκευές κάθε κόμβος έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας, που είναι οι μετατοπίσεις κατά τους άξονες x και y και η στροφή του κόμβου γύρω από τον άξονα z , στις πλάκες χρειάζεται το βέλος καθώς και οι κλίσεις σε δύο κάθετες διευθύνσεις, κλπ.



Σχήμα 4.3 Σύνδεση πεπερασμένων στοιχείων με κόμβους

Ονομάζεται N ο συνολικός αριθμός των στοιχείων στον οποίον υποδιαιρείται η κατασκευή, n ο συνολικός αριθμός των κόμβων της κατασκευής και k ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας κάθε κόμβου. Υποτίθεται ακόμα ότι κάθε στοιχείο έχει p κόμβους. [11]

Αν τα δεδομένα του προβλήματος που ζητείται η λύση του είναι τα διανύσματα $F = \{F_x, F_y, F_z\}^T$ και $t = \{t_x, t_y, t_z\}^T$ των καθολικών και επιφανειακών δυνάμεων που ασκούνται στην υπό εξέταση κατασκευή, τότε εφαρμόζονται τα ενεργειακά θεωρήματα (Αρχή δυνατών έργων) από τα οποία προκύπτουν kn εξισώσεις, που προσδιορίζουν τις kn άγνωστες μετατοπίσεις όλων των κόμβων της κατασκευής.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που η αρχή των δυνατών έργων περιοριστεί μόνο σε ένα πεπερασμένο στοιχείο τότε προκύπτει η σχέση:

$$K^e \cdot q^e = F^e \quad (4.1)$$

Όπου K^e είναι το μητρώο ακαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου, $F^e = FFe + Fte$ είναι οι κομβικές δυνάμεις, δηλαδή η αναγωγή των καθολικών φορτίσεων F και των επιφανειακών t σε ισοδύναμα φορτία στους κόμβους του πεπερασμένου στοιχείου και q^e το μητρώο μετατοπίσεων των κόμβων του πεπερασμένου στοιχείου.

Αντίστοιχα για όλη την κατασκευή η σχέση (4.1) γράφεται με την παρακάτω μορφή:

$$K \cdot \delta = R \quad (4.2)$$

Όπου K είναι το μητρώο ακαμψίας όλης της κατασκευής με διαστάσεις $kn \times kn$, R οι κομβικές δυνάμεις, δηλαδή η αναγωγή των καθολικών φορτίσεων F και των επιφανειακών t σε ισοδύναμα φορτία σε όλους τους κόμβους της κατασκευής, και δ το μητρώο μετατοπίσεων όλων των κόμβων της κατασκευής.

Κάθε πεπερασμένο στοιχείο δεν παύει να έχει την ίδια ελαστική συμπεριφορά με το αρχικό σώμα. Το κέρδος από αυτή την υποδιαίρεση είναι ότι το στοιχείο έχει πεπερασμένο μέγεθος και απλούστερη μορφή. Έτσι, γνωρίζοντας τις μετατοπίσεις των κόμβων ενός στοιχείου, χρησιμοποιώντας παρεμβολή υπολογίζονται οι μετατοπίσεις κάθε σημείου του στοιχείου. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις και τέλος οι τάσεις.

Οι παραμορφώσεις δίνονται από τη σχέση:

$$\varepsilon = X \cdot q \quad (4.3)$$

όπου ε και q είναι αντίστοιχα το μητρώο τροπών και μετατοπίσεων και X είναι το μητρώο τελεστής.

Στην μονοδιάστατη ελαστικότητα όπου $q(x) = u(x)$ η σχέση (4.3) γράφεται πολύ απλά:

$$\varepsilon = \partial u / \partial x \quad (4.4)$$

Ενώ αντίστοιχα στην διδιάστατη ελαστικότητα δίνονται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Τέλος, οι τάσεις συνδέονται με τις τροπές με τη σχέση:

$$\sigma = D \cdot \varepsilon \quad (4.6)$$

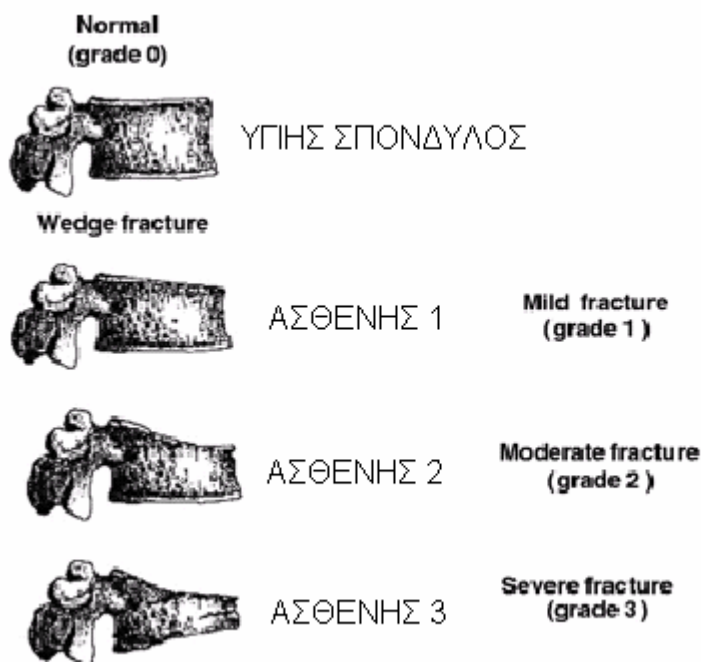
όπου D είναι το μητρώο των ελαστικών σταθερών, δηλαδή το μητρώο που έχει το μέτρο ελαστικότητας προς όλες τις κατευθύνσεις.

**Κεφάλαιο 5ο ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ
ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ
& ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ**

5.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης του βαθμού κατάγματος στα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης τεσσάρων σπονδύλων. Επίσης, διερευνάται η επίδραση του μεσοσπονδύλιου δίσκου στη μηχανική συμπεριφορά των υπό εξέταση σπονδύλων.

Συγκεκριμένα, εξετάζεται ο δωδέκατος θωρακικός σπόνδυλος (Θ12) τεσσάρων διαφορετικών ατόμων, που υποβλήθηκαν σε αξονική τομογραφία. Ο πρώτος από τους εξεταζόμενους σπονδύλους είναι υγιής, ενώ οι υπόλοιποι τρεις παρουσιάζουν διαφορετικού βαθμού οστεοπορωτικό κάταγμα, σφηνοειδούς μορφής. Ο πρώτος ασθενής παρουσιάζει ήπιο κάταγμα (βαθμού 1), ο δεύτερος μέτριου βαθμού κάταγμα (βαθμού 2), ενώ ο τρίτος σοβαρού βαθμού κάταγμα (βαθμού 3) - σύμφωνα με το διαχωρισμό κατά Genant. (Σχήμα 5.1)



Σχήμα 5.1: Η κατά Genant ταξινόμηση των σφηνοειδούς μορφής σπονδυλικών καταγμάτων και η αντιστοίχησή τους σπονδύλους των υπό εξέταση ασθενών στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Οι τομογραφίες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική έχουν εξαχθεί από αξονικό τομογράφο τύπου Spiral Toshiba Xpress GX CT σε μορφή Dicom αρχείων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία των μοντέλων αναφέρεται συνοπτικά παρακάτω.

Τα Dicom αρχεία που έχουμε λάβει από τον αξονικό τομογράφο εισάγονται στο Mimics το οποίο είναι ένα πρόγραμμα δημιουργίας και απεικόνισης τρισδιάστατων

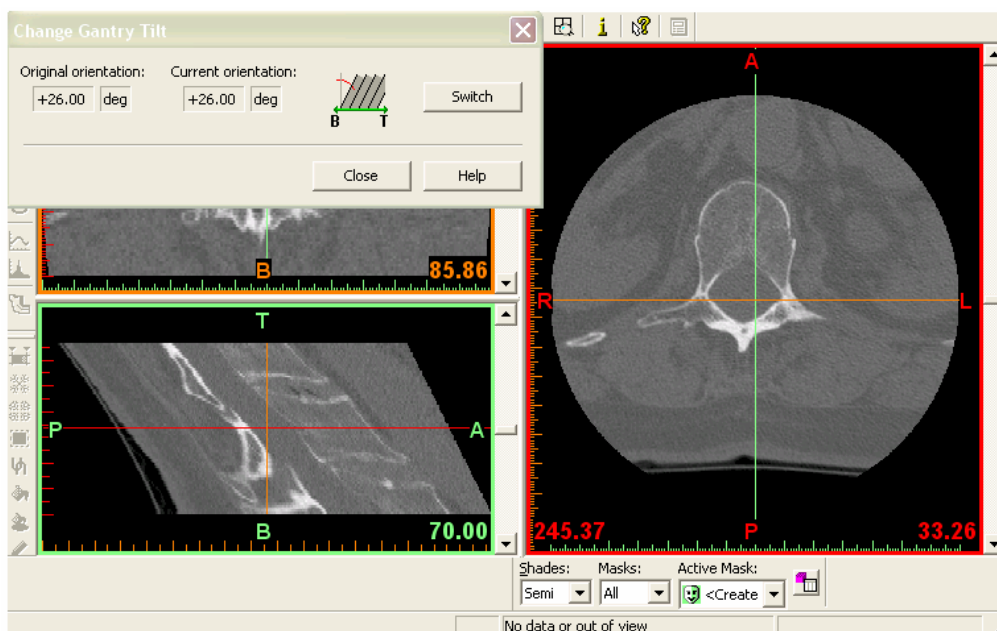
αντικειμένων. Η τρισδιάστατη αυτή απεικόνιση εισάγεται ακολούθως στο Ansys το οποίο είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση πολυδιάστατων δομών. Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι το Ansys v.10.0. Επιγραμματικά, η διαδικασία που ακολουθείται για την δημιουργία του κάθε μοντέλου είναι: Εισαγωγή της γεωμετρίας, γένεση πλέγματος, απόδοση υλικών ,επιβολή στηρίξεων και φορτίσεων και τέλος η επίλυση του προβλήματος

5.2 Επεξεργασία Των Αξονικών Τομογραφιών

Το πρόγραμμα επεξεργασίας τομογραφιών που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το MIMICS v 8.11.

Στο MIMICS εισάγονται αρχεία τύπου Dicom που έχουν ληφθεί από τον αξονικό τομογράφο. Από τις πληροφορίες των Dicom αρχείων επιτυγχάνεται η τριδιάστατη απεικόνιση του προς εξέταση σπονδύλου.

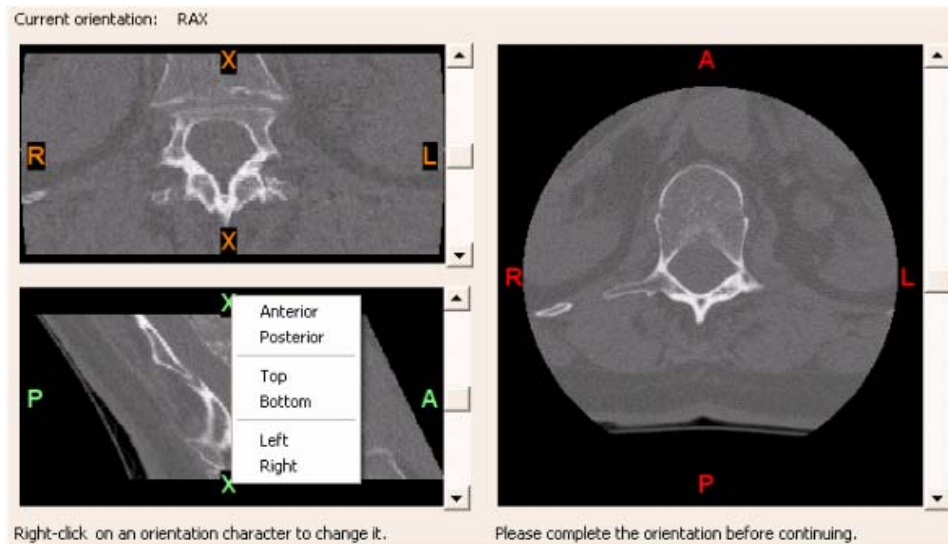
Το πρώτο βήμα, μετά την εισαγωγή των τομογραφιών στο πρόγραμμα MIMICS, είναι η διόρθωση της γωνίας των τομογραφιών. Κατά τη σάρωση ο τομογράφος στρέφει κάθε τομογραφία που ανήκει σε ένα πακέτο τομογραφιών κατά συγκεκριμένη γωνία, ώστε όλες οι τομογραφίες να έχουν τον ίδιο κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 5.2 Η διόρθωση του tilt στο περιβάλλον του MIMICS.

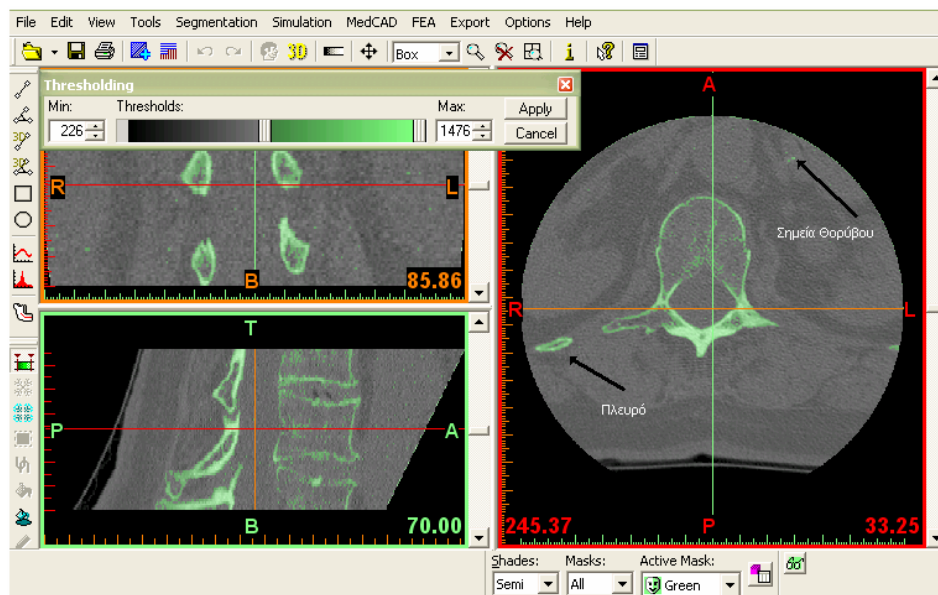
Οπότε, το MIMICS επιτρέπει στο χρήστη να εξαλείψει τη γωνία διόρθωσης (tilt) κατά συγκεκριμένες μοίρες για κάθε σπόνδυλο. (Σχήμα 5.2)

Στη συνέχεια ορίζεται από τον χρήστη η πρώτη και η τελευταία τομογραφία. (Σχήμα 5.3)



Σχήμα 5.3 Ο ορισμός της πάνω και της κάτω πλευράς του σπονδύλου στο πρόγραμμα MIMICS.

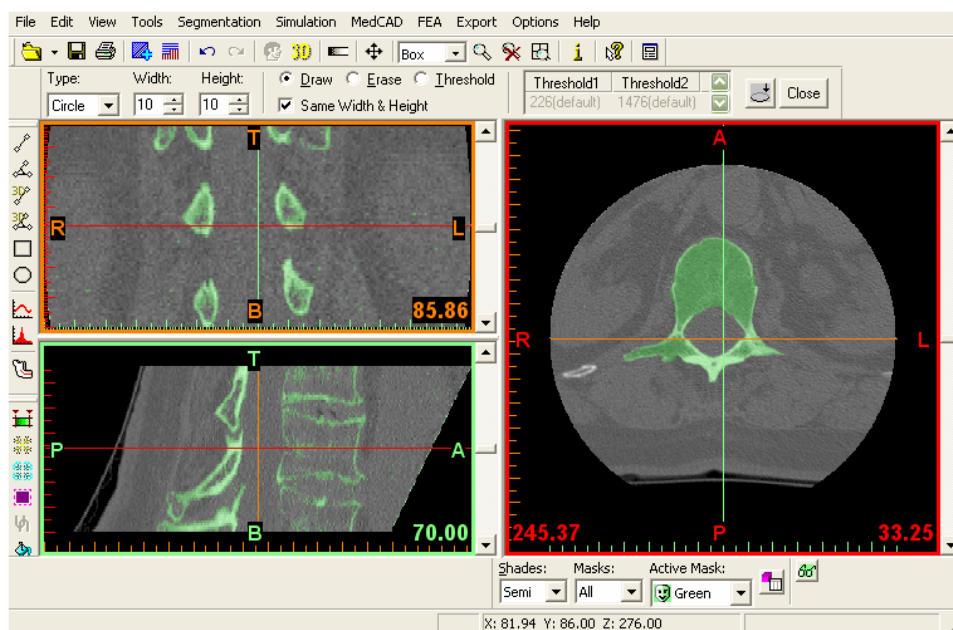
Ο αξονικός τομογράφος δεν μπορεί να σαρώσει μόνο το σπόνδυλο που ζητείται η εξέταση του.



Σχήμα 5.4 Ο ορισμός των ορίων φωτεινότητας (Threshold) και το περιβάλλον του MIMICS πριν την επεξεργασία μιας τυχαίας τομογραφίας του Θ12.

Συνεπώς, στην αρχική εικόνα που έχουμε, εκτός από τον προς εξέταση σπόνδυλο, εμφανίζονται και τμήματα των εκατέρωθεν σπονδύλων, τμήματα των πλευρών, μαλακοί ιστοί και θόρυβος από τον τομογράφο. Αρχικά, ορίζονται στο περιβάλλον του MIMICS τα όρια (threshold) φωτεινότητας, έτσι ώστε να απεικονίζονται μόνο σκληροί ιστοί. Το κατώτερο όριο φωτεινότητας στην παρούσα μελέτη ισούται με 226 Hounsfield Units (HU) και το ανώτερο με 1476 HU. (Σχήμα 5.4)

Εν συνεχεία, απομακρύνονται γραφικά από το χρήστη τα τμήματα που έχουν φωτεινότητα εντός των ορίων που επιλέχθηκαν, αλλά δεν ανήκουν στον υπό εξέταση σπόνδυλο. Αφότου έχει απομονωθεί ο υπό εξέταση σπόνδυλος, συμπληρώνονται πάνω στην τομογραφία οι περιοχές του σπονδύλου όπου στο γραφικό περιβάλλον του MIMICS δεν ανήκουν στα όρια φωτεινότητας που ετέθησαν. Οι περιοχές αυτές αναπαριστούν οστό με χαμηλότερη της ελάχιστης τιμής φωτεινότητας που ορίστηκε. Τελικά, ο σπόνδυλος αποκτά ενιαίο όγκο. (Σχήμα 5.5)



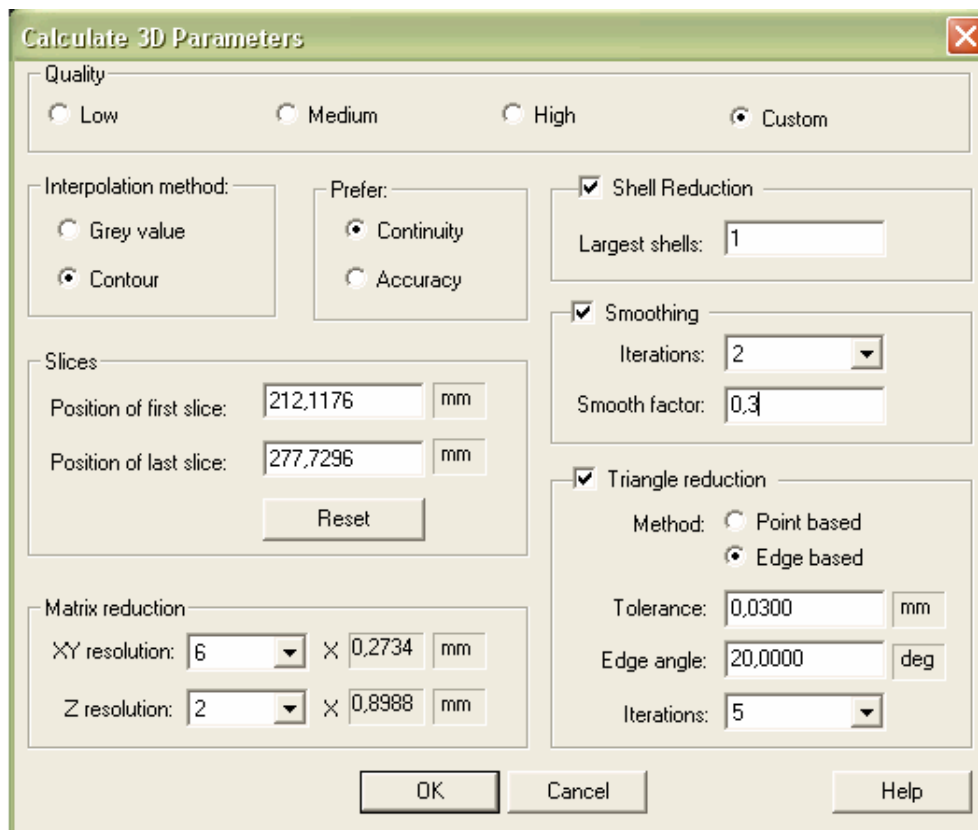
Σχήμα 5.5 Γραφική συμπλήρωση του σπονδύλου για την δημιουργία ενιαίου όγκου μέσα στο περιβάλλον του MIMICS.

Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία των τομογραφιών, ακολουθεί η τριδιάστατη απεικόνιση του σπονδύλου, χρησιμοποιώντας την εντολή 'Calculate 3D'. Η γεωμετρία της εξωτερικής επιφάνειας του σπονδύλου αναπαρίσταται με χρήση τριγωνικών επιφανειών.

Κατά την δημιουργία του τριδιάστατου αντικειμένου, μετά από προγενέστερη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο παρών εργαστήριο, βρέθηκε ότι ιδιαίτερης προσοχής χρήζει η επιλογή της τιμής ορισμένων παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητά του (Σχήμα 5.6), όπως:

- Χρήση φίλτρου το οποίο αποφεύγει την ύπαρξη μικρών όγκων κενού μέσα στη γεωμετρία (shell reduction).
- Εξομάλυνση της εξωτερικής επιφάνειας της τριδιάστατης απεικόνισης (smoothing).

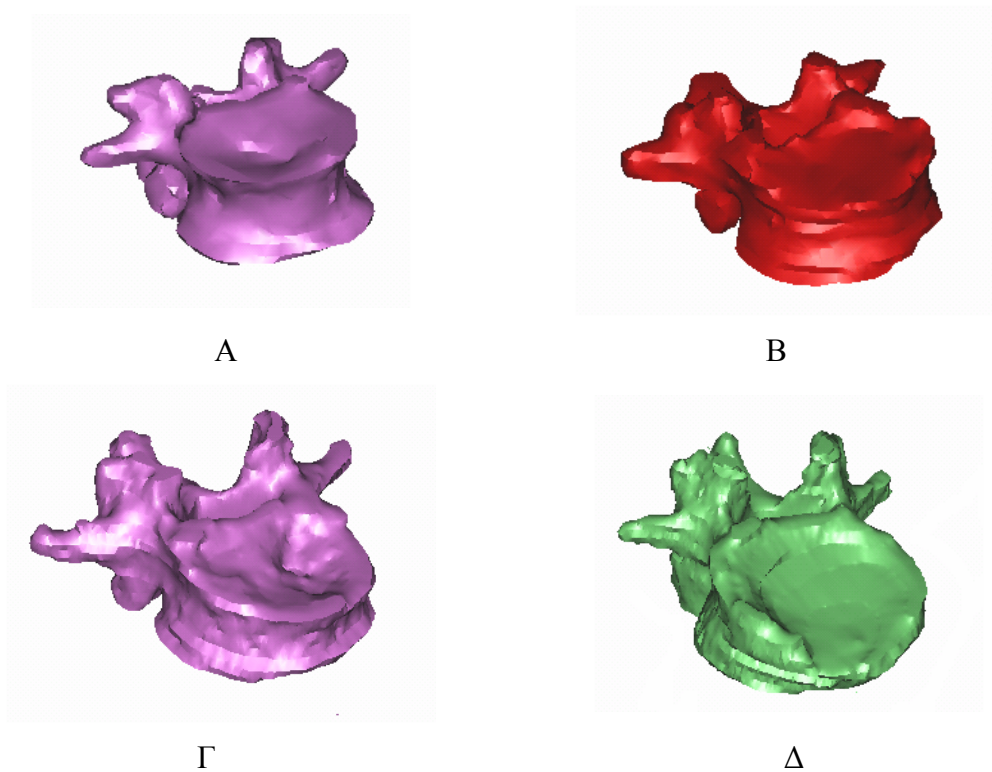
- Ορισμός του αριθμού των εικονοστοιχείων που ομαδοποιούνται στο επίπεδο xy και στον άξονα z για να δημιουργηθούν οι τριγωνικές επιφάνειες (matrix reduction).
- Ελάττωση του αριθμού των τριγωνικών επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν (triangle reduction).



Σχήμα 5.6 Επιλογές που δίνονται στο χρήστη κατά την εξαγωγή τριδιάστατου αντικειμένου από το MIMICS.

Οι τιμές που δίδονται στις προαναφερθείσες παραμέτρους τείνουν να ελαττώσουν τον συνολικό αριθμό τριγώνων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της εξωτερικής επιφάνειας του εκάστοτε σπονδύλου. Επίσης, στοχεύουν και στην ομαλοποίησή της. Όμως, το τελικό τριδιάστατο αντικείμενο που αναπαριστά το σπόνδυλο εξακολουθεί να αποτελεί μία πιστή και υψηλής ποιότητας αναπαράσταση του σπονδύλου. Επιπλέον, μέσω αυτής της διαδικασίας, εξυπηρετείται και η ελάττωση του υπολογιστικού χρόνου που χρειάζεται κατά την εισαγωγή και επεξεργασία του αντικειμένου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Στην ακόλουθη εικόνα (Σχήμα 5.7) παρατίθενται τα τριδιάστατα αντικείμενα των τεσσάρων σπονδύλων που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως αυτά προκύπτουν στο περιβάλλον του MIMICS.



Σχήμα 5.7 Τριδιάστατα αντικείμενα των τεσσάρων υπό εξέταση σπονδύλων της παρούσης διπλωματικής εργασίας που προκύπτουν από το πρόγραμμα MIMICS

Τέλος, η τριδιάστατη γεωμετρία του σπονδύλου εξάγεται υπό τη μορφή .stl (stereolithography) από το MIMICS. Υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής δύο ειδών αρχείων .stl, Binary ή ASCII. Ο όρος ASCII (American Standard Code for Information Interchange) είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος μορφοποίησης κειμένου στους υπολογιστές και στο διαδίκτυο. Σε ένα ASCII αρχείο κάθε αγγλικός χαρακτήρας αναπαρίσταται από ένα επτανήφιο δυαδικό αριθμό.

Όμως, προκειμένου να επιτευχθεί επικοινωνία μεταξύ του αρχείου .stl και του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων όπου θα δημιουργηθεί το τριδιάστατου μοντέλου του σπονδύλου, προηγείται η επεξεργασία του .stl αρχείου. Το .stl αρχείο τροποποιείται με τη βοήθεια ενός διορθωτή κειμένου ώστε να μετατραπεί σε εντολές του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφουν σημεία στην εξωτερική επιφάνεια του σπονδύλου. Οι αλλαγές που γίνονται στο .stl αρχείο είναι οι ακόλουθες:

- Στην αρχή της σελίδας εισάγεται «/ prep7» ώστε να ανοίξει ο preprocessor
- Όπου “facet”, “end”, “outer” εισάγω “!” μετατρέποντας έτσι τις συγκεκριμένες γραμμές σε γραμμές σχολίων
- Όπου “vertex” εισάγω “k” ώστε να γίνει η εισαγωγή των keypoints.

- Όπου “ ” εισάγω “,” ώστε να αποδοθεί σωστότερα η παραπάνω εντολή για τα keypoints.

5.3 Μοντελοποίηση του Σπονδύλου με Πεπερασμένα Στοιχεία

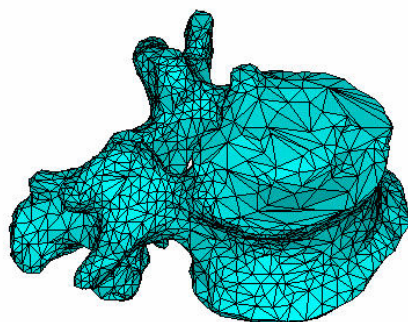
5.3.1 Εισαγωγή Μοντέλου στο Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι το ANSYS v 10.0. Το τροποποιημένο αρχείο .stl εισάγεται στο ANSYS με την επιλογή “Read Input from” της επιλογής files από τη γραμμή εργαλείων του ANSYS. Με τον τρόπο αυτό εισάγονται τα σημεία (keypoints) που περιγράφουν τη γεωμετρία της εξωτερικής επιφάνειας του σπονδύλου. (Σχήμα 5.8)



Σχήμα 5.8 Εισαγωγή των σημείων που περιγράφουν την εξωτερική επιφάνεια του σπονδύλου.

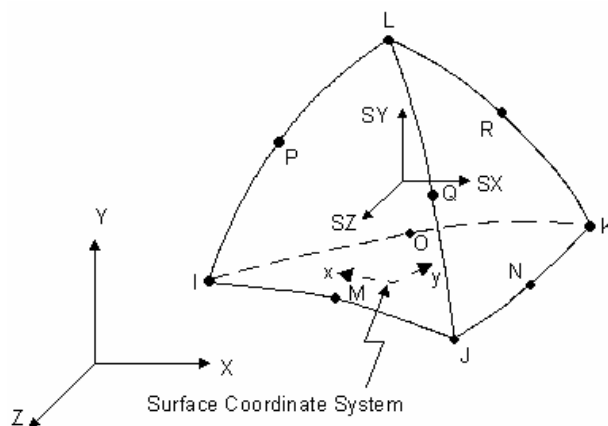
Ακολουθεί η δημιουργία επιφανειών (areas) (Σχήμα 5.9) από τα σημεία και όγκου (volume) από τις σχηματισθείσες επιφάνειες, χρησιμοποιώντας εντολές του προεπεξεργαστή (pre-processor) του ANSYS. Μεταξύ αυτών των δύο βημάτων πραγματοποιείται η διαδικασία συγχώνευσης διπλών σημείων (merging), τα οποία εμποδίζουν το σχηματισμό όγκων.



Σχήμα 5.9 Δημιουργία επιφανειών από keypoints στο περιβάλλον του ANSYS.

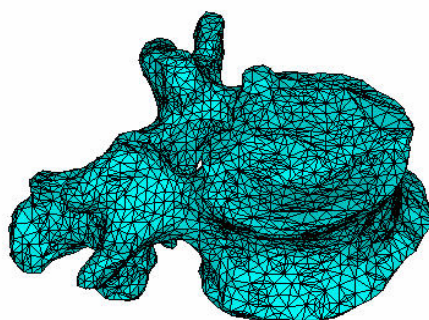
Τον σχηματισμό όγκων ακολουθεί η επιλογή από τη βιβλιοθήκη του ANSYS κατάλληλου πεπερασμένου στοιχείου. Το πεπερασμένο στοιχείο που θα επιλεγεί

πρέπει να επιτρέπει τη μοντελοποίηση αντικειμένων με πολύπλοκη γεωμετρία, πολλές γωνίες και σημεία με απότομη κλίση. Επομένως θα πρέπει να έχει πολλούς κόμβους, τόσο στις κορυφές, όσο και ενδιάμεσους. Τελικά, για το σπόνδυλο, επιλέγεται ένα τετραεδρικό, δεκακομβικό πεπερασμένο στοιχείο, σχήματος πυραμίδας με τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (SOLID92). (Σχήμα 5.10)



Σχήμα 5.10 Το τετραεδρικό, δεκακομβικό πεπερασμένο στοιχείο Solid92 της βιβλιοθήκης του ANSYS

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία πλέγματος (meshing). Πριν την δημιουργία πλέγματος, ορίζεται το μέγιστο μήκος της πλευράς των πεπερασμένων στοιχείων, δεδομένου ότι δεν έχουν όλα τα πεπερασμένα στοιχεία το ίδιο μήκος πλευράς. Στα μοντέλα που δημιουργηθήκαν, το μέγιστο μήκος πλευράς των πεπερασμένων στοιχείων ορίστηκε ίσο με 4. (Σχήμα 5.11) [16]



Σχήμα 5.11 Δημιουργία πλέγματος στο μοντέλο του σπονδύλου στο περιβάλλον του ANSYS.

5.3.2 Απόδοση των Υλικών

Ο διαχωρισμός των πεπερασμένων στοιχείων σε υλικά αποτελεί απαραίτητο βήμα στη μοντελοποίηση ενός σπονδύλου. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε στο εργαστήριο, στα πλαίσια παλαιότερης διπλωματικής εργασίας, ένα πρόγραμμα στη

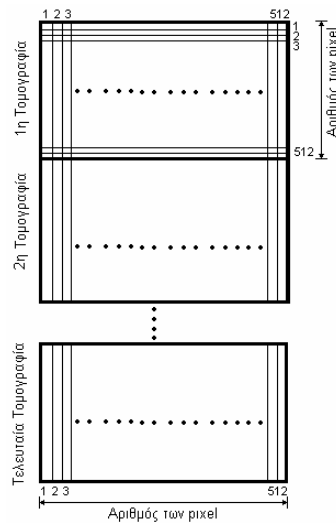
Matlab [20]. Στόχος του προγράμματος είναι η συσχέτιση του κέντρου βάρους (x , y , z) κάθε πεπερασμένου στοιχείου με συγκεκριμένη θέση των αξονικών τομογραφιών και στη συνέχεια η αντιστοίχιση του με συγκεκριμένη τιμή φωτεινότητας, όπως προκύπτει από τις τομογραφίες. Οπότε, πριν την μετάβαση στη Matlab, προηγείται η εύρεση των κέντρων βάρους των πεπερασμένων στοιχείων στο περιβάλλον του ANSYS.

Στην παράγραφο 5.2. έγινε αναφορά στην διόρθωση γωνίας (tilt) των τομογραφιών κατά την εισαγωγή τους στο περιβάλλον του MIMICS. Άμεσο επακόλουθο της διόρθωσης αυτής είναι η μεταβολή των συντεταγμένων του κέντρου βάρους κάθε εικονοστοιχείου στο περιβάλλον του ANSYS και έμμεσα η αδυναμία αντιστοίχισης των συντεταγμένων των κέντρων βάρους των πεπερασμένων στοιχείων με τις συντεταγμένες των αντίστοιχων εικονοστοιχείων στις αξονικές τομογραφίες. Για αυτό το λόγο, οι συντεταγμένες όλων των κέντρων βάρους που βρίσκονται από το ANSYS, μεταβάλλονται κατά συγκεκριμένο τρόπο στο τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων x , y , z , ώστε να συμπίπτουν με τις συντεταγμένες των τομογραφιών. Τελικά, η άκρη της πρώτης τομογραφίας βρίσκεται στην αρχή των αξόνων (0, 0, 0) μέσα στο περιβάλλον του ANSYS.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται, αναλυτικά, τα βήματα που ακολουθήθηκαν από το πρόγραμματος απόδοσης υλικών.

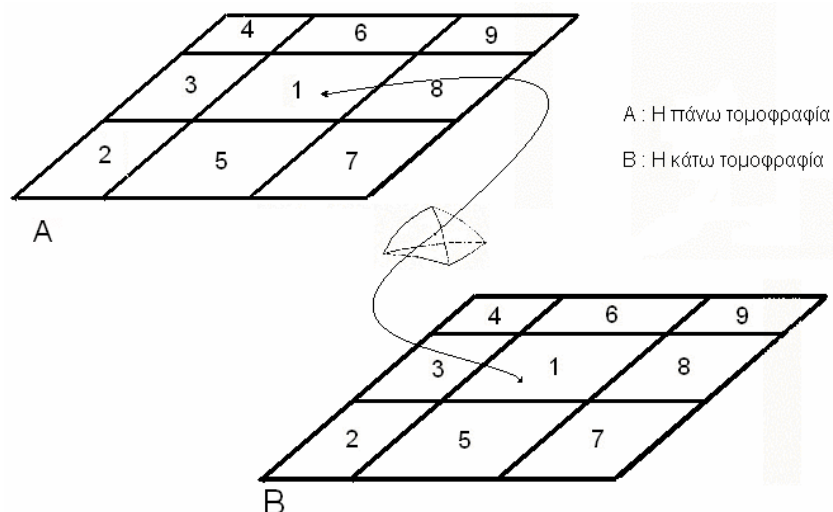
- Αρχικά, το πρόγραμμα διαβάζει μέσω της εντολής 'dmlread' τις συντεταγμένες του κέντρου βάρους κάθε πεπερασμένου στοιχείου και τις αποθηκεύει σε ένα πίνακα
- Ορίζεται το μέγεθος των εικονοστοιχείων κάθε τομογραφίας σε χιλιοστά (mm) διαιρώντας τη διάμετρο (mm) κάθε τομογραφίας του σπονδύλου με τον αριθμό των εικονοστοιχείων της κατά τον άξονα x (512).
- Το εύρος των τιμών φωτεινότητας όπως προκύπτει από το MIMICS, διαιρείται σε τόσα διαστήματα όσα και το πλήθος των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν (εδώ: εννέα υλικά).
- Το πρόγραμμα, με την εντολή 'dicomread' διαβάζει τις τομογραφίες του κάθε σπονδύλου. Για το σπόνδυλο Θ12 του υγιούς ατόμου έχουμε 74 τομογραφίες, ενώ για τον σπόνδυλο Θ12 του πρώτου, δεύτερου και τρίτου ασθενούς έχουμε 56, 61, 92, τομογραφίες, αντίστοιχα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, κάθε τομογραφία αποτελεί έναν πίνακα 512x512 με ακέραιες τιμές φωτεινότητας. Τελικά, δημιουργείται ο πίνακας AFULL όπου τοποθετούνται όλες οι τιμές φωτεινότητας από όλες τις τομογραφίες του εκάστοτε

σπονδύλου. Ο AFULL έχει μέγεθος (αριθμό τομογραφιών×512) γραμμές και 512 στήλες. (Σχήμα 5.12)



Σχήμα 5.12 Ο πίνακας AFULL.

- Κάθε κέντρο βάρους αντιστοιχίζεται σε μία συγκεκριμένη τιμή φωτεινότητας, που αποτελεί στοιχείο του πίνακα AFULL. Για την αντιστοίχιση: κέντρου βάρους (μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) – εικονοστοιχείου (αξονικές τομογραφίες), χρησιμοποιούνται οι διορθωμένες τιμές συντεταγμένων του κέντρου βάρους κάθε πεπερασμένου στοιχείου. Σε περίπτωση που το εικονοστοιχείο – όπου αντιστοιχίζεται ένα κέντρο βάρους – δεν εντοπίζεται στο οριζόντιο επίπεδο μίας τομογραφίας (άξονας x) αλλά στο χώρο ανάμεσα σε δύο διαδοχικές τομογραφίες, τότε ακολουθείται η εξής πορεία:
- Στην πάνω τομή, εντοπίζεται το εικονοστοιχείο όπου αντιστοιχίζεται το κέντρο βάρους του πεπερασμένου στοιχείου. Λαμβάνοντας υπόψη την φωτεινότητα των 8 γειτονικών του εικοστοιχείων, επαναπροσδιορίζεται η τιμή φωτεινότητας που αποδίδεται στο συγκεκριμένο κέντρο βάρους από την πάνω τομογραφία.
- Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για την κάτω τομογραφία. (Σχήμα 5.13)



Σχήμα 5.13 Αντιστοίχιση του κέντρου βάρους ενός πεπερασμένου στοιχείου σε δύο ομάδες pixel

- Ορίζεται ένας συντελεστής που δείχνει σε ποια από τις δύο τομές βρίσκεται πιο κοντά το κέντρο βάρους του πεπερασμένου στοιχείου που εντοπίζεται στο χώρο μεταξύ των διαδοχικών τομογραφιών.
- Η πραγματική τιμή φωτεινότητας του κέντρου βάρους του πεπερασμένου στοιχείου υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος της φωτεινότητας των δύο εννιάδων εικονοστοιχείων.
- Εντοπίζεται σε ποιο διάστημα τιμών φωτεινότητας ανήκει η τιμή φωτεινότητας του κέντρου βάρους – οπότε κάθε πεπερασμένο στοιχείο αντιστοιχίζεται σε ένα υλικό.

Το πρόγραμμα στη Matlab αποθηκεύει τα πεπερασμένα στοιχεία που ανήκουν σε κάθε υλικό σε ένα .lis αρχείο – συνολικά, στην παρούσα διπλωματική εργασία προκύπτουν εννέα .lis αρχεία. Τα .lis αρχεία εισάγονται και διαβάζονται από το ANSYS κατά την απόδοση υλικών.

5.4 Μέτρο Ελαστικότητας και Λόγος Poisson

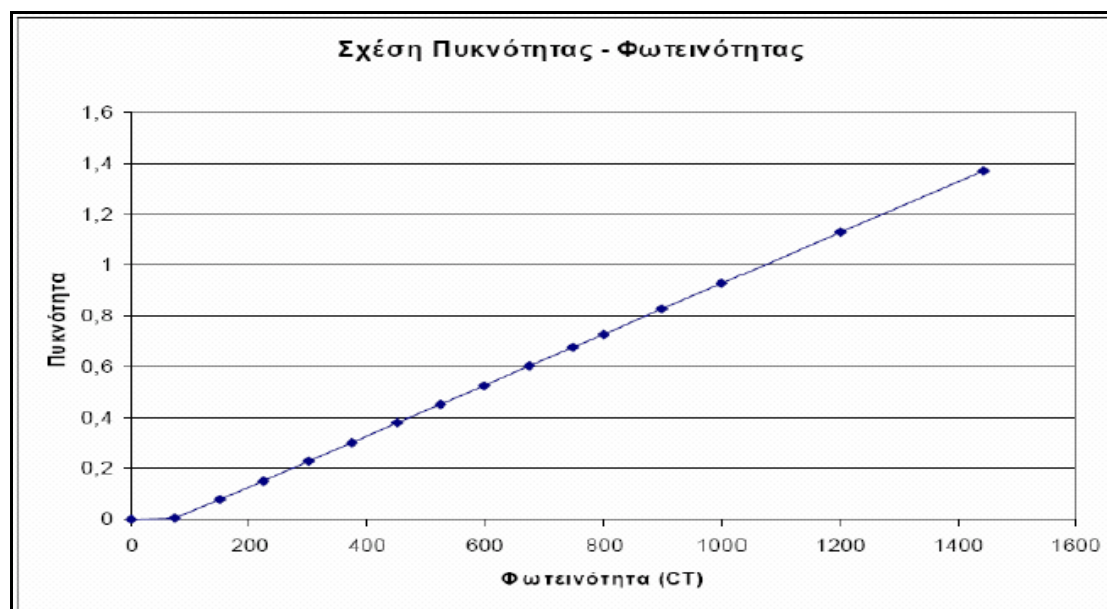
Έχοντας πλέον εισάγει τα ομαδοποιημένα σε υλικά πεπερασμένα στοιχεία στο ANSYS η επόμενη δουλειά είναι να ορίσουμε το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson του κάθε υλικού.

5.4.1 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας του κάθε υλικού είναι συνδεδεμένο με την τιμή φωτεινότητας που λαμβάνεται από την τομογραφία. Η φωτεινότητα σχετίζεται με μία γραμμική σχέση με την οστική πυκνότητα η οποία με τη σειρά της σχετίζεται άμεσα με το μέτρο ελαστικότητας του σπονδύλου. Δυστυχώς δεν υπάρχει ακριβής τύπος που

δίνει τη σχέση φωτεινότητας – οστικής πυκνότητας καθώς η σχέση αυτή εξαρτάται από τον τομογράφο από τον οποίο ελήφθησαν οι τομογραφίες. Προηγούμενες μελέτες με τομογραφίες [18] από τον ίδιο τομογράφο έχουν δείξει ότι μία πολύ καλή προσέγγιση για την παραπάνω σχέση είναι η εξής:

$$\text{Οστική πυκνότητα} = 0,001 (\text{φωτεινότητα}) - 0,072$$



Σχήμα 5.14 Σχέση Οστικής Πυκνότητας - Φωτεινότητας

Για τη σχέση του μέτρου ελαστικότητας με την πυκνότητα έχουν βρεθεί από τη βιβλιογραφία αρκετοί τύποι [23,24]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται οι παρακάτω:

Για το φλοιώδες οστό: $E(\text{GPa}) = 4,25\rho^3$

Για το σπογγώδες οστό: $E(\text{GPa}) = 4,73 \rho^{1,56}$

Για τιμές φωτεινότητας από 400 – 1000 θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω ενδιάμεσος τύπος:

$$E(\text{GPa}) = 5\rho^{1,2}$$

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1 συγκέντρωσης των τιμών φωτεινότητας, οστικής πυκνότητας και μέτρου ελαστικότητας για κάθε ένα από τα 9 υλικά

ΥΛΙΚΟ	ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑ (CT)	ΟΣΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ g/cm^3	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (MPa)
1	-700 – 100	-	1
2	100 – 200	0,078	88

3	200 – 300	0,178	320
4	300 – 400	0,278	642
5	400 – 500	0,378	1556
6	500 – 600	0,478	2062
7	600 – 800	0,628	2861
8	800 – 1000	0,828	3987
9	1000 – 1400	1,166	6737

5.4.2 Λόγος Poisson

Στις περισσότερες μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται λόγος Poisson = 0,3.

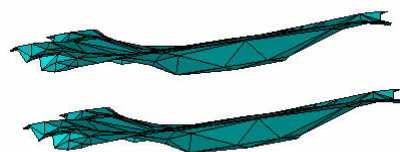
5.5 Ολοκλήρωση του Μοντέλου

Όπως είδαμε παραπάνω το πρόγραμμα MATLAB έχει κατηγοριοποιήσει τα κέντρα βάρους των πεπερασμένων στοιχείων σε εννέα κατηγορίες, σύμφωνα με τα εννέα υλικά που θεωρούμε ότι αποτελείται ο κάθε σπόνδυλος. Η πληροφορία αυτή αποθηκεύτηκε σε εννέα αρχεία τα οποία είναι αναγνώσιμα από το ANSYS και έτσι πολύ απλά εισάγονται αυτά τα δεδομένα στο μοντέλο. Πλέον έχουν ομαδοποιηθεί τα πεπερασμένα στοιχεία με βάση το υλικό και εισάγονται κατά ομάδα τα χαρακτηριστικά που θέλουμε τα οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson.

5.5.1 Δημιουργία του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου

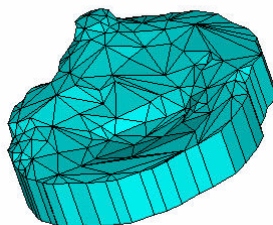
Η δημιουργία των μεσοσπονδύλιων δίσκων αποτελεί το τελευταίο στάδιο δημιουργίας του μοντέλου. Η δημιουργία του μεσοσπονδύλιου δίσκου γίνεται εξ ολοκλήρου στο περιβάλλον του ANSYS με μόνο δεδομένο τη μορφή της επιφάνειας της πάνω και της κάτω επιφυσιακής πλάκας του σπονδυλικού σώματος κάθε σπονδύλου.

Επιλέγεται η άνω επιφάνεια του σπονδυλικού σώματος και αντιγράφεται σε κάποια απόσταση τόση όση θέλουμε να είναι το πάχος του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Στην παρούσα εργασία έχουμε επιλέξει ένα σύνθετο μέσο πάχος ίσο με 8mm (Σχήμα 5.15)



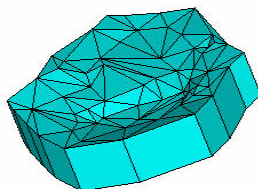
Σχήμα 5.15 Η δημιουργία της πάνω και κάτω επιφάνειας του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Δημιουργούμε κάθετες επιφάνειες μεταξύ των δύο παραπάνω επιφανειών. Με την αντιγραφή κατορθώσαμε να έχουμε ίδιο αριθμό κόμβων στην περιφέρεια των δύο επιφανειών, οι οποίες επιπλέον είναι και ίδιας μορφής. Συνεπώς η δημιουργία των κάθετων επιφανειών είναι εφικτή.(Σχήμα 5.16)



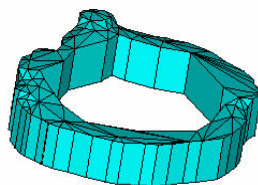
Σχήμα 5.16 Η ολοκλήρωση των επιφανειών του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Πλέον έχουμε τον μεσοσπονδύλιο σαν μία κλειστή επιφάνεια. Από τον μεσοσπονδύλιο δίσκο επιλέγουμε ένα κομμάτι επιφανειών για τη δημιουργία του πυρήνα και αφού το ξεχωρίσουμε από τον υπόλοιπο μεσοσπονδύλιο δημιουργούμε πάλι κάθετες επιφάνειες έτσι ώστε στο τέλος να έχουμε ξανά μία κλειστή επιφάνεια για τον πυρήνα. Κατά την επιλογή των επιφανειών το σχήμα του πυρήνα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο κυκλικό και να αποτελεί περίπου το 1/3 του συνολικού μεσοσπονδύλιου δίσκου.(Σχήμα 5.17)



Σχήμα 5.17 Η ολοκλήρωση των επιφανειών του πυρήνα του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Έχοντας πλέον όλο το μεσοσπονδύλιο δίσκο αλλά και τον πυρήνα ως σύνολο επιφανειών μπορεί να απομονωθεί ο εξωτερικός δακτύλιος του μεσοσπονδύλιου δίσκου.



Σχήμα 5.18 Η ολοκλήρωση των επιφανειών του δακτυλίου κάθε μεσοσπονδύλιου δίσκου

Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως ο μεσοσπονδύλιος δίσκος που δημιουργείται δεν είναι γεωμετρικά λεπτομερής, δηλαδή δεν αντιπροσωπεύει τον πραγματικό μεσοσπονδύλιο του ασθενούς.

Το τελευταίο στάδιο είναι να δημιουργήσουμε όγκους του πυρήνα και του δακτυλίου, να δημιουργήσουμε πλέγμα και αφού επιλέξουμε πεπερασμένο στοιχείο να αποδώσουμε στο μεσοσπονδύλιο δίσκο τιμές για το μέτρο ελαστικότητας και για το λόγο Poisson

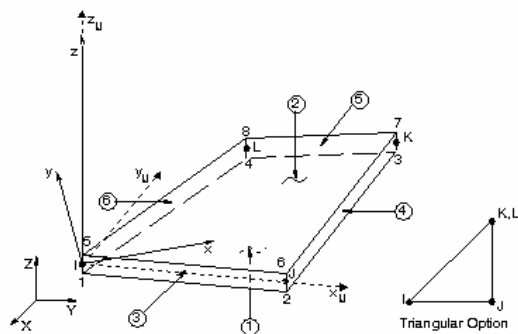
5.5.2 Απόδοση Υλικών στον Μεσοσπονδύλιο Δίσκο

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία έχει αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την αναπαράσταση ενός μεσοσπονδύλιου δίσκου. Σε όλα τα μοντέλα γίνονται παραδοχές που σκοπό έχουν τη διευκόλυνση μεν στη δημιουργία του μοντέλου χωρίς όμως να υπάρχει κόστος στον τομέα των αποτελεσμάτων.

Ο πηκτοειδής πυρήνας θεωρείται ως ασυμπίεστο υγρό και για την μοντελοποίησή του χρησιμοποιούνται στερεά στοιχεία. (SOLID 45, 92) [14]. Για τον ινώδη δακτύλιο η μοντελοποίηση μπορεί να γίνει με την παραδοχή σύνθετου υλικού το οποίο αποτελείται από τη θεμέλια ουσία που είναι η μήτρα στην οποία είναι τοποθετημένες οι κολλαγόνες ίνες. Η θεμέλια ουσία μοντελοποιείται όπως ο πηκτοειδής πυρήνας ενώ οι ίνες με στοιχεία τύπου καλωδίου.

Εξ αιτίας της φυσικής και πολύπλοκης μορφής που έχει ο μεσοσπονδύλιος δίσκος δεν είναι εφικτό να σχεδιαστούν οι ίνες κολλαγόνου στον ινώδη δακτύλιο και ειδικά στο εσωτερικό του. Συνεπώς ο παραπάνω τρόπος μοντελοποίησης του μεσοσπονδύλιου δίσκου δεν είναι εφικτός.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, αποφασίστηκε οι κολλαγόνες ίνες να αναπαρασταθούν μόνο εξωτερικά του ινώδους δακτυλίου και στην διαχωριστική επιφάνεια με τον πηκτοειδή πυρήνα. Σε αυτό το νέο μοντέλο τεχνητού μεσοσπονδύλιου δίσκου που δημιουργούμε καταργούμε τις ενδιάμεσες διατάξεις των κολλαγόνων ινών και διατηρούμε μόνο δύο επιφάνειες, μία εξωτερικά του ινώδους δακτυλίου και μία στη διαχωριστική επιφάνεια με τον πηκτοειδή πυρήνα που θα αναπαραστήσουν τις ίνες. Το στοιχείο που χρησιμοποιούμε για τις επιφάνειες αυτές είναι το SHELL 63. Το στοιχείο αυτό έχει δυνατότητα καμπτικής λειτουργίας και λειτουργίας μεμβράνης. Η φόρτισή του μπορεί να είναι στο επίπεδό του ή κάθετα σε αυτό. Έχει 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, 3 μετατοπίσεις και 3 στροφές. (Σχήμα 5.19)



Σχήμα 5.19 Η μορφή του πεπερασμένου στοιχείου SHELL63

Επειδή έχει αλλάξει η κατανομή των κολλαγόνων ινών μέσα στον ινώδη δακτύλιο αποφασίστηκε, ως αντισταθμιστικό μέτρο, να μεταβληθούν η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του πυρήνα και το πάχος των επιφανειών εξωτερικά του ινώδους δακτυλίου και στη διαχωριστική επιφάνεια με τον πυρήνα, μέχρις ότου να βρεθεί ο συνδυασμός των τιμών που θα δίνει ικανοποιητική προσέγγιση. Αυτός ο παραμετρικός έλεγχος έχει γίνει σε παλαιότερη διπλωματική εργασία και τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι πως για το μέτρο ελαστικότητας του πυρήνα επιλέγουμε 1,15 Mpa και για το πάχος των επιφανειών 0,372 mm [21]. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι τελικές ιδιότητες των υλικών που αποτελούν τον μεσοσπονδύλιο δίσκο σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία [15] και την αναθεωρημένη τιμή για τον πυρήνα.

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες των υλικών του πυρήνα και του δακτυλίου έπειτα και από την αναθεώρηση της τιμής του πυρήνα

	Πυκτοειδής πυρήνας	Ινώδης δακτύλιος	Ενδιάμεσες επιφάνειες
Μέτρο ελαστικότητας E σε Mpa	1,15	4,2	450
Λόγος Poisson V	0,499	0,45	0,3

**Κεφάλαιο 6ο ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ, ΟΡΙΑΚΕΣ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΑ ΥΛΙΚΩΝ
ΣΤΟΥΣ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥΣ**

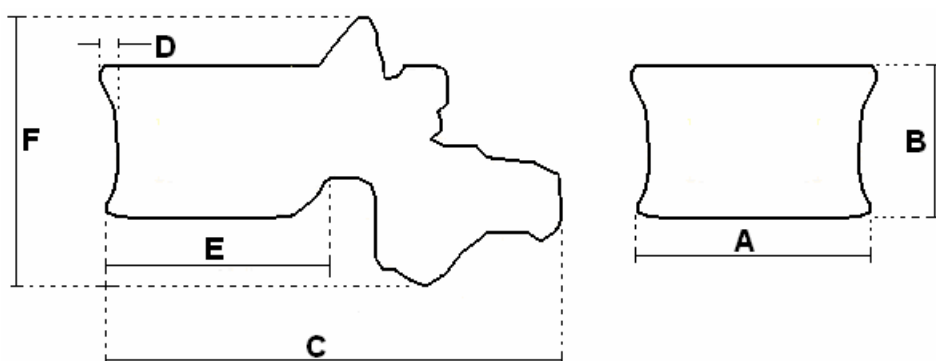
6.1 Εισαγωγή

Το υπολογιστικό μέρος της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει την εξέταση ενός υγιούς και τριών καταγματικών σπονδύλων σε τρεις τρόπους φόρτισης. Το πρώτο που πρέπει να παρατηρήσουμε για να καταλάβουμε την κατάσταση των σπονδύλων αυτών είναι η γεωμετρία τους.

6.2 Ανάλυση της Γεωμετρίας

Οι Lavaste et al. [17] υποστηρίζουν ότι για την πλήρη περιγραφή της γεωμετρίας ενός σπονδύλου αρκούν τα εξής μεγέθη: (Σχήμα 6.1)

- το πλάτος του σπονδυλικού σώματος (A)
- το ύψος του σπονδυλικού σώματος (B)
- το συνολικό μήκος του σπονδύλου (σώμα και αποφύσεις) (C)
- το κοίλωμα του σπονδυλικού σώματος (D)
- το μήκος του σπονδυλικού σώματος (E)
- το συνολικό ύψος του σπονδύλου (σώμα και αποφύσεις) (F)



Σχήμα 6.1 Οι κατά Lavaste μετρούμενες διαστάσεις για την περιγραφή ενός σπονδύλου

Έπειτα από τις μετρήσεις που έγιναν στο πρόγραμμα MIMICS ακολουθεί ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 6.1 Οι μετρούμενες διαστάσεις κατά Lavaste για τους σπονδύλους του κάθε ασθενή σε mm

	A	B	C	D	E	F
Υγιής Σπόνδυλος	46,18	26,72	72,80	6,07	33,54	49,52
Ασθενής 1	44,80	21,70	70,58	3,61	31,44	40,64
Ασθενής 2	48,93	22,55	77,94	4,19	34,18	40,54
Ασθενής 3	51,01	22,49	70,38	6,27	39,29	52,57

Τα τέσσερα άτομα των οποίων μελετούνται οι σπόνδυλοι είναι γυναίκες ηλικιωμένες. Το βάρος των τεσσάρων αυτών ατόμων από το υγιές προς τον ασθενή 4 είναι αντίστοιχα 90 kg, 90kg, 99kg, 130kg.

Παρατηρείται πως το συνολικό μήκος των σπονδύλων είναι περίπου ίδιο, με εξαίρεση τον ασθενή 3 όπου είναι ελαφρώς μεγαλύτερο. Το μέγεθος που πρέπει να εξεταστεί στην παρούσα εργασία είναι το ύψος του σπονδύλου, ή, ακόμη καλύτερα, αφού οι σπόνδυλοι είναι διαφορετικοί ο λόγος του ύψους του σπονδυλικού σώματος προς το πλάτος αυτού. (Πίνακας 6.2)

Πίνακας 6.2 Ο λόγος του ύψους προς το πλάτος του σπονδυλικού σώματος για τους τέσσερις σπονδύλους.

	A	B	Ο λόγος B/A
Υγιής Σπόνδυλος	46,18	26,72	0,57
Ασθενής 1	44,80	21,70	0,48
Ασθενής 2	48,93	22,55	0,46
Ασθενής 3	51,01	22,49	0,44

Παρατηρείται πως ο υγιής σπόνδυλος έχει τον μεγαλύτερο τέτοιο λόγο πράγμα που δείχνει πως είναι πιο τετράγωνος από τους υπόλοιπους. Ακολουθεί ο σπόνδυλος του ασθενή 1, ο σπόνδυλος του ασθενή 2 και τέλος ο σπόνδυλος με το μεγαλύτερο βαθμό κατάγματος του ασθενή 3. Ακόμα, βλέπουμε από τα μεγέθη ότι ο πιο μικρός σε διαστάσεις σπόνδυλος είναι αυτός του ασθενή 1 και ο μεγαλύτερος είναι του τελευταίου ασθενή. Αυτό δικαιολογείται αφού ο ασθενής 4 έχει μεγαλύτερο βάρος απ' όλους κι έτσι θα έπρεπε να έχει μεγάλη επιφάνεια σπονδυλικού σώματος ώστε να αντέχει το συνεχές μεγάλο θλιπτικό φορτίο που τον καταπονεί.

6.3 Φορτίσεις και Στηρίξεις

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα επιλογής της κατάλληλης δύναμης που θα εφαρμόσουμε σε κάθε ασθενή. Όπως είδαμε και από τη γεωμετρία ο κάθε σπόνδυλος έχει διαφορετικές διαστάσεις πράγμα που δικαιολογείται καθώς ο κάθε ασθενής έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά (βάρος, ύψος κ.λ.π.) αλλά και διαφορετική ζωή (δουλειά γραφείου, χειρονακτική εργασία κ.λ.π.). Έτσι, θεωρήσαμε σκόπιμο, για το θλιπτικό φορτίο να μην επιβάλλουμε την ίδια δύναμη σε όλους, αλλά αυτή που προκύπτει από τα 2/3 του συνολικού βάρους της κάθε μιας από τις τέσσερις περιπτώσεις. Αυτό γίνεται για να δούμε πως συμπεριφέρονται τα μοντέλα στην επιβολή του καθημερινού συνεχούς φορτίου το οποίο δέχονται, ανεξαρτήτως των δραστηριοτήτων του κάθε ασθενή, μέσα στην ημέρα.

6.3.1 Φορτίσεις για την Προσομοίωση της Θλίψης

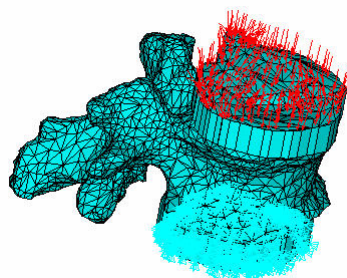
Σύμφωνα με τα παραπάνω η πίεση που επιβάλλουμε στην άνω επιφυσιακή πλάκα του σπονδύλου είτε στη άνω επιφάνεια του πάνω μεσοσπονδύλιου δίσκου για την προσομοίωση της πίεσης είναι σε κάθε σπόνδυλο διαφορετική καθώς και η δύναμη που πρέπει να ασκήσουμε αλλά και το εμβαδόν της επιφάνειας του κάθε σπονδύλου είναι διαφορετικό. Οι κόμβοι στους οποίους περιορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας για την στήριξη του κάθε μοντέλου βρίσκονται στην κάτω επιφυσιακή πλάκα του σπονδυλικού σώματος ή στην κάτω επιφάνεια του κάτω μεσοσπονδύλιου δίσκου.

Έτσι για τη θλίψη παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.3 Τα μετρούμενα μεγέθη που χρειάζονται ως δεδομένα για την θλίψη

	Επιφάνεια A σε mm ²	Δύναμη F σε N	Πίεση σε (N/ mm ²)
Υγιής Σπόνδυλος	1504	600	0,398
Ασθενής 1	1003	600	0,59
Ασθενής 2	1551	660	0,43
Ασθενής 3	2262	910	0,41

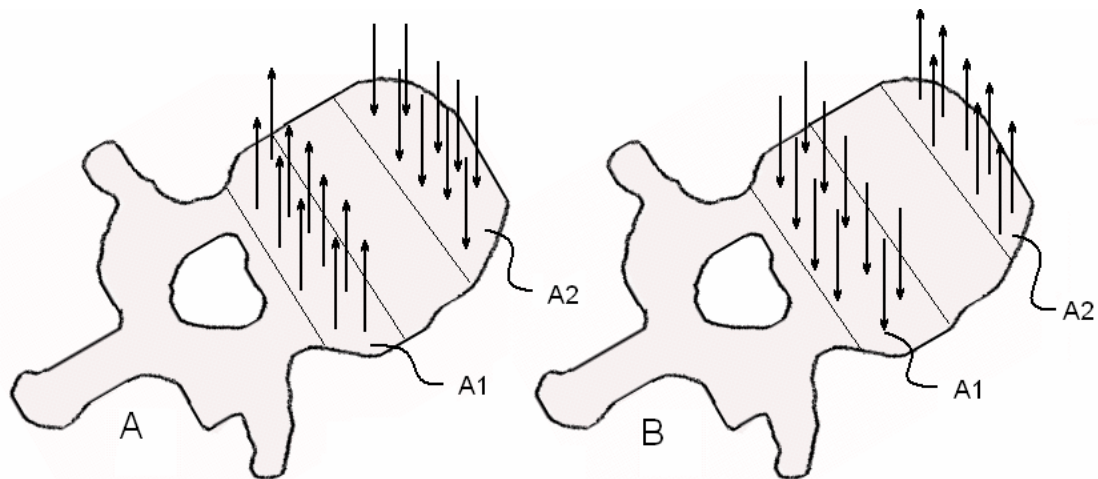
Η επιβολή του θλιπτικού φορτίου και ο τρόπος με τον οποίο αυτό εφαρμόζεται στο κάθε μοντέλο στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 6.2)



Σχήμα 6.2 Εικόνα της πίεσης που προσομοιώνει την θλίψη αλλά και οι πακτώσεις στους κάτω κόμβους για τον υγιή σπόνδυλο με μεσοσπονδύλιο δίσκο

6.3.2 Φορτίσεις για την Προσομοίωση της Κάμψης και της Έκτασης

Η διαδικασία που ακολουθείται για την επιβολή της πίεσης και της στήριξης στην κάμψη και την έκταση είναι ίδια με αυτή της θλίψης. Η μόνη διαφορά είναι στον τρόπο επιβολής των φορτίων προκειμένου να έχουμε καμπτική ή εκτατική συμπεριφορά. Για τον σκοπό αυτό χωρίζουμε την επιφάνεια της άνω επιφυσιακής πλάκας σε τρεις περιοχές όπως στο παρακάτω σχήμα: (Σχήμα 6.3)



Σχήμα 6.3 Ο τρόπος επιβολής πιέσεων που προσομοιώνει (Α) Την κάμψη, (Β) Την έκταση

Η κεντρική περιοχή παραμένει αφόρτιστη τόσο στην κάμψη όσο και στην έκταση, ενώ οι περιοχές δεξιά και αριστερά φορτίζονται με δυνάμεις σε μορφή πίεσης. Όπως είδαμε στο σχήμα οι δυνάμεις αυτές είναι αντίθετες στις δύο επιφάνειες ώστε να έχουμε αντίστοιχα κάμψη ή έκταση.

Για την κάθε περίπτωση επιβάλλεται ροπή 7200 Nmm. Η ροπή μετατρέπεται σε πίεση με την ακόλουθη διαδικασία:

- Υπολογίζεται το εμβαδόν των περιοχών A1, A2
- Υπολογίζεται το κέντρο βάρους αυτών των περιοχών
- Υπολογίζεται η απόσταση D των κέντρων βάρους
- Υπολογίζεται η δύναμη που θα επιβληθεί στην κάθε περιοχή από τη σχέση $F = M/D$ όπου M η ροπή
- Υπολογίζεται η πίεση που θα επιβληθεί στην κάθε επιφάνεια από τη σχέση $P = F/A$ και παίρνουμε τις τιμές P1 και P2 για τις παραπάνω αντίστοιχες περιοχές

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι τιμές των πιέσεων που ασκούνται στην κάθε επιφάνεια, οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους τους και το εμβαδόν τους χωρίς, αλλά και με τη χρήση, μεσοσπονδύλιου δίσκου. (Πίνακας 6.3), (Πίνακας 6.4)

Πίνακας 6.3 Τα μετρούμενα μεγέθη που χρειάζονται ως δεδομένα για την κάμψη και την έκταση στα μοντέλα χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο

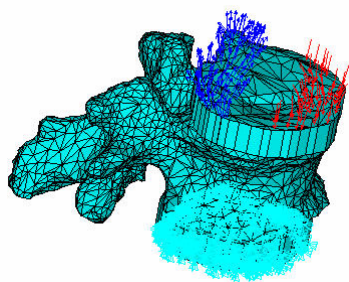
	A1 σε mm ²	Κ.Βάρους σε mm	A2 σε mm ²	Κ. Βάρους σε mm	D σε mm	F σε N	P1 σε N/mm ²	P2 σε N/mm ²
Υγιής σπόνδυλος	389,09	64,03	457,29	67,19	25,35	284,00	0,72	0,62
		49,66		72,62				

		257,52		266,33				
Ασθενής 1	295,78	72,54	305,77	74,94	18,03	399,32	1,35	1,30
		78,48		60,62				
		245,70		244,94				
Ασθενής 2	511,39	69,94	363,55	70,03	24,76	290,07	0,56	0,80
		88,19		63,71				
		146,60		142,85				
Ασθενής 3	539,52	79,15	444,10	84,54	33,68	219,75	0,39	0,48
		83,15		50,87				
		269,89		261,93				

Πίνακας 6.4 Τα μετρούμενα μεγέθη που χρειάζονται ως δεδομένα για την κάμψη και την έκταση στα μοντέλα με μεσοσπονδύλιο δίσκο

	A1 σε mm ²	Κ.Βάρους σε mm	A2 σε mm ²	Κ. Βάρους σε mm	D σε mm	F σε N	P1 σε N/ mm ²	P2 σε N/ mm ²
Υγιής σπόνδυλος	479,49	64,076	437,25	64,55	22,87	314,81	0,66	0,71
		71,59		48,83				
		267,85		265,62				
Ασθενής 1	295,78	72,54	317,14	75,57	17,81	404,07	1,36	1,27
		78,48		60,91				
		245,70		253,75				
Ασθενής 2	574,85	68,144	322,92	70,61	24,76	291,86	0,51	0,90
		87,58		63,31				
		154,58		150,91				
Ασθενής 3	467,42	80,61	582,86	83,73	32,93	218,59	0,47	0,37
		84,15		52,40				
		278,05		270,03				

Η επιβολή του καμπτικού φορτίου όπως αυτό εφαρμόζεται στην πάνω επιφάνεια του κάθε μοντέλου στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. (Σχήμα 6.4)



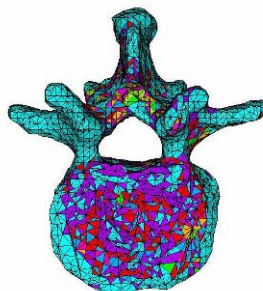
Σχήμα 6.4 Εικόνα της πίεσης που προσομοιώνει την κάμψη αλλά και οι πακτώσεις στους κάτω κόμβους για τον υγιή σπόνδυλο με μεσοσπονδύλιο δίσκο

6.4 Αποτελέσματα της Απόδοσης των Υλικών

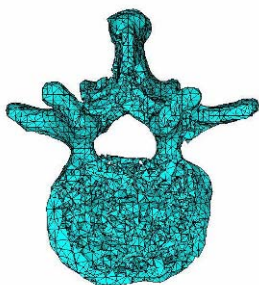
Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές των υλικών των τεσσάρων υπό εξέταση σπονδύλων.

6.4.1 Υγιής Σπόνδυλος

Για τον υγιή σπόνδυλο εξήχθησαν οι παρακάτω εικόνες: (Σχήμα 6.5)



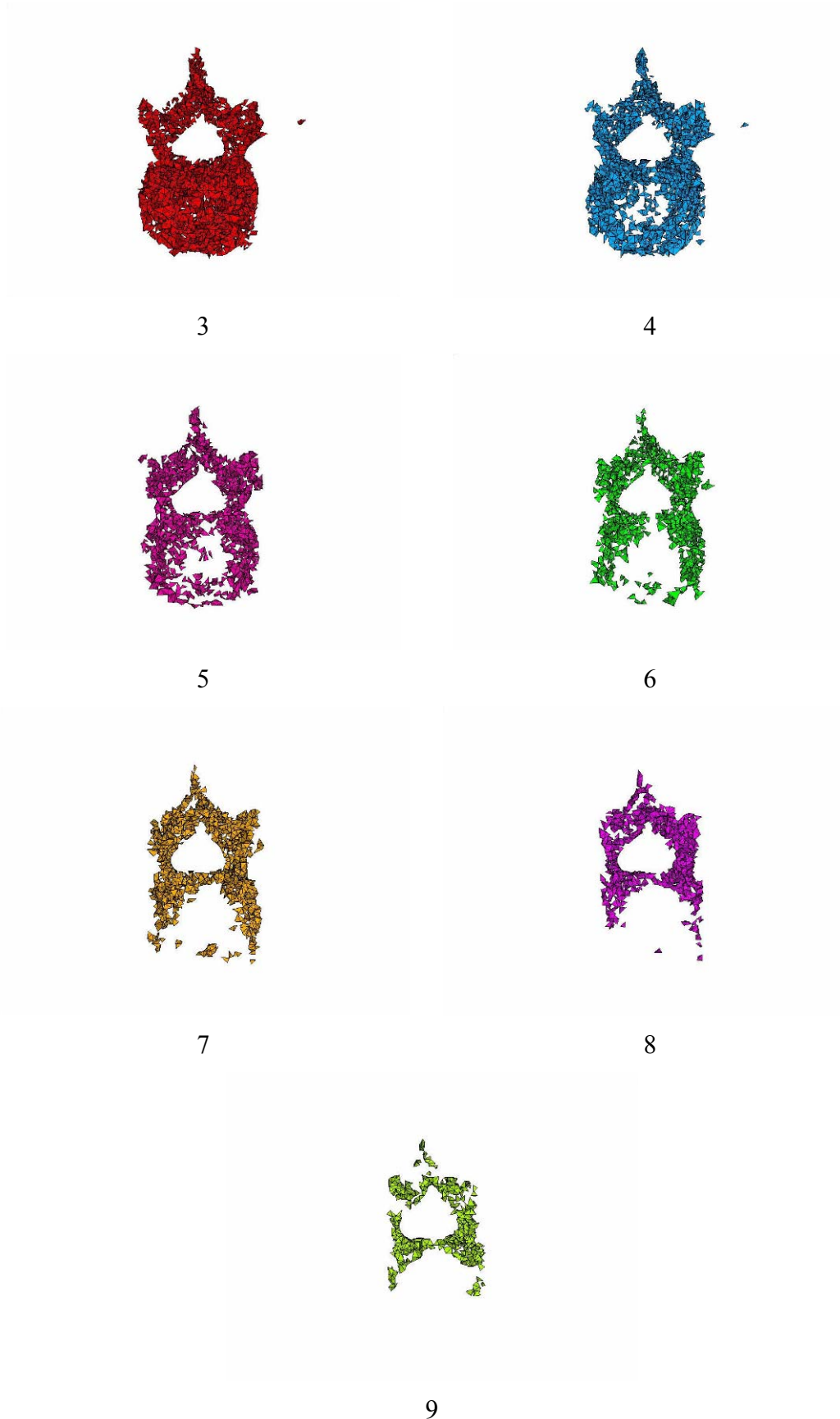
Όλα τα υλικά



1



2

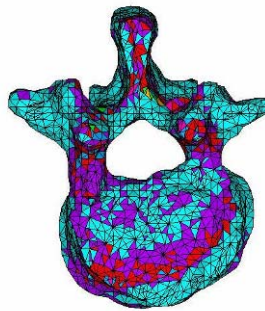


Σχήμα 6.5 Σχήμα που δείχνει την θέση των υλικών 1- 9 σε κάθε εικόνα αντίστοιχα για τον υγιή σπόνδυλο

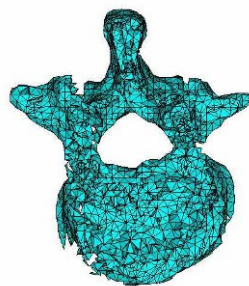
Τα υλικά 1 και 2 κατέχουν το μεγαλύτερο μέρος του σπονδύλου. Ακολουθούν κατ' αντίστροφη αντιστοιχία ποσότητας και αύξοντα αριθμού τα υλικά 3 έως 9. Παρατηρείται επίσης πως οι αποφύσεις έχουν εξαφανισθεί μετά το 5 υλικό ενώ τα υλικά από το 6 και έπειτα βρίσκονται στις περιοχές κοντά στο μεσοσπονδύλιο τρήμα αλλά και στα όρια του σπονδυλικού σώματος όπου υπάρχει φλοιώδες συμπαγές οστό.

6.4.2 Ασθενής 1

Για τον ασθενή 1 εξήχθησαν οι παρακάτω εικόνες: (Σχήμα 6.6)



Όλα τα υλικά



1



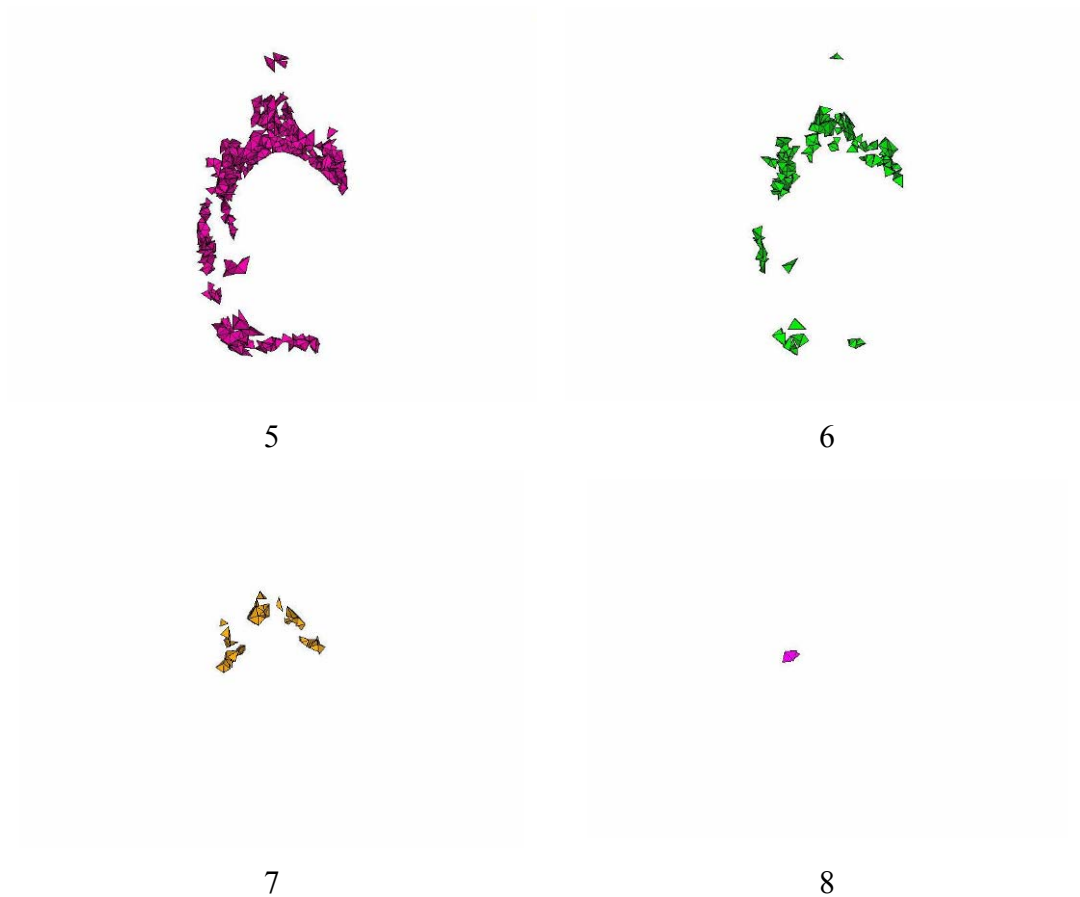
2



3



4

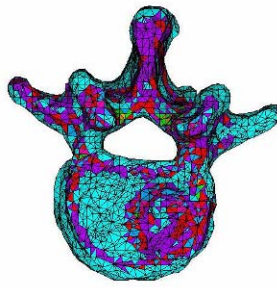


Σχήμα 6.5 Σχήμα που δείχνει την θέση των υλικών 1- 9 σε κάθε εικόνα αντίστοιχα για τον σπόνδυλο του ασθενή 1

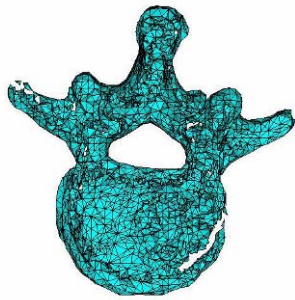
Όπως και στον υγιή σπόνδυλο παρατηρείται για μία ακόμη φορά ότι το μεγαλύτερο μέρος του σπονδύλου κατέχουν τα υλικά 1 και 2. Όμοια συμπεριφορά έχουν και τα υπόλοιπα υλικά. Τοπολογικά τα πιο σκληρά υλικά βρίσκονται στα ίδια σημεία με αυτά του υγιούς σπονδύλου, παρόλα αυτά παρατηρείται πολύ μικρό ποσοστό υλικών πιο σκληρών από το υλικό 6. Ακόμα φαίνεται να μην υπάρχει καθόλου υλικό 9. Αυτό είναι ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε και προηγουμένως. Είναι λογικό ο σπόνδυλος του ασθενούς 1 να είναι λιγότερο σκληρός και να περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα πρώτων υλικών.

6.4.3 Ασθενής 2

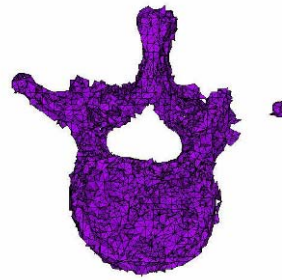
Για τον ασθενή 2 εξήχθησαν οι παρακάτω εικόνες: (Σχήμα 6.6)



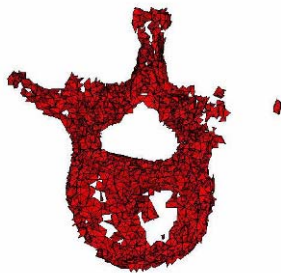
Όλα τα υλικά



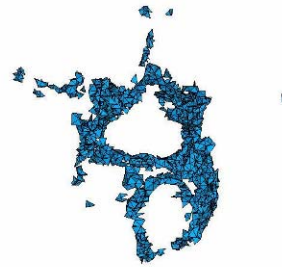
1



2



3



4



5



6



7



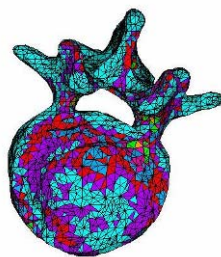
8

Σχήμα 6.6 Σχήμα που δείχνει την θέση των υλικών 1- 9 σε κάθε εικόνα αντίστοιχα για τον σπόνδυλο του ασθενή 2

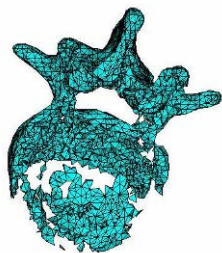
Ο τρόπος κατανομής των υλικών είναι όμοιος με αυτόν του υγιούς σπονδύλου αλλά και του παραπάνω καταγματικού. Παρατηρείται και εδώ πως δεν εμφανίζεται το υλικό 9 και έχουμε ξανά μεγάλη συγκέντρωση πρώτων υλικών.

6.4.4 Ασθενής 3

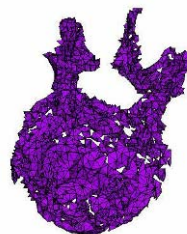
Για τον ασθενή 3 εξήχθησαν οι παρακάτω εικόνες: (Σχήμα 6.7)



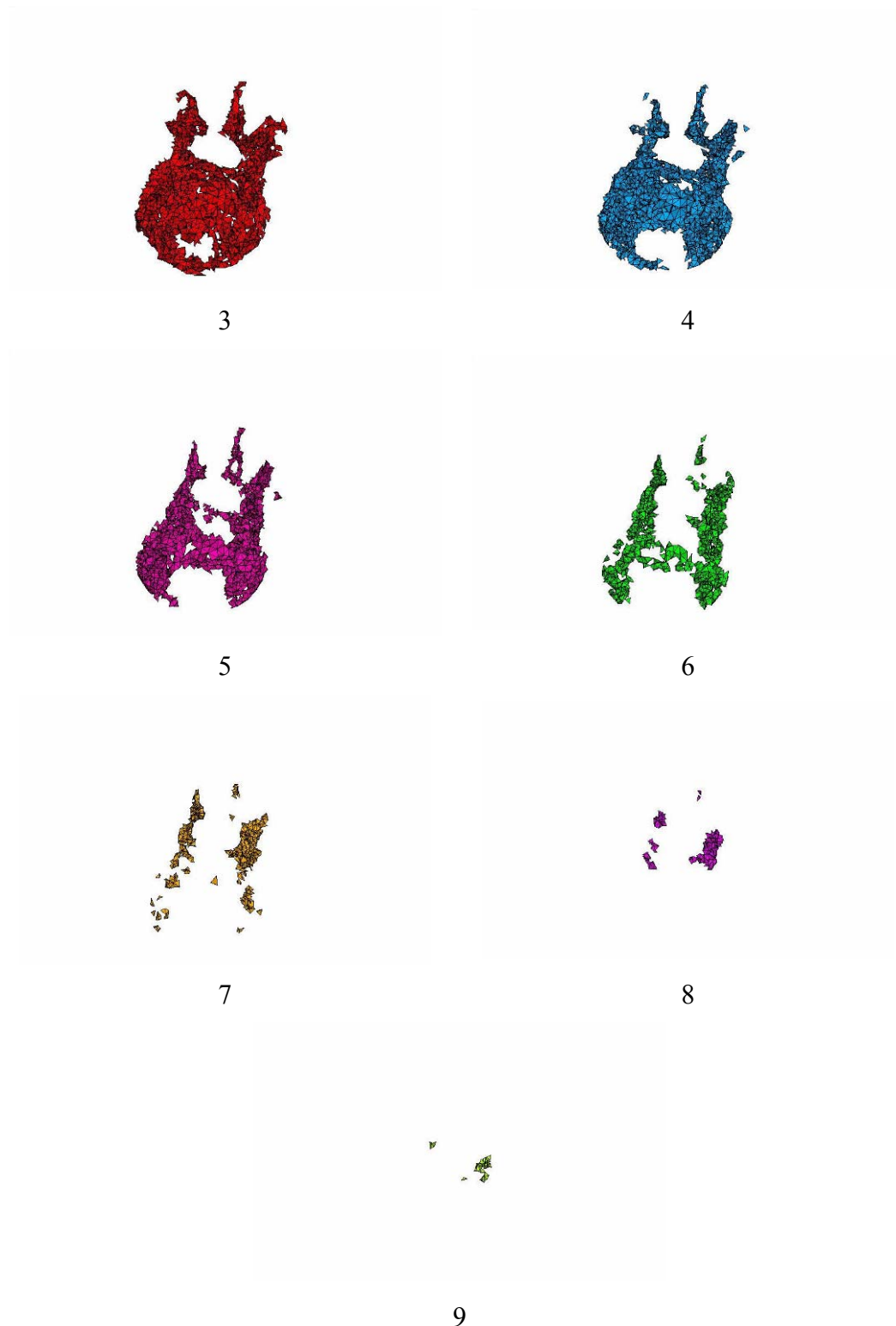
Όλα τα υλικά



1



2



Σχήμα 6.7 Σχήμα που δείχνει την θέση των υλικών 1- 9 σε κάθε εικόνα αντίστοιχα για τον σπόνδυλο του ασθενή 3

Εκτός από τις γενικές παρατηρήσεις, που ισχύουν στους παραπάνω σπονδύλους και ισχύουν και σε αυτόν του ασθενή 3, παρατηρείται επίσης το εξής φαινόμενο. Παρότι ο

ασθενής 3 έχει τον μεγαλύτερο βαθμό κατάγματος έχει επίσης μεγάλη ποσότητα σκληρών υλικών όπως στον υγιή σπόνδυλο.

Για τους τέσσερις σπονδύλους φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού όγκου τους αποδίδεται στα δύο πρώτα υλικά. Ακολουθούν τα επόμενα ενώ σε δύο απ' αυτούς τους σπονδύλους δεν εμφανίζεται καθόλου το υλικό 9 ενώ και το υλικό 8 είναι μηδαμινής ποσότητας.

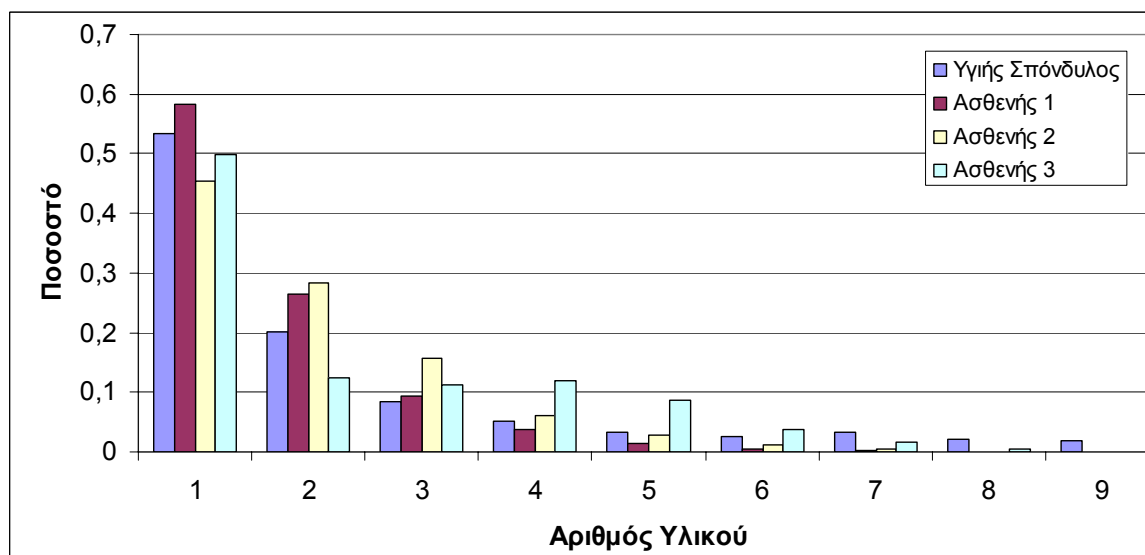
6.5 Σύγκριση Κατανομής των Όγκων ανά Υλικό

Ακολουθεί ο πίνακας που δείχνει το ποσοστό όγκου του κάθε υλικού στο σύνολο του σπονδύλου για κάθε μία περίπτωση.

Πίνακας 6.5 Πίνακας αποτελεσμάτων για ποσοστό του συνολικού όγκου που καταλαμβάνει κάθε υλικό σε κάθε έναν από τους τέσσερις σπονδύλους

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Υγιής σπόνδυλος	0,532	0,202	0,083	0,050	0,033	0,025	0,032	0,022	0,019
Ασθενής 1	0,582	0,264	0,094	0,036	0,015	0,005	0,002	0,000	0
Ασθενής 2	0,453	0,284	0,156	0,060	0,027	0,011	0,005	0,001	0
Ασθενής 3	0,497	0,123	0,111	0,119	0,087	0,037	0,015	0,005	0,001

Ακολουθεί και το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 6.8 Διάγραμμα αποτελεσμάτων για ποσοστό του συνολικού όγκου που καταλαμβάνει κάθε υλικό σε κάθε έναν από τους τέσσερις σπονδύλους

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 6.8) παρατηρούμε μία δυσανάλογη κατανομή ποσοστών ανά υλικό. Σύμφωνα με όσα έχουμε ήδη αναφέρει τα οστικά κατάγματα είναι

οστεοπορωτικής φύσεως. Λόγω της παραπάνω υπενθύμισης θα ήταν λογικό όσο αυξάνεται ο αριθμός του κατάγματος να αυξάνεται και ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων (και κατά συνέπεια του όγκου) που αντιστοιχούν στα πρώτα υλικά. Αυτό είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει μεταξύ των δύο πρώτων σπονδύλων, δηλ. μεταξύ του υγιούς και του ασθενή 1. Αντίθετα όμως δεν εμφανίζεται το ίδιο φαινόμενο στους ασθενείς 2 και 3 ούτε κατά την μεταξύ τους σύγκριση ούτε και κατά τη σύγκρισή τους με τον υγιή. Αυτό δικαιολογείται καθώς σε ένα σπόνδυλο μετά την εμφάνιση του κατάγματος έχει διατηρηθεί η ποσότητα των υλικών του αλλά έχει μειωθεί ο όγκος του. Έτσι το σπονδυλικό σώμα έχει μεγαλύτερη οστική πυκνότητα από αυτήν που είχε πριν το κάταγμα.

Έτσι αν, δεχθούμε πως τα δύο πρώτα υλικά μπορούν να καθορίσουν ποιος από τους σπόνδυλους έχει την μικρότερη οστική πυκνότητα από όλους τότε αρκεί να εξεταστεί το άθροισμα αυτών. (Πίνακας 6.7)

Πίνακας 6.7 Πίνακας αποτελεσμάτων για ποσοστό του συνολικού όγκου που καταλαμβάνει το υλικό 1, το υλικό 2 και το άθροισμα αυτών

	Υλικό 1	Υλικό 2	Άθροισμα των υλικών 1 και 2
Υγιής σπόνδυλος	0,532	0,202	0,734
Ασθενής 1	0,582	0,264	0,846
Ασθενής 2	0,453	0,284	0,737
Ασθενής 3	0,497	0,123	0,620

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πάνω πίνακα παρατηρούμε πως στα μοντέλα μας ισχύουν δύο διαφορετικές κατατάξεις.

Η πρώτη κατάταξη αφορά το βαθμό κατάγματος και αντιπροσωπεύει τη σειρά από τον πιο υγιή στον πιο καταγματικό είναι:

Υγιής σπόνδυλος – Ασθενής 1 – Ασθενής 2 – Ασθενής 3

Η δεύτερη κατάταξη αφορά το επίπεδο σκληρότητας των σπονδύλων και από τον σπόνδυλο με την μεγαλύτερη προς αυτόν με την μικρότερη οστική πυκνότητα είναι:

Ασθενής 3 – Ασθενής 2 – Υγιής σπόνδυλος – Ασθενής 1

Ο Ασθενής 2 στην παραπάνω κατάταξη θεωρήθηκε ότι έχει μεγαλύτερη οστική πυκνότητα από αυτή του υγιούς, παρότι περιέχουν το ίδιο ποσοστό αθροίσματος υλικού 1 και 2, διότι περιέχει λιγότερο υλικό 1 από τον υγιή, της τάξεως του 8%.

**Κεφάλαιο 7ο ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΧΩΡΙΣ
ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΟΥΣ ΔΙΣΚΟΥΣ**

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιούνται τα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για τον υγίη σπόνδυλο και τους τρεις καταγματικούς χωρίς τους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Οι επιφάνειες που ασκούνται οι πιέσεις για τη θλίψη, την κάμψη και την έκταση βρίσκονται στην επάνω επιφυσιακή πλάκα του σπονδυλικού σώματος ενώ η επιφάνεια της στήριξης είναι αντίστοιχα η κάτω επιφυσιακή πλάκα.

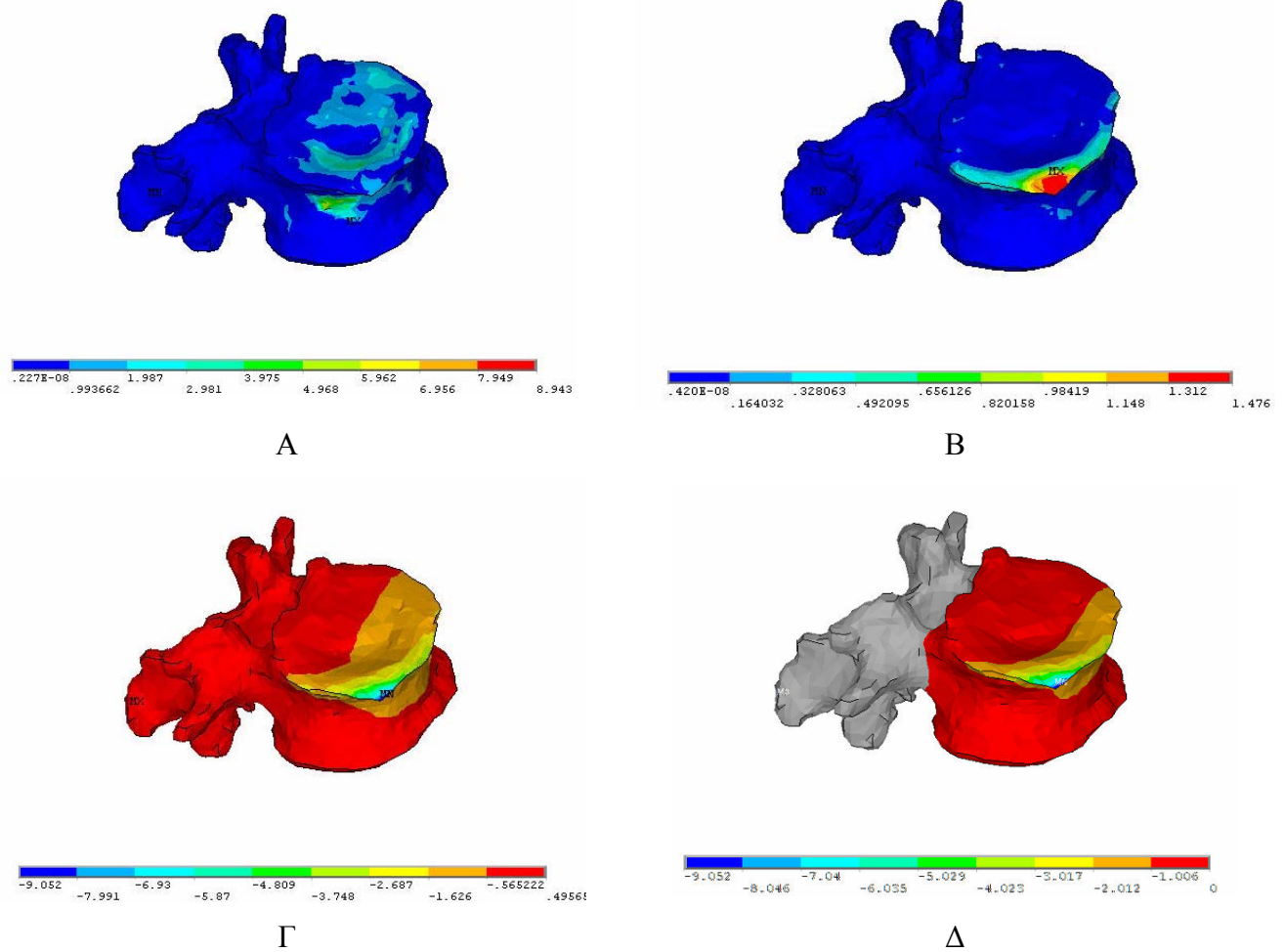
Αφού επιβληθούν οι φορτίσεις, ακολουθεί η επίλυση των μοντέλων στο Ansys. Μετά την επίλυση εξάγονται τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται οι ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κατά Von Mises και η μετατόπιση κατά τον άξονα z. Οι τιμές που μελετώνται τόσο για την τάση όσο και για την παραμόρφωση είναι οι μέσες (Average) των μέγιστων τιμών που εμφανίζονται σε κάθε μοντέλο συνολικά αλλά και για κάθε υλικό ξεχωριστά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τιμή του υπό εξέταση μεγέθους κάθε πεπερασμένου στοιχείου να επηρεάζεται από την τιμή των γειτονικών του. Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα εξετάζονται ανά υλικό υπάρχουν μεμονωμένα στοιχεία που έχουν υπερβολικές τιμές μεγεθών Έτσι οι μέγιστες τιμές που παρατίθενται είναι ενδεικτικές

7.2 Υγίης Σπόνδυλος

Έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η γεωμετρία του υγιούς σπονδύλου, τα υλικά που τον απαρτίζουν με το ποσοστό του συνολικού όγκου που καταλαμβάνουν σε αυτόν αλλά και την τοπολογία τους. Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις τρεις μορφές φόρτισης.

7.2.1 Θλίψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής θλιπτικού φορτίου στον υγίη σπόνδυλο.(Σχήμα 7.1)



Σχήμα 7.1: Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z, (Δ) της μετατόπισης κατά Z με αρνητικές τιμές για τον υγιή σπόνδυλο έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου.

Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στον αριστερό αυχένα του σπονδυλικού τόξου ενώ εμφανίζεται επίσης μεγάλη συγκέντρωση τάσεων στην δεξιά εμπρόσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Γενικότερα όμως οι τάσεις κατανέμονται σε όλο τον όγκο του σπονδυλικού σώματος

Η μέγιστη παραμόρφωση βρίσκεται στη δεξιά μεριά της άνω επιφυσιακής πλάκας του σπονδυλικού σώματος, έχει τοπικό χαρακτήρα και οφείλεται στην ύπαρξη υψηλού ποσοστού υλικού 1 στην περιοχή αυτή. Στο ίδιο αυτό σημείο παρατηρείται και η μέγιστη μετατόπιση.

Ακολουθεί ο πίνακας που συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές για την τάση, την παραμόρφωση και τη μετατόπιση ανά υλικό: (Πίνακας 7.1)

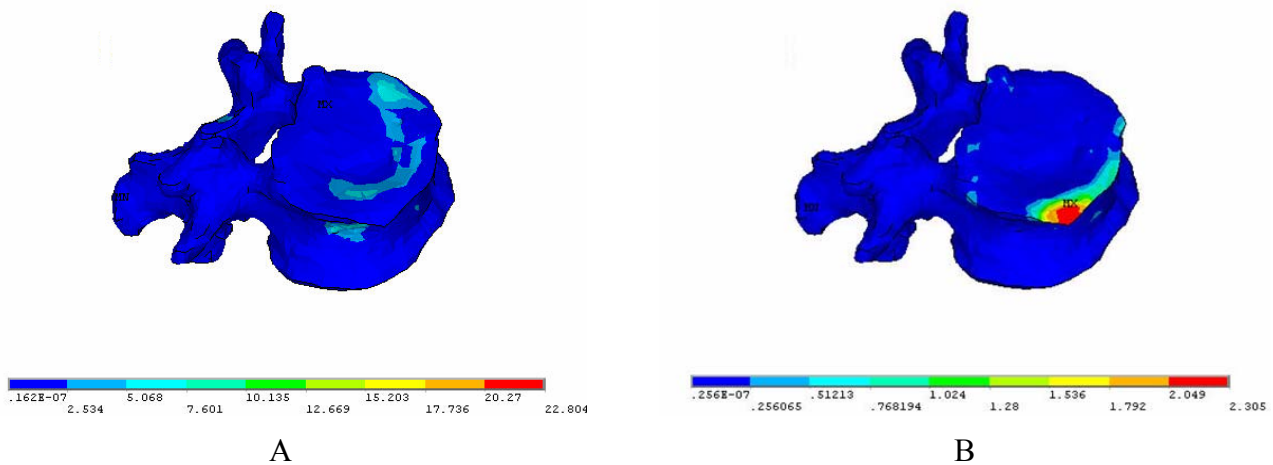
Πίνακας 7.1: Πίνακας αποτελεσμάτων του υγιούς σπονδύλου κατά τη θλιπτική καταπόνηση

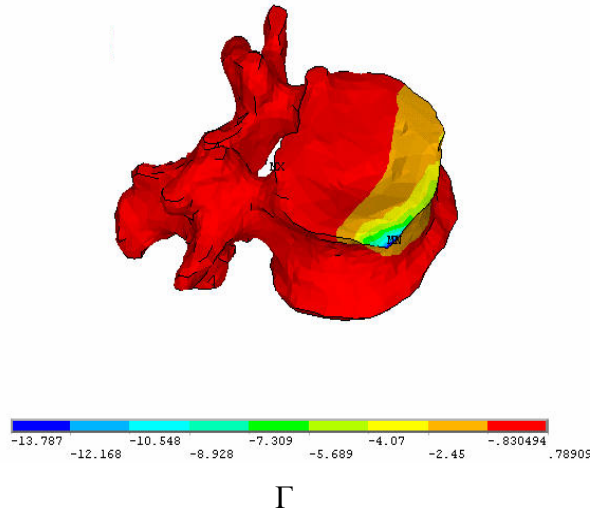
Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	1,140	5,966	11,154	10,804	15,984	22,531	20,599	13,944	12,754
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	1476000	177000	80000	29900	22800	12900	16400	4600	3000
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-9	-3,22	-1,82	-1,74	-1,59	-1,51	-1,24	-0,67	-0,35

Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στα υλικά 6 και 7, ενώ τα υλικά 1 και 2 έχουν μικρότερη τάση. Αυτό είναι λογικό αφού τα πεπερασμένα στοιχεία που ανήκουν στα δύο πρώτα υλικά δεν φέρουν μεγάλες αντιστάσεις στις πιέσεις που δέχονται και όπως είναι εμφανές από τις δύο επόμενες σειρές του πίνακα είναι τα στοιχεία που παραμορφώνονται και μετατοπίζονται περισσότερο από όλα

7.2.2 Κάμψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής του καμπτικού φορτίου στον υγιή σπόνδυλο (Σχήμα 7.2)





Σχήμα 7.2 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον υγιή σπόνδυλο έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου

Η μέγιστη τάση εμφανίζεται ξανά στον αριστερό αυχένα ενώ παρατηρείται όπως και πριν ομοιόμορφη κατανομή τάσεων μέσα στο σώμα και αισθητή συγκέντρωση τάσεων στην άνω επιφυσιακή επιφάνεια του σπονδυλικού σώματος.

Η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στην ίδια περιοχή που εμφανίστηκε στη θλίψη και η αιτία είναι και πάλι το μεγάλο ποσοστό υλικού 1.

Η μετατόπιση, όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ακολουθεί τη φορά των δυνάμεων. Πιο συγκεκριμένα κοντά στην επιφάνεια A2 όπου εφαρμόζεται θλιπτική δύναμη έχουμε μετατόπιση προς τα κάτω, ενώ στην επιφάνεια A1 και τις γειτονικές της, που εφαρμόζεται εφελκυστική δύναμη, έχουμε μετατόπιση προς τα πάνω.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 7.2)

Πίνακας 7.2: Πίνακας αποτελεσμάτων του υγιούς σπονδύλου κατά τη καμπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	1,776	8,933	14,218	14,804	22,689	24,901	32,204	36,034	32,968
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	2305000	276000	103000	40000	27000	17000	19000	10000	6000
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-13,78	-4,93	-2,72	-2,58	-2,32	-2,21	-1,63	-0,884	0,635

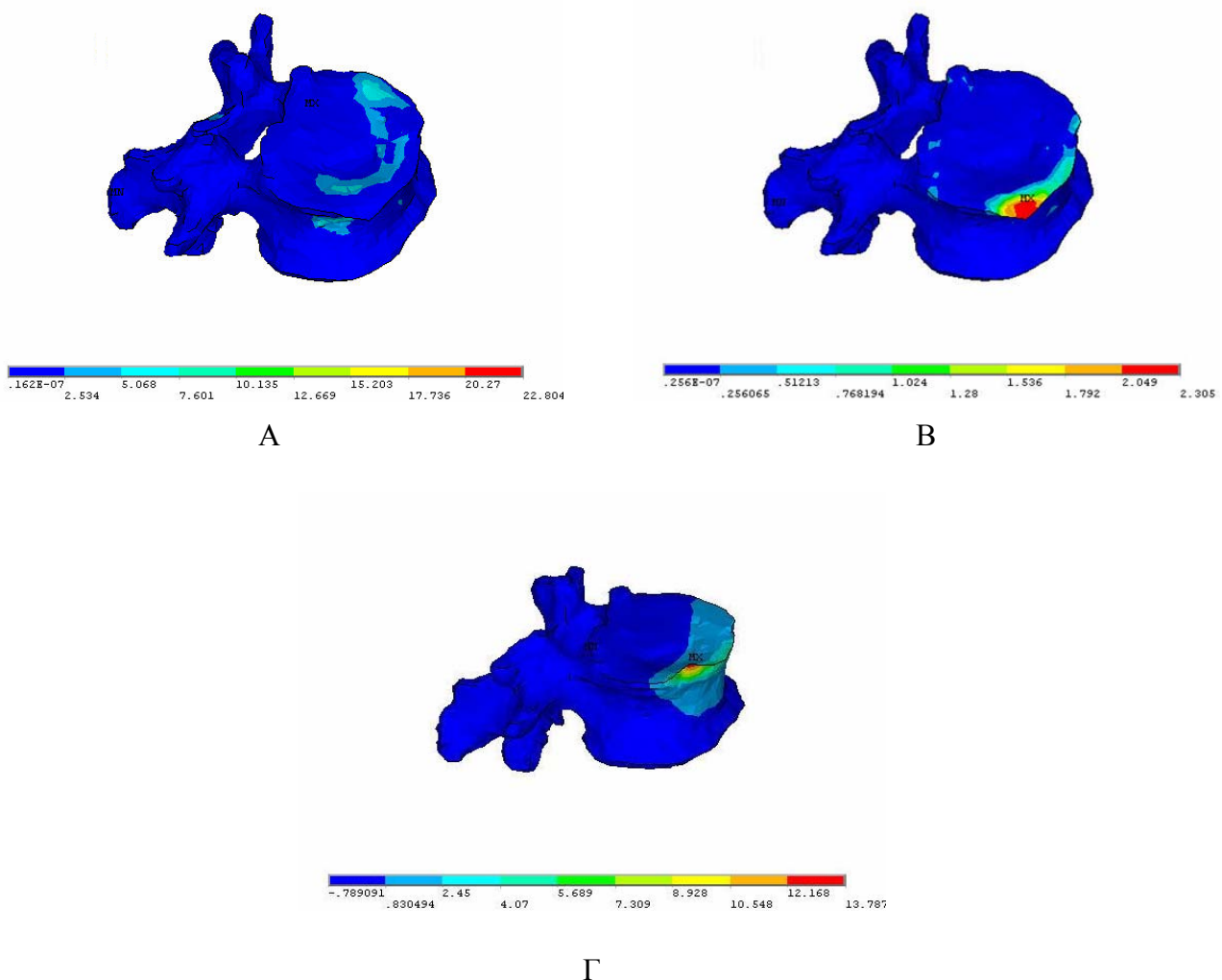
Παρατηρείται πως η μέγιστη τιμή έχει πλέον μεταφερθεί στο υλικό 8 και πως τα υλικά υψηλού μέτρου ελαστικότητας (6, 7, 8) έχουν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων. Για

την παραμόρφωση και την μετατόπιση εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα με την προηγούμενη παράγραφο. Τα πεπερασμένα στοιχεία που ανήκουν στα 2 πρώτα υλικά παραμορφώνονται και μετατοπίζονται περισσότερο από όλα τα υπόλοιπα.

Αξίζει να αναφερθεί πως όλα τα μεγέθη έχουν μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες της θλιπτικής καταπόνησης. Αυτό είναι λογικό αν αναλογισθούμε πως η κάμψη είναι μία κίνηση η οποία καταπονεί πολύ περισσότερο το σπόνδυλο από τη θλίψη.

7.2.3 Έκταση

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής του εκτατικού φορτίου στον υγιή σπόνδυλο. (Σχήμα 7.3)



Σχήμα 7.3 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον υγιή σπόνδυλο έπειτα από την επιβολή εκτατικού φορτίου,

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 7.3)

Πίνακας 7.3: Πίνακας αποτελεσμάτων του υγιούς σπονδύλου κατά τη εκτατική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	1,776	8,933	14,218	14,804	22,689	24,901	32,204	36,034	32,968
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	2305000	276000	102000	40000	27000	17000	19000	11000	5000
Μετατόπιση κατά Z (mm)	13,78	4,93	2,72	2,58	2,32	2,21	1,63	0,88	-0,63

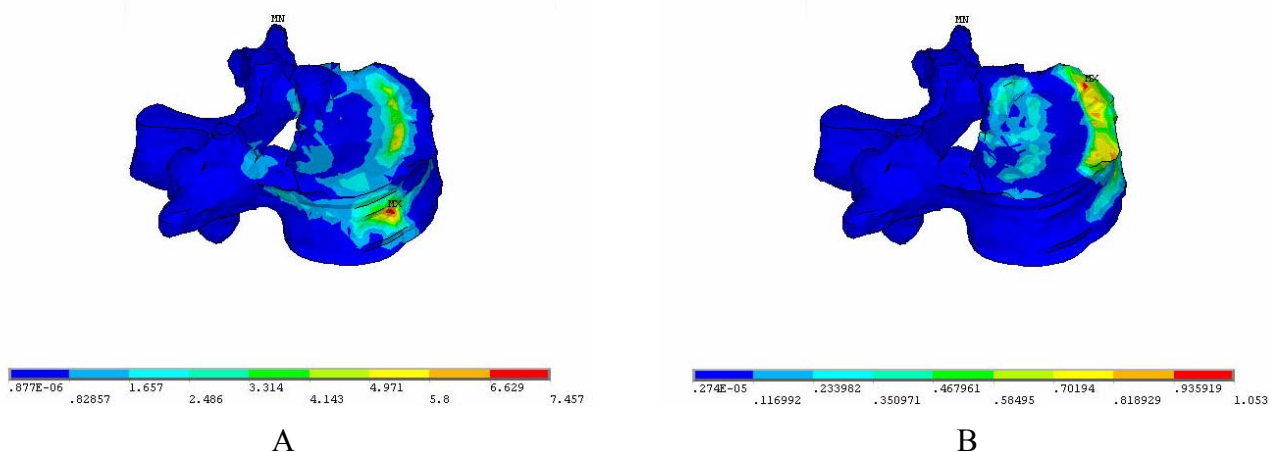
Κατά την εξέταση της έκτασης για τον υγιή σπόνδυλο εξήχθησαν τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα με αυτά της κάμψης. Αυτό είναι λογικό καθώς η έκταση δεν είναι τίποτε άλλο από μία αντίστροφη κάμψη. Η μόνη διαφορά είναι στη φορά των μετατοπίσεων κατά Z αλλά όχι και στην τιμή. Από αυτό το σημείο και έπειτα όσο μελετούνται τα μοντέλα χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο δεν θα αναφερθεί ξανά η έκταση καθώς δεν έχει ιδιαίτερη αξία.

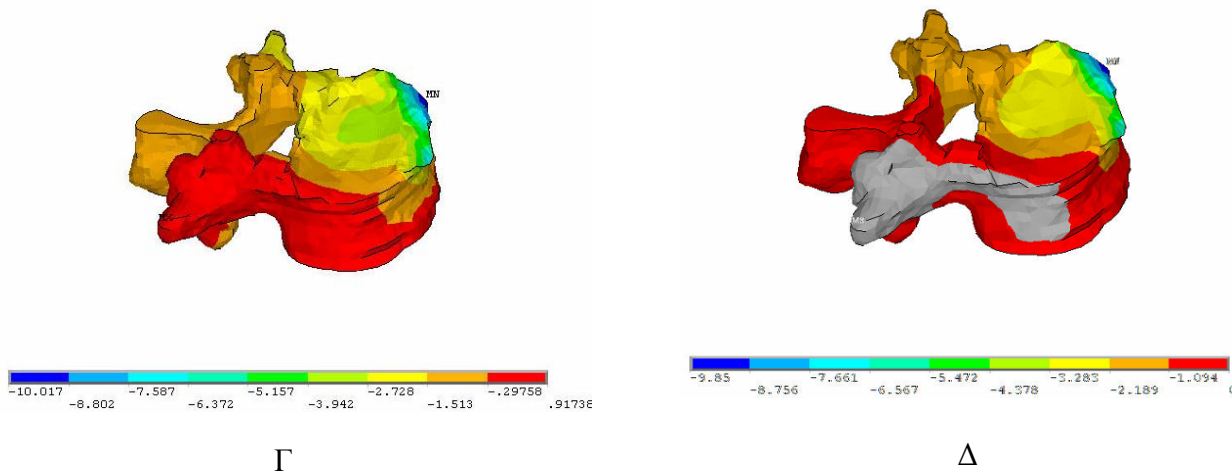
7.3 Ασθενής 1

Όμοια με την προηγούμενη παράγραφο θα αναλυθεί η συμπεριφορά του σπονδύλου του ασθενή 1, ο οποίος παρουσιάζει κάταγμα βαθμού 1 (ήπιο) κάταγμα, σε θλίψη και κάμψη.

7.3.1 Θλίψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής θλιπτικού φορτίου στο μοντέλο του σπονδύλου του ασθενή 1. (Σχήμα 7.4)





Σχήμα 7.4 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z, (Δ) της μετατόπισης κατά Z με αρνητικές τιμές για τον σπόνδυλο του Ασθενή 1 έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου

Σε αντίθεση με τη θλίψη του υγιούς σπονδύλου εδώ η μέγιστη τάση εμφανίζεται στη δεξιά εμπρόσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος και όχι στον αυχένα. Επίσης παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων στην άνω επιφυσιακή πλάκα του σπονδυλικού σώματος. Το ίδιο παρατηρούμε και για τις παραμορφώσεις, όπου εκτός από την περιφέρεια της άνω επιφυσιακής πλάκας παρατηρούνται, επίσης, παραμορφώσεις στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας αλλά και στην εμπρόσθια αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Η μετατόπιση κατά την αρνητική φορά του άξονα Z εμφανίζεται σε όλο το σπόνδυλο εκτός από την δεξιά εγκάρσια πλευρική γλήνη και ένα μέρος της δεξιά πλευράς του σπονδυλικού σώματος, γεγονός που οφείλεται στην ασυμμετρία του σπονδύλου του ασθενή 1.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 7.4)

Πίνακας 7.4: Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του Ασθενή 1 κατά τη θλιπτική καταπόνηση

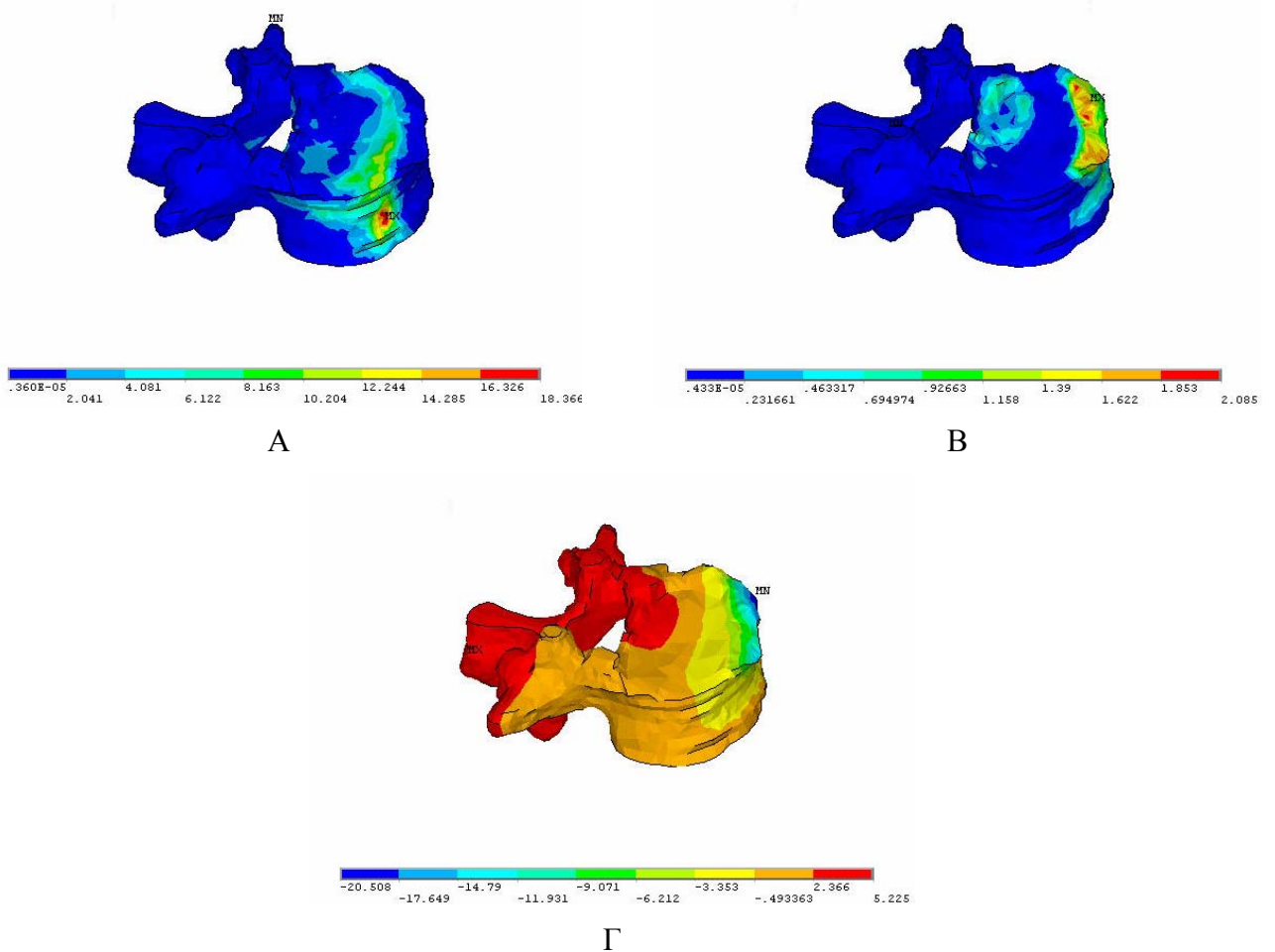
Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	1,025	20,971	13,46	9,889	11,207	7,413	3,63	4,05	-
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	1268000	420400	693000	22000	14900	8600	1700	1100	-
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-10,017	-3,073	-2,975	-2,861	-2,498	-2,292	-1,187	-0,3997	-

Από τον πίνακα μπορεί να παρατηρηθεί πως οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται σε αρχικά υλικά και πιο συγκεκριμένα στο 2 και στο 3. Αυτό συμβαίνει διότι ο παραπάνω σπόνδυλος περιέχει μικρό ποσοστό υλικών υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Συγκεκριμένα

το ποσοστό των υλικών από το 6° στο 9° είναι λιγότερο από 1%. Η μέγιστη παραμόρφωση και μετατόπιση όπως είναι λογικό λαμβάνει χώρα στα πρώτα υλικά.

7.3.2 Κάμψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής καμπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 1. (Σχήμα 7.5)



Σχήμα 7.5 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον σπόνδυλο του Ασθενή 1 έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου

Τοπολογικά η μέγιστη τάση εμφανίζεται στη δεξιά εμπρόσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις εμφανίζονται στην εμπρόσθια και αριστερή πλευρά της περιφέρειας του σπονδυλικού σώματος όπως επίσης και στην αριστερή εμπρόσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 7.5)

Πίνακας 7.5: Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του Ασθενή 1 κατά την καμπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	2,054	19,682	31,752	23,395	33,295	18,271	5,426	2,700	0
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	2413000	519000	141000	51000	34000	18000	3000	1000	0
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-20,50	5,04	5,06	5,09	4,63	4,58	3,51	2,17	0

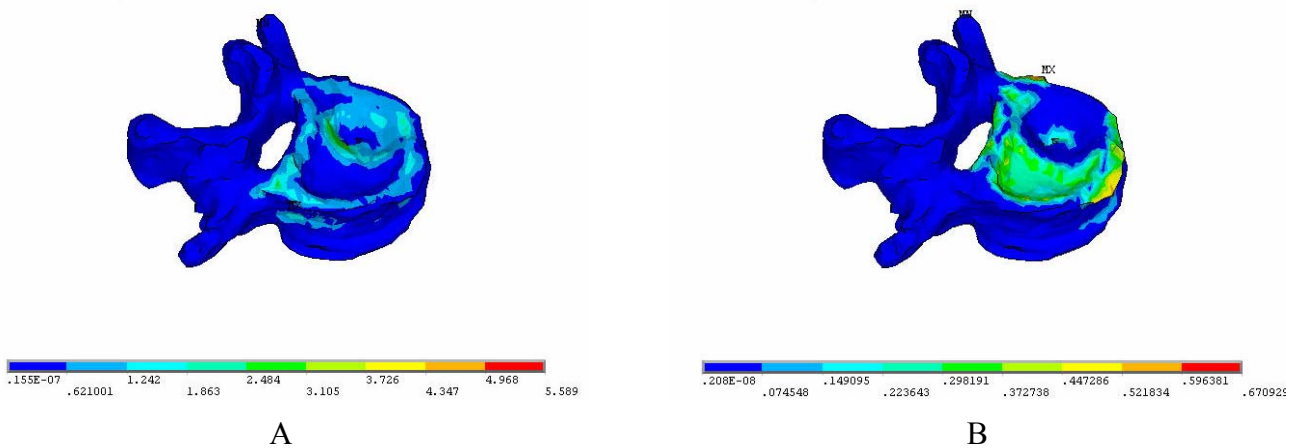
Οι μέγιστες τάσεις μετατοπίστηκαν στα υλικά 3 και 5 από τα υλικά 2 και 3 που εμφανίστηκαν στην περίπτωση της θλίψης. Ακόμα παρατηρείται, ξανά, ότι οι τάσεις αλλά και οι παραμορφώσεις έχουν μεγαλύτερες τιμές από αυτές της θλίψης, όπως συνέβη και στον υγιή σπόνδυλο.

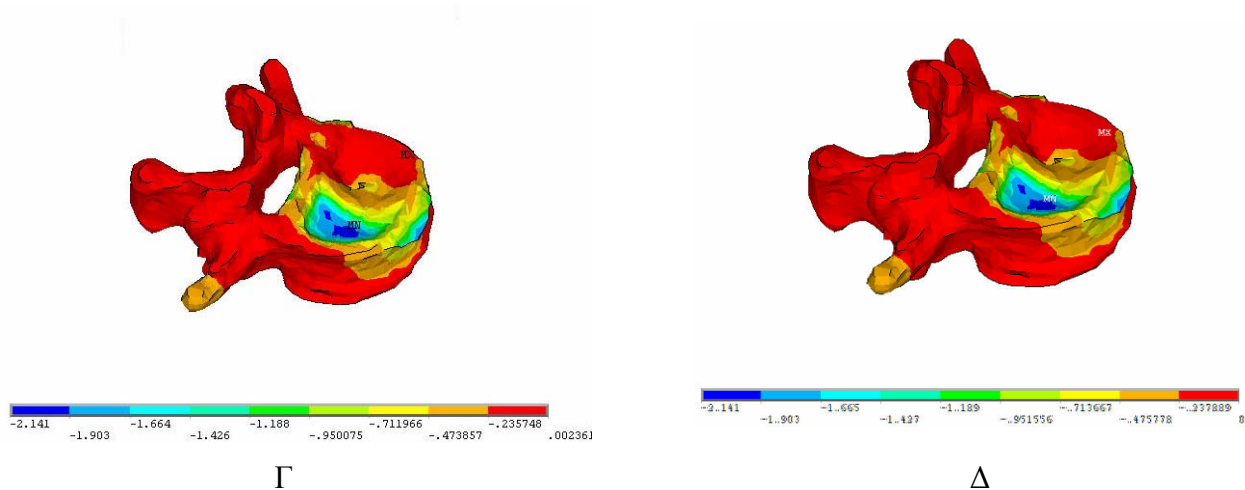
7.4 Ασθενής 2

Όμοια με την προηγούμενη παράγραφο θα αναλυθεί η συμπεριφορά του σπονδύλου του ασθενή 2, ο οποίος παρουσιάζει κάταγμα βαθμού 2 (μέτριο), σε θλίψη και κάμψη.

7.4.1 Θλίψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής θλιπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 2. (Σχήμα 7.6)





Σχήμα 7.6 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z, (Δ) μετατόπισης κατά Z με αρνητικές τιμές για τον σπόνδυλο του Ασθενή 2 έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου

Στο σπόνδυλο του ασθενή 2 είναι εύκολο να παρατηρηθεί πως η άνω επιφυσιακή πλάκα έχει υποστεί μεταβολή στην γεωμετρία λόγω του σπονδυλικού κατάγματος που εμφανίζει ο σπόνδυλος. Η μεταβαλλόμενη αυτή γεωμετρία της άνω επιφυσιακής πλάκας έχει δημιουργήσει επιφάνειες όπου έχουμε φαινόμενα συσσώρευσης τάσεων και παραμορφώσεων.

Ακόμα παρατηρείται μεγάλη καταπόνηση στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας που βρίσκεται κοντά στο τρήμα. Η περιοχή αυτή αποτελείται από υλικά υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Το σύνολο των υλικών της περιοχής αυτής συγκρατεί το σπονδυλικό σώμα το οποίο λόγω του υψηλού βαθμού κατάγματος εμφανίζει μεγάλες μετατοπίσεις κατά την εφαρμογή του θλιπτικού φορτίου.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης, της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό.(Πίνακας 7.6)

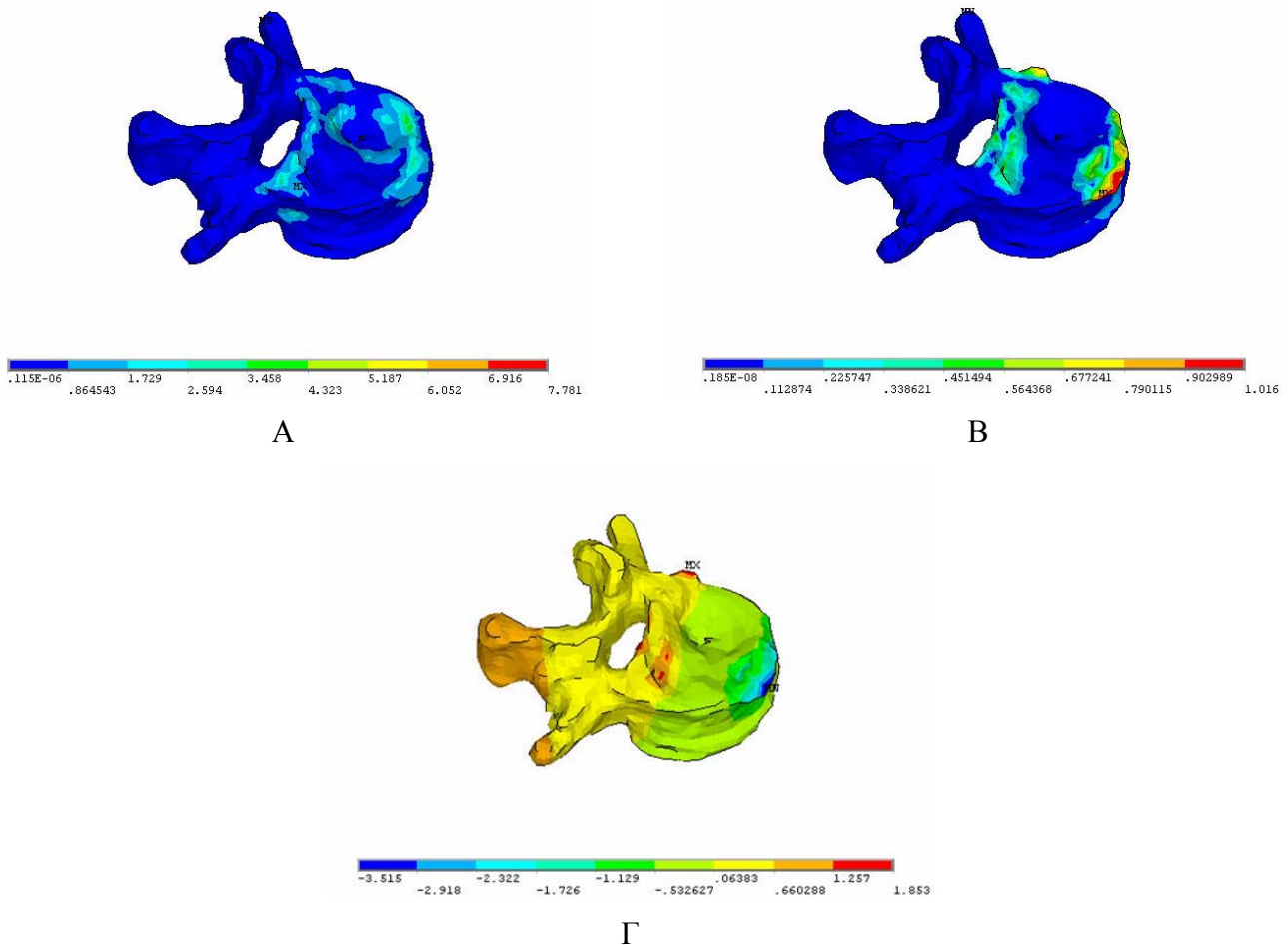
Πίνακας 7.6: Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 2 κατά τη θλιπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,559	3,923	5,355	9,464	7,175	3,552	3,294	0,4208	0
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	782000	98000	28000	15000	5000	2900	2400	100	0
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-2,14	-1,24	-0,52	-0,41	-0,397	-0,37	-0,36	-0,13	0

Η περιοχή των υλικών που εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις είναι τα υλικά 4 & 5.

7.4.2 Κάμψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής καμπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 2. (Σχήμα 7.7)



Σχήμα 7.7 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον σπόνδυλο του Ασθενή 2 έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης, της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 7.7)

Πίνακας 7.7: Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 2 κατά την καμπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,914	6,117	8,976	11,853	9,784	4,637	5,193	0,469	0
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	1092000	147000	38000	19000	8000	3000	2000	200	0

Μετατόπιση κατά Z (mm)	-3,51	1,17	0,92	0,90	0,73	0,54	0,52	0,44	0
------------------------	-------	------	------	------	------	------	------	------	---

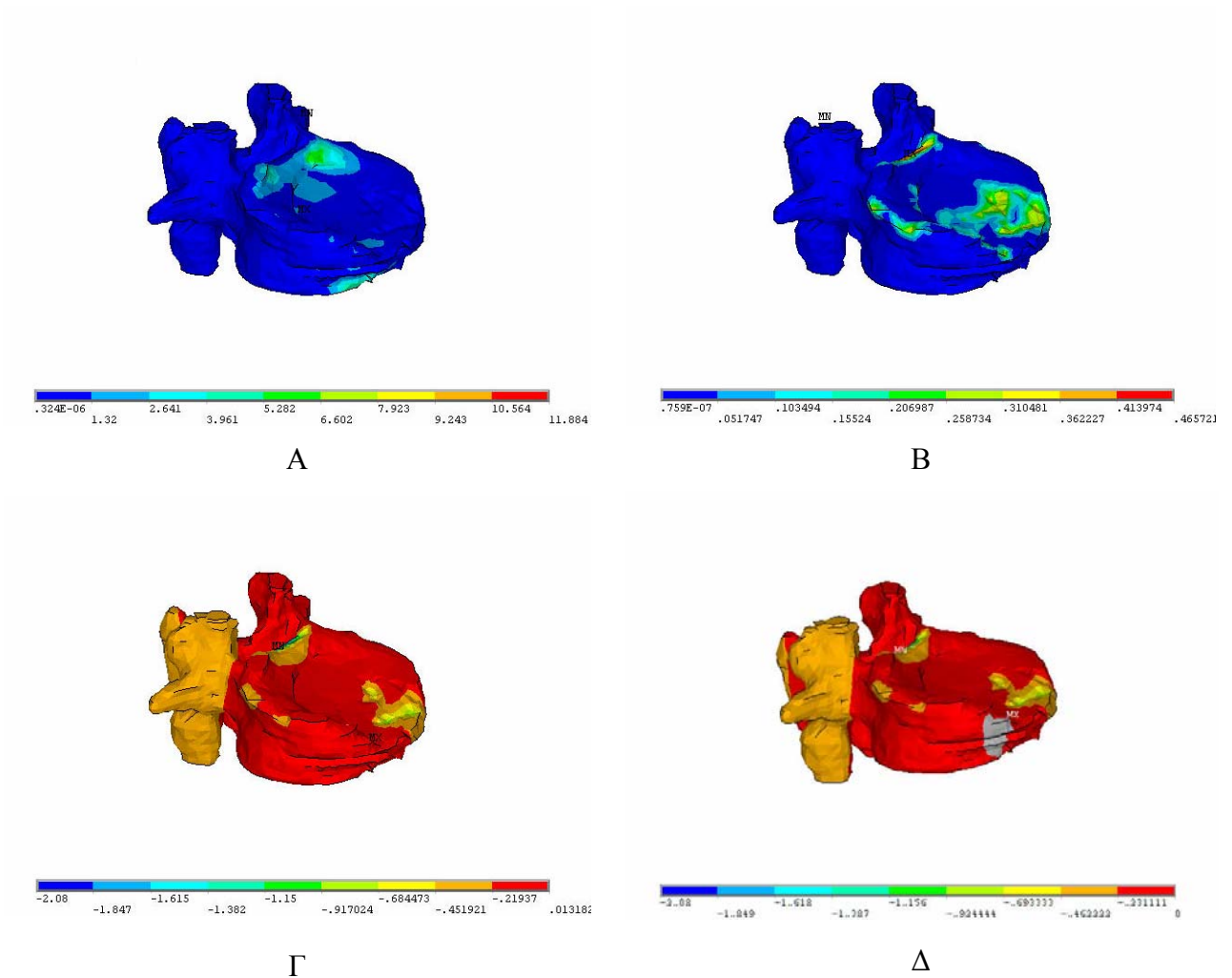
Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στα ίδια υλικά με αυτά στα οποία εμφανίστηκαν στη προηγούμενη παράγραφο της θλιπτικής καταπόνησης του ασθενή 2, δηλαδή τα υλικά 4 και 5. Ακόμα παρατηρούμε πως και οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων για τις δύο αυτές διαφορετικές φορτίσεις, είναι περίπου οι ίδιες.

7.5 Ασθενής 3

Όμοια με την προηγούμενη παράγραφο θα αναλύθει η συμπεριφορά του σπονδύλου του ασθενή 3, ο οποίος παρουσιάζει κάταγμα βαθμού 3 (σοβαρό), σε θλίψη και κάμψη

7.5.1 Θλίψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής θλιπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 3. (Σχήμα 7.8)



Σχήμα 7.8 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z, (Δ) μετατόπισης κατά Z με

αρνητικές τιμές για τον σπόνδυλο του Ασθενή 3 έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου. Οι μέγιστες τάσεις και οι παραμορφώσεις εμφανίζονται στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας κοντά στο τρήμα όπως επίσης εμφανίζονται παραμορφώσεις και στη μπροστά δεξιά πλευρά της κάτω επιφυσιακής πλάκας.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 7.8)

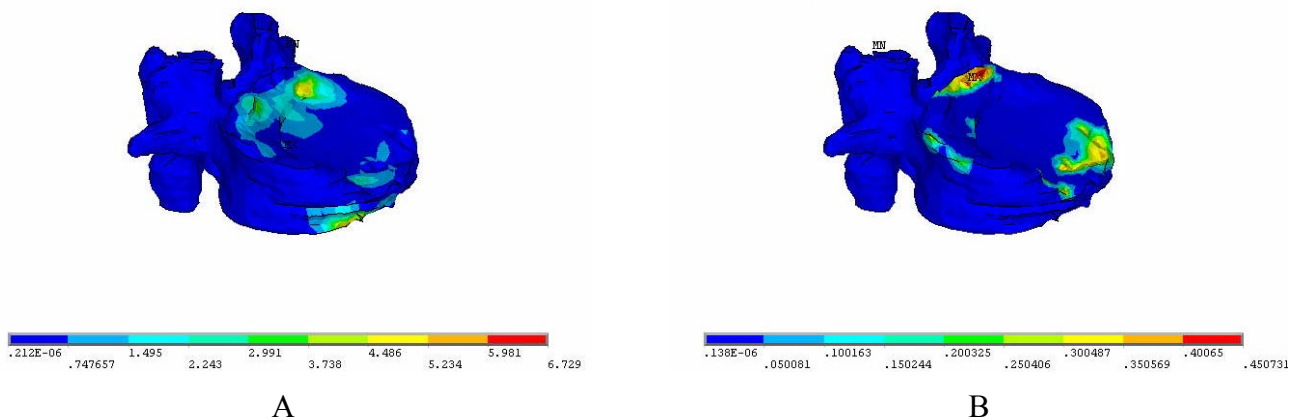
Πίνακας 7.8: Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 3 κατά την θλιπτική καταπόνηση

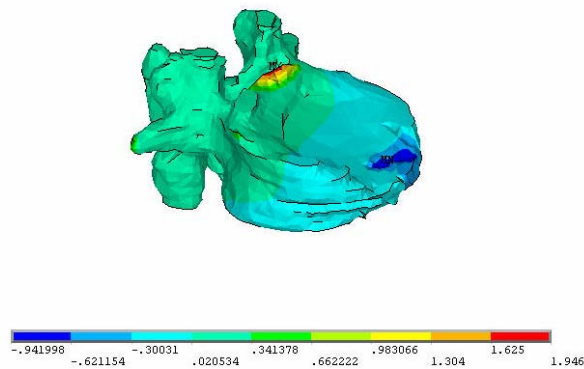
Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,440	3,285	9,860	6,969	11,112	12,468	14,119	12,767	14,997
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	794000	73000	41000	13000	10000	9000	7000	4000	3000
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-2,08	-0,48	-0,37	-0,36	-0,34	-0,29	-0,28	-0,25	0,22

Η μέγιστες τιμές των τάσεων εμφανίζονται στα υλικά 7 και 9

7.5.2 Κάμψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής καμπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 3. (Σχήμα 7.9)





Γ

Σχήμα 7.9 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον σπόνδυλο του Ασθενή 3 έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό.(Πίνακας 7.9)

Πίνακας 7.9: Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 3 κατά την καμπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,914	6,117	8,976	11,853	9,784	4,637	5,193	0,469	0
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	1092000	147000	38000	19000	8000	3000	2000	200	0
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-3,51	1,17	0,92	0,90	0,73	0,54	0,52	0,44	0

Οι μέγιστες τάσεις και οι παραμορφώσεις εμφανίζονται όπως και στην περίπτωση της θλίψης στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας κοντά στο τρήμα όπως επίσης εμφανίζονται παραμορφώσεις και στη μπροστά δεξιά πλευρά της κάτω επιφυσιακής πλάκας.

Στο συγκεκριμένο σπόνδυλο παρατηρούμε πως οι μέγιστες τιμές των τάσεων που εμφανίζονται κατά την κάμψη είναι μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται κατά τη θλίψη και πως οι παραμορφώσεις σε αυτές τις δύο καταπονήσεις είναι περίπου ίδιες. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγάλου βαθμού κατάγματος που έχει υποστεί ο σπόνδυλος και έχει ως αποτέλεσμα η θλίψη να καταπονεί εξ ίσου αν όχι και περισσότερο το σπόνδυλο απ' ότι η κάμψη.

7.6 Σύγκριση επίδρασης είδους φόρτισης

Στην παράγραφο αυτή συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα τα οποία έχουν εξαχθεί μέχρι τώρα στο τρέχον κεφάλαιο.

Η κάμψη και η έκταση είναι σχεδόν ταυτόσημες καταπονήσεις

Σε κάθε σπόνδυλο η μέγιστη τάση εμφανίζεται σε διαφορετικό υλικό και έχει σχέση με το ποιο υλικό βρίσκεται στο σημείο όπου συσσωρεύονται οι τάσεις λόγω γεωμετρίας αλλά και της τοπολογίας των υλικών μέσα στο σπόνδυλο.

Η κάμψη καταπονεί περισσότερο έναν υγιή και ελαφρώς καταγματικό σπόνδυλο απ' ό τι η θλίψη φαινόμενο που φαίνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων τόσο των τάσεων όσο και των παραμορφώσεων

Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κατάγματος ενός σπονδύλου τόσο πιο μικρή είναι η διαφορά των μέγιστων τιμών των μηχανικών μεγεθών μεταξύ θλίψης και κάμψης. Στους πρώτους δύο σπονδύλους η κάμψη καταπονεί περισσότερο από τη θλίψη, στον τρίτο οι δύο φορτίσεις τον καταπονούν εξ ίσου ενώ στον τέταρτο (με το μεγαλύτερο βαθμό κατάγματος) συμβαίνει το αντίθετο και η θλίψη καταπονεί περισσότερο από την κάμψη.

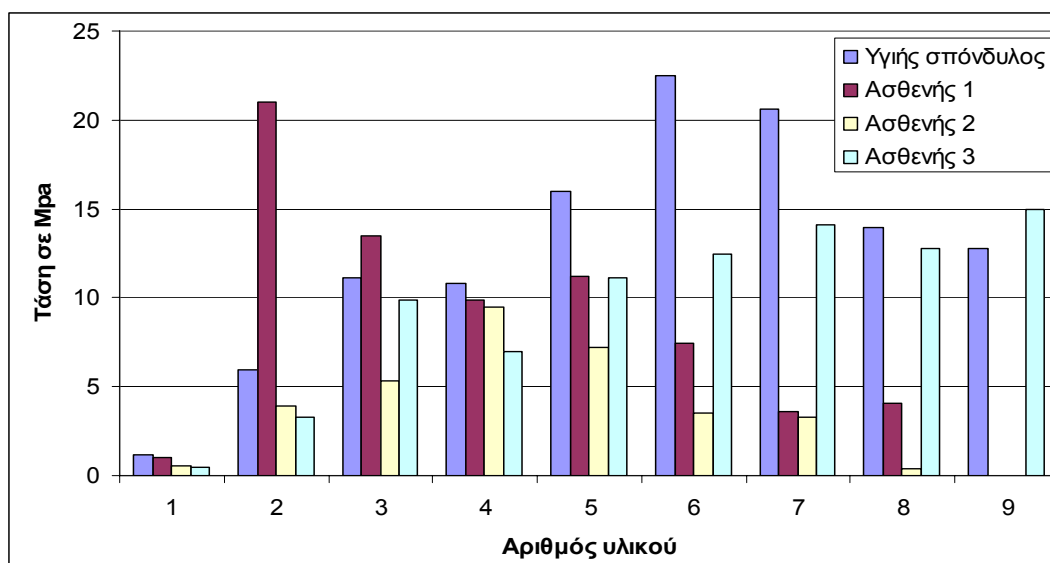
Στους καταγματικούς σπονδύλους παρατηρείται πως οι άνω επιφυσιακές πλάκες στο κάθε μοντέλο έχουν έντονες διαφορές στην γεωμετρία τους σε σχέση με την άνω επιφυσιακή πλάκα ενός υγιούς σπονδύλου. Έτσι έχουν δημιουργηθεί απότομες κλίσεις όπως επίσης και κοιλότητες στις οποίες συσσωρεύονται τάσεις και παραμορφώσεις. Οι κλίσεις αυτές είναι μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κατάγματος, συνεπώς και η συγκέντρωση των τάσεων και των παραμορφώσεων στις περιοχές αυτές είναι εντονότερη. Ακόμα παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας κοντά στο τρήμα. Ανατομικά αυτή η περιοχή φαίνεται να συγκρατεί το σπονδυλικό σώμα.

7.7 Σύγκριση επίδρασης βαθμού κατάγματος

Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των τεσσάρων διαφορετικών σπονδύλων και εξάγονται συμπεράσματα για το πως συμπεριφέροντε οι καταγματικοί σπόνδυλοι σε μία ίδιου τύπου καταπονεί σε σχέση με τον υγιή.

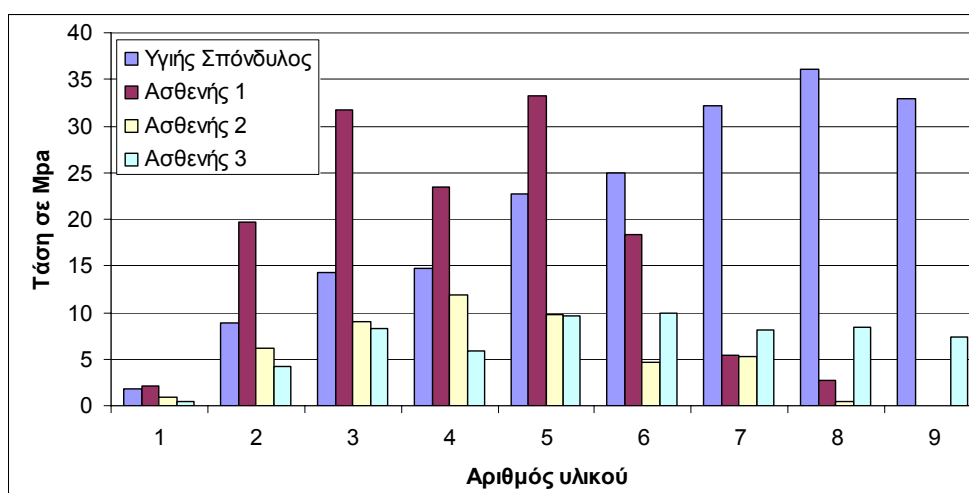
7.7.1 Σύγκριση μέγιστων Τάσεων & Παραμορφώσεων ανά υλικό.

Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα των μέγιστων τάσεων που εμφανίζονται σε κάθε υλικό των τεσσάρων σπονδύλων σε θλιπτική καταπόνηση: (Σχήμα 7.10)



Σχήμα 7.10 Οι μέγιστες τιμές τάσεων ανά υλικό στους υπό εξέταση σπονδύλους κατά τη θλίψη

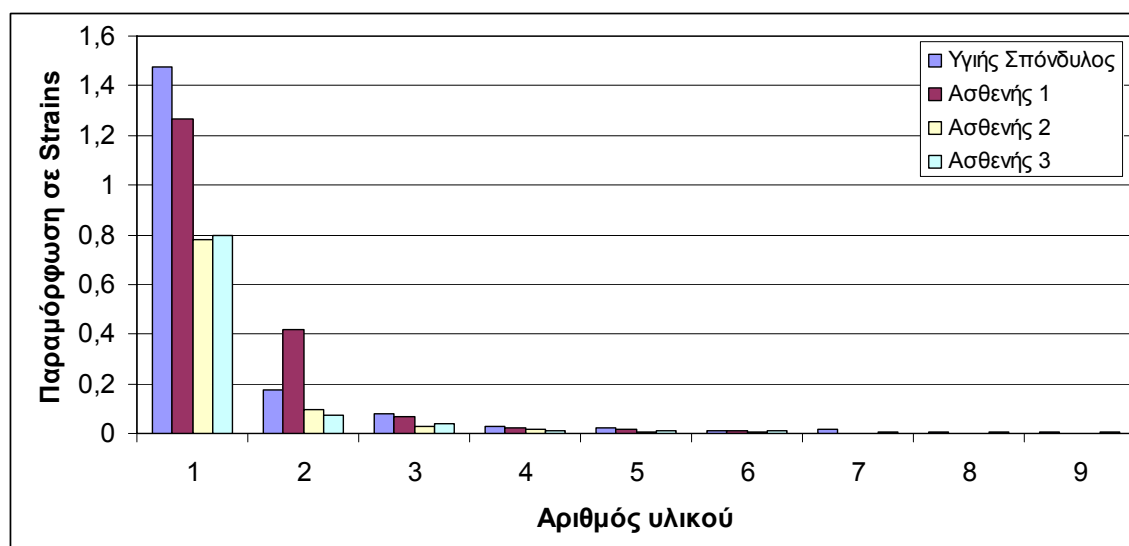
Ακόμα, ακολουθεί το διάγραμμα των μέγιστων τάσεων που εμφανίζονται σε κάθε υλικό των τεσσάρων σπονδύλων σε καμπτική καταπόνηση. (Σχήμα 7.11)



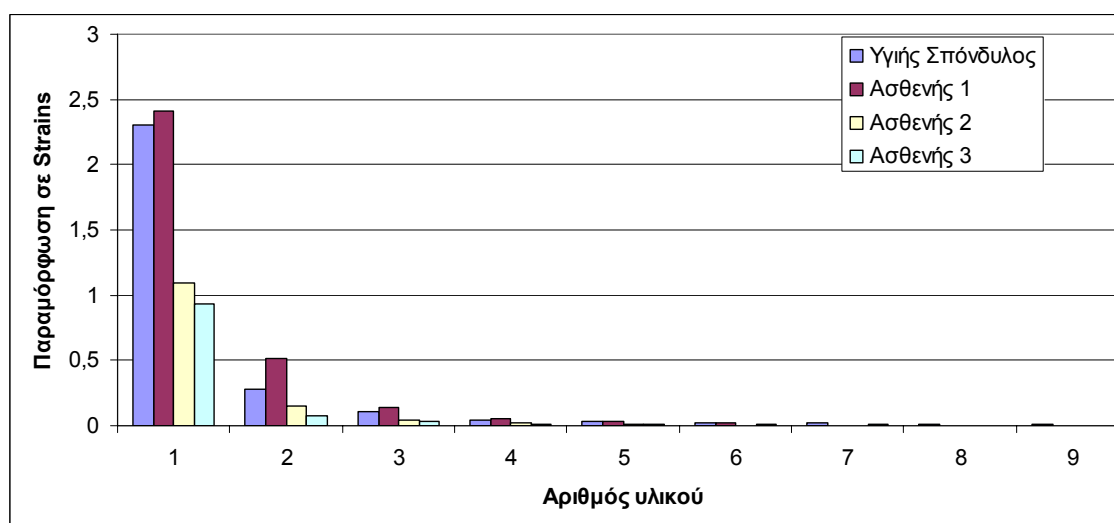
Σχήμα 7.11 Οι μέγιστες τιμές τάσεων ανά υλικό στους υπό εξέταση σπονδύλους κατά την κάμψη

Από τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 7.10) (Σχήμα 7.11) φαίνεται πως ο κάθε σπόνδυλος έχει τη δική του ξεχωριστή κατανομή των τάσεων στα υλικά του. Ο υγιής σπόνδυλος καταπονεί περισσότερο τα υλικά 6 & 7 στη θλίψη και 7 & 8 στην κάμψη. Αντίστοιχα ο σπόνδυλος του ασθενή 1 καταπονεί τα υλικά 3 & 4 στη θλίψη και 3 & 6 στην κάμψη. Η συμπεριφορά του σπονδύλου του ασθενή 2 είναι ίδια και στη θλίψη και στην κάμψη όπου οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στα υλικά 4 & 5 ενώ ο σπόνδυλος του ασθενή 4 εμφανίζει τις μέγιστες τάσεις στα υλικά 7 & 9 στη θλίψη και στα υλικά 5 & 6 στην κάμψη.

Ακολουθούν τα διαγράμματα των μέγιστων παραμορφώσεων που εμφανίζονται σε κάθε υλικό των τεσσάρων σπονδύλων σε θλιπτική και καμπτική καταπόνηση αντίστοιχα. (Σχήμα 7.12) (Σχήμα 7.13).



Σχήμα 7.12 Οι μέγιστες τιμές παραμορφώσεων ανά υλικό στους υπό εξέταση σπονδύλους κατά την θλίψη



Σχήμα 7.13 Οι μέγιστες τιμές παραμορφώσεων ανά υλικό στους υπό εξέταση σπονδύλους κατά την έκταση

Σε όλους του σπονδύλους, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα πρώτα υλικά. Σε υλικά σκληρότερα του υλικού 3 οι παραμορφώσεις γίνονται αισθητά μικρότερες. (Σχήμα 7.12) (Σχήμα 7.13)

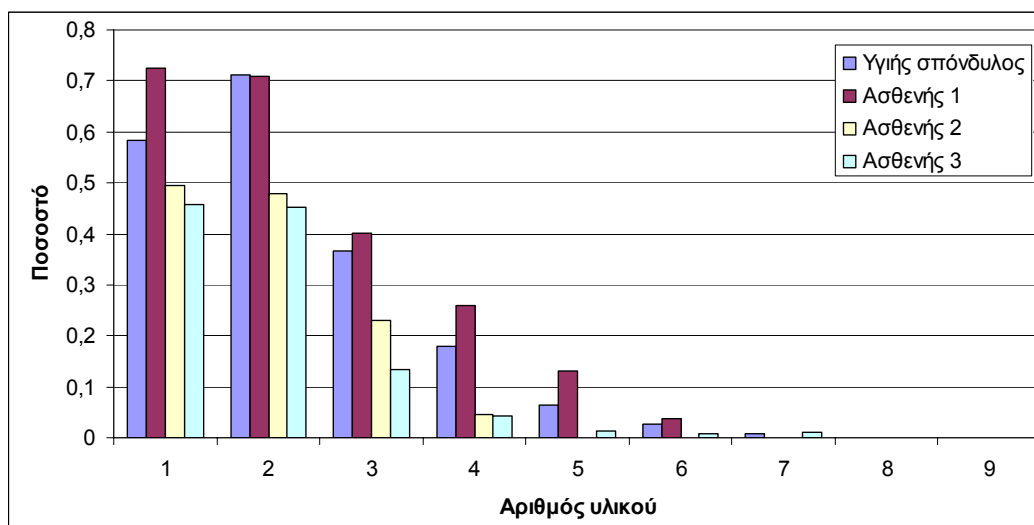
Είναι εμφανές πως από την ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά υλικό δεν μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για τις μέγιστες τιμές των μηχανικών μεγεθών. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς ο κάθε ένας σπόνδυλος έχει διαφορετικό ποσοστό κάθε

υλικού αλλά και διαφορετική τοπολογία αυτού. Έτσι οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση δεν αφορούν όλους τους σπονδύλους αλλά κάθε έναν ξεχωριστά.

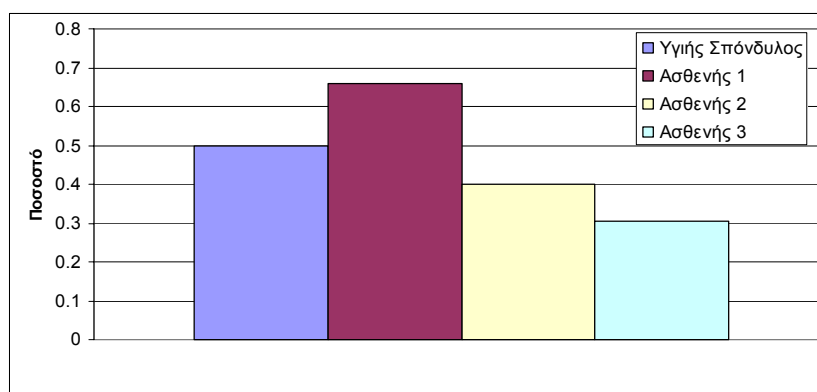
Στη συνέχεια, λοιπόν θα παρατεθούν οι μέγιστες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων στο σύνολο του κάθε σπονδύλου.

7.7.2 Σύγκριση του Ποσοστού του συνολικού όγκου με Παραμόρφωση Μεγαλύτερη από 5000 μ Strains

Ακολουθούν τα διαγράμματα που δείχνουν το ποσοστό του όγκου ανά υλικό αλλά και συνολικού όγκου που εμφανίζει παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5000 μ Strains στους δύο τύπους καταπόνησης. (Σχήμα 7.14) (Σχήμα 7.15) (Σχήμα 7.16) (Σχήμα 7.17)

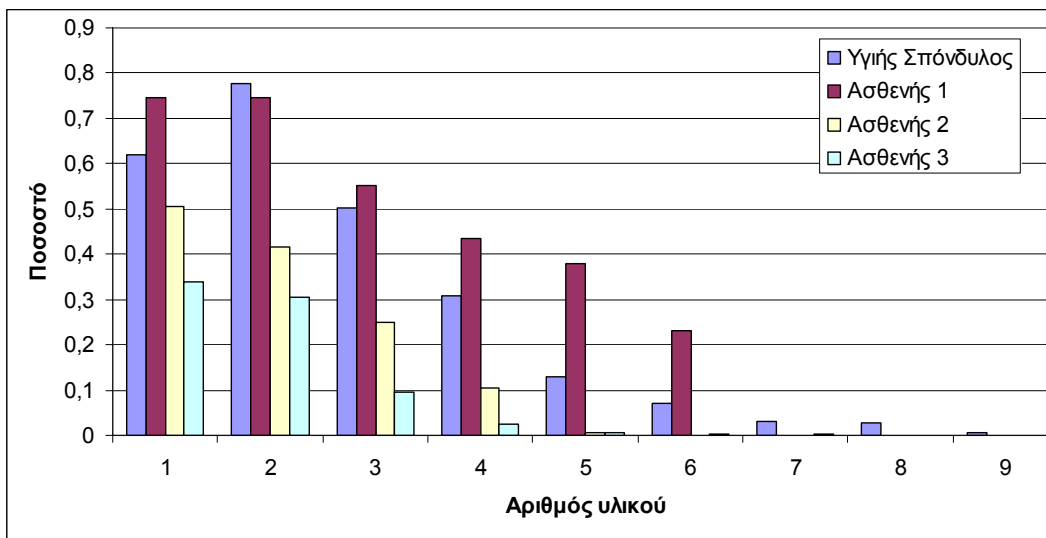


Σχήμα 7.14 Το ποσοστό του όγκου ανά υλικό που η μέγιστη Von Mises παραμόρφωση ξεπερνάει την τιμή 0,005 Strains κατά την θλίψη

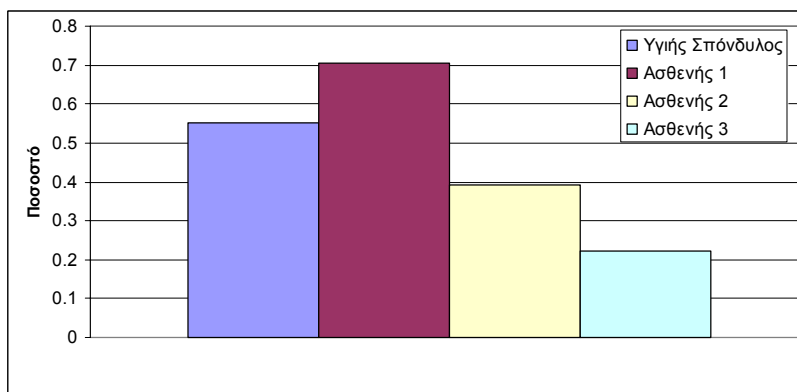


Σχήμα 7.15 Ποσοστό όγκου με ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises μεγαλύτερες από 5000 μ Strains κατά τη θλίψη

Σύμφωνα με τον Frost η παραπάνω τιμή της παραμόρφωσης αποτελεί το ανώτερο όριο κάτω από το οποίο έχουμε φυσιολογική οστική ανακατασκευή.



Σχήμα 7.16 Το ποσοστό του όγκου ανά υλικό που η μέγιστη Von Misses παραμόρφωση ξεπερνάει την τιμή 0,005 Strains κατά την κάμψη



Σχήμα 7.17 Ποσοστό όγκου που έχει ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises μεγαλύτερες από 5000μStrains κατά την κάμψη

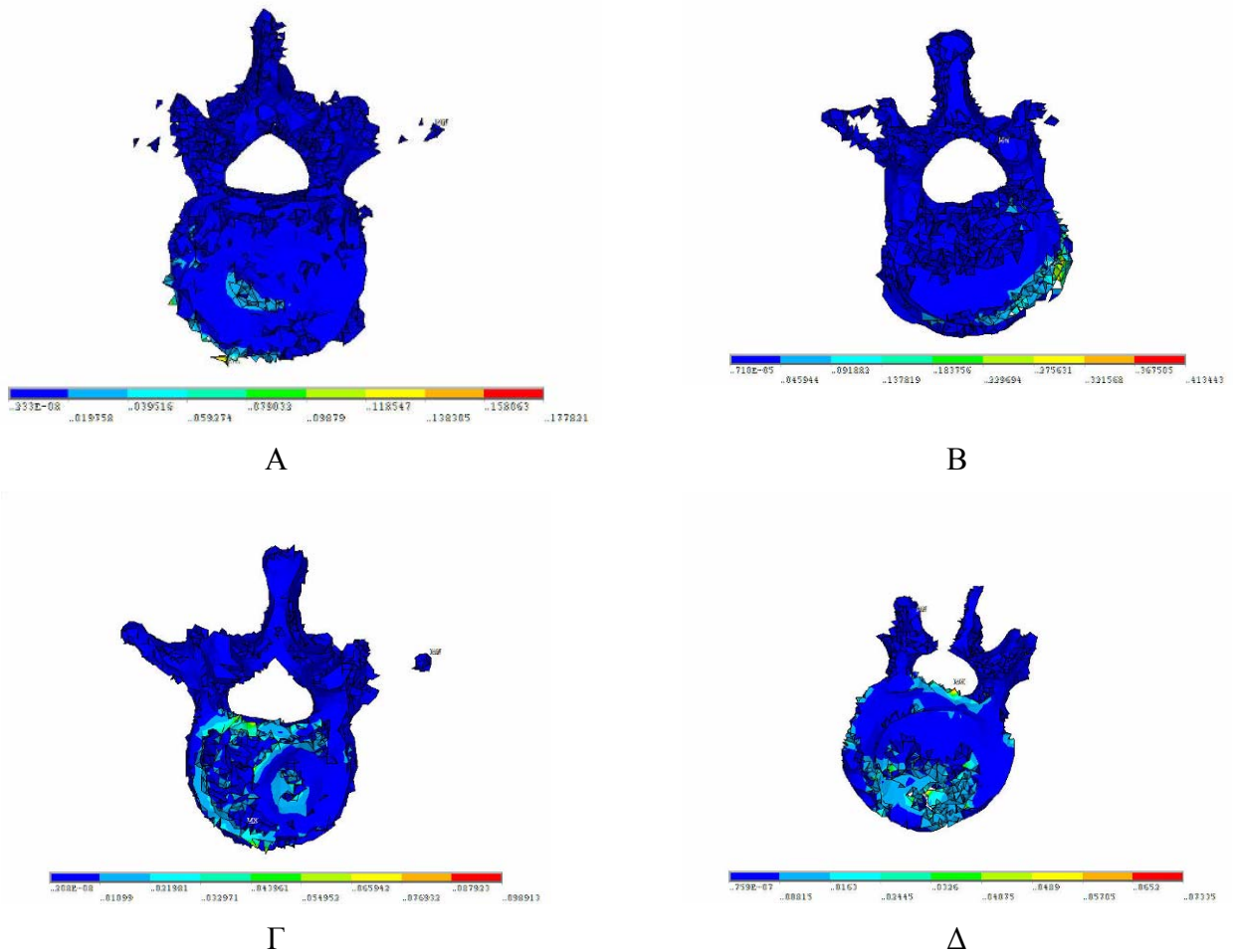
Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 7.15) (Σχήμα 7.17) φαίνεται ακόμα καθαρότερα ότι το ποσοστό του όγκου που εμφανίζει παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5000 μStrains και για τις δύο καταπονήσεις ακολουθεί την κατάταξη σκληρότητας. Ακόμα παρατηρείται πως το ποσοστό αυτό είναι ελαφρώς μεγαλύτερο στην κάμψη για τους πρώτους δύο σπονδύλους και περίπου ίδιο για τους δύο επόμενους.

7.7.3 Σύγκριση των Αποτελεσμάτων μετά την Αφαίρεση των Υλικών 1 και 2

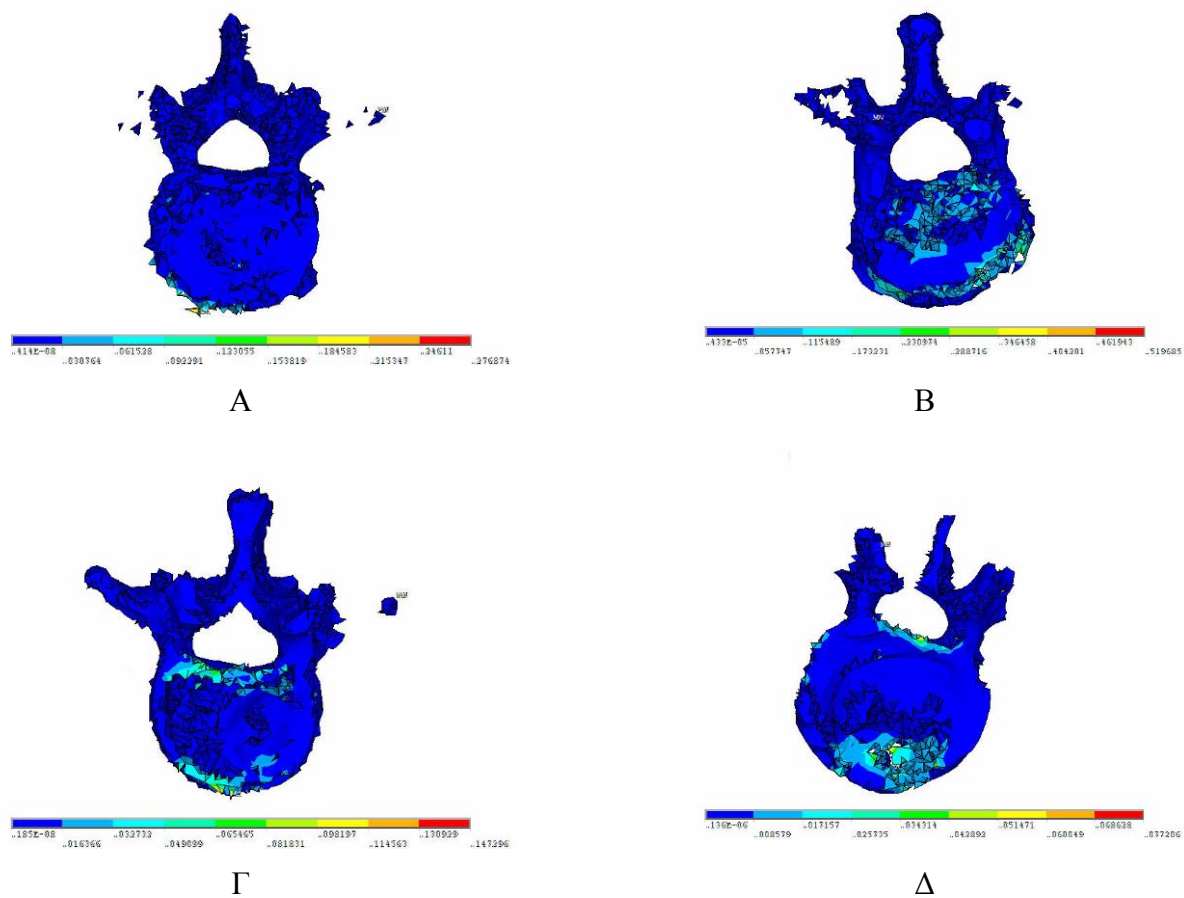
Η απόδοση των υλικών έδωσε πολύ μεγάλες ποσότητες υλικού 1 και 2 σε κάθε σπόνδυλο. Μέχρι τώρα, στην παρούσα διπλωματική εργασία,, μετρούνται σε αυτά τα υλικά τάσεις

και παραμορφώσεις. Όπως γνωρίζουμε το υλικό 1 αντιπροσωπεύει το κενό, συνεπώς θα μπορούσε να αφαιρεθεί από τη διαδικασία επισκόπησης των αποτελεσμάτων

Ακολουθεί η κατανομή της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises των υλικών 2 – 9 σε κάτοψη για τους δύο τύπους φόρτισης. (Σχήμα 7.18) (Σχήμα 7.19)



Σχήμα 7.18 Η κατανομή της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου χωρίς το πρώτο υλικό σε κάτοψη, (Α) Του υγιούς σπονδύλου , (Β) Του Ασθενή 1 , (Γ) Του Ασθενή 2 , (Δ) Του Ασθενή 3

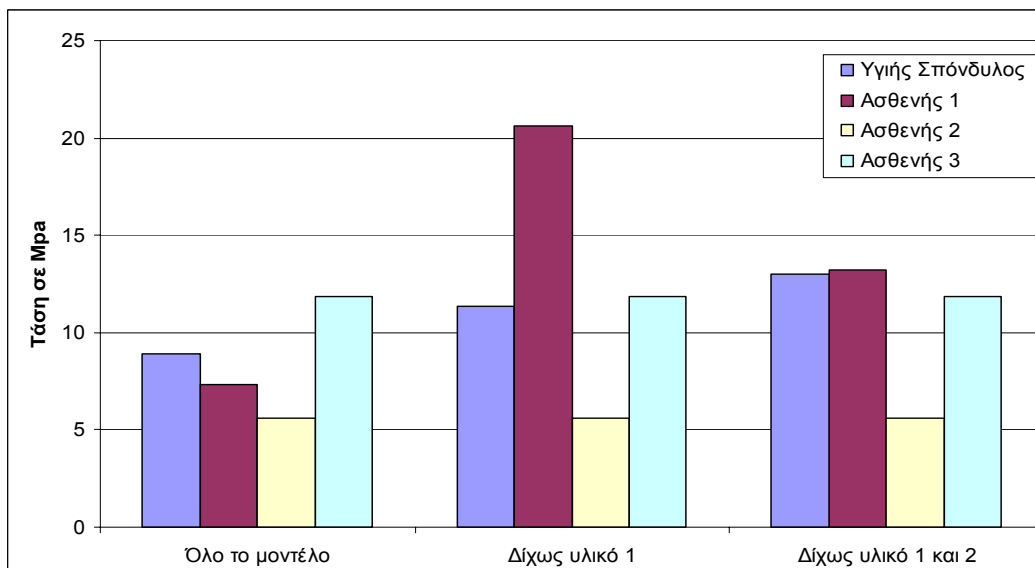


Σχήμα 7.19 Η κατανομή της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου χωρίς το πρώτο υλικό σε κάτοψη, (Α) Του υγιούς σπονδύλου , (Β) Του Ασθενή 1 , (Γ) Του Ασθενή 2 , (Δ) Του Ασθενή 3

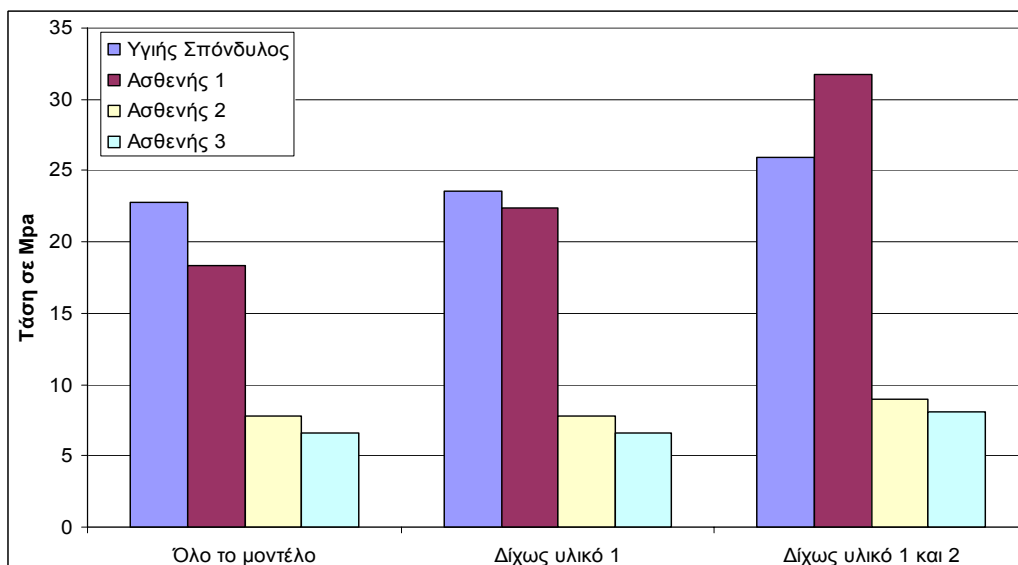
Έπειτα από την γραφική αφαίρεση του πρώτου υλικού από την διαδικασία επισκόπησης των αποτελεσμάτων οι παραμορφώσεις παραμένουν τοπολογικά στις ίδιες περιοχές. Με την αφαίρεση του πρώτου υλικού περιορίστηκε το φαινόμενο συγκέντρωσης των παραμορφώσεων στα όρια του σπονδυλικού σώματος όπου βλέπαμε όταν είχαμε ολόκληρο το μοντέλο. Οι παρακάτω παρατηρήσεις ισχύουν και για τις δύο φορτίσεις. Στον υγιή σπόνδυλο οι παραμορφώσεις ισοκατανέμονται σε όλο τον όγκο του σπονδυλικού σώματος. Ο σπόνδυλος του ασθενή 1 συγκεντρώνει λόγω γεωμετρίας τις παραμορφώσεις στην εμπρόσθια αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Ο σπόνδυλος του ασθενή 2 συγκεντρώνει τις παραμορφώσεις στην πάνω επιφυσιακή πλάκα του σπονδυλικού σώματος φαινόμενο που εμφανίζεται και στο σπόνδυλο του ασθενή 3.

Το υλικό 2 έχει και αυτό πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας. Με το ίδιο σκεπτικό που αφαιρέθηκε το υλικό 1 μπορεί να αφαιρεθεί και το υλικό 2.

Ακολουθούν τα διαγράμματα που δείχνουν τις μέγιστες τιμές τάσεων των τεσσάρων σπονδύλων για ολόκληρο το μοντέλο, για τα υλικά 2-9 και για τα υλικά 3-9.(Σχήμα 7.20) (Σχήμα 7.21)



Σχήμα 7.20 Η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στους τέσσερις σπονδύλους κατά την θλίψη σε όλα τα υλικά, από 2-9 και από 3-9



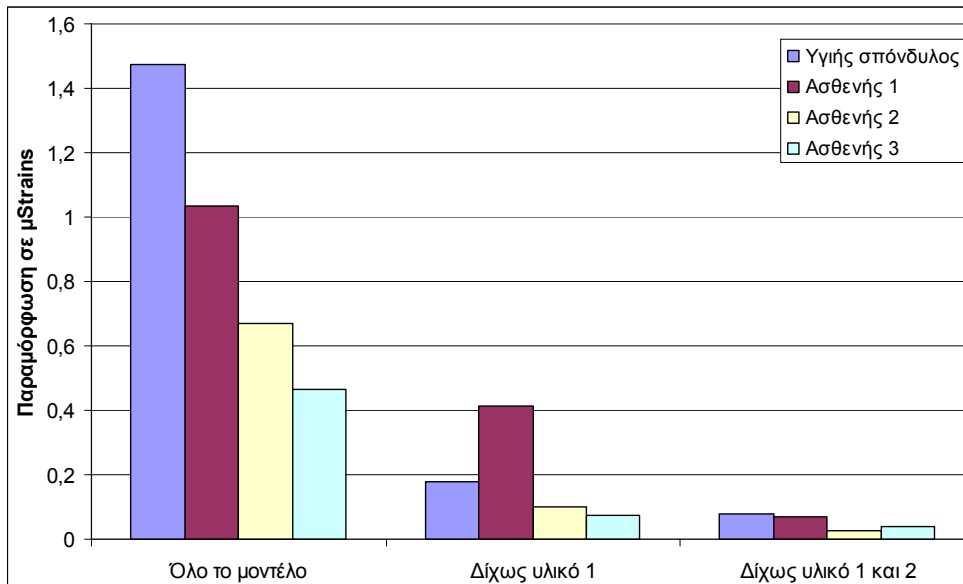
Σχήμα 7.21 Η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στους τέσσερις σπονδύλους κατά την κάμψη σε όλα τα υλικά, από 2-9 και από 3-9

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των τάσεων στα τέσσερα μοντέλα όταν μελετάται ολόκληρος ο σπόνδυλος.

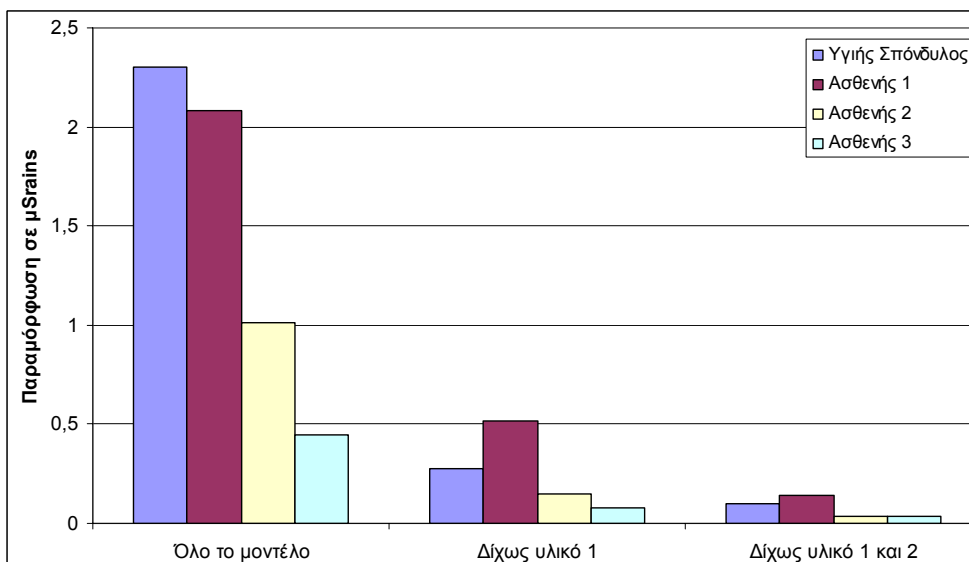
Στην περίπτωση λοιπόν της θλίψης μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών οι τάσεις ακολουθούν την κατάταξη σκληρότητας με μόνη διαφορά την τιμή της ισοδύναμης τάσης

που εμφανίζεται στον σπόνδυλο του ασθενή 3 (Σχήμα 7.20). Στην περίπτωση της κάμψης μάλιστα μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού ακολουθείται από την τάση ακριβώς η κατά σκληρότητα κατάταξη. (Σχήμα 7.21)

Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για την παραμόρφωση. (Σχήμα 7.22) (Σχήμα 7.23)



Σχήμα 7.22 Η μέγιστη παραμόρφωση που εμφανίζεται στους τέσσερεις σπονδύλους κατά την θλίψη σε όλα τα υλικά, από 2-9 και από 3-9



Σχήμα 7.23 Η μέγιστη παραμόρφωση που εμφανίζεται στους τέσσερεις σπονδύλους κατά την κάμψη σε όλα τα υλικά, από 2-9 και από 3-9

Οι τιμές των παραμορφώσεων μειώνονται μετά την αφαίρεση των υλικών 1 και 2. Στις δύο περιπτώσεις της θλίψης και της κάμψης, μετά την αφαίρεση του υλικού 1,

παρατηρείται ξανά το ίδιο, γνωστό πλέον, φαινόμενο της κατάταξης κατά σκληρότητα που ακολουθούν οι τιμές των ισοδύναμων παραμορφώσεων των τεσσάρων σπονδύλων. (Σχήμα 7.22) (Σχήμα 7.23)

**Κεφάλαιο 8ο ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΤΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕ ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΟΥΣ
ΔΙΣΚΟΥΣ**

8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιούνται τα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για τον υγιή σπόνδυλο και τους τρεις καταγματικούς με τη χρήση μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πάνω και στην κάτω επιφυσιακή πλάκα του σπονδυλικού σώματος κάθε σπονδύλου.

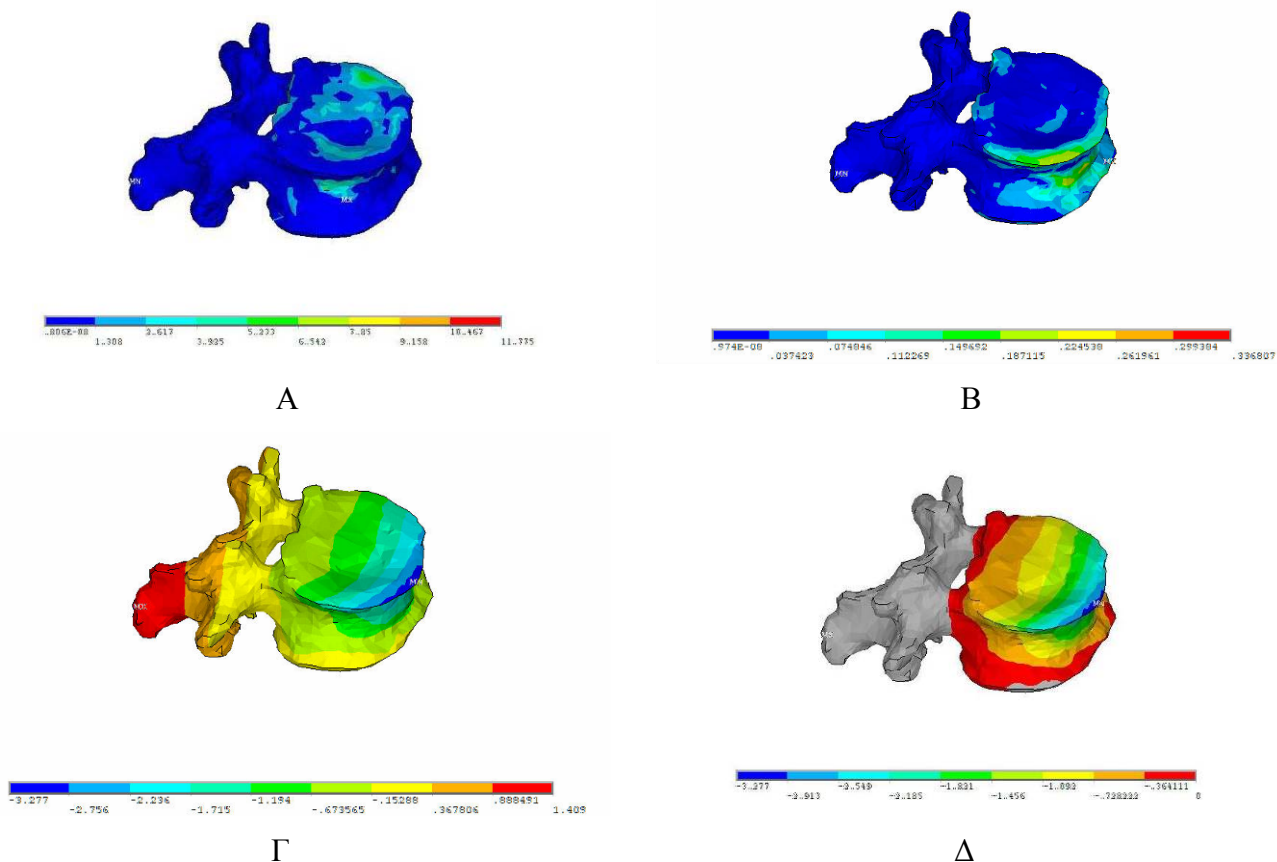
Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο μετά την επίλυση των μοντέλων στο Ansys εξετάζονται οι ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κατά Von Mises και η μετατόπιση κατά τον άξονα z.

8.2 Υγιής Σπόνδυλος

Έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο την γεωμετρία του υγιούς σπονδύλου, το ποσοστό των υλικών που τον απαρτίζουν αλλά και την τοπολογία αυτών. Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις τρεις μορφές φόρτισης.

8.2.1 Θλίψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής θλιπτικού φορτίου στον υγιή σπόνδυλο. (Σχήμα 8.1)



Σχήμα 8.1 Η κατανομή (A) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (B) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z, (Δ) της μετατόπισης κατά Z με αρνητικές τιμές για τον υγιή σπόνδυλο έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου

Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στον αριστερό αυχένα του σπονδυλικού τόξου ενώ εμφανίζεται επίσης συγκέντρωση τάσεων στην δεξιά εμπρόσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος.

Η μέγιστη παραμόρφωση βρίσκεται στη δεξιά μεριά της άνω επιφυσιακής πλάκας του σπονδυλικού σώματος. Στο ίδια αυτή περιοχή παρατηρείται και η μέγιστη μετατόπιση. Επίσης εμφανίζονται έντονες παραμορφώσεις και στην δεξιά εμπρόσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος.

Ακολουθεί ο πίνακας που συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές για την τάση, την παραμόρφωση και τη μετατόπιση ανά υλικό: (Πίνακας 8.1)

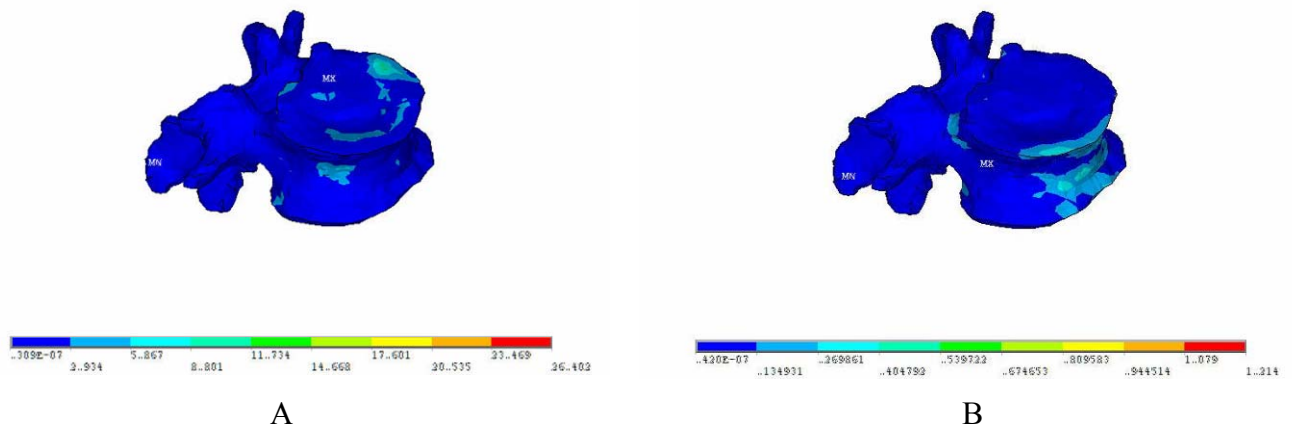
Πίνακας 8.1 Πίνακας αποτελεσμάτων του υγιούς σπονδύλου κατά την θλιπτική καταπόνηση

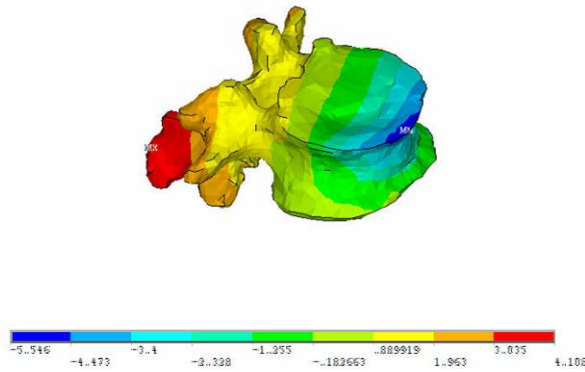
Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,277	5,782	11,305	19,705	20,9	27,291	20,15	23,247	19,741
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	336800	143700	79300	64500	31200	26400	9200	8900	4700
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-3,27	-3,15	-2,53	-2,45	-2,32	-2,23	-1,85	-1,28	1,04

Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στα υλικά 6 και 8. Οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα υλικά 1 και 2 και η μικρότερη παραμόρφωση στο υλικό 9. Οι αρνητικές τιμές της μετατόπισης εμφανίζονται μεγάλες καθώς σε αυτές έχει συνυπολογισθεί και η μετατόπιση του μεσοσπονδύλιου δίσκου.

8.2.2 Κάμψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής του καμπτικού φορτίου στον υγίή σπόνδυλο. (Σχήμα 8.2)





Γ

Σχήμα 8.2: Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον υγιή σπόνδυλο έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου

Τοπολογικά οι συγκεντρώσεις των τάσεων και των παραμορφώσεων εμφανίζονται στα ίδια σημεία με αυτά της θλίψης.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης κατά τον άξονα z ανά υλικό. (Πίνακας 8.2)

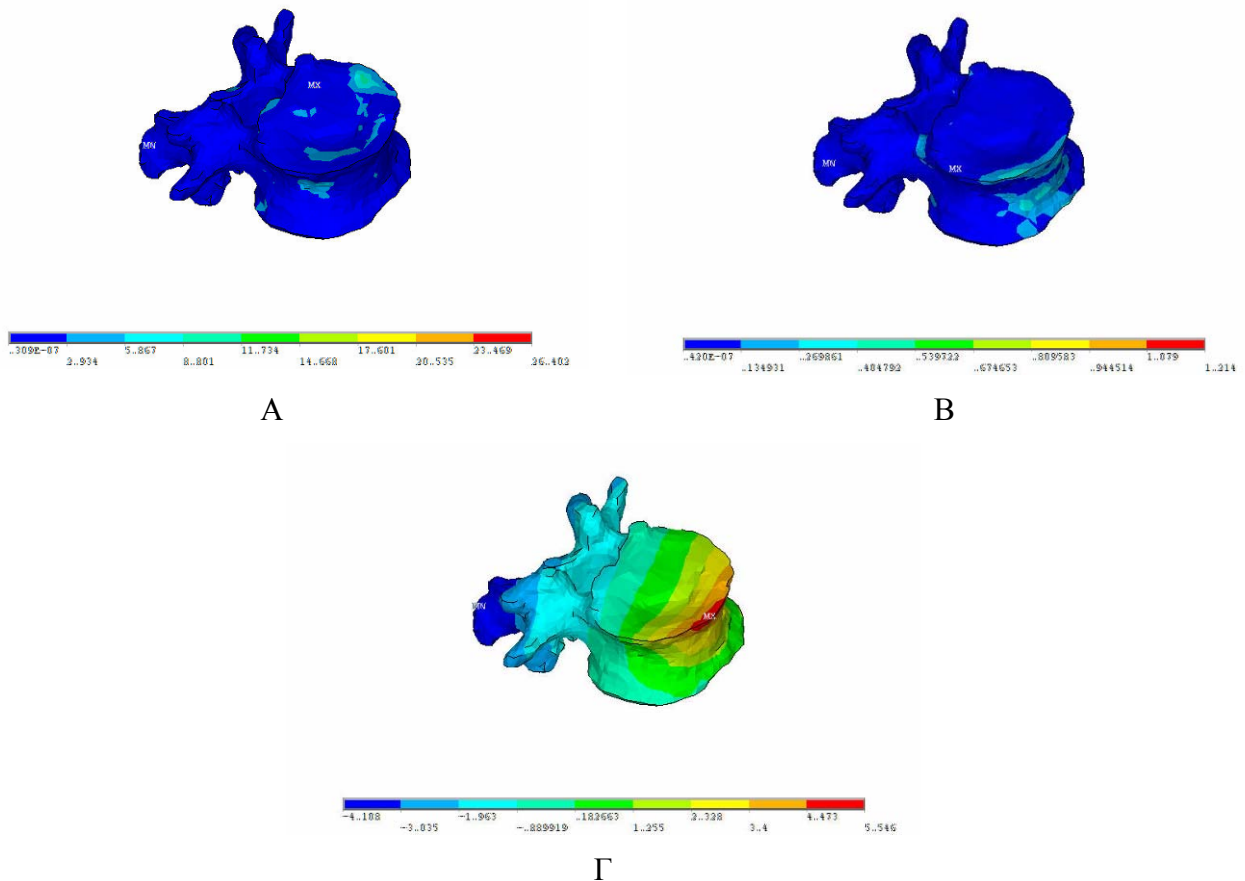
Πίνακας 8.2 Πίνακας αποτελεσμάτων του υγιούς σπονδύλου κατά την καμπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,460	10,940	36,720	34,010	30,444	32,199	35,990	40,498	37,833
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	1214000	222000	205000	103500	39000	38000	24000	12000	5000
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-5,54	-5,30	-4,25	-4,12	-4,00	-3,80	3,50	3,35	3,31

Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο υλικό 8 και οι τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της θλίψης. Οι μέγιστες μετατοπίσεις κάθε υλικού είναι μεγαλύτερες αυτών της θλίψης.

8.2.3 Έκταση

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής του εκτατικού φορτίου στον υγιή σπόνδυλο: (Σχήμα 8.3)



Σχήμα 8.3 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον υγίή σπόνδυλο έπειτα από την επιβολή εκτατικού φορτίου,

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 8.3)

Πίνακας 8.3 Πίνακας αποτελεσμάτων του υγιούς σπονδύλου κατά την εκτατική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,461	10,939	36,726	34,019	30,444	32,199	35,991	40,498	37,833
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	1214000	222000	205000	103500	39000	38000	24000	12000	5000
Μετατόπιση κατά Z (mm)	5,54	5,30	4,25	4,12	4,00	3,80	-3,50	-3,35	-3,20

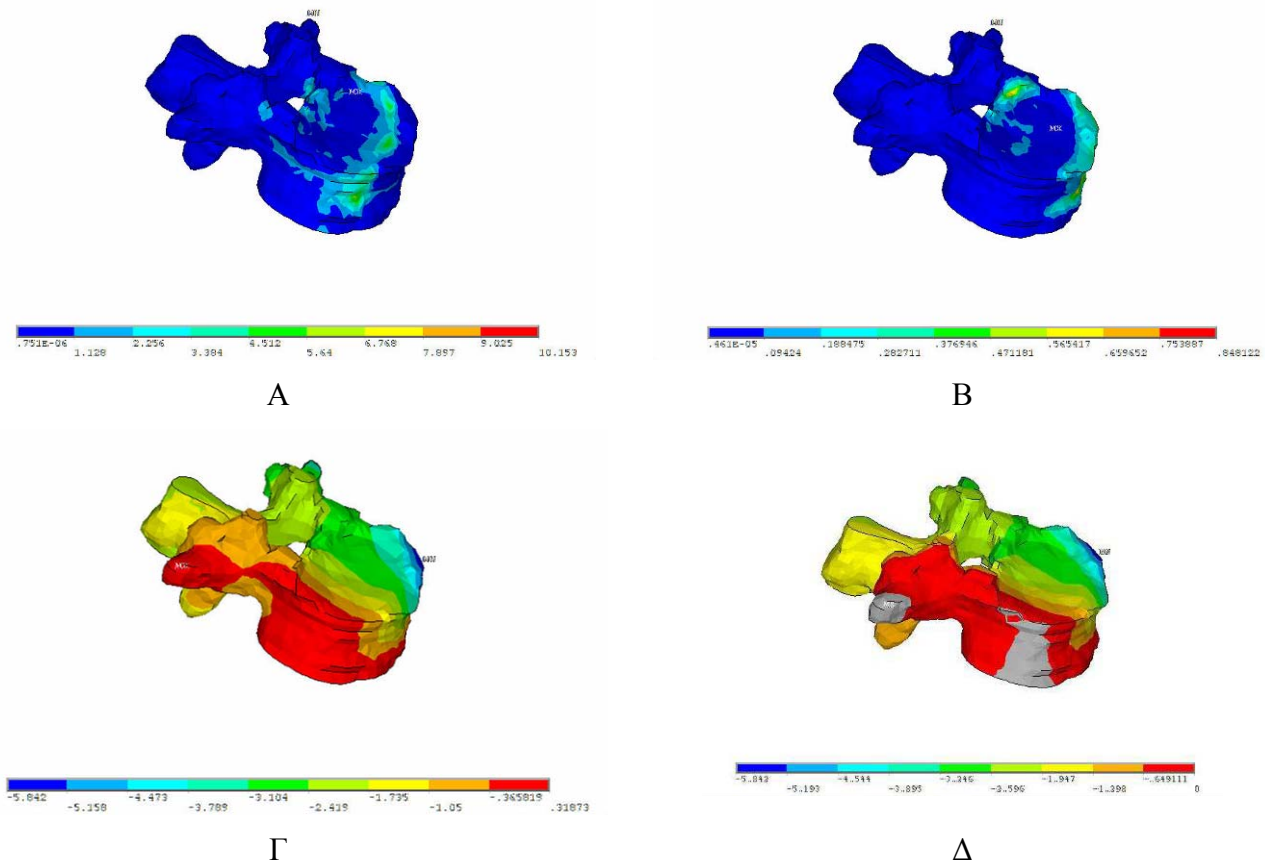
Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο κατά την εξέταση της έκτασης στον υγίή σπόνδυλο εξήχθησαν τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα με αυτά της κάμψης. Από αυτό το σημείο και έπειτα όσο μελετούνται τα μοντέλα χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο δεν θα αναφερθεί ξανά η έκταση καθώς δεν έχει ιδιαίτερη αξία.

8.3 Ασθενής 1

Όμοια με την προηγούμενη παράγραφο θα αναλυθεί η συμπεριφορά του σπονδύλου του ασθενή 1, ο οποίος παρουσιάζει κάταγμα βαθμού 1 (ήπιο) κάταγμα, σε θλίψη και κάμψη.

8.3.1 Θλίψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής θλιπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 1. (Σχήμα 8.4)



Σχήμα 8.4 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z, (Δ) της μετατόπισης κατά Z με αρνητικές τιμές για τον σπόνδυλο του Ασθενή 1 έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου

Σε αντίθεση με τη θλίψη του υγιούς σπονδύλου εδώ οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στο σώμα του σπονδύλου και όχι στον αυχένα. Επίσης παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων στην άνω επιφυσιακή πλάκα του σπονδυλικού σώματος. Το ίδιο παρατηρούμε και για τις παραμορφώσεις με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας του σπονδυλικού σώματος κοντά στο τρήμα ενώ να εμφανίζεται μεγάλη συγκέντρωση και στην εμπρόσθια αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Η μετατόπιση κατά την αρνητική φορά του άξονα Z εμφανίζεται σε όλο το σπόνδυλο εκτός από την δεξιά εγκάρσια πλευρική γλήνη και ένα μέρος της δεξιά πλευράς του

σπονδυλικού σώματος, γεγονός που οφείλεται στην ασυμμετρία του σπονδύλου του ασθενή 1.

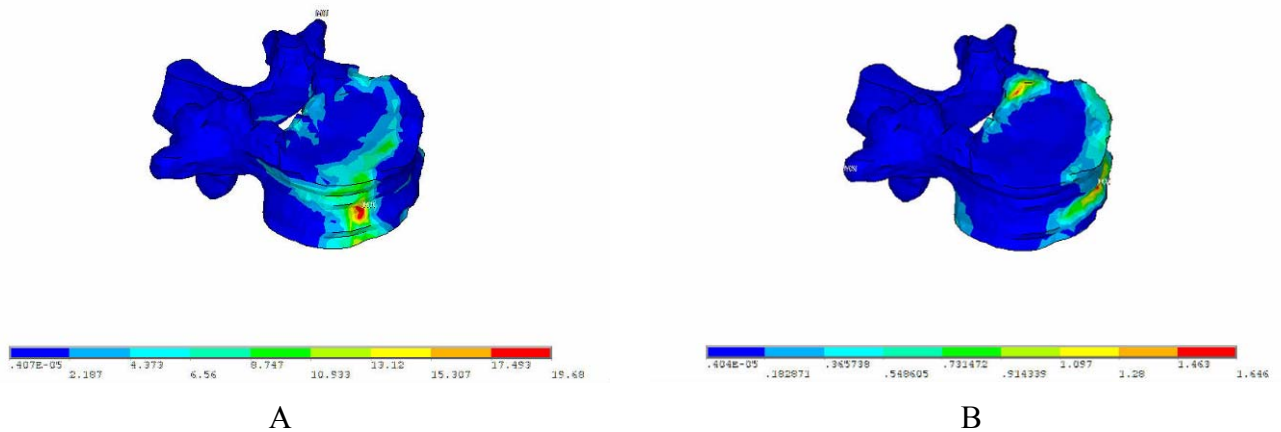
Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 8.4)

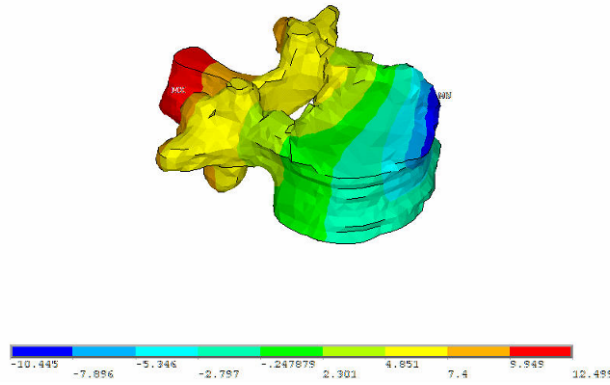
Πίνακας 8.4 Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 1 κατά τη θλιπτική καταπόνηση									
Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,750	19,757	17,703	9,805	12,374	8,482	3,443	3,622	-
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	867000	390000	99000	34000	12000	7000	2000	1000	-
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-5,84	-3,4	-3,45	-3,30	-2,62	-2,35	-2,20	-1,05	-

Από τον πίνακα μπορεί να παρατηρηθεί πως οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται σε αρχικά υλικά και πιο συγκεκριμένα στο 2 και στο 3 φαινόμενο το οποίο εξηγήθηκε στην αντίστοιχη παράγραφο του προηγούμενου κεφαλαίου.

8.3.2 Κάμψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής καμπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 1. (Σχήμα 8.5)





Γ

Σχήμα 8.5 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον σπόνδυλο του Ασθενή 1 έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου κατά Z

Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στη δεξιά εμπρόσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις εμφανίζονται στην εμπρόσθια και αριστερή πλευρά της περιφέρειας του σπονδυλικού σώματος. Ακόμα, παρατηρούνται παραμορφώσεις στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας κοντά στο τρήμα.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 8.5)

Πίνακας 8.5 Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 1 κατά τη καμπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	1,469	19,270	34,922	24,552	34,216	20,265	6,155	3,372	-
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	1654000	504000	160000	78000	35000	25000	4000	1000	-
Μετατόπιση κατά Z (mm)	12,49	11,96	12,00	12,11	10,91	10,83	8,41	5,49	-

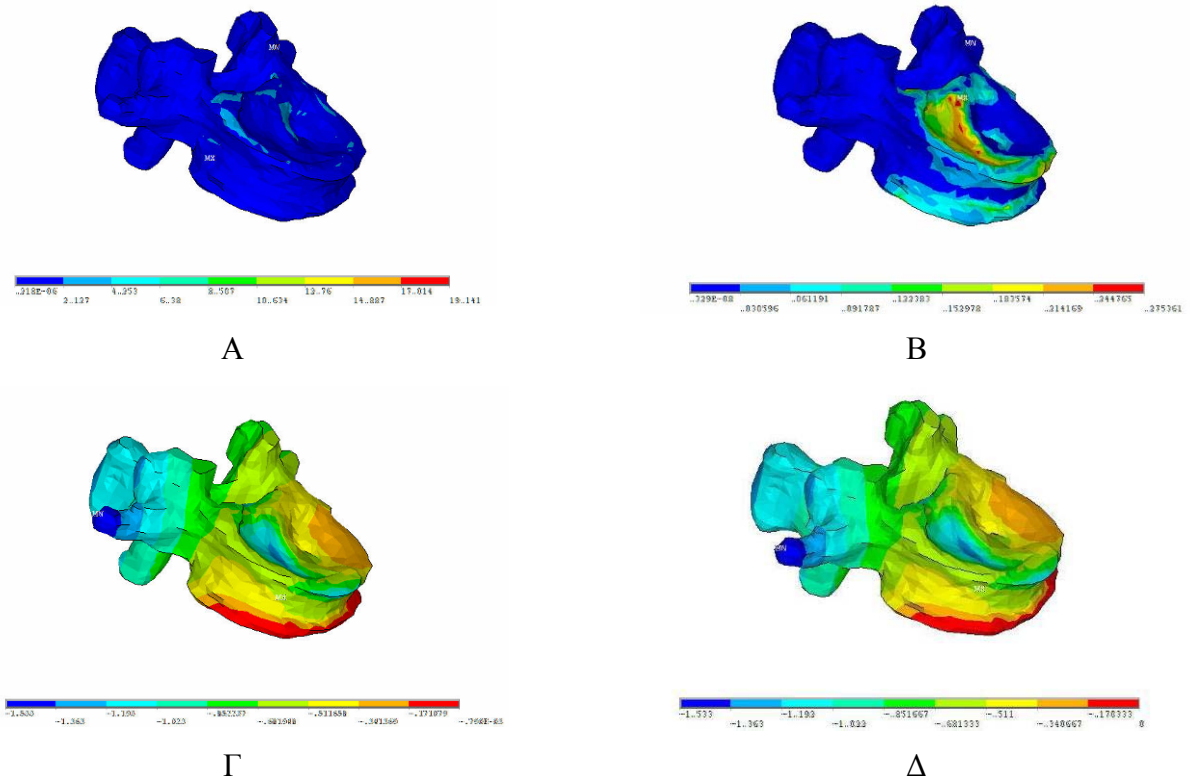
Οι μέγιστες τάσεις μετατοπίστηκαν στα υλικά 3 και 5 από τα υλικά 2 και 3 που εμφανίστηκαν στην περίπτωση της θλίψης. Ακόμα παρατηρείται, ξανά, ότι οι τάσεις αλλά και οι παραμορφώσεις έχουν μεγαλύτερες τιμές από αυτές της θλίψης, όπως συνέβη και στον υγιή σπόνδυλο.

8.4 Ασθενής 2

Όμοια με την προηγούμενη παράγραφο θα αναλύθει η συμπεριφορά του καταγματικού σπονδύλου του ασθενή 2 σε θλίψη και κάμψη.

8.4.1 Θλίψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής θλιπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 2. (Σχήμα 8.6)



Σχήμα 8.6 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z, (Δ) μετατόπισης κατά Z με αρνητικές τιμές για τον σπόνδυλο του Ασθενή 2 έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου

Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην δεξιά οπίσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι και εδώ η μεταβαλλόμενη γεωμετρία της άνω επιφυσιακής πλάκας έχει δημιουργήσει επιφάνειες όπου έχουμε φαινόμενα συσσώρευσης τάσεων και παραμορφώσεων. Ακόμα παρατηρούνται παραμορφώσεις και στην περιφέρεια τόσο της άνω, όσο και της κάτω επιφυσιακής πλάκας.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 8.6)

Πίνακας 8.6 Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 2 κατά τη θλιπτική καταπόνηση

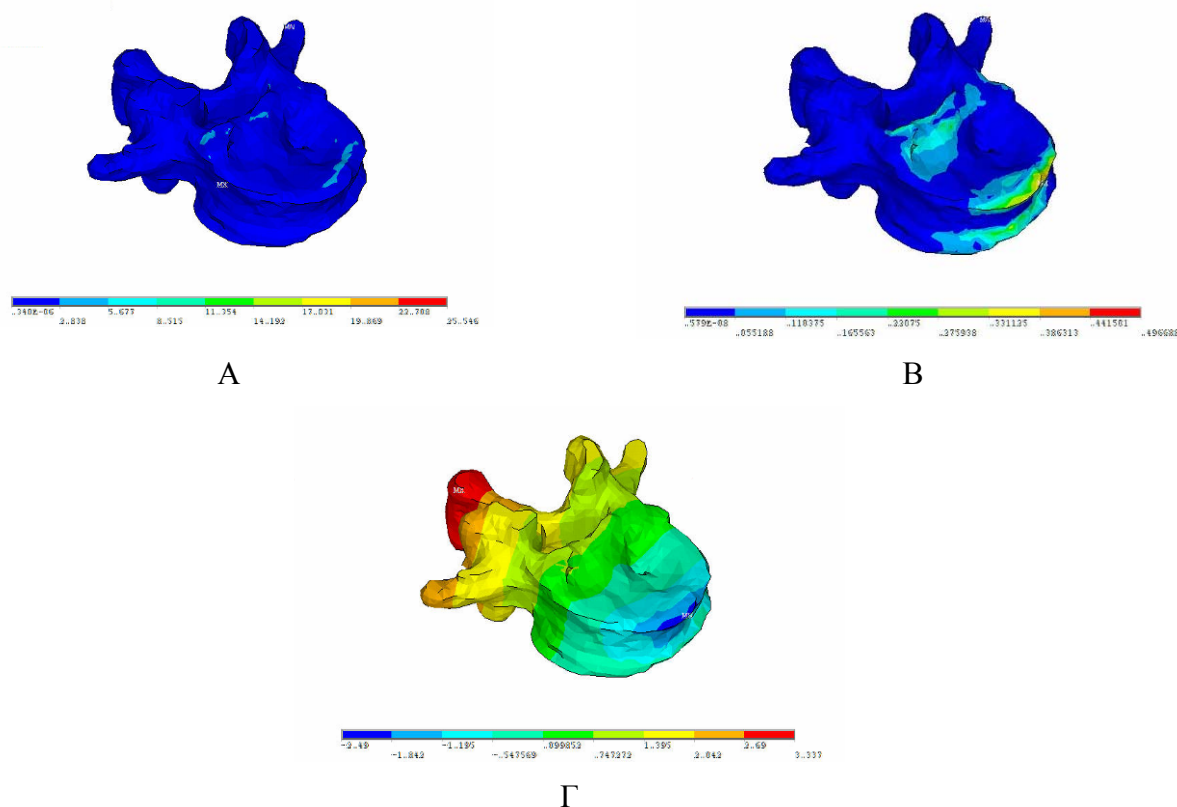
Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,294	8,806	24,700	31,768	9,632	9,272	4,787	0,827	-
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	432000	233000	156000	134000	28000	9000	3000	200	-

Μετατόπιση κατά Z (mm)	-1,53	-1,52	-1,51	-1,51	-1,49	-0,90	-0,87	-0,78	-
------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---

Η περιοχή των υλικών που εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις είναι τα υλικά 3 & 4.

8.4.2 Κάμψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής καμπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 2. Τα μεγέθη που εξετάζονται είναι η τάση και η παραμόρφωση κατά Von Mises και η κατά Z μετατόπιση.



Σχήμα 8.7 Η κατανομή (A) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (B) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον σπόνδυλο του Ασθενή 2 έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου

Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην δεξιά οπίσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Οι μέγιστες παραμορφώσεις παρατηρούνται στην περιφέρεια τόσο της άνω, όσο και της κάτω επιφυσιακής πλάκας αλλά και στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας κοντά στο τρήμα.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 8.7)

Πίνακας 8.7 Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 2 κατά τη καμπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,410	11,340	32,399	42,570	12,770	10,538	5,028	0,932	-
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	496000	301000	203000	180000	21000	11000	4000	400	-
Μετατόπιση κατά Z (mm)	3,337	3,218	3,166	3,102	2,463	1,861	1,815	1,55	-

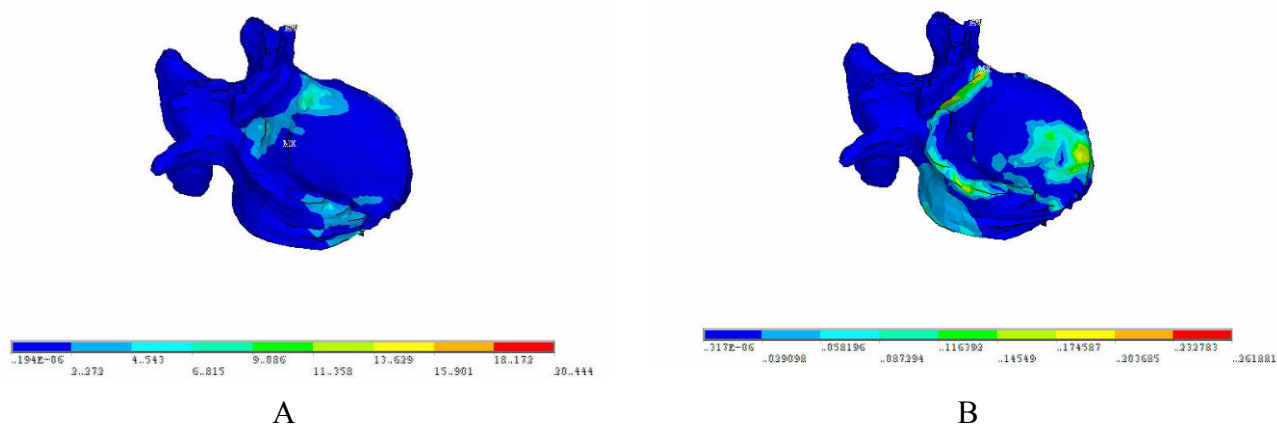
Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στα ίδια υλικά με αυτά στα οποία εμφανίστηκαν στη προηγούμενη παράγραφο της θλιπτικής καταπόνησης του ασθενή 2, δηλαδή τα υλικά 3 και 4. Ακόμα παρατηρείται, ξανά, ότι οι τάσεις αλλά και οι παραμορφώσεις έχουν μεγαλύτερες τιμές από αυτές της θλίψης, όπως συνέβη και στον υγιή σπόνδυλο.

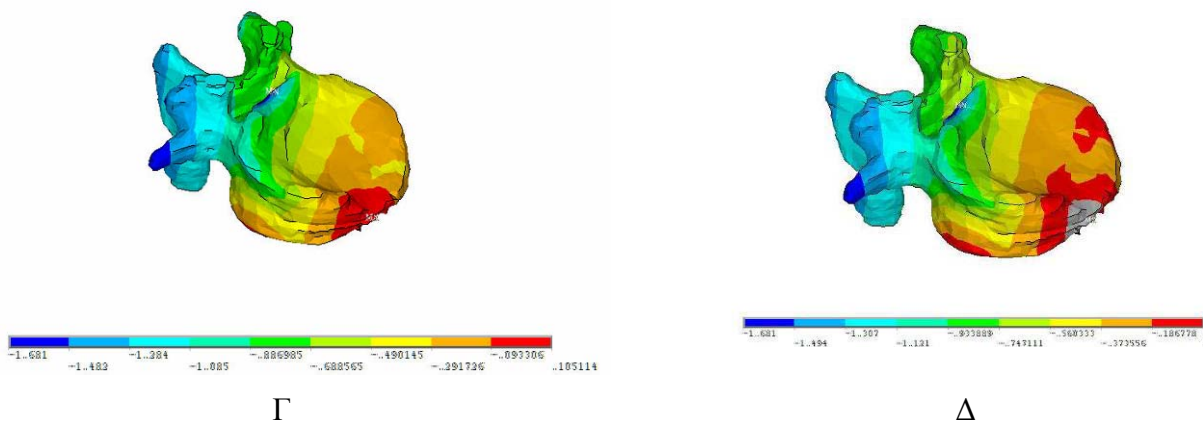
8.5 Ασθενής 3

Όμοια με την προηγούμενη παράγραφο θα αναλύθει η συμπεριφορά του σπονδύλου του ασθενή 3, ο οποίος παρουσιάζει κάταγμα βαθμού 3 (σοβαρό), σε θλίψη και κάμψη

8.5.1 Θλίψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής θλιπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 3. (Σχήμα 8.8)





Σχήμα 8.8 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z, (Δ) μετατόπισης κατά Z με αρνητικές τιμές για τον σπόνδυλο του Ασθενή 3 έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου

Οι μέγιστες τάσεις και οι παραμορφώσεις εμφανίζονται στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας κοντά στο τρήμα όπως επίσης εμφανίζονται παραμορφώσεις και στη μπροστά δεξιά πλευρά της κάτω επιφυσιακής πλάκας αλλά και στην οπίσθια δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό.(Πίνακας 8.8)

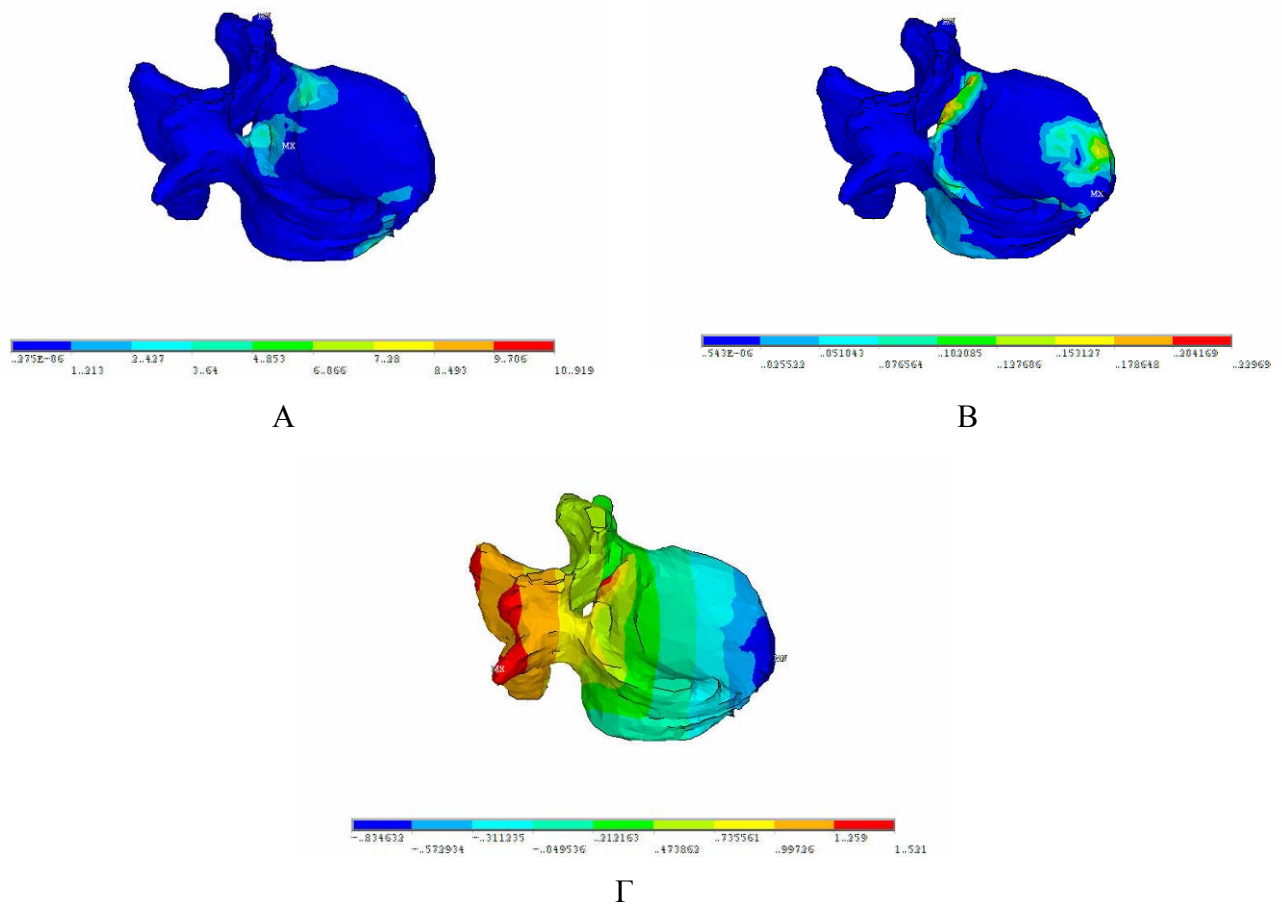
Πίνακας 8.8 Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 3 κατά τη θλιπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,304	9,634	27,434	34,876	24,015	28,701	43,224	20,898	36,627
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	341000	137000	113000	174000	28000	22000	43000	15000	14000
Μετατόπιση κατά Z (mm)	-1,68	-1,48	-1,47	-1,46	-1,36	-1,28	-1,27	-1,14	-1,04

Η μέγιστες τιμές των τάσεων εμφανίζονται στα υλικά 7 και 9

8.5.2 Κάμψη

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της επιβολής καμπτικού φορτίου στον σπόνδυλο του ασθενή 3. (Σχήμα 8.9)



Σχήμα 8.9 Η κατανομή (Α) της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, (Β) της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises, (Γ) της μετατόπιση κατά Z για τον σπόνδυλο του Ασθενή 3 έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου

Οι μέγιστες τάσεις και οι παραμορφώσεις εμφανίζονται όπως και στην περίπτωση της θλίψης στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας κοντά στο τρήμα όπως επίσης εμφανίζονται παραμορφώσεις και στη μπροστά δεξιά πλευρά της κάτω επιφυσιακής πλάκας.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου συγκεντρώνει τις μέγιστες τιμές της τάσης της παραμόρφωσης και της μετατόπισης Z ανά υλικό. (Πίνακας 8.9)

Πίνακας 8.9 Πίνακας αποτελεσμάτων του σπονδύλου του ασθενή 3 κατά τη καμπτική καταπόνηση

Υλικό	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Μέγιστη τάση (Mpa)	0,260	7,313	21,423	18,317	14,832	22,878	29,076	15,045	21,258
Μέγιστη Παραμόρφωση (μStrains)	296000	129000	89000	92000	18000	18000	34000	8000	8000
Μετατόπιση κατά Z (mm)	1,52	1,39	1,38	1,36	1,26	1,17	1,16	1,00	0,89

Στο συγκεκριμένο σπόνδυλο παρατηρείται πως οι μέγιστες τιμές των τάσεων που εμφανίζονται κατά την κάμψη είναι μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται κατά τη θλίψη και πως οι παραμορφώσεις σε αυτές τις δύο καταπονήσεις είναι περίπου ίδιες. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγάλου βαθμού κατάγματος που έχει υποστεί ο σπόνδυλος και έχει ως αποτέλεσμα η θλίψη να καταπονεί εξ ίσου αν όχι και περισσότερο το σπόνδυλο απ' ότι η κάμψη.

8.6 Γενικά Συμπεράσματα από την Μεταξύ των Φορτίσεων Σύγκριση

Στην παράγραφο αυτή συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα τα οποία έχουν εξαχθεί μέχρι τώρα στο τρέχον κεφάλαιο. Σημειώνουμε πως καταλήξαμε στα ίδια συμπεράσματα με αυτά του προηγούμενου κεφαλαίου και πως τα παραθέτουμε ξανά εδώ για λόγους εποπτείας.

Η κάμψη και η έκταση είναι σχεδόν ταυτόσημες καταπονήσεις

Σε κάθε σπόνδυλο η μέγιστη τάση εμφανίζεται σε διαφορετικό υλικό και έχει σχέση με το ποιο υλικό βρίσκεται στο σημείο όπου συσσωρεύονται οι τάσεις λόγω γεωμετρίας αλλά και της τοπολογίας των υλικών μέσα στο σπόνδυλο.

Η κάμψη καταπονεί περισσότερο έναν υγίη και ελαφρώς καταγματικό σπόνδυλο απ' ότι η θλίψη φαινόμενο που φαίνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων τόσο των τάσεων όσο και των παραμορφώσεων

Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κατάγματος ενός σπονδύλου τόσο πιο μικρή είναι η διαφορά των μέγιστων τιμών των μηχανικών μεγεθών μεταξύ θλίψης και κάμψης. Στους πρώτους δύο σπονδύλους η κάμψη καταπονεί περισσότερο από τη θλίψη, στον τρίτο οι δύο φορτίσεις τον καταπονούν εξ ίσου ενώ στον τέταρτο (με το μεγαλύτερο βαθμό κατάγματος) συμβαίνει το αντίθετο και η θλίψη καταπονεί περισσότερο από την κάμψη.

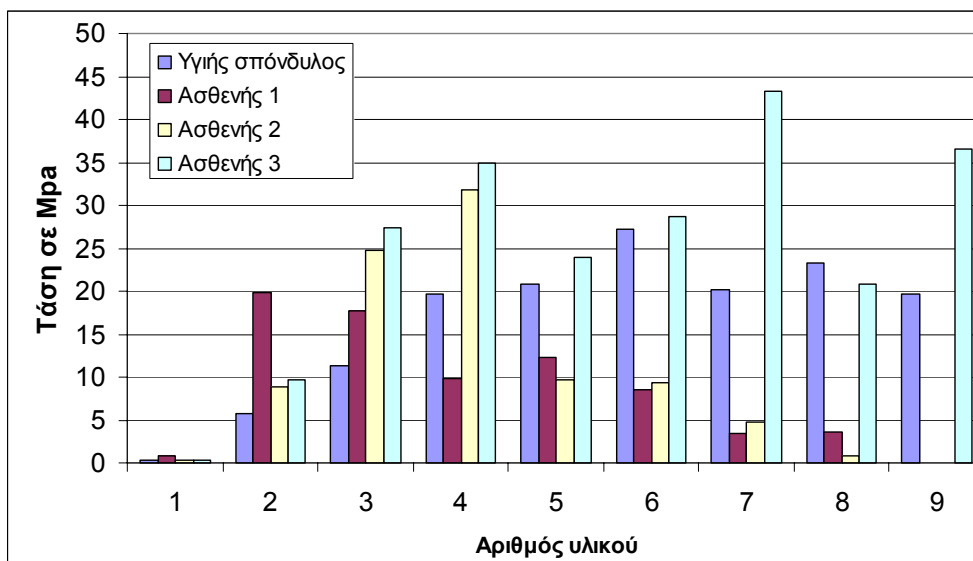
Στους καταγματικούς σπονδύλους παρατηρείται πως οι άνω επιφυσιακές πλάκες στο κάθε μοντέλο έχουν έντονες διαφορές στην γεωμετρία τους σε σχέση με την άνω επιφυσιακή πλάκα ενός υγιούς σπονδύλου. Έτσι έχουν δημιουργηθεί απότομες κλίσεις όπως επίσης και κοιλότητες στις οποίες συσσωρεύονται τάσεις και παραμορφώσεις. Οι κλίσεις αυτές είναι μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κατάγματος, συνεπώς και η συγκέντρωση των τάσεων και των παραμορφώσεων στις περιοχές αυτές είναι εντονότερη. Ακόμα παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων στο πίσω μέρος της άνω επιφυσιακής πλάκας κοντά στο τρήμα. Ανατομικά αυτή η περιοχή φαίνεται να συγκρατεί το σπονδυλικό σώμα.

8.7 Σύγκριση των Σπονδύλων Μεταξύ τους

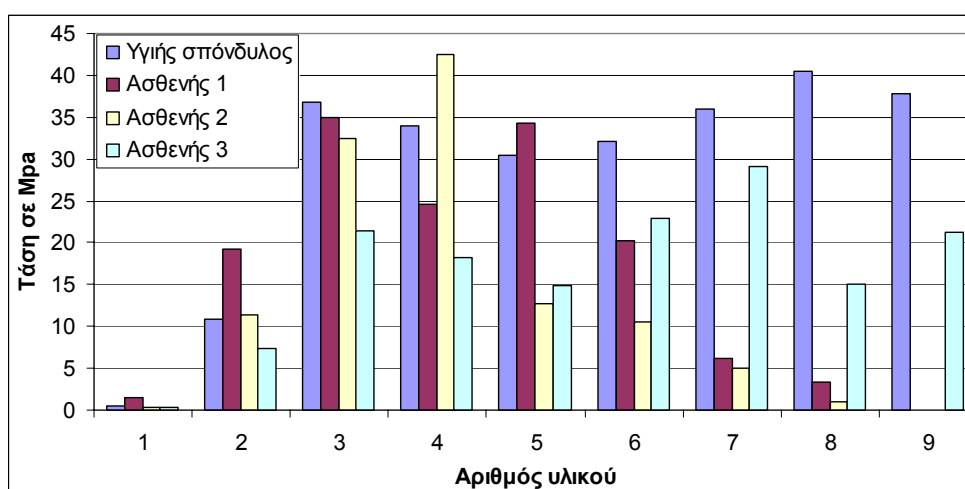
Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των τεσσάρων διαφορετικών σπονδύλων και εξάγονται συμπεράσματα για το πως συμπεριφέροντε οι καταγματικοί σπόνδυλοι σε μία ίδιου τύπου καταπόνηση σε σχέση με τον υγιή.

8.7.1 Σύγκριση των μέγιστων Τάσεων & Παραμορφώσεων ανά Υλικό

Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα των μέγιστων τάσεων που εμφανίζονται σε κάθε υλικό των τεσσάρων σπονδύλων σε θλιπτική καταπόνηση: (Σχήμα 8.10)



Σχήμα 8.10 Οι μέγιστες τάσεις ανά υλικό στους τέσσερεις σπονδύλους κατά την θλίψη. Ακόμα, ακολουθεί το διάγραμμα των μέγιστων τάσεων που εμφανίζονται σε κάθε υλικό των τεσσάρων σπονδύλων σε καμπτική καταπόνηση. (Σχήμα 8.13)



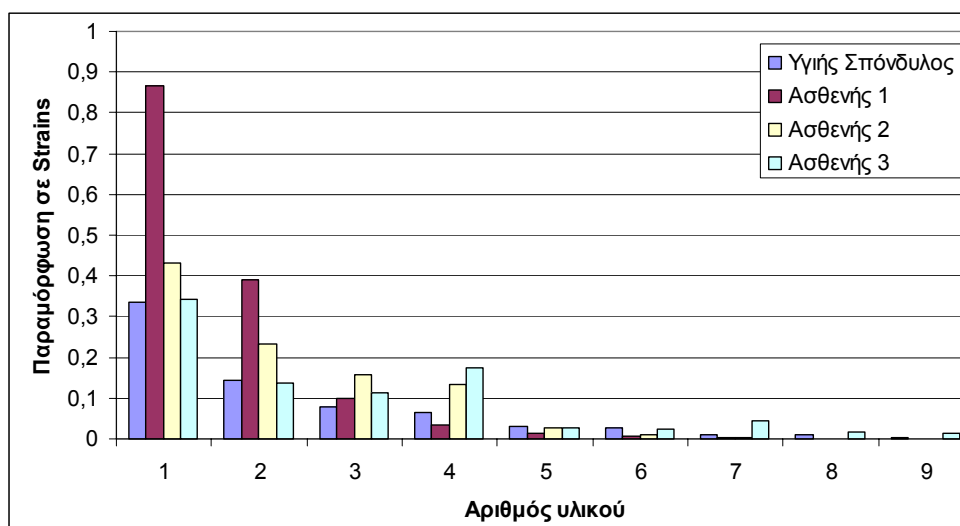
Σχήμα 8.11 Οι μέγιστες τάσεις ανά υλικό στους τέσσερεις σπονδύλους κατά την κάμψη. Από τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 8.10) (Σχήμα 8.11) φαίνεται πως ο κάθε σπόνδυλος έχει τη δική του ξεχωριστή κατανομή των τάσεων στα υλικά του. Ο υγιής

σπόνδυλος καταπονεί περισσότερο τα υλικά 6 & 8 στη θλίψη και 8 & 9 στην κάμψη. Αντίστοιχα ο σπόνδυλος του ασθενή 1 καταπονεί τα υλικά 2 & 3 στη θλίψη και 3 & 5 στην κάμψη. Η συμπεριφορά του σπονδύλου του ασθενή 2 είναι ίδια και στη θλίψη και στην κάμψη όπου οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στα υλικά 3 & 4 ενώ ο σπόνδυλος του ασθενή 4 εμφανίζει τις μέγιστες τάσεις στα υλικά 4,7 & 9 στη θλίψη και στα υλικά 6 & 7 στην κάμψη.

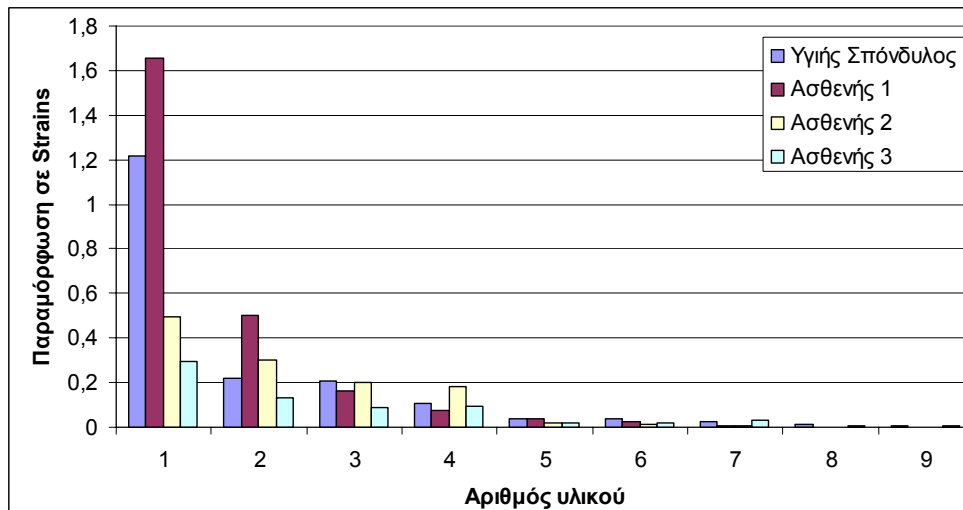
Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ίδια με αυτά του προηγούμενου κεφαλαίου κατά τη θλίψη και την κάμψη των μοντέλων χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους. Πολύ επιγραμματικά αναφέρονται παρακάτω τα κοινά για τις δύο περιπτώσεις συμπεράσματα..

Ο κάθε σπόνδυλος έχει την δική του ξεχωριστή κατανομή των τάσεων στα υλικά του. Οι τάσεις στους δύο πρώτους σπονδύλους εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή στην κάμψη απ' ότι στη θλίψη κάτι που δεν συμβαίνει στον τρίτο σπόνδυλο όπου οι δύο καταπονήσεις είναι σχεδόν ίδιες και στον τέταρτο όπου η θλίψη δίνει μεγαλύτερες τάσεις απ' ότι η κάμψη. Σαν σύνολο και εδώ οι μέγιστες τάσεις από τις μικρότερες στις μεγαλύτερες ακολουθούν την κατανομή κατά σκληρότητα όπου έχει ήδη αναφερθεί στο τέλος του κεφαλαίου 6.

Ακολουθούν τα διαγράμματα των μέγιστων παραμορφώσεων που εμφανίζονται σε κάθε υλικό των τεσσάρων σπονδύλων σε θλιπτική και καμπτική καταπόνηση αντίστοιχα. (Σχήμα 8.12) (Σχήμα 8.13).



Σχήμα 8.12 Οι μέγιστες παραμορφώσεις ανά υλικό στους τέσσερις σπονδύλους κατά την θλίψη

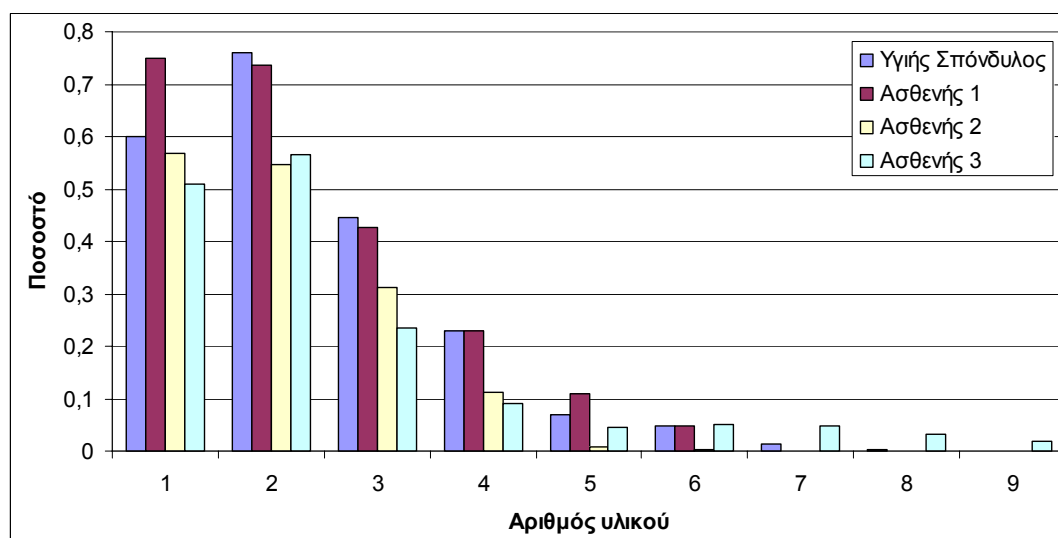


Σχήμα 8.13 Οι μέγιστες παραμορφώσεις ανά υλικό στους τέσσερις σπονδύλους κατά την κάμψη

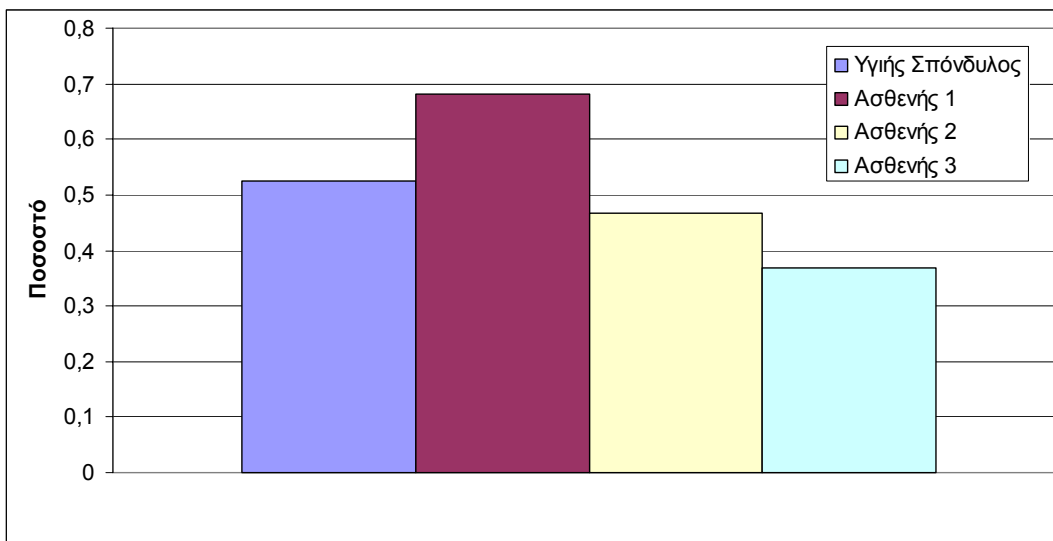
Σε όλους του σπονδύλους, όπως έχει ήδη αναφερθεί οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα πρώτα υλικά. Σε υλικά σκληρότερα του υλικού 3 οι παραμορφώσεις γίνονται αισθητά μικρότερες. (Σχήμα 7.12) (Σχήμα 7.13)

8.7.2 Σύγκριση του Ποσοστού του συνολικού όγκου με Παραμόρφωση Μεγαλύτερη από 5000μStrains

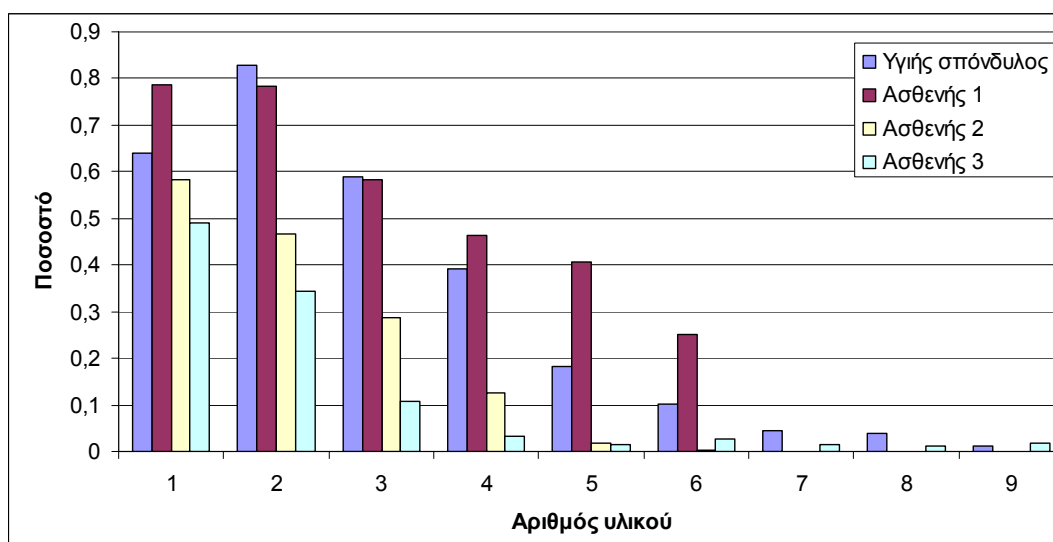
Κατ' αντιστοιχία με το προηγούμενο κεφάλαιο ακολουθούν τα διαγράμματα που δείχνουν το ποσοστό του όγκου ανά υλικό αλλά και συνολικού όγκου που εμφανίζει παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5000 μStrains στο δύο τύπους καταπόνησης. (Σχήμα 8.14) (Σχήμα 8.15) (Σχήμα 8.16) (Σχήμα 8.17)



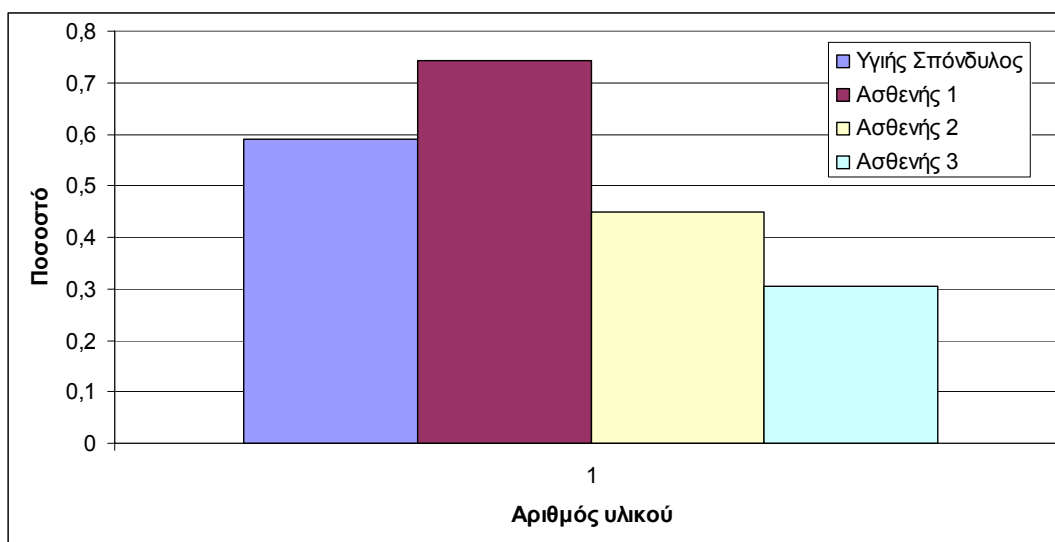
Σχήμα 8.14 Το ποσοστό του όγκου ανά υλικό που η μέγιστη Von Mises παραμόρφωση ξεπερνάει την τιμή 0,005 Strains κατά την θλίψη



Σχήμα 8.15 Ποσοστό όγκου που έχει ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises μεγαλύτερες από 5000μStrains κατά την θλίψη



Σχήμα 8.16 Το ποσοστό του όγκου ανά υλικό που η μέγιστη Von Mises παραμόρφωση ξεπερνάει την τιμή 0,005 Strains κατά την κάμψη

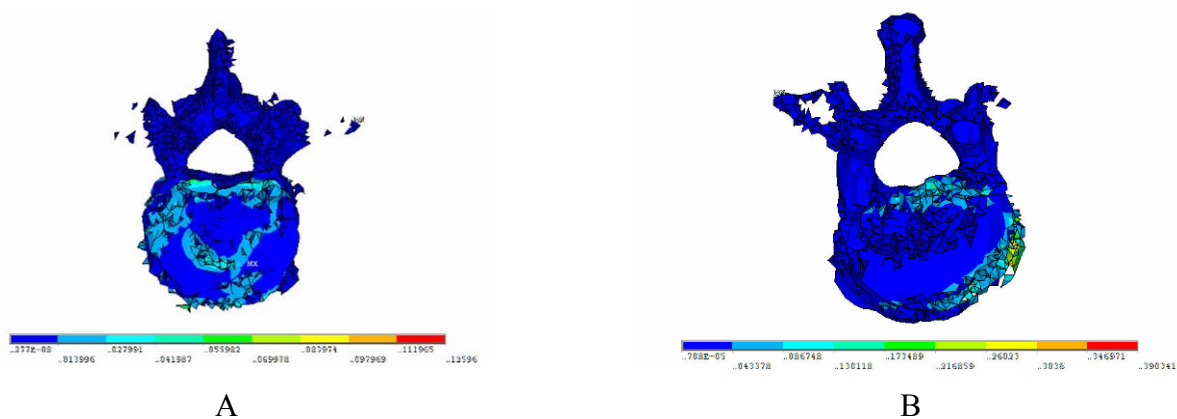


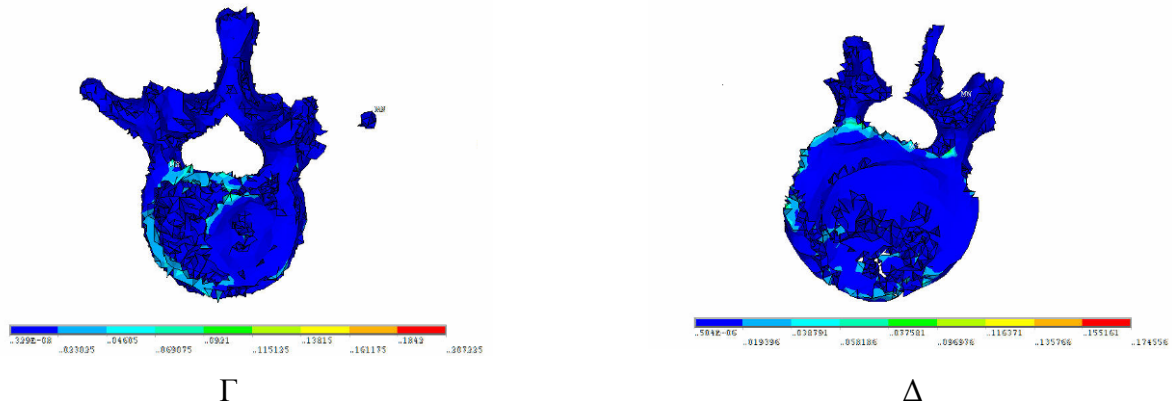
Σχήμα 8.17 Ποσοστό όγκου που έχει ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises μεγαλύτερες από 5000μStrains κατά την κάμψη

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 8.15) (Σχήμα 8.17) φαίνεται ακόμα καθαρότερα ότι το ποσοστό του όγκου που εμφανίζει τέτοιου παραμόρφωση μεγαλύτερη από 5000 μStrains και για τις δύο καταπονήσεις ακολουθεί την κατάταξη σκληρότητας. Ακόμα παρατηρείται πως το ποσοστό αυτό είναι ελαφρώς μεγαλύτερο στην κάμψη για τους πρώτους δύο σπονδύλους και περίπου ίδιο για τους δύο επόμενους.

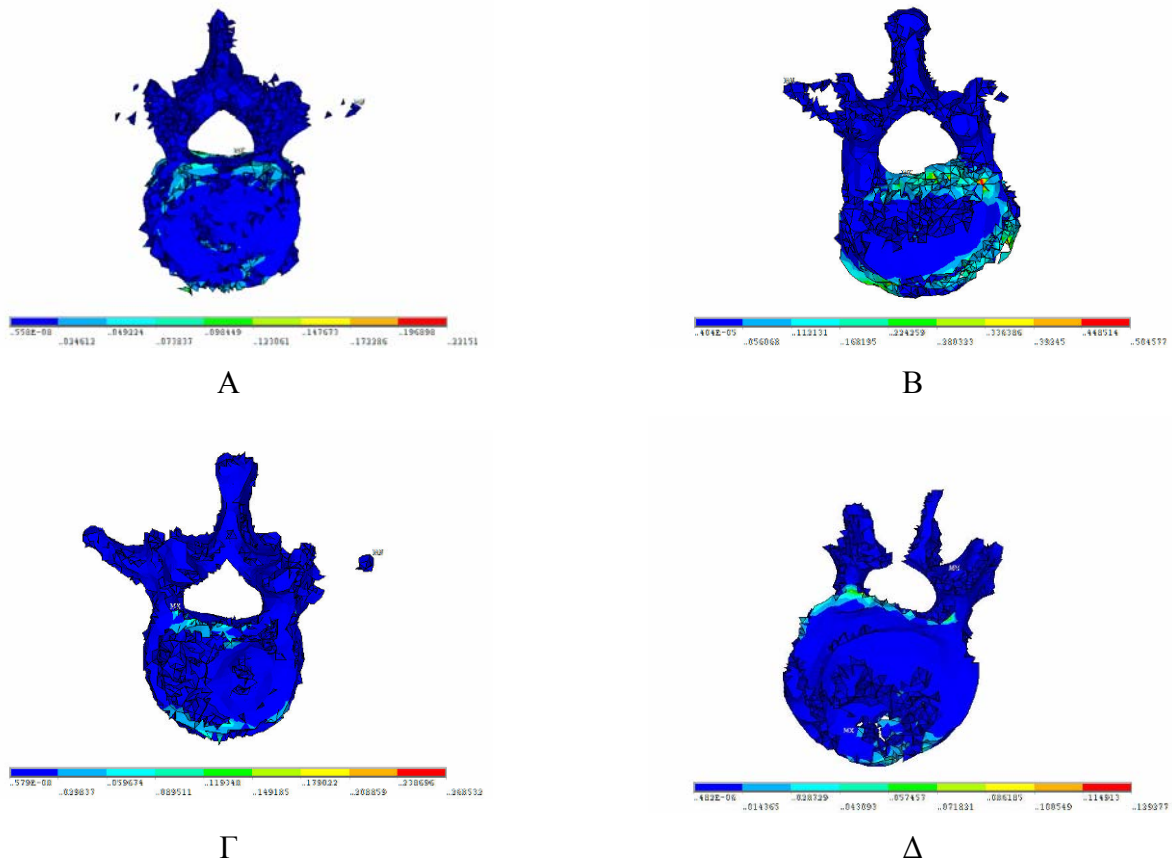
8.7.3 Σύγκριση των Αποτελεσμάτων Μετά Την Αφαίρεση Των Υλικών 1 Και 2

Κατά αντιστοιχία με το προηγούμενο κεφάλαιο ακολουθεί η κατανομή της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises των υλικών 2 – 9 σε κάτοψη για τους δύο τύπους φόρτισης. (Σχήμα 8.18) (Σχήμα 8.19)





Σχήμα 8.18 Θέση εμφάνιση των μέγιστων τιμών της Von Mises παραμόρφωσης έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου χωρίς το πρώτο υλικό σε κάτοψη, (Α) Του υγιούς σπονδύλου , (Β) Του Ασθενή 1 , (Γ) Του Ασθενή 2 , (Δ) Του Ασθενή 3



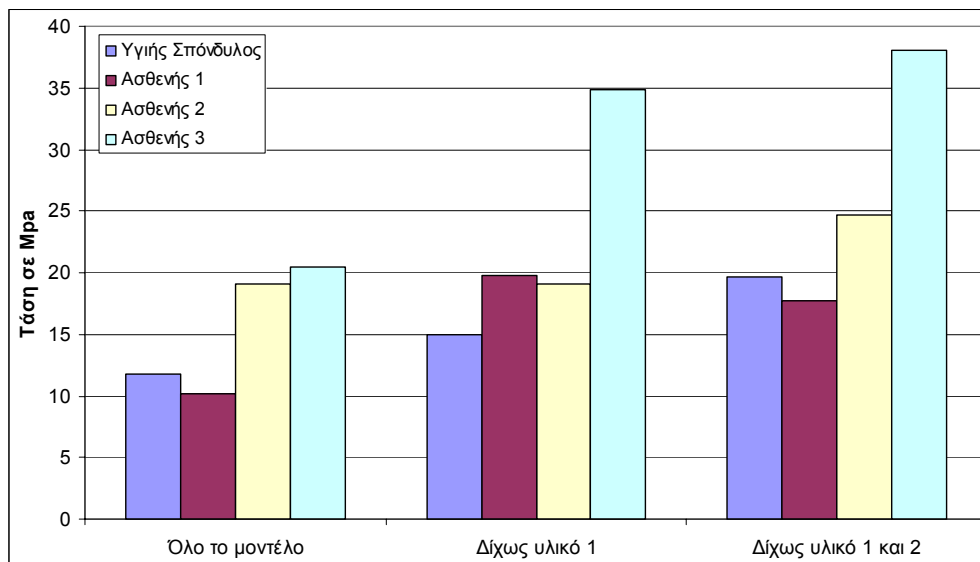
Σχήμα 8.19 Θέση εμφάνιση των μέγιστων τιμών της Von Mises παραμόρφωσης έπειτα από την επιβολή καμπτικού φορτίου χωρίς το πρώτο υλικό σε κάτοψη, (Α) Του υγιούς σπονδύλου , (Β) Του Ασθενή 1 , (Γ) Του Ασθενή 2 , (Δ) Του Ασθενή 3

Έπειτα από την γραφική αφαίρεση του πρώτου υλικού από την διαδικασία επισκόπησης των αποτελεσμάτων οι παραμορφώσεις παραμένουν τοπολογικά στις ίδιες περιοχές. Με την αφαίρεση του πρώτου υλικού περιορίστηκε το φαινόμενο συγκέντρωσης των παραμορφώσεων στα όρια του σπονδυλικού σώματος όπου βλέπαμε όταν είχαμε

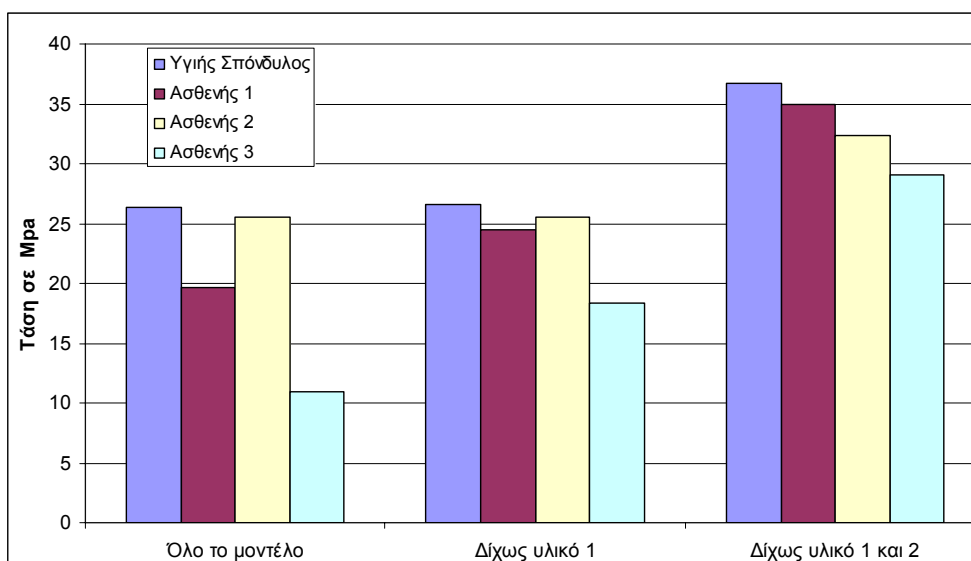
ολόκληρο το μοντέλο. Οι παρακάτω παρατηρήσεις ισχύουν και για τις δύο φορτίσεις. Στον υγιή σπόνδυλο οι παραμορφώσεις ισοκατανέμονται σε όλο τον όγκο του σπονδυλικού σώματος. Ο σπόνδυλος του ασθενή 1 συγκεντρώνει λόγω γεωμετρίας τις παραμορφώσεις στην εμπρόσθια αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Ο σπόνδυλος του ασθενή 2 συγκεντρώνει τις παραμορφώσεις στην πάνω επιφανειακή πλάκα του σπονδυλικού σώματος φαινόμενο που εμφανίζεται και στο σπόνδυλο του ασθενή 3.

Το υλικό 2 έχει και αυτό πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας. Με το ίδιο σκεπτικό που αφαιρέθηκε το υλικό 1 μπορεί να αφαιρεθεί και το υλικό 2.

Ακολουθούν τα διαγράμματα που δείχνουν τις μέγιστες τιμές τάσεων των τεσσάρων σπονδύλων για ολόκληρο το μοντέλο, για τα υλικά 2-9 και για τα υλικά 3-9. (Σχήμα 8.20) (Σχήμα 8.21)



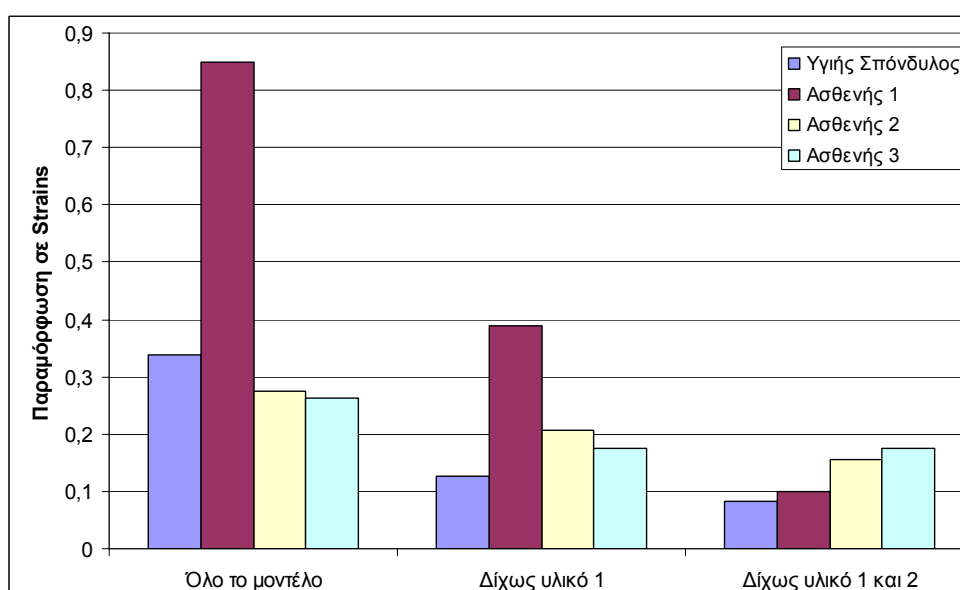
Σχήμα 8.20 Η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στους τέσσερεις σπονδύλους κατά την θλίψη σε όλα τα υλικά, από 2-9 και από 3-9



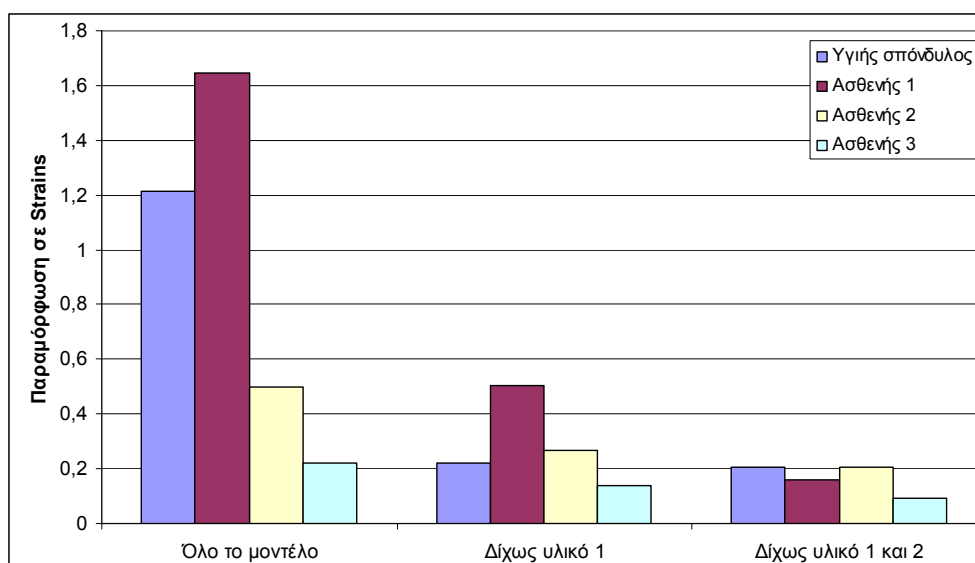
Σχήμα 8.21 Η μέγιστη τάση που εμφανίζεται στους τέσσερεις σπονδύλους κατά την κάμψη σε όλα τα υλικά, από 2-9 και από 3-9

Στην περίπτωση λοιπόν της θλίψης μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών οι τάσεις ακολουθούν την κατάταξη με βάση τον βαθμό του κατάγματος και όχι την κατάταξη σκληρότητας που ακολουθούσαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με μόνη διαφορά την τιμή της ισοδύναμης τάσης που εμφανίζεται στον σπόνδυλο του ασθενή 2 (Σχήμα 8.20). Στην περίπτωση της κάμψης αντίθετα μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού ακολουθείται από την τάση η κατά σκληρότητα κατάταξη με μόνη διαφορά την τιμή της ισοδύναμης τάσης που εμφανίζεται στον σπόνδυλο του υγιή σπονδύλου. (Σχήμα 8.21)

Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για την παραμόρφωση για τις δύο διαφορετικές φορτίσεις: (Σχήμα 8.22) (Σχήμα 8.23)



Σχήμα 8.22 Η μέγιστη παραμόρφωση που εμφανίζεται στους τέσσερεις σπονδύλους κατά την θλίψη σε όλα τα υλικά, από 2-9 και από 3-9



Σχήμα 8.23 Η μέγιστη παραμόρφωση που εμφανίζεται στους τέσσερις σπονδύλους κατά την κάμψη σε όλα τα υλικά, από 2-9 και από 3-9

Οι τιμές των παραμορφώσεων μειώνονται μετά την αφαίρεση των υλικών 1 και 2. Στις δύο περιπτώσεις της θλίψης και της κάμψης, μετά την αφαίρεση του υλικού 1, παρατηρείται ξανά το ίδιο, γνωστό πλέον, φαινόμενο της κατάταξης κατά σκληρότητα που ακολουθούν οι τιμές των ισοδύναμων παραμορφώσεων των τεσσάρων σπονδύλων. Αντίθετα μετά την αφαίρεση του υλικού 2 στην περίπτωση της θλίψης ακολουθεί η κατάταξη κατάγματος. Στην περίπτωση της κάμψης ο υγιής σπόνδυλος φαίνεται να παρουσιάζει την ίδια παραμόρφωση με το ασθενή 2, ακολουθεί με μικρότερη παραμόρφωση ο ασθενής 1 και τέλος ο ασθενής 3 (Σχήμα 8.22) (Σχήμα 8.23)

**Κεφάλαιο 9ο ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ
ΤΡΟΠΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

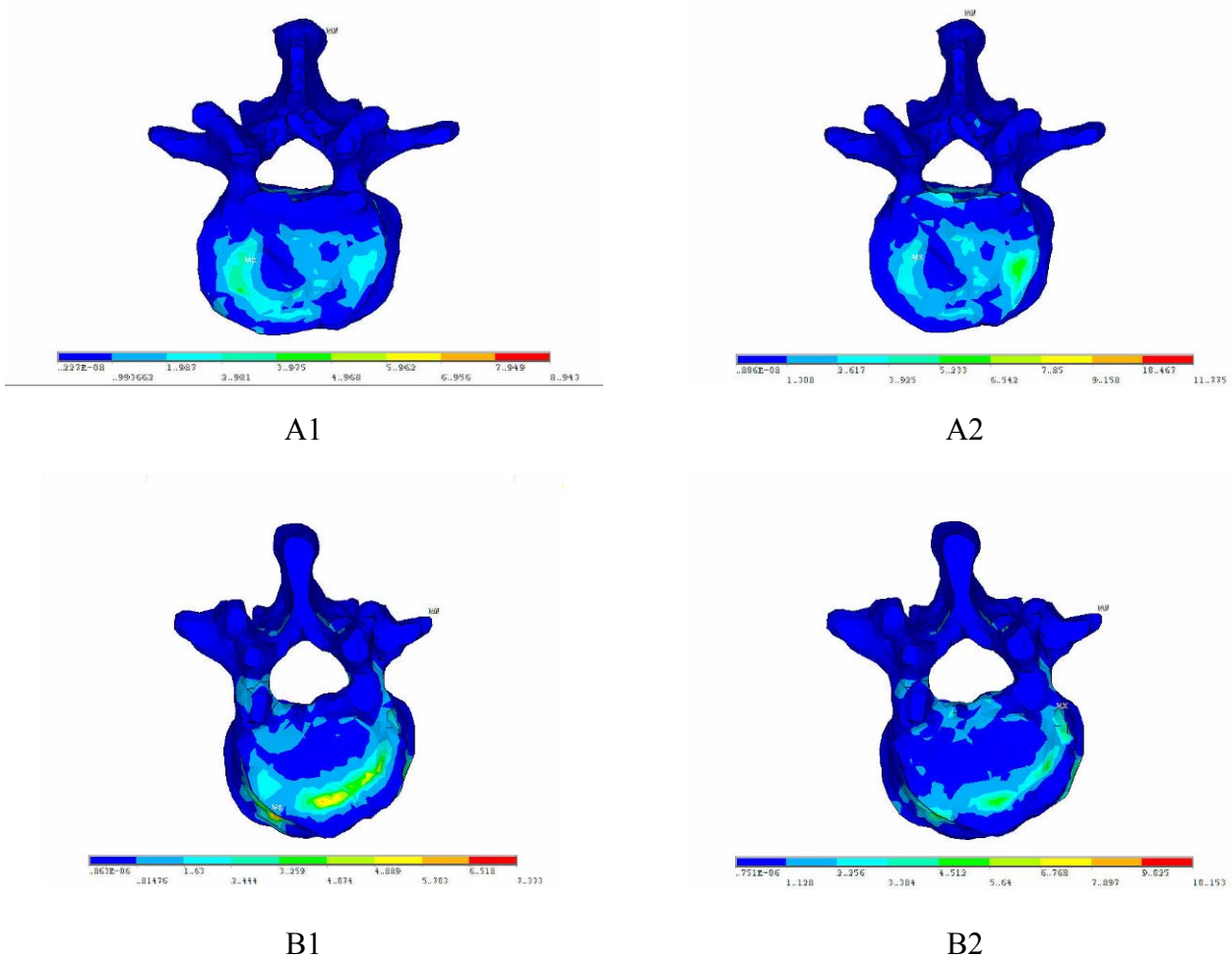
9.1 Εισαγωγή

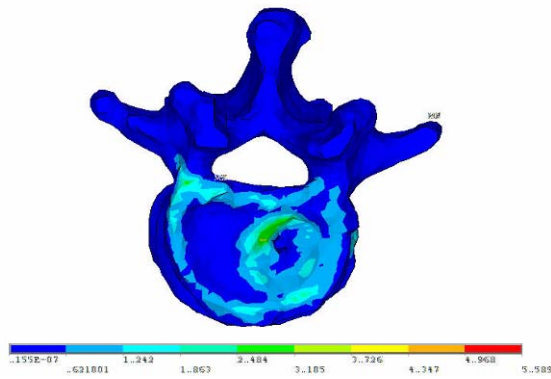
Αυτό το 9^ο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ασχολείται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων μοντελοποίησης των σπονδύλων (μοντελοποίηση με – χωρίς τη χρήση μεσοσπονδύλιου δίσκου).

Ο σκοπός της σύγκρισης αυτής είναι, αξιολογώντας τα αποτελέσματα, να φανεί ποια μέθοδος είναι η σωστότερη και επιτυγχάνει την καλύτερη σύγκριση καταγματικών σπονδύλων.

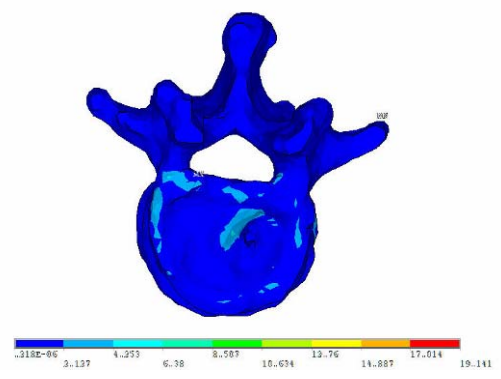
9.2 Αποτελέσματα της Σύγκρισης

Τοπολογικά οι τάσεις εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές, για συγκεκριμένο σπόνδυλο και καταπόνηση, και στις δύο περιπτώσεις. Ακολούθως ο μεσοσπονδύλιος δίσκος εξομαλύνει την κατανομή των τάσεων σε κάθε σπόνδυλο. Ακολουθεί μία εικόνα που υποστηρίζει τον παραπάνω ισχυρισμό. (Σχήμα 9.1)

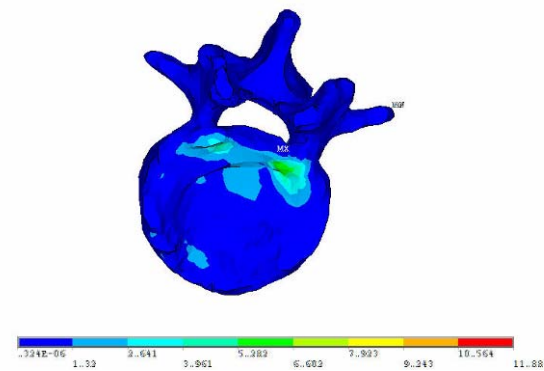




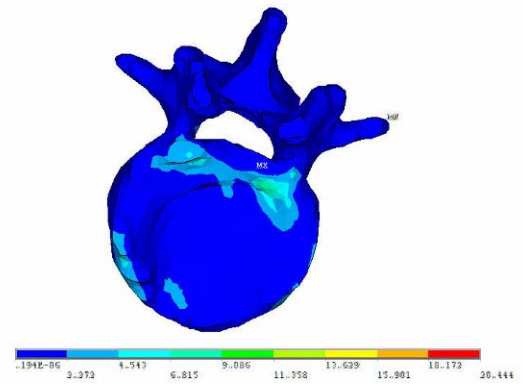
Γ1



Γ2



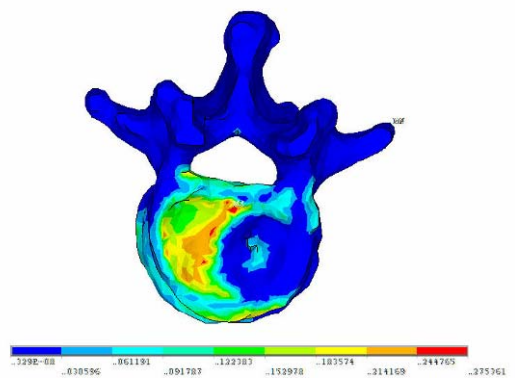
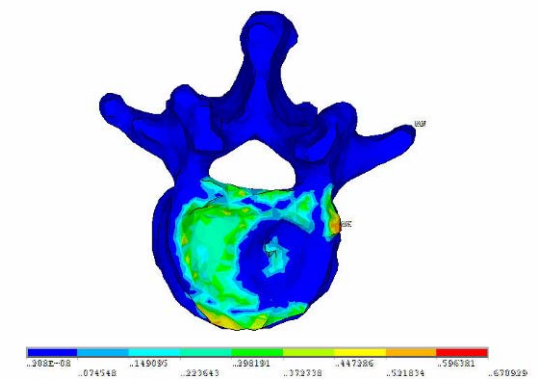
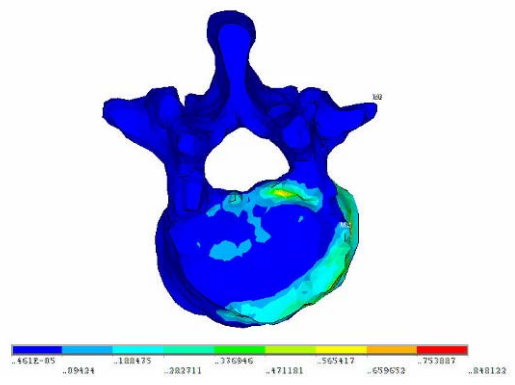
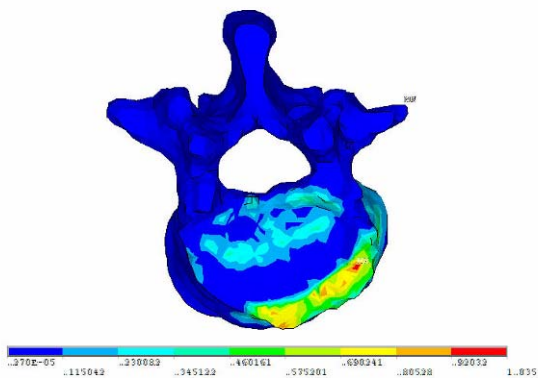
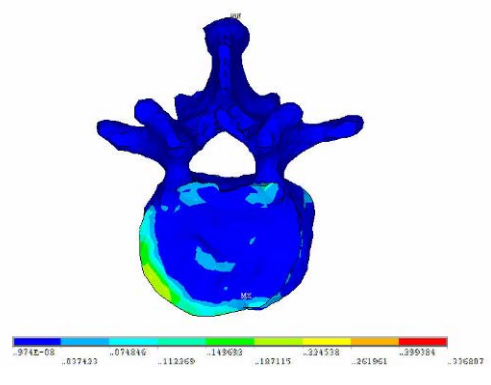
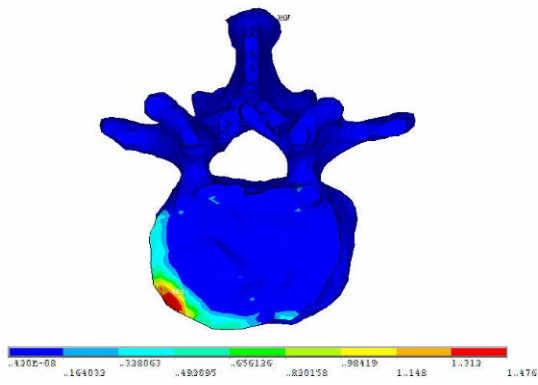
Δ1

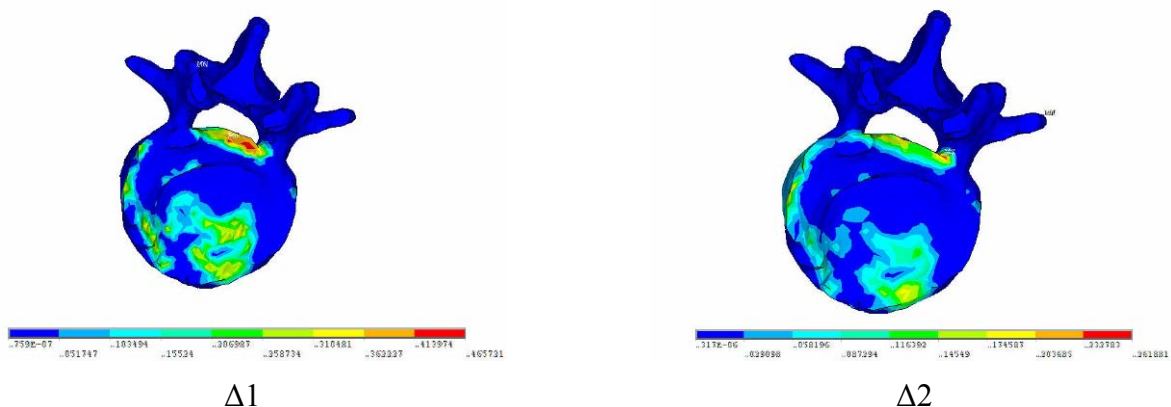


Δ2

Σχήμα 9.1 Η κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου, (Α1) Για τον υγιή σπόνδυλο χωρίς μεσοσπονδύλιο, (Α2) Για τον υγιή σπόνδυλο με μεσοσπονδύλιο, (Β1) Για τον Ασθ. 1 χωρίς μεσοσπονδύλιο, (Β2) Για τον Ασθ. 1 με μεσοσπονδύλιο, (Γ1) Για τον Ασθ. 2 χωρίς μεσοσπονδύλιο, (Γ2) Για τον Ασθ. 2 με μεσοσπονδύλιο, (Δ1) Για τον Ασθ. 3 χωρίς μεσοσπονδύλιο, (Δ2) Για τον Ασθ. 3 με μεσοσπονδύλιο

Τοπολογικά οι παραμορφώσεις εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές, για συγκεκριμένο σπόνδυλο και καταπόνηση, και στις δύο περιπτώσεις. Ακολούθως ο μεσοσπονδύλιος δίσκος εξομαλύνει την κατανομή των παραμορφώσεων σε κάθε σπόνδυλο. Ακόμα δεν εμφανίζεται τόσο έντονο το πρόβλημα της συγκέντρωσης των παραμορφώσεων στην περιφέρεια της άνω επιφυσιακής πλάκας του σπονδυλικού σώματος. Αυτό συμβαίνει επειδή πλέον δεν εφαρμόζονται οι δυνάμεις (είτε θλιπτικές είτε καμπτικές) απ' ευθείας στο σπονδυλικό σώμα. Ακολουθεί μία εικόνα που υποστηρίζει τον παραπάνω ισχυρισμό. (Σχήμα 9.2)

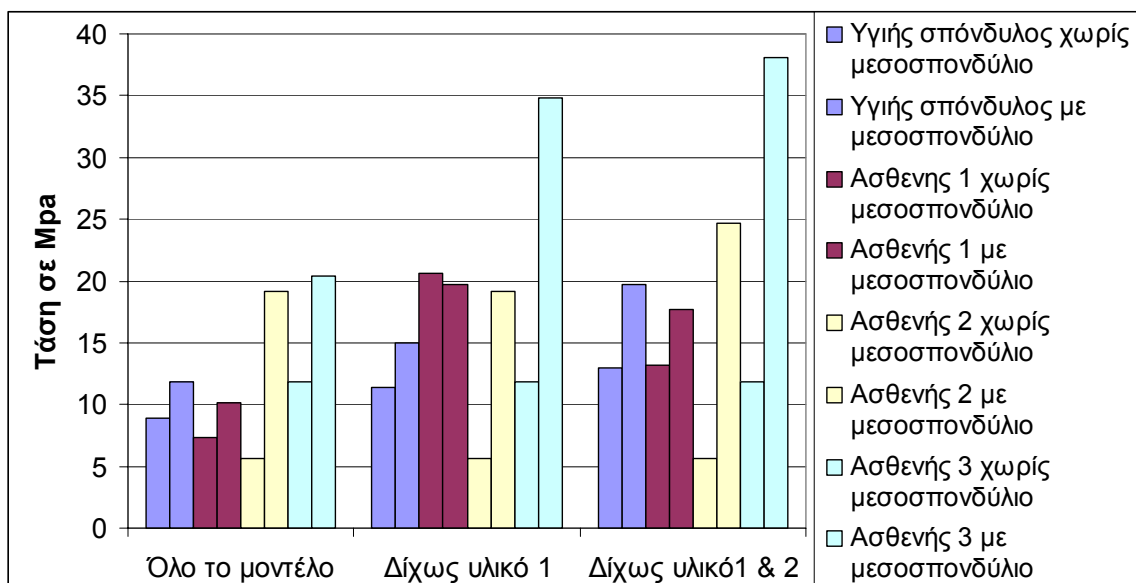




Σχήμα 9.2 Η κατανομή της ισοδύναμης παραμόρφωσης κατά Von Mises έπειτα από την επιβολή θλιπτικού φορτίου, (A1) Για τον υγιή σπόνδυλο χωρίς μεσοσπονδύλιο, (A2) Για τον υγιή σπόνδυλο με μεσοσπονδύλιο, (B1) Για τον Ασθ. 1 χωρίς μεσοσπονδύλιο, (B2) Για τον Ασθ. 1 με μεσοσπονδύλιο, (Γ1) Για τον Ασθ. 2 χωρίς μεσοσπονδύλιο, (Γ2) Για τον Ασθ. 2 με μεσοσπονδύλιο, (Δ1) Για τον Ασθ. 3 χωρίς μεσοσπονδύλιο, (Δ2) Για τον Ασθ. 3 με μεσοσπονδύλιο

Τα συμπεράσματα από την μεταξύ των φορτίσεων σύγκριση ήταν και στις δύο μεθόδους μοντελοποίησης τα ίδια και έχουν παρουσιαστεί στα κεφάλαια 7.6 και 8.6

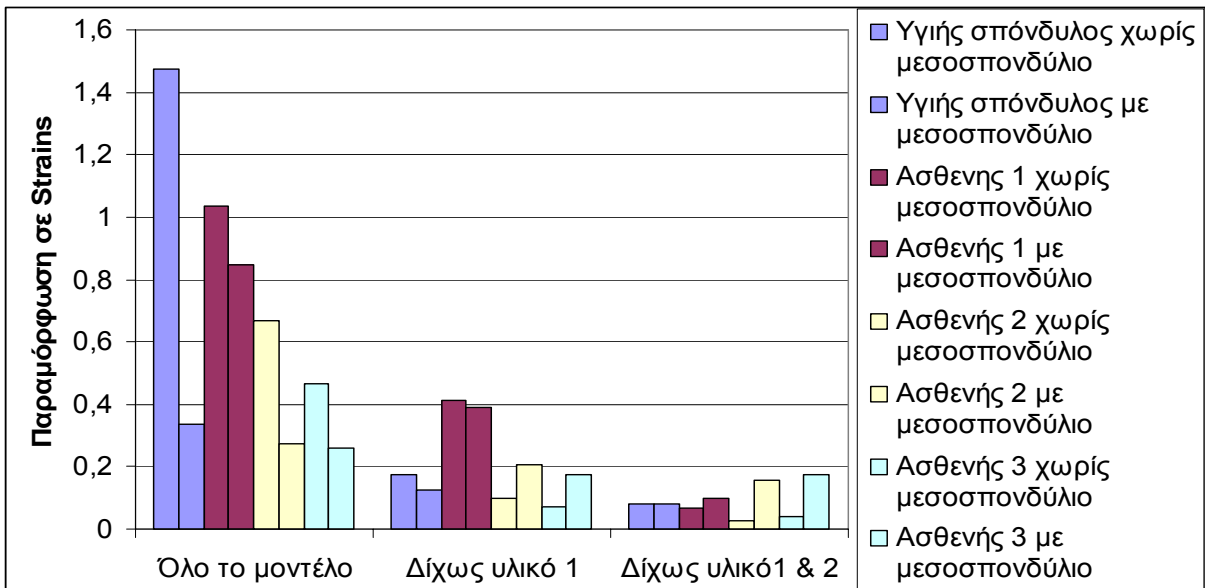
Οι τιμές των τάσεων εμφανίζονται συνολικά μεγαλύτερες κατά τη μοντελοποίηση με μεσοσπονδύλιο δίσκο απ' ότι χωρίς. Ακολουθεί μία εικόνα που υποστηρίζει τον παραπάνω ισχυρισμό. (Σχήμα 9.3)



Σχήμα 9.3 Τάση σε Μpa όλων των σπονδύλων χωρίς και με την χρήση μεσοσπονδύλιου αντίστοιχα για θλιπτική καταπόνηση

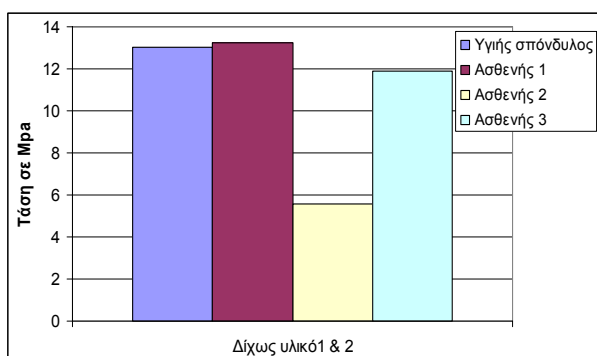
Οι μέγιστες παραμορφώσεις των μοντέλων που προκύπτουν με τη χρήση μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι μικρότερες απ' αυτές που προκύπτουν χωρίς μεσοσπονδύλιο όταν εξετάζεται ολος ο σπόνδυλος. Αντίθετα οι μέγιστες παραμορφώσεις των μοντέλων που προκύπτουν μετά την αφαίρεση των υλικών 1 και 2 παρουσιάζονται ίδιες στον υγιή σπόνδυλο και

μεγαλύτερες στους καταγματικούς όταν χρησιμοποιείται μεσοσπονδύλιος δίσκος. Ακολουθεί μία εικόνα που υποστηρίζει τον παραπάνω ισχυρισμό. (Σχήμα 9.4)

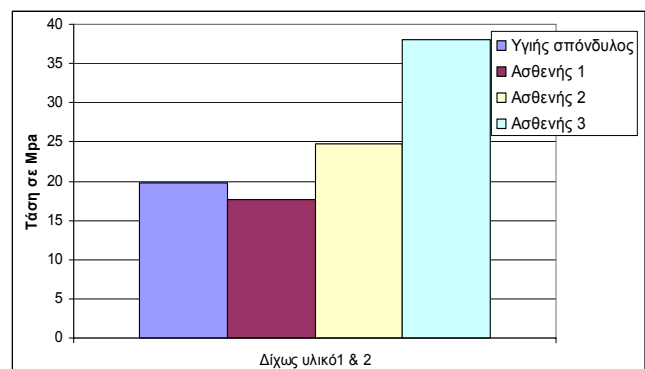


Σχήμα 9.4 Παραμόρφωση σε Strains όλων των σπονδύλων χωρίς και με την χρήση μεσοσπονδύλιου αντίστοιχα για θλιπτική καταπόνηση

Έπειτα από την αφαίρεση των πρώτων δύο υλικών στη μοντελοποίηση με μεσοσπονδύλιο δίσκο, τουλάχιστον στην περίπτωση της θλίψης, η σύγκριση των σπονδύλων μεταξύ τους είναι ορθότερη. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στην προκειμένη περίπτωση, ακολούθησαν την κατάταξη κατάγματος και όχι την κατάταξη σκληρότητας. Ακολουθεί μία εικόνα που υποστηρίζει τον παραπάνω ισχυρισμό. (Σχήμα 9.5), (Σχήμα 9.6)

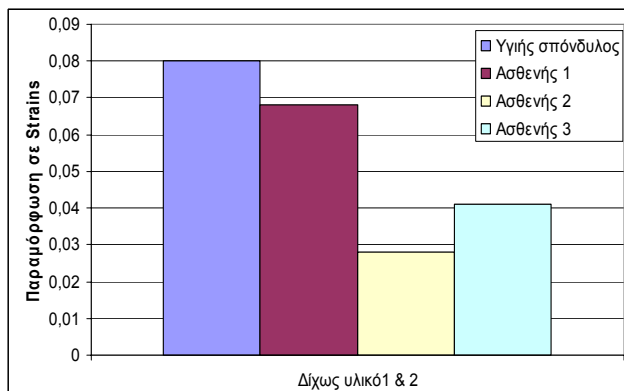


A

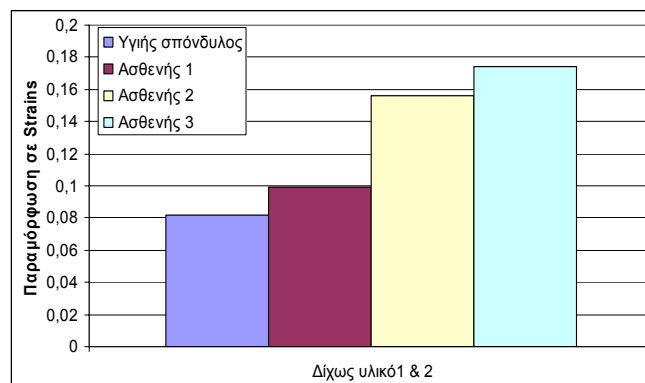


B

Σχήμα 9.5 Διαγράμματα των συνολικών τάσεων των τεσσάρων σπονδύλων σε θλιπτικό φορτίο για τα υλικά 3-9 (A): Για μοντέλα χωρίς μεσοσπονδύλιο (B): Για μοντέλα με μεσοσπονδύλιο



A



B

Σχήμα 9.6 Διαγράμματα των συνολικών παραμορφώσεων των τεσσάρων σπονδύλων σε θλιπτικό φορτίο για τα υλικά 3-9 (A): Για μοντέλα χωρίς μεσοσπονδύλιο (B): Για μοντέλα με μεσοσπονδύλιο

9.3 Γενικά Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις φορτίσεις, τους σπονδύλους και τους δύο τρόπους μοντελοποίησης μπορεί να εξαχθεί ένα γενικό συμπέρασμα. Όπως είδαμε, τα δεδομένα μας περιείχαν δύο αντικρουόμενες πληροφορίες. Ενώ η κατάταξη από τον υγιή σπόνδυλο στον σπόνδυλο με το μεγαλύτερο βαθμό κατάγματος ήταν της μορφής: υγιής σπόνδυλος - ασθενής 1 - ασθενής 2 - ασθενής 3 η κατάταξη από το σπόνδυλο με τη μεγαλύτερη οστική πυκνότητα προς αυτόν με τη μικρότερη ήταν σχεδόν η αντίθετη: ασθενής 3 - ασθενής 2 - υγιής σπόνδυλος - ασθενής 1.

Στο μεγαλύτερο όγκο των αποτελεσμάτων οι τάσεις και οι παραμορφώσεις ακολουθούσαν την κατάταξη κατά σκληρότητα. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως περισσότερο το ποσοστό των υλικών και λιγότερο η μορφή του σπονδυλικού σώματος επηρεάζει τα αριθμητικά αποτελέσματα. Αντίθετα, ο βαθμός του κατάγματος επηρεάζει περισσότερο την περιοχή που θα κατανεμηθούν οι τάσεις σε κάθε σπόνδυλο και θα εμφανιστούν οι μέγιστες παραμορφώσεις. Οι τελευταίες μάλιστα, στους καταγματικούς σπονδύλους συγκεντρώνονται στις κλίσεις που έχουν δημιουργηθεί στην πάνω επιφυσιακή πλάκα των μοντέλων, λόγω κατάγματος.

Τέλος, από την προηγούμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου προκύπτει πως η μοντελοποίηση με την χρήση μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι ορθότερη για την μεταξύ καταγματικών σπονδύλων σύγκριση καθώς μόνο τότε τα αποτελέσματα έδειξαν να επηρεάζονται περισσότερο από τον βαθμό του σπονδυλικού κατάγματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «Εμβιομηχανική και Βιοϊατρική τεχνολογία», πρόχειρες σημειώσεις του μαθήματος, τεύχος 1, Χρ. Προβατίδης καθηγητής Ε.Μ.Π, Αθήνα 2000
- [2] «Πεπερασμένα στοιχεία στη μηχανολογία», Α. Κανάραχος και Χρ. Προβατίδης, Αθήνα 2000
- [3] «Άτλας βασικών ιατρικών επιστημών Ι, Ανατομία του ανθρώπου». Frank H. Netter, M.D, Ιατρικές εκδόσεις Π.Χ. Πασχαλίδης, 3^η Έκδοση 2003
- [4] «Άτλαντας ανατομικής του ανθρώπου», Τόμος 2. Sobotta 1995
- [5] «Εισαγωγή στην ορθοπαιδική και τραυματολογία», Γεώργιος Κ. Παπαχρήστου, Ιατρικές εκδόσεις Π.Χ. Πασχαλίδης, 2006
- [6] «Μεταβολικά νοσήματα των οστών και διαταραχές του μεταβολισμού των μετάλλων», Γ. Λυρίτης, Αθήνα 1998
- [7] «Διαφορική διάγνωση και θεραπευτικά σχήματα στην Οστεοπόρωση», Γ. Λυρίτης, Αθήνα 2003
- [8] «Οστεοπόρωση, η επερχόμενη επιδημία», Γεώργιος Κ. Παπαχρήστου, Αρχαία Ελληνικής ιατρικής 1991
- [9] «Ανατομική του ανθρώπου », Επ. Κατρίτση και Ν. Παπαδόπουλου, Ιατρικές εκδόσεις Λίτσας, 2002
- [10] «Φυσική του ανθρώπινου σώματος», J.R. Cameron, J.G. Skofronick, R.M. Grant. Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης, Ε. Γεωργίου, Ε. Γιακουμάκης, Σ. Κόττου, Κ. Ντάλλες, Α. Σερέφογλου, Α. Σκυλλάκου-Λουίζη, Εκδόσεις Παρισιάνου Α.Ε 2001
- [11] «Μηχανική παραμορφωσίμων σωμάτων ΙΙ». Γ.Ι. Τσαμασφύρος, Εκδόσεις Συμμετρία
- [12] «Diagnosis of osteoporosis and assessment of fracture risk», Kanis JA. 2002
- [13] «Prevention and management of osteoporosis», C. Compston JE., 1997
- [14] «Evaluation of the role of ligaments, facets and disc nucleus in lower cervical spine under compression and sagittal moments using finite element method Medical Engineering & Physics 23 155-164» E.C. Teo, H.W. Ng 2001
- [15] «The influence of cancellous bone density on load sharing in human lumbar spine: a comparison between an intact and surgically altered motion segment », Tobias Pitzen, Fred H. Geisler Matthis Hans Muller-Storz K. Pedersen Wolf-Ingo Steudel, 2001

- [16] «Investigation of the influence of mesh quality and number of materials used to simulate osteoporosis in finite element models of vertebrae» Provatidis C.G., Vossou C.G., Koukoulis I.N. 2005
- [17] «Three-dimensional geometrical and mechanical modelling of the lumbar spine», Lavaste F., Wafa S., Robin S., Roy-Camille R., Mazel C. 1992
- [18] «Computer modelling and stress analysis of the lumbar spine» Nabhani F., Wake M. 2002
- [19] «Digital imaging and communication in medicine, National Electrical Manufactures Associations URL: [http:// medical.nema.org/dicom.html](http://medical.nema.org/dicom.html) »
- [20] «Συγκριτικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων υγιούς και οστεοπορωτικού σπονδύλου» Διπλωματική Εργασία, Α Λιζίδης 2004
- [21] «Ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μεσοσπονδύλιου δίσκου και μελέτη της επίδρασης του σε υγιή σπονδυλική μονάδα» Διπλωματική Εργασία, Γ Σπανός 2006
- [22] «Περιγραφή της εξέλιξης της οστεοπόρωσης στη σπονδυλική στήλη με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων», Διπλωματική Εργασία Ε. Πετροπούλου 2006
- [23] «Material properties assignment to finite element models of bone structures», Cinzia Zannoni, Raffaella Mantovani, Marco Viceconi, 1998
- [24] «Trabecular bone modulus-density relationships depend on anatomic site», Elise F. Morgan, Harun H. Bayraktar, Tony M. Keaveny, 2003