



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

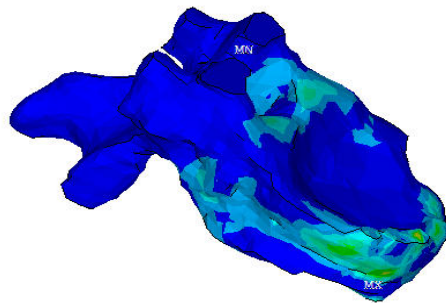
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ &

ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΝΟΣΟΥ ΤΗΣ
ΟΣΤΕΟΠΟΡΩΣΗΣ ΣΤΗ ΣΠΟΝΔΥΛΙΚΗ ΣΤΗΛΗ ΚΑΙ
ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ
ΜΕΣΟΣΠΟΝΔΥΛΙΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



ΜΠΟΤΣΗΣ ΛΟΥΚΑΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: κ. Χριστόφορος Προβατίδης,

Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2008

Λίστα Πινάκων	ix
Λίστα Σχημάτων	xii
Κεφάλαιο 1ο Εισαγωγή	1
1.1 Πρόλογος	1
1.2 Ο Οικονομικός και Κοινωνικός αντίκτυπος της οστεοπόρωσης.....	1
1.3 Ο ρόλος του Μηχανικού στην αντιμετώπιση του προβλήματος της οστεοπόρωσης. 2	
1.4 Ο σκοπός της εργασίας	2
1.5 Ανασκόπηση των κεφαλαίων της ΔΕ	3
Κεφάλαιο 2ο Ανατομικά στοιχεία της σπονδυλικής στήλης.....	5
2.1 Τα οστά της σπονδυλικής στήλης.....	6
2.2 Κοινά γνωρίσματα των γνήσιων σπονδύλων	6
2.2.1 Το σώμα του σπονδύλου	7
2.2.2 Το σπονδυλικό τόξο.....	7
2.2.3 Οι αποφύσεις των σπονδύλων	7
2.2.4 Το σπονδυλικό τμήμα	8
2.3 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των σπονδύλων	8
2.3.1 Αυχενικοί σπόνδυλοι	8
2.3.2 Θωρακικοί σπόνδυλοι.....	11
2.3.3 Οσφυϊκοί σπόνδυλοι	12
2.3.4 Το ιερό οστό	13
2.3.5 Ο κόκκυγας.....	14
2.4 Μεσοσπονδύλιες συγχονδρώσεις	15
2.4.1 Σύνδεσμοι των μεσοσπονδύλιων συγχονδρώσεων.....	17
2.5 Τα κυρτώματα της σπονδυλικής στήλης	18
2.5.1 Κυρτώματα κατά το οβελιαίο επίπεδο.....	18
2.5.2 Κυρτώματα κατά το μετωπιαίο επίπεδο	19
2.6 Κινήσεις της σπονδυλικής στήλης.....	19
Κεφάλαιο 3ο Η νόσος της οστεοπόρωσης.....	21
3.1 Γενικά	22

3.2 Αιτιολογία και Παθογένεση	22
3.3 Παράγοντες Κινδύνου της οστεοπόρωσης.....	23
3.4 Οστική πυκνότητα και ηλικία: Κορυφαία /Μέγιστη Οστική Μάζα.....	25
3.5 Κλινική εικόνα της οστεοπόρωσης	26
3.5.1 Πρωτοπαθής οστεοπόρωση.....	26
3.5.2 Δευτεροπαθής οστεοπόρωση	27
3.6 Οστικά κατάγματα.....	27
3.7 Οστική Ανακατασκευή (Bone Remodeling).....	29
Κεφάλαιο 4ο Λήψη και επεξεργασία των τομογραφιών.....	31
4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Αρχή λειτουργίας του αξονικού τομογράφου	32
4.3 Ανακατασκευή εικόνας	34
4.4 Αναπαραγωγή της εικόνας	37
Κεφάλαιο 5ο Εμβιομηχανική & Θεωρία Πεπερασμένων στοιχείων	41
5.1 Εμβιομηχανική	42
5.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην εμβιομηχανική και τη μελέτη της σπονδυλικής στήλης	42
5.3 Γενική Περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.....	43
5.3.1 Σχηματισμός πίνακα δυσκαμψίας	45
5.3.2 Επίλυση του συστήματος	46
5.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	46
5.4.1 Μοντέλα Π.Σ. σπονδύλων και σπονδυλικών σωμάτων	46
5.4.2 Μοντέλα Π.Σ. Μεσοσπονδύλιων δίσκων.....	48
Κεφάλαιο 6ο Μοντελοποίηση του σπονδύλου	51
6.1 Μοντελοποίηση.....	52
6.2 Κατασκευή της γεωμετρίας του Σπονδύλου	52
6.2.1 Πληροφορίες για τις προς επεξεργασία τομογραφίες	52
6.2.2 Επεξεργασία αξονικών τομογραφιών	52
6.3 Εισαγωγή της τριδιάστατης γεωμετρίας στο πρόγραμμα Π.Σ.	55

6.4 Απόδοση Υλικών στους σπονδύλους	56
6.5 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson	57
6.5.1 Μέτρο ελαστικότητας	57
6.5.2 Λόγος Poisson	59
6.6 Κατανομή των υλικών για τις δύο καταστάσεις στους δύο σπονδύλους	59
6.6.1 Σπόνδυλος Θ12	59
6.6.2 Σπόνδυλος Ο1	63
Κεφάλαιο 7ο Μοντελοποίηση Μεσοσπονδύλιου δίσκου	67
7.1 Εισαγωγή	68
7.2 Φορτίσεις στο Μεσοσπονδύλιο δίσκο	68
7.3 Εμβιομηχανική του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου	68
7.4 Διόγκωση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	70
7.5 Ιδιότητες των υλικών και η γεωμετρία του Μεσοσπονδύλιου δίσκου	70
7.6 Τρόποι μοντελοποίησης μεσοσπονδύλιου δίσκου	71
7.7 Δημιουργία του νέου μοντέλου μεσοσπονδύλιου δίσκου	72
7.7.1 Προσέγγιση του νέου μοντέλου	72
7.7.2 Δημιουργία Μεσοσπονδύλιου Δίσκου στους υπό εξέταση σπονδύλους....	73
Κεφάλαιο 8ο Επιβολή Φορτίσεων & Στηρίξεων	75
8.1 Επιβολή φορτίσεων και στηρίξεων	76
8.2 Θλίψη	76
8.3 Κάμψη και Έκταση	77
Κεφάλαιο 9ο Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων του σπονδύλου Θ12 με μεσοσπονδύλιους δίσκους (πλήρες μοντέλο) της πρώτης ασθενούς	81
9.1 Η Γεωμετρία του σπονδύλου	82
9.2 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε θλίψη	84
9.2.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά το άξονα z	84
9.2.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises	85
9.2.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων	87
9.3 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε καμπτική φόρτιση	91

9.3.1	Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z	91
9.3.2	Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων	92
9.3.3	Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων.....	94
9.4	Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε έκταση	98
9.4.1	Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z	98
9.4.2	Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων	99
9.4.3	Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων.....	101
9.5	Συμπέρασμα	104
Κεφάλαιο 10ο Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων στο σπόνδυλο Θ12 χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους της πρώτης ασθενούς		
10.1 Εισαγωγή.....		108
10.2 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων κατά την επιβολή θλιπτικής φόρτισης.....		108
10.2.1	Αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z.....	108
10.2.2	Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises	110
10.2.3	Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises.....	111
10.3 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων κατά την επιβολή καμπτικής φόρτισης.....		114
10.3.1	Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα z.....	114
10.3.2	Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων	116
10.3.3	Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων.....	118
10.4	Συμπέρασμα	121
Κεφάλαιο 11ο Σύγκριση των αποτελεσμάτων του σπονδύλου Θ12 μεταξύ των μοντέλων με μεσοσπονδύλιο δίσκο και χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο		
11.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων και για τις δύο καταστάσεις με και χωρίς μεσοσπονδύλιο κατά την επιβολή θλίψης.....		124
11.1.1	Σύγκριση των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z	124
11.1.2	Σύγκριση ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises.....	125
11.1.3	Σύγκριση ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises	127
11.2	Σύγκριση των αποτελεσμάτων κατά την επιβολή κάμψης	128

11.2.1	Σύγκριση των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z.....	128
11.2.2	Σύγκριση ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises	130
11.2.3	Σύγκριση ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises	131
11.3	Συμπέρασμα.....	133
Κεφάλαιο 12ο Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων στο μοντέλο του O1 με μεσοσπονδύλιους δίσκους της δεύτερης ασθενούς		
12.1	Γεωμετρία του σπονδύλου.....	138
12.2	Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε θλίψη.....	139
12.2.1	Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα z	139
12.2.2	Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises.....	141
12.2.3	Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises	143
12.3	Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε καμπτική φόρτιση.....	146
12.3.1	Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα z	146
12.3.2	Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises.....	147
12.3.3	Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων	149
12.4	Συμπέρασμα.....	152
Κεφάλαιο 13ο Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων στο σπόνδυλο O1 του μοντέλου χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους της δεύτερης ασθενούς.....		
13.1	Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε θλίψη.....	156
13.1.1	Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z	156
13.1.2	Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων.....	157
13.1.3	Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων	159
13.2	Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε κάμψη	162
13.2.1	Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα z	162
13.2.2	Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων.....	163
13.2.3	Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων	165
13.3	Συμπέρασμα.....	167
Κεφάλαιο 14ο Σύγκριση των αποτελεσμάτων του σπονδύλου μεταξύ των μοντέλων του σπονδύλου O1 με μεσοσπονδύλιο δίσκο και χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο.....		
		169

14.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων κατά την επιβολή θλίψης ανάλογα με τη μοντελοποίηση	170
14.1.1 Σύγκριση των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z	170
14.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ισοδύναμων τάσεων	171
14.1.3 Σύγκριση ισοδύναμων παραμορφώσεων	173
14.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατά την επιβολή κάμψης	174
14.2.1 Σύγκριση μετατοπίσεων κατά τον άξονα z	174
14.2.2 Σύγκριση ισοδύναμων τάσεων	176
14.2.3 Σύγκριση ισοδύναμων παραμορφώσεων	177
14.3 Συμπέρασμα	179
Βιβλιογραφία.....	182

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 4.1 Τυπικές τιμές αριθμού CT.....	39
Πίνακας 6.1 Παρουσίαση Υλικών.....	59
Πίνακας 7.1 Ιδιότητες υλικών του μεσοσπονδύλιου δίσκου.....	70
Πίνακας 7.2 Γεωμετρικές ιδιότητες του μεσοσπονδύλιου δίσκου.....	71
Πίνακας 7.3 Μέγιστες και ελάχιστες μετατοπίσεις κατά τους τρεις άξονες για το προσεγγιστικό μοντέλο.....	73
Πίνακας 8.1 Επιβολή πιέσεων για την κάθε περίπτωση.....	76
Πίνακας 8.2 Σπόνδυλος Θ12/ 1 ^η κατάσταση.....	78
Πίνακας 8.3 Σπόνδυλος Θ12/ 2 ^η κατάσταση.....	79
Πίνακας 8.4 Σπόνδυλος Ο1/ 1 ^η κατάσταση.....	79
Πίνακας 8.5 Σπόνδυλος Ο1/ 2 ^η κατάσταση.....	79
Πίνακας 9.1 Γεωμετρικά μεγέθη και οι μεταβολές τους από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση.....	83
Πίνακας 9.2 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12.....	85
Πίνακας 9.3 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων στο Θ12.....	87
Πίνακας 9.4 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12.....	90
Πίνακας 9.5 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12.....	92
Πίνακας 9.6 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων.....	93
Πίνακας 9.7 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12.....	97
Πίνακας 9.8 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12.....	99
Πίνακας 9.9 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων.....	100
Πίνακας 9.10 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12.....	103
Πίνακας 10.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12.....	109
Πίνακας 10.2 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων.....	110
Πίνακας 10.3 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12.....	114
Πίνακας 10.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12.....	116
Πίνακας 10.5 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων.....	117
Πίνακας 10.6 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12.....	120

Πίνακας 11.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1	125
Πίνακας 11.2 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο	126
Πίνακας 11.3 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12 στην περίπτωση του πλήρους και του απλού μοντέλου	128
Πίνακας 11.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1	129
Πίνακας 11.5 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο	131
Πίνακας 11.6 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12 στην περίπτωση του πλήρους και του απλού μοντέλου	132
Πίνακας 12.1 Γεωμετρικά μεγέθη και οι μεταβολές τους από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση	139
Πίνακας 12.2 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12	141
Πίνακας 12.3 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων στο Θ12	142
Πίνακας 12.4 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο O1	145
Πίνακας 12.5 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1	147
Πίνακας 12.6 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων στο Θ12	148
Πίνακας 12.7 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο O1	152
Πίνακας 13.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1	157
Πίνακας 13.2 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων	159
Πίνακας 13.3 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο O1	161
Πίνακας 13.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1	163
Πίνακας 13.5 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων	164
Πίνακας 13.6 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12	167
Πίνακας 14.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1	171
Πίνακας 14.2 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο	172
Πίνακας 14.3 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο O1 στην περίπτωση του πλήρους και του απλού μοντέλου	174
Πίνακας 14.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1	175

Πίνακας 14.5 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο	177
Πίνακας 14.6 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12 στην περίπτωση του λήρου και του απλού μοντέλου	178

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Η οστεοπόρωση απειλεί περισσότερο τις γυναίκες, που ανήκουν στην Καυκάσια και τη ασιατική φυλή και προκαλεί προβλήματα στην καθημερινή τους ζωή... 1	1
Σχήμα 1.2 Το αντίκτυπο των οστεοπορωτικών σπονδυλικών καταγμάτων στην ποιότητα ζωής των γυναικών βάσει του δείκτη SF36 1	1
Σχήμα 2.1 Η σπονδυλική στήλη του ανθρώπου εμπρός πίσω και πλάγια (από αριστερά προς τα δεξιά)..... 6	6
Σχήμα 2.2 Δομικά χαρακτηριστικά του σπονδύλου (α) πλάγια και (β) από πάνω 7	7
Σχήμα 2.3 Ο πρώτος αυχενικός σπόνδυλος, άτλαντας (α) πλάγια και (β) από κάτω 9	9
Σχήμα 2.4 Ο δεύτερος αυχενικός σπόνδυλος, άτλαντας (α) πλάγια (β) από κάτω και (γ) ο πρώτος και ο δεύτερος αυχενικός σπόνδυλος μαζί..... 10	10
Σχήμα 2.5 Ο έβδομος αυχενικός σπόνδυλος..... 10	10
Σχήμα 2.6 (α) ο πρώτος θωρακικός σπόνδυλος από πάνω (β) ο δέκατος θωρακικός σπόνδυλος από εμπρός (γ) ο έκτος θωρακικός σπόνδυλος από πλάγια και (δ) ο δωδέκατος θωρακικός σπόνδυλος από πλάγια 11	11
Σχήμα 2.7 Ο τέταρτος οσφυϊκός σπόνδυλος (α) από επάνω και (β) από εμπρός 13	13
Σχήμα 2.8 Το ιερό οστόν (α) από πλάγια και (β) από εμπρός και κάτω 13	13
Σχήμα 2.9 Ο κόκκυγας 15	15
Σχήμα 2.10 Οι σπόνδυλοι που παρουσιάζονται στην εργασία 15	15
Σχήμα 2.11 Ο Μεσοσπονδύλιος δίσκος. Στο κέντρο διακρίνεται ο πηκτοειδής πυρήνας ενώ περιφερικά φαίνονται τα επίπεδα του ινώδη δακτυλίου 16	16
Σχήμα 2.12 Κολλαγόνες ίνες του ινώδους δακτυλίου. Οι κολλαγόνες ίνες του δακτυλίου σχηματίζουν γωνία 30° με το επίπεδο του δακτυλίου..... 17	17
Σχήμα 2.13 Λειτουργική μονάδα της οσφυϊκής μοίρας στην οποία διαφαίνεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος και οι περιοχές που τον αποτελούν. Επίσης διαφαίνονται οι βασικοί σύνδεσμοι της οσφυϊκής μοίρας 18	18
Σχήμα 3.1 Αριστερά φαίνεται ο υγιής σπόνδυλος O2 37χρονου ανδρός ενώ δεξιά ο οστεοπορωτικός σπόνδυλος O2 75χρονης γυναίκας..... 22	22
Σχήμα 3.2 Η πορεία της οστικής μάζας στους άνδρες και στις γυναίκες σε σχέση με την ηλικία..... 25	25
Σχήμα 3.3 (α) Σφηνοειδές κάταγμα (β) Καθιζήμενος σπόνδυλος 29	29
Σχήμα 3.4 Ο κύκλος της οστικής ανακατασκευής..... 30	30

Σχήμα 4.1. Διαγραμματική απεικόνιση Αξονικού τομογράφου.....	33
Σχήμα 4.2 Διαδικασία λήψης τομογραφιών	34
Σχήμα 4.3 Αλγεβρική μέθοδος ανακατασκευής από πολλαπλές προβολές	35
Σχήμα 4.4. α) Δύο ορθογώνιες προβολές τομής κυλινδρικής ράβδου β) Απλή οπισθοπροβολή των δύο προβολών γ) Οπισθοπροβολή των δύο προβολών αφού έχουν φιλτραριστεί με ειδικά σχεδιασμένο φίλτρο.....	36
Σχήμα 4.5. Οριζόντια προβολή διακριτών στοιχείων μιας τομής με διαφορετικούς συντελεστές εξασθένησης των ακτινών X.	37
Σχήμα 4.6. Διαδικασία αναπαραγωγής της εικόνας υπολογιστικής τομογραφίας.....	38
Σχήμα 5.1. Κατάστρωση προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία	45
Σχήμα 5.2. Σημεία ολοκλήρωσης Gauss σε ένα επίπεδο στοιχείο.....	45
Σχήμα 5.3. Το μοντέλο των Hakim & King.	47
Σχήμα 5.4 Το ακριβές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε από τους Fagan et al.....	47
Σχήμα 5.5 Το απλοποιημένο μοντέλο του σπονδυλικού σώματος του σπονδύλου L1 που χρησιμοποίησαν οι Whyne et al. για τη μελέτη της αντοχής.	48
Σχήμα 5.6 Το τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του μεσοσπονδύλιου δίσκου O2-O3 που αναπτύχθηκε από τους Shirazi-Adl et al.	49
Σχήμα 6.1 Περιβάλλον λογισμικού επεξεργασίας ιατρικών τομογραφιών (MIMICS). Τομογραφίες του Θ12 στη δεύτερη κατάσταση.....	53
Σχήμα 6.2 Το πεπερασμένο στοιχείο SOLID 92 της βιβλιοθήκης του ANSYS	55
Σχήμα 6.3 Οι γεωμετρίες των σπονδύλων Θ12 (α) στην πρώτη κατάσταση και (β) στη δεύτερη κατάσταση και του Ο1 (γ) στην πρώτη κατάσταση και (δ) στη δεύτερη κατάσταση.	56
Σχήμα 6.4. Σχέση πυκνότητας-φωτεινότητας.....	58
Σχήμα 6.5 Κατανομή των υλικών του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη και στη δεύτερη κατάσταση	61
Σχήμα 6.6. Ποσοστιαία κατανομή των υλικών στο σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση	62
Σχήμα 6.7 Κατανομή των υλικών του σπονδύλου Ο1 στην πρώτη (αριστερά) και στη δεύτερη (δεξιά) κατάσταση	65

Σχήμα 6.8 Ποσοστιαία κατανομή υλικών στο σπόνδυλο O1 για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	66
Σχήμα 7.1 Ο κόμβος του Schmorl οφείλεται σε αστοχία της τελικής πλάκας κατά τη συμπίεση.....	69
Σχήμα 8.1 Θλιπτική φόρτιση στο σπόνδυλο O1 στην δεύτερη κατάσταση.....	77
Σχήμα 8.2 Επιβολή κάμψης (αριστερά) και έκτασης (δεξιά)	77
Σχήμα 8.3 Κάμψη και έκταση στο σπόνδυλο O1 στη δεύτερη κατάσταση.....	78
Σχήμα 9.1 Η γεωμετρία του σπονδύλου στις δύο διαδοχικές καταστάσεις (α) εμπρόσθια όψη (β) αριστερή όψη του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη κατάσταση και (γ) εμπρόσθια όψη (δ) αριστερή όψη του σπονδύλου Θ12 στη δεύτερη κατάσταση	82
Σχήμα 9.2 Απεικόνιση των παραμέτρων που κατά τους Lavaste et al αρκούν για την πλήρη περιγραφή της γεωμετρίας ενός σπονδύλου	82
Σχήμα 9.3 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	84
Σχήμα 9.4 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	86
Σχήμα 9.5 Τομή του σπονδύλου κατά τον z-άξονα Θ12 (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση	87
Σχήμα 9.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση	88
Σχήμα 9.7 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2	89
Σχήμα 9.8 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.	90
Σχήμα 9.9 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β)	

του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση	91
Σχήμα 9.10 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση	93
Σχήμα 9.11 Τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον z-άξονα (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση	94
Σχήμα 9.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	95
Σχήμα 9.13 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2	96
Σχήμα 9.14 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.	97
Σχήμα 9.15 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση	99
Σχήμα 9.16 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση	100
Σχήμα 9.17 Τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον z-άξονα (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση	101
Σχήμα 9.18 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	102
Σχήμα 9.19 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2	103

Σχήμα 9.20 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.....	103
Σχήμα 10.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση του υλικού 1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	109
Σχήμα 10.2 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση	110
Σχήμα 10.3 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στη δεύτερη κατάσταση μετά την αφαίρεση ΠΣ με μέγιστη τιμή τάσης κατά Von Mises.....	111
Σχήμα 10.4 Τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον z-άξονα (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση	111
Σχήμα 10.5 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση	112
Σχήμα 10.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2	113
Σχήμα 10.7 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.....	113
Σχήμα 10.8 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση του υλικού 1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	115
Σχήμα 10.9 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση	116
Σχήμα 10.10 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στη δεύτερη κατάσταση μετά την αφαίρεση ΠΣ με μέγιστη τιμή τάσης κατά Von Mises	117
Σχήμα 10.11 Τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον z-άξονα (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση	118
Σχήμα 10.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση.....	118
Σχήμα 10.13 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2	119

Σχήμα 10.14 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.	120
Σχήμα 11.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	124
Σχήμα 11.2 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	126
Σχήμα 11.3 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην (α) πρώτη και (β) δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ. με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.....	127
Σχήμα 11.4 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	129
Σχήμα 11.5 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	131
Σχήμα 11.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην (α) πρώτη και (β) δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ. με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.....	132
Σχήμα 11.7 Ποσοστό όγκου με παραμορφώσεις μεγαλύτερες των 4500 μ Strains τόσο για την πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση για θλίψη και κάμψη	134
Σχήμα 11.8 Ποσοστό ανά υλικό με παραμόρφωση άνω των 4500 μ strains για το κάθε μοντέλο και τις δύο καταστάσεις του σπονδύλου Θ12	135
Σχήμα 12.1 Η γεωμετρία του σπονδύλου στις δύο διαδοχικές καταστάσεις (α) εμπρόσθια όψη (β) αριστερή όψη του σπονδύλου Ο1 στην πρώτη κατάσταση και (γ) εμπρόσθια όψη (δ) αριστερή όψη του σπονδύλου Ο1 στη δεύτερη κατάσταση.....	138
Σχήμα 12.2 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	140
Σχήμα 12.3 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Ο1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β)	

του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	141
Σχήμα 12.4 Τομή του σπονδύλου κατά τον άξονα Z του O1 (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση.....	142
Σχήμα 12.5 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου O1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση	143
Σχήμα 12.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2	144
Σχήμα 12.7 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.....	145
Σχήμα 12.8 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου O1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	146
Σχήμα 12.9 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου O1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	148
Σχήμα 12.10 Τομή του σπονδύλου κατά τον z-άξονα O1 (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση	149
Σχήμα 12.11 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου O1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	150
Σχήμα 12.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2	151
Σχήμα 12.13 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.....	152

Σχήμα 13.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση του υλικού 1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	156
Σχήμα 13.2 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση.....	158
Σχήμα 13.3 Τομή του σπονδύλου O1 κατά τον άξονα Z (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση.....	158
Σχήμα 13.4 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση.....	159
Σχήμα 13.5 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2....	160
Σχήμα 13.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.....	161
Σχήμα 13.7 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση του υλικού 1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.....	162
Σχήμα 13.8 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση.....	164
Σχήμα 13.9 Τομή του σπονδύλου O1 κατά τον άξονα Z (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση.....	165
Σχήμα 13.10 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση.....	165
Σχήμα 13.11 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2	166
Σχήμα 13.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.	167
Σχήμα 14.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z του σπονδύλου O1 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	170

Σχήμα 14.2 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	172
Σχήμα 14.3 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Ο1 στην (α) πρώτη και (β) δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ. με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.....	173
Σχήμα 14.4 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z του σπονδύλου Ο1 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	175
Σχήμα 14.5 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου	176
Σχήμα 14.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Ο1 στην (α) πρώτη και (β) δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ. με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.....	178
Σχήμα 14.7 Ποσοστό όγκου με παραμορφώσεις μεγαλύτερες των 4500 μ Strains τόσο για την πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση για θλίψη και κάμψη.....	180
Σχήμα 14.8 Ποσοστό ανά υλικό με παραμόρφωση άνω των 4500 μ strains για το κάθε μοντέλο και στις δύο καταστάσεις του σπονδύλου Ο1	180

Κεφάλαιο 1ο Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και των επιστημών κατά τον 20^ο αιώνα οδήγησε σε ραγδαία βελτίωση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου που συνοδεύτηκε από σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής του. Η αύξηση όμως του μέσου όρου ζωής συνεπάγεται και προβλήματα υγείας, τα οποία αναπόφευκτα πλήττουν τον άνθρωπο με το πέρασμα της ηλικίας. Αυτό σε συνδυασμό με την απαίτηση του σύγχρονου ανθρώπου για υψηλό επίπεδο ζωής και κατά τη διάρκεια της τρίτης ηλικίας, έχει ανάγει προβλήματα, όπως η οστεοπόρωση, σε πρωτεύοντα για τη δημόσια υγεία, παγκοσμίως.

Πρόσφατες καταγραφές υπολογίζουν τους πάσχοντες από τη νόσο, σε Ευρώπη, Ιαπωνία και Αμερική, σε 75 εκατομμύρια, αριθμός που αναμένεται να διπλασιαστεί στα επόμενα 50 χρόνια. Πρακτικά, μία στις τρεις γυναίκες και ένας στους πέντε άντρες μετά την ηλικία των 50 ετών θα υποστούν οστεοπορωτικό κάταγμα. Παρά την πρόοδο που έχει γίνει τα τελευταία χρόνια στον τομέα της διάγνωσης και της θεραπείας της νόσου, η οστεοπόρωση ακόμη υποδιαγνώσκεται και υποθεραπεύεται. Είναι γεγονός ότι η νόσος απειλεί περισσότερο τις γυναίκες που ανήκουν στην Καυκάσια και την ασιατική φυλή και επηρεάζει σημαντικά την καθημερινή τους ζωή (Σχήμα 1.1), ωστόσο αυτό δε σημαίνει ότι σε άλλους πληθυσμούς αποτελεί σπάνια ασθένεια (π.χ. άνδρες, γυναίκες τις μαύρης φυλής κτλ.). [1]

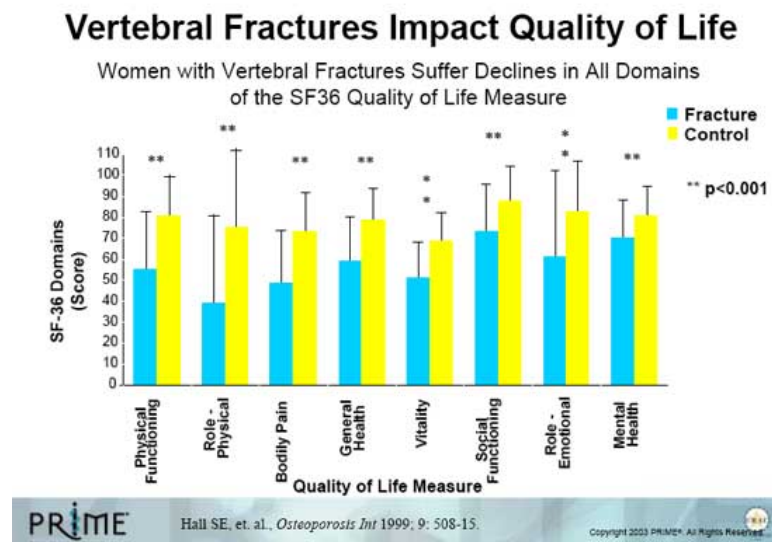


Σχήμα 1.1 Η οστεοπόρωση απειλεί περισσότερο τις γυναίκες, που ανήκουν στην Καυκάσια και τη ασιατική φυλή και προκαλεί προβλήματα στην καθημερινή τους ζωή.

1.2 Ο Οικονομικός και Κοινωνικός αντίκτυπος της οστεοπόρωσης

Σύμφωνα με στοιχεία του αμερικανικού εθνικού ιδρύματος για την οστεοπόρωση, μόνο το 1997, ξοδεύτηκαν 13.8 δισεκατομμύρια δολάρια τα οποία ήταν άμεσα συνδεδεμένα με τη νόσο, ενώ το ετήσιο κόστος που σχετίζεται με την οστεοπόρωση αναμένεται να έχει διπλασιαστεί μέχρι το 2047.

Ο κοινωνικός αντίκτυπος της οστεοπόρωσης είναι επίσης εξαιρετικά σημαντικός. Στις ΗΠΑ 20 εκατομμύρια άνθρωποι πάσχουν από οστεοπόρωση, κάτι που κάθε χρόνο συνεπάγεται 1.3 εκατομμύρια κατάγματα, από τα οποία τα 250.000 κατάγματα συμβαίνουν στο ισχίο. Η ποιότητα ζωής των ατόμων που έχουν υποστεί οστεοπορωτικά κατάγματα μειώνεται δραματικά καθώς σε αρκετές περιπτώσεις τα άτομα αυτά αδυνατούν να αναλάβουν εκ' νέου τις φυσιολογικές τους δραστηριότητες. Σχεδόν το 50% των ατόμων που έχουν υποστεί κατάγματα στο ισχίο υπόκεινται σε έντονες αλλαγές της κοινωνικής τους ζωής, ενώ ένα μεγάλο μέρος αυτών των ατόμων είναι απόλυτα εξαρτημένο από τη φροντίδα άλλων ανθρώπων. Στις ΗΠΑ περίπου 60.000 αιτήσεις το χρόνο σε ιδρύματα φροντίδας είναι άμεσα συνδεδεμένες με την οστεοπόρωση. Να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος της ετήσιας δαπάνης που προαναφέρθηκε αφορά τη νοσηλεία και τη φροντίδα στο σπίτι. [2]



Σχήμα 1.2 Το αντίκτυπο των οστεοπορωτικών σπονδυλικών καταγμάτων στην ποιότητα ζωής των γυναικών βάσει του δείκτη SF36

Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται ένα διάγραμμα όπου παρουσιάζεται ο αντίκτυπος των σπονδυλικών καταγμάτων στην ποιότητα ζωής των γυναικών, με βάση το δείκτη SF 36. Ο δείκτης αυτός βασίζεται σε 36 ερωτήσεις. Μέσω των ερωτήσεων παράγεται ένα προφίλ του ατόμου σε 8 τομείς που μετρούν την σωματική, ψυχική και πνευματική υγεία του ατόμου. [41]

Τα παραπάνω κάνουν εμφανή το μέγεθος του προβλήματος και το ανάγουν σε ένα μείζον ζήτημα τόσο για την υγεία όσο και για την οικονομία και την κοινωνία στο σύνολό της. Επομένως, η έρευνα και η συνεργασία των επιστημών, για την αντιμετώπιση και την κατανόηση, σε βάθος, της οστεοπόρωσης είναι εξαιρετικά σημαντική.

1.3 Ο ρόλος του Μηχανικού στην αντιμετώπιση του προβλήματος της οστεοπόρωσης

Συχνά, ακούγεται η άποψη ότι το ανθρώπινο σώμα είναι μια καλοσχεδιασμένη μηχανή. Η άποψη αυτή δεν είναι διόλου αβάσιμη, καθώς το ανθρώπινο σώμα θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι ένα σύνολο «εξαρτημάτων» – κύτταρα, ιστοί, οστά, μύες κ.τ.λ. – τα οποία συνεργάζονται με έναν αρκετά πολύπλοκο, αλλά πολύ αποτελεσματικό τρόπο, προκειμένου να θέσουν σε λειτουργία τη «μηχανή» που λέγεται άνθρωπος. Με βάση αυτή την οπτική γωνία τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το ανθρώπινο σώμα μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης του μηχανικού.

Η αντίληψη αυτή οδήγησε στη συνεργασία της επιστήμης της ιατρικής με την τεχνολογία δημιουργώντας έτσι τον κλάδο της Βιοϊατρικής Τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα, η συνεργασία της ιατρικής με τη μηχανική έχουν οδηγήσει στη δημιουργία του νέου κλάδου της Εμβιομηχανικής. Ο νέος αυτός κλάδος χρησιμοποιώντας τις μεθόδους της μηχανικής σε ιατρικά προβλήματα καλείται να δώσει νέες λύσεις σε πλήθος προβλημάτων υγείας, όπως είναι η οστεοπόρωση, που ταλαιπωρούν τον άνθρωπο.

Ένα από τα βασικά εργαλεία επίλυσης προβλημάτων της μηχανικής, και κατ' επέκταση της εμβιομηχανικής, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια υπολογιστική μέθοδος μηχανικής ανάλυσης που βασίζεται στην ανάλυση μιας πολύπλοκης γεωμετρίας σε ένα πλέγμα (mesh) πεπερασμένου αριθμού στοιχείων απλού σχήματος όπου στους κόμβους (nodes) του επιλύονται συγκεκριμένες διαφορικές εξισώσεις.

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Modeling) είναι η δυνατότητα που παρέχει να μελετούνται, από μηχανικής απόψεως, μοντέλα και όχι τα πραγματικά δοκίμια, η εύρεση των οποίων σε αρκετές περιπτώσεις, όπως και στην παρούσα εργασία, είναι δύσκολη (είναι αδύνατο να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά ενός σπονδύλου, που ανήκει σε ένα έμβιο ον). Από την άλλη βέβαια δεν πρέπει να ξεχνά κανείς ότι μέθοδος της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis) είναι μια υπολογιστική μέθοδος, που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που δίνει είναι προσεγγιστικά.

1.4 Ο σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) που διεξάγεται στα πλαίσια της εμβιομηχανικής τεχνολογίας, είναι η μελέτη της εξέλιξης της νόσου της οστεοπόρωσης στη σπονδυλική στήλη, με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον μελετάται η επίδραση της μοντελοποίησης των γειτονικών μεσοσπονδύλιων δίσκων στη συμπεριφορά των μοντέλων των υπό εξέταση σπονδύλων.

Αναλυτικότερα, μοντελοποιείται ο δωδέκατος θωρακικός (Θ12) και ο πρώτος οσφυϊκός (Ο1) σπόνδυλος δύο ασθενών με οστεοπόρωση σε δύο διαδοχικές καταστάσεις – πριν και

ένα χρόνο μετά τη χορήγηση φαρμακευτικής αγωγής. Για κάθε σπόνδυλο πραγματοποιούνται δύο διαφορετικές μοντελοποιήσεις, μία με και μία χωρίς τους γειτονικούς μεσοσπονδύλιους δίσκους. Το κάθε μοντέλο οστού υπόκειται σε θλίψη, κάμψη και έκταση.

1.5 Ανασκόπηση των κεφαλαίων της ΔΕ

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική περιγραφή της ανατομίας της σπονδυλικής στήλης ώστε ο αναγνώστης να έρθει σε επαφή με τη γεωμετρία και τις ιδιαιτερότητες του ανθρωπίνου οργάνου που μελετάται.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί η αναλυτικότερη περιγραφή της νόσου της οστεοπόρωσης, καθώς και των μηχανισμών ανάπτυξής της.

Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει τον τρόπο λειτουργίας του υπολογιστικού αξονικού τομογράφου καθώς επίσης και τις βασικές αρχές στις οποίες βασίζεται η λειτουργία του, δεδομένου ότι η πρώτη ύλη για την κατασκευή των μοντέλων είναι οι αξονικές τομογραφίες που ελήφθησαν από τις ασθενείς στο πλαίσιο τυπικών εξετάσεων.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται γενικά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και περιέχει μια σύντομη αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου όσον αφορά την εφαρμογή της στην παρούσα μα και σε παρόμοιες εργασίες. Επίσης, γίνεται μια σύντομη αναφορά σε άλλες εργασίες παρόμοιου αντικειμένου που έχουν πραγματοποιηθεί.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν προκειμένου να δημιουργηθούν τα μοντέλα των σπονδύλων. Αρχικά περιγράφεται πως γίνεται η επεξεργασία των τομογραφιών με χρήση λογισμικού επεξεργασίας ιατρικών εικόνων. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο το τριδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο εισάγεται σε λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων όπου δημιουργείται πλέγμα, και τέλος, περιγράφεται η διαδικασία της απόδοσης υλικών σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο.

Το έκτο κεφάλαιο πραγματεύεται τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Αφού γίνει μια ανασκόπηση σε εργασίες που έχουν ασχοληθεί με την εμβιομηχανική του μεσοσπονδύλιου δίσκου, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος στην παρούσα ΔΕ.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο επιβάλλονται οι οριακές συνθήκες στο κάθε μοντέλο και υπολογίζονται οι αριθμητικές οι τιμές των φορτίσεων ώστε να αντιστοιχούν στο σωματότυπο της κάθε ασθενούς.

Στο κεφάλαιο οχτώ αναλύονται τα αποτελέσματα του Θ12 με τους γειτονικούς μεσοσπονδύλιους δίσκους τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση και εντοπίζονται οι μεταβολές που συνέβησαν.

Στο κεφάλαιο εννέα γίνεται το ίδιο πράγμα για τον Θ12 χωρίς τους γειτονικούς μεσοσπονδύλιους δίσκους

Στο κεφάλαιο δέκα αναλύονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων κεφαλαίων δίνοντας βάση στη μεταβολή που προκάλεσε στα αποτελέσματα η μοντελοποίηση των εκατέρωθεν μεσοσπονδύλιων δίσκων.

Στο κεφάλαιο έντεκα αναλύονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της πρώτης και της δεύτερης κατάστασης για το μοντέλο του Ο1 με τους γειτονικούς μεσοσπονδύλιους δίσκους.

Στο κεφάλαιο δώδεκα ακολουθείται η ίδια διαδικασία για το μοντέλο του Ο1 αλλά χωρίς τη μοντελοποίηση των γειτονικών μεσοσπονδύλιων δίσκων

Στο κεφάλαιο δεκατρία συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δύο κεφαλαίων με έμφαση την επίδραση της μοντελοποίησης των εκατέρωθεν μεσοσπονδύλιων δίσκων και στις δύο καταστάσεις του.

Τέλος, στο κεφάλαιο δεκατέσσερα συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν τόσο για την εξέλιξη της νόσου σε δύο ασθενείς σε αντίστοιχο χρονικό διάστημα όσο και για την επίδραση των μεσοσπονδύλιων δίσκων στα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 2ο Ανατομικά στοιχεία της σπονδυλικής στήλης

2.1 Τα οστά της σπονδυλικής στήλης

Η σπονδυλική στήλη (Σ.Σ.) 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. Στο εσωτερικό της φιλοξενείται προστατευόμενος από αυτή ο νωτιαίος μυελός.

Η Σ.Σ. (Σχήμα 2.1) αποτελείται από 33-34 οστά, τους σπονδύλους, οι οποίοι φέρονται επάλληλα και χωρίζονται μεταξύ τους με τους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Οι σπόνδυλοι στο σύνολό τους αποτελούν το 1/4 του συνολικού μήκους της και χωρίζονται σε 5 μοίρες : την αυχενική, τη θωρακική, την οσφυϊκή, την ιερή και την κοκκυγική κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από συγκεκριμένο αριθμό σπονδύλων. Έτσι διακρίνονται: 7 αυχενικοί, 12 θωρακικοί, 5 οσφυϊκοί και 3-4 κοκκυγικοί. Οι αυχενικοί, οι θωρακικοί και οι οσφυϊκοί σπόνδυλοι είναι ανεξάρτητοι και ονομάζονται γνήσιοι. Οι ιεροί και κοκκυγικοί έχουν συνοστεωθεί μεταξύ τους και σχηματίζουν ενιαία οστά, το *ιερό οστό* και τον *κόκκυγα* αντίστοιχα, γι' αυτό ονομάζονται νόθοι σπόνδυλοι.



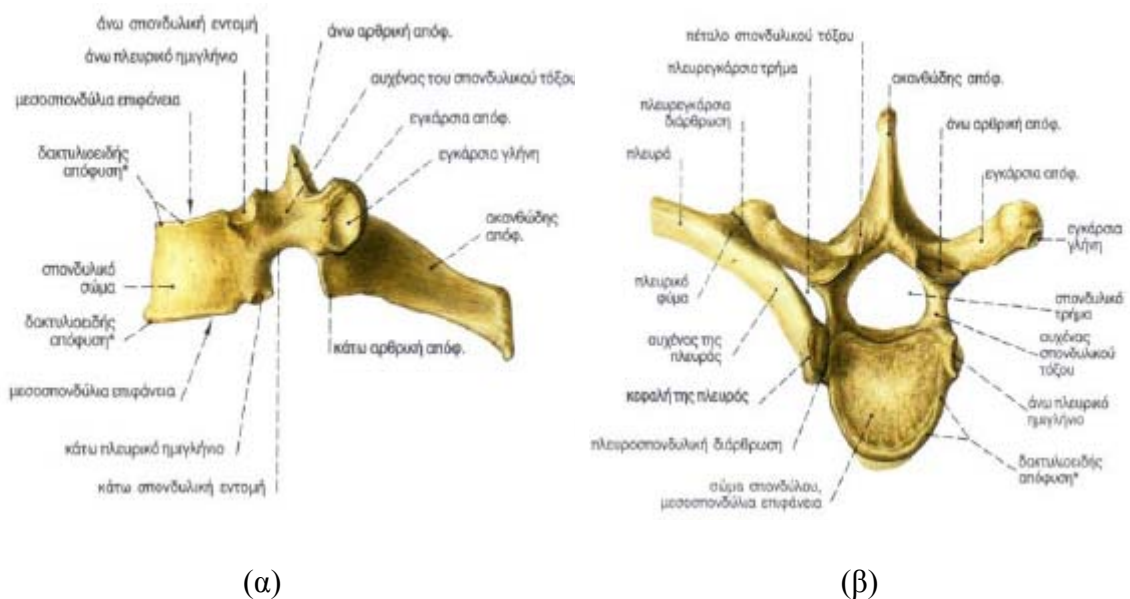
Σχήμα 2.1 Η σπονδυλική στήλη του ανθρώπου εμπρός πίσω και πλάγια (από αριστερά προς τα δεξιά)

2.2 Κοινά γνωρίσματα των γνήσιων σπονδύλων

Κάθε γνήσιος σπόνδυλος (Σχήμα 2.2) εμφανίζει τα εξής κύρια μέρη:

- Το σώμα
- Το τόξο

- Τις αποφύσεις
- Το σπονδυλικό τμήμα



Σχήμα 2.2 Δομικά χαρακτηριστικά του σπονδύλου (α) πλάγια και (β) από πάνω

2.2.1 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 τμήμα.

2.2.2 Το σπονδυλικό τόξο

Το σπονδυλικό τόξο φέρεται σαν κρίκος *πίσω από το σώμα* και αφορίζει με αυτό το *σπονδυλικό τμήμα*. 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 *κάτω σπονδυλική εντομή* (η κάτω βαθύτερη από την άνω). Οι σπονδυλικές εντομές των αλληλοδιαδόχων σπονδύλων σχηματίζουν τα μεσοσπονδύλια τμήματα, δια των οποίων διέρχονται τα νωτιαία νεύρα. Από το σπονδυλικό τόξο εκφύονται οι αποφύσεις των σπονδύλων.

2.2.3 Οι αποφύσεις των σπονδύλων

Από κάθε σπόνδυλο εκφύονται 7 αποφύσεις, που διακρίνονται σε:

- 3 μυϊκές: μια ακανθώδη και δύο εγκάρσιες

- 4 αρθρικές: δύο άνω και δύο κάτω, για την άρθρωση με τον υπερκείμενο και τον υποκείμενο σπόνδυλο.

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

Οι εγκάρσιες αποφύσεις (δεξιά-αριστερή) εκφύονται από το όριο αυχένα-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.

2.2.4 Το σπονδυλικό τμήμα

Το σπονδυλικό τμήμα αφορίζεται μπροστά από το σώμα κατά τα πλάγια και πίσω από το σπονδυλικό τόξο. Στη συντεταγμένη σπονδυλική στήλη το σύνολο των σπονδυλικών τμημάτων απαρτίζει το *σπονδυλικό ή νωτιαίο σωλήνα*, μέσα στον οποίο βρίσκεται ο νωτιαίος μυελός με 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).

2.3 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των 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..

2.3.1 Αυχενικοί σπόνδυλοι

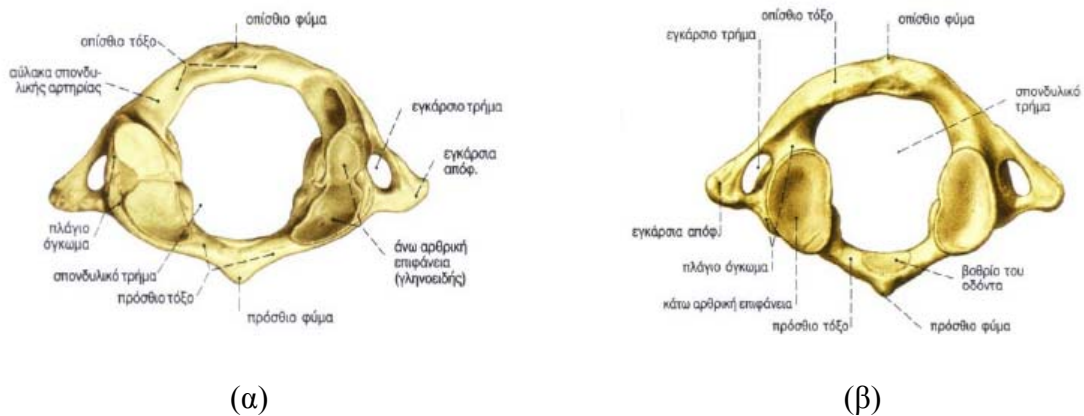
Κάθε αυχενικός σπόνδυλος έχει στην εγκάρσια απόφυσή του ένα τμήμα, το εγκάρσιο τμήμα. Το σύνολο των εγκαρσίων τμημάτων της αυχενικής μοίρας, απαρτίζει τον εγκάρσιο σωλήνα (δεξιά-αριστερά), ο οποίος εμφανίζει ατελή τοιχώματα συμπληρούμενα με μαλακά μόρια.

Οι εγκάρσιες αποφύσεις είναι βραχείες και εκφύονται από το σώμα με δύο ρίζες, την πρόσθια και την οπίσθια, μεταξύ των οποίων αφορίζεται το εγκάρσιο τμήμα. Η *πρόσθια ρίζα* αποτελεί υπόλειμμα πλευράς. Η *οπίσθια ρίζα* αντιστοιχεί στην πραγματική εγκάρσια απόφυση. Στην άνω επιφάνεια των εγκαρσίων αποφύσεων υπάρχει αβαθής αύλακα στην οποία πορεύεται το σύστοιχο νωτιαίο νεύρο. Το άκρο κάθε εγκάρσιας απόφυσης απολήγει στο πρόσθιο και οπίσθιο φύμα.

Το σώμα των αυχενικών σπονδύλων είναι το μικρότερο από όλους τους σπονδύλους και έχει μεγαλύτερη την εγκάρσια διάμετρο. Το *σπονδυλικό τμήμα* είναι ευρύ τριγωνικού σχήματος.

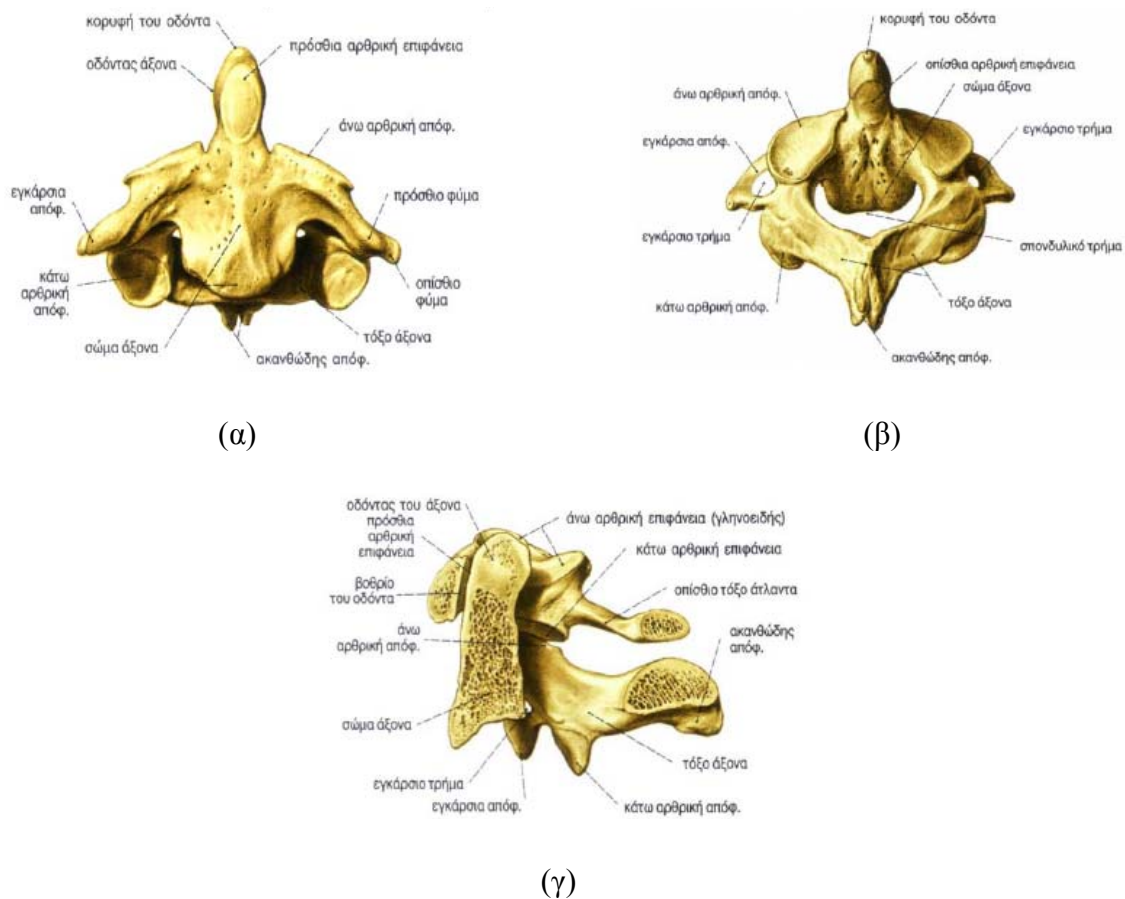
Όσον αφορά την *ακανθώδη απόφυση* εμφανίζει διασχιδές άκρο. Οι *αρθρικές επιφάνειες* των άνω αρθρικών αποφύσεων βλέπουν προς τα πίσω και άνω, ενώ των κάτω αρθρικών αποφύσεων βλέπουν προς τα πρόσω και κάτω.

Εκτός από τα παραπάνω κοινά γνωρίσματα όλων των αυχενικών σπονδύλων, ο πρώτος, ο δεύτερος και ο έβδομος αυχενικός σπόνδυλος έχουν διαφορετική μορφολογία. Ο *πρώτος αυχενικός σπόνδυλος* (Σχήμα 2.3) 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 πλαιίου ογκώματος εμφανίζει κοίλη αρθρική επιφάνεια τη *γληνοειδή κοιλότητα*. Με αυτήν αρθρώνεται ο άτλαντας με το σύστοιχο ινιακό κόνδυλο και σχηματίζουν την άνω κεφαλική ή ατλαντική διάρθρωση. Η κάτω επιφάνειά του συντάσσεται με τη σύστοιχη άνω αρθρική επιφάνεια του δεύτερου αυχενικού σπονδύλου. Στην έσω επιφάνεια κάθε πλαιίου ογκώματος υπάρχει *φύμα* για την πρόσφυση του εγκάρσιου συνδέσμου. Η πρόσθια επιφάνεια του πρόσθιου τόξου εμφανίζει το πρόσθιο αρθρικό φύμα και η οπίσθια επιφάνεια του οπίσθιου τόξου, το οπίσθιο αρθρικό φύμα, το οποίο αποτελεί υπόλειμμα της ακανθώδους απόφυσης. Στην άνω επιφάνεια του κάθε ημιμορίου του οπισθίου τόξου υπάρχει η *αύλακα της σπονδυλικής αρτηρίας*. Η οπίσθια επιφάνεια του πρόσθιου τόξου εμφανίζει το *βοθρίο οδόντος*, που χρησιμεύει για την άρθρωση του οδόντα με τον άξονα. Το σπονδυλικό τμήμα του πρώτου αυχενικού σπονδύλου εμφανίζει δύο μοίρες, την πρόσθια, που υποδέχεται τον οδόντα του άξονα και την οπίσθια για τη διέλευση του νωτιαίου μυελού.



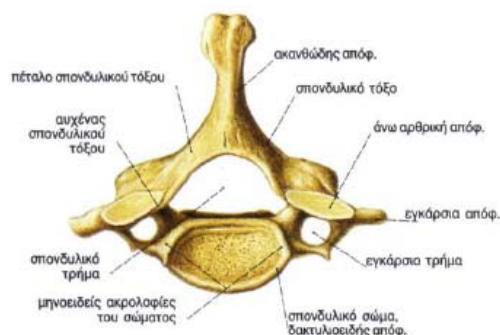
Σχήμα 2.3 Ο πρώτος αυχενικός σπόνδυλος, άτλαντας (α) πλάγια και (β) από κάτω

Ο *δεύτερος αυχενικός σπόνδυλος* ή *άξονας* (Σχήμα 2.4), 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 ατλαντοαξονικής διάρθρωσης (πρόσθια μέση ατλαντοαξονική).



Σχήμα 2.4 Ο δεύτερος αυχενικός σπόνδυλος, άτλαντας (α) πλάγια (β) από κάτω και (γ) ο πρώτος και ο δεύτερος αυχενικός σπόνδυλος μαζί

Ο έβδομος αυχενικός σπόνδυλος (Σχήμα 2.5) χαρακτηρίζεται από τη μακρά και άσχηστη ακανθώδη απόφυση, η οποία προέχει και γι' αυτό ονομάζεται *προέχων σπόνδυλο*. Η απόφυση αυτή χρησιμεύει σαν οδηγό σημείο στη ράχη για την αρίθμηση των σπονδύλων και των πλευρών.

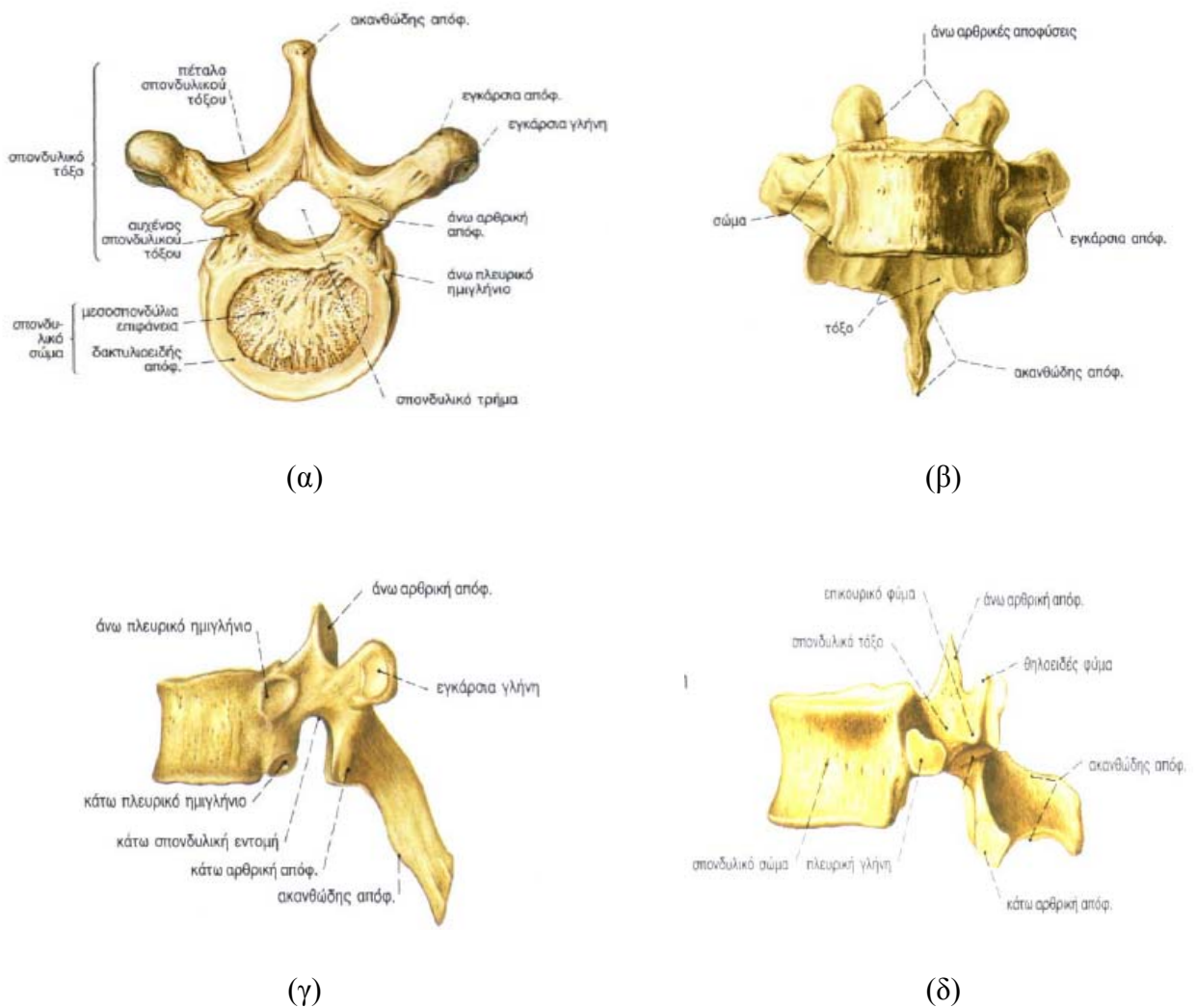


Σχήμα 2.5 Ο έβδομος αυχενικός σπόνδυλος

2.3.2 Θωρακικοί σπόνδυλοι

Οι θωρακικοί σπόνδυλοι (Σχήμα 2.6) χαρακτηρίζονται από:

- α) το *σώμα*, του οποίου το μέγεθος είναι μεγαλύτερο από αυτό των αυχενικών, μικρότερο από των οσφυϊκών και αυξάνει από τους πρώτους προς τους τελευταίους σπονδύλους,
- β) το *σπονδυλικό τμήμα*, το οποίο είναι μικρού σχετικά εύρους και στρογγυλό και
- γ) τις *ακανθώδεις αποφύσεις*, οι οποίες είναι μακρές και φέρονται σχεδόν κάθετα προς τα κάτω, επικαλύπτουσες τις υποκείμενες, όπως τα κεραμίδια.



Σχήμα 2.6 (α) ο πρώτος θωρακικός σπόνδυλος από πάνω (β) ο δέκατος θωρακικός σπόνδυλος από εμπρός (γ) ο έκτος θωρακικός σπόνδυλος από πλάγια και (δ) ο δωδέκατος θωρακικός σπόνδυλος από πλάγια

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των θωρακικών σπονδύλων είναι ότι παρουσιάζουν πρόσθετες αρθρικές επιφάνειες στο σώμα και στις εγκάρσιες αποφύσεις.

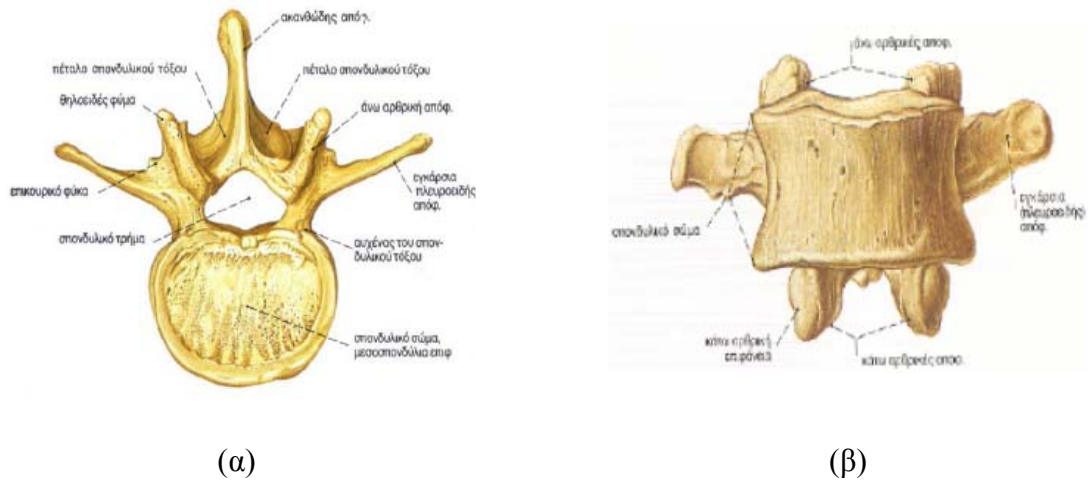
Οι αρθρικές επιφάνειες στα πλάγια του σώματος (άνω, κάτω δεξιά και άνω, κάτω αριστερά) ονομάζονται *πλευρικά ημιγλήνια*. Οι αρθρικές επιφάνειες στις εγκάρσιες αποφύσεις (μια δεξιά και μια αριστερά) ονομάζονται *εγκάρσιες γλήνες*.

Τα πλευρικά ημιγλήνια κάθε ημιμορίου του σώματος βρίσκονται αμέσως μπροστά από τις σπονδυλικές εντομές και ονομάζονται *άνω και κάτω πλευρικό ημιγλήνιο*. Στη συντεταγμένη Σ.Σ. τα πλευρικά ημιγλήνια των επάλληλων σπονδύλων σχηματίζουν την *τέλεια γλήνη*, που συντάσσεται με την κεφαλή της πλευράς. Η εγκάρσια γλήνη συντάσσεται με το φύμα της πλευράς. Έτσι, από κάθε πλευρά η κεφαλή συντάσσεται με την τέλεια γλήνη των δύο επάλληλων σπονδύλων και το φύμα της με την εγκάρσια απόφυση του υποκείμενου από τους δύο σπονδύλους. Εγκάρσια γλήνη δεν έχουν ο ενδέκατος και δωδέκατος 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 πρώτης πλευράς και ένα πλευρικό ημιγλήνιο προς τα κάτω για τη σύνταξη με το άνω μισό της κεφαλής της δεύτερης πλευράς.

2.3.3 Οσφυϊκοί σπόνδυλοι

Οι οσφυϊκοί σπόνδυλοι (Σχήμα 2.7) χαρακτηρίζονται από:

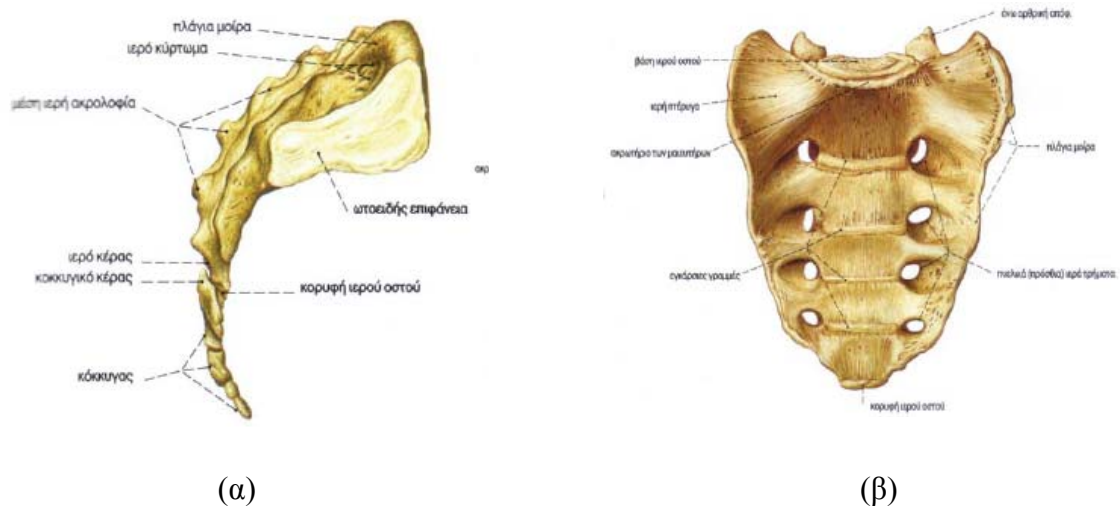
- α) το *σώμα* που είναι ογκώδες, νεφροειδούς σχήματος,
- β) τον *αυχένα* και το *πέταλό* που είναι παχιά,
- γ) το *σπονδυλικό τμήμα* που είναι τριγωνικού σχήματος,
- δ) τις *εγκάρσιες αποφύσεις* που είναι μακρές, λεπτές και φέρονται προς τα έξω,
- ε) την *ακανθώδη απόφυση* που είναι παχιά, βραχεία και τετράπλευρη και φέρεται κατευθείαν προς τα πίσω,
- στ) το *επικουρικό φύμα* στην εγκάρσια απόφυση και το *θηλοειδές φύμα* στην άνω αρθρική απόφυση και τέλος,
- ζ) τις *αρθρικές αποφύσεις* που έχουν αρθρικές επιφάνειες που φέρονται σε οβελιαίο επίπεδο και οι μεν άνω βλέπουν προς τα έσω, οι δε κάτω βλέπουν προς τα έξω.



Σχήμα 2.7 Ο τέταρτος οσφυϊκός σπόνδυλος (α) από επάνω και (β) από εμπρός

2.3.4 Το ιερό οστό

Οι ιεροί σπόνδυλοι (Σχήμα 2.8) συνοστεωθέντες μεταξύ τους αποτελούν ενιαίο οστό, το *ιερό οστό* το οποίο έχει σχήμα τετράπλευρης πυραμίδας, αποπλατυσμένης από εμπρός προς τα πίσω.



Σχήμα 2.8 Το ιερό οστό (α) από πλάγια και (β) από εμπρός και κάτω

Περιγραφικά εμφανίζει βάση, κορυφή, και τέσσερις επιφάνειες πρόσθια, οπίσθια και δύο πλάγιες. Το ιερό οστό, παρεμβαλλόμενο μεταξύ ανωνύμων οστών με τα οποία αρθρώνεται, σχηματίζει με αυτά την *πέελο ή λεκάνη*.

Η *βάση* του ιερού οστού συντάσσεται με τον τελευταίο οσφυϊκό σπόνδυλο και σχηματίζει με αυτόν γωνία, που προέχει προς τα πρόσω, λέγεται ακρωτήριο των μαιευτήρων και έχει εξαιρετική κλινική σημασία στη μαιευτική. Δεξιά και αριστερά από την άνω αρθρική επιφάνεια του σώματος του πρώτου ιερού σπονδύλου βρίσκονται οι άνω αρθρικές

αποφύσεις, η άνω σπονδυλική εντομή και επί τα εκτός αυτών τα *ιερά πτερύγια*. Πίσω από το σώμα βρίσκεται το άνω στόμιο του ιερού σωλήνα.

Η *κορυφή* του ιερού οστού αρθρώνεται με τον κόκκυγα και πίσω της υπάρχει το *ιερό σχίσμα*, του οποίου τα σκέλη καταλήγουν στα ιερά κέρατα. Το ιερό σχίσμα σχηματίζεται γιατί δεν υπάρχει πέταλο στον πέμπτο και σπανιότερα στον τέταρτο ιερό σπόνδυλο.

Η *πρόσθια επιφάνεια* του ιερού οστού είναι υπόκοιλη και εμφανίζει τα πρόσθια ιερά τμήματα, τα οποία ανά τέσσερα δεξιά και αριστερά, χρησιμεύουν για τη διέλευση των πρόσθιων κλάδων των ιερών νεύρων. Ανάμεσα στους δύο στοίχους των πρόσθιων ιερών τρημάτων περιλαμβάνεται η περιοχή των συνοστεοθέντων σωμάτων των ιερών σπονδύλων, η οποία σχηματίζει τέσσερις εγκάρσιες γραμμώσεις που αντιστοιχούν στις θέσεις συνοστέωσης.

Η οπίσθια επιφάνεια του ιερού οστού είναι υπόκυρτη και ανώμαλη. Εμφανίζει:

(α) τη *μέση ιερή ακρολοφία*, που σχηματίζεται από υπολείμματα των ακανθωδών αποφύσεων των ιερών σπονδύλων και προς τα κάτω τελειώνει στο *ιερό σχίσμα*.

(β) την *αρθρική ιερή ακρολοφία*, επί τα εκτός της προηγούμενης, που σχηματίζεται από τη συνοστέωση των αρθρικών αποφύσεων των ιερών σπονδύλων.

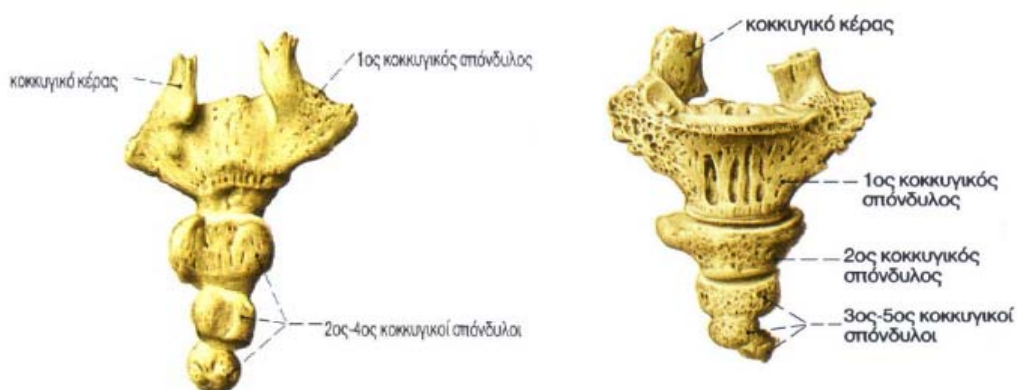
(γ) τα *οπίσθια ιερά τμήματα*, δεξιά και αριστερά, επί τα εκτός από την προηγούμενη ακρολοφία. Από τα τμήματα αυτά διέρχονται οι οπίσθιοι κλάδοι των ιερών νεύρων.

(δ) την *πλάγια ή εγκάρσια ιερή ακρολοφία*, που βρίσκεται δεξιά και αριστερά, επί τα εκτός των οπίσθιων ιερών τρημάτων και σχηματίζεται από τη συνοστέωση των εγκάρσιων αποφύσεων των ιερών σπονδύλων.

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

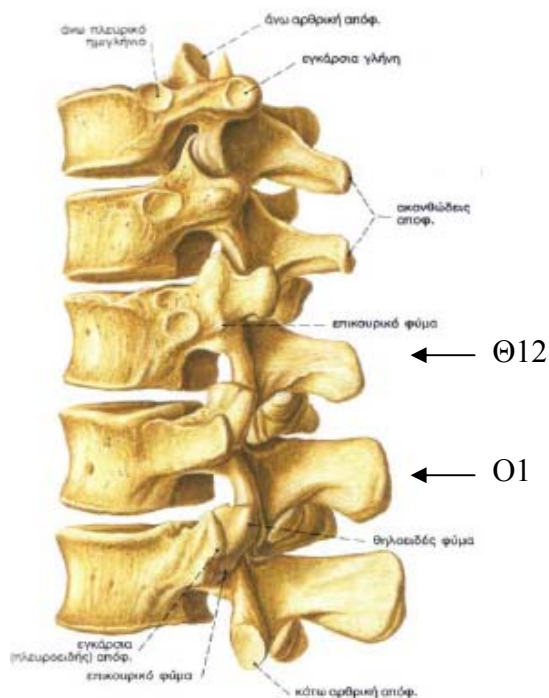
2.3.5 Ο κόκκυγας

Ο κόκκυγας, (Σχήμα 2.9), έχει πυραμοδοειδές σχήμα και προέρχεται από συνοστέωση των τεσσάρων ή πέντε κοκκυγικών σπονδύλων. Η βάση του αρθρώνεται με την κορυφή του ιερού 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 ιερού νεύρου. Η κορυφή του κόκκυγα καταλήγει σε μικρό φύμα που αποτελεί υπόλειμμα του σώματος του τελευταίου κοκκυγικού σπονδύλου.



Σχήμα 2.9 Ο κόκκυγας

Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται το κομμάτι της σπονδυλικής στήλης στο οποίο ανήκουν οι σπόνδυλοι που θα μελετηθούν στη συνέχεια



Σχήμα 2.10 Οι σπόνδυλοι που παρουσιάζονται στην εργασία

Πιο συγκεκριμένα, από πάνω προς τα κάτω, φαίνονται οι σπόνδυλοι Θ10-Θ12 και Ο1-Ο2. Οι σπόνδυλοι Θ12 και Ο1 θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία

2.4 Μεσοσπονδύλιες συγγονδρώσεις

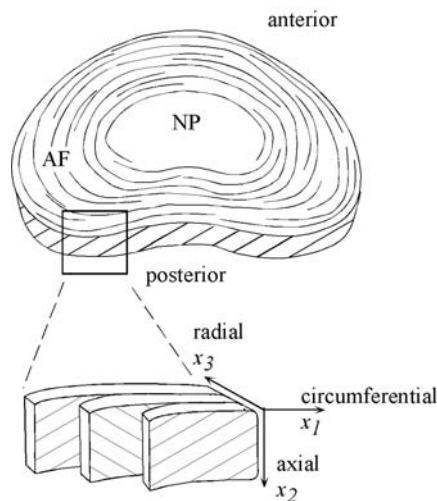
Τα σώματα των σπονδύλων αρθρώνονται μεταξύ τους με την παρεμβολή ινοχόνδρινων δίσκων, των μεσοσπονδύλιων συνδέσμων ή μεσοσπονδύλιων δίσκων.

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 κινήσεών τους. Το συνολικό πάχος τους ανέρχεται στο $\frac{1}{4}$ του μήκους της Σ.Σ. Γενικά, οι δίσκοι είναι παχύτεροι στην οσφυϊκή μοίρα και ανθεκτικότεροι από εκείνους της θωρακικής και αυχενικής μοίρας.

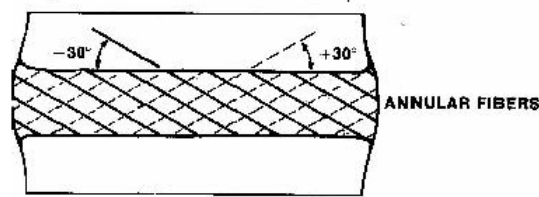
Λόγω των φυσικών ιδιοτήτων τους και της ελαστικότητας τους οι δίσκοι λειτουργούν ως απορροφητές των δονήσεων και ταυτόχρονα επιτρέπουν τη σχετική κίνηση του ενός σπονδύλου ως προς τον άλλο. Οι φυσικές αυτές ιδιότητες χάνονται με την πάροδο του χρόνου.

Κάθε μεσοσπονδύλιος δίσκος αποτελείται από το περιφερικό μέρος, τον ινώδη δακτύλιο, και από το κεντρικό μέρος, τον πηκτοειδή πυρήνα (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11 Ο Μεσοσπονδύλιος δίσκος. Στο κέντρο διακρίνεται ο πηκτοειδής πυρήνας ενώ περιφερικά φαίνονται τα επίπεδα του ινώδη δακτυλίου

Ο ινώδης δακτύλιος αποτελείται από ινώδη και ελαστικό χόνδρο με κολλαγόνες ίνες σε διάταξη ομόκεντρων πεταλίων. Οι δεσμίδες των κολλαγόνων ινών εισδύουν κατά λοξή φορά στους παρακείμενους σπονδύλους και οι περιφερικότερες απ' αυτές προσφύονται στερεά στον πρόσθιο και τον οπίσθιο επιμήκη σύνδεσμο της Σ.Σ (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12 Κολλαγόνες ίνες του ινώδους δακτυλίου. Οι κολλαγόνες ίνες του δακτυλίου σχηματίζουν γωνία 30° με το επίπεδο του δακτυλίου.

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

Σε απότομη αύξηση της συμπίεσης κατά μήκος της Σ.Σ. ο πηκτοειδής πυρήνας αποπλάτνεται. Η αποπλάτυνση αυτή περιορίζεται από τον ινώδη δακτύλιο. Μερικές φορές όμως, λόγω ισχυρότερης πίεσης, η αποπλάτυνση μπορεί να προκαλέσει ρήξη του ινώδους δακτυλίου και προσβολή δια μέσου αυτής του πηκτοειδή πυρήνα.

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.

2.4.1 Σύνδεσμοι των μεσοσπονδύλιων συγχονδρώσεων

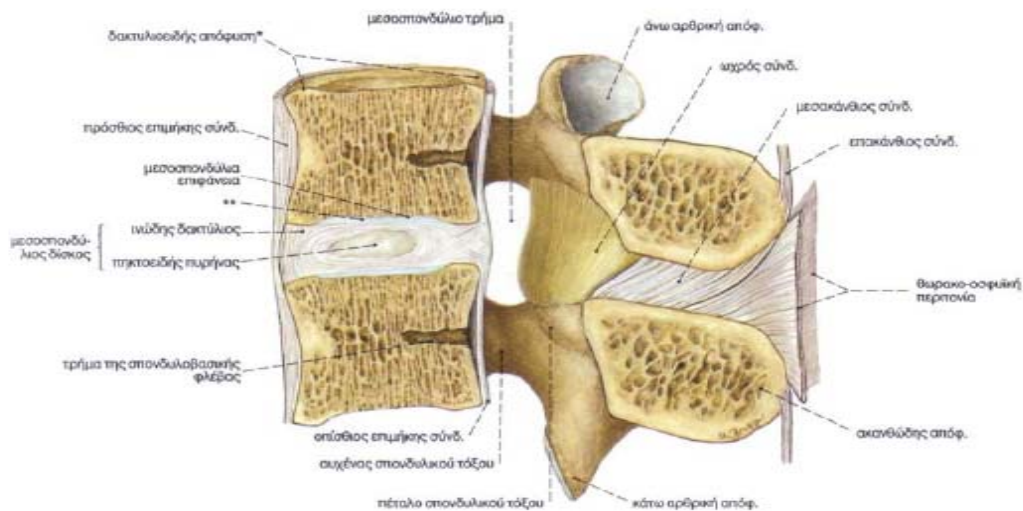
Εκτός από τους μεσοσπονδύλιους δίσκους, οι μεσοσπονδύλιες συγχονδρώσεις ενισχύονται από μπροστά και από πίσω με συνδέσμους που φέρονται επιμηκώς και συνεχώς μεταξύ των σωμάτων των σπονδύλων. Είναι ο *πρόσθιος* και ο *οπίσθιος επιμήκης* σύνδεσμος. Και οι δύο αρχίζουν από το ινιακό οστό και φέρονται αντίστοιχα κατά μήκος της πρόσθιας και της οπίσθιας επιφάνειας των σωμάτων των σπονδύλων.

Ο πρόσθιος επιμήκης σύνδεσμος εκτείνεται από τη βάση του κρανίου μέχρι την πρόσθια επιφάνεια του δεύτερου 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, προσφύμενος στην οπίσθια επιφάνεια των σωμάτων των σπονδύλων, εκτείνεται από τη βάση του κρανίου μέχρι το δεύτερο 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.

Στο Σχήμα 2.13 φαίνεται μια λειτουργική μονάδα της οσφυϊκής μοίρας στην οποία διαφαίνεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος καθώς και οι βασικοί σύνδεσμοι της οσφυϊκής μοίρας



Σχήμα 2.13 Λειτουργική μονάδα της οσφυϊκής μοίρας στην οποία διαφαίνεται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος και οι περιοχές που τον αποτελούν. Επίσης διαφαίνονται οι βασικοί σύνδεσμοι της οσφυϊκής μοίρας

2.5 Τα κυρτώματα της σπονδυλικής στήλης

Η Σ.Σ. στο σύνολο της εμφανίζει κυρτώματα κατά το μετωπιαίο και κατά το οβελιαίο επίπεδο.

2.5.1 Κυρτώματα κατά το οβελιαίο επίπεδο

Όταν βλέπουμε τη σπονδυλική στήλη από τα πλάγια, εμφανίζει 4 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.

Τα κυρτώματα αυτά παράγονται ως εξής:

Κατά την εμβρυϊκή ζωή η Σ.Σ. εμφανίζει ένα ενιαίο κύρτωμα με το κοίλο προς τα εμπρός. Περί το τέλος της εμβρυϊκής ζωής εμφανίζεται γωνίωση μεταξύ οσφυϊκής και ιερής μοίρας, που στρέφει το κυρτό της προς τα εμπρός. Μετά τη γέννηση και την ανύψωση της κεφαλής του νεογνού δημιουργείται το αυχενικό κύρτωμα. Περί το τέλος του πρώτου έτους και με την έναρξη της όρθια στάσης δημιουργείται το οσφυϊκό κύρτωμα. Στη γένεση των κυρτωμάτων μετά τη γέννηση συμβάλει η ανάλογη προσαρμογή του πάχους του σώματος των σπονδύλων και των μεσοσπονδύλιων δίσκων.

Στους ενήλικες, παράγοντες που επιδρούν στο βαθμό ανάπτυξης των κυρτωμάτων είναι το υποβασταζόμενο από τη σπονδυλική στήλη βάρος, το επάγγελμα και οι ατομικές συνήθειες. Η υπέρμετρη ανάπτυξη του θωρακικού κυρτώματος αποτελεί κύφωση, του δε οσφυϊκού τη λόρδωση.

2.5.2 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 (δεξιόχειρία-αριστεροχειρία). Στους δεξιόχειρες το θωρακικό κύρτωμα στρέφει το κυρτό του προς τα δεξιά και τα άλλα δύο προς τα αριστερά. Η υπέρμετρη ανάπτυξη αυτών των κυρτωμάτων αποτελεί τη σκολίωση της Σ.Σ.

2.6 Κινήσεις της σπονδυλικής στήλης

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

- α) τη χαλαρότητα του αρθρικού θυλάκου
- β) το πάχος και τη φυσική κατάσταση των μεσοσπονδύλιων δίσκων,
- γ) το σχήμα και τη φορά των αρθρικών επιφανειών, και
- δ) 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 Σ.Σ. 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 από την κάμψη. Η προς τα πρόσω μεγάλη κάμψη του κορμού αποδίδεται κυρίως στην κάμψη της κεφαλής 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 όρθιου ατόμου γίνεται με στροφή της πυέλου στους μηρούς και όχι με στροφή της Σ.Σ. [3]

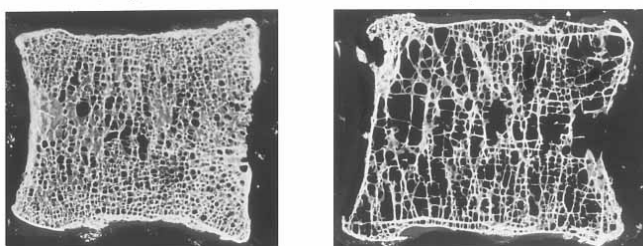
Κεφάλαιο 3ο Η νόσος της οστεοπόρωσης

3.1 Γενικά

Η οστεοπόρωση, η οποία αποτελεί τη συχνότερη μεταβολική πάθηση των οστών, χαρακτηρίζεται από παράλληλη ελάττωση των αλάτων και της θεμέλιας ουσίας των οστών, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η ποσότητα του οστίτη ιστού χωρίς να επηρεάζεται η κανονική σύστασή του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ευθραυστότητας του οστού και τη μείωση της αντοχής του, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αναίτια κατάγματα. Η μηχανική αντοχή του οστού δεν εξαρτάται μόνο από την οστική του πυκνότητα αλλά και από άλλους παράγοντες. Δηλαδή, σύμφωνα με τη σημερινή αντίληψη, η οστεοπόρωση δεν είναι μόνο ποσοτική διαταραχή του οστού μα και ποιοτική. Δυστυχώς όμως, κλινικά μπορεί να μετρηθεί μόνο η οστική πυκνότητα με μη επεμβατικές μεθόδους. Οι γυναίκες κατά τη διάρκεια της ζωής τους χάνουν περίπου το 50% του σπογγώδους και το 30% του φλοιώδους οστίτη ιστού τους ενώ μετά την εμμηνόπαυση το 30% των λευκών γυναικών υφίσταται τελικά οστεοπορωτικά κατάγματα. Στις πολύ μεγάλες ηλικίες το 1/3 όλων των γυναικών και το 1/6 όλων των ανδρών θα υποστούν κάταγμα στο ισχίο. [4]

3.2 Αιτιολογία και Παθογένεση

Η ανάπτυξη της οστεοπόρωσης προέρχεται από μια σχετική αύξηση της οστικής απορρόφησης σε σχέση με το σχηματισμό νέου οστού στο σκελετό του ενήλικου. Αυτή η διαταραχή σύζευξης του οστικού μεταβολισμού μπορεί να παρατηρηθεί μέσα από μια αύξηση στην οστική απορρόφηση ή μια ελάττωση του σχηματισμού νέου οστού. Είναι βέβαια πιθανό να συμβάλλουν και οι δύο αυτές διεργασίες. Η προκύπτουσα χαμηλή οστική μάζα δεν έχει επαρκή δομική ακεραιότητα για να αντέξει στις μηχανικές φορτίσεις του σκελετού και έτσι προκύπτουν κατάγματα.



Σχήμα 3.1 Αριστερά φαίνεται ο υγιής σπόνδυλος Ο2 37χρονου ανδρός ενώ δεξιά ο οστεοπορωτικός σπόνδυλος Ο2 75χρονης γυναίκας.

Η αδρή μηχανική ανεπάρκεια του σκελετού που οδηγεί σε κάταγμα αντιπροσωπεύεται σε μικροσκοπικό επίπεδο από τη μικροαρχιτεκτονική βλάβη, η οποία περιλαμβάνει τη διάτρηση και την αποσύνδεση των δοκίδων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1.

Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της οστικής μάζας, που μετράται και προσδιορίζεται ποσοτικά ως οστική πυκνότητα (BMD) και του κινδύνου για κάταγμα. Για ελάττωση της τυπικής απόκλισης (SD) της BMD, η οποία αντιπροσωπεύει 10-12% πτώση της BMD, υπάρχει 1,4 έως 2,5 φορές μεγαλύτερος κίνδυνος καταγμάτων. Η σχέση αυτή μεταξύ BMD και αυξημένου σχετικού κινδύνου κατάγματος είναι στενότερη για την περιοχή της μέτρησης, αλλά μια χαμηλή τιμή BMD μπορεί επίσης να συνδέεται με έναν αυξημένο κίνδυνο κατάγματος σε οποιαδήποτε θέση του σκελετού.

3.3 Παράγοντες Κινδύνου της οστεοπόρωσης

Οι παράγοντες κινδύνου της οστεοπόρωσης είναι οι εξής:

- Χαμηλή πυκνότητα σε άλατα του οστού (BMD)
- Ηλικία και γένος
- Στεροειδή και γονάδων
- Καθυστερημένη έναρξη εμμηνορρουσίας
- Πρώιμη εμμηνόπαυση
- Αφαίρεση ωοθηκών
- Αμηνόρροια
- Ατοκία
- Γενετική ανεπάρκεια ή απώλεια
- Καταστολή από φάρμακα, π.χ. γλυκοκορτικοειδή
- Παράγοντες διατροφής και μεταβολισμού αλάτων
- Χαμηλή πρόσληψη, ειδικά κατά τη διάρκεια της οστικής ανάπτυξης των:
 - Ασβέστιο
 - Βιταμίνη D
- Χρόνια περίσσεια σε:
 - Φώσφορο και νάτριο
 - Θυρεοειδής ορμόνες
 - Πρωτεΐνη
 - Καφεΐνη, τσιγάρα, αλκοόλ
- Ασβεστιουρικούς παράγοντες ειδικά θειαζίδες
- Αδυναμία στη διατήρηση νεφρικού ασβεστίου

- Χαμηλό σωματικό βάρος
- Γρήγορη και ουσιαστική απώλεια βάρους
- Νευρογενής ανορεξία και βουλιμία
- Αυξημένοι οστικοί δείκτες
- Κληρονομικότητα /γενετικοί παράγοντες
- Φυλή: Καυκάσια ή Ασιατική
- Θηλυκό γένος και πρόωρη λεύκανση μαλλιών
- Συγγενής με οστεοπόρωση
- Συγγενής με μη τραυματικό κάταγμα
- Λεπτή σωματική κατασκευή: Χαμηλή σχέση βάρους με ύψος
- Μακρύτερος άξονας του ισχίου
- Ακινησία (χρόνια)
- Κάκωση νωτιαίου μυελού
- Αρθρίτιδα
- Εγκεφαλικό επεισόδιο
- Παράγοντες τρόπου ζωής
- Φάρμακα και νοσήματα
- Κάταγμα στον ίδιο τον ασθενή ή σε συγγενή πρώτου βαθμού
- Πτώση

Οι περισσότεροι από τους παράγοντες κινδύνου έχουν επισημανθεί κατά τη διάρκεια επιδημιολογικών μελετών, και έτσι η αιτιολογία τους δεν έχει προσδιοριστεί με σαφήνεια. Παρόλα αυτά, φαίνεται να συμβάλλουν ανεξάρτητα στον παράγοντα κινδύνου. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι οι παράγοντες κινδύνου που αναφέρονται παραπάνω αφορούν τόσο το κάταγμα όσο και την απώλεια οστού και συνήθως και τα δύο. Επίσης, είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι ορισμένοι παράγοντες κινδύνου είναι τροποποιήσιμοι όπως συμβαίνει με τη χαμηλή τιμή της BMD, τις χαμηλές ποσότητες των στεροειδών, την κακή διατροφή, το σεξ, τον κακό τρόπο ζωής ενώ άλλοι παράγοντες όπως οι γενετικοί παράγοντες και η ηλικία είναι μη τροποποιήσιμοι. Οι τροποποιήσιμοι παράγοντες αποτελούν το αντικείμενο της θεραπείας.

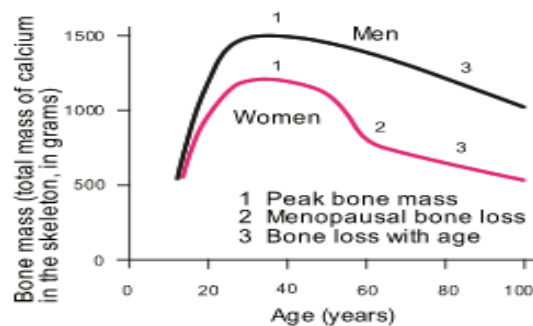
3.4 Οστική πυκνότητα και ηλικία: Κορυφαία /Μέγιστη Οστική Μάζα

Η απώλεια της οστικής μάζας που συνδέεται με την ηλικία, είναι μια σημαντική συνιστώσα, ουσιαστικά όλων των μορφών οστεοπόρωσης. Η κορυφαία οστική μάζα συνήθως επιτυγχάνεται στους ενήλικους κατά την τρίτη δεκαετία. Παράγοντες που επηρεάζουν την κορυφαία οστική μάζα είναι οι εξής:

- Φύλο
- Φυλή
- Γενετικοί παράγοντες
- Στεροειδή των γονάδων
- Αυξητική ορμόνη
- Χρόνος έναρξης της ενήβωσης
- Πρόσληψη ασβεστίου
- Άσκηση

Η διατροφική επάρκεια της βιταμίνης D ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της εφηβείας προάγει την ανάπτυξη της οστικής μάζας, το ίδιο συμβαίνει και με την πραγματική δραστηριότητα στη διάρκεια αυτής της χρονικής φάσης. Στην ηλικία των 20 ετών, η μέση γυναίκα έχει αποκτήσει το μεγαλύτερο μέρος της σκελετικής της μάζας. Οι άντρες έχουν μεγαλύτερη οστική πυκνότητα από τις γυναίκες. Οι μαύροι έχουν υψηλότερη οστική μάζα από τους καυκάσιους ή τους Ασιάτες.

Μετά την επίτευξη της κορυφαίας οστικής μάζας παρατηρείται μια προοδευτική πτώση της οστικής μάζας υπό την επίδραση του χρόνου, ουσιαστικά σε όλα τα άτομα. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται μια τυπική καμπύλη μεταβολής της οστικής μάζας τόσο για τους άνδρες όσο και για τις γυναίκες.



Σχήμα 3.2 Η πορεία της οστικής μάζας στους άνδρες και στις γυναίκες σε σχέση με την ηλικία

Η πτώση της οστικής μάζας είναι μεγαλύτερη στις γυναίκες απ' ότι στους άντρες και αρχίζει στη χρονική περίοδο γύρω από την εμμηνόπαυση ενώ επιταχύνεται μετά την εμμηνόπαυση. Οι γυναίκες μπορεί να χάσουν το 20% της οστικής τους μάζας κατά το 5^ο έως 7^ο έτος μετά την εμμηνόπαυση. Ο αυξημένος αυτός ρυθμός απώλειας οστικής μάζας μειώνεται πριν τη συμπλήρωση της πρώτης δεκαετίας μετά την εμμηνόπαυση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.

Είναι δύσκολο να τραβήξει κανείς μια διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στη φυσιολογική διαδικασία απώλειας οστικής μάζας που σχετίζεται με την ηλικία και εκείνη της παθολογικής διαδικασίας που οδηγεί σε ανάπτυξη οστεοπενίας και οστεοπόρωσης. Η επέλευση του κατάγματος είναι το κλινικό γεγονός που κάνει αυτή τη διάκριση.

3.5 Κλινική εικόνα της οστεοπόρωσης

Η οστεοπόρωση διακρίνεται σε πρωτοπαθής και δευτεροπαθής.

3.5.1 *Πρωτοπαθής οστεοπόρωση*

Πρόκειται για μια μεταβολική ασθένεια των οστών, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλή οστική μάζα και διαταραχή της μικροαρχιτεκτονικής των οστών. Η πρωτοπαθής οστεοπόρωση οφείλεται είτε σε ορμονική δυσλειτουργία είτε στην προχωρημένη ηλικία των ασθενών. Διακρίνουμε τρεις τύπους πρωτοπαθούς οστεοπόρωσης οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω, την *τύπου I ή μετεμμηνοπαυσιακή οστεοπόρωση*, την *τύπου II ή γεροντική οστεοπόρωση* και την *ιδιοπαθή οστεοπόρωση*. Οι δύο πρώτοι τύποι οστεοπόρωσης είναι δυνατό να υπάρχουν ταυτόχρονα σε έναν ασθενή, ιδίως αν πρόκειται για γυναικά άνω των 70 ετών.

Τύπου I ή μετεμμηνοπαυσιακή οστεοπόρωση

Η οστεοπόρωση τύπου I πλήττει κυρίως το γυναικείο πληθυσμό (αναλογία ανδρών-γυναικών 1:6). Οι γυναίκες, οι οποίες μετά τη διακοπή της εμμηνορρυσίας, εμφανίζουν οστεοπενία βαρύτερη από την αναμενόμενη για την ηλικία τους αναφέρονται ως ασθενείς με τύπου I ή μετεμμηνοπαυσιακή οστεοπόρωση. Η συγκεκριμένη κατηγορία της νόσου χαρακτηρίζεται από απώλεια ιδίως του δοκιδώδους οστού που οφείλεται στη μείωση παραγωγής οιστρογόνων. Η οστεοπόρωση τύπου I πολλές φορές εκδηλώνεται, κλινικά, με συντριπτικά κατάγματα ή με κατάγματα τύπου Colles.

Τύπου II ή γεροντική οστεοπόρωση

Ο τύπος II οστεοπόρωσης αναφέρεται στην οστεοπόρωση που σχετίζεται με την ηλικία και χαρακτηρίζεται από την απώλεια τόσο του δοκιδώδους όσο και του φλοιώδους οστού τόσο στους άνδρες όσο και στις γυναίκες. Πέραν της ανεπάρκειας παραγωγής οιστρογόνων, η οστεοπόρωση τύπου II υποστηρίζεται ότι οφείλεται στην μείωση της

λειτουργίας οργάνων που συντηρούν το μεταβολισμό του ασβεστίου και στον δευτεροπαθή υπερθυρεοειδισμό, καταστάσεις που σχετίζονται με την ηλικία. Επειδή στην οστεοπόρωση τύπου II η απώλεια φλοιώδους και δοκιδώδους οστού είναι πιο ισορροπημένη, συνήθως παρατηρούνται κατάγματα του ισχίου, της πυέλου, του καρπού, της ανώτερης μοίρας του βραχιονίου οστού, της ανώτερης μοίρας της κνήμης και των σπονδυλικών καταγμάτων.

Ιδιοπαθής οστεοπόρωση

Πρόκειται για εξαιρετικά σπάνια μορφή της νόσου. Εμφανίζεται σε άτομα άνω των 50 ετών αλλά είναι πιθανό, για άγνωστους λόγους, να εμφανιστεί και σε παιδιά ή ενηλίκους μέχρι 40 ετών. Η νόσος αντιμετωπίζεται με αύξηση της ορμονικής δραστηριότητας.

3.5.2 Δευτεροπαθής οστεοπόρωση

Δευτεροπαθής οστεοπόρωση είναι μια μη ικανοποιητική ονομασία που έχει δοθεί σε μια φτωχά περιγεγραμμένη ομάδα νοσημάτων που χαρακτηρίζονται από ελαττωμένη οστική μάζα και αυξημένο κίνδυνο κατάγματος – που πιθανώς προκαλείται από ειδικές κλινικές διαταραχές και συνδέεται με αυτές – και είναι ευδιάκριτη από την πρωτοπαθή οστεοπόρωση. Στην ομάδα αυτή νοσημάτων μπορεί να διαπιστωθεί ή να ενοχοποιηθεί ένας ειδικός αιτιολογικός παράγοντας.

Τα χαρακτηριστικά της δευτεροπαθούς οστεοπόρωσης συνήθως κυριαρχούνται από τις επιδράσεις του προκλητικού παράγοντα και η θεραπεία κατευθύνεται κυρίως σε αυτόν τον παράγοντα. Παρακάτω παρατίθενται τα αίτια δευτερογενούς οστεοπόρωσης:

- Φάρμακα που προάγουν την απορρόφηση των οστών
- Ενδοκρινικά και Μεταβολικά Νοσήματα
- Δυσασπορρόφηση
- Ιστιοκύττωση
- Λεμφο- και Μυελοβλαστική Νόσος
- Κάκωση Νωτιαίου Μυελού (ακινησία)
- Διαστημική Πτήση (έλλειψη βαρύτητας)
- Ορισμένες Αρθρίτιδες (π.χ. ρευματοειδής αρθρίτιδα) [5]

3.6 Οστικά κατάγματα

Η εκδήλωση οστικών καταγμάτων στους σπονδύλους είναι κάτι κοινό, ιδιαίτερα σε ενήλικες της τρίτης ηλικίας. Βασική αιτία πρόκλησης των οστικών καταγμάτων είναι η οστεοπόρωση. Τα οστικά κατάγματα μπορεί να είναι από ήπια μέχρι πολύ έντονα. Τα

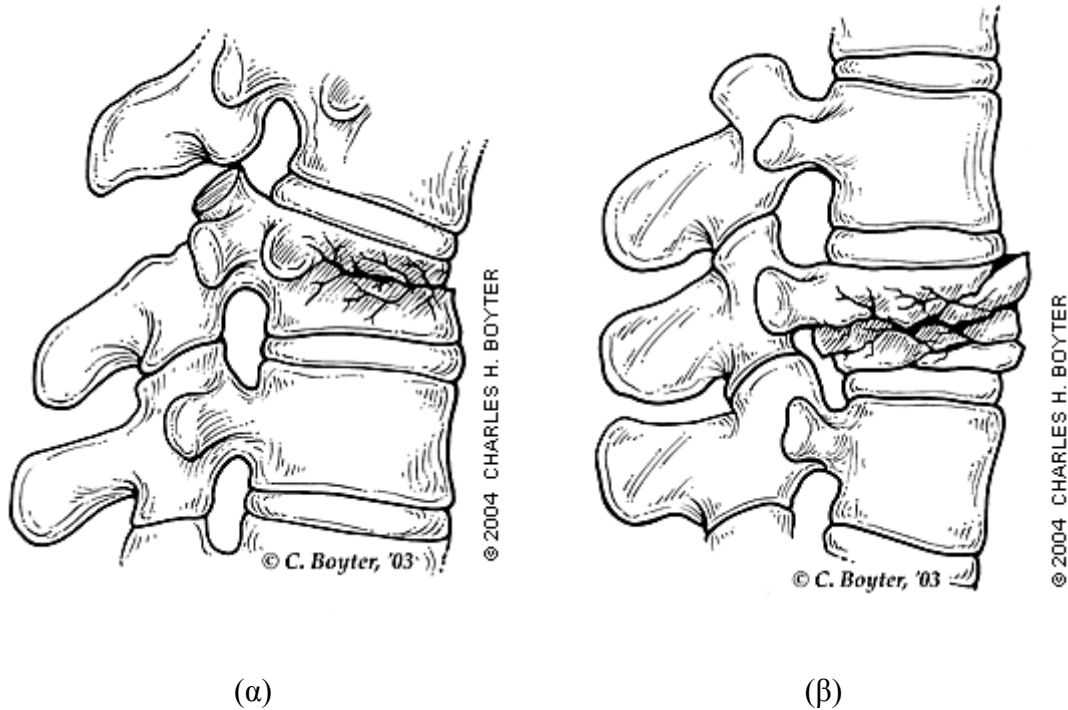
έντονα οστικά κατάγματα μπορεί να προκαλέσουν στον ασθενή έντονο πόνο και προβλήματα στην εκτέλεση των καθημερινών δραστηριοτήτων του ατόμου μέχρι και θάνατο ιδιαίτερα στα ηλικιωμένα άτομα.

Τα οστικά κατάγματα αποτελούν το σήμα κατατεθέν της οστεοπόρωσης και για το λόγο αυτό οι παράγοντες που οδηγούν στην εκδήλωσή τους είναι παρόμοιοι με εκείνους που οδηγούν και στην οστεοπόρωση. Στις ΗΠΑ το 25% όλων των γυναικών που έχουν περάσει την εμμηνόπαυση υποφέρουν από οστεοπορωτικά κατάγματα.

Τα έντονα οστικά κατάγματα προκαλούνται όταν το βάρος του σώματος ξεπερνά την τάση που μπορεί να φέρει το οστό. Γενικά, κάθε οστικό κάταγμα προκαλείται κατόπιν τραυματισμού του ατόμου. Ωστόσο σε περίπτωση που το άτομο πάσχει από οστεοπόρωση, σε προχωρημένο στάδιο, ο τραυματισμός αυτός μπορεί να προκληθεί από μια απλή καθημερινή πράξη, όπως το σήκωμα ενός απλού αντικειμένου ή ακόμα και το φτέρνισμα! Περισσότερο από το 30% των οστικών καταγμάτων συμβαίνουν όταν ο ασθενής βρίσκεται στο κρεβάτι. Σε περίπτωση που η οστεοπόρωση είναι σε αρχικό στάδιο, χρειάζεται μεγαλύτερη δύναμη-δηλαδή εντονότερος τραυματισμός- προκειμένου να προκληθεί οστικό κάταγμα, όπως για παράδειγμα η πτώση από σκάλα ή το σήκωμα υψηλού βάρους. Τέλος και μια υγιής σπονδυλική στήλη μπορεί να υποστεί οστικό κάταγμα ύστερα από έντονο τραυματισμό, όπως είναι ο τραυματισμός ύστερα από τροχαίο ατύχημα.

Η ασκούμενη δύναμη συνήθως προκαλεί το θρυμματισμό του μπροστινού μέρους του σπονδυλικού σώματος, σχηματίζοντας ένα σφηνοειδές μπροστινό κάταγμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3 (α). Το μεσαίο κομμάτι του σπονδυλικού σώματος παραμένει άθικτο και μπορεί να λειτουργήσει σαν «μεντεσές». Έτσι προκαλείται μείωση του ύψους του μπροστινού μέρους του σπονδυλικού σώματος ενώ το πίσω μέρος παραμένει ανεπηρέαστο. Το γεγονός αυτό οδηγεί τη σπονδυλική στήλη στο να γύρει μπροστά προκαλώντας στο πάσχον άτομο κύφωση. Όταν το κάταγμα πλήττει ολόκληρο το σπονδυλικό σώμα τότε υφίσταται η περίπτωση του «καθιζήμενου σπονδύλου» (Σχήμα 3.3 (β)).

Τα οστικά κατάγματα μπορεί να είναι ύπουλα και να προκαλέσουν αρχικά μόνο ένα μικρό πόνο στην πλάτη. Με το πέρασμα του χρόνου, πολλαπλά κατάγματα μπορεί να προκαλέσουν σημαντική μείωση του ύψους. Η προοδευτική απώλεια ύψους προκαλεί το κόντημα των μυών γύρω από τη σπονδυλική στήλη απαιτώντας κατ' αυτόν τον τρόπο παρατεταμένη συστολή προκειμένου να διατηρηθεί η στάση του σώματος, προκαλώντας έτσι πόνο από μυϊκή κόπωση. Ο πόνος αυτό μπορεί να διαρκέσει για αρκετό χρονικό διάστημα μετά τη θεραπεία του κατάγματος. [42]

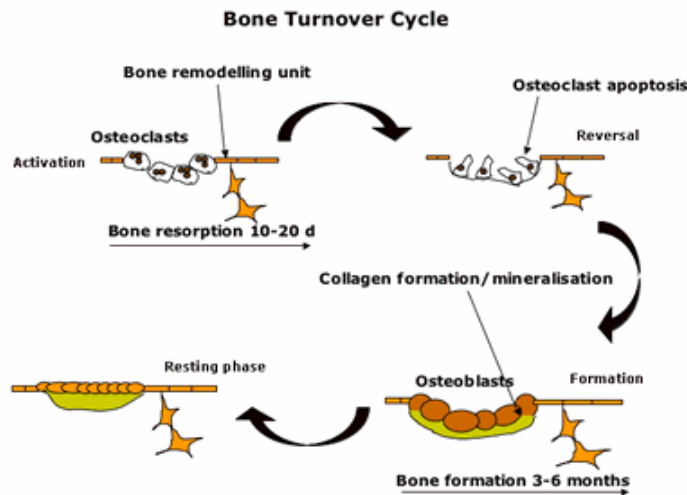


Σχήμα 3.3 (α) Σφηνοειδές κάταγμα (β) Καθιζήμενος σπόνδυλος

3.7 Οστική Ανακατασκευή (Bone Remodeling)

Η ανακατασκευή των οστών συνίσταται στη διάλυση του οστού μέσω των οστεοκλαστικών διεργασιών και τη δημιουργία νέου οστού από τους οστεοβλάστες. Οι *οστεοβλάστες* είναι κυβοειδή κύτταρα με έκκεντρο πυρήνα. Περιέχουν πληθώρα συνθετικών οργανιδίων, μεμβράνες του Golgi και εκτεταμένο ενδοπλασματικό δίκτυο. Τα κύτταρα αυτά είναι επιφορτισμένα με την παραγωγή οστίτη ιστού όταν αυτό είναι απαραίτητο (οστεοπλασία). Οι οστεοκλάστες δημιουργούνται ύστερα από τη συνένωση πολλών μονοπύρηνων κυττάρων τα οποία προέρχονται από το μυελό των οστών. Τα κύτταρα αυτά αναλαμβάνουν την αποδόμηση του οστού όταν αυτό είναι απαραίτητο. [7]

Το φαινόμενο της οστικής ανακατασκευής, που σχηματικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4, εμφανίζεται σε όλα τα οστά και συνεχίζεται σε όλη τη διάρκεια της ζωής του ανθρώπου, με διαφορετικό ρυθμό, βέβαια, στον καθένα.



Σχήμα 3.4 Ο κύκλος της οστικής ανακατασκευής

Στα συμπαγή οστά η ανακατασκευή αρχίζει με τη διάνοιξη μιας κωνοειδούς οπής από τους οστεοκλάστες στην περιοχή στην οποία έχουν δραστηριοποιηθεί. Τα τοιχώματα της κωνοειδούς κοιλότητας επαλείφονται από οστεοβλάστες, οι οποίοι δημιουργούν ένα πέταλο από νέο οστό με το κολλαγόνο και τις άλλες πρωτεΐνες της θεμέλιας ουσίας που εκκρίνουν. Οι οστεοβλάστες επίσης, συμβάλλουν στην ασβέστωση του οστεοειδούς που δημιουργήθηκε με τις άφθονες αλκαλικές φωσφατάσες της κυτταρικής τους μεμβράνης. Στα σπογγώδη οστά η ανακατασκευή συντελείται στην επιφάνεια των δοκίδων. Οι οστεοκλάστες ανασκάπτουν μια περιοχή που γεμίζει με νέο οστό από τους οστεοβλάστες οι οποίοι σπεύδουν στο σημείο καταστροφής. Σε κάθε σημείο ανακατασκευής του οστού η διαδικασία της οστεόλυσης αντιστοιχεί σε ανάλογη διαδικασία της οστεοσύνθεσης, ώστε η παραγωγή νέου οστού να είναι ίση με την ποσότητα που «καταστράφηκε» από τους οστεοκλάστες. Στην διάρκεια ανάπτυξης του ατόμου η οστεοσύνθεση υπερτερεί ενώ μετά την ηλικία των 30 αρχίζει η απώλεια οστού, η οποία κατά τις πρώτες δεκαετίες είναι πολύ βραδεία. [2]

Η ανακατασκευή στα δύο είδη οστίτη ιστού πραγματοποιείται με διαφορετικό ρυθμό και έχει διαφορετική διάρκεια λόγω των σημαντικών ανατομικών διαφορών τους. Η ανακατασκευή του σπογγώδους οστού είναι ταχύτερη με αποτέλεσμα να παρατηρείται ανακατασκευή σε ποσοστό 26% ανά έτος της σπογγώδους μοίρας, ενώ το συμπαγές τμήμα ανακατασκευάζεται σε ποσοστό 3% ανά έτος. Για το λόγο αυτό τα σπογγώδη οστά εμφανίζουν συχνότερα οστεοπόρωση [2]. Ένας κύκλος οστικής ανακατασκευής διαρκεί συνήθως 3-4 μήνες για το σπογγώδες οστό και 7 μήνες για το φλοιώδες οστό.

Γενικά, η οστική ανακατασκευή χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των μονάδων που βρίσκονται σε ανακατασκευή, το ρυθμό ανακύκλυσής της, το βάθος των κοιλοτήτων που σκάβουν οι οστεοκλάστες και το πάχος του νέου οστού που παράγουν οι οστεοβλάστες.

Κεφάλαιο 4ο Λήψη και επεξεργασία των τομογραφιών

4.1 Εισαγωγή

Ο όρος τομογραφία προέρχεται από τη σύνθεση των ελληνικών λέξεων «τομή» και «γραφή» και αναφέρεται σε μια μέθοδο απεικόνισης του εσωτερικού του ανθρώπινου σώματος. Η τομογραφία είναι η διαδικασία απεικόνισης ενός τριδιάστατου αντικειμένου με μια σειρά από διαδοχικές εικόνες. Υπάρχουν πολλά είδη τομογραφιών από το οποία αναφέρονται τα κυριότερα:

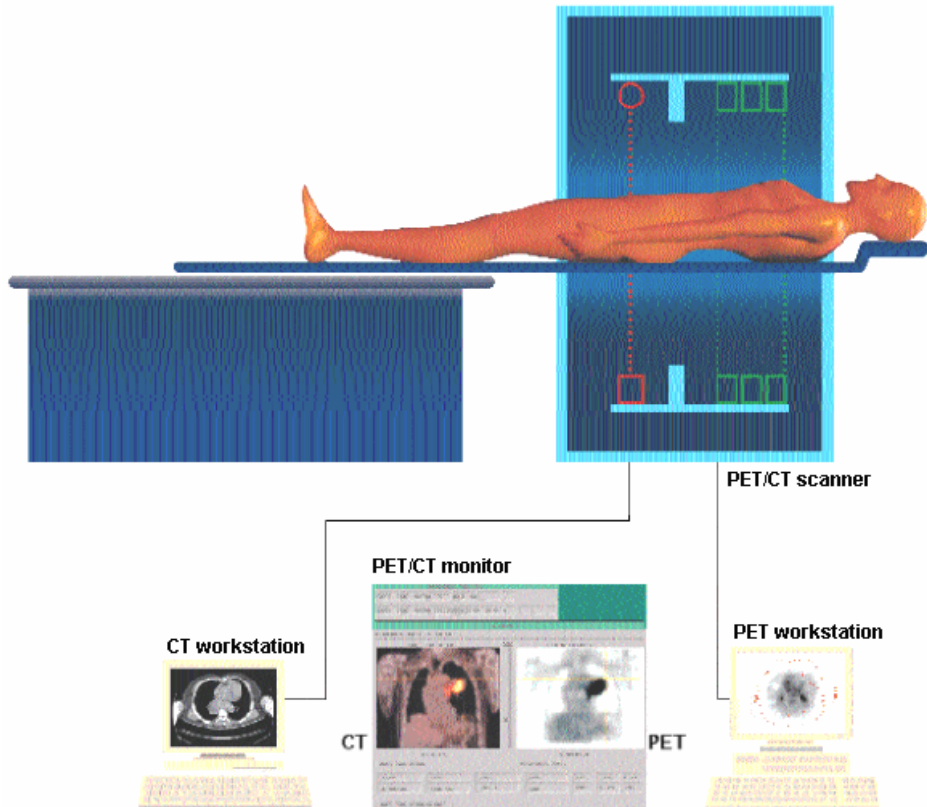
- Αξονικές
- Μαγνητικές (MRI)
- Εκπομπής ποζιτρονίων (PET)
- Πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (SPECT)
- Ηλεκτρικής αντίστασης (EIT)

Οι τομογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ ανήκουν στην πρώτη κατηγορία. Η Αξονική Τομογραφία (ΑΤ) εφευρέθηκε το 1972 παράλληλα και ανεξάρτητα από το Βρετανό Godfrey Hounsfield και από το Νοτιοαφρικανό Allan Cormack. Το 1979 οι Hounsfield και Cormack τιμήθηκαν με βραβείο Νόμπελ αφού η κλινική χρησιμότητα της μεθόδου είχε καθιερωθεί. Η ΑΤ αποτελεί ένα σημαντικότατο διαγνωστικό εργαλείο για πληθώρα προβλημάτων που εμφανίζονται στους ασθενείς. Ο σκοπός των πρώτων τομογράφων που εγκαταστάθηκαν στα νοσοκομεία ήταν η αποτύπωση του ανθρώπινου εγκεφάλου. [8]

4.2 Αρχή λειτουργίας του αξονικού τομογράφου

Υπάρχουν δύο μέθοδοι τομογραφικής απεικόνισης. Η *τομογραφία διέλευσης* (transmission tomography) και η *τομογραφία εκπομπής* (emission tomography). Στην πρώτη μέθοδο, η πηγή και το ανιχνευτικό σύστημα βρίσκονται σε αντιδιαμετρική θέση και περιστρέφονται γύρω από το υπό εξέταση αντικείμενο. Στη δεύτερη μέθοδο, η πηγή είναι η ίδια η υπό εξέταση περιοχή και γύρω από αυτή περιστρέφεται το ανιχνευτικό σύστημα.

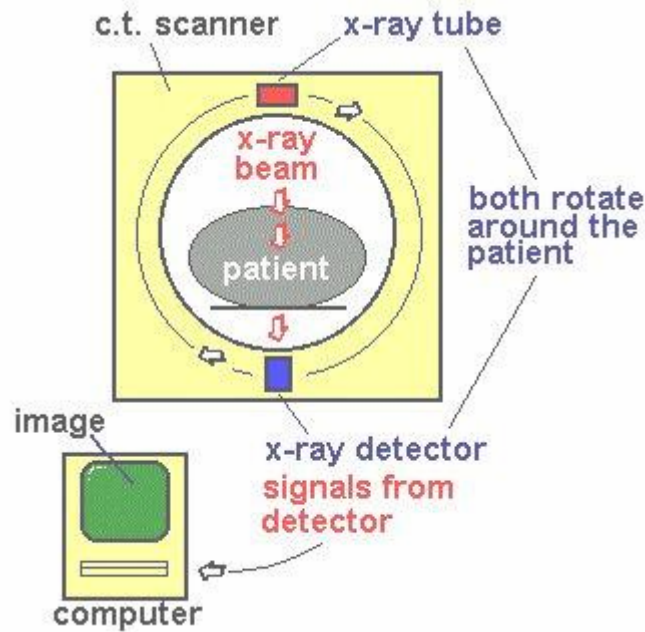
Ο *υπολογιστικός τομογράφος* (Σχήμα 4.1) χρησιμοποιεί την πρώτη μέθοδο τομογραφικής απεικόνισης, την τομογραφία διέλευσης. Ο τομογράφος αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο δακτύλιο διαμέτρου 1.5m, πάνω στον οποίο είναι προσαρτημένη μια λυχνία παραγωγής ακτινών X (πηγή). Η λυχνία παραγωγής ακτινών X (collimator) λειτουργεί σε υψηλή τάση από 60 έως 140 kVp. Η πηγή περιστρέφεται και κινείται πάνω στο δακτύλιο γύρω από τον ασθενή. Αντιδιαμετρικά της λυχνίας, πάνω στον ίδιο δακτύλιο, υπάρχει σύστημα ανιχνευτών ακτινοβολίας X. Η εξεταστική τράπεζα πάνω στην οποία τοποθετείται ο ασθενής, είναι τοποθετημένη με τον άξονά της κάθετο στο επίπεδο λυχνία-ανιχνευτές και έχει τη δυνατότητα να κινείται κατά μήκος του άξονά της.



Σχήμα 4.1. Διαγραμματική απεικόνιση Αξονικού τομογράφου

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στη δυνατότητα ανακατασκευής μιας εικόνας-τομής του αντικείμενου από πολλαπλές προβολές του με ακτίνες X. Οι ακτίνες X διέρχονται μέσα από το αντικείμενο και η κατανομή της απορρόφησής τους καταγράφεται από το ανιχνευτικό σύστημα. Οι δομές που βρίσκονται πάνω ή κάτω από το επίπεδο της δέσμης δεν απεικονίζονται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για πολλές διαφορετικές θέσεις του συστήματος λυχνία-ανιχνευτικό σύστημα γύρω από το αντικείμενο, παίρνοντας έτσι πολλές προβολές του αντικείμενου. Η τελική εικόνα είναι σαν να έχει αφαιρεθεί από το σώμα του ασθενούς «φέτα» πάχους λίγων χιλιοστών, και αυτή η φέτα να έχει ακτινογραφηθεί με ακτίνες-x κάθετες στο επίπεδό της.

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή συντίθεται η εικόνα της τομής από τις επιμέρους προβολές (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 Διαδικασία λήψης τομογραφιών

Το σύστημα περιορισμού της δέσμης ακτίνων X που εξέρχεται από τη λυχνία, είναι σχεδιασμένο προκειμένου να παράγει πολύ λεπτές δέσμες, πάχους 1-10 mm, εξασφαλίζοντας αντίστοιχα πάχη τομής κατά την απεικόνιση. Αυτό οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα εικόνας καθώς μειώνεται κατά πολύ η σκεδαζόμενη ακτινοβολία αλλά και το πάχος κυλίνδρου που προβάλλεται στο επίπεδο του φιλμ.

Το ανιχνευτικό σύστημα αποτελείται από μεγάλο αριθμό ανιχνευτών διατεταγμένων σε τόξο, οι οποίοι είναι ανιχνευτές αερίου ή ανιχνευτές στερεάς κατάστασης. Οι δεύτεροι θεωρούνται καλύτεροι διότι παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά (απόδοση κ.λ.π.) και λιγότερα προβλήματα λειτουργίας.

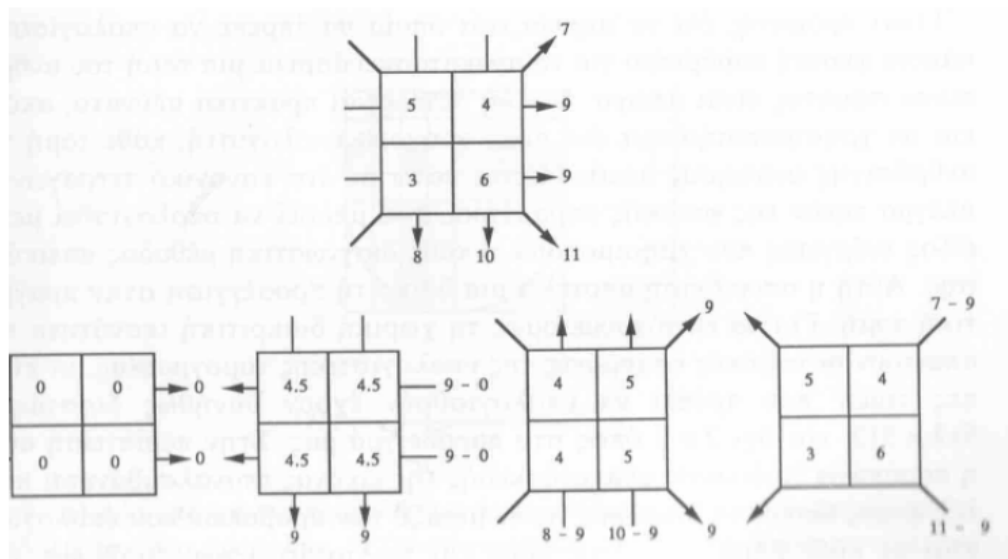
Για να ολοκληρωθεί μια εξέταση απαιτείται μια σειρά από τομές. Για την απεικόνιση του κρανίου παραδείγματος χάριν απαιτούνται 25 τομές, αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω επαναλαμβάνεται 25 φορές. Μεταξύ δύο τομών σταματά η εκπομπή των ακτίνων X από τη λυχνία, προκειμένου να γυρίσει στην αρχική της θέση και να ξεκινήσει ξανά για νέα τομή. Ταυτόχρονα με την επιστροφή της λυχνίας η εξεταστική τράπεζα κινείται κατά ένα διάστημα το οποίο ισούται με το πάχος της τομής. Με τον τρόπο αυτό ο ασθενής βρίσκεται σε νέα θέση όπου τώρα στο επίπεδο της δέσμης βρίσκεται η επόμενη «φέτα» που πρόκειται να απεικονιστεί.

4.3 Ανακατασκευή εικόνας

Η υπολογιστική τομογραφία βασίζεται στη μέθοδο της μαθηματικής ανακατασκευής και απεικόνισης της εσωτερικής δομής ενός αντικειμένου από πολλαπλές προβολές του. Έτσι,

αντικείμενα δύο διαστάσεων μπορούν να ανακατασκευαστούν από μονοδιάστατες προβολές σε πολλαπλές κατευθύνσεις, τριδιάστατα αντικείμενα μπορούν να ανακατασκευαστούν από πολλαπλές διδιάστατες προβολές τους.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ανακατασκευής της εικόνας. Οι βασικότερες είναι η *οπισθοπροβολή* (backprojection), που χρησιμοποιείται σήμερα από όλα τα συστήματα, η *ανακατασκευή Fourier*, και η *αλγεβρική μέθοδος ανακατασκευής* που είναι και η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον Hounsfield και η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



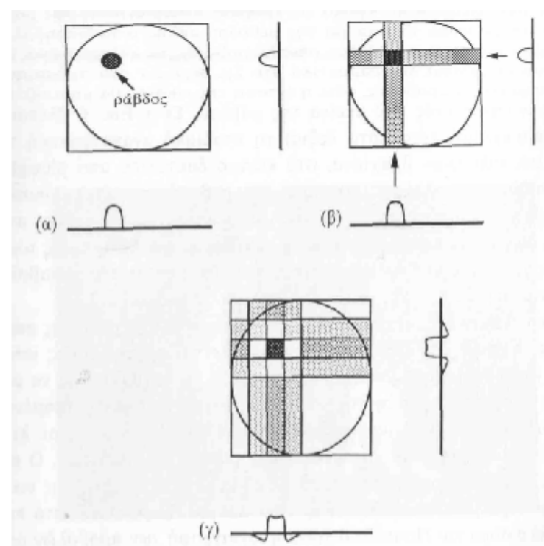
Σχήμα 4.3 Αλγεβρική μέθοδος ανακατασκευής από πολλαπλές προβολές

Στο Σχήμα 4.3 βλέπουμε μια απλή τομή που αποτελείται από τέσσερις ομογενείς περιοχές, η κάθε μια από τις οποίες έχει διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης ακτινών X, διαφορετική πυκνότητα ή όποια άλλη φυσική ιδιότητα θέλουμε να αντιπροσωπεύουν οι τιμές 5, 4, 3 και 6. Η ψηφιακή εικόνα που θα ανακατασκευαστεί έχει μέγεθος 2x2. Οι τιμές αυτές μας είναι άγνωστες, αλλά είναι γνωστές οι προβολές τους στην οριζόντια, κάθετη και στις δύο διαγώνιες κατευθύνσεις. Αρχικά υποθέτουμε ότι όλες οι άγνωστες τιμές είναι 0. Αν όμως προβληθούν οι τιμές αυτές στην οριζόντια κατεύθυνση, παρατηρείται ότι οι δύο τιμές της οριζόντιας προβολής διαφέρουν από τις σωστές τιμές. Η διαφορά είναι 9 και στις δύο περιπτώσεις χωρίς ωστόσο να είναι γνωστό πως αυτή είναι κατανομημένη μεταξύ των δύο περιοχών από τις οποίες περνάει η κάθε οριζόντια δέσμη. Εφόσον δεν υπάρχει άλλη πληροφορία οι διαφορές μοιράζονται εξίσου στις δύο περιοχές της τομής από τις οποίες προέρχονται και λαμβάνεται μια προσέγγιση στις τιμές των τεσσάρων στοιχείων της εικόνας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα όλες οι τιμές είναι 4.5.

Προβάλλονται, τώρα οι νέες τιμές στην κάθετη κατεύθυνση και λαμβάνεται 9 για κάθε στήλη. Οι προβολές αυτές διαφέρουν πάλι από τις σωστές προβολές που είναι 8 και 10 αντίστοιχα. Οι διαφορές -1 και +1 που προκύπτουν μοιράζονται στα στοιχεία κάθε στήλης αφαιρώντας ή προσθέτοντας 0.5 στο καθένα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μια ακόμη φορά για τις διαγώνιες προβολές, και λαμβάνεται η τελική ανακατασκευή της εικόνας.

Για να επιτευχθεί η χωρική διακριτική ικανότητα που απαιτούν οι ιατρικές εφαρμογές της υπολογιστικής τομογραφίας, οι πίνακες τιμών που πρέπει να υπολογιστούν έχουν συνήθως διαστάσεις 512x512 και όχι 2x2 όπως στο παραπάνω παράδειγμα. Στην περίπτωση αυτή η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου οι διαφορές τιμών που υπολογίζονται σε κάθε βήμα του αλγορίθμου να είναι πολύ μικρές. Είναι εύκολο, λοιπόν, να καταλάβει κανείς ότι για έναν πίνακα 512x512 ο αριθμός των επαναλήψεων θα είναι πολύ μεγαλύτερος. Εκτός του μεγάλου αριθμού επαναληπτικών πράξεων η αλγεβρική μέθοδος ανακατασκευής είναι πρακτικά πολύ αργή και λόγω του ότι πρέπει πρώτα να καταγραφούν όλες οι προβολές και μετά να αρχίσει η εκτέλεση του αλγορίθμου.

Η μέθοδος της υπολογιστικής τομογραφίας που χρησιμοποιείται σήμερα από όλα τα συστήματα ονομάζεται μέθοδος *οπισθοπροβολής με φιλτράρισμα προβολών*. Είναι σημαντικά ταχύτερη από την αλγεβρική μέθοδο και περιγράφεται παρακάτω. Έστω ότι μέσα στην κυκλική περιοχή η οποία προβάλλεται από το σύστημά μας σε διάφορες κατευθύνσεις βρίσκεται μια κυλινδρική ράβδος μεγάλου συντελεστή εξασθένησης ακτινών X, όπως φαίνεται παρακάτω Σχήμα 4.4.



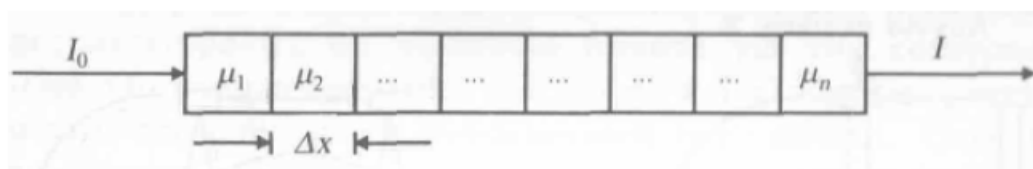
Σχήμα 4.4. α) Δύο ορθογώνιες προβολές τομής κυλινδρικής ράβδου β) Απλή οπισθοπροβολή των δύο προβολών γ) Οπισθοπροβολή των δύο προβολών αφού έχουν φιλτραριστεί με ειδικά σχεδιασμένο φίλτρο

Στο Σχήμα 4.4(α) φαίνεται η ράβδος και δύο από τις πολλές προβολές που έχουν καταγραφεί. Αν η μη μηδενική τιμή της κάθε προβολής μοιραστεί εξίσου (οπισθοπροβολή) μεταξύ όλων των στοιχείων της τομής που βρίσκονται πάνω στην ευθεία προβολής, και σε κάθε σημείο της τομής προστεθούν οι στοιχειώδεις επιδράσεις από όλες τις προβολές, παρατηρεί κανείς ότι οι οπισθοπροβολές τέμνονται στο σημείο στο οποίο βρίσκεται η ράβδος και, επομένως, η ένταση της εικόνας στο σημείο αυτό θα είναι σημαντικά αυξημένη (Σχήμα 4.4(β)).

Η ένταση των άλλων σημείων της εικόνας θα είναι μη μηδενική και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από το κέντρο της ράβδου. Αν τώρα υποθεθεί ότι, αντί για ράβδο, έχουμε ένα σημείο και κάθε τομή ενός σύνθετου αντικειμένου αποτελείται από πολλά τέτοια σημεία, είναι εύκολο να καταλάβει κανείς ότι η τελική εικόνα που λαμβάνεται με τη μέθοδο της απλής οπισθοπροβολής δεν είναι καθαρή, αφού κάθε σημείο απεικονίζεται σαν ένα άστρο που επεκτείνεται πάνω σε όλη την εικόνα και του οποίου η ένταση είναι μέγιστη στο κέντρο και εξασθενεί καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό. Για να διορθωθεί το σφάλμα αυτό είναι απαραίτητο να φιλτράρουμε πρώτα τις προβολές, διορθώνοντας με μαθηματικά αυστηρό τρόπο το σφάλμα της μεθόδου απλής οπισθοπροβολής. Αυτή είναι ουσιαστικά η μέθοδος οπισθοπροβολής με φιλτράρισμα των προβολών που φαίνεται στο Σχήμα 4.4(γ). Στη μέθοδο αυτή ο συνολικός χρόνος καταγραφής των προβολών και ανακατασκευής της εικόνας είναι συχνά μικρότερος των 30sec. Συγκριτικά, στο πειραματικό σύστημα του Hounsfield τόσο η καταγραφή των προβολών όσο και η μαθηματική ανακατασκευή της κάθε τομής διαρκούσε μερικές ώρες, ενώ στο πρώτο κλινικό σύστημα της EMI οι χρόνοι ήταν της τάξεως των 15-20min.

4.4 Αναπαραγωγή της εικόνας

Η αναπαραγωγή της εικόνας επιτυγχάνεται ουσιαστικά με τον υπολογισμό της έντασης της ακτινοβολίας που εξέρχεται από τον ιστό. Όταν μια ακτίνα X εισέρχεται σε έναν ιστό έχει προκαθορισμένη ένταση I_0 . Όταν όμως περάσει από το σώμα λόγω φαινομένων απορρόφησης και σκέδασης η ένταση που καταγράφουν οι ανιχνευτές είναι σημαντικά μειωμένη.



Σχήμα 4.5. Οριζόντια προβολή διακριτών στοιχείων μιας τομής με διαφορετικούς συντελεστές εξασθένησης των ακτινών X.

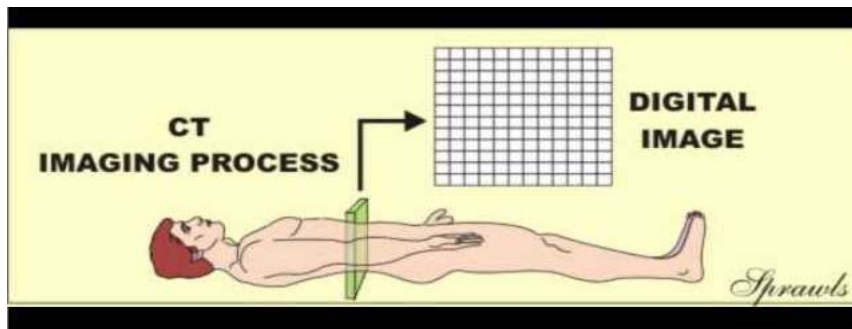
Συγκεκριμένα, η ένταση I της δέσμης που προσπίπτει στους ανιχνευτές δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n)}$$

Όπου τα $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ είναι οι συντελεστές εξασθένησης ακτινών X.

Μέσω της έντασης της ακτινοβολίας παίρνουμε στη συνέχεια τιμές του «Αριθμού Υπολογιστικής Τομογραφίας», ή αλλιώς αριθμός CT , που μας δίνει ο τομογράφος και στη συνέχεια γίνεται η χαρτογράφηση του συντελεστή μ πάνω σε κάθε τομή. Ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ εκφράζει την πιθανότητα, ανά μονάδα μήκους, ένα φωτόνιο να κάνει οποιαδήποτε αλληλεπίδραση και εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων και το υλικό του απορροφητή.

Για να επιτευχθεί η χαρτογράφηση του συντελεστή μ κατασκευάζεται πλέγμα πάνω σε κάθε τομή δημιουργώντας εικονοστοιχεία (pixels). Στην ουσία όμως επειδή η κάθε τομή έχει ένα συγκεκριμένο πάχος ορίζονται στοιχεία όγκου (Voxels). Έτσι η αναπαραγωγή της εικόνας συνίσταται στον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης μ για κάθε Voxel (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6. Διαδικασία αναπαραγωγής της εικόνας υπολογιστικής τομογραφίας

Για την αποτίμηση των αξονικών τομογραφιών χρησιμοποιείται η κλίμακα Hounsfield. Η κλίμακα Hounsfield είναι ένας τρόπος ποσοτικής μέτρησης της πυκνότητας της ακτινοβολίας. Η τιμή του pixel παρατίθεται με βάση την τιμή εξασθένησης της ακτινοβολίας η οποία αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών από -1024 μέχρι +3071 στην κλίμακα Hounsfield.

Οι τιμές κλίμακας Hounsfield είναι οι τιμές που παίρνει ο αριθμός CT που αναφέρθηκε παραπάνω και ονομάζονται μονάδες *Hounsfield* (*Hounsfield Units-HU*). Ο αριθμός CT ορίζεται ως εξής:

$$CT \text{ number} = \frac{(\mu_{\text{tissue}} - \mu_{\text{water}})}{\mu_{\text{water}}} \times 1000$$

Όπου μ_{tissue} ο συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας στον ιστό

μ_{water} ο συντελεστής εξασθένησης της ακτινοβολίας στο νερό

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται ορισμένες ενδεικτικές τιμές του αριθμού CT.

Πίνακας 4.1 Τυπικές τιμές αριθμού CT

Υλικό	Αριθμός CT
Νερό	0
Αέρας	-1000
Σπογγώδες Οστό	400
Αίμα	42-58
Μυϊκός Ιστός	44-59
Εμφύτευμα Τιτανίου	1000

Στην υπολογιστική τομογραφία διακρίνονται 256 αποχρώσεις του γκρι οι οποίες κατανέμονται σε όλο το εύρος της κλίμακας Hounsfield προκειμένου να αποδοθεί η απεικόνιση ενός αντικειμένου που θα προκύψει αποδίδοντας χρώμα στο κάθε pixel της εικόνας με βάση τον αριθμό CT που έχει και άρα τη φωτεινότητά της. [9]

Κεφάλαιο 5ο Εμβιομηχανική & Θεωρία Πεπερασμένων στοιχείων

5.1 Εμβιομηχανική

Με τον όρο εμβιομηχανική εννοούμε την εφαρμογή των γνώσεων κλάδων της Μηχανικής (Στατική, Ρομποτική, Μηχανική των Ρευστών κτλ) για τη μελέτη του ανθρωπίνου σώματος και των προβλημάτων που αντιμετωπίζει, με σκοπό πάντα την βελτίωση της ζωής του ανθρώπου. Φυσικά, ο κλάδος της εμβιομηχανικής είναι διεπιστημονικός και ασχολούνται με αυτόν συνεργαζόμενοι επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων, κυρίως βιολόγοι, ιατροί, μηχανικοί και φυσικοί.

5.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην εμβιομηχανική και τη μελέτη της σπονδυλικής στήλης

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σημαντικό εργαλείο σε πολλές δραστηριότητες του μηχανικού. Πρόκειται για μια μέθοδο καλά δοκιμασμένη, που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό πληθώρας προϊόντων – από ηλεκτρονικά συστήματα μέχρι μεγάλες κατασκευές κτηρίων.

Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά το 1950 στην αεροπορική βιομηχανία, στην οποία εξακολουθεί μέχρι σήμερα να εφαρμόζεται ευρέως για τη σχεδίαση σημαντικών εξαρτημάτων του αεροπλάνου. Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου στον τομέα της εμβιομηχανικής έγινε το 1972. Από τότε ο αριθμός των εφαρμογών στο συγκεκριμένο τομέα έχει πολλαπλασιαστεί με σκοπό τη λεπτομερειακή μελέτη και ανάλυση της συμπεριφοράς των ανθρωπίνων οργάνων.

Η αύξηση της υπολογιστικής ικανότητας των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y) δίνει τη δυνατότητα μελέτης και ανάλυσης όλο και συνθετότερων προβλημάτων. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται και η μελέτη της Σ.Σ. και των μερών της. Υπάρχουν τρεις τομείς μελέτης και ανάλυσης της Σ.Σ., με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της και την αντιμετώπιση των ιατρικών προβλημάτων που συνδέονται με αυτήν, στους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων:

- Μελέτη της Σ.Σ. (ή μέρους αυτής, το οποίο μπορεί να είναι ένας σπόνδυλος, ένας μεσοσπονδύλιος δίσκος ή ακόμη και μια ολόκληρη σπονδυλική μοίρα) σε υγιή κατάσταση.
- Μελέτη της Σ.Σ. όταν έχει επηρεαστεί λόγω ασθένειας – όπως στην παρούσα εργασία – ηλικίας, τραυματισμού ή χειρουργικής επέμβασης.
- Σχεδίαση και ανάπτυξη εμφυτευμάτων για τη Σ.Σ..

Στους παραπάνω τομείς μπορούν να γίνουν επίσης πειραματικές και κλινικές μελέτες που θα μπορούσαν να θεωρηθούν επαρκείς, ωστόσο, η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία δίνει πληροφορίες που τα εργαστηριακά πειράματα αδυνατούν να δώσουν. Για παράδειγμα, επιτρέπει τη μελέτη ενός τεραστίου εύρους και συνδυασμού φυσιολογικών

συνθηκών που βοηθά στην καλύτερη και σε βάθος κατανόηση της εμβιομηχανικής του συστήματος. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα μελέτης διαφορετικών μεθόδων θεραπείας και χειρουργικών επεμβάσεων, χωρίς κανένα κόστος για την υγεία του ασθενούς, βοηθώντας με τον τρόπο αυτό στην επιλογή της καταλληλότερης θεραπείας ή χειρουργικής επέμβασης. Τέλος, βοηθά στη βελτίωση των εμφυτευμάτων που χρησιμοποιούνται από τους γιατρούς.

5.3 Γενική Περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια προσεγγιστική μέθοδος της αριθμητικής ανάλυσης. Μέσω αυτής, γίνεται φυσική προσέγγιση του προβλήματος διαμερίζοντας το χώρο σε επιμέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία στα οποία ορίζονται εξισώσεις που έχουν ακριβή λύση. Λόγω του ότι τα προβλήματα της μηχανικής του παραμορφώσιμου στερεού περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις μερικών παραγώγων μπορούν να επιλυθούν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τα προβλήματα της μηχανικής προκύπτουν από άλλες σχέσεις όπως οι παρακάτω [10], [11]:

Σύνδεση ανηγμένων παραμορφώσεων-μετατοπίσεων:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \text{ και } \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

Εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_i}{\partial j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_j}{\partial i^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial i \partial j}, \text{ όπου τα } i, j \text{ είναι } x, y \text{ ή } y, z \text{ ή } z, x.$$

Εξισώσεις ισορροπίας:

$$\frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} + F_i = 0, \text{ όπου τα } i=x,y,z \text{ και } F_i \text{ οι μαζικές δυνάμεις.}$$

Κάθε πρόβλημα όμως που εκφράζεται με διαφορικές εξισώσεις έχει κάποιες συνοριακές συνθήκες. Έτσι, και στα συγκεκριμένα προβλήματα έχουμε συνοριακές όπως φυσικές συνοριακές συνθήκες (φορτίσεις κλπ) και βασικές συνοριακές συνθήκες (συνθήκες Dirichlet και Neumann) (δεσμεύσεις, στηρίξεις κλπ.).

Συνοριακές συνθήκες: $\sigma_{ij} \cdot \nu_j = G_j$ όπου ν στο σύνορο και G_i η δύναμη ανά μονάδα επιφανείας στο σύνορο.

Επίσης: $u_i = F_i$, η παραπάνω σχέση σημαίνει ότι το διάνυσμα των μετατοπίσεων ορίζεται σε περιοχές του σώματος.

Για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η αρχή των δυνατών έργων [12], [13]. Έστω σ_{ij} και ε_{ij} είναι οι τανυστές των τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων αντίστοιχα και P_i , δ_i είναι τα φορτία και οι δυνατές μετακινήσεις. Το έργο που προκαλείται από τα φορτία πρέπει να ισούται με το δυνατό έργο των παραμορφώσεων. Δηλαδή:

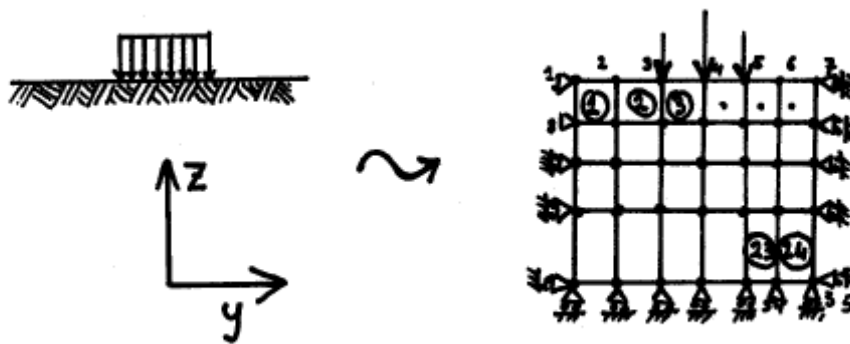
$$\sum P_i \delta_i = \int_V \sigma_{ij} \cdot \varepsilon_{ij} dV$$

Προκειμένου να καταστρωθεί το πρόβλημα των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να χωριστεί το πεδίο του προβλήματος – το οποίο καταλαμβάνει κάποιο πεπερασμένο όγκο – σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων απλούστερου σχήματος. Καθένα από τα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία χωρίζεται το πεδίο του προβλήματος αποτελείται από κάποιο αριθμό κόμβων (π.χ. στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δεκακομβικά τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία). Κάθε κόμβος έχει κάποιους βαθμούς ελευθερίας. Το πρόβλημα λοιπόν ανάγεται στην απόδοση τιμών σε αυτούς τους βαθμούς ελευθερίας. Τα στοιχεία συναρμολογούνται σε κάποιους κοινούς βαθμούς ελευθερίας (ή κόμβους). Έτσι σε έναν κόμβο μπορεί να συνδέονται 2, 3 ή και παραπάνω στοιχεία. Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως εξής [12] [13]:

$$[K] \cdot u = F$$

Όπου u είναι διάνυσμα διάστασης n , όπου το n ισούται με τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος. Κάποιοι από τους βαθμούς ελευθερίας είναι δεσμευμένοι και αποτελούν τις συνθήκες Dirichlet. Το F είναι επίσης διάνυσμα διάστασης n και περιέχει τις συνοριακές συνθήκες των φορτίσεων, δηλαδή δυνάμεις στους κόμβους πιέσεις στις πλευρές των στοιχείων και μαζικές δυνάμεις. Ο πίνακας $[K]$ έχει $n \times n$ διαστάσεις και ονομάζεται πίνακας δυσκαμψίας. Ο πίνακας $[K]$ περιλαμβάνει τη γεωμετρία και τις φυσικές ιδιότητες των υλικών του προβλήματος. Ονομάζεται *πίνακας δυσκαμψίας* διότι δείχνει τη δυσκαμψία του προβλήματος να αντιδράσει σε κάποια εξωτερική φόρτιση – ή αλλιώς δείχνει την απόκριση του συστήματος σε εξωτερικά αίτια. Τελικά, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα επιλύεται το παραπάνω σύστημα εξισώσεων ως προς u . Αφού προσδιοριστούν οι τιμές των u με κατάλληλες αναγωγές μπορούν να προκύψουν και άλλα παράγωγα μεγέθη όπως οι τάσεις.

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται σχηματοποιημένα η κατάστρωση ενός προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία. Φαίνεται το πεδίο του προβλήματος, η διακριτοποίηση του σε πεπερασμένα στοιχεία που συναρμολογούνται από κόμβους, τις συνοριακές συνθήκες καθώς και ένα απομονωμένο στοιχείο με τους τοπικούς και καθολικούς βαθμούς ελευθερίας.



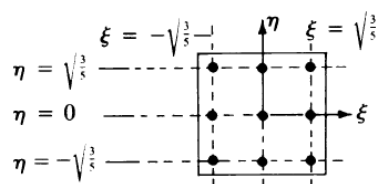
Σχήμα 5.1. Κατάστροψη προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία

5.3.1 Σχηματισμός πίνακα δυσκαμψίας

Προκειμένου να σχηματιστεί ο πίνακας δυσκαμψίας $[K]$ γίνεται συναρμολόγηση πολλών επιμέρους πινάκων $[K_i]$ κάθε στοιχείου. Για να σχηματιστούν οι πίνακες $[K_i]$ χρησιμοποιείται η αριθμητική ολοκλήρωση με τη μέθοδο των σημείων Gauss. Για να διευκολύνουμε τους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε πολυώνυμα τα οποία είναι εύκολα ολοκληρώσιμα - παραγωγίσιμα. Τα πολυώνυμα αυτά ονομάζονται πολυώνυμα μορφής. Ανάλογα με το βαθμό των πολυωνύμων λαμβάνεται και ανάλογη τάξη στα στοιχεία. Έτσι κάνοντας χρήση πολυωνύμων πρώτου βαθμού, στα στερεά προκύπτουν κυβικά στοιχεία 8 κόμβων. Αν χρησιμοποιηθούν στοιχεία ανώτερης τάξης όπως κυβικά στοιχεία 20 κόμβων. Μεγαλύτερη τάξη στοιχείων σημαίνει καλύτερη ακρίβεια στη λύση. Η ακρίβεια στη λύση μπορεί να επιτευχθεί και πυκνώνοντας το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

Τα πολυώνυμα μορφής εκφράζονται σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων (ξ, η, ζ) το οποίο έχει κέντρο στο εσωτερικό του στοιχείου. Οι τιμές των συντεταγμένων στο τοπικό σύστημα παίρνουν τιμές από -1 έως 1. Τα πολυώνυμα μορφής παραγωγίζονται εύκολα ως προς τα (ξ, η, ζ) και σχηματίζουν τα μητρώα $[B_i]$ με τις παραγώγους τους.

Στο Σχήμα 5.2 φαίνονται τα σημεία ολοκλήρωσης Gauss για ένα διδιάστατο στοιχείο. Για τριδιάστατα στοιχεία υπάρχουν τρία τέτοια διατεταγμένα επίπεδα.



Σχήμα 5.2. Σημεία ολοκλήρωσης Gauss σε ένα επίπεδο στοιχείο

Προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια ολοκλήρωσης με τη μέθοδο Gauss αυξάνεται ο αριθμός σημείων ολοκλήρωσης.

Ο τελικός τύπος για το σχηματισμό του μητρώου δυσκαμψίας ενός στοιχείου $[K_e]$ είναι:

$$K_e = \int_V [B]^T [D] [B] dV$$

Ο παραπάνω τύπος με τη βοήθεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης μπορεί να γραφεί σαν άθροισμα διακριτών όρων:

$$K_e = \sum_{i=1}^n H_i [B(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)]^T [D] [B(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)] |J(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)|$$

Οι H_i είναι συντελεστές της ολοκλήρωσης Gauss σε n διακριτά σημεία με συντεταγμένες (ξ_i, η_i, ζ_i) , ενώ η J είναι η Ιακωβιανή μετασχηματισμού από το καθολικό σύστημα συντεταγμένων X, Y, Z στο ξ, η, ζ . Το $[D]$ είναι ένα μητρώο που υπολογίζεται από τις ελαστικές σταθερές E, ν .

5.3.2 Επίλυση του συστήματος

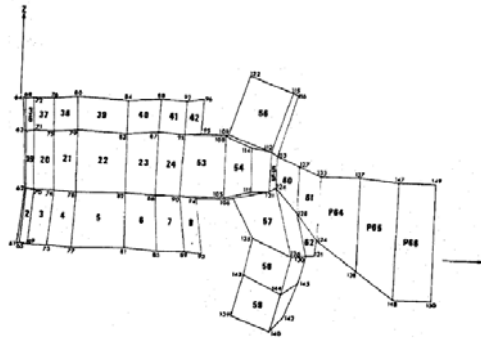
Αφού επιλυθεί το σύστημα $[K]u=F$ προκύπτουν οι τιμές των u . Ας θεωρήσουμε ότι τα u είναι μετατοπίσεις στους βαθμούς ελευθερίας (κατά x, y, z στους κόμβους). Μετά την επίλυση, πέραν των μετατοπίσεων, χρήσιμα μεγέθη είναι και οι τάσεις καθώς και διάφορα άλλα παράγωγα μεγέθη. Με αριθμητικές παραγωγίσεις του πεδίου είναι δυνατό να υπολογιστούν οι ανηγμένες παραμορφώσεις και οι τάσεις στο πεδίο του προβλήματος. Η κατανομή του πεδίου των μετατοπίσεων είναι συνεχής, δεν ισχύει όμως το ίδιο και για τα παράγωγα μεγέθη τα οποία ενδέχεται να μην έχουν συνέχεια. Σε περίπτωση που τα πολυώνυμα μορφής είναι 1^{ου} βαθμού, οι παράγωγοι είναι σταθεροί αριθμοί και η κατανομή τους για κάποιο στοιχείο είναι σταθερή. Φαίνεται λοιπόν ότι με αύξηση της τάξης του μεγέθους των στοιχείων, βελτιώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

5.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Παρακάτω γίνεται αναφορά σε εργασίες που έχουν σαν αντικείμενο την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.) σπονδύλων και μεσοσπονδύλιων δίσκων (Μ.Δ.).

5.4.1 Μοντέλα Π.Σ. σπονδύλων και σπονδυλικών σωμάτων

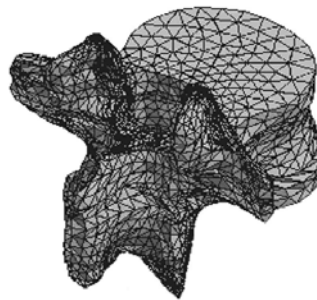
Οι Hakim και King [14, 15] ανέπτυξαν ένα τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενός μεμονωμένου σπονδύλου. Οι ανατομικές λεπτομέρειες του οστού ελήφθησαν ύστερα από κατάτμηση και απευθείας λήψη μετρήσεων. Ο αριθμός των Π.Σ. δεν ξεπερνούσε τα 150 (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3. Το μοντέλο των Hakim & King.

Οι Hakim και King ήταν οι πρώτοι που έλαβαν υπόψη τους τον πρόσθιο επιμήκη σύνδεσμο, ωστόσο ο μεσοσπονδύλιος δίσκος μοντελοποιήθηκε από απλά γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία.

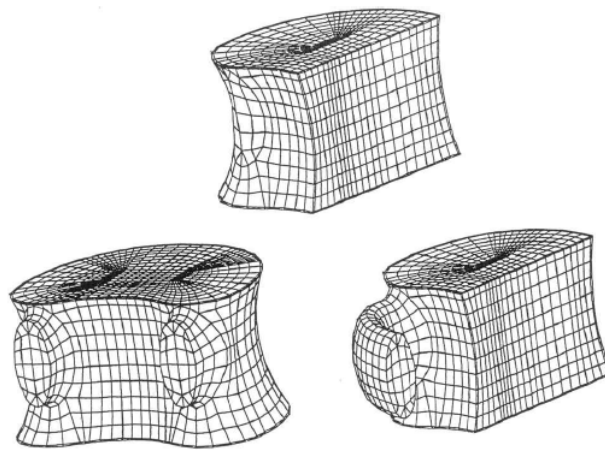
Πολύ πιο ακριβείς γεωμετρίες δημιουργήθηκαν αργότερα χρησιμοποιώντας πληροφορίες από τους υπολογιστικούς αξονικούς τομογράφους για την αναπαράσταση της γεωμετρίας όπως το μοντέλο στο Σχήμα 5.4 που αναπτύχθηκε από τους Fagan et al. [16]



Σχήμα 5.4 Το ακριβές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε από τους Fagan et al.

Οι Mizrahi et al. [41] μελέτησαν τα αποτελέσματα της οστεοπόρωσης, σε έναν εξιδανικευμένο σπονδυλικό σώμα του σπονδύλου O3, μεταβάλλοντας το μέτρο ελαστικότητας (E). Εξέτασαν τη μεταβολή της τάσης κατά την εφαρμογή θλιπτικών φορτίων στο μοντέλο. Οι ιδιότητες των υλικών μεταβάλλονταν μέσα στο μοντέλο Π.Σ. σαν μια συνάρτηση της οστικής πυκνότητας. Η ανάλυση που πραγματοποίησαν έδειξε πως εγκάρσια κατάγματα μπορεί να προκληθούν από την επιβολή ομοιόμορφης θλιπτικής τάσης στην επιφυσιακή πλάκα.

Οι Whyne et al. [17] μελέτησαν την αντοχή του σπονδυλικού σώματος του σπονδύλου O1 (Σχήμα 5.5). Χρησιμοποίησαν απλοποιημένη αναπαράσταση της γεωμετρίας και τυπικές ιδιότητες των υλικών προκειμένου να μελετήσουν τη συνεισφορά του αυχενικού και του οπίσθιου τόξου στην αντοχή.



Σχήμα 5.5 Το απλοποιημένο μοντέλο του σπονδυλικού σώματος του σπονδύλου L1 που χρησιμοποίησαν οι Whyne et al. για τη μελέτη της αντοχής.

Οι Lavaste et al. [18] ανέπτυξαν ένα παραμετροποιημένο μοντέλο Π.Σ. τριών διαστάσεων της οσφυϊκής μοίρας. Χρησιμοποίησαν έξι παραμέτρους για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του κάθε σπονδύλου οι οποίες ελήφθησαν από την ψηφιοποίηση δύο ακτινογραφιών. Οι παράμετροι ήταν το πλάτος, το βάθος, το ύψος και το κοίλωμα του σπονδυλικού σώματος, καθώς και το συνολικό ύψος και βάθος του σπονδύλου. Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επιρροή αυτών των γεωμετρικών παραμέτρων στη μηχανική συμπεριφορά της οσφυϊκής μοίρας [19].

Οι Kong et al. [20] ανέπτυξαν ένα μοντέλο τμήματος της θωρακοοσφυϊκής μοίρας, στο οποίο ελήφθησαν υπόψη οι δυνάμεις στους μύες της θωρακοοσφυϊκής μοίρας. Χρησιμοποίησαν το μοντέλο προκειμένου να προβλέψουν τη συμπεριφορά της θωρακοοσφυϊκής μοίρας και τη μεταφορά φορτίσεων μέσω αυτής, κατά τη στατική καταπόνηση στο κατακόρυφο επίπεδο με φυσιολογική και προβληματική λειτουργία των μυών. Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η δυσλειτουργία των μυών, οδηγεί σε αποσταθεροποίηση της θωρακοοσφυϊκής μοίρας, μειώνει τη λειτουργικότητα των πλευρικών αρθρώσεων – των οποίων ο ρόλος είναι η μετάδοση των φορτίσεων κατά μήκος της σπονδυλικής στήλης – και μετατοπίζει τις φορτίσεις στους Μ.Δ. και στους συνδέσμους.

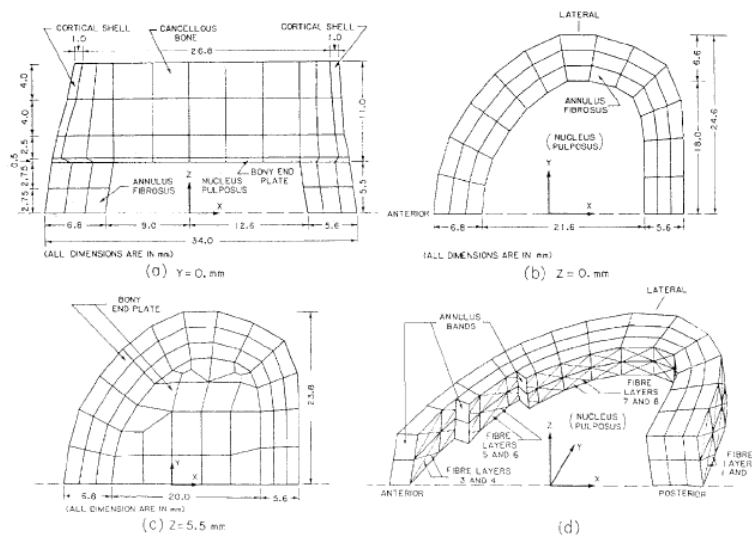
5.4.2 Μοντέλα Π.Σ. Μεσοσπονδύλιων δίσκων

Στο Κεφάλαιο 2.4 έγινε η περιγραφή του μεσοσπονδύλιου δίσκου από την πλευρά της ανατομίας του. Παρακάτω γίνεται μια περιγραφή του μεσοσπονδύλιου δίσκου από την εμβιομηχανική σκοπιά. Γενικά, ο μεσοσπονδύλιος δίσκος έχει απασχολήσει αρκετούς επιστήμονες από το πεδίο της μηχανικής. Ο λόγος είναι αφενός ότι ένα αρκετά υψηλό ποσοστό ανθρώπων ανά τον κόσμο ταλαιπωρείται από προβλήματα στους

μεσοσπονδύλιους δίσκους, αφετέρου η εξαιρετικά ενδιαφέρουσα εμβιομηχανική του συμπεριφορά και ο σημαντικότερος ρόλος του στην ομαλή λειτουργία της σπονδυλικής στήλης.

Μια από τις σημαντικότερες συνεισφορές στη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου έγινε από τους Shirazi-Adl et al. [21] το 1984. Η ομάδα του ανέπτυξε ένα τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του μεσοσπονδύλιου δίσκου O2-O3. Το μοντέλο αποτελείται από φλοιώδες οστό, σπογγώδες οστό και την επιφυσιακή πλάκα (Σχήμα 5.6).

Ο ινώδης δακτύλιος μοντελοποιήθηκε σαν σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από κολλαγόνες ίνες τοποθετημένες στη βασική ουσία του ινώδη δακτυλίου, ενώ ο πυρήνας μοντελοποιήθηκε σαν ασυμπιέστο ρευστό.



Σχήμα 5.6 Το τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του μεσοσπονδύλιου δίσκου O2-O3 που αναπτύχθηκε από τους Shirazi-Adl et al.

Οι κολλαγόνες ίνες του ινώδη δακτυλίου μοντελοποιήθηκαν με μονοδιάστατα γραμμικά Π.Σ., τα οποία ήταν διατεταγμένα χιαστή, περιφερειακά του ινώδη δακτυλίου και τους αποδόθηκαν μη γραμμικές ιδιότητες προκειμένου να προσομοιαστεί η χαλάρωση των ινών σε υψηλές φορτίσεις. Εξαιτίας των υψηλών μετατοπίσεων και καταπονήσεων, τις οποίες υφίσταται ο Μ.Δ. όταν του εφαρμόζονται φυσιολογικές θλιπτικές φορτίσεις, έπρεπε να πραγματοποιηθεί μη γραμμική επίλυση.

Εξαιρετικά σημαντικό ήταν και το μοντέλο Π.Σ. που αναπτύχθηκε από τους Simon et al. [22] το 1985. Το συγκεκριμένο μοντέλο ήταν το πρώτο μοντέλο Π.Σ. που έλαβε υπόψη του την ποροελαστικότητα του Μ.Δ..

Το ίδιο μοντέλο Π.Σ. επεκτάθηκε από τους Laible et al. [23] προκειμένου να λάβει υπόψη τις συνέπειες της διόγκωσης του Μ.Δ. που προκαλείται από την οσμωτική πίεση, έτσι

ώστε η παραλαβή φορτίων από την υγρή φάση να συμβαίνει και σε ισορροπία, με αντίστοιχη μείωση των τάσεων και υποστήριξη της στερεάς κατάστασης. Μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για τον υπολογισμό των εσωτερικών πιέσεων των Μ.Δ. κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, ελήφθησαν υπόψη και έδειξαν να συμφωνούν αρκετά με τα ποροελαστικά μοντέλα Π.Σ. [24, 25].

Κεφάλαιο 6ο Μοντελοποίηση του σπονδύλου

6.1 Μοντελοποίηση

Το σύνολο των απαραίτητων ενεργειών για την ανάπτυξη ενός μοντέλου Π.Σ., δηλαδή η κατασκευή της γεωμετρίας, η γένεση του πλέγματος, η επιβολή των οριακών συνθηκών και η επίλυση, αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Modeling & Analysis – FEM & FEA).

6.2 Κατασκευή της γεωμετρίας του Σπονδύλου

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή της γεωμετρίας είναι η επεξεργασία των αξονικών τομογραφιών.

6.2.1 Πληροφορίες για τις προς επεξεργασία τομογραφίες

Στην παρούσα ΔΕ χρησιμοποιήθηκαν τομογραφίες δύο διαδοχικών καταστάσεων από δύο ασθενείς. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τομογραφίες δύο διαδοχικών καταστάσεων, του 12^{ου} θωρακικού σπονδύλου (Θ12) γυναίκας, που πάσχει από οστεοπόρωση και η οποία έχει υποστεί σπονδυλικό κάταγμα, ηλικίας 70 ετών και του 1^{ου} οσφυϊκού σπονδύλου (Ο1) γυναίκας της ίδιας ηλικίας που επίσης πάσχει από οστεοπόρωση και έχει υποστεί σπονδυλικό κάταγμα. Στην πρώτη κατάσταση έγινε διάγνωση της οστεοπόρωσης και στις δύο περιπτώσεις, ενώ στη δεύτερη κατάσταση απεικονίζεται η εξέλιξη της νόσου κατόπιν φαρμακευτικής αγωγής

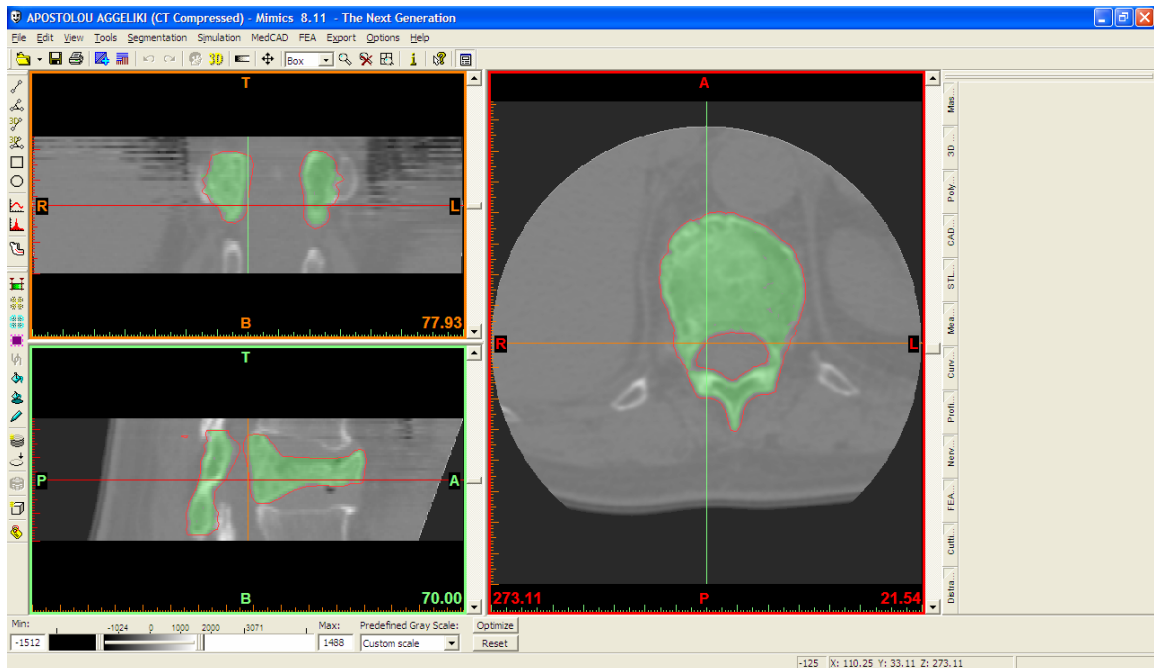
Οι τομογραφίες και των δύο ασθενών ελήφθησαν από αξονικό τομογράφο τύπου GE Medical Systems/Hi Speed και εξάχθηκαν υπό τη μορφή αρχείων DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine). Το DICOM είναι ένα πρότυπο για τη μεταφορά ψηφιακών εικόνων, που επιτρέπει στους χρήστες την ανάκτηση εικόνων και σχετιζόμενων πληροφοριών από απεικονιστικά μηχανήματα, με πρωτοτυποποιημένο τρόπο που είναι ο ίδιος για όλα τα μηχανήματα.

Όλες οι τομογραφίες που ελήφθησαν έχουν ανάλυση 512x512 pixel. Το πάχος της κάθε τομής για την περίπτωση του Θ12 είναι 0.94 mm, ενώ του Ο1 είναι 0.93 mm. Η τιμή της γωνιακής διόρθωσης (tilt) για τον πρώτο σπόνδυλο είναι 20.5° ενώ για τον δεύτερο είναι 21°.

6.2.2 Επεξεργασία αξονικών τομογραφιών

Συνολικά, έγινε επεξεργασία τεσσάρων ομάδων τομογραφιών με τη χρήση του λογισμικού Mimics 8.11 (Σχήμα 6.1). Πιο συγκεκριμένα, από τις τομογραφίες απομονώνονται τα οστά που μας ενδιαφέρουν. Δηλαδή, διαγράφονται τα γειτονικά οστά, τα πλευρά καθώς και διάφορα άλλα σημεία θορύβου. Στη συνέχεια συμπληρώνονται τα κενά τμήματα του σπονδύλου, όπου χρειάζεται. Τα κενά αυτά προκύπτουν στις περιοχές όπου η φωτεινότητα του οστού είναι χαμηλότερη από αυτή που εμείς ορίσαμε ως

ελάχιστη στο πρόγραμμα Mimics. Η διαδικασία αυτή δε διαφέρει από τη χρήση ενός οποιουδήποτε προγράμματος επεξεργασίας εικόνας.



Σχήμα 6.1 Περιβάλλον λογισμικού επεξεργασίας ιατρικών τομογραφιών (MIMICS).
Τομογραφίες του Θ12 στη δεύτερη κατάσταση

Αφού απομονωθούν τα οστά που μας ενδιαφέρουν για την κάθε περίπτωση, ακολουθεί η απεικόνιση του τριδιάστατου μοντέλου με τη χρήση τριγωνικών επιφανειών. Για την πραγματοποίηση της τριδιάστατης απεικόνισης ο χρήστης πρέπει να αποφασίσει τις τιμές παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα και την πιστότητα του αποτελέσματος. Οι παράμετροι αυτές είναι ο τρόπος παρεμβολής, η εξομάλυνση της επιφανείας, ο αριθμός των τριγώνων που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα και στις τέσσερις τριδιάστατες απεικονίσεις:

- Χρησιμοποιήθηκε φίλτρο ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη μικρών όγκων κενού μέσα στον όγκο (shell reduction). Η τιμή που ορίζεται από το χρήστη είναι η μέγιστη τιμή του όγκου που δεν θα ληφθεί υπόψη.
- Ορίστηκε ο αριθμός των επαναλήψεων εξομάλυνσης (iterations) ίσος με 2 και ο συντελεστής εξομάλυνσης (smoothing factor) ίσος με 0.30. Ο αριθμός των επαναλήψεων πρέπει να οριστεί προσεκτικά από το χρήστη ώστε να μην είναι υπερβολικά μεγάλος. Αν ο αριθμός των επαναλήψεων είναι πολύ μεγάλος κάθε τριδιάστατο αντικείμενο θα μετατραπεί σε σφαιροειδές. Ο συντελεστής εξομάλυνσης παίρνει τιμές από 0 έως 1. Όσο ο συντελεστής παίρνει τιμές κοντά στο μηδέν, η τοπική γεωμετρία θεωρείται σημαντική οπότε έχουμε περιορισμένη

εξομάλυνση ενώ όσο ο συντελεστής πλησιάζει το 1 τόσο πιο ομαλή γίνεται η γεωμετρία.

- Ορίστηκε ο αριθμός των εικονοστοιχείων που ομαδοποιούνται κατά το επίπεδο xy ίσος με 6 και κατά τον άξονα z ίσος με 2 ώστε να δημιουργηθούν οι τριγωνικές επιφάνειες. Ο αριθμός των εικονοστοιχείων που ορίζεται στο xy επίπεδο πολλαπλασιάζεται με το μήκος (mm) του κάθε εικονοστοιχείου. Αντίστοιχα ο αριθμός που ορίστηκε κατά τον άξονα z πολλαπλασιάζεται με την απόσταση δύο διαδοχικών τομογραφιών. Υπολογίζεται, λοιπόν έμμεσα και το μέγεθος των τριγωνικών επιφανειών
- Τέλος, μειώθηκε ο αριθμός των τριγωνικών επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν. Επιλέχθηκε κατά τη διαδικασία της μείωσης να απομακρύνονται πλευρές (edge based) και όχι μεμονωμένα σημεία (point based) καθώς αυτό προτείνεται από το λογισμικό για εφαρμογές εμβιομηχανικής. Με βάση αυτή την επιλογή ορίστηκαν τρεις ακόμα παράμετροι:
 1. Η ανοχή, που ορίζει τη μέγιστη απόκλιση (mm) που μπορεί να έχει ένα τρίγωνο ώστε να είναι μέρος μιας επιφάνειας. Tolerance=pixel size.
 2. Ο αριθμός των επαναλήψεων που ορίζει το πόσες φορές θα γίνουν οι υπολογισμοί. Number of iterations=5
 3. Η ελάχιστη γωνία που μπορούν να σχηματίζουν οι πλευρές ενός τριγώνου. Σε περίπτωση που σχηματίζουν μικρότερη γωνία το τρίγωνο ομαδοποιείται με άλλα τρίγωνα. Edge angle=20o

Το Mimics παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εξάγει την τριδιάστατη γεωμετρία σε αρχεία διαφόρων μορφών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται η εξαγωγή του μοντέλου σε μορφή STL (stereolithography). Το αρχείο STL είναι ένα ASCII αρχείο κειμένου και προκειμένου να εισαχθεί στο λογισμικό ανάλυσης με Π.Σ. υφίσταται ορισμένες μετατροπές με τη βοήθεια ενός διορθωτή κειμένου (editor).

Στο αρχείο STL έγιναν οι παρακάτω μετατροπές:

1. Εισήχθη στην αρχή του αρχείου η εντολή /PREP7 προκειμένου να ανοίξει ο προεπεξεργαστής του προγράμματος Π.Σ..
2. Όλες οι γραμμές όπου εμφανίζονταν οι εντολές "end", "facet" ή "outer" μετατράπηκαν σε σχόλια με την εισαγωγή "!".
3. Προκειμένου να γίνει η εισαγωγή των σημείων (keypoints) όπου "vertex" εισήχθει "k", ενώ όπου υπάρχει κενό εισάγεται ",". Οι παραπάνω αλλαγές πραγματοποιούνται διότι η μορφή της εντολής με την οποία εισάγονται σημεία στο πρόγραμμα Π.Σ. που χρησιμοποιήθηκε έχει τη μορφή: K, NPT, X, Y, Z. Όπου το K δηλώνει ότι πρόκειται να

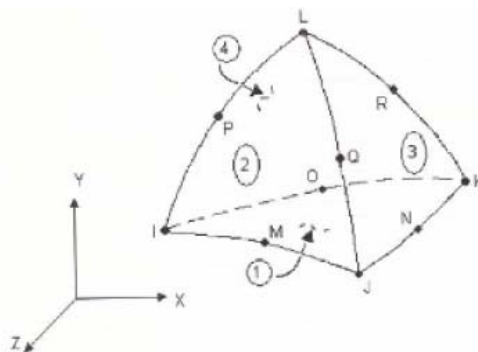
εισαχθεί ένα keypoint, το NPT δηλώνει τον αριθμό του keypoint και τα X, Y, Z τις συντεταγμένες του στο εν ενεργεία σύστημα συντεταγμένων.

6.3 Εισαγωγή της τριδιάστατης γεωμετρίας στο πρόγραμμα Π.Σ.

Μετά την τροποποίηση του αρχείου STL, αυτό εισάγεται στο πρόγραμμα Π.Σ. που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή στο Ansys v11.0 με την επιλογή 'Read input from...' από την επιλογή File της γραμμής εργαλείων. Έτσι, εισάγονται τα σημεία (keypoints) που αντιστοιχούν στις κορυφές των τριγώνων που περιγράφουν τη γεωμετρία των σπονδύλων και από τα οποία στη συνέχεια θα δημιουργηθεί η τριδιάστατη γεωμετρία των σπονδύλων. Μετά την εισαγωγή των σημείων δημιουργούνται από αυτά επιφάνειες και στη συνέχεια, από τις επιφάνειες, όγκοι. Προκειμένου να δημιουργηθούν οι όγκοι, μετά τη δημιουργία των επιφανειών ακολουθεί μια διαδικασία συγχώνευσης των διπλών σημείων (merging). Τα διπλά σημεία δημιουργούνται διότι κατά τη δημιουργία των τριγωνικών επιφανειών ορισμένα σημεία ανήκουν σε δύο τριγωνικές επιφάνειες. Αυτή η διαδικασία λοιπόν είναι απαραίτητη διότι σε αντίθετη περίπτωση, η δημιουργία όγκων θα ήταν αδύνατη καθώς η ύπαρξη διπλών σημείων θα είχε σαν αποτέλεσμα οι γειτονικές επιφάνειες να μη συνδέονται μεταξύ τους.

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία πλέγματος. Πριν δημιουργηθεί το πλέγμα πρέπει να επιλεγεί το κατάλληλο είδος πεπερασμένου στοιχείου. Το στοιχείο που θα επιλεγεί θα πρέπει να επιτρέπει την κατά το δυνατό πιστότερη αναπαράσταση του σπονδύλου. Στην παρούσα ΔΕ επιλέχθηκε το στοιχείο Solid 92. Πρόκειται για δεκακομβικό στοιχείο με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, τις μετατοπίσεις x, y και z, και είναι κατάλληλο για μοντέλα με ακανόνιστο πλέγμα και πολύπλοκη γεωμετρία διότι έχει και ενδιάμεσους κόμβους με αποτέλεσμα να μπορεί να ακολουθεί τις καμπύλες της γεωμετρίας.

Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται το στοιχείο Solid 92 που χρησιμοποιήθηκε.

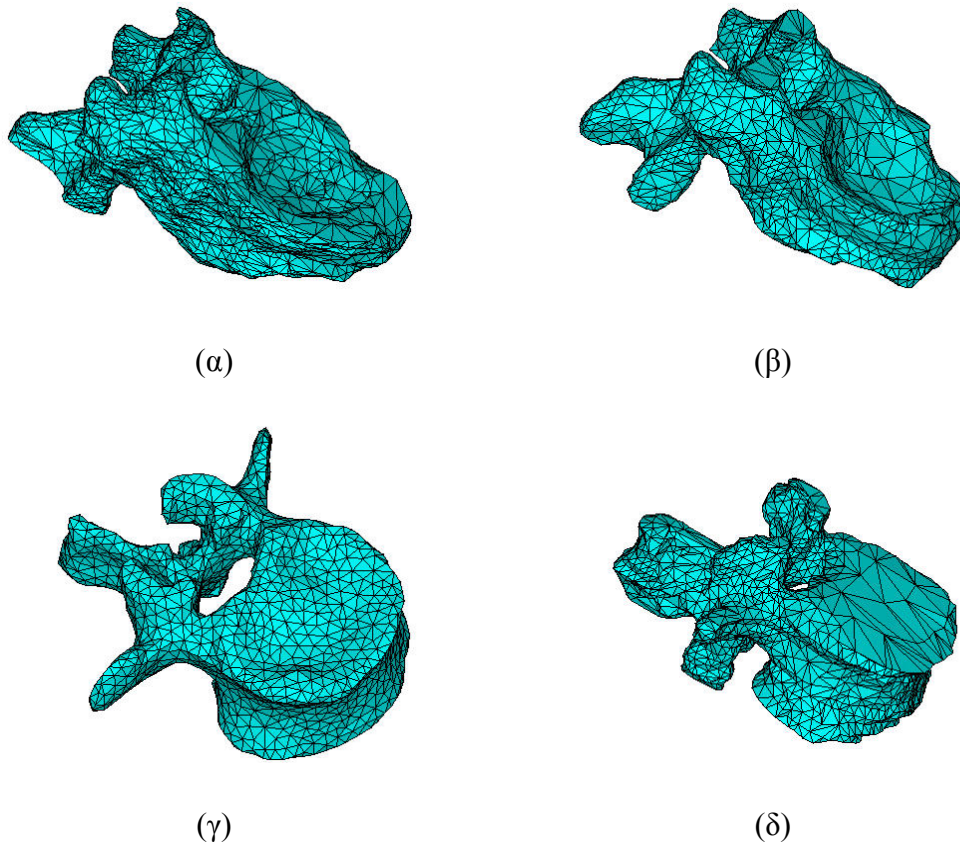


Σχήμα 6.2 Το πεπερασμένο στοιχείο SOLID 92 της βιβλιοθήκης του ANSYS

Στη συνέχεια, ορίζεται μέγιστο μήκος πλευράς των πεπερασμένων στοιχείων ίσο με 4. Έχει αποδειχθεί ότι πεπερασμένα στοιχεία με μήκος πλευράς έως 4 δίνουν πλέγμα

ικανοποιητικής πυκνότητας στους σπονδύλους. Επιπλέον όσο μικρότερο είναι το μήκος της πλευράς, τόσο πυκνότερο είναι το πλέγμα που σημαίνει υψηλότερο υπολογιστικό κόστος. Στη συνέχεια δημιουργείται το πλέγμα (meshing) με ελεύθερη διακριτοποίηση (free).

Στο Σχήμα 6.3 φαίνονται το πλέγμα και οι γεωμετρίες των υπό εξέταση σπονδύλων.



Σχήμα 6.3 Οι γεωμετρίες των σπονδύλων Θ12 (α) στην πρώτη κατάσταση και (β) στη δεύτερη κατάσταση και του Ο1 (γ) στην πρώτη κατάσταση και (δ) στη δεύτερη κατάσταση.

6.4 Απόδοση Υλικών στους σπονδύλους

Το επόμενο βήμα είναι η απόδοση υλικών σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab που είχε αναπτυχθεί στο Εργαστήριο. Το πρόγραμμα απόδοσης υλικών αντιστοιχίζει το κέντρο βάρους του κάθε πεπερασμένου στοιχείου σε μια τιμή φωτεινότητας (CT number), και κατ' επέκταση σε ένα υλικό. Αυτό σημαίνει ότι πριν την επεξεργασία του προγράμματος στο Matlab δημιουργείται ένα αρχείο, το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες των κέντρων βάρους του κάθε πεπερασμένου στοιχείου.

Παρακάτω γίνεται ανάλυση των βημάτων του προγράμματος απόδοσης υλικών:

- Αρχικά το πρόγραμμα, με τη χρήση της εντολής dlmread, διαβάζει τις συντεταγμένες του κέντρου βάρους του κάθε Π.Σ. και τις αποθηκεύει σε έναν πίνακα με τρεις στήλες και γραμμές όσες και ο αριθμός των Π.Σ..
- Ορίζεται το μέγεθος των εικονοστοιχείων (pixels) σε χιλιοστά, διαιρώντας τη διάμετρο της κάθε τομογραφίας με τον αριθμό των pixels κατά τον άξονα x (512).
- Το εύρος των τιμών φωτεινότητας της κάθε ομάδας τομογραφιών χωρίζεται σε τόσα διαστήματα όσος και ο αριθμός των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Στην προκειμένη περίπτωση ορίζονται εννέα υλικά.
- Με την εντολή dicomread το πρόγραμμα διαβάζει τις τομογραφίες του κάθε σπονδύλου. Κάθε τομογραφία αποτελεί έναν πίνακα 512x512, συνεπώς οι τιμές φωτεινότητάς τους τοποθετούνται σε έναν πίνακα που αποτελείται από 512 στήλες και γραμμές ίσες με το γινόμενο του αριθμού τομογραφιών επί 512.
- Κάθε κέντρο βάρους αντιστοιχίζεται με μια τιμή φωτεινότητας του συνολικού πίνακα. Ωστόσο το κέντρο βάρους συνήθως δε συμπίπτει με το επίπεδο κάποιας τομογραφίας. Το γεγονός αυτό αντιμετωπίζεται ως εξής:
 1. Προσδιορίζεται εκ' νέου η τιμή φωτεινότητας του κάθε κέντρου βάρους λαμβάνοντας υπόψη και τα οκτώ γειτονικά του. Αυτό γίνεται τόσο για την πάνω όσο και την κάτω τομή.
 2. Ορίζεται ένας συντελεστής που δηλώνει σε ποια τομή βρίσκεται πλησιέστερα το κέντρο βάρους του πεπερασμένου στοιχείου.
 3. Βρίσκεται ο σταθμισμένος μέσος όρος φωτεινότητας των δύο εννιάδων, ο οποίος θα είναι και η τιμή φωτεινότητας του κέντρου βάρους.
- Ανάλογα με το εύρος τιμών φωτεινότητας στο οποίο ανήκει η τιμή φωτεινότητας του κέντρου βάρους του Π.Σ., αυτό αντιστοιχίζεται σε ένα υλικό
- Τέλος, τα Π.Σ. ανάλογα με το υλικό στο οποίο ανήκουν αποθηκεύονται σε ένα αρχείο το οποίο διαβάζεται από το Ansys κατά την διαδικασία απόδοσης υλικών.

6.5 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson

Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson για το κάθε υλικό του σπονδύλου.

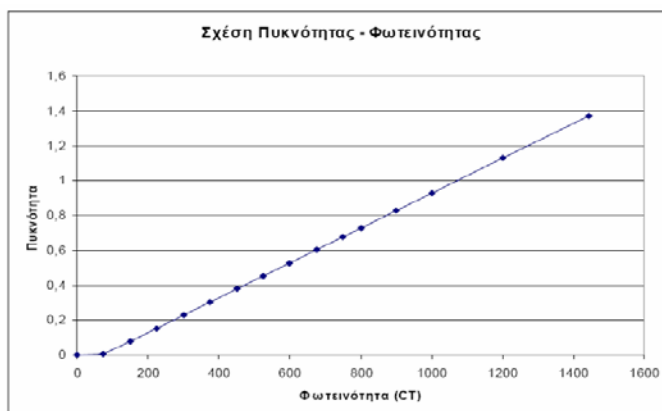
6.5.1 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας του κάθε υλικού συνδέεται με τη φωτεινότητά που λαμβάνεται από την τομογραφία. Συγκεκριμένα, η φωτεινότητα συνδέεται με την οστική πυκνότητά του μέσω της γραμμικής σχέσης

$$y = a \cdot x + b \quad (6.1)$$

Οι συντελεστές a και b εξαρτώνται από τον τομογράφο που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των τομογραφιών. Προηγούμενες μελέτες που έχουν γίνει στο εργαστήριο για τον συγκεκριμένο τομογράφο έχουν καταλήξει στην παρακάτω σχέση με πολύ καλή προσέγγιση:

$$BMD = 0,001 \times (CTNumber) - 0,072 \quad (6.2)$$



Σχήμα 6.4. Σχέση πυκνότητας-φωτεινότητας

Η οστική πυκνότητα συνδέεται, με τη σειρά της, με το μέτρο ελαστικότητας. Συνεπώς, το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός της τιμής του μέτρου ελαστικότητας του κάθε υλικού. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί τύποι οι οποίοι συσχετίζουν το μέτρο ελαστικότητας με την οστική πυκνότητα. Στην παρούσα ΔΕ επιλέχθηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

Για το φλοιώδες οστό:

$$E(GPa) = 4.25 \cdot \rho^3 \quad (6.3)$$

Για το σπογγώδες οστό:

$$E(GPa) = 4.76 \cdot \rho^{1.56} \quad (6.4)$$

Η Σχέση 6.3 χρησιμοποιείται για τιμές φωτεινότητας από 1000 και πάνω ενώ η Σχέση 6.4 για τιμές φωτεινότητας από 400 και κάτω. Για τις ενδιάμεσες τιμές χρησιμοποιείται η ενδιάμεση σχέση:

$$E(GPa) = 5.00 \cdot \rho^{1.2} \quad (6.5)$$

Η Σχέση 6.5 ορίστηκε λόγω του ότι οι σπόνδυλοι που μελετήθηκαν είναι οστεοπορωτικοί επομένως η διάκριση σε φλοιώδες και σπογγώδες οστό δεν είναι ξεκάθαρη.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 6.1 που παρουσιάζει τον αριθμό του υλικού, την οστική του πυκνότητα, τη φωτεινότητά του, το μέτρο ελαστικότητάς του και τον τύπο που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του.

Πίνακας 6.1 Παρουσίαση Υλικών

Υλικό	Οστική πυκνότητα	Φωτεινότητα	Μέτρο ελαστικότητας MPa	Τύπος που χρησιμοποιήθηκε
1	-	-700- +100	1	-
2	0.078	100-200	88	2
3	0.178	200-300	320	2
4	0.278	300-400	642	2
5	0.378	400-500	1556	3
6	0.478	500-600	2062	3
7	0.628	600-800	2861	3
8	0.828	800-1000	3987	3
9	1.166	1000-1400	6100	1

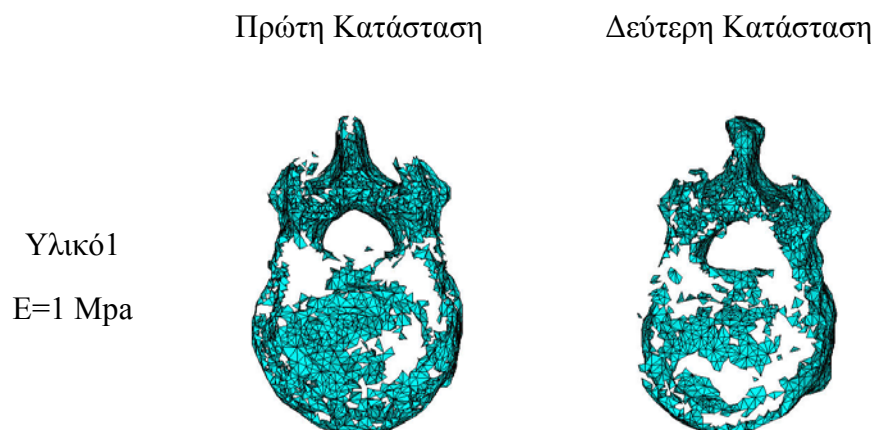
6.5.2 Λόγος Poisson

Σύμφωνα με τις περισσότερες διεθνείς μελέτες, σχετικές με τα οστά και τις ιδιότητές τους, χρησιμοποιείται λόγος Poisson ίσος με 0.3.

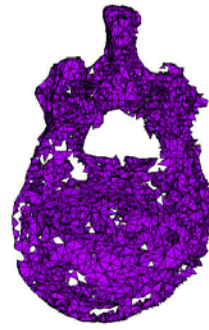
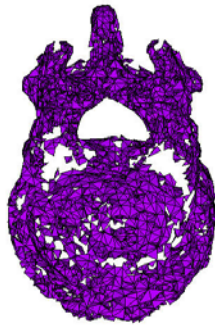
6.6 Κατανομή των υλικών για τις δύο καταστάσεις στους δύο σπονδύλους

6.6.1 Σπόνδυλος Θ12

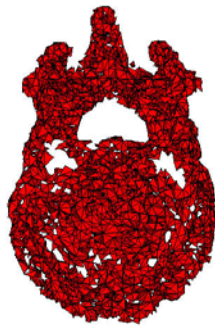
Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται η κατανομή υλικών στο σπόνδυλο Θ12 τόσο στην πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση.



Υλικό 2
E=88 MPa



Υλικό 3
E=320 MPa



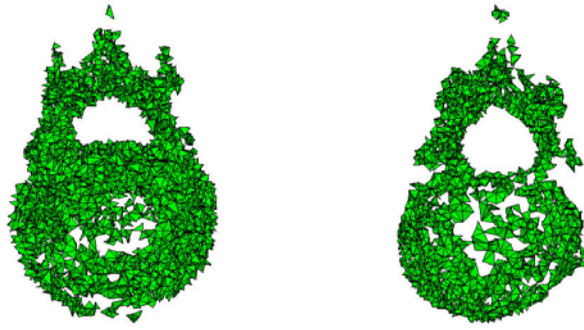
Υλικό 4
E=642 MPa



Υλικό 5
E= 1556 MPa



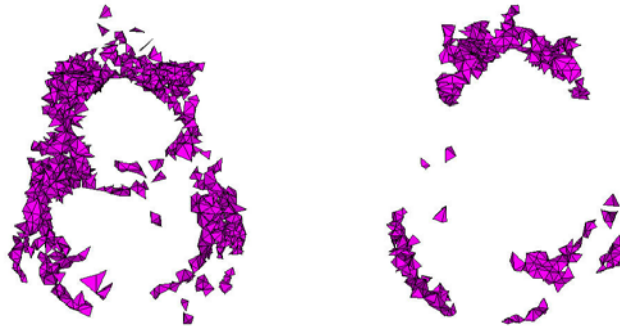
Υλικό 6
E= 2062 MPa



Υλικό 7
E=2861 MPa



Υλικό 8
E=3987 MPa

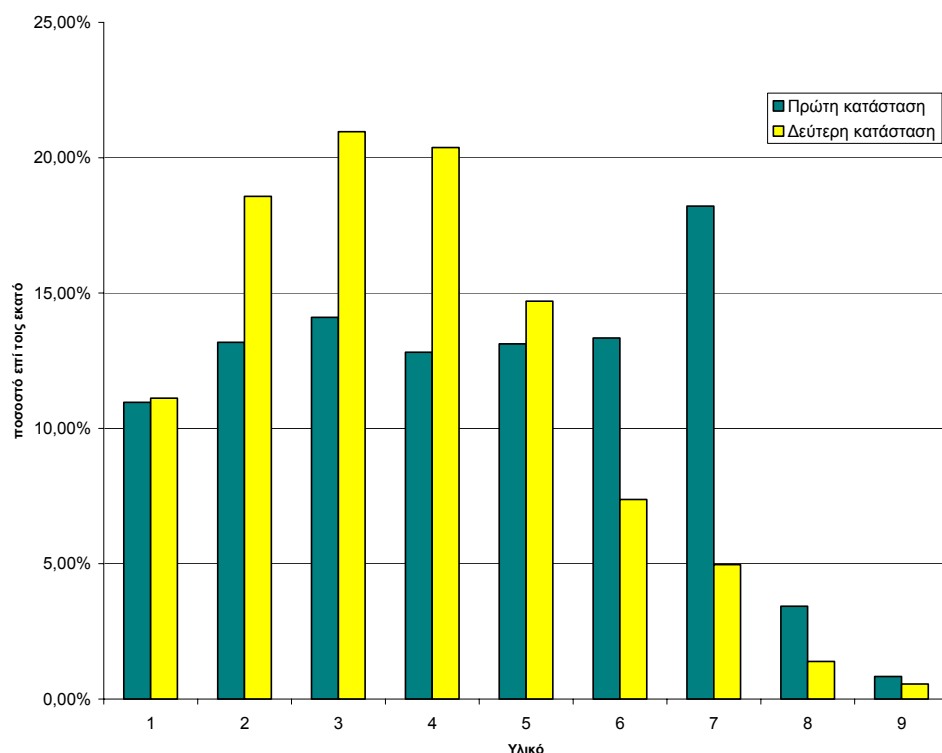


Υλικό 9
E=6100 MPa



Σχήμα 6.5 Κατανομή των υλικών του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη και στη δεύτερη κατάσταση

Στο Σχήμα 6.6 που ακολουθεί φαίνεται η ποσοστιαία κατανομή των υλικών του Θ12 στις δύο διαδοχικές καταστάσεις.



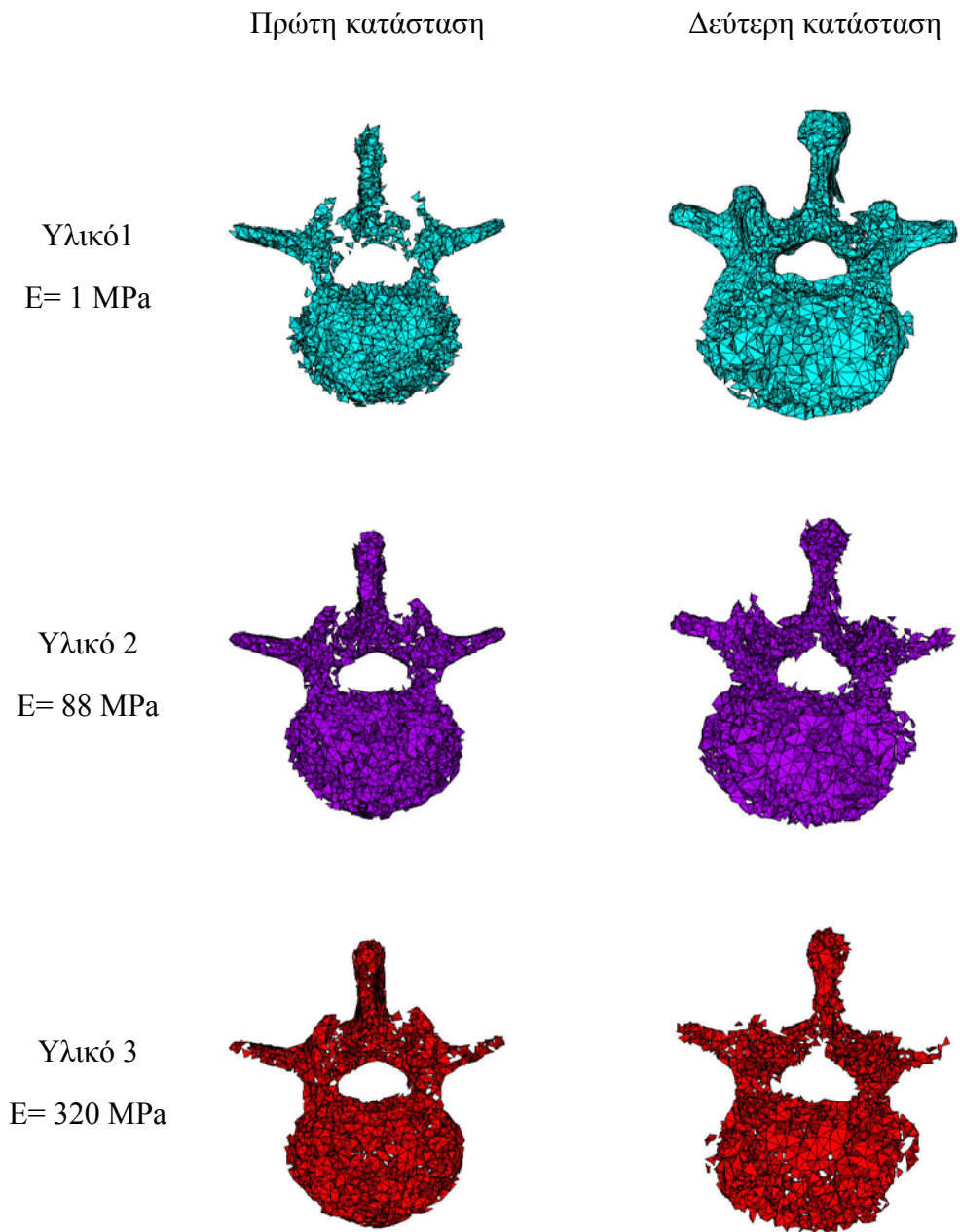
Σχήμα 6.6. Ποσοστιαία κατανομή των υλικών στο σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση το μεγαλύτερο ποσοστό Π.Σ. συγκεντρώνεται στο τρίτο υλικό ,14.10% και 20.96% στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση αντίστοιχα. Επίσης παρατηρείται ότι και στις δύο καταστάσεις στο πρώτο υλικό, που έχει μοντελοποιηθεί με μέτρο ελαστικότητας ίσο με 1MPa, συγκεντρώνεται πάνω από το 10% του συνολικού όγκου των Π.Σ. Στη δεύτερη κατάσταση το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο από την πρώτη. Αντιθέτως, στη δεύτερη κατάσταση παρατηρείται σημαντική μείωση του έβδομου κατά 70.1% και του όγδοου υλικού κατά 55.7% . Παρόλα αυτά, γενικά στη δεύτερη κατάστασης η κατανομή των υλικών είναι ομαλότερη.

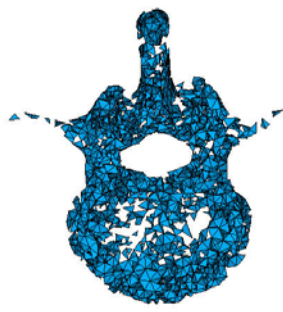
Το μεγαλύτερο ποσοστό στοιχείων, και στις δύο καταστάσεις, συγκεντρώνεται στα πρώτα υλικά που αντιστοιχούν στο σπογγώδες οστό. Συγκεκριμένα τα τέσσερα πρώτα υλικά συγκεντρώνουν 51.05% και 71.03% του συνολικού όγκου, στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση αντίστοιχα. Το ποσοστό των Π.Σ. που ανήκουν στα πέντε πρώτα υλικά αυξάνεται στη δεύτερη κατάσταση κατά 46.53% κάτι που οφείλεται κυρίως στην σημαντική αύξηση του ποσοστού του όγκου των Π.Σ. που ανήκουν στα υλικά 2, 3, 4 και 5.

6.6.2 Σπόνδυλος O1

Στο Σχήμα 6.7 κατ' αντιστοιχία με τον σπόνδυλο Θ12, φαίνεται η κατανομή υλικών στο σπόνδυλο O1 τόσο στην πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση.



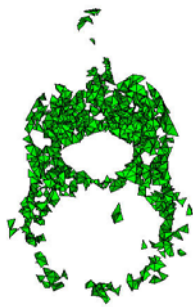
Υλικό 4
E= 642 MPa



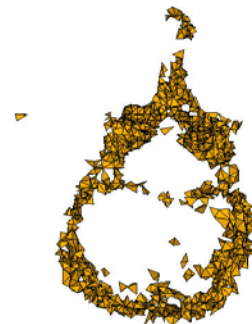
Υλικό 5
E= 1556 MPa



Υλικό 6
E= 2062 MPa



Υλικό 7
E= 2861 MPa



Υλικό 8
E= 3987 MPa

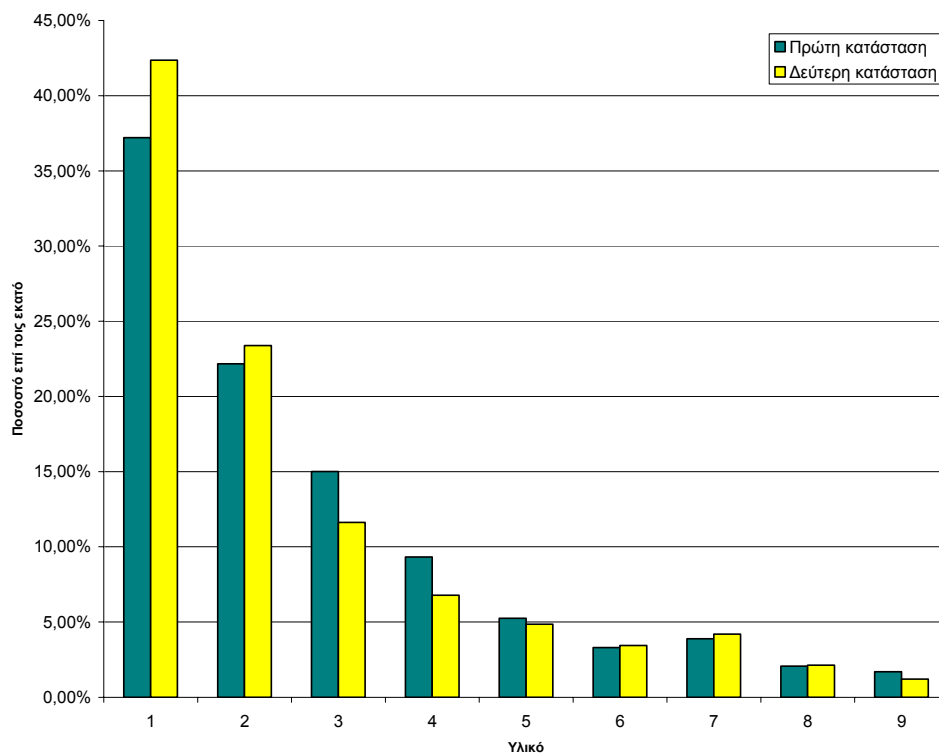


Υλικό 9
E= 6100 MPa



Σχήμα 6.7 Κατανομή των υλικών του σπονδύλου O1 στην πρώτη (αριστερά) και στη δεύτερη (δεξιά) κατάσταση

Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται η ποσοστιαία κατανομή των υλικών στο σπόνδυλο της δεύτερης ασθενούς στις δύο διαδοχικές καταστάσεις.



Σχήμα 6.8 Ποσοστιαία κατανομή υλικών στο σπόνδυλο O1 για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Αρχικά παρατηρείται ότι και οι δύο καταστάσεις έχουν την ίδια κατανομή Π.Σ. ανά υλικό. Στο πρώτο υλικό ανήκει το μεγαλύτερο ποσοστό Π.Σ.. Το ποσοστό αυτό μειώνεται διαδοχικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός του υλικού. Εξαιρέση αποτελεί το έβδομο υλικό που αυξάνεται σε σχέση με το έκτο.

Το μεγαλύτερο ποσοστό Π.Σ. βρίσκεται στα πρώτα υλικά και συγκεκριμένα, στα πέντε πρώτα υλικά στην πρώτη κατάσταση συγκεντρώνεται ποσοστό 88.96 %, ενώ στη δεύτερη κατάσταση συγκεντρώνεται ποσοστό 89 %, ενώ τα δύο πρώτα υλικά αντιστοιχούν σε ποσοστό περίπου 60 % του συνολικού όγκου των Π.Σ στην πρώτη κατάσταση ενώ περίπου πάνω από 60 % στη δεύτερη κατάσταση . Τα υλικά 2 έως 5 καταλαμβάνουν υψηλότερο ποσοστό στην πρώτη κατάσταση συγκριτικά με τη δεύτερη. Στην πρώτη κατάσταση τα υλικά αυτά αντιστοιχούν σε ποσοστό 55.06% ενώ στη δεύτερη 46.64 %. Αντιθέτως το ποσοστό των υλικών 6 μέχρι 8 αυξάνεται στη δεύτερη κατάσταση. Συγκεκριμένα το ποσοστό του συνολικού όγκου που αντιστοιχεί στα υλικά 6 μέχρι 8 στη δεύτερη κατάσταση αυξάνεται κατά 20.5%.

Τέλος να αναφερθεί ότι η μεγαλύτερη αύξηση ποσοστού από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση, παρατηρείται στα υλικά 1 και 7 και είναι ίση με 10.35 % και 4.9 % αντίστοιχα, ενώ η μεγαλύτερη μείωση στο τρίτο υλικό (24.9 %).

Κεφάλαιο 7ο Μοντελοποίηση Μεσοσπονδύλιου δίσκου

7.1 Εισαγωγή

Οι διαδικασίες που περιγράφησαν στο Κεφάλαιο 6ο οδηγούν στην κατασκευή ενός πλήρους μοντέλου Π.Σ για τον καθένα από τους σπονδύλους σε κάθε κατάσταση, δηλαδή κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα για τον Θ12 και δύο για τον Ο1. Σκοπός της παρούσας ΔΕ, όμως είναι να μελετηθεί και η επίδραση της εισαγωγής μεσοσπονδύλιων δίσκων στα αποτελέσματα τις μηχανικής ανάλυσης. Στο Κεφάλαιο 7ο, λοιπόν, θα αναλυθεί η δημιουργία μοντέλων Π.Σ. μεσοσπονδύλιων δίσκων και η εισαγωγή τους στα μοντέλα των σπονδύλων.

7.2 Φορτίσεις στο Μεσοσπονδύλιο Δίσκο

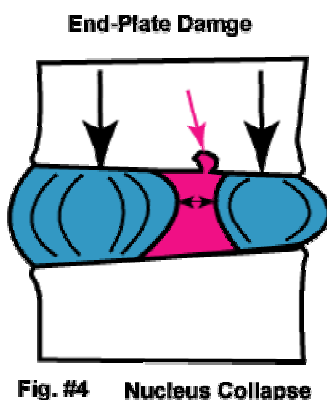
Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος είναι τοποθετημένος ανάμεσα στους σπονδύλους και υπόκειται σε διάφορα είδη φορτίσεων. Η βασική φόρτιση στην οποία υπόκειται είναι η θλιπτική και παρατηρήθηκε, σε πειράματα που έγιναν από τον Nachemson [30], ότι στην καθιστική στάση η καταπόνηση των μεσοσπονδύλιων δίσκων της οσφυϊκής μοίρας είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από το βάρος του ανώτερου κορμού. Στο μεσοσπονδύλιο δίσκο, σε πειραματικό επίπεδο, επιβλήθηκαν και δυναμικές καταπονήσεις – στην καθημερινή ζωή τέτοιες είναι οι περιπτώσεις που ο άνθρωπος πηδάει. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε καταπόνηση των μεσοσπονδύλιων δίσκων διπλάσια σε σχέση με την περίπτωση της στατικής καταπόνησης. Στο μεσοσπονδύλιο δίσκο επιβλήθηκαν επίσης εκτατικές και διατμητικές τάσεις. Οι παραπάνω φορτίσεις έδρασαν σε διαφορετικά τμήματα του μεσοσπονδύλιου δίσκου ανάλογα με το αν η κίνηση ήταν κάμψη ή έκταση.

Οι φορτίσεις που υφίσταται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος μπορούν να είναι είτε φορτίσεις μεγάλου μεγέθους που δρουν για μικρή διάρκεια, είτε φορτίσεις μικρού μεγέθους που δρουν για μεγάλη διάρκεια. Η παρούσα ΔΕ ασχολείται με στατικές καταπονήσεις.

7.3 Εμβιομηχανική του Μεσοσπονδύλιου Δίσκου

Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος στη φύση έχει ιξωδοελαστικές ιδιότητες, αυτό σημαίνει ότι επηρεάζεται από το ρυθμό επιβολής της φόρτισης. Οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού μπορούν να μετρηθούν επιβάλλοντας φόρτιση με αργό ρυθμό. Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος είναι ο βασικός φορέας φορτίσεων της σπονδυλικής στήλης – κυρίως δέχεται θλιπτικές φορτίσεις. Έχουν γίνει πολλές δοκιμές ασκώντας σταθερή θλιπτική τάση, στο μεσοσπονδύλιο δίσκο και σε κομμάτι του γειτονικού σπονδύλου είτε σε ολόκληρο το γειτονικό σπόνδυλο. Με τη βοήθεια αυτών των πειραματικών δοκιμών εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για τις φυσικές ιδιότητες του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Η καμπύλη στα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι σιγμοειδής, που σημαίνει ότι ο μεσοσπονδύλιος δίσκος για μικρές τάσεις εμφανίζει μικρή αντίσταση, ενώ για μεγαλύτερες τάσεις μεγαλύτερη αντίσταση. Σε τέτοια πειράματα, που ασκείται στο δίσκο σταθερή θλιπτική τάση, έχει παρατηρηθεί ότι πρώτα αστοχεί το

σπονδυλικό σώμα λόγω του ότι σπάει η τελική πλάκα. Αυτό διέφερε σε περίπτωση που ο σπόνδυλος ήταν οστεοπορωτικός, όπου και διαπιστωνόταν πρόωμη αστοχία του σπονδυλικού σώματος [27]. Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος δεν υπήρξε αστοχία του δίσκου λόγω δημιουργίας κήλης. Παρότι η υπερβολική επιβολή δύναμης δεν ευθύνεται για τη δημιουργία κήλης στο μεσοσπονδύλιο δίσκο ο «κόμβος του Schmorl» μπορεί να προκληθεί από επιβολή υπερβολικής δύναμης. Ο κόμβος του Schmorl (Σχήμα 7.1) είναι η διαρροή ιστού του μεσοσπονδύλιου δίσκου μέσα στο σπονδυλικό σώμα από την τελική πλάκα.



Σχήμα 7.1 Ο κόμβος του Schmorl οφείλεται σε αστοχία της τελικής πλάκας κατά τη συμπίεση.

Ο δίσκος σπάνια δέχεται καθαρά εφελκυστικές φορτίσεις αλλά μέρος του δίσκου υπόκειται σε εφελκυστικές φορτίσεις κυρίως κατά τις διαδικασίες της κάμψης, της έκτασης και της πλευρικής κάμψης. Παλαιότερα πειράματα του Brown [25] που έγιναν με σκοπό να μελετηθεί η μεταβολή της δύναμης σχετικά με τη θέση και τον προσανατολισμό του δίσκου έδειξαν ότι το εμπρός και το πίσω μέρος του δίσκου ανθίστανται καλύτερα στην επιβολή εφελκυστικών δυνάμεων σε σχέση με την περιοχή του πηκτοειδούς πυρήνα η οποία είναι πιο αδύνατη.

Άλλα πειράματα [28] έχουν δείξει ότι ο μεσοσπονδύλιος δίσκος ανθίσταται καλύτερα σε θλιπτικές φορτίσεις από ότι σε εφελκυστικές φορτίσεις. Υπεύθυνος για αυτό θεωρείται ο πηκτοειδής πυρήνας καθώς κατά τον εφελκυσμό δεν γίνεται να ενδυναμωθεί όπως στην περίπτωση της συμπίεσης όπου αποβάλλει προσωρινά νερό.

Ο Farfan [29] εξετάζοντας μεσοσπονδύλιους δίσκους της οσφυϊκής μοίρας διαπίστωσε ότι η αντοχή τους σε στρέψη είναι καλύτερη σε δίσκο μη εκφυλισμένο από ότι σε ενυδατωμένο δίσκο (hydrated disc). επίσης, οι μεγαλύτεροι δίσκοι παρουσίαζαν μεγαλύτερη αντοχή σε στρέψη.

Τέλος, οι Nachemson και Morris [30] ήταν οι πρώτοι που προσδιόρισαν την πίεση εντός του δίσκου σε in vivo πειράματα. Στα πειράματα αυτά διαπιστώθηκε, εκτός των άλλων,

ότι η φόρτιση στην οποία υπόκειται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος (συγκεκριμένα οι μετρήσεις έγιναν στον O3-O4) ήταν μεγαλύτερη από το βάρος του κορμού πριν από το δίσκο.

7.4 Διόγκωση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Η ακτινική και αξονική παραμόρφωση έχει μελετηθεί σε ενυδατωμένο μεσοσπονδύλιο δίσκο (σε άτομα άνω των 30 ετών). Οι Shah και Jayson [31] διεξήγαγαν πειράματα σε πτωματικά δείγματα μεσοσπονδύλιων δίσκων O4-O5 επιβάλλοντας ελεγχόμενη φόρτιση και κάνοντας λεπτομερή καταμέτρηση/ανάλυση των τάσεων. Παρατήρησαν ότι η ακτινική διόγκωση του μεσοσπονδύλιου δίσκου αυξάνεται σε σχέση με τη φόρτιση με μη γραμμικό τρόπο κάτι που τονίζει το γεγονός ότι η δυσκαμψία του δίσκου αυξάνεται με τη φόρτιση και αλλάζει ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης στο δίσκο. Ο Steindler (1935) πρότεινε τη μετακίνηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου σε περίπτωση έκκεντρης φόρτισης του. Οι Shah και Jayson διεξήγαγαν πειράματα για να διαπιστώσουν αν κάτι τέτοιο ισχύει. Παρατηρήθηκε ότι κάτι τέτοιο συμβαίνει σε περιπτώσεις κάμψης και έκτασης του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Ο εκφυλισμένος δίσκος είχε διαφορετική συμπεριφορά σε αυτή την περίπτωση, καθώς ο πυρήνας δέχεται πίεση ανομοιόμορφα.

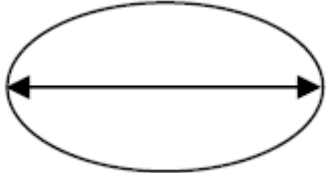
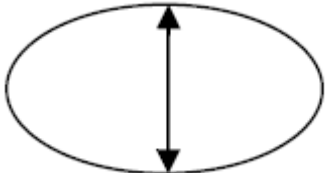
7.5 Ιδιότητες των υλικών και η γεωμετρία του Μεσοσπονδύλιου δίσκου

Παρακάτω παρατίθενται δύο πίνακες που περιέχουν τις τιμές των ιδιοτήτων των υλικών και της γεωμετρίας που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 7.1 Ιδιότητες υλικών του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Υλικό	Μέτρα ελαστικότητας Young E (MPa)	Λόγος Poisson ν
Πηκτοειδής πυρήνας	1-4 [32-35]	0.499 [32-35]
Ίνες δακτυλίου	175-450 [32]-[35]	0.3 [32-33], [35]
Θεμέλια ουσία δακτυλίου	4.2 [32-33], [35-36]	0.1 [33]-0.45 [32] [36] [35]
Τελική πλάκα	500-12000 [34],[36]	0.3-0.4 [34],[36]

Πίνακας 7.2 Γεωμετρικές ιδιότητες του μεσοσπονδύλιου δίσκου

		Διάμετρος		
				-
Θεμέλια ουσία δακτυλίου	Εξωτερικά	40.8 [37]-59 [36]	33 [37]-38.1 [36]	-
	Εσωτερικά	34.3 [37]	20 [37]	-
Πηκτοειδής Πυρήνας		34.3 [37]	20 [37]	-
Ίνες Δακτυλίου		-	-	0.09 [33]-0.7 [39]

7.6 Τρόποι μοντελοποίησης μεσοσπονδύλιου δίσκου

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [33] τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ) που σκοπό έχουν την αναπαράσταση της κίνησης της σπονδυλικής στήλης ή μιας μονάδας της σπονδυλικής στήλης. Τα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη την ποροελαστική δομή του μεσοσπονδύλιου δίσκου δεν είναι πολλά. Στα συγκεκριμένα μοντέλα τα υλικά θεωρείται ότι βρίσκονται σε δύο φάσεις, μια υγρή και μια στερεή. Το υγρό ρέει μέσα από τους πόρους του στερεού υλικού. [22, 23]

Στα μοντέλα σπονδύλων η λειτουργία των μυών και των συνδέσμων δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψη, χάριν απλοποίησης. Στο σημείο αυτό να υπογραμμιστεί ότι οι απλοποιήσεις που πραγματοποιούνται, σκοπό έχουν να μας διευκολύνουν επηρεάζοντας όμως ελάχιστα ή καθόλου τα αποτελέσματά μας. Ο πηκτοειδής πυρήνας αποτελείται από ασυμπίεστο υγρό οπότε για τη μοντελοποίησή του χρησιμοποιούνται στέρεα στοιχεία (solid 45, 92) [35], [34], [33]. Ίδια στοιχεία χρησιμοποιούνται και για τις τελικές πλάκες. Για τον ινώδη δακτύλιο μπορεί να γίνει η παραδοχή σύνθετου υλικού, που αποτελείται από τη θεμέλιο ουσία η οποία είναι η μήτρα στην οποία είναι τοποθετημένες οι κολλαγόνες ίνες που μοντελοποιούνται με στοιχεία τύπου καλωδίου (cable, link) [35], [34] ή με στοιχεία επιφανείας κελύφους (Shell) [34]. Η μήτρα μοντελοποιείται με στερεά στοιχεία όπως ο πηκτοειδής πυρήνας. Η παραπάνω διαφοροποίηση στον τρόπο που μοντελοποιείται ο ινώδης δακτύλιος αποτελεί και το βασικό κριτήριο κατηγοριοποίησης

των μοντέλων μεσοσπονδύλιου δίσκου που δεν λαμβάνουν υπόψη την ποροελαστικότητα. Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη περιγραφή ενός μοντέλου που χρησιμοποιεί την υπόθεση του σύνθετου υλικού για τη δημιουργία του ινώδη δακτυλίου. Το μοντέλο αυτό είχε δημιουργηθεί σε παλαιότερη εργασία και είναι ακατάλληλο για χρήση στην παρούσα εργασία ωστόσο μέσω αυτού του μοντέλου μεσοσπονδύλιου δίσκου έγινε δυνατή η κατασκευή του μοντέλου μεσοσπονδύλιου δίσκου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Είναι εύκολο να καταλάβει κανείς, παρατηρώντας και τη γεωμετρία των σπονδύλων τους με τους οποίους καταπιάνεται η συγκεκριμένη εργασία, ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα μεσοσπονδύλιων δίσκων δεν είναι εφικτό να ενσωματωθούν στους σπονδύλους λόγω του τρόπου που κατασκευάστηκαν οι σπόνδυλοι. Τα μοντέλα των σπονδύλων είναι ανατομικά ακριβή και το ίδιο θα πρέπει να συμβαίνει και με τους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Το φυσικό αυτό σχήμα εμποδίζει τη σχεδίαση των ινών στο εσωτερικό του ινώδους δακτυλίου.

7.7 Δημιουργία του νέου μοντέλου μεσοσπονδύλιου δίσκου

Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να μοντελοποιηθούν οι κολλαγόνες ίνες με δύο επιφάνειες στο εξωτερικό του ινώδους δακτυλίου και στη διαχωριστική επιφάνεια του με τον πηκτοειδή πυρήνα. Επομένως, πρέπει να σχεδιαστεί ένα νέο μοντέλο τεχνητού μεσοσπονδύλιου δίσκου το οποίο θα μας διευκολύνει στην κατασκευή της γεωμετρίας χωρίς όμως να μας στοιχίσει σε επίπεδο ακρίβειας. Δηλαδή θέλουμε τα νέα υλικά να έχουν ιδιότητες τέτοιες ώστε να προσεγγίζουν τα αποτελέσματα του μοντέλου που περιγράφηκε παραπάνω. Στο νέο μοντέλο για την εξωτερική επιφάνεια και για την διαχωριστική επιφάνεια πηκτοειδή πυρήνα-ινώδους δακτυλίου θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία κελύφους, τα οποία αναπαριστούν τις κολλαγόνες ίνες. Το στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε για τις δύο αυτές επιφάνειες είναι το Shell63.

7.7.1 Προσέγγιση του νέου μοντέλου

Αρχικά πρέπει να προσεγγιστεί το μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτό θα γίνει βρίσκοντας τις τιμές των μετατοπίσεων κατά τους τρεις άξονες που προσεγγίζουν κατά το δυνατόν περισσότερο τις τιμές που παρατίθενται στον Πίνακα 7.3, που ακολουθεί. Εφόσον έχει αλλάξει η κατανομή των κολλαγόνων ινών μέσα στον ινώδη δακτύλιο ως αντισταθμιστικό μέτρο θα μεταβληθεί τα μέτρο ελαστικότητας του πηκτοειδή πυρήνα, το πάχος των επιφανειών της εξωτερικής επιφάνειας του ινώδους δακτυλίου και της διαχωριστικής επιφάνειας ινώδους δακτυλίου-πηκτοειδούς πυρήνα μέχρι να επιτευχθεί η καλύτερη προσέγγιση. Η δουλειά αυτή έχει γίνει σε παλαιότερη εργασία και εδώ παρατίθενται τα διαγράμματα που δείχνουν τη σύνοψη των ελέγχων που έγιναν. Οι

έλεγχοι έγιναν για τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας από 1.05 MPa έως 1.20 MPa και για πάχη επιφανειών από 0.370 mm μέχρι 0.376 mm. [39]

Λαμβάνοντας υπόψη τις αποκλίσεις από τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές των μετατοπίσεων λαμβάνεται μέτρο ελαστικότητας 1.15 MPa και πάχος 0.372 mm. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω τιμές μέγιστων και ελάχιστων μετατοπίσεων.

Πίνακας 7.3 Μέγιστες και ελάχιστες μετατοπίσεις κατά τους τρεις άξονες για το προσεγγιστικό μοντέλο

Μετατόπιση κατά x		Μετατόπιση κατά y		Μετατόπιση κατά z	
X _{min}	X _{max}	Y _{min}	Y _{max}	Z _{min}	Z _{max}
-0.227	0.230	-0.285	0.040	-0.235	0.237

7.7.2 Δημιουργία Μεσοσπονδύλιου Δίσκου στους υπό εξέταση σπονδύλους

Αφού προσδιοριστούν το μέτρο ελαστικότητας του ινώδους δακτυλίου και το πάχος των στοιχείων της εξωτερικής επιφάνειας του ινώδους δακτυλίου και της διαχωριστικής του επιφάνεια με τον πηκτοειδή πυρήνα, δημιουργείται το νέο μοντέλο του μεσοσπονδύλιου δίσκου στο Ansys.

Αρχικά απομονώνεται η κάτω και η άνω επιφυσιακή πλάκα των σπονδύλων προκειμένου να κατασκευαστεί ο κάτω και ο άνω μεσοσπονδύλιος δίσκος αντίστοιχα. Στη συνέχεια αντιγράφεται η κάθε επιφάνεια σε απόσταση 10 mm από το δίσκο (προς τα πάνω ή προς τα κάτω αντίστοιχα). Η απόσταση έχει ληφθεί από τη βιβλιογραφία ως τυπικό ύψος μεσοσπονδυλίων [41]. Αφού απομονωθούν οι εξωτερικές γραμμές των δύο επιφανειών δημιουργούνται επιφάνειες με την εντολή Skinning (Preprocessor>Create-Areas-Arbitrary-By skinning). Στην ουσία συνδέονται οι δύο επιφάνειες του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Στη συνέχεια απομονώνεται η επιφάνεια του πυρήνα και ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Μέσω του προεπεξεργαστή (Preprocessor, από την επιλογή Numbering Controls-Merge items), ενσωματώνονται οι γραμμές στις επιφάνειες που ανήκουν. Ακολουθώντας δημιουργούνται οι όγκοι του πηκτοειδή πυρήνα και ινώδους δακτυλίου και το πλέγμα του καθενός. Για τη δημιουργία του πλέγματος του πηκτοειδή πυρήνα και του ινώδους δακτυλίου χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία Solid 92. Τέλος, δημιουργείται το πλέγμα της εξωτερικής επιφάνειας του ινώδους δακτυλίου και της διαχωριστικής επιφάνειας του με τον πηκτοειδή πυρήνα χρησιμοποιώντας στοιχεία Shell 63 από τη βιβλιοθήκη του Ansys. Από την επιλογή Real Constants του Ansys προσδιορίζεται το πάχος των στοιχείων Shell 63 ίσο με 0.372 mm.

Κεφάλαιο 8ο Επιβολή Φορτίσεων & Στηρίξεων

8.1 Επιβολή φορτίσεων και στηρίξεων

Τα μοντέλα ΠΣ του 12^{ου} θωρακικού σπονδύλου της πρώτης ασθενούς (θα αναφέρεται ως Θ12) και του 1^{ου} οσφυϊκού της δεύτερης ασθενούς (θα αναφέρεται ως Ο1) δοκιμάστηκαν στην κάθε κατάσταση σε θλίψη, κάμψη και έκταση. Οι φορτίσεις ασκήθηκαν σε κάθε περίπτωση στην άνω επιφυσιακή πλάκα ή στην πάνω επιφάνεια του άνω μεσοσπονδύλιου δίσκου ενώ οι στηρίξεις στην κάτω επιφυσιακή πλάκα ή στην κάτω επιφάνεια του κάτω μεσοσπονδύλιου δίσκου.

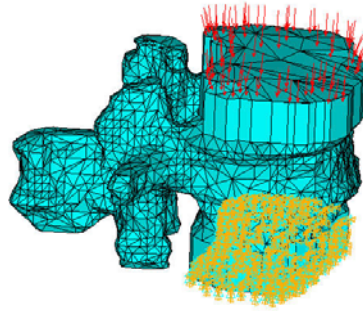
Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία οι τυπικές δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σπόνδυλο που καταπονείται σε θλίψη κυμαίνονται μεταξύ 400N [42] και 1000N [38]. Ένας σπόνδυλος που καταπονείται σε κάμψη ή σε έκταση υπόκειται σε φορτίσεις μεταξύ 2500 Nmm και 10000 Nmm [36].

8.2 Θλίψη

Για την επιβολή θλίψης στο κάθε μοντέλο απομονώνεται η πάνω επιφάνεια του πάνω μεσοσπονδύλιου δίσκου (ή άνω επιφυσιακή πλάκα). Στην επιφάνεια αυτή ασκείται δύναμη που αντιστοιχεί στα 2/3 του βάρους του ασθενούς. Έτσι στην πρώτη ασθενή η οποία ζυγίζει 70 kg ασκείται δύναμη 467 N ενώ στη δεύτερη που ζυγίζει 60 kg ασκείται δύναμη 400N. Οι δυνάμεις αυτές ασκούνται στα μοντέλα υπό τη μορφή πίεσης. Η πίεση υπολογίζεται διαιρώντας τη δύναμη με το εμβαδόν της επιφάνειας στην οποία αυτή ασκείται. Στον Πίνακα 8.1 φαίνονται οι επιφάνειες επιβολής θλίψης για την κάθε περίπτωση και η τιμή της πίεσης που ασκείται, ενώ στο φαίνεται μια τυπική περίπτωση θλιπτικής φόρτισης.

Πίνακας 8.1 Επιβολή πιέσεων για την κάθε περίπτωση

	Επιφάνεια επιβολής πίεσης A (mm ²)	Πίεση P (N/mm ²)
Σπόνδυλος Θ12 1η κατάσταση (Αποστόλου)	1750.0	0.27
Σπόνδυλος Θ12 2η κατάσταση (Αποστόλου)	1792.0	0.26
Σπόνδυλος Ο1 1η κατάσταση (Ματρόνα)	1353.8	0.30
Σπόνδυλος Ο1 2η κατάσταση (Ματρόνα)	1391.8	0.29



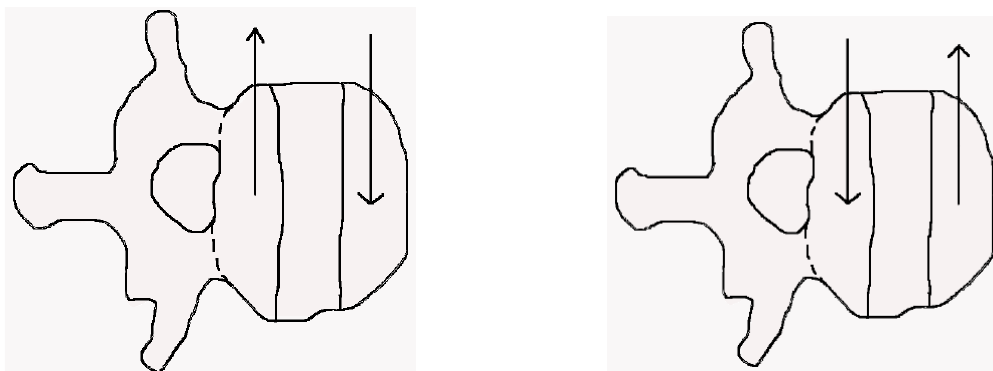
Σχήμα 8.1 Θλιπτική φόρτιση στο σπόνδυλο O1 στην δεύτερη κατάσταση

8.3 Κάμψη και Έκταση

Προφανώς και κατά τη δοκιμή σε κάμψη και έκταση ο σπόνδυλος θεωρείται πακτωμένος με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Η φόρτιση, και πάλι, θα επιβληθεί υπό τη μορφή πίεσης.

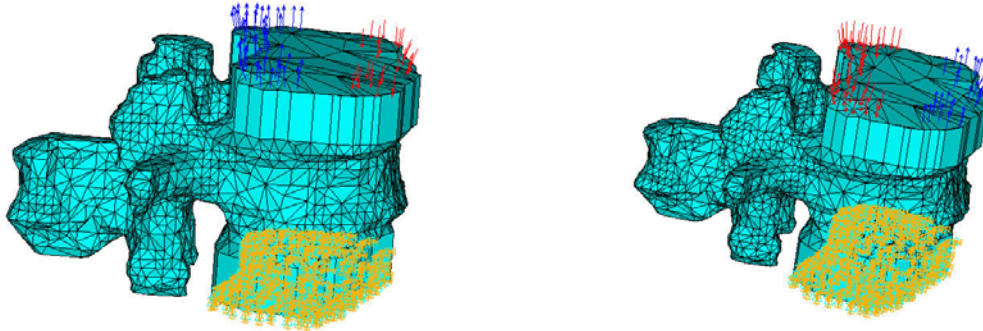
Προκειμένου να ασκηθεί η κάμψη και η έκταση χωρίζεται η άνω επιφυσιακή πλάκα, (ή η άνω επιφάνεια του άνω μεσοσπονδύλιου δίσκου) σε τρεις περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2.

Πιο συγκεκριμένα, θα επιβληθεί πίεση στην μπροστά και την πίσω επιφάνεια ενώ η μεσαία επιφάνεια θα παραμείνει αφόρτιστη. Στην κάμψη θα ασκηθεί πίεση στο μπροστινό μέρος της επιφυσιακής πλάκας (δεξιά όπως κοιτάμε το Σχήμα 8.2) και αντίθετη φόρτιση στο πίσω μέρος της. Οι αντίθετες φορτίσεις θα ασκηθούν στην περίπτωση της έκτασης, δηλαδή θα ασκηθεί πίεση στο πίσω μέρος της επιφυσιακής πλάκας και αντίθετη φόρτιση στο πίσω μέρος της επιφυσιακής πλάκας.



Σχήμα 8.2 Επιβολή κάμψης (αριστερά) και έκτασης (δεξιά)

Με αυτή τον τρόπο ασκείται ροπή 7200 Nmm αντίθετης φοράς στην κάμψη και την έκταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3.



Σχήμα 8.3 Κάμψη και έκταση στο σπόνδυλο O1 στη δεύτερη κατάσταση

Η ροπή αυτή θα προκληθεί από το ζεύγος δυνάμεων που θα ασκηθεί στην μπροστά και πίσω επιφάνεια της άνω επιφυσιακής πλάκας του άνω μεσοσπονδύλιου δίσκου. Προκειμένου να προσδιοριστεί η τιμή της πίεσης που θα ασκηθεί στην κάθε επιφάνεια ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Προσδιορίζεται το εμβαδόν της μπροστά και της πίσω επιφάνειας.
- Προσδιορίζεται το κέντρο βάρους της μπροστά και πίσω επιφάνειας.
- Υπολογίζεται η απόσταση D των κέντρων βάρους της αριστερά και δεξιά περιοχής από τη σχέση:

$$D = [(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2]^{1/2}$$

- Υπολογίζεται η δύναμη που επιβάλλεται σε κάθε περιοχή από τη σχέση:

$$F = \frac{M}{D}$$

- Υπολογίζεται η πίεση που θα επιβληθεί στην κάθε επιφάνεια από τη σχέση:

$$P = \frac{F}{A}$$

Παρακάτω παρατίθενται οι Πίνακες 8.2 έως 8.5 με τα αποτελέσματα των παραπάνω μεγεθών για τους δύο σπόνδυλους και τις δύο καταστάσεις του κάθε σπονδύλου.

Πίνακας 8.2 Σπόνδυλος Θ12/ 1^η κατάσταση

Επιφάνεια επιβολής φόρτισης (mm ²)	Συντεταγμένες κέντρου βάρους			D (mm)	F (N)	P (N/mm ²)	
	Xc	Yc	Zc			Κάμψη	Έκταση

Μπροστά 586.97	59.089	39.590	-942.30	24.10	298.81	0.5091	-0.5091
Πίσω 687.81	62.400	63.366	-940.22			-0.434	0.434

Πίνακας 8.3 Σπόνδυλος Θ12/ 2^η κατάσταση

Επιφάνεια επιβολής φόρτισης (mm ²)	Συντεταγμένες κέντρου βάρους			D (mm)	F (N)	P (N/mm ²)	
	Xc	Yc	Zc			Κάμψη	Έκταση
Μπροστά 537.55	72.304	44.106	292.87	25.81	278.96	0.519	-0.519
Πίσω 599.15	76.513	69.183	297.29			-0.466	0.466

Πίνακας 8.4 Σπόνδυλος Ο1/ 1^η κατάσταση

Επιφάνεια επιβολής φόρτισης (mm ²)	Συντεταγμένες κέντρου βάρους			D (mm)	F (N)	P (N/mm ²)	
	Xc	Yc	Zc			Κάμψη	Έκταση
Μπροστά 431.67	64.023	389.79	-1047.9	19.96	360.72	0.836	-0.8356
Πίσω 536.08	65.347	409.69	-1046.9			-0.673	0.6729

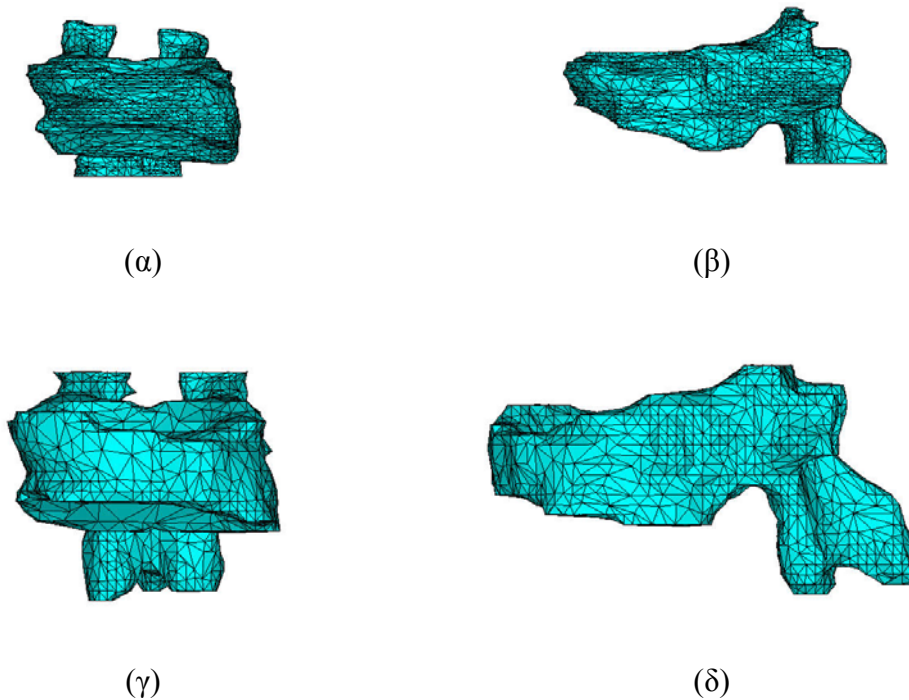
Πίνακας 8.5 Σπόνδυλος Ο1/ 2^η κατάσταση

Επιφάνεια επιβολής φόρτισης (mm ²)	Συντεταγμένες κέντρου βάρους			D (mm)	F (N)	P (N/mm ²)	
	Xc	Yc	Zc			Κάμψη	Έκταση
Μπροστά 473.32	66.783	59.048	372.79	21.42	336.13	0.7102	-0.7102
Πίσω 390.79	65.710	80.429	373.61			-0.8601	0.8601

Κεφάλαιο 9ο Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων του σπονδύλου Θ12 με μεσοσπονδύλιους δίσκους (πλήρες μοντέλο) της πρώτης ασθενούς

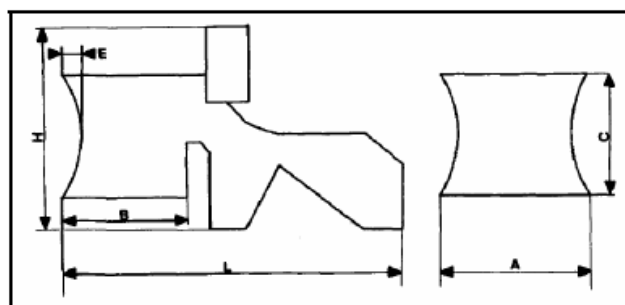
9.1 Η Γεωμετρία του σπονδύλου

Το υπολογιστικό μέρος της συγκεκριμένης ΔΕ, όπως προαναφέρθηκε, περιλαμβάνει την εξέταση της εξέλιξης της νόσου της οστεοπόρωσης. Το πρώτο ενδεικτικό στοιχείο είναι οι αλλαγές στη γεωμετρία του σπονδύλου ανάμεσα στις δύο διαδοχικές καταστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 9.1.



Σχήμα 9.1 Η γεωμετρία του σπονδύλου στις δύο διαδοχικές καταστάσεις (α) εμπρόσθια όψη (β) αριστερή όψη του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη κατάσταση και (γ) εμπρόσθια όψη (δ) αριστερή όψη του σπονδύλου Θ12 στη δεύτερη κατάσταση

Οι Lavaste et. al υποστηρίζουν ότι για την πλήρη περιγραφή της γεωμετρίας ενός σπονδύλου: το πλάτος (A), το μήκος (B) το ύψος (C) και το κοίλωμα του σπονδυλικού σώματος (E) καθώς και το συνολικό ύψος (H) και μήκος (L) του σπονδύλου (σώμα και αποφύσεις). Τα παραπάνω μεγέθη φαίνονται στο Σχήμα 9.2



Σχήμα 9.2 Απεικόνιση των παραμέτρων που κατά τους Lavaste et al αρκούν για την

πλήρη περιγραφή της γεωμετρίας ενός σπονδύλου

Πλάτος του σπονδυλικού σώματος: Δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφοροποίηση. Στην πρώτη κατάσταση είναι 48.13 mm, ενώ στη δεύτερη 48.24 mm, δηλαδή παρουσιάζει αύξηση κατά 1.5%.

Μήκος του σπονδυλικού σώματος: Παρουσιάζει ελάττωση κατά 6% στη δεύτερη κατάσταση. Συγκεκριμένα, στην πρώτη κατάσταση το μήκος είναι 47.18 mm ενώ στη δεύτερη 44.34 mm.

Ύψος του σπονδυλικού σώματος: Παρουσιάζει αύξηση κατά 12% στη δεύτερη κατάσταση, που οφείλεται στη δημιουργία οστεόφυτου στην μπροστά δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Συγκεκριμένα το ύψος στην πρώτη κατάσταση είναι 16.20 mm ενώ στη δεύτερη 18.40 mm.

Κοίλωμα του σπονδυλικού σώματος: Λόγω της οστεοπόρωσης, παρατηρείται κύρτωμα του σπονδυλικού σώματος προς τα έξω, έτσι το μέγεθος το κοίλωμα είναι αδύνατο να υπολογιστεί. Το μόνο σχόλιο που μπορεί να γίνει είναι ότι το κύρτωμα στη δεύτερη κατάσταση είναι μικρότερο συγκριτικά με την πρώτη

Συνολικό ύψος του σπονδύλου: Δεδομένου ότι από το σπόνδυλο της πρώτης κατάστασης απουσιάζει τμήμα της ακανθώδους απόφυσης, ενώ από αυτόν της δεύτερης κομμάτι των αρθρικών αποφύσεων, δεν είναι δυνατή η μέτρηση και σύγκριση του συνολικού ύψους. Ωστόσο εάν συγκριθεί το ύψος του τμήματος που απεικονίζεται στις τομογραφίες και των δύο καταστάσεων προκύπτει ότι το ύψος του σπονδύλου δεν μεταβάλλεται σημαντικά

Συνολικό μήκος του σπονδύλου: Στην πρώτη κατάσταση το συνολικό μήκος του σπονδύλου είναι 82.10 mm, ενώ στη δεύτερη 77.61 mm. Η μείωση δηλαδή που παρατηρείται στο συνολικό μήκος του σπονδύλου είναι 5.6%, μείωση που είναι λογική αφού και το μήκος του σπονδυλικού σώματος ελαττώνεται κατά 6%.

Πίνακας 9.1 Γεωμετρικά μεγέθη και οι μεταβολές τους από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση

	A (mm)	B (mm)	C (mm)	H (mm)	L (mm)
Πρώτη Κατάσταση	48.13	47.18	16.20	27.80	82.10
Δεύτερη Κατάσταση	48.24	44.34	18.40	27.78	77.61
Ποσοστιαία Μεταβολή	-0.003%	-6.4%	13.6%	~0%	-5.6%

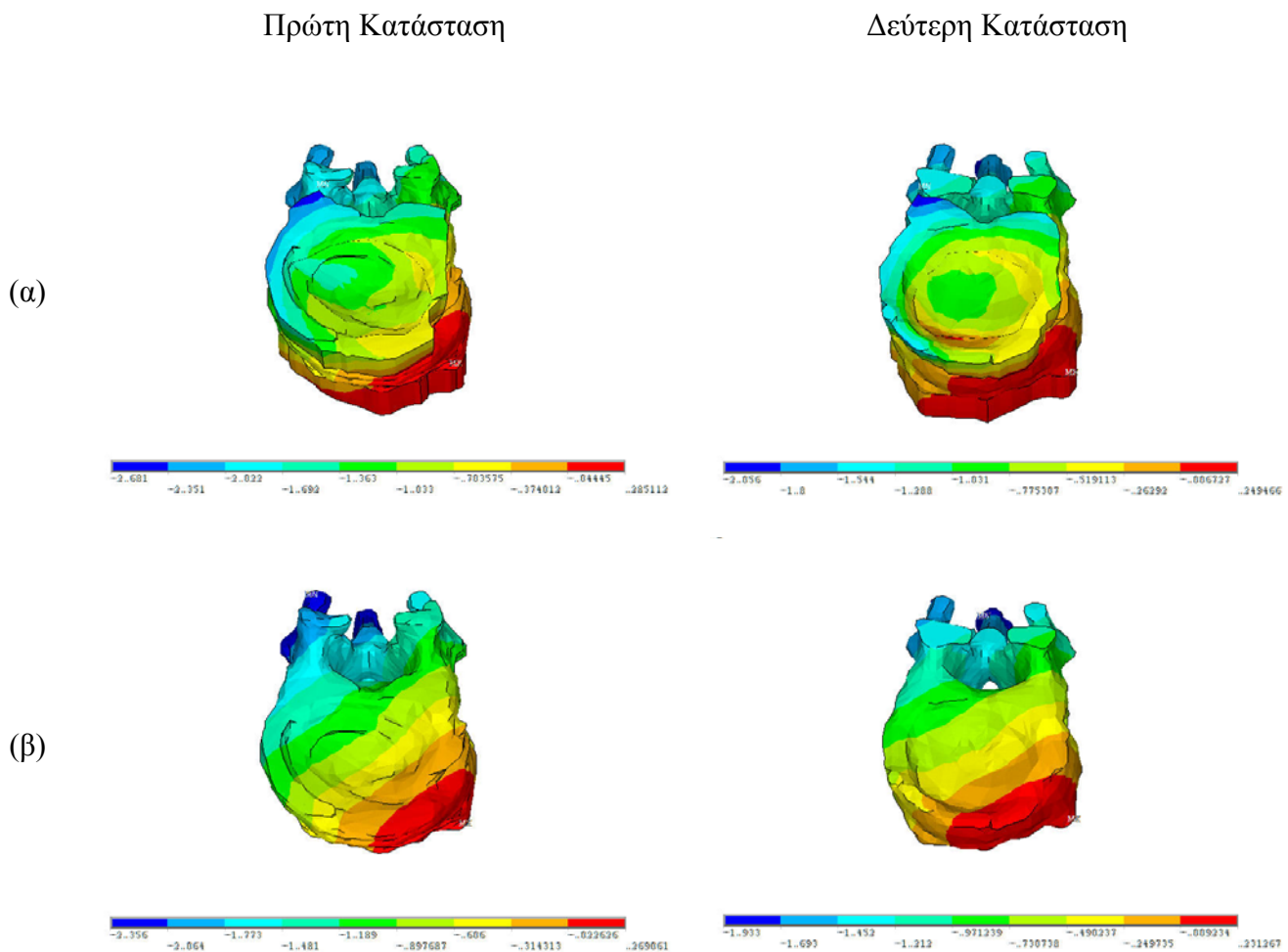
Στον Πίνακα 9.1 καταγράφονται οι μεταβολές των γεωμετρικών μεγεθών στις δύο διαδοχικές καταστάσεις.

9.2 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε θλίψη

Μετά την επίλυση του μοντέλου του Θ12 με τους γειτονικούς του μεσοσπονδύλιους σε θλίψη τόσο για την πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση, ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z και του τασικού και παραμορφωσιακού πεδίου.

9.2.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά το άξονα z

Στο Σχήμα 9.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον οβελιαίο άξονα τόσο για την πρώτη κατάσταση όσο και για τη δεύτερη.



Σχήμα 9.3 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Στο Σχήμα 9.3 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του

μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση φαίνεται ότι η μέγιστη μετατόπιση και στις δύο καταστάσεις εντοπίζεται στην πίσω δεξιά πλευρά του άνω μεσοσπονδύλιου δίσκου. Να σημειωθεί ότι οι μετατοπίσεις που υφίσταται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος της πρώτης κατάστασης είναι υψηλότερες συγκριτικά με τη δεύτερη, γεγονός που οφείλεται στη βελτίωση της γεωμετρίας του σπονδύλου στη δεύτερη κατάσταση.

Μετά τη γραφική αφαίρεση των μεσοσπονδύλιων δίσκων Σχήμα 9.3 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου $\Theta 12$ και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου $\Theta 12$ μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση παρατηρείται ότι η μέγιστη μετατόπιση εντοπίζεται στη δεξιά εγκάρσια απόφυση, στην πρώτη κατάσταση, ενώ στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση. Γενικά στην περιοχή των αποφύσεων οι μετατοπίσεις στη δεύτερη κατάσταση είναι μικρότερες από ότι στην πρώτη. Επιπλέον στη δεύτερη κατάσταση παρατηρούνται γενικότερα μικρότερες μετατοπίσεις και η κατανομή των μετατοπίσεων ομαλοποιείται. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στη βελτίωση της γεωμετρίας του σπονδύλου μετά τη θεραπευτική αγωγή που ακολούθησε η ασθενής.

Στον Πίνακα 9.2 καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης κατά τον οβελιαίο άξονα και στις δύο καταστάσεις και η μεταβολή της από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 9.2 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου $\Theta 12$

	Zmin	Zmax
Πρώτη κατάσταση	0.02	2.36
Δεύτερη Κατάσταση	0.009	1.93
Ποσοστιαία Μεταβολή	-55%	-18.92%

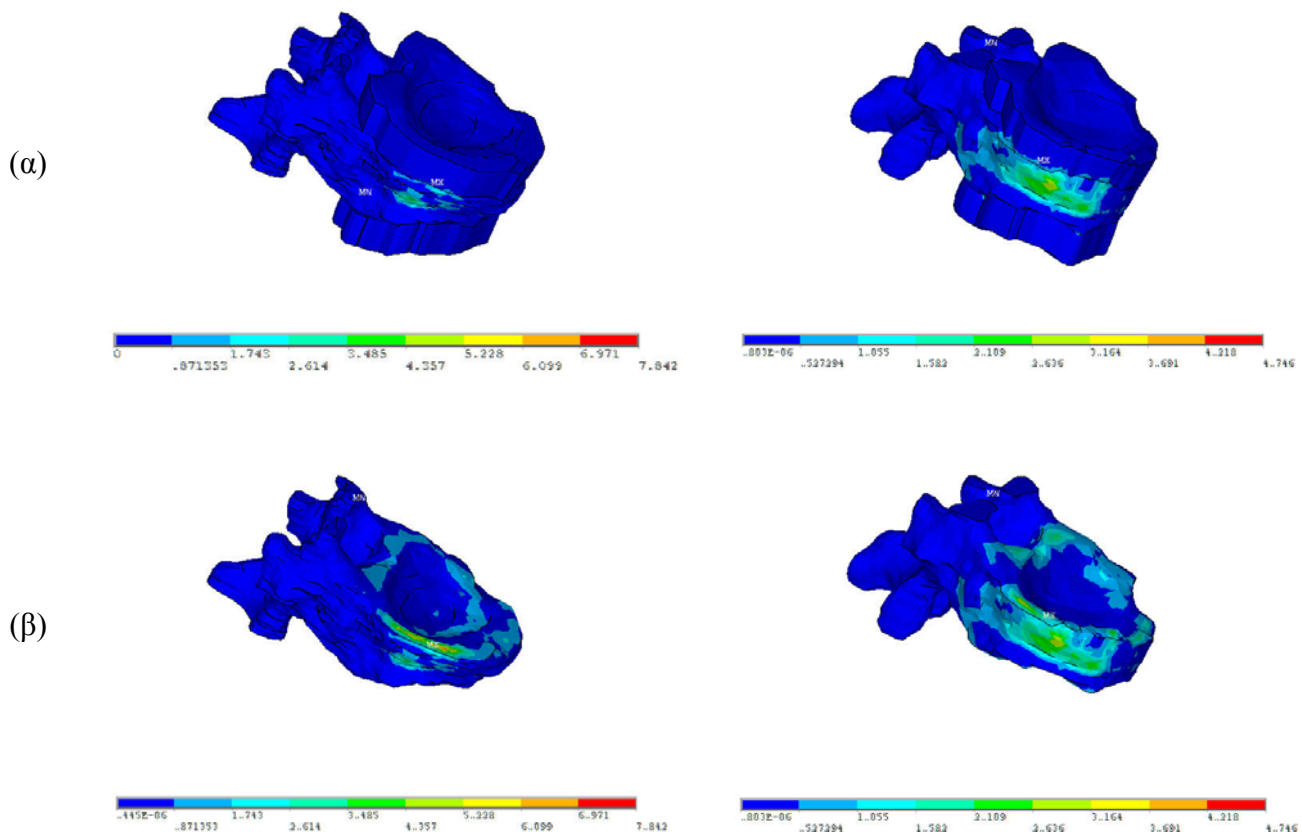
Η μέγιστη μετατόπιση του σπονδύλου $\Theta 12$ στη δεύτερη κατάσταση μειώνεται κατά 18.92%.

9.2.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 9.4 παρουσιάζονται οι κατανομές των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στο σπόνδυλο $\Theta 12$ τόσο για την πρώτη όσο και για τη δεύτερη κατάσταση.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 9.4 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Οι τάσεις, και στις δύο καταστάσεις, εντοπίζονται στο σπονδυλικό σώμα. Η μέγιστη τάση τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση εντοπίζεται στην δεξιά εμπρόσθια πλευρά του σπονδυλικού σώματος.

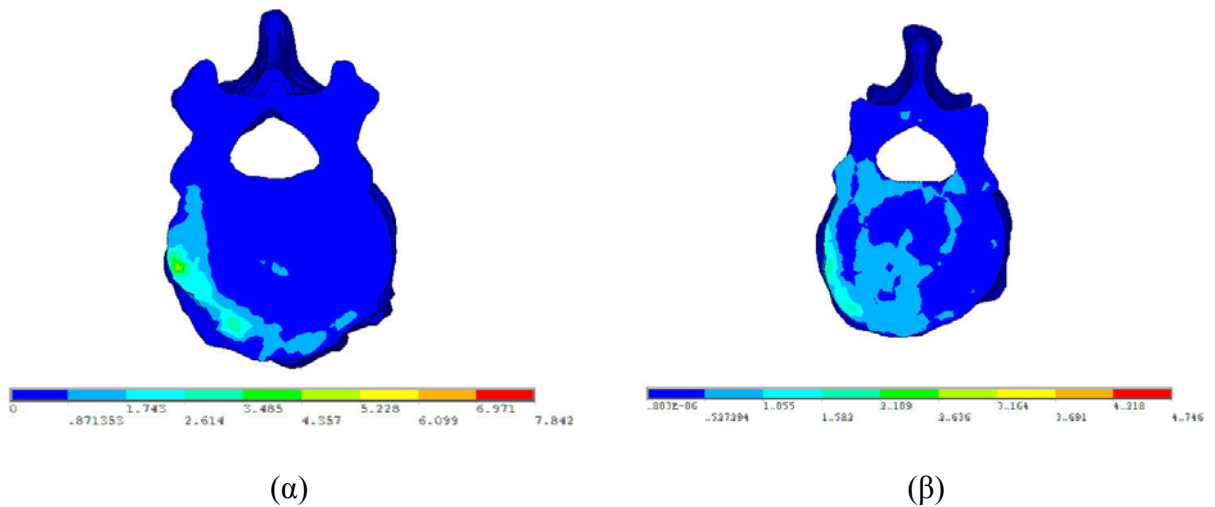
Στη δεύτερη κατάσταση παρατηρούνται γενικότερα μειωμένες τάσεις, ενώ η κατανομή τους είναι ομαλότερη σε σχέση με την πρώτη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην εξομάλυνση της γεωμετρίας του οστού μετά τη θεραπευτική αγωγή στην οποία υποβλήθηκε η ασθενής, σε συνδυασμό με τη βελτίωση της ποιότητάς του όπως φάνηκε νωρίτερα στην παρουσίαση της κατανομής των υλικών.

Στον Πίνακα 9.3 φαίνεται η μέγιστη τάση για την κάθε κατάσταση καθώς και ποσοστιαία μεταβολή αυτής.

Πίνακας 9.3 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων στο Θ12

	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή
Πρώτη κατάσταση	7.842	-39.5%
Δεύτερη Κατάσταση	4.746	

Στο Σχήμα 9.5 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε μια τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον άξονα Z στις δύο διαδοχικές καταστάσεις.



Σχήμα 9.5 Τομή του σπονδύλου κατά τον z-άξονα Θ12 (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση

Στην πρώτη κατάσταση Σχήμα 9.5(α) εμφανίζεται μια περιοχή στη δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος η οποία παραλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων. Στη δεύτερη κατάσταση το εμβαδόν αυτής της περιοχής έχει μειωθεί αισθητά και οι τάσεις παραλαμβάνονται και από το εσωτερικό του σπονδυλικού σώματος. Αυτό σημαίνει ότι στη δεύτερη κατάσταση η κατανομή των τάσεων και στο εσωτερικό του σπονδύλου είναι ομαλότερη συγκριτικά με την πρώτη.

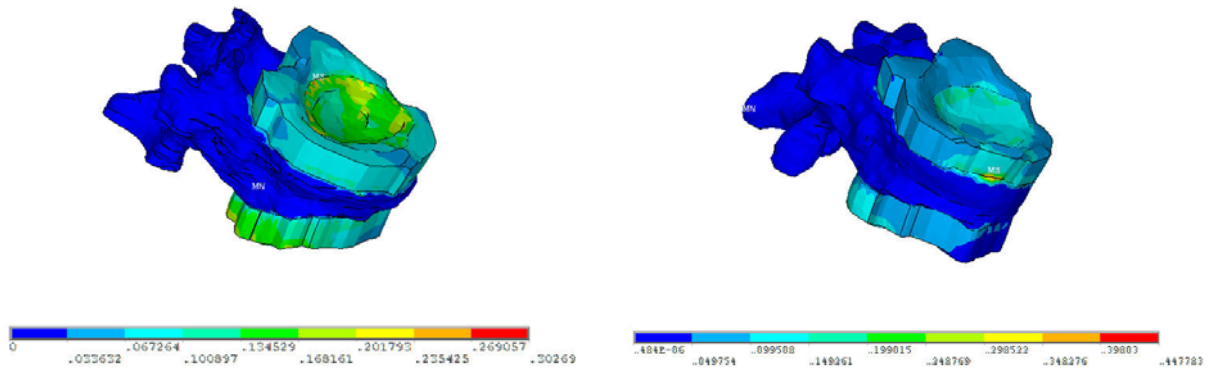
9.2.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 9.6 που ακολουθεί φαίνονται οι ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises. Είναι εμφανές στο Σχήμα 9.6(α) ότι μεγαλύτερες παραμορφώσεις υφίστανται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι. Συγκεκριμένα, στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση εντοπίζεται στην επιφάνεια διαχωρισμού του ινώδους δακτυλίου με τον πηκτοειδή πυρήνα, ενώ στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση εντοπίζεται στη δεξιά πλευρά του μεσοσπονδυλίου δίσκου στην περιοχή που αυτός ενώνεται με την άνω επιφυσιακή πλάκα.

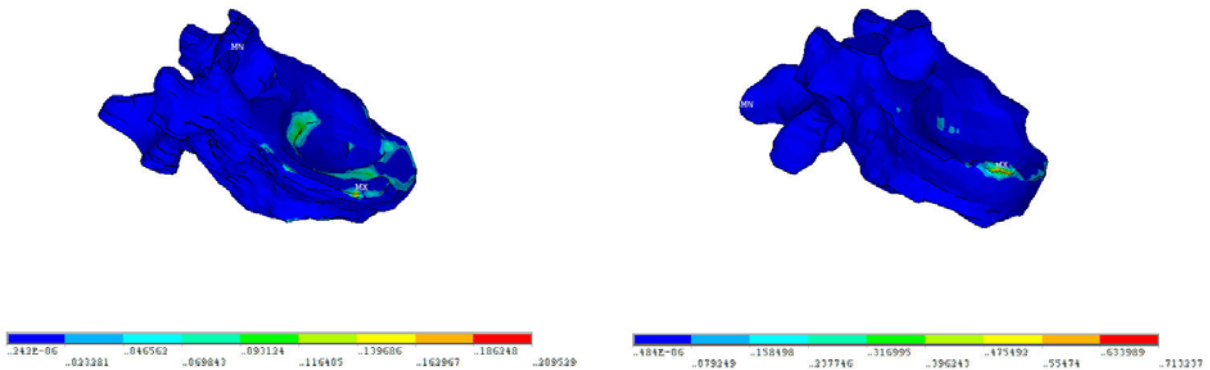
Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση

(α)



(β)



Σχήμα 9.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

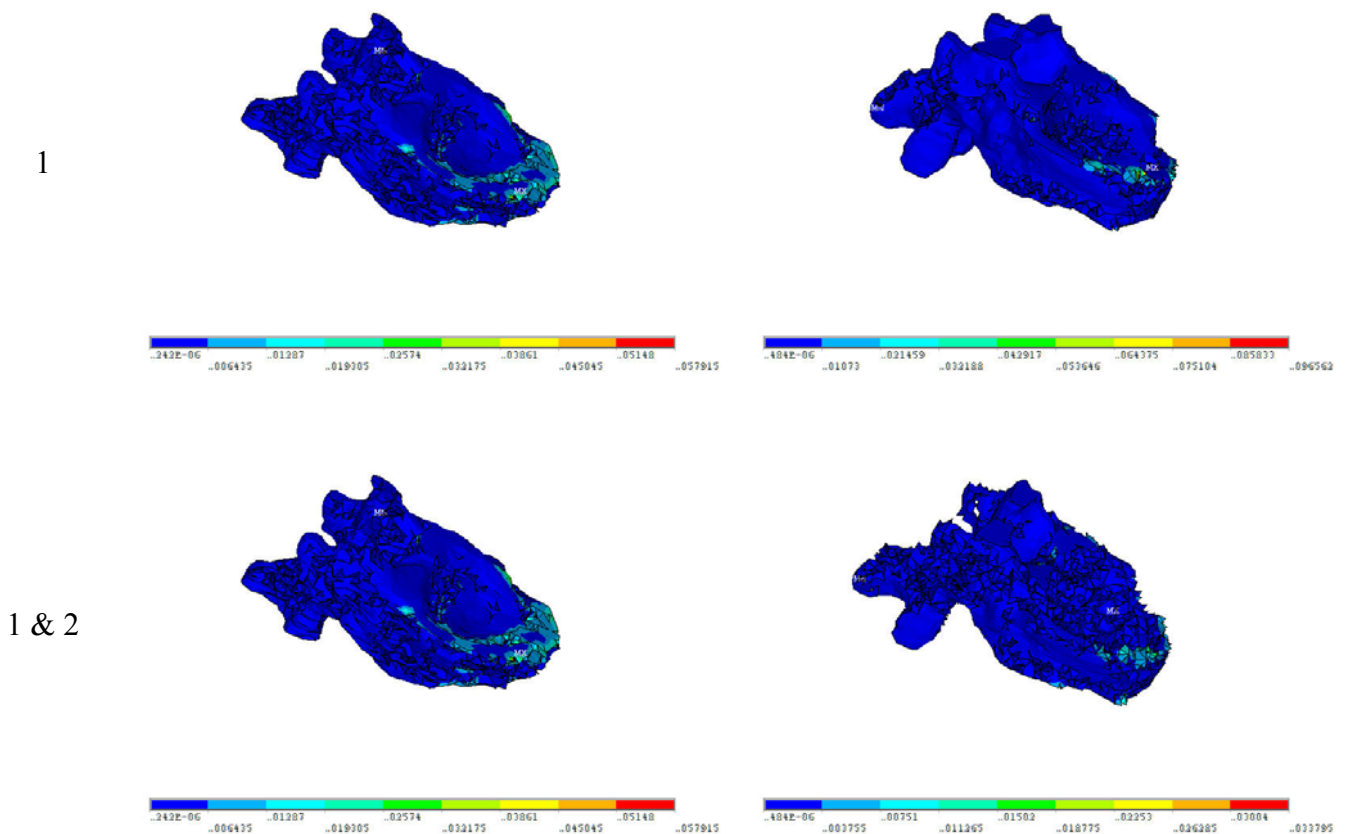
Στο Σχήμα 9.6(β) παρατηρείται ότι η μέγιστη παραμόρφωση στο σπονδυλικό σώμα και στις δύο καταστάσεις εμφανίζεται στην μπροστά δεξιά πλευρά της άνω επιφυσιακής πλάκας. Οι τιμές των παραμορφώσεων είναι πολύ υψηλές και αυτό συμβαίνει διότι στο σπόνδυλο συμπεριλαμβάνεται και το πρώτο υλικό το οποίο έχει ιδιότητες κενού, δηλαδή πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας.

Στο Σχήμα 9.7 παρουσιάζεται η ίδια κατανομή μετά την αφαίρεση των πρώτων υλικών.

Αφαίρεση υλικού

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



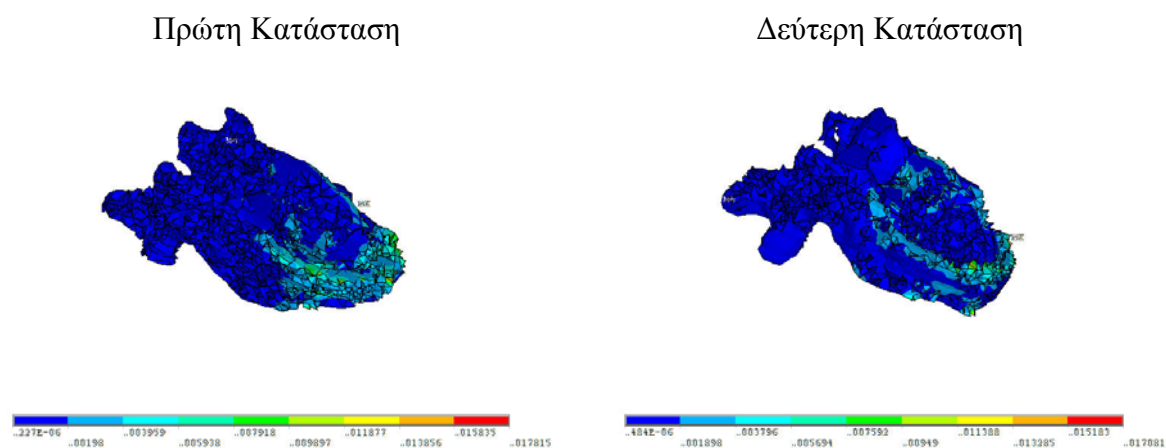
Σχήμα 9.7 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού (Σχήμα 9.7), παρατηρείται μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση. Συγκεκριμένα, η μέγιστη παραμόρφωση στην πρώτη κατάσταση πριν την αφαίρεση του πρώτου υλικού είναι 209520 μ strains ενώ μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού είναι 57915 μ strains. Αντίστοιχα, στη δεύτερη περίπτωση πριν την αφαίρεση του υλικού 1 η μέγιστη παραμόρφωση είναι 732370 μ strains ενώ μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού είναι 96562 μ strains. Οι μέγιστες τιμές και στις δύο καταστάσεις είναι τοπικές και οφείλονται στη δημιουργία ακμών κατά την κατασκευή της γεωμετρίας του σπονδύλου. Η έντονη μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει υψηλή συγκέντρωση του πρώτου υλικού στις θέσεις του μέγιστου. Η μέγιστη παραμόρφωση στο σπόνδυλο είναι υψηλότερη στην δεύτερη κατάσταση συγκριτικά με την πρώτη τόσο με όσο και χωρίς το πρώτο υλικό.

Μετά την αφαίρεση και του δευτέρου υλικού (Σχήμα 9.7) παρατηρείται περαιτέρω μείωση της παραμόρφωσης. Αυτή τη φορά ωστόσο η μείωση είναι μικρότερη. Συγκεκριμένα, στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση ισούται με 46014 μ strains ενώ στη

δεύτερη με 33795 μ strains, δηλαδή η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται κατά 20.5% στην πρώτη κατάσταση και κατά 65% στη δεύτερη.

Ωστόσο παρά το γεγονός ότι παρατηρείται μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης οι τιμές της παραμένουν υψηλές. Παρατηρώντας προσεκτικά το μοντέλο διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται σε μεμονωμένα πεπερασμένα στοιχεία με αποτέλεσμα οι τιμές αυτές να μην ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα. Μετά την αφαίρεση αυτών των στοιχείων η κατανομή βελτιώνεται αισθητά και φαίνεται στο Σχήμα 9.8.



Σχήμα 9.8 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Στον Πίνακα 9.4 παρατίθενται οι μέγιστες τιμές της ισοδύναμης παραμόρφωσης για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 9.4 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12

	Μέγιστη παραμόρφωση (μ Strains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Πλήρες μοντέλο	302690	447783
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση των Μ.Δ.	209520	732370
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	57915	96562
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	46014	33795
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	17815	17081

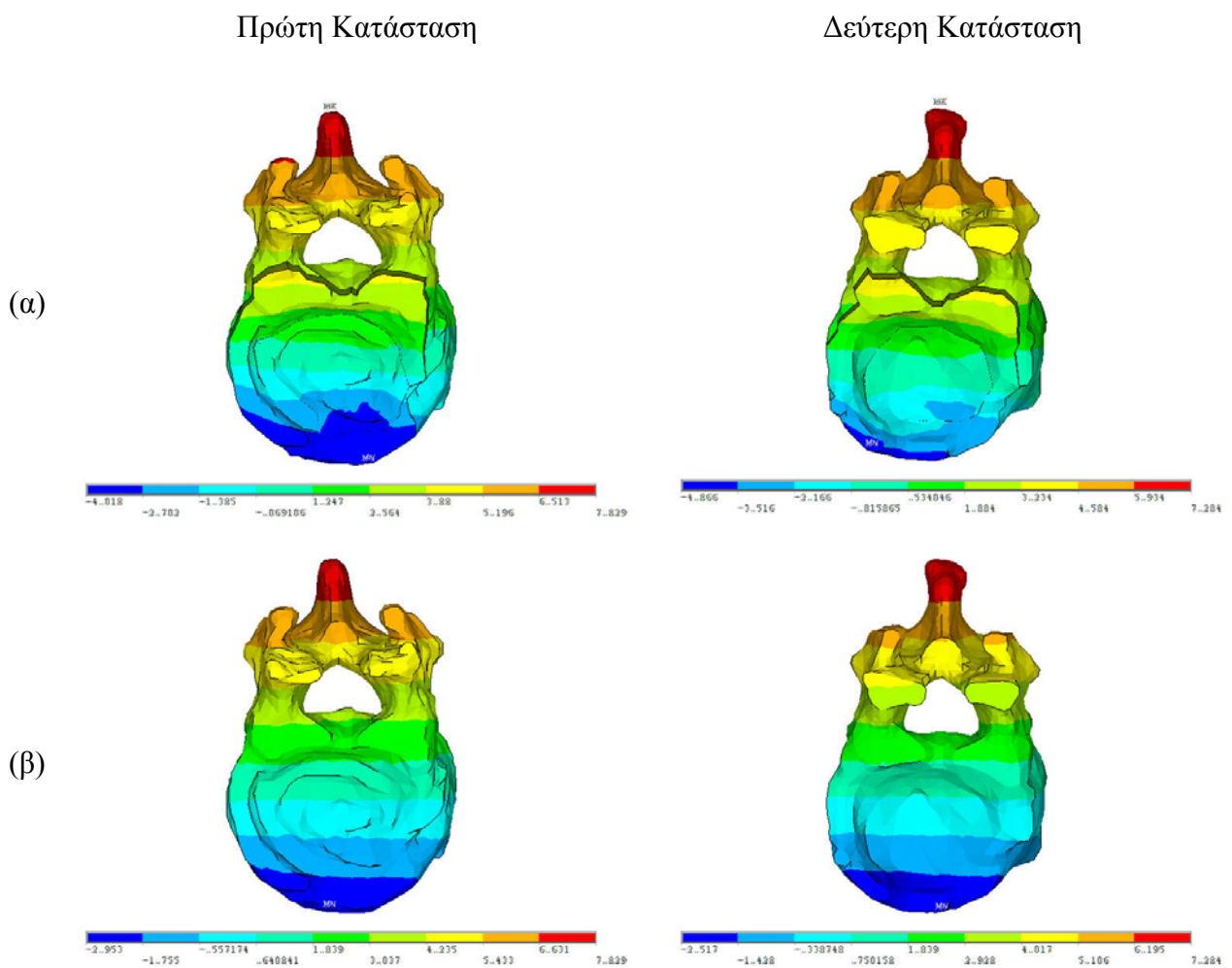
Πριν την αφαίρεση του δεύτερου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση στην πρώτη κατάσταση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της δεύτερης. Αντίθετα, μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού οι παραμορφώσεις της δεύτερης κατάστασης είναι μικρότερες, ενώ μετά την αφαίρεση και των μεμονωμένων Π.Σ. η διαφορά τους περιορίζεται στο 4.1%.

9.3 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε καμπτική φόρτιση

Όπως και στην περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z, καθώς και το τασικό και παραμορφωσιακό πεδίου κατά την επιβολή καμπτικής φόρτισης στο πλήρες μοντέλο του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

9.3.1 *Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z*

Στο Σχήμα 9.9 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις κατά τον οβελιαίο άξονα τόσο για την πρώτη όσο και για τη δεύτερη κατάσταση.



Σχήμα 9.9 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του

σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Σε αντίθεση με τη θλίψη, η θέση της μέγιστης μετατόπισης είναι αντίστοιχη πριν και μετά την γραφική απομάκρυνση των μεσοσπονδύλιων δίσκων. Η μέγιστη μετατόπιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.9 (α) και (β), τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση εμφανίζεται στην ακανθώδη απόφυση. Η κατανομή των μετατοπίσεων δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές ανάλογα με την κατάσταση.

Στον Πίνακα 9.5 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12 που ακολουθεί καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης κατά τον άξονα Z και στις δύο καταστάσεις αλλά και η μεταβολή της από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 9.5 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12

	Zmin	Zmax
Πρώτη κατάσταση	0.56	7.83
Δεύτερη Κατάσταση	0.34	7.28
Ποσοστιαία Μεταβολή	-39.3%	-7%

Όσον αφορά το σπόνδυλο Θ12, η μέγιστη μετατόπιση στη δεύτερη κατάσταση μειώνεται κατά 7%.

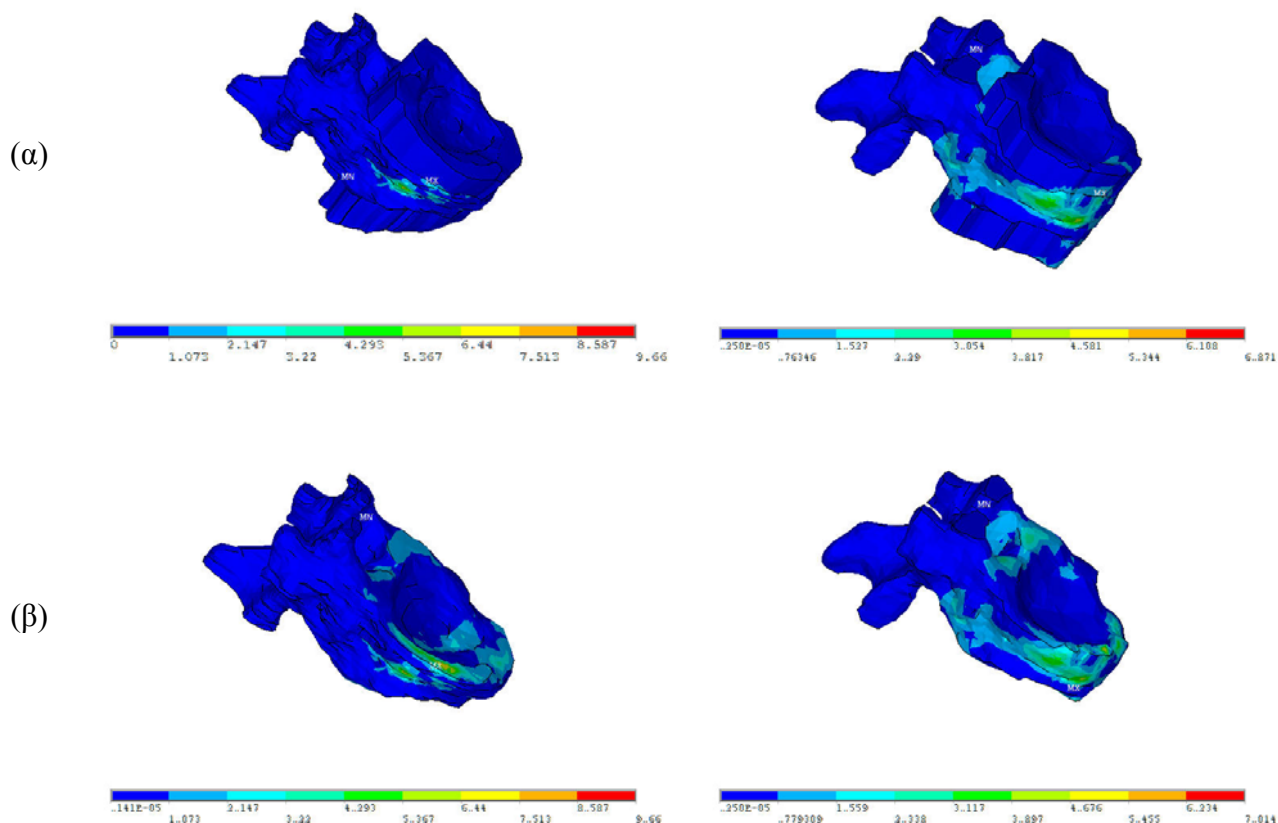
Οι υψηλές τιμές των μετατοπίσεων, αλλά και άλλων μηχανικών μεγεθών, οφείλονται στο ότι στη μοντελοποίηση δεν συμπεριλαμβάνεται η επίδραση συνδέσμων και μυών που θα δρούσαν στην ακανθώδη απόφυση – αλλά και στο σπονδυλικό σώμα. Παρόλα αυτά επειδή βασικός σκοπός της παρούσας ΔΕ είναι η σύγκριση των δύο καταστάσεων και η διερεύνηση της επίδρασης του μεσοσπονδυλίου δίσκου και όχι η εξέταση των ακριβών τιμών των μηχανικών μεγεθών θεωρείται ότι αυτή η απλοποίηση δεν επηρεάζει τα συμπεράσματα που θα ακολουθήσουν.

9.3.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων

Στο Σχήμα 9.10 παρουσιάζονται οι κατανομές ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον Θ12 τόσο για την πρώτη όσο και για τη δεύτερη κατάσταση.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 9.10 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τάση εμφανίζεται στη δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Όπως και στην περίπτωση της εφαρμογής θλιπτικού φορτίου η μέγιστη τιμή στην δεύτερη κατάσταση είναι μικρότερη από αυτήν της πρώτης και η κατανομή των τάσεων ομαλότερη, κάτι που οφείλεται στην εξομάλυνση της γεωμετρίας, όπως προαναφέρθηκε.

Βασική διαφοροποίηση της καμπτικής φόρτισης σε σχέση με τη θλιπτική είναι η εμφάνιση υψηλότερων τάσεων, της τάξης του 1.2MPa, στους αυχένες του σπονδύλου.

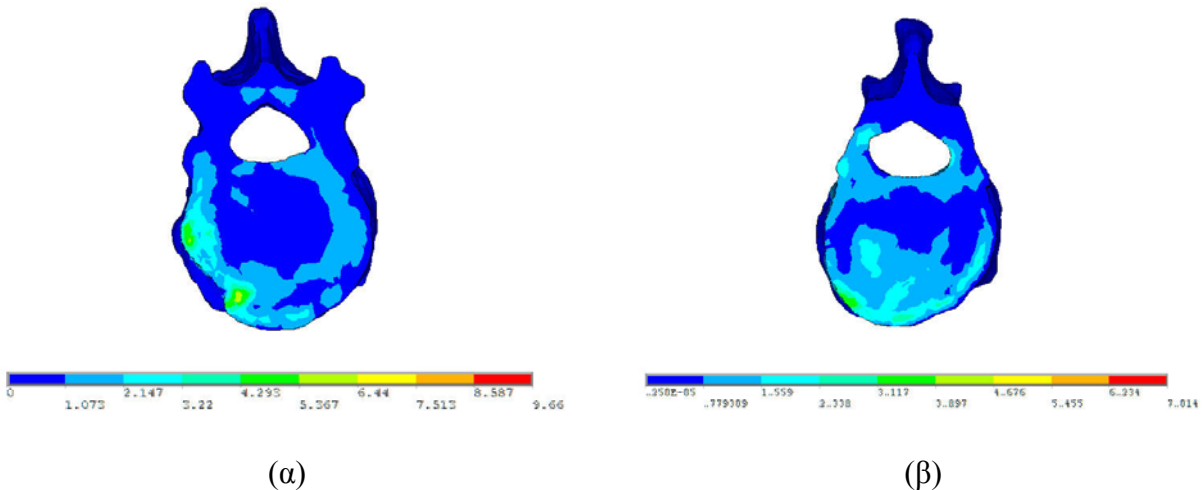
Στον Πίνακα 9.6 φαίνονται οι μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων και στις δύο καταστάσεις καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή τους.

Πίνακας 9.6 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων

	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή

Πρώτη κατάσταση	9.66	-27.4 %
Δεύτερη Κατάσταση	7.01	

Στο Σχήμα 9.11 παρουσιάζεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση, σε μια τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον άξονα Z.



Σχήμα 9.11 Τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον z-άξονα (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση

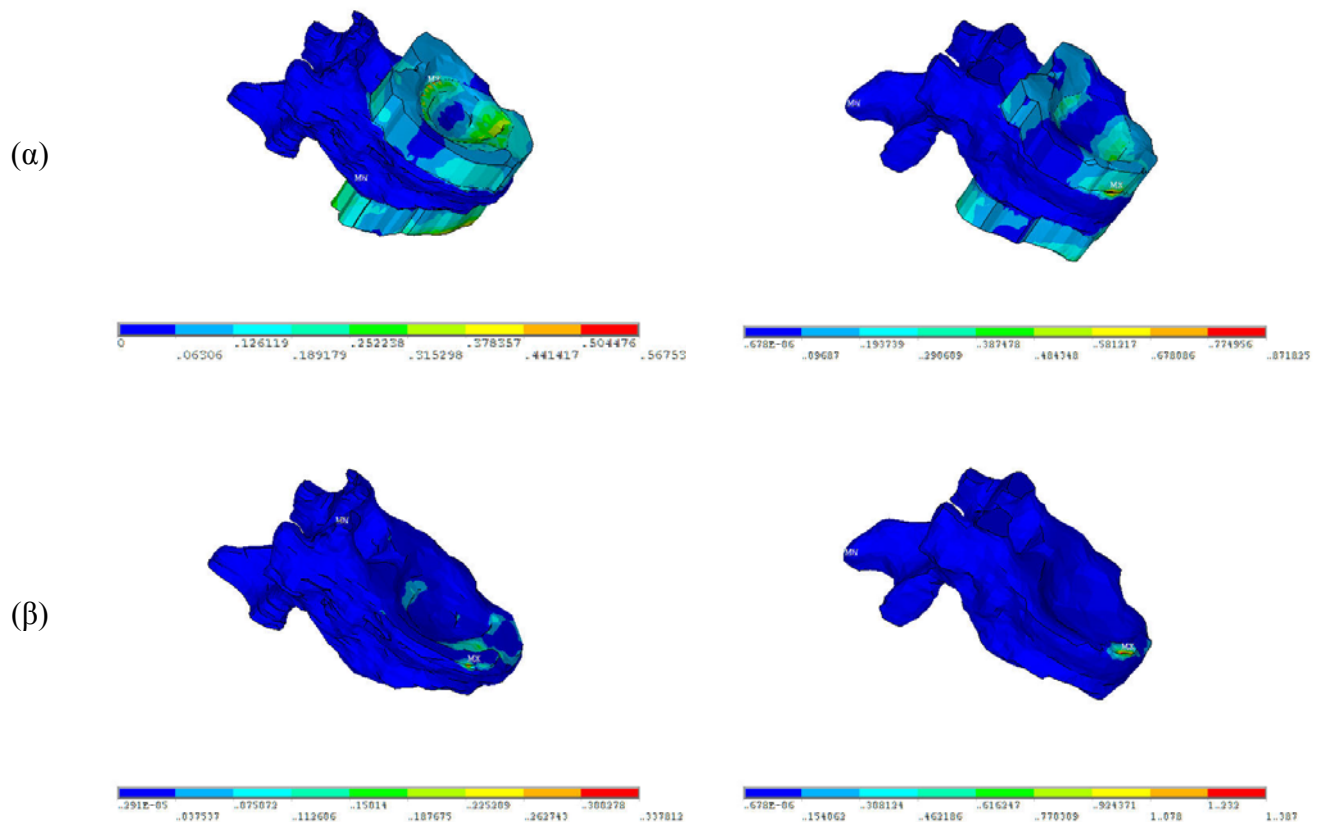
Στην πρώτη κατάσταση παρατηρούνται σαφώς εντονότερες διαφοροποιήσεις των τάσεων στο σπονδυλικό σώμα, και κυρίως υπάρχει μια σχετικά μεγάλη περιοχή στη δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος που παραλαμβάνει τάσεις, στη δεύτερη κατάσταση δεν παρατηρείται αντίστοιχη περιοχή.

9.3.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 9.12 που ακολουθεί φαίνονται οι ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises. Είναι εμφανές στο Σχήμα 9.12(α) ότι μεγαλύτερες παραμορφώσεις υφίστανται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι όπως και κατά τη μοντελοποίηση της θλίψης. Συγκεκριμένα, στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στην επιφάνεια διαχωρισμού του ινώδους δακτυλίου με τον πηκτοειδή πυρήνα, ενώ στη δεύτερη κατάσταση εντοπίζεται στην εμπρόσθια δεξιά πλευρά του μεσοσπονδύλιου δίσκου στην επαφή με το σπονδυλικό σώμα.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 9.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

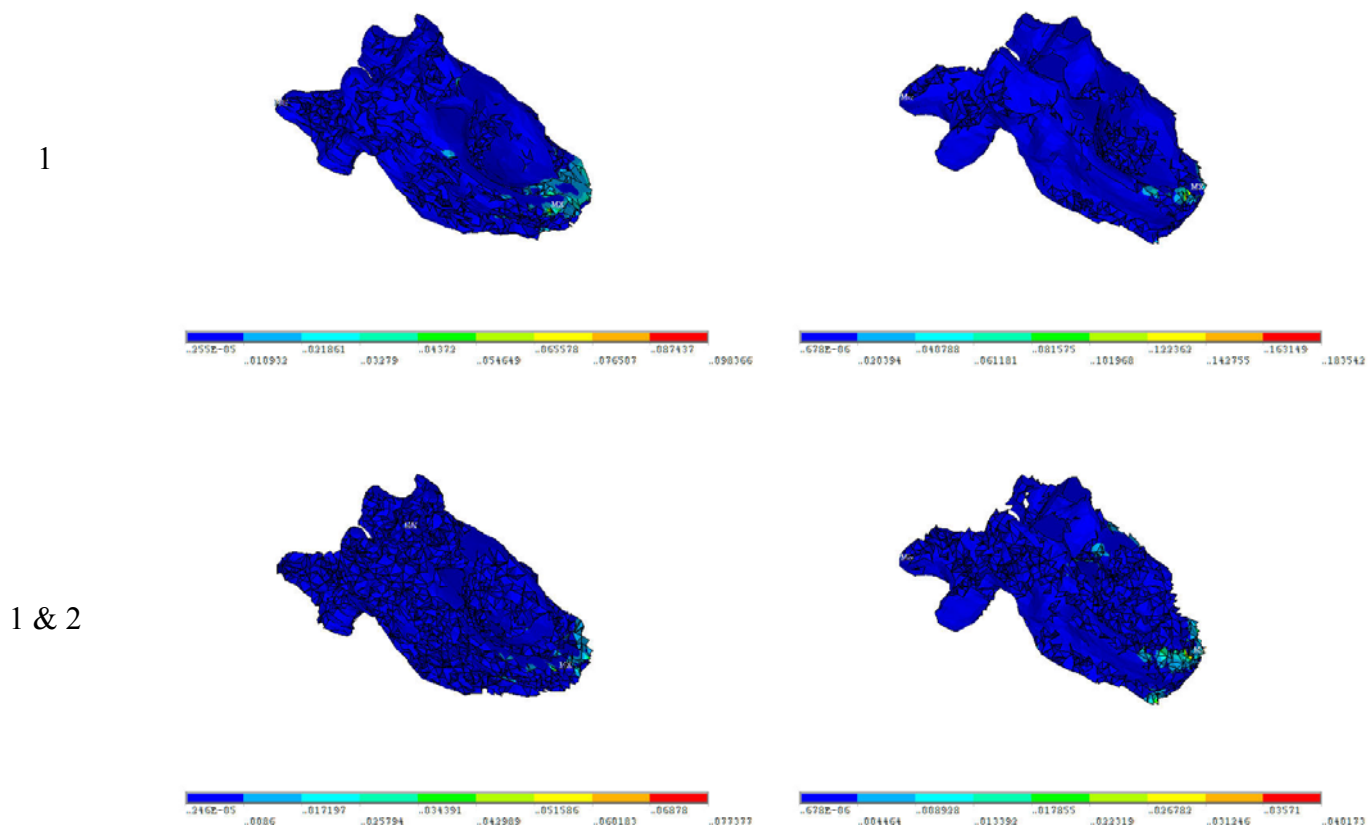
Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης του μεσοσπονδύλιου δίσκου είναι υψηλότερη από αυτή της πρώτης κατάστασης.

Στο Σχήμα 9.12 παρατηρείται ότι τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση οι τιμές των μέγιστων παραμορφώσεων είναι πολύ υψηλές. Αυτό συμβαίνει διότι το μοντέλο περιλαμβάνει το πρώτο υλικό που όπως προαναφέρθηκε έχει ιδιότητες κενού δηλαδή πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας.

Αφαίρεση
υλικού

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



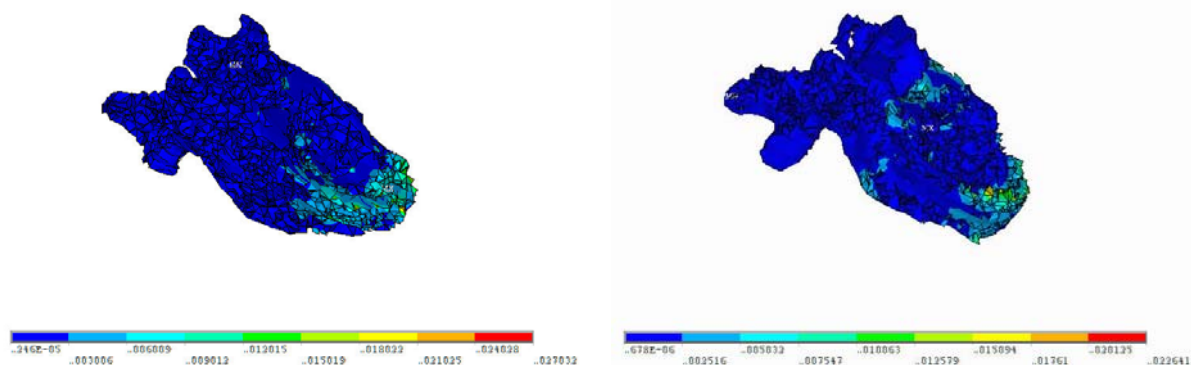
Σχήμα 9.13 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Μετά την αφαίρεση του πρώτου και των δύο πρώτων υλικών η κατανομή των ισοδύναμων παραμορφώσεων δεν μεταβάλλεται τοπολογικά ούτε στην πρώτη ούτε στη δεύτερη κατάσταση αλλά οι μέγιστες τιμές μειώνονται.

Μελετώντας προσεκτικά το μοντέλο παρατηρείται ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται σε μεμονωμένα ΠΣ. Μετά την αφαίρεση αυτών των στοιχείων (Σχήμα 9.14) η κατανομή ομαλοποιείται περαιτέρω.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 9.14 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Στον Πίνακα 9.7 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12 που ακολουθεί οι μέγιστες παραμορφώσεις για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση. Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού (Σχήμα 9.13 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2(1)) η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης μειώνεται κατά 70.9% ενώ στη δεύτερη κατάσταση κατά 86.8%. Μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού, στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται κατά 21.3% ενώ στη δεύτερη κατά 78.1%.

Πίνακας 9.7 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12

	Μέγιστη παραμόρφωση (μStrains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Πλήρες μοντέλο	567536	871825
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση των Μ.Δ.	337812	1387000
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	98366	183542
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	77377	40173
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	27032	22641

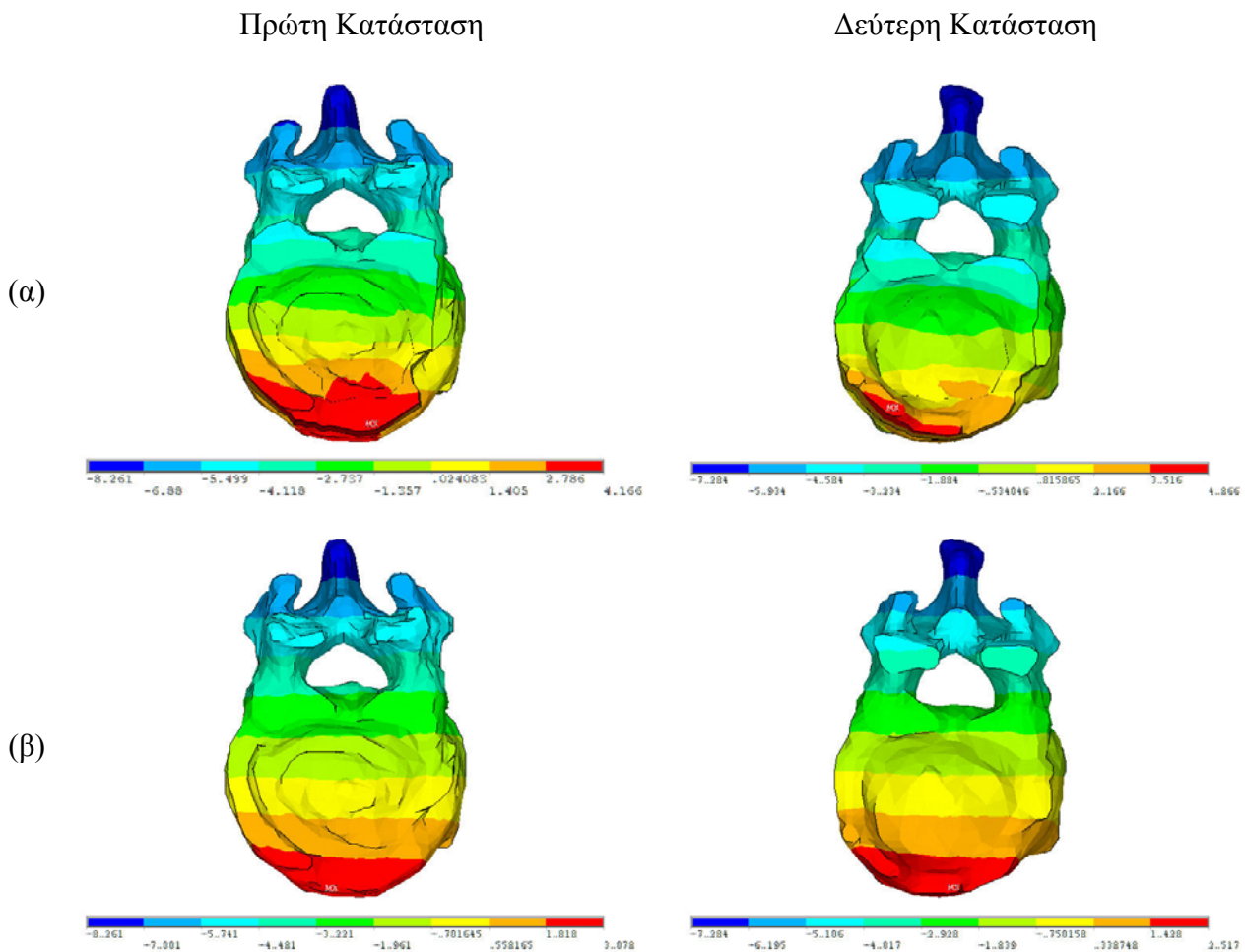
Σημαντική παρατήρηση από τον Πίνακα 9.7 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12 είναι ότι μετά την αφαίρεση του δεύτερου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση στη δεύτερη κατάσταση είναι μικρότερη συγκριτικά με την πρώτη.

9.4 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε έκταση

Σε αντιστοιχία με τη θλίψη και την κάμψη παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης του μοντέλου του Θ12 συμπεριλαμβανομένων των γειτονικών ΜΔ. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z και οι κατανομές των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων.

9.4.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα-z

Στο Σχήμα 9.15 Σχήμα 9.15 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις κατά τον οβελιαίο άξονα τόσο για την πρώτη όσο και για τη δεύτερη κατάσταση.



Σχήμα 9.15 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται μείωση της μέγιστης τιμής μετατόπισης από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση, όπως και στις δύο προηγούμενες συνθήκες φόρτισης Η μέγιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης όπως και στην κάμψη εμφανίζεται στην ακανθώδη απόφυση ενώ η ελάχιστη εμφανίζεται στο σπονδυλικό σώμα. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της μετατόπισης για τον σπόνδυλο Θ12 και η ποσοστιαία μεταβολή της καθεμίας.

Πίνακας 9.8 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12

	Zmin	Zmax
Πρώτη κατάσταση	0.56	8.26
Δεύτερη Κατάσταση	0.34	7.28
Ποσοστιαία Μεταβολή	-39.3 %	-11.8 %

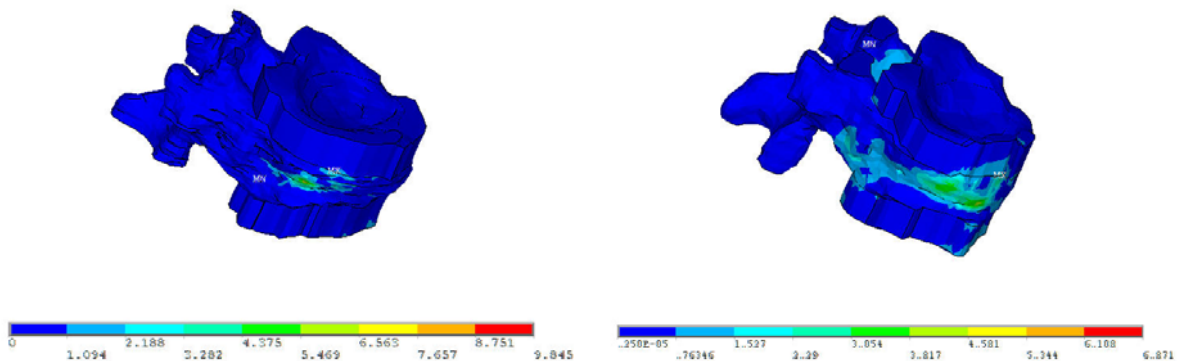
Στον Πίνακα 9.8 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12 φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή των μετατοπίσεων που εμφανίζεται στην ακανθώδη απόφυση μειώθηκε κατά 12% περίπου

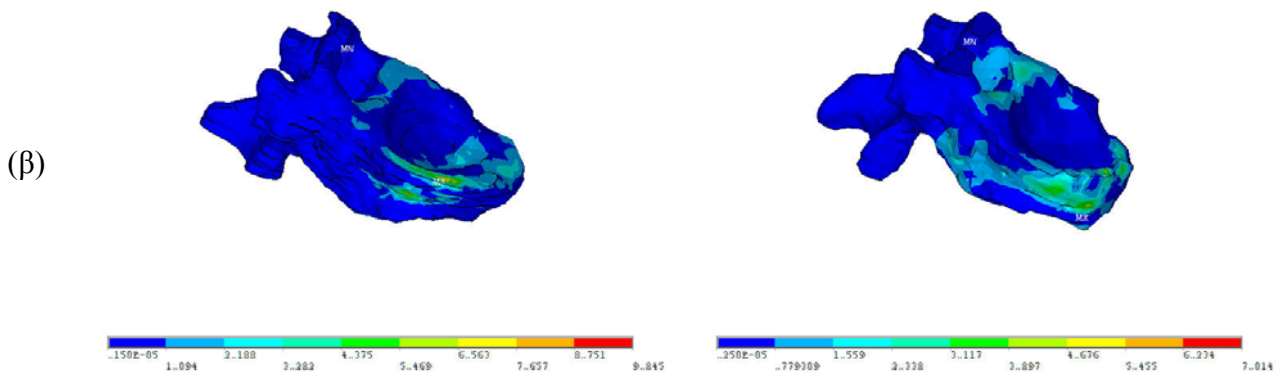
9.4.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση

(α)





Σχήμα 9.16 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

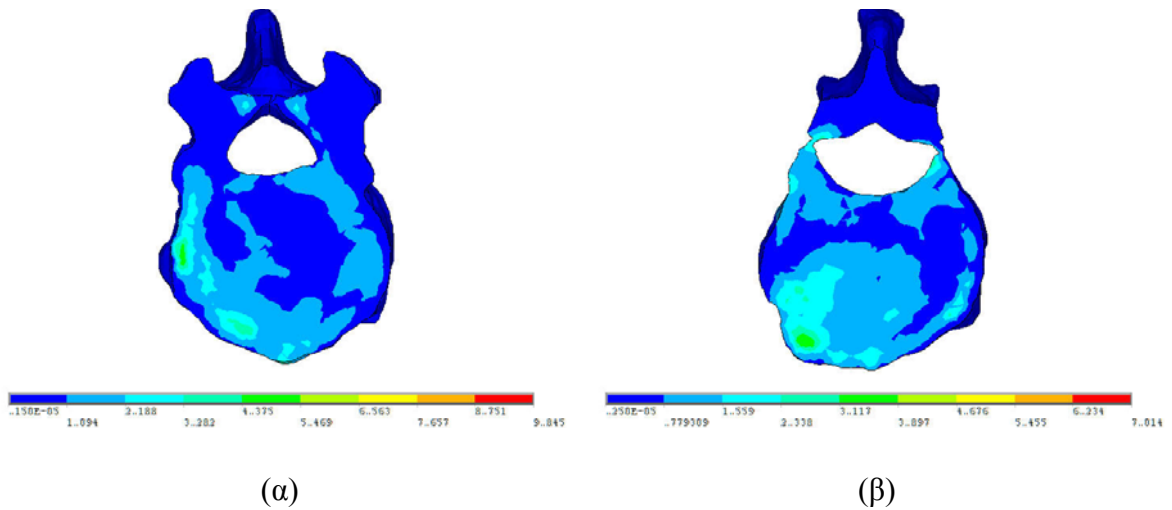
Όπως και στην περίπτωση του καμπτικού φορτίου η μέγιστη τάση εμφανίζεται, τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση, στη εμπρόσθια δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος (Σχήμα 9.16). Η κατανομή των τάσεων είναι ομαλότερη στη δεύτερη κατάσταση λόγω της ομαλότερης γεωμετρίας. Η κατανομή είναι ίδια με εκείνη της περίπτωσης του καμπτικού φορτίου όπως ήταν αναμενόμενο αφού οι δυνάμεις είναι ίδιου μέτρου και αντίθετης φοράς.

Στον Πίνακα 9.9 παρουσιάζεται η μέγιστη τάση για την κάθε περίπτωση καθώς και ποσοστιαία μείωση της.

Πίνακας 9.9 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων

	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή
Πρώτη κατάσταση	9.85	-28,75 %
Δεύτερη Κατάσταση	7.014	

Στο Σχήμα 9.17 παρατίθεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων σε μια τομή κατά τον άξονα Z του σπονδύλου Θ12, για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

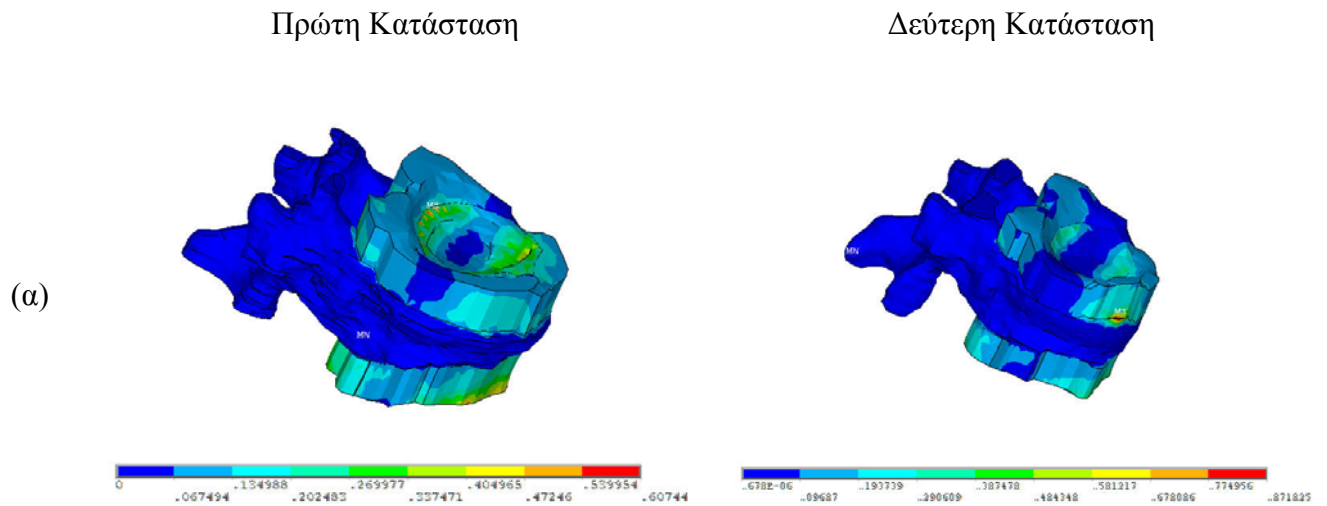


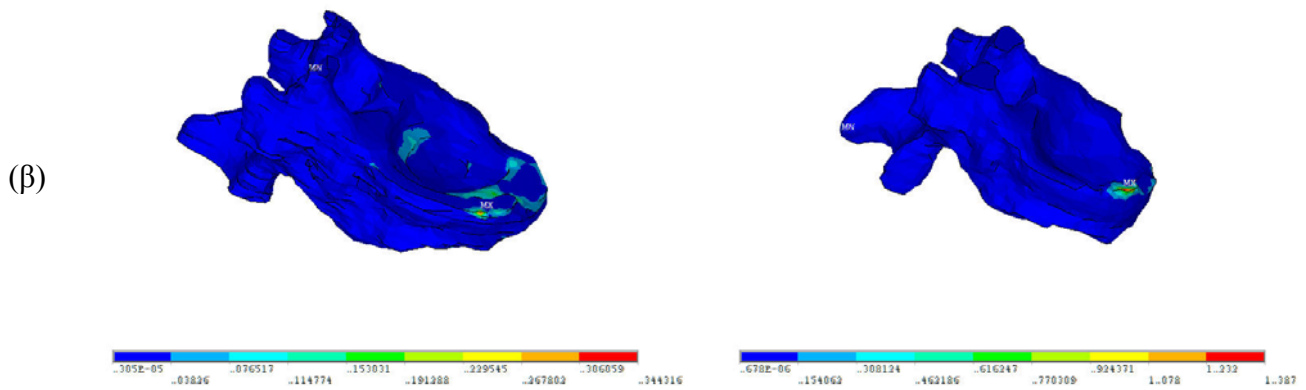
Σχήμα 9.17 Τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον z-άξονα (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση

Ο σπόνδυλος Θ12 έχει ομαλότερη κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό του στη δεύτερη κατάσταση συγκριτικά με την πρώτη, κάτι που οφείλεται τόσο στην κατανομή των υλικών του όσο και στην ομαλότερη γεωμετρία του.

9.4.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises.





Σχήμα 9.18 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Όπως ήταν αναμενόμενο τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με εκείνα που παρουσιάστηκαν στην περίπτωση της κάμψης. Η μέγιστη παραμόρφωση και πάλι εμφανίζεται στους μεσοσπονδύλιους δίσκους. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη κατάσταση εμφανίζεται στο μεσοσπονδύλιο δίσκο και μάλιστα στη διαχωριστική επιφάνεια του ινώδους δακτυλίου με τον πηκτοειδή πυρήνα, στην πίσω πλευρά του πηκτοειδή πυρήνα. Στη δεύτερη κατάσταση παρατηρείται μέγιστη παραμόρφωση στη δεξιά πλευρά του μεσοσπονδύλιου δίσκου, στην επιφάνεια επαφής του με το σπονδυλικό σώμα. Στο Σχήμα 9.18, όπως και στην περίπτωση της κάμψης, παρατηρείται μεγαλύτερη μέγιστη παραμόρφωση στη δεύτερη κατάσταση από ότι στην πρώτη. Αυτό ισχύει τόσο στο πλήρες μοντέλο όσο και στο σπόνδυλο Θ12.

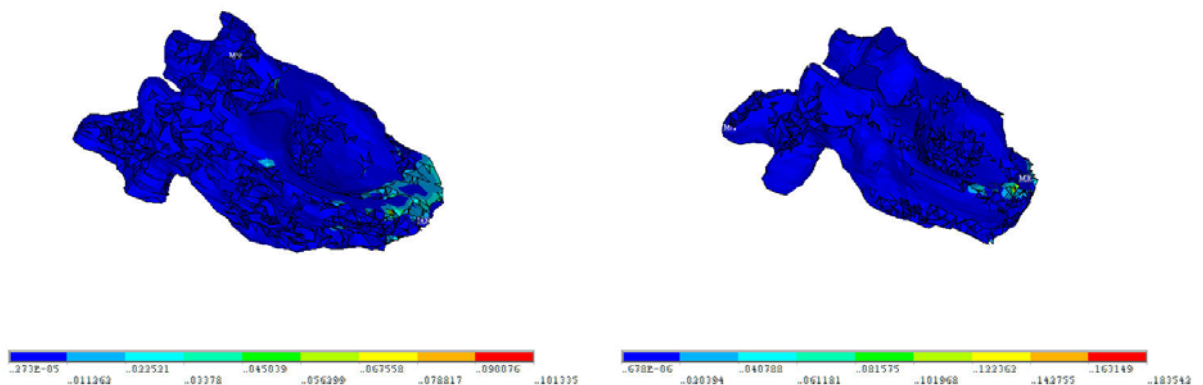
Αφαιρώντας αρχικά το πρώτο και στη συνέχεια το δεύτερο υλικό οι αριθμητικές τιμές των ισοδύναμων παραμορφώσεων ομαλοποιούνται.

Αφαίρεση
υλικού

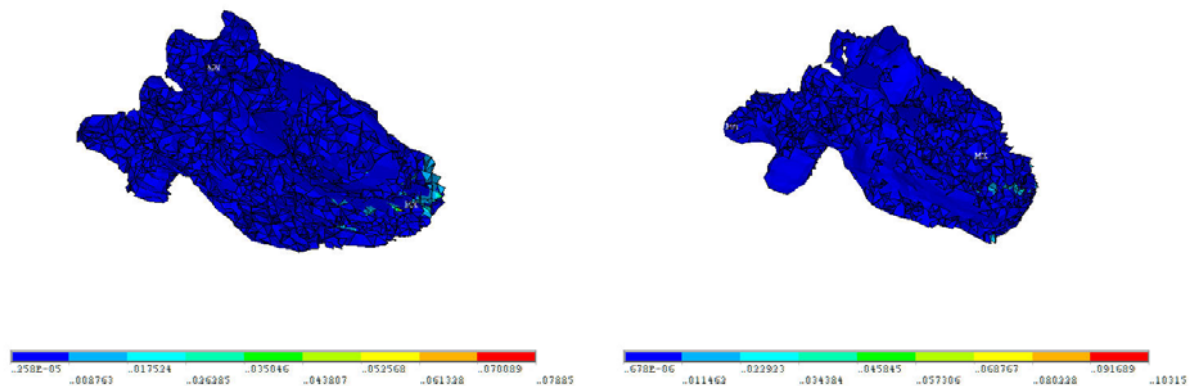
Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση

1



1 & 2

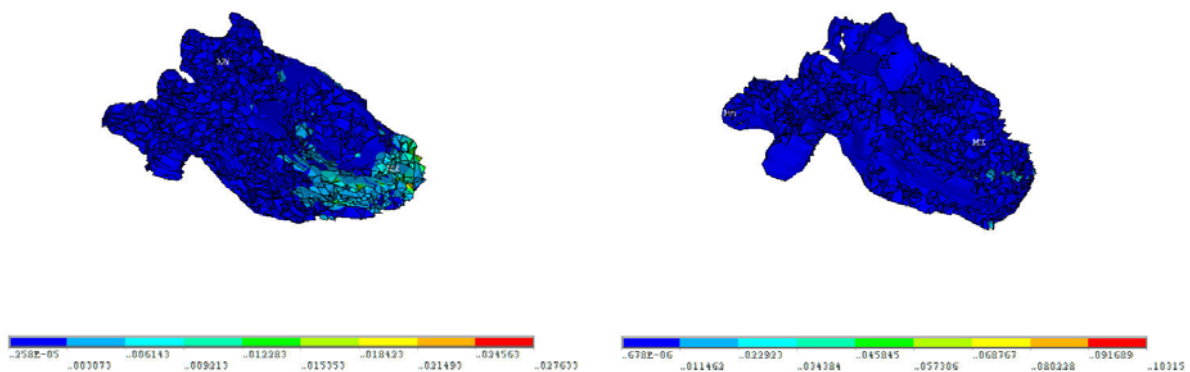


Σχήμα 9.19 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Στη συνέχεια αφαιρούνται τα μεμονωμένα Π.Σ. που εμφανίζουν τη μέγιστη παραμόρφωση. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η αφαίρεση μεμονωμένων στοιχείων δεν πραγματοποιήθηκε στην περίπτωση της έκτασης στη δεύτερη κατάσταση, καθώς μετά την αφαίρεση του δεύτερου υλικού δεν υπήρχε μεμονωμένο ΠΣ με τη μέγιστη τιμή ισοδύναμων παραμορφώσεων αλλά σύνολο ΠΣ στο εσωτερικό του σπονδυλικού σώματος.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 9.20 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Στον Πίνακα 9.10 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα για την κάθε κατάσταση.

Πίνακας 9.10 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12

	Μέγιστη παραμόρφωση (μStrains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Πλήρες μοντέλο	607448	871825
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση των Μ.Δ.	344316	1387000
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	101335	183542
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	78850	103150
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	27633	103150

Η παραμόρφωση μετά την αφαίρεση μεμονωμένων Π.Σ. έχει μειωθεί συνολικά κατά 92% στην πρώτη κατάσταση ενώ στη δεύτερη κατά 92.6%.

9.5 Συμπέρασμα

Αρχικά, όσον αφορά τη γεωμετρία προκύπτει ότι το ύψος του σπονδυλικού σώματος αυξάνεται, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι η γεωμετρία του σπονδύλου βελτιώνεται στη δεύτερη κατάσταση.

Στην περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης, παρατηρείται ότι η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον z άξονα είναι παραπλήσια αλλά η μέγιστη τιμή της διαφέρει περίπου κατά 19%. Όσον αφορά την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises η κατανομή της μεταβάλλεται από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση και πιο συγκεκριμένα ενώ στην πρώτη κατάσταση οι τάσεις περιορίζονται στην άνω επιφυσιακή πλάκα, στη δεύτερη κατάσταση εμφανίζονται αυξημένες τάσεις σε όλο το σπονδυλικό σώμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο καταστάσεις η δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος δέχεται μεγαλύτερες τάσεις από την αριστερή. Όσον αφορά στη μέγιστη τιμή αυτού του μεγέθους παρουσιάζει μείωση στη δεύτερη κατάσταση κατά 40%. Τέλος, όσον αφορά στις παραμορφώσεις η κατανομή παραμένει ίδια, παραμορφώνεται εντονότερα το εμπρόσθιο τμήμα του σπονδυλικού σώματος ενώ η μέγιστη τιμή τους μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων ΠΣ παραμένει σχεδόν ίδια.

Στην περίπτωση της καμπτικής φόρτισης, παρατηρείται ότι οι κατανομές όλων των μηχανικών μεγεθών δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα. Όσον αφορά στη μέγιστη τιμή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z αυτή μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση κατά 7%. Όπως και στην περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης, τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση η δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος δέχεται υψηλότερες τάσεις. Η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση κατά 27.4%. Τέλος

όσον αφορά τις παραμορφώσεις και στις δύο καταστάσεις παραμορφώνεται εντονότερα το εμπρόσθιο τμήμα του σπονδυλικού σώματος ενώ η διαφορά των μεγίστων τιμών της ισοδύναμης παραμόρφωσης μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων πεπερασμένων στοιχείων είναι μικρή.

Τελικά η μηχανική συμπεριφορά του σπονδύλου μεταβάλλεται και μάλιστα αν ληφθούν υπόψη οι μέγιστες τιμές, βελτιώνεται. Η βελτίωση οφείλεται ασφαλώς στη φαρμακευτική αγωγή που ακολούθησε η ασθενής, και ενδεχομένως σε άλλες δραστηριότητες τις οποίες η παρούσα μελέτη δεν είναι σε θέση να γνωρίζει.

**Κεφάλαιο 10ο Ανάλυση και σύγκριση των δύο
καταστάσεων στο σπόνδυλο Θ12 χωρίς
μεσοσπονδύλιους δίσκους της πρώτης ασθενούς**

10.1 Εισαγωγή

Οι φορτίσεις που επιβλήθηκαν στο μοντέλο του Θ12 με μεσοσπονδύλιους δίσκους επιβλήθηκαν και στον Θ12 χωρίς αυτούς, ώστε να μελετηθεί η επίδρασή τους στα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης. Η βασική διαφορά των δύο μοντελοποιήσεων είναι ότι πλέον οι οριακές συνθήκες επιβάλλονται απευθείας στο σπόνδυλο.

10.2 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων κατά την επιβολή θλιπτικής φόρτισης

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον οβελιαίο άξονα, των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων κατά Von Mises για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

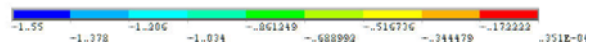
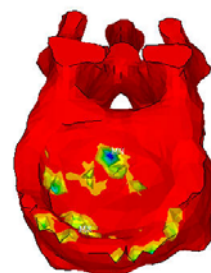
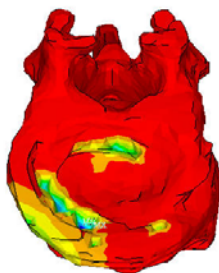
10.2.1 Αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 10.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κατανομές των μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση. Στο Σχήμα 10.1(β) έχει γίνει γραφική αφαίρεση του πρώτου υλικού.

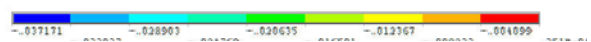
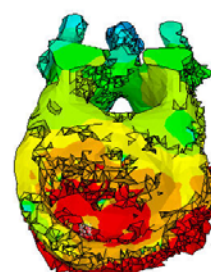
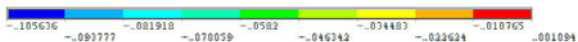
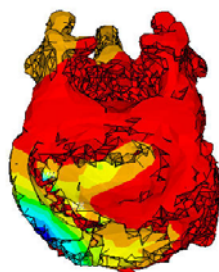
Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση

(α)



(β)



Σχήμα 10.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση του υλικού 1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Αρχικά, παρατηρείται ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται στην άνω επιφανειακή πλάκα τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση.

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού οι μετατοπίσεις κατανέμονται σε ολόκληρο το σπόνδυλο. Η περιοχή της μέγιστης μετατόπισης, στη δεύτερη κατάσταση, αλλάζει θέση και μετατοπίζεται στην περιοχή της ακανθώδους αποφύσεως.

Στον Πίνακα 10.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12 καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης στον οβελιαίο άξονα και για τις δύο καταστάσεις καθώς και η μεταβολή της μέγιστη τιμής της από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση

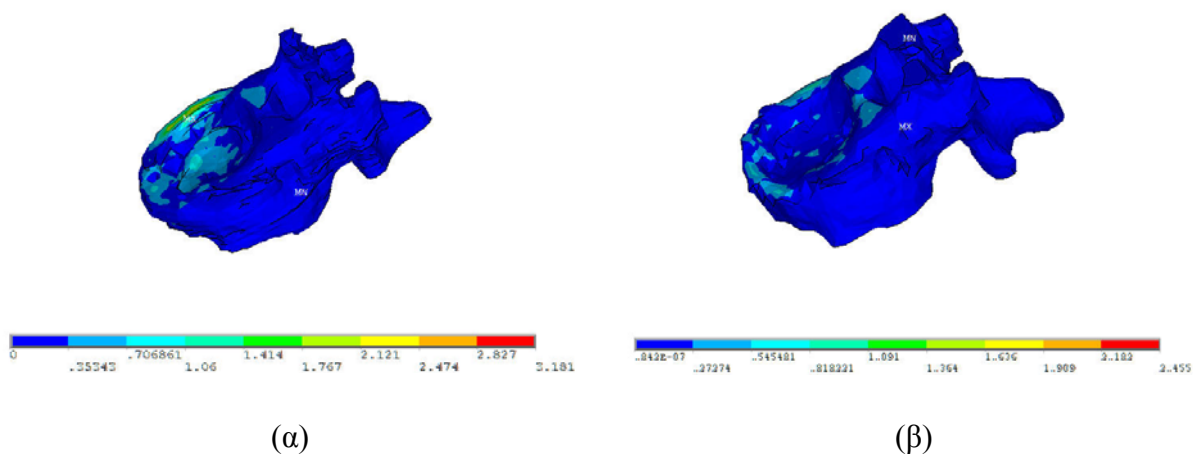
Πίνακας 10.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12

	Πρώτη Κατάσταση		Δεύτερη Κατάσταση		Ποσοστιαία Μεταβολή Zmax
	Zmin	Zmax	Zmin	Zmax	
Με το υλικό 1	0.36x10 ⁻³	0.30	0.351x10 ⁻⁴	1.55	416.7%
Χωρίς το υλικό 1	0.001094	0.11	0.351x10 ⁻⁴	0.04	-63.6%
Ποσοστιαία μεταβολή με την αφαίρεση του υλικού 1	67%	-63.3%	0%	-97.4%	

Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης αυξάνεται από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση κατά 416.7%, όταν εξετάζονται όλα τα υλικά. Επιπλέον έχει τοπικό χαρακτήρα και τα στοιχεία που την εμφανίζουν, έχουν τις ιδιότητες του πρώτου υλικού. Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη τιμή της μετατόπισης μειώνεται. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα της πρώτης και της δεύτερη κατάστασης, απουσία του πρώτου υλικού, παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της μετατόπισης από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση μειώνεται κατά 63.6%.

10.2.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 10.2 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων μετά την επιβολή του θλιπτικού φορτίου για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.



Σχήμα 10.2 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση

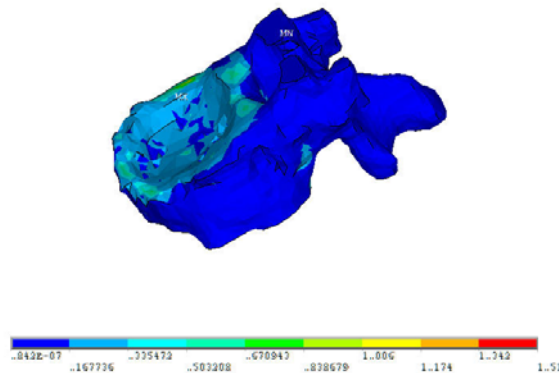
Στην πρώτη κατάσταση, Σχήμα 10.2(α), η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο εσωτερικό του σπονδυλικού σώματος. Επίσης, παρατηρείται ότι στη δεξιά πλευρά της άνω επιφυσιακής πλάκας υπάρχει περιοχή συγκέντρωσης τάσεων. Στη δεύτερη κατάσταση, αντίστοιχα, η θέση εμφάνισης της μέγιστης τάσης είναι στην κάτω επιφυσιακή πλάκα, κοντά στα πλευρικά ημιγλήνια, στην δεξιά και αριστερή πλευρά, και μάλιστα σε μικρό αριθμό ΠΣ.

Στον Πίνακα 10.2 φαίνεται η ποσοστιαία μείωση των τάσεων καθώς και η μέγιστη τιμή σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 10.2 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων

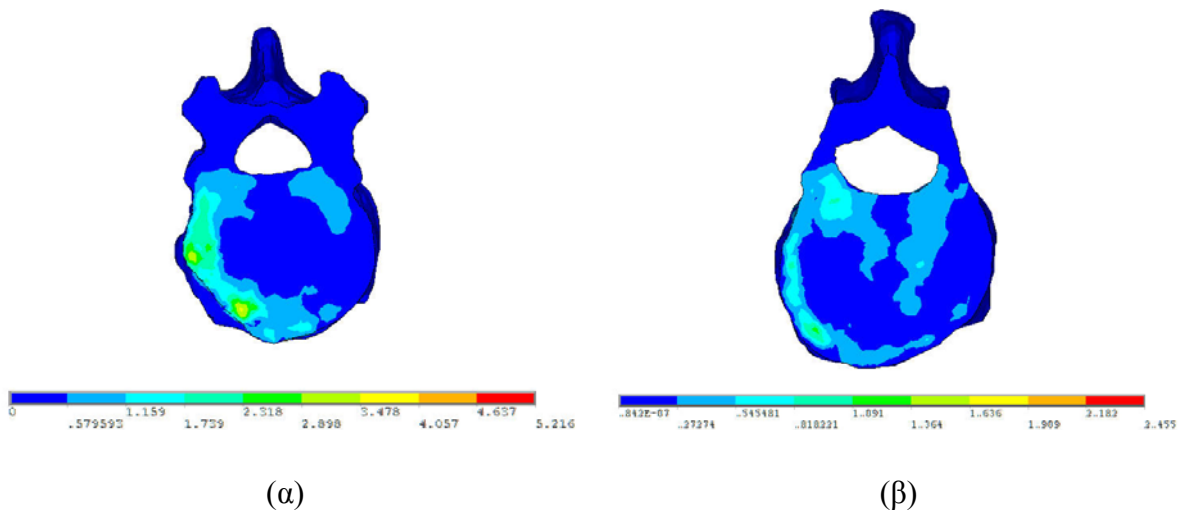
	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή
Πρώτη κατάσταση	3.181	-22.8%
Δεύτερη Κατάσταση	2.455	

Στη θέση εμφάνισης της μέγιστης τιμής ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises, στη δεύτερη κατάσταση, διαπιστώνεται η ύπαρξη οξείας γωνίας η οποία δημιουργήθηκε κατά την κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου. Αν αφαιρεθεί γραφικά η περιοχή αυτή, η κατανομή των τάσεων αλλάζει (Σχήμα 10.3) και φαίνεται ότι οι τάσεις καταμερίζονται σε όλη την άνω επιφυσιακή πλάκα.. Ο όγκος των ΠΣ που αφαιρέθηκαν αντιστοιχεί στο 0.5% του συνολικού όγκου.



Σχήμα 10.3 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στη δεύτερη κατάσταση μετά την αφαίρεση ΠΣ με μέγιστη τιμή τάσης κατά Von Mises

Στο Σχήμα 10.4 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε μια τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον άξονα z.

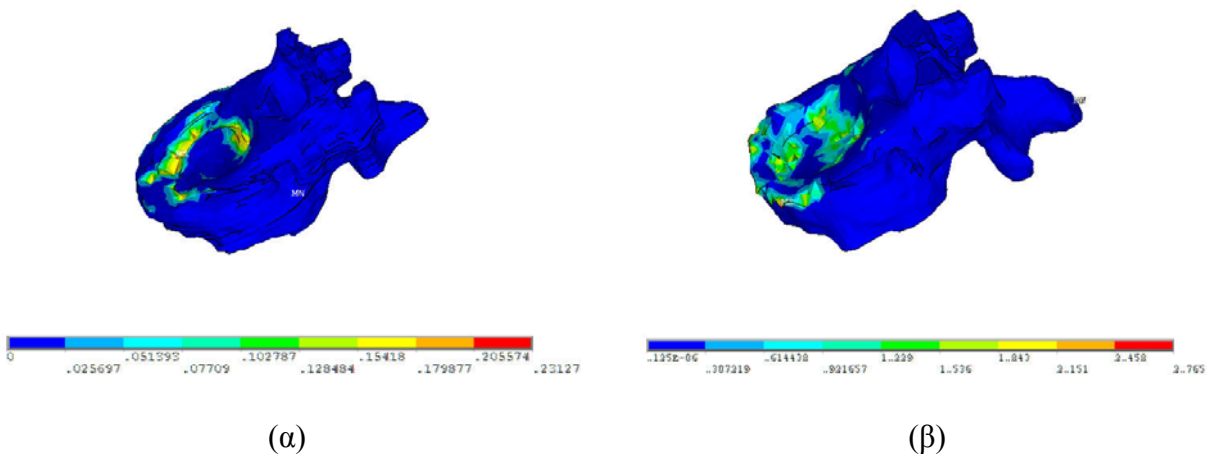


Σχήμα 10.4 Τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον z-άξονα (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση

Παρατηρείται ότι και στις δύο καταστάσεις, υπάρχει συγκέντρωση τάσεων στην εμπρόσθια δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος και μικρές τιμές τάσεων στο εσωτερικό του. Στην δεύτερη κατάσταση το εμβαδόν της περιοχής συγκέντρωσης τάσεων είναι μικρότερο.

10.2.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 10.5 παρουσιάζονται οι κατανομές των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises.



Σχήμα 10.5 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση

Στο Σχήμα 10.5 είναι φανερό ότι μεγαλύτερες παραμορφώσεις υφίσταται η άνω επιφυσιακή πλάκα και στις δύο καταστάσεις. Οι μέγιστες τιμές παραμορφώσεων που εμφανίζονται τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση είναι πολύ υψηλές και αυτό συμβαίνει γιατί στο σπόνδυλο συμπεριλαμβάνεται το πρώτο υλικό το οποίο όπως αναφέραμε έχει ιδιότητες κενού, δηλαδή πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας.

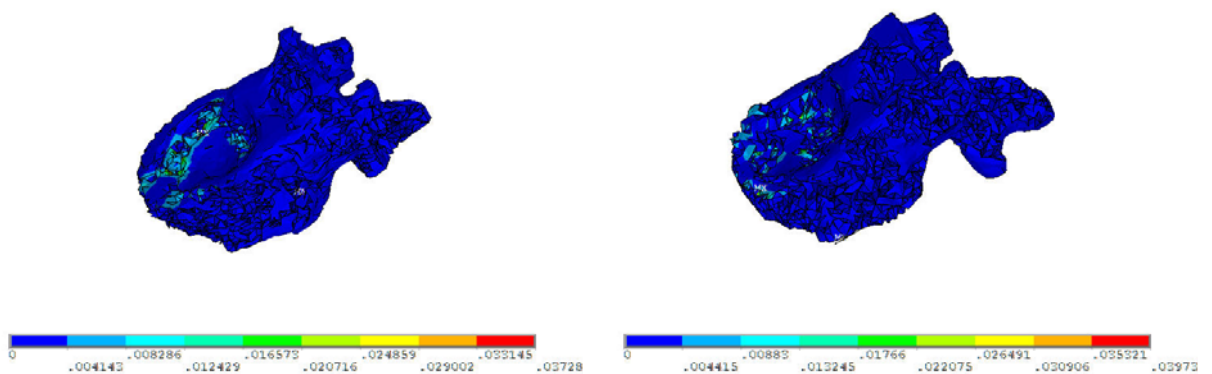
Στο Σχήμα 10.6 παρουσιάζεται η ίδια κατανομή μετά την αφαίρεση των πρώτων υλικών

Αφαίρεση υλικού

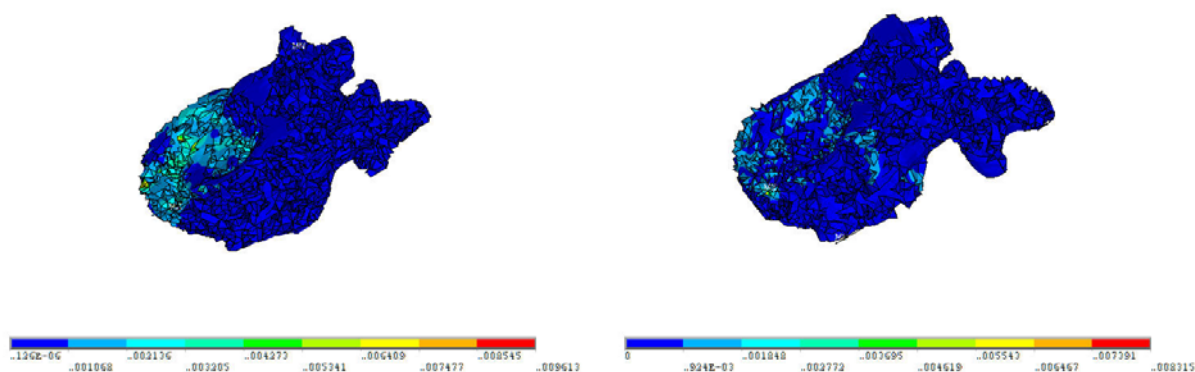
Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση

1



1 & 2



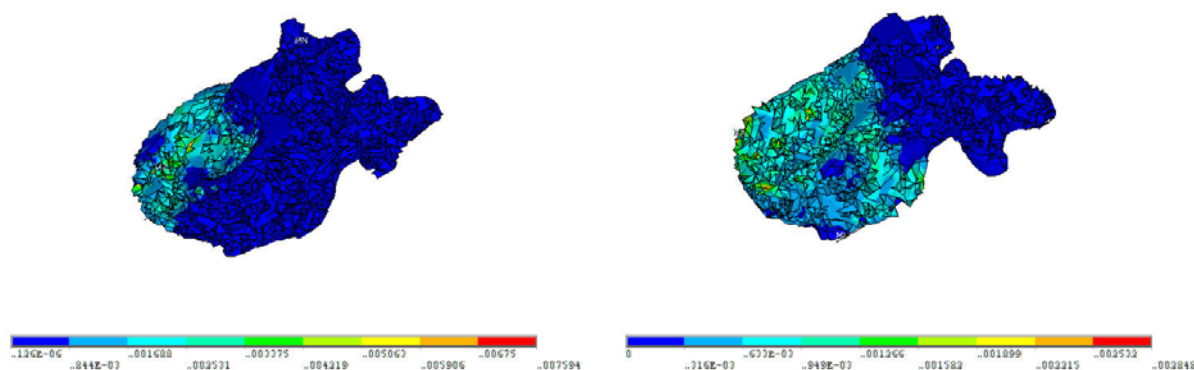
Σχήμα 10.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση έχουμε σημαντική μείωση της μέγιστης τιμής της παραμόρφωσης, και στη συνέχεια μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού παρατηρείται περαιτέρω μείωσή της αλλά και εξομάλυνση της κατανομής των ισοδύναμων παραμορφώσεων. Παρατηρείται ότι μετά την αφαίρεση του δεύτερου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση στη δεύτερη κατάσταση έχει μικρότερη τιμή από αυτήν της πρώτης.

Παρατηρώντας προσεκτικά τα παραπάνω αποτελέσματα, φαίνεται ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται σε μεμονωμένα ΠΣ. Αφαιρώντας αυτά τα ΠΣ προκύπτει το Σχήμα 10.7.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 10.7 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Στον Πίνακα 10.3 που ακολουθεί παρατίθενται οι μέγιστες τιμές των ισοδύναμων παραμορφώσεων για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 10.3 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12

	Μέγιστη παραμόρφωση (μStrains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Σπόνδυλος Θ12	231270	2765000
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	37280	39730
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	9613	8315
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	7594	2848

Πριν την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση στη δεύτερη κατάσταση είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή της πρώτης κατά 91.6%. Με την αφαίρεση του πρώτου υλικού στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται κατά 83.9%, ενώ κατά τη δεύτερη κατάσταση κατά 98.6%. Μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται κατά 74.2% στην πρώτη κατάσταση και κατά 79.1% στη δεύτερη.

10.3 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων κατά την επιβολή καμπτικής φόρτισης

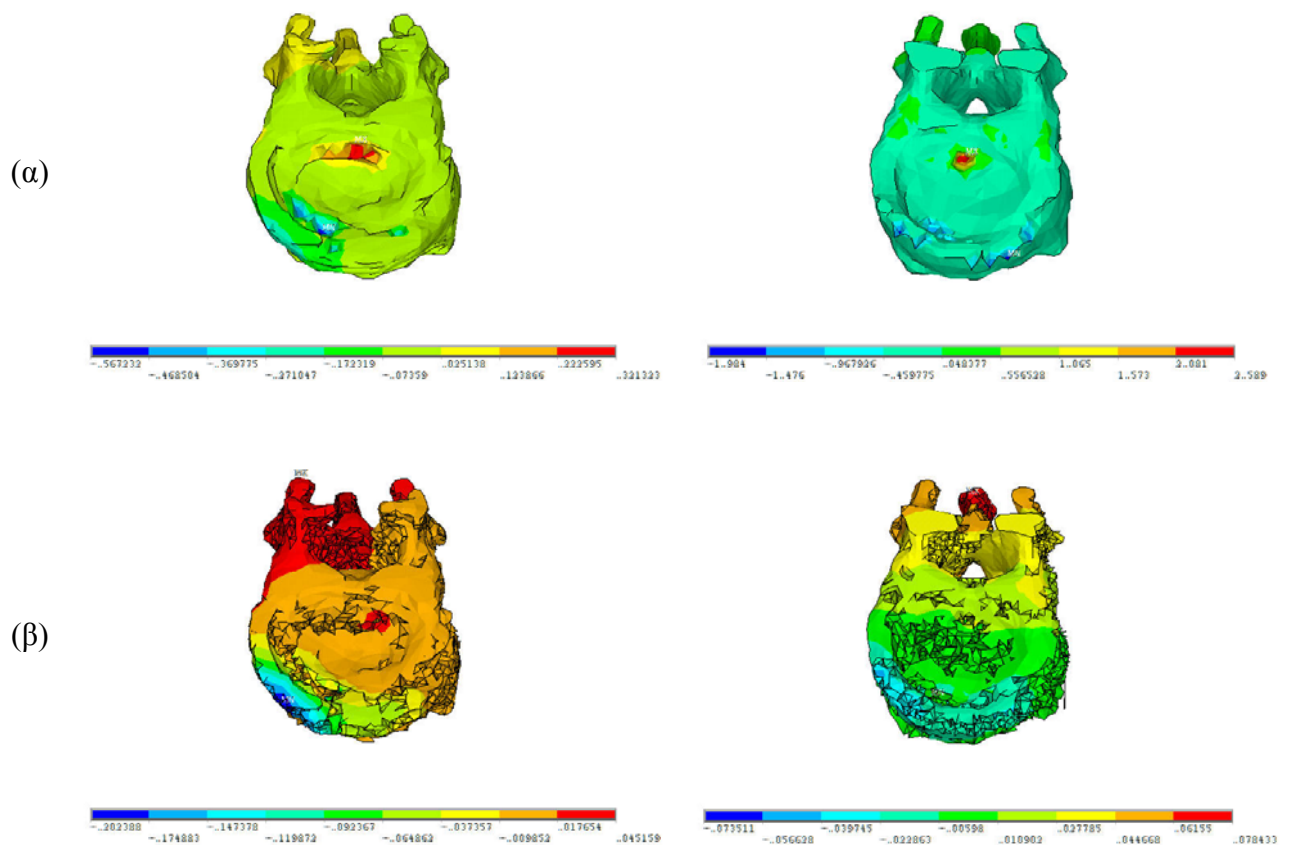
Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z, των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων κατά την επιβολή κάμψης στο σπόνδυλο Θ12 για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση. Παράλληλα γίνεται σύγκριση των δύο καταστάσεων.

10.3.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 10.8 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις κατά τον οβελιαίο άξονα με και χωρίς το πρώτο υλικό.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 10.8 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση του υλικού 1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση πριν την αφαίρεση του πρώτου υλικού εντοπίζεται στο πίσω μέρος του σπονδυλικού σώματος, ενώ υψηλές μετατοπίσεις εμφανίζονται και στην μπροστά δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Παρατηρείται ότι η τιμή της μέγιστης μετατόπισης είναι μεγαλύτερη στη δεύτερη κατάσταση σε σχέση με την πρώτη.

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού παρατηρείται αλλαγή των κατανομών και μείωση των απόλυτων αριθμητικών τιμών των μετατοπίσεων και στις δύο καταστάσεις. Στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στην εμπρόσθια δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος, ενώ στη δεύτερη, η περιοχή της μέγιστης μετατόπισης εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση. Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης κατ' απόλυτη τιμή στη δεύτερη κατάσταση εμφανίζεται μικρότερη συγκριτικά με την πρώτη.

Στον Πίνακα 10.4 καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης στον οβελιαίο άξονα και στις δύο καταστάσεις και η μεταβολή της από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση

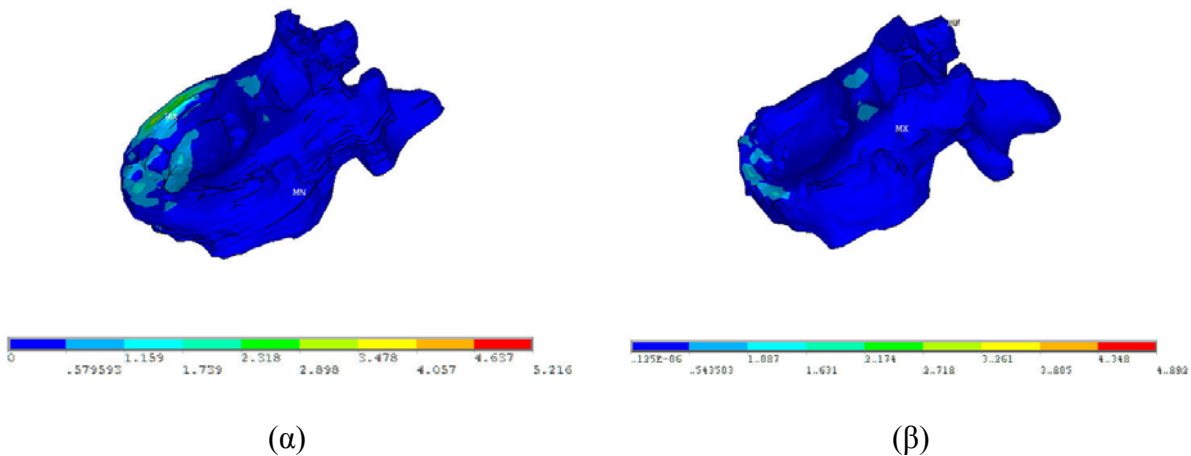
Πίνακας 10.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12

	Πρώτη Κατάσταση		Δεύτερη Κατάσταση		Ποσοστιαία Μεταβολή Zmax
	Zmin	Zmax	Zmin	Zmax	
Με το υλικό 1	0.074	0.57	0.048	2.6	78%
Χωρίς το υλικό 1	0.010	0.20	0.006	0.08	-60%
Ποσοστιαία μεταβολή με την αφαίρεση του υλικού 1	-86.4%	-64.9%	-87.5%	-96.9%	

Πριν τη αφαίρεση του πρώτου υλικού μέγιστη τιμή της μετατόπισης στη δεύτερη κατάσταση αυξάνεται κατά 78%, ενώ μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται κατά 60%.

10.3.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων

Στο Σχήμα 10.9 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων μετά την επιβολή του θλιπτικού φορτίου για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

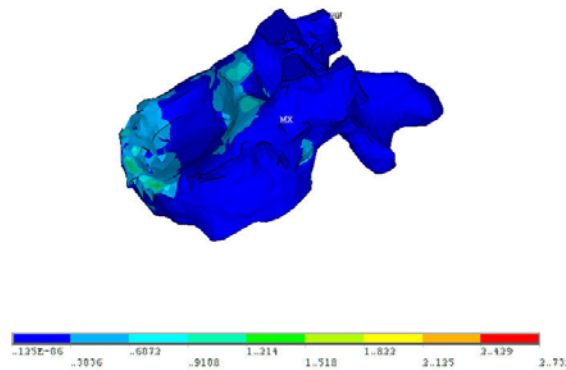


Σχήμα 10.9 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση

Στην πρώτη κατάσταση η θέση εμφάνισης της μέγιστης τάσης εντοπίζεται στην αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Όπως και κατά τη θλιπτική φόρτιση, η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης εντοπίζεται στην κάτω επιφυσιακή πλάκα, κοντά στα πλευρικά

ημιγλήνια. Η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης είναι μεγαλύτερη στην πρώτη κατάσταση.

Για λόγους πλήρους αντιστοιχίας με την ανάλυση που έγινε παραπάνω για τη θλίψη αφαιρούνται τα ίδια Π.Σ. από το μοντέλο της δεύτερης κατάστασης και παρατίθεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στο Σχήμα 10.10.



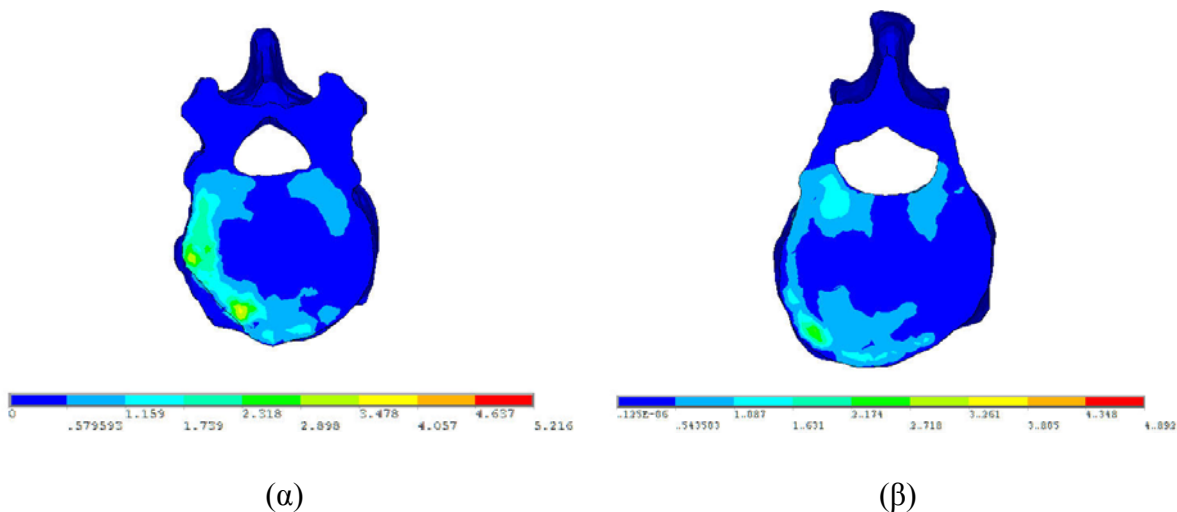
Σχήμα 10.10 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στη δεύτερη κατάσταση μετά την αφαίρεση ΠΣ με μέγιστη τιμή τάσης κατά Von Mises

Μετά την αφαίρεση των συγκεκριμένων Π.Σ η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης μειώνεται και γίνεται 2.732 MPa. Στον Πίνακα 10.5 φαίνεται η ποσοστιαία μείωση των τάσεων καθώς και η μέγιστη τιμή σε κάθε περίπτωση

Πίνακας 10.5 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων

	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή
Πρώτη κατάσταση	5.216	-6.2%
Δεύτερη Κατάσταση	4.892	

Στο Σχήμα 10.11 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε μια τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον άξονα z.

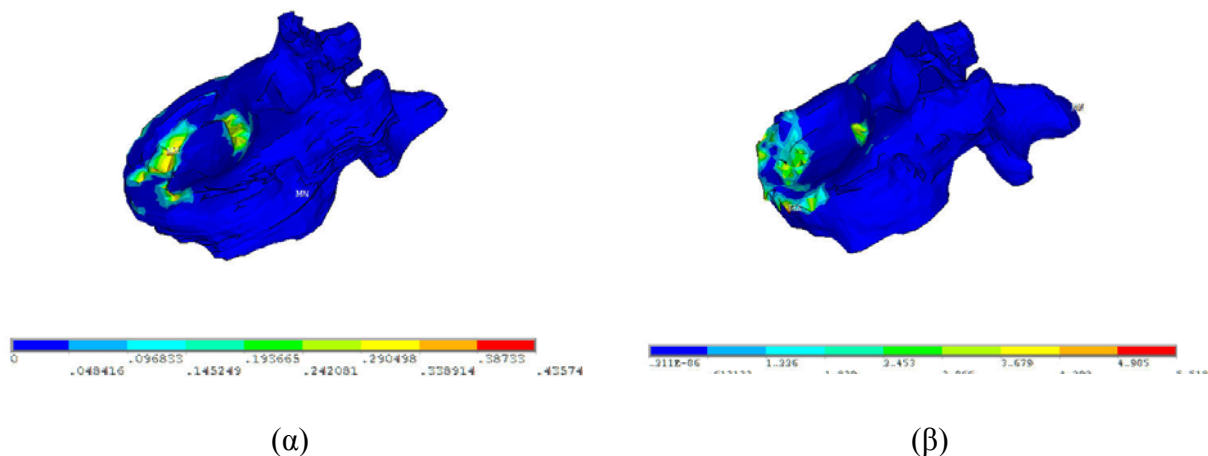


Σχήμα 10.11 Τομή του σπονδύλου Θ12 κατά τον z-άξονα (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση

Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση υπάρχει μια περιοχή στη δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος που παραλαμβάνει μεγάλο ποσοστό τάσεων. Το εμβαδόν αυτό στη δεύτερη κατάσταση έχει μειωθεί αισθητά.

10.3.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 10.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση που ακολουθεί φαίνονται οι ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises.

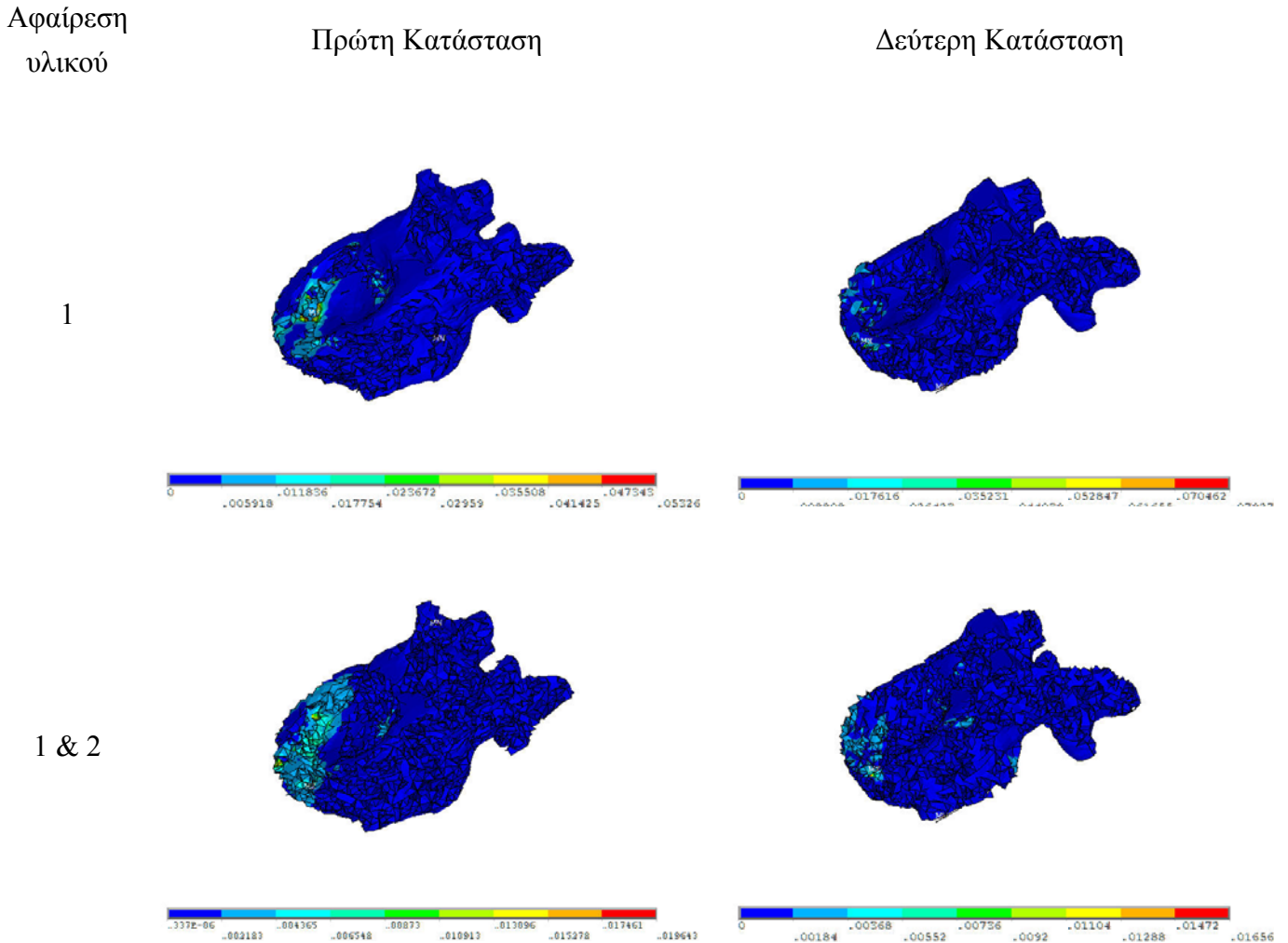


Σχήμα 10.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση

Είναι εμφανές ότι μεγαλύτερες παραμορφώσεις υφίστανται οι άνω επιφυσιακές πλάκες. Οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη

κατάσταση είναι πολύ υψηλές και αυτό συμβαίνει γιατί στο σπόνδυλο συμπεριλαμβάνεται το πρώτο υλικό το οποίο έχει ιδιότητες κενού.

Στο Σχήμα 10.13 παρουσιάζεται η ίδια κατανομή μετά την αφαίρεση των πρώτων υλικών.



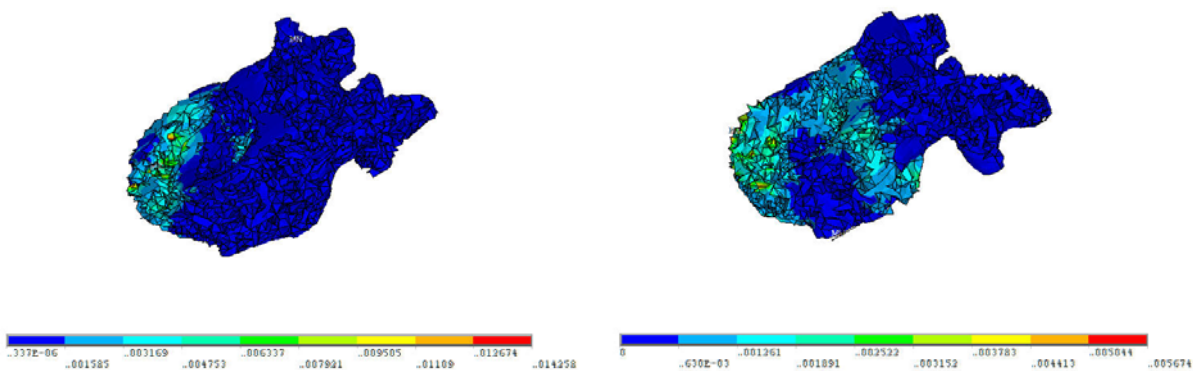
Σχήμα 10.13 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Και στις δύο καταστάσεις η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στο σπονδυλικό σώμα. Όπως και στην περίπτωση της θλίψης μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης μειώνεται, και μάλιστα στη δεύτερη κατάσταση είναι μικρότερη από ότι στην πρώτη.

Οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται σε μεμονωμένα ΠΣ. Αφαιρώντας αυτά τα ΠΣ κατ' αντιστοιχία με τη θλίψη προκύπτει το Σχήμα 10.14.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 10.14 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Αφού αφαιρεθούν τα μεμονωμένα Π.Σ. οι μέγιστες τιμές των ισοδύναμων παραμορφώσεων μειώνονται περαιτέρω και στις δύο καταστάσεις. Στον Πίνακα 10.6 παρατίθενται οι μέγιστες παραμορφώσεις για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 10.6 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12

	Μέγιστη παραμόρφωση (μStrains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Σπόνδυλος Θ12.	435740	5518000
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	53260	79270
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	19643	16560
Σπόνδυλος Θ12 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	14358	5674

Συγκεκριμένα μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται στην πρώτη κατάσταση κατά 87.8% και στη δεύτερη κατά 98.6% . Μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται κατά 63.1% ενώ στη δεύτερη κατά 65.7%. Μετά την αφαίρεση και των μεμονωμένων στοιχείων η διαφορά μεταξύ πρώτης και δεύτερης κατάστασης είναι 60.5%.

10.4 Συμπέρασμα

Στην περίπτωση επιβολής της θλιπτικής φόρτισης, παρατηρείται ότι η μέγιστη μετατόπιση στην πρώτη κατάσταση εντοπίζεται στην εμπρόσθια δεξιά πλευρά της άνω επιφυσιακής πλάκας. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση, μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού, εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση. Η μέγιστη τιμή, μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού, μειώνεται από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση κατά 64%. Όσον αφορά στην ισοδύναμη τάση κατά Von Mises παρατηρείται ότι και στις δύο καταστάσεις η δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος δέχεται μεγαλύτερες τάσεις. Στη δεύτερη κατάσταση μετά την αφαίρεση μεμονωμένων ΠΣ οι τάσεις κατανέμονται στο μεγαλύτερο τμήμα της άνω επιφυσιακής πλάκας. Η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση μειώνεται κατά 23%. Τέλος, όσον αφορά στις ισοδύναμες παραμορφώσεις παρατηρείται ότι στην πρώτη κατάσταση το εμπρόσθιο δεξιά τμήμα του σπονδυλικού σώματος υφίσταται μεγαλύτερες παραμορφώσεις ενώ στη δεύτερη κατάσταση οι παραμορφώσεις κατανέμονται πιο ομοιόμορφα σε όλο το σπονδυλικό σώμα. Μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων ΠΣ η μέγιστη τιμή στη δεύτερη κατάσταση εμφανίζεται κατά 63% μικρότερη.

Στην περίπτωση επιβολής καμπτικής φόρτισης, μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού και στις δύο καταστάσεις, παρατηρείται ότι στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση κατά τον άξονα z, εντοπίζεται στην εμπρόσθια δεξιά πλευρά της άνω επιφυσιακής πλάκας όπως και στην περίπτωση της θλίψης. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση. Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση κατά 60%. Όσον αφορά την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises, στην πρώτη κατάσταση το εμπρόσθιο δεξιά τμήμα του σπονδυλικού σώματος δέχεται μεγαλύτερες τάσεις, ενώ στη δεύτερη κατάσταση οι τάσεις κατανέμονται στο εμπρόσθιο και το πίσω τμήμα του σπονδυλικού σώματος. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης μειώνεται κατά 6%. Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι μετά την αφαίρεση μεμονωμένων ΠΣ η κατανομή στη δεύτερη κατάσταση ομαλοποιείται σημαντικά. Τέλος, όσον αφορά τις ισοδύναμες παραμορφώσεις, και στις δύο καταστάσεις το εμπρόσθιο δεξιά τμήμα του σπονδυλικού σώματος δέχεται μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων ΠΣ οι παραμορφώσεις στη δεύτερη κατάσταση κατανέμονται στο μπροστά και το πίσω τμήμα του σπονδυλικού σώματος, ενώ η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης μειώνεται κατά 61%.

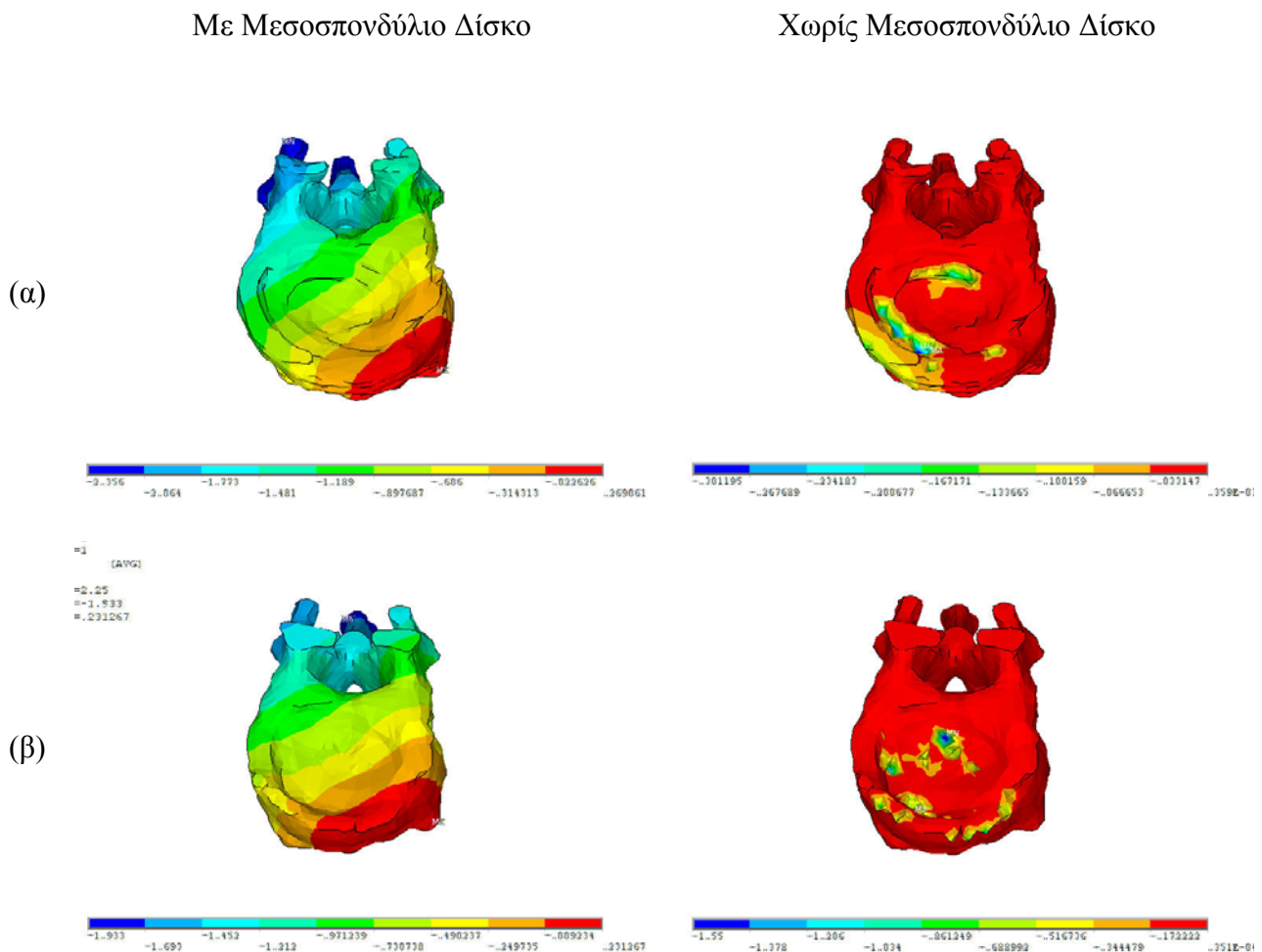
**Κεφάλαιο 11ο Σύγκριση των αποτελεσμάτων του
σπονδύλου Θ12 μεταξύ των μοντέλων με
μεσοσπονδύλιο δίσκο και χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο**

11.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων και για τις δύο καταστάσεις με και χωρίς μεσοσπονδύλιο κατά την επιβολή θλίψης

Παρακάτω συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z, των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων, κατά την επιβολή θλίψης στο πλήρες μοντέλο και στο μοντέλο χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο.

11.1.1 Σύγκριση των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 11.1 φαίνεται η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον οβελιαίο άξονα και για τις δύο καταστάσεις κατά τη μοντελοποίηση με και χωρίς μεσοσπονδύλιο.



Σχήμα 11.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Η αρχική παρατήρηση είναι ότι η ύπαρξη ή απουσία του μεσοσπονδύλιου δίσκου αλλάζει η κατανομή των μετατοπίσεων. Επίσης η θέση της μέγιστης τιμής της μετατόπισης κατά τον άξονα Z μετακινείται. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο μεσοσπονδύλιος δίσκος τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση, ενώ στην περίπτωση που δεν συμπεριλαμβάνεται ο

μεσοσπονδύλιος δίσκος εντοπίζεται στην άνω επιφυσιακή πλάκα και έχει τοπικό χαρακτήρα και στις δύο καταστάσεις.

Στον Πίνακα 11.1 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες μετατοπίσεις για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 11.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1

Μεσοσπονδύλιοι Δίσκοι	Πρώτη Κατάσταση		Δεύτερη Κατάσταση	
	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Zmin (mm)	Zmax (mm)
Ναι	0.02	2.36	0.009	1.93
Όχι	0.359x10-3	0.30	0.351x10-4	1.55
Ποσοστιαία μεταβολή	-96.8 %	-87.21 %	-99.6%	-19.8%

Παρατηρείται ότι στο πλήρες μοντέλο εμφανίζεται υψηλότερη τιμή μέγιστης μετατόπισης. Οι ελάχιστες μετατοπίσεις στα μοντέλα χωρίς μεσοσπονδύλιο είναι μηδενικές σε αντίθεση με τα μοντέλα με μεσοσπονδύλιο. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πρώτη περίπτωση οι κόμβοι στην κάτω επιφυσιακή πλάκα έχουν δεσμευμένους όλους τους βαθμούς ελευθερίας τους ενώ στη δεύτερη περίπτωση η κάτω επιφυσιακή πλάκα μετατοπίζεται.

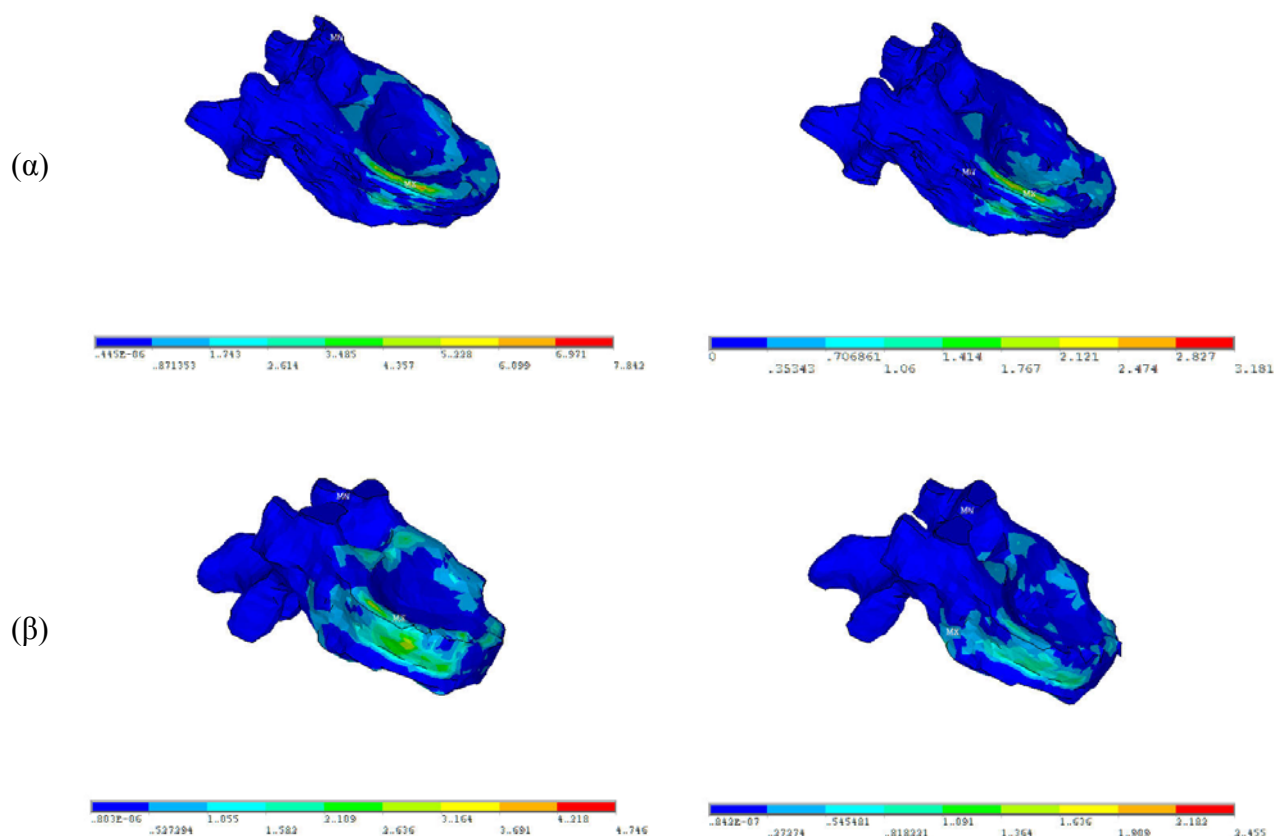
Τέλος στα σημεία εμφάνισης μέγιστης μετατόπισης στο απλό μοντέλο, οι αντίστοιχες μετατοπίσεις στο πλήρες μοντέλο διαφέρουν κατά 52.9% (μικρότερη μετατόπιση στο απλό μοντέλο) στην πρώτη κατάσταση και κατά 3% στη δεύτερη κατάσταση (μικρότερη μετατόπιση στο απλό μοντέλο).

11.1.2 Σύγκριση ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 11.2 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στο σπόνδυλο Θ12 και για τις δύο καταστάσεις αλλά και τη μοντελοποίηση με και χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο.

Με Μεσοσπονδύλιο Δίσκο

Χωρίς Μεσοσπονδύλιο Δίσκο



Σχήμα 11.2 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Τοπολογικά η κατανομή στην κάθε περίπτωση, με και χωρίς μεσοσπονδύλιο, δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές.

Στον Πίνακα 11.2 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο φαίνονται οι μέγιστες τάσεις για την κάθε περίπτωση και η ποσοστιαία μείωση των τάσεων.

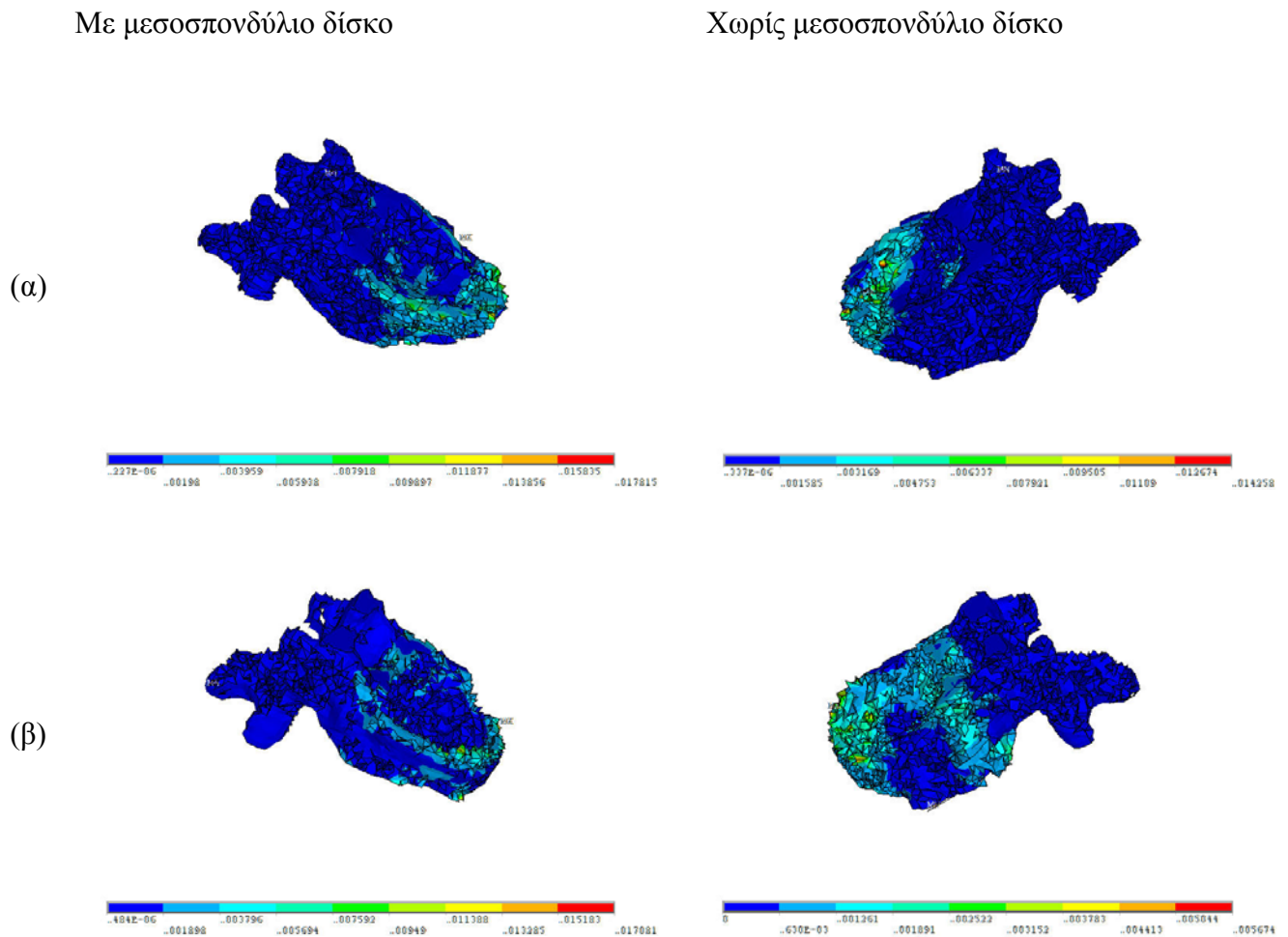
Πίνακας 11.2 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο

	1η Κατάσταση	2η Κατάσταση
Πλήρες μοντέλο (MPa)	7.842	4.746
Απλό μοντέλο (MPa)	3.181	2.455
Ποσοστιαία Μεταβολή	-59.44 %	-48.27 %

Στο απλό μοντέλο και στις δύο καταστάσεις η μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων είναι χαμηλότερες από ότι στο πλήρες. Ανεξάρτητα της ύπαρξης των μεσοσπονδύλιων δίσκων οι μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων είναι μικρότερες στη δεύτερη κατάσταση. Στο πλήρες μοντέλο η μέγιστη τάση μειώνεται κατά 39.48% ενώ στο απλό μοντέλο η μέγιστη τάση μειώνεται κατά 22.82 %.

11.1.3 Σύγκριση ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 11.3 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises και για τις δύο καταστάσεις στο μοντέλο με μεσοσπονδύλιο δίσκο.



Σχήμα 11.3 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην (α) πρώτη και (β) δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ. με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους

Στο μοντέλο με μεσοσπονδύλιους παρατηρείται ότι η παραμόρφωση στην πρώτη κατάσταση παραλαμβάνεται από την περιφέρεια της άνω επιφυσιακής πλάκας. Αντίθετα στο μοντέλο χωρίς μεσοσπονδύλιους οι παραμορφώσεις παραλαμβάνονται από την αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Στη δεύτερη κατάσταση η παραμόρφωση

στο μοντέλο με μεσοσπονδύλιους δίσκους παραλαμβάνεται από την περιφέρεια της άνω επιφυσιακής πλάκας. Στο μοντέλο χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους οι παραμορφώσεις παραλαμβάνονται από το σύνολο του σπονδυλικού σώματος.

Στον Πίνακα 11.3 φαίνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 11.3 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12 στην περίπτωση του πλήρους και του απλού μοντέλου

	Κατάσταση 1			Κατάσταση 2		
	Πλήρες μοντέλο	Απλό μοντέλο	Ποσοστιαία μεταβολή	Πλήρες μοντέλο	Απλό μοντέλο	Ποσοστιαία μεταβολή
Χωρίς το υλικό 1 (μstrains)	57915	53260	-8%	96562	79270	-17.9%
Χωρίς το υλικό 1 και 2 (μstrains)	46014	19643	-57.3%	33795	16560	-50.9%
Μετά την αφαίρεση μεμονωμένων στοιχείων (μstrains)	17815	14358	-19.4%	17081	5674	-66.78%

Παρατηρείται ότι γενικά στο πλήρες μοντέλο οι μέγιστες τιμές ισοδύναμων παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερες από αυτές του μοντέλου χωρίς τους μεσοσπονδύλιους. Η τιμές στη δεύτερη κατάσταση ανεξαρτήτως μοντελοποίησης είναι μικρότερες.

11.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων κατά την επιβολή κάμψης

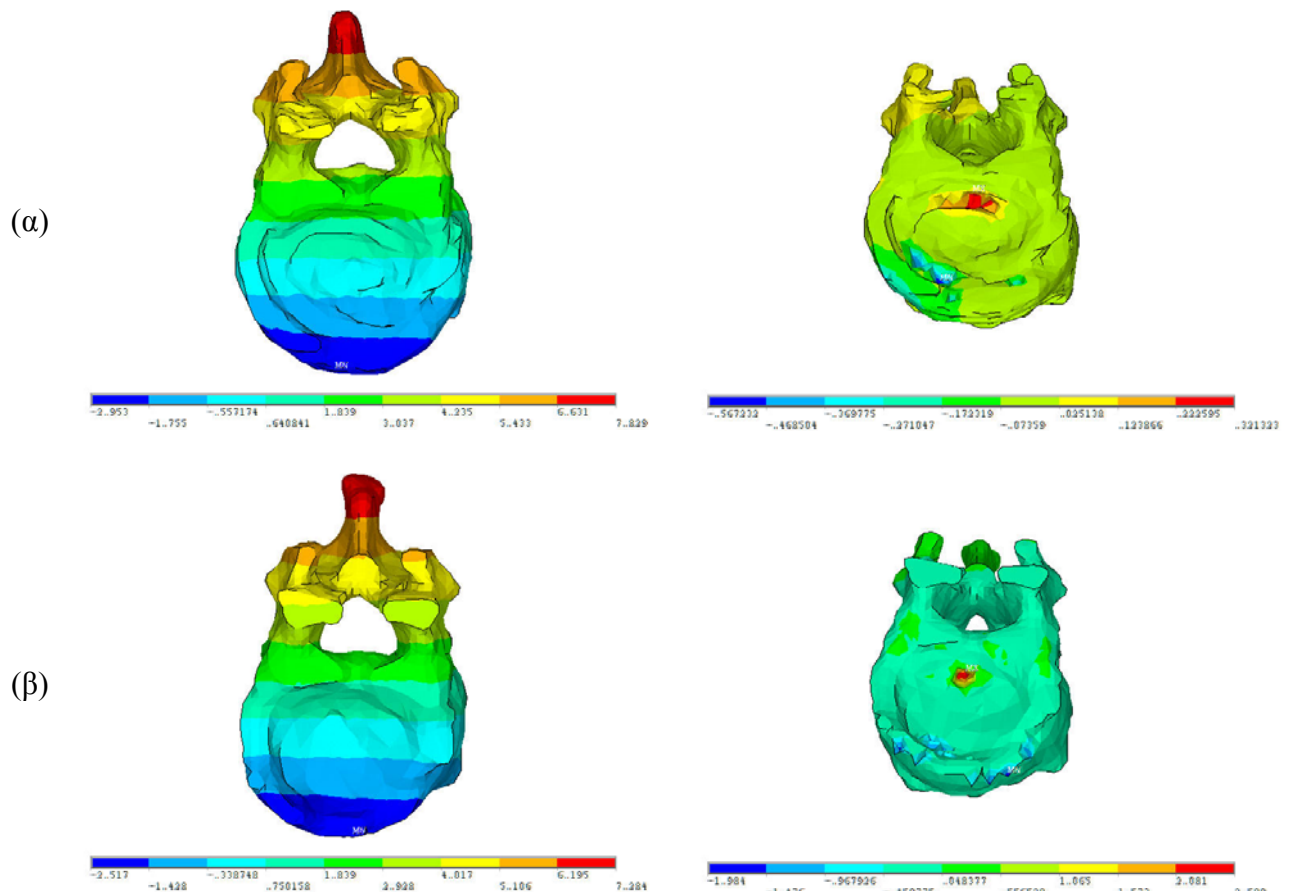
Παρακάτω συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z, των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων, κατά την επιβολή κάμψης ανάλογα με την παρουσία ή όχι των μεσοσπονδύλιων δίσκων.

11.2.1 Σύγκριση των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 11.4 που ακολουθεί, φαίνεται η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z και για τις δύο καταστάσεις αλλά και τη μοντελοποίηση με και χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο.

Με Μεσοσπονδύλιο Δίσκο

Χωρίς Μεσοσπονδύλιο Δίσκο



Σχήμα 11.4 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Όπως και στην περίπτωση της θλίψης, η κατανομή των μετατοπίσεων είναι ομαλότερη στο μοντέλο με τους μεσοσπονδύλιους. Η μέγιστη παραμόρφωση στο απλό μοντέλο εμφανίζεται στην άνω επιφυσιακή πλάκα, ενώ στο πλήρες μοντέλο στην εγκάρσια απόφυση, και στις δύο καταστάσεις. Να σημειωθεί ότι στο μοντέλο χωρίς τους μεσοσπονδύλιους οι μέγιστες παραμορφώσεις έχουν και σε αυτή την περίπτωση φόρτισης τοπικό χαρακτήρα

Στον Πίνακα 11.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Ο1 φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης στον οβελιαίο άξονα για την κάθε περίπτωση και η μεταβολή της από το απλό στο πλήρες μοντέλο.

Πίνακας 11.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Ο1

Μεσοσπονδύλιοι Δίσκοι	Πρώτη Κατάσταση		Δεύτερη Κατάσταση	
	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Zmin (mm)	Zmax (mm)

Ναι	0.56	7.83	0.34	7.28
Όχι	0.07	0.57	0.05	2.59
Ποσοστιαία μεταβολή	-86.7%	-92.75%	-85.7%	-64.4%

Οι μέγιστες μετατοπίσεις στο μοντέλο με την παρουσία μεσοσπονδυλίων είναι μεγαλύτερες από το απλό μοντέλο, για λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη μετατόπιση στο απλό μοντέλο είναι μεγαλύτερη στη δεύτερη κατάσταση συγκριτικά με την πρώτη ενώ γίνεται μικρότερη, όπως αναφέρθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού.

Τέλος στα σημεία εμφάνιση μέγιστης μετατόπισης στο απλό μοντέλο, οι αντίστοιχες μετατοπίσεις στο πλήρες μοντέλο διαφέρουν κατά 81.3% (μικρότερη μετατόπιση στο απλό μοντέλο) και στη δεύτερη κατάσταση κατά 11.5%. (μικρότερη μετατόπιση στο απλό μοντέλο).

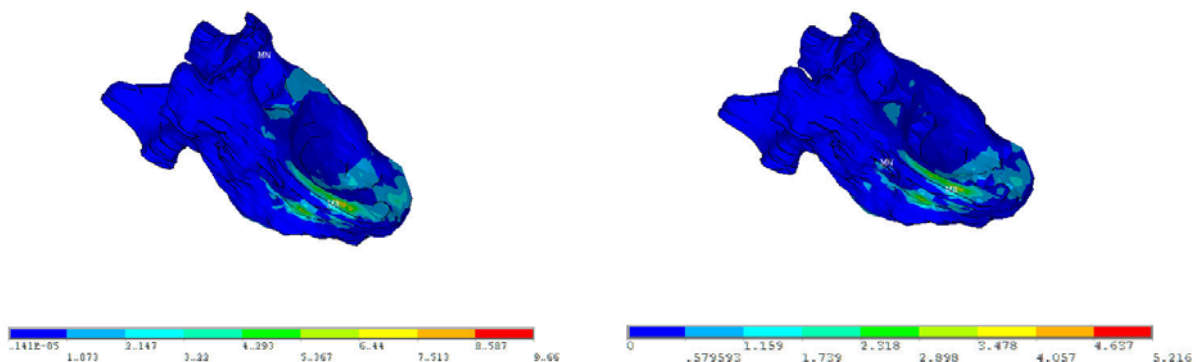
11.2.2 Σύγκριση ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises

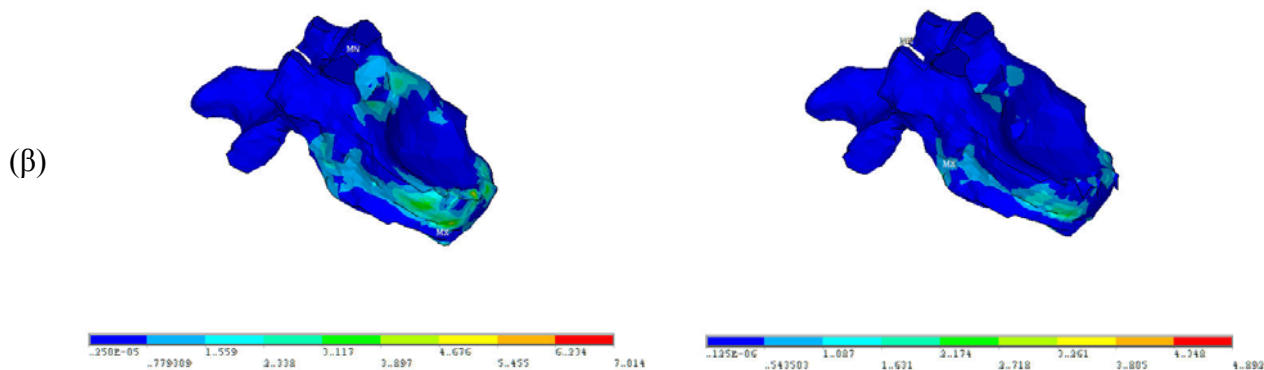
Στο Σχήμα 11.5 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στο σπόνδυλο Θ12 και για τις δύο καταστάσεις με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.

Με Μεσοσπονδύλιο Δίσκο

Χωρίς Μεσοσπονδύλιο Δίσκο

(α)





Σχήμα 11.5 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Όπως και στην περίπτωση της θλίψης οι μέγιστες τάσεις στο μοντέλο με τους μεσοσπονδύλιους είναι υψηλότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες στο απλό μοντέλο. Στον Πίνακα 11.5 φαίνονται οι μέγιστες τάσεις για την κάθε περίπτωση και η ποσοστιαία μείωση των τάσεων.

Πίνακας 11.5 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο

	1η Κατάσταση	2η Κατάσταση
Πλήρες μοντέλο (MPa)	9.66	7.014
Απλό μοντέλο (MPa)	5.216	4.892
Ποσοστιαία Μεταβολή	-46%	-30.25%

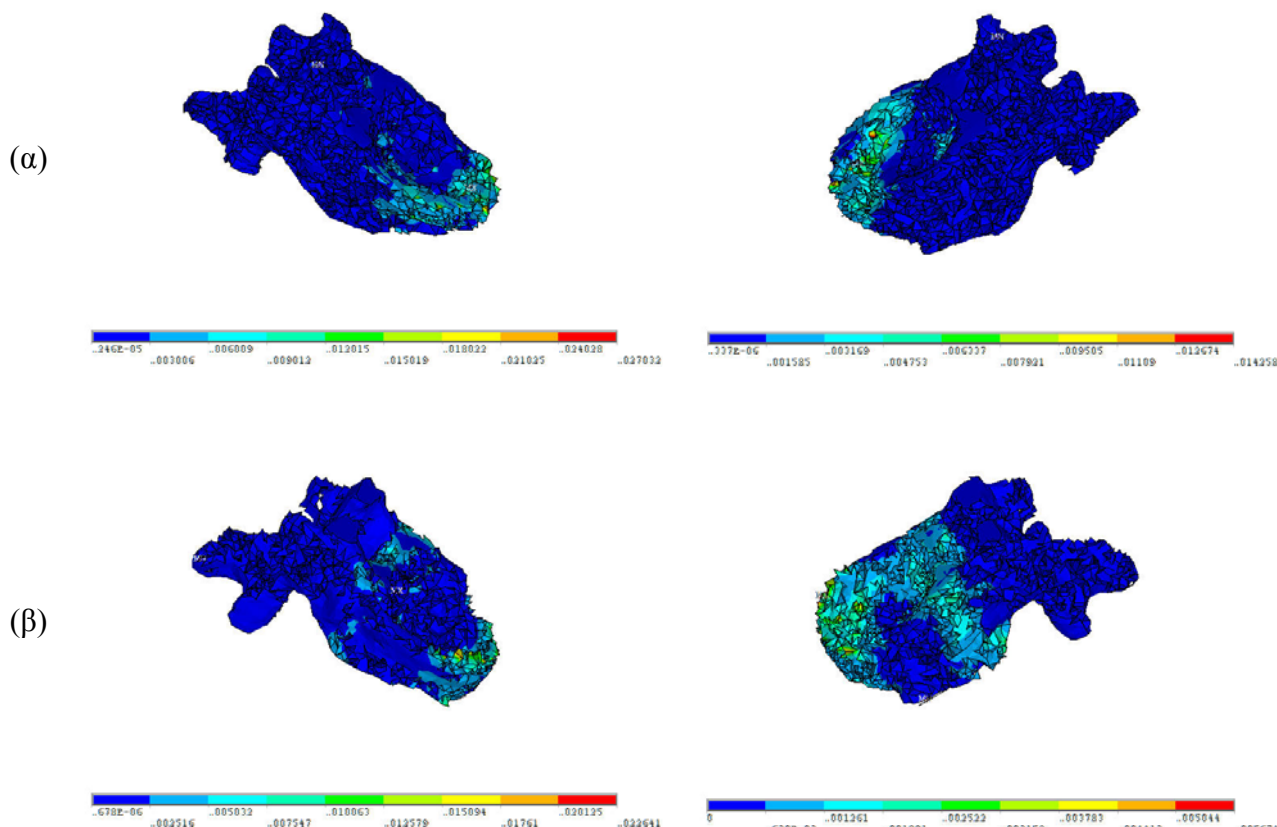
Τόσο στην περίπτωση του πλήρους όσο και στην περίπτωση του απλού μοντέλου η μέγιστη τάση μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση. Στην περίπτωση του πλήρους μοντέλου η μέγιστη τάση μειώνεται κατά 27.39 % ενώ στο απλό μοντέλο κατά 6.2 %.

11.2.3 Σύγκριση ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 11.6 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises και για τις δύο καταστάσεις στο μοντέλο με μεσοσπονδύλιο δίσκο.

Με μεσοσπονδύλιο δίσκο

Χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο



Σχήμα 11.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην (α) πρώτη και (β) δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ. με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους

Παρατηρείται ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις στο πλήρες μοντέλο είναι υψηλότερες.

Στον Πίνακα 11.6 φαίνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 11.6 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12 στην περίπτωση του πλήρους και του απλού μοντέλου

	Κατάσταση 1			Κατάσταση 2		
	Πλήρες μοντέλο	Απλό μοντέλο	Ποσοστιαία μεταβολή	Πλήρες μοντέλο	Απλό μοντέλο	Ποσοστιαία μεταβολή
Χωρίς το υλικό 1 (μstrains)	98366	53260	-45.8%	183542	79270	-56.8%
Χωρίς το υλικό 1 και 2 (μstrains)	77377	19643	-74.6%	40173	16560	-58.7%

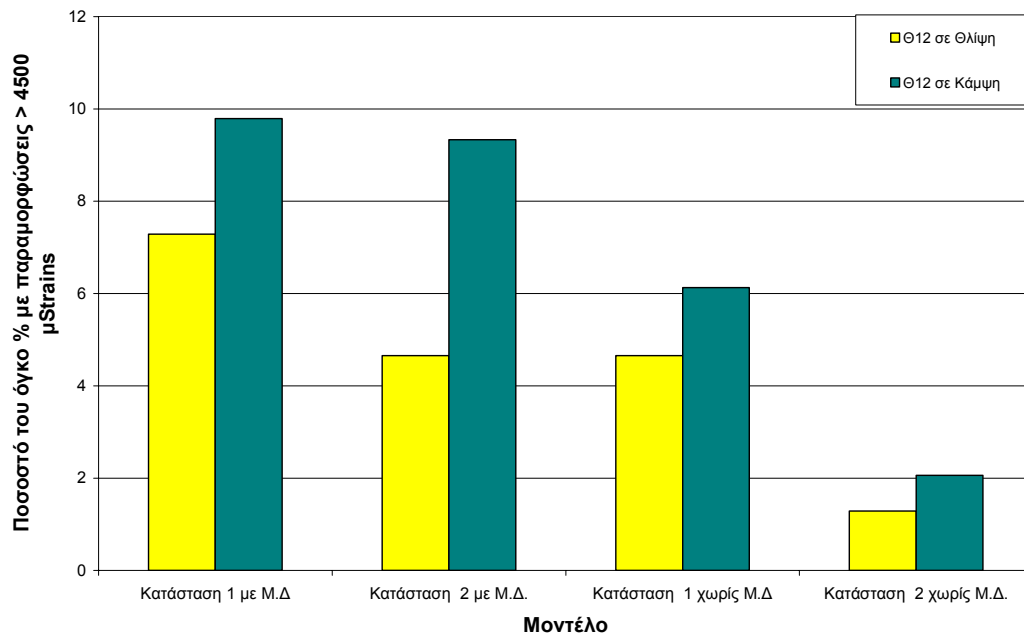
Μετά την αφαίρεση μεμονωμένων στοιχείων (μstrains)	27032	14358	-46.9 %	22641	5674	-74.9%
--	-------	-------	---------	-------	------	--------

Το απλό μοντέλο έχει σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερες τιμές παραμορφώσεων. Επίσης χωρίς το υλικό ένα ανεξαρτήτως μοντελοποίησης η δεύτερη κατάσταση έχει μεγαλύτερες τιμές μέγιστων τάσεων. Η ισορροπία αυτή αντιστρέφεται μετά την αφαίρεση του δεύτερου υλικού.

11.3 Συμπέρασμα

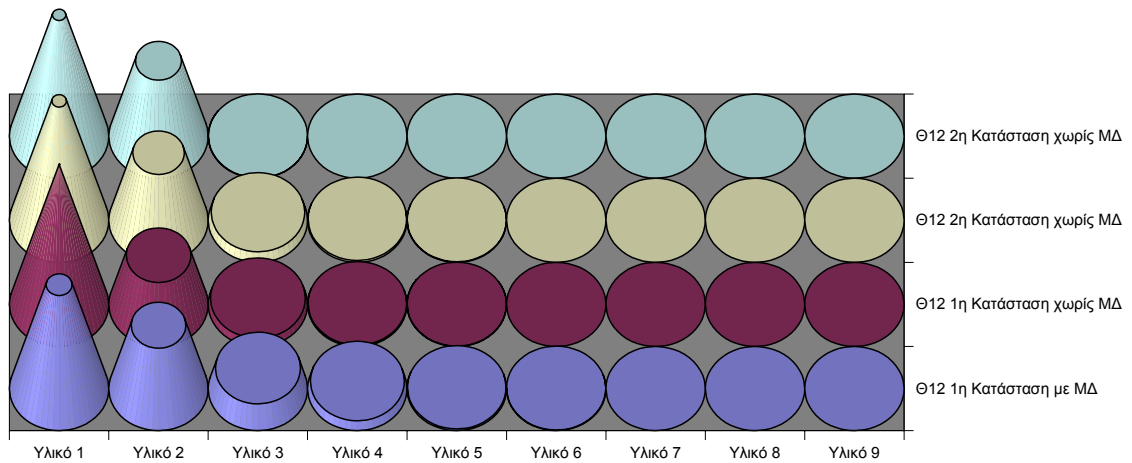
Όσον αφορά την επιβολή θλιπτικού φορτίου, η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z είναι ομαλότερη στην περίπτωση του μοντέλου με ΜΔ. Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης σε αυτό το μοντέλο, εντοπίζεται και στις δύο καταστάσεις στην ακανθώδη απόφυση. Στο μοντέλο χωρίς ΜΔ, στην πρώτη κατάσταση, η μέγιστη τιμή της μετατόπισης εντοπίζεται στην εμπρόσθια δεξιά πλευρά της άνω επιφυσιακής πλάκας, ενώ στη δεύτερη εντοπίζεται στο οπίσθιο τμήμα της άνω επιφυσιακής πλάκας και έχει σημειακό χαρακτήρα. Οι τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων στην περίπτωση του μοντέλου χωρίς ΜΔ είναι μικρότερες, γεγονός που οφείλεται στο ότι στο πλήρες μοντέλο παραλαμβάνουν μετατοπίσεις και οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι. Παρόλα αυτά τόσο με όσο και χωρίς τη μοντελοποίηση του ΜΔ, μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση. Όσον αφορά στις ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises και στα δύο μοντέλα εμφανίζεται παραπλήσια κατανομή και για τις δύο καταστάσεις. Δηλαδή το εμπρόσθιο δεξιά τμήμα του σπονδυλικού σώματος παραλαμβάνει μεγαλύτερες τάσεις. Επίσης ανεξάρτητα από την ύπαρξη του ΜΔ στο μοντέλο παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της τάσης μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση. Στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης στο μοντέλο χωρίς ΜΔ είναι κατά 59.4% μικρότερη από ότι σε αυτό με ΜΔ, ενώ στη δεύτερη κατάσταση η διαφορά είναι 48.27% γεγονός που οφείλεται στον τρόπο επιβολής της φορτίσεως. Τέλος, όσον αφορά στις παραμορφώσεις, στην πρώτη κατάσταση, μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων ΠΣ στο μοντέλο με ΜΔ το εμπρόσθιο τμήμα του σπονδυλικού σώματος παραμορφώνεται εντονότερα ενώ στο μοντέλο χωρίς ΜΔ εντονότερα παραμορφώνεται το εμπρόσθιο δεξιά τμήμα του σπονδυλικού σώματος. Στη δεύτερη κατάσταση στο μοντέλο με ΜΔ, μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων ΠΣ, παραμορφώνεται εντονότερα η περιφέρεια της άνω επιφυσιακής πλάκας ενώ στο μοντέλο χωρίς ΜΔ οι παραμορφώσεις παραλαμβάνονται από ολόκληρο το σπονδυλικό σώμα. Ανεξαρτήτως του μοντέλου οι μέγιστη τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης εμφανίζεται μικρότερη στη δεύτερη κατάσταση.

Όσον αφορά την επιβολή καμπτικού φορτίου, η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z είναι ομαλότερη στην περίπτωση του πλήρους μοντέλου. Στο πλήρες μοντέλο η μέγιστη μετατόπιση εντοπίζεται και στις δύο καταστάσεις στην ακανθώδη απόφυση, ενώ στο απλό μοντέλο πριν την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη μετατόπιση εντοπίζεται στην άνω επιφυσιακή πλάκα και έχει σημειακό χαρακτήρα. Η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται στο πλήρες μοντέλο ενώ στο μοντέλο χωρίς ΜΔ αυτό συμβαίνει μόνο μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού. Οι μέγιστες τιμές των μετατοπίσεων είναι υψηλότερες στο πλήρες μοντέλο γεγονός που οφείλεται στην παραλαβή μετατοπίσεων από τους ΜΔ. Όσον αφορά τις ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises παρατηρείται παραπλήσια κατανομή και στα δύο μοντέλα. Δηλαδή το εμπρόσθιο δεξιά τμήμα του σπονδυλικού σώματος παραλαμβάνει υψηλότερες τάσεις. Στο απλό μοντέλο εντοπίζονται μικρότερες τάσεις γεγονός που οφείλεται στον τρόπο επιβολής της φόρτισης. Τέλος, όσον αφορά τις παραμορφώσεις στο πλήρες μοντέλο και στις δύο καταστάσεις το εμπρόσθιο τμήμα του σπονδυλικού σώματος παραμορφώνεται εντονότερα. Στο απλό μοντέλο στην πρώτη κατάσταση εντονότερα παραμορφώνεται το εμπρόσθιο δεξιά τμήμα του σπονδυλικού σώματος ενώ στη δεύτερη κατάσταση οι παραμορφώσεις παραλαμβάνονται από ολόκληρο το σπονδυλικό σώμα. Να σημειωθεί ότι στο απλό μοντέλο οι μέγιστες τιμές των ισοδύναμων παραμορφώσεων είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες στο πλήρες μοντέλο γεγονός που οφείλεται στην παραλαβή παραμορφώσεων από τους ΜΔ. Τέλος ανεξαρτήτως μοντέλου η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων ΠΣ, μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση.



Σχήμα 11.7 Ποσοστό όγκου με παραμορφώσεις μεγαλύτερες των 4500 μStrains τόσο για την πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση για θλίψη και κάμψη

Στο Σχήμα 11.7 παρουσιάζεται το ποσοστό των στοιχείων που εμφανίζουν παραμόρφωση μεγαλύτερη από 4500 μ strains ενώ στο Σχήμα 11.8 παρουσιάζεται το ποσοστό ανά υλικό με παραμόρφωση άνω των 4500 μ strains για το κάθε μοντέλο και στις δύο καταστάσεις του σπονδύλου $\Theta 12$.



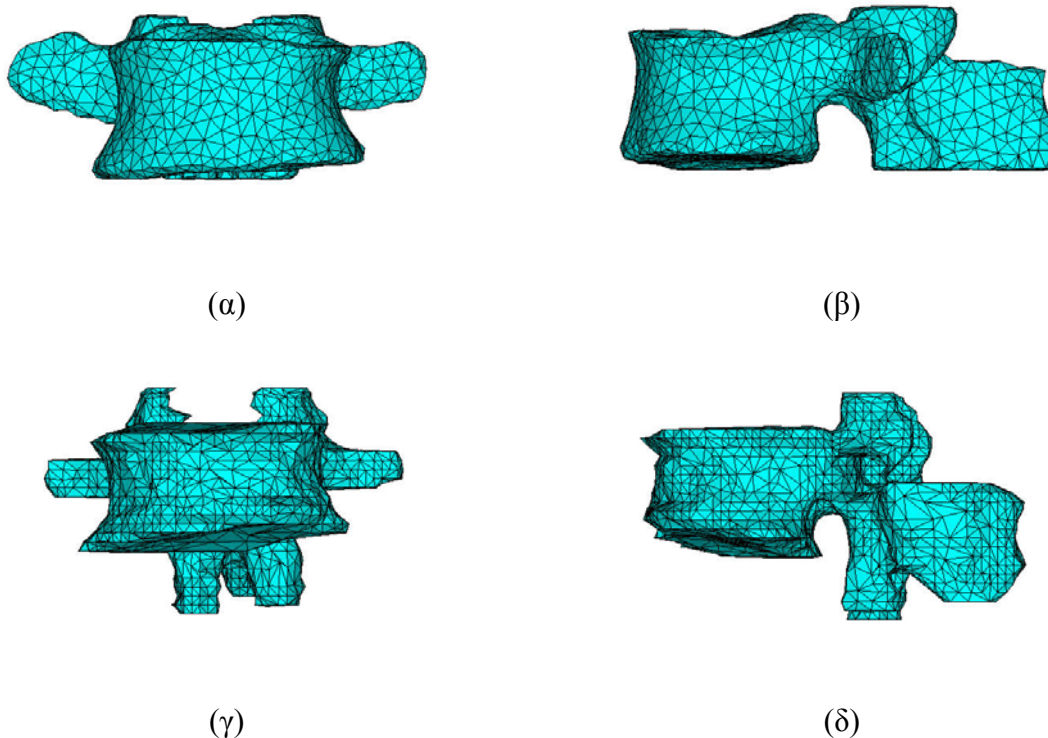
Σχήμα 11.8 Ποσοστό ανά υλικό με παραμόρφωση άνω των 4500 μ strains για το κάθε μοντέλο και τις δύο καταστάσεις του σπονδύλου $\Theta 12$

Η ύπαρξη μεσοσπονδύλιων δίσκων επηρεάζει σαφώς τα αποτελέσματα ως προς τις μέγιστες τιμές που παίρνουν τα υπό εξέταση μηχανικά μεγέθη. Ωστόσο παρατηρώντας τα Σχήματα 11.7 και 11.8 και λαμβάνοντας υπόψη όσα προαναφέρθηκαν, καταλήγει κανείς ότι μπορούν να εξαχθούν ασφαλή ποιοτικά αποτελέσματα για τη μηχανική συμπεριφορά του σπονδύλου $\Theta 12$ αλλά και για την μεταβολή της από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση είτε με είτε χωρίς τη μοντελοποίηση των εκατέρωθεν ΜΔ.

**Κεφάλαιο 12ο Ανάλυση και σύγκριση των δύο
καταστάσεων στο μοντέλο του O1 με μεσοσπονδύλιους
δίσκους της δεύτερης ασθενούς**

12.1 Γεωμετρία του σπονδύλου

Στο Σχήμα 12.1 φαίνεται η γεωμετρία του σπονδύλου στις δύο διαδοχικές καταστάσεις.



Σχήμα 12.1 Η γεωμετρία του σπονδύλου στις δύο διαδοχικές καταστάσεις (α) εμπρόσθια όψη (β) αριστερή όψη του σπονδύλου O1 στην πρώτη κατάσταση και (γ) εμπρόσθια όψη (δ) αριστερή όψη του σπονδύλου O1 στη δεύτερη κατάσταση

Όπως έγινε και στην περίπτωση του σπονδύλου Θ12 έτσι και εδώ θα συγκριθούν τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη στις δύο καταστάσεις:

Πλάτος του σπονδυλικού σώματος: Στην πρώτη κατάσταση το πλάτος του σπονδύλου είναι 52.95 mm ενώ στη δεύτερη 56.01 mm, δηλαδή στη δεύτερη κατάσταση παρουσιάζει αύξηση κατά 5.5%.

Μήκος του σπονδυλικού σώματος: Στη δεύτερη κατάσταση το μήκος του σπονδυλικού σώματος εμφανίζει ελάττωση κατά 1.9% συγκριτικά με την πρώτη κατάσταση. Δηλαδή από 38.5 mm που είναι στην πρώτη κατάσταση στη δεύτερη μειώνεται στα 37.78 mm.

Ύψος του σπονδυλικού σώματος: Στην πρώτη κατάσταση το ύψος του σπονδυλικού σώματος είναι 27.1 mm ενώ στη δεύτερη κατάσταση μειώνεται στα 24.37 mm, δηλαδή στη δεύτερη κατάσταση παρατηρείται μείωση της τάξης του 10.1%.

Κοίλωμα του σπονδυλικού σώματος: Στην πρώτη κατάσταση το κοίλωμα ισούται με 0.59mm ενώ στη δεύτερη με 4.17mm. Στη δεύτερη κατάσταση, λοιπόν, εμφανίζει,

περίπου δεκαπλασιασμό και αυτό οφείλεται στην προεξοχή που εμφανίζει η άνω επιφυσιακή πλάκα

Συνολικό ύψος του σπονδυλικού σώματος: Στο μοντέλο της πρώτης κατάστασης απουσιάζει τμήμα των αρθρικών αποφύσεων. Αφαιρώντας και από το μοντέλο της δεύτερης κατάστασης το ίδιο τμήμα των αρθρικών αποφύσεων προκύπτει ότι το συνολικό ύψος του σπονδύλου παρουσιάζει αύξηση στη δεύτερη κατάσταση κατά 21.7%. Συγκεκριμένα στη δεύτερη κατάσταση το ύψος του σπονδύλου ισούται με 38.7 mm και στην πρώτη ισούται με 31.8 mm.

Συνολικό μήκος του σπονδύλου: Το συνολικό μήκος του σπονδύλου χαρακτηρίζεται από μείωση 6.1%. Συγκεκριμένα στην πρώτη κατάσταση το συνολικό μήκος του σπονδύλου είναι 84.36 mm, ενώ στη δεύτερη 79.21 mm.

Πίνακας 12.1 Γεωμετρικά μεγέθη και οι μεταβολές τους από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση

	A (mm)	B (mm)	C (mm)	E(mm)	H (mm)	L (mm)
Πρώτη Κατάσταση	52.94	38.50	27.10	0.59	31.80	84.36
Δεύτερη Κατάσταση	56.01	37.78	24.37	4.17	38.7	79.21
Ποσοστιαία Μεταβολή	5.8%	-1.9%	-10.1%	606%	21.7%	-6.1%

Στον Πίνακα 12.1 καταγράφονται οι μεταβολές των γεωμετρικών μεγεθών κατά την εξέλιξη της οστεοπόρωσης.

12.2 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε θλίψη

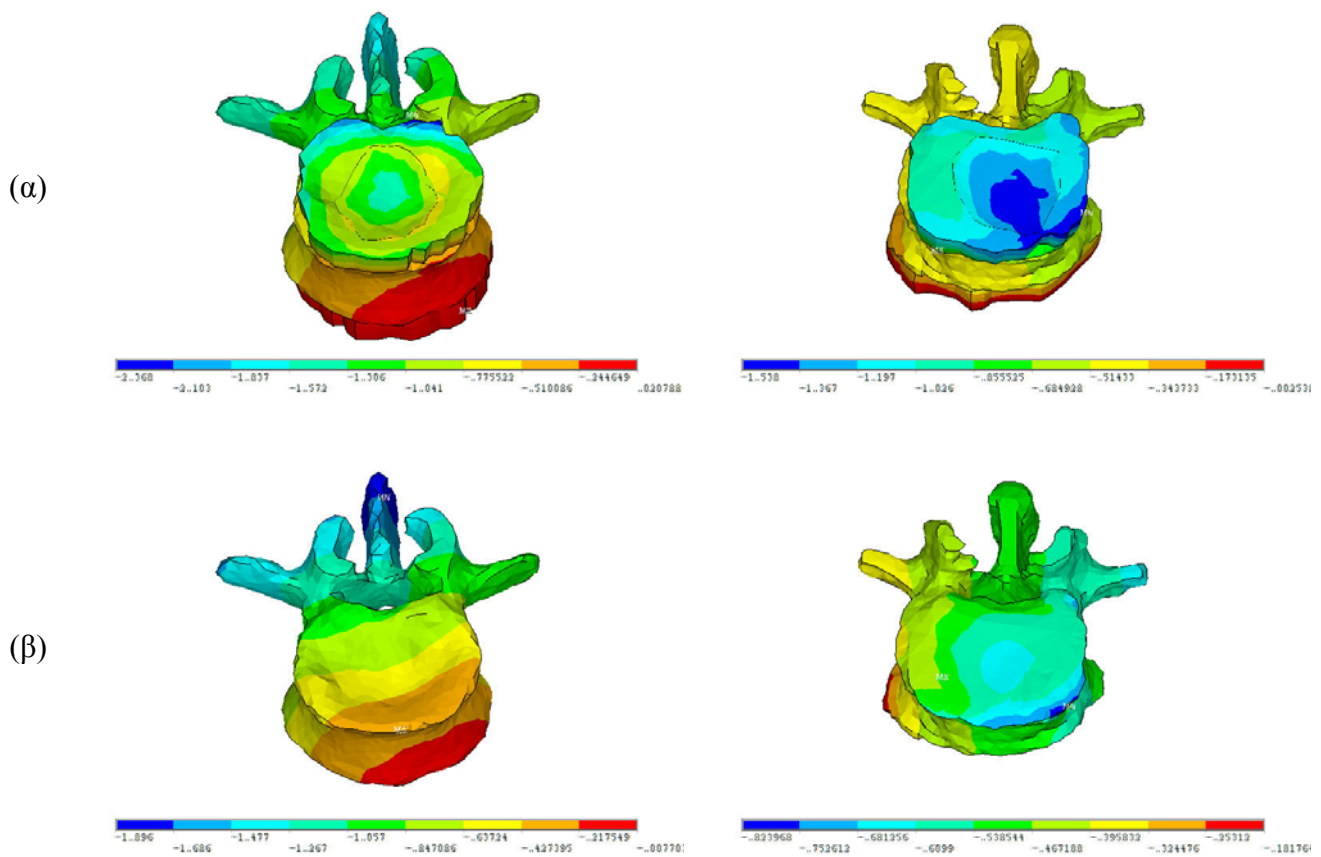
Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z, καθώς και τα αποτελέσματα του τασικού και παραμορφωσιακού πεδίου κατά την επιβολή θλίψης στο μοντέλο του O1 με τους γειτονικούς του μεσοσπονδύλιους δίσκους για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

12.2.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 12.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται η κατανομή της μετατόπισης κατά τον οβελιαίο άξονα τόσο για την πρώτη κατάσταση όσο και για τη δεύτερη.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 12.2 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Θ12 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Θ12 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Στην πρώτη κατάσταση η θέση εμφάνισης της μέγιστης απόλυτης τιμής της μετατόπισης βρίσκεται στο πίσω μέρος του μεσοσπονδύλιου δίσκου. Στη δεύτερη κατάσταση βρίσκεται και πάλι στο μεσοσπονδύλιο δίσκο αλλά στο εμπρόσθιο και κεντρικό τμήμα του.

Αφαιρώντας γραφικά τους μεσοσπονδύλιους δίσκους παρατηρείται μείωση των τιμών των μετατοπίσεων και στις δύο καταστάσεις. Στην πρώτη κατάσταση η τιμή της μέγιστης μετατόπισης εντοπίζεται στη ακανθώδη απόφυση ενώ στη δεύτερη στην άνω επιφυσιακή πλάκα στο εμπρόσθιο τμήμα της. Όσον αφορά τις αποφύσεις εμφανίζονται μικρότερες μετατοπίσεις στη δεύτερη κατάσταση σε σχέση με την πρώτη.

Στον Πίνακα 12.2 καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης στον οβελιαίο άξονα και στις δύο καταστάσεις και η μεταβολή της από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση

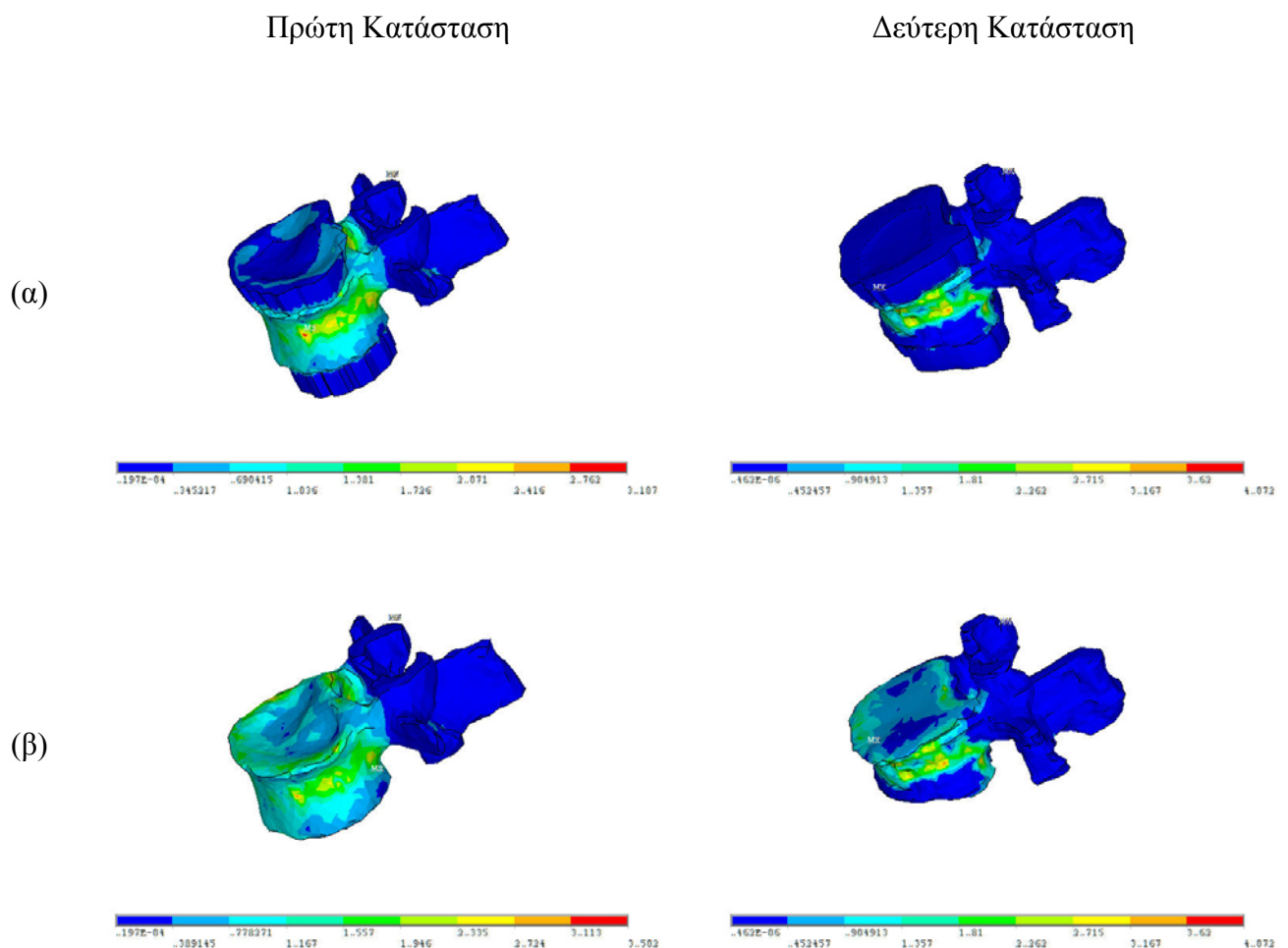
Πίνακας 12.2 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Θ12

	Zmin	Zmax
Πρώτη κατάσταση	0.08	1.90
Δεύτερη Κατάσταση	0.18	0.82
Ποσοστιαία Μεταβολή	125 %	-56,54 %

Στο σπόνδυλο O1, η μέγιστη τιμή της μετατόπισης στη δεύτερη κατάσταση μειώνεται κατά 56.54 %.

12.2.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 12.3 παρουσιάζονται η κατανομές ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον O1 τόσο για την πρώτη όσο και για την δεύτερη κατάσταση.



Σχήμα 12.3 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου O1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη

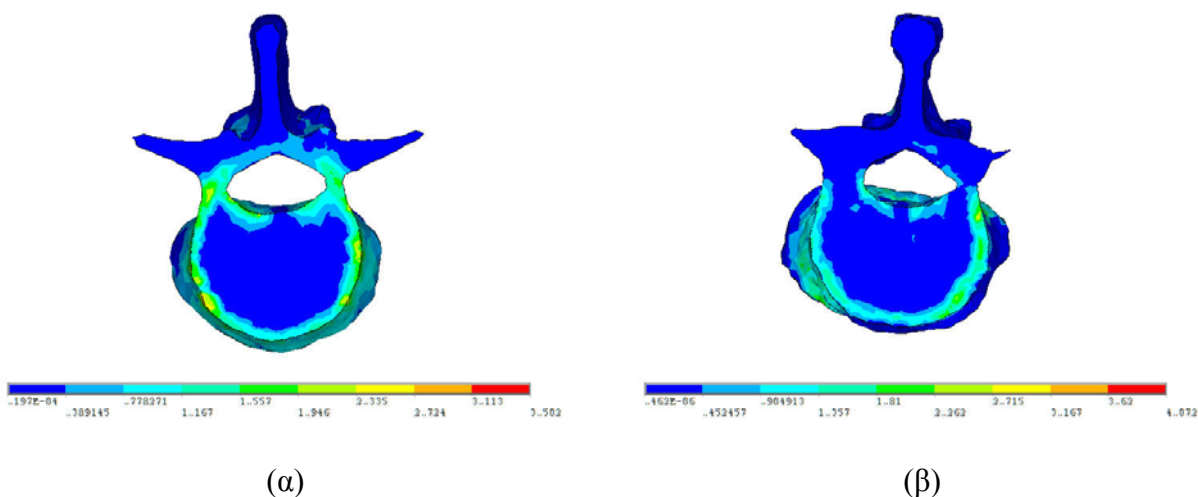
γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Στο μοντέλο του σπόνδυλου O1 στη δεύτερη κατάσταση εμφανίζεται υψηλότερη μέγιστη τάση. Στον Πίνακα 12.3 φαίνονται οι μέγιστες τιμές των ισοδύναμων τάσεων και στις δύο καταστάσεις. Η υψηλή τιμή τη μέγιστης τάσης στη δεύτερη κατάσταση οφείλεται στη γεωμετρία του σπονδύλου. Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση οι τάσεις εμφανίζονται κυρίως στο σπονδυλικό σώμα. Στην πρώτη κατάσταση παρατηρείται ομαλότερη κατανομή των τάσεων κάτι που οφείλεται στην αλλαγή της γεωμετρίας του σπονδύλου στη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 12.3 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων στο Θ12

	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή
Πρώτη κατάσταση	3.502	16.3 %
Δεύτερη Κατάσταση	4.072	

Στο Σχήμα 12.4 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε μια τομή του σπονδύλου O1 κατά τον άξονα z.

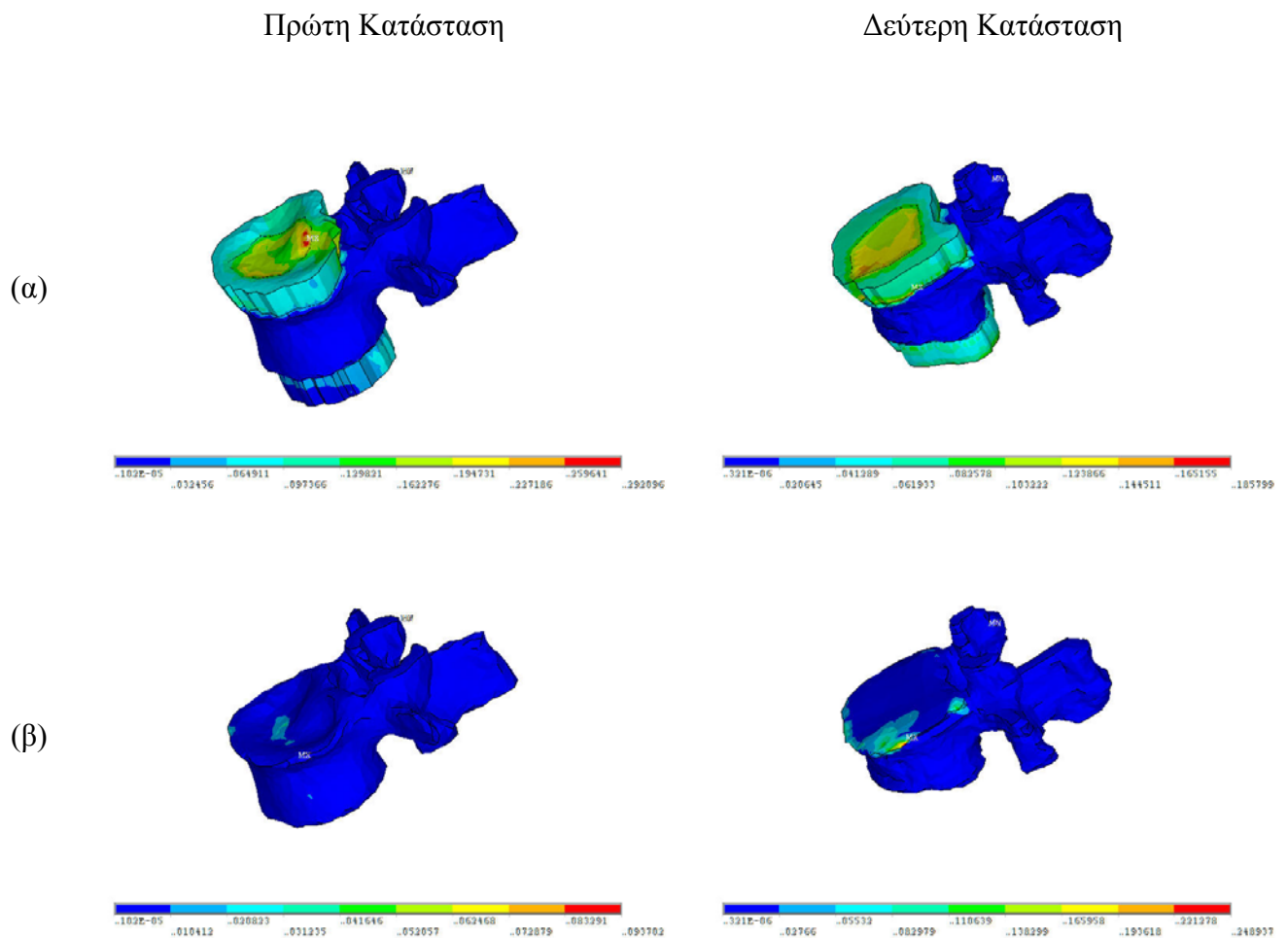


Σχήμα 12.4 Τομή του σπονδύλου κατά τον άξονα Z του O1 (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση

Η κατανομή των τάσεων είναι παρεμφερής στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση. Χαρακτηριστικό και των δύο καταστάσεων είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων καταλαμβάνεται από την περιφέρεια του σπονδυλικού σώματος.

12.2.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 12.5 που ακολουθεί φαίνονται οι ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises.



Σχήμα 12.5 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου O1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Είναι εμφανές στο Σχήμα 12.5 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου O1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση(α), ότι μεγαλύτερες παραμορφώσεις υφίστανται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι. Συγκεκριμένα στη πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στην επιφάνεια διαχωρισμού του ινώδους δακτυλίου με τον πηκτοειδή πυρήνα στο οπίσθιο μέρος, ενώ στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στην επιφάνεια που ενώνεται ο πηκτοειδής πυρήνας με τον ινώδη δακτύλιο στο εμπρόσθιο μέρος. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης είναι χαμηλότερη από αυτή της πρώτης.

Στο Σχήμα 12.5(β) παρατηρείται ότι οι τιμές των παραμορφώσεων είναι πολύ υψηλές και αυτό συμβαίνει γιατί στο σπόνδυλο συμπεριλαμβάνεται το πρώτο υλικό που όπως προαναφέρθηκε έχει πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας. Η μέγιστη παραμόρφωση στο σπονδυλικό σώμα στη πρώτη κατάσταση εμφανίζεται περί το κέντρο του σπονδυλικού σώματος ενώ στη δεύτερη κατάσταση εμφανίζεται στη μπροστά αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Η μέγιστη παραμόρφωση στο σπόνδυλο είναι υψηλότερη στη δεύτερη κατάσταση συγκριτικά με την πρώτη.

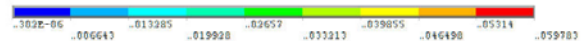
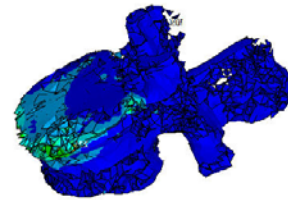
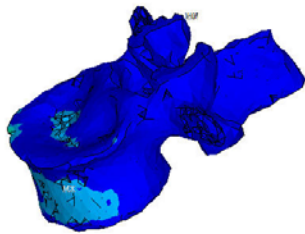
Στο Σχήμα 12.6 παρουσιάζεται η ίδια κατανομή μετά την αφαίρεση των πρώτων υλικών.

Αφαίρεση υλικού

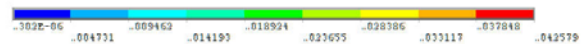
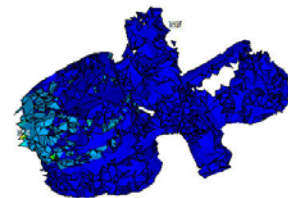
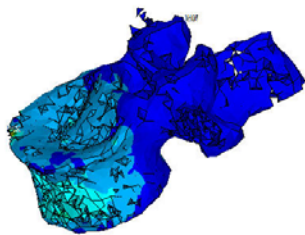
Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση

1



1 & 2

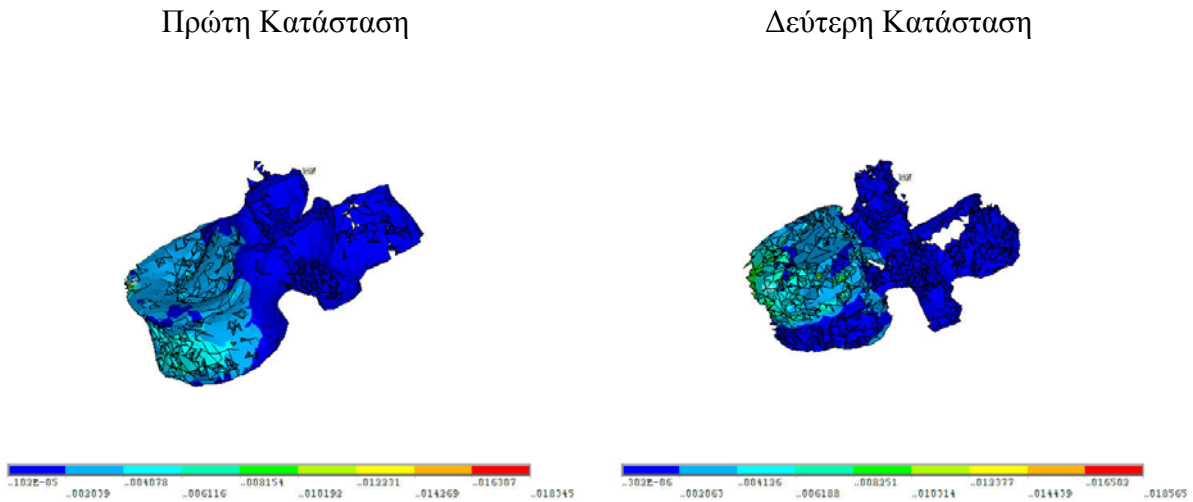


Σχήμα 12.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού, παρατηρείται μείωση της μέγιστης τιμής της ισοδύναμης παραμόρφωσης τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση.

Μετά την αφαίρεση και του υλικού 2 παρατηρείται περαιτέρω μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης του σπονδύλου και στις δύο καταστάσεις.

Οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών φαίνεται ότι οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων εμφανίζεται σε μεμονωμένα Π.Σ. Μετά την αφαίρεση αυτών των Π.Σ. η κατανομή αλλάζει και φαίνεται στο Σχήμα 12.7 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.



Σχήμα 12.7 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Στον Πίνακα 12.4 παρατίθενται οι μέγιστες παραμορφώσεις για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 12.4 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Ο1

	Μέγιστη παραμόρφωση (μStrains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Πλήρες μοντέλο	292076	185799
Σπόνδυλος Ο1 μετά την αφαίρεση των Μ.Δ.	93702	248937
Σπόνδυλος Ο1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	43075	59783
Σπόνδυλος Ο1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	18345	42579
Σπόνδυλος Ο1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	18345	18565

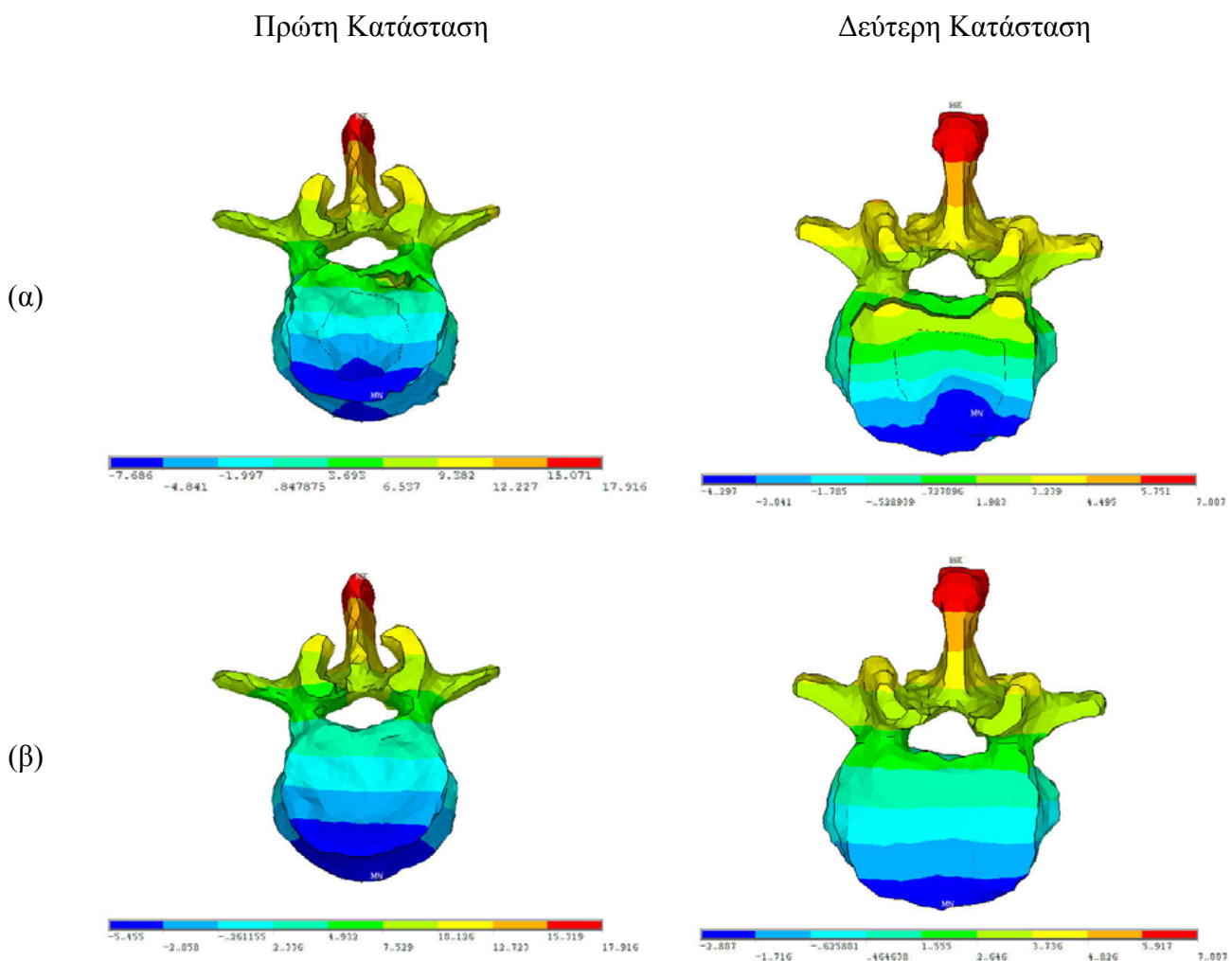
Μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών η μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων μειώνεται κατά 80.4% στην πρώτη κατάσταση και κατά 82.9 % στη δεύτερη κατάσταση.

12.3 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε καμπτική φόρτιση

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z, καθώς και τα αποτελέσματα των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων, κατά την επιβολή κάμψης στο μοντέλο του Ο1 μαζί με τους γειτονικούς του μεσοσπονδύλιους δίσκους, για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

12.3.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 12.8 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης σε φορτίσεις κάμψης, όσον αφορά την μετατόπιση κατά τον οβελιαίο άξονα τόσο για την πρώτη κατάσταση όσο και για τη δεύτερη.



Σχήμα 12.8 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου Ο1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Ο1 μετά τη

γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση οι μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στην ακανθώδη απόφυση, ενώ σημαντικές είναι και οι μετατοπίσεις που εμφανίζονται στις άνω αρθρικές και στις εγκάρσιες αποφύσεις αλλά και το εμπρόσθιο τμήμα του σπονδυλικού σώματος και είναι της τάξης των 5.5-17 mm στην πρώτη κατάσταση και των 2.7-7 mm στη δεύτερη κατάσταση. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση μειώνεται αισθητά.

Αντίστοιχα στον Πίνακα 12.5 φαίνονται οι απόλυτες αριθμητικές τιμές των μέγιστων και ελάχιστων μετατοπίσεων που εμφανίζονται στο μοντέλο του O1 κατά την επιβολή της κάμψης.

Πίνακας 12.5 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1

	Zmin (mm)	Zmax (mm)
Πρώτη κατάσταση	0.261	17.916
Δεύτερη Κατάσταση	0.465	7.007
Ποσοστιαία Μεταβολή	43.79 %	60.89 %

Συγκεκριμένα η μέγιστη μετατόπιση από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση μειώνεται κατά 60.89 %. Η κατανομή των μετατοπίσεων δεν παρουσιάζει σημαντικές αλλαγές, δηλαδή οι μέγιστες και οι ελάχιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές στην κάθε κατάσταση.

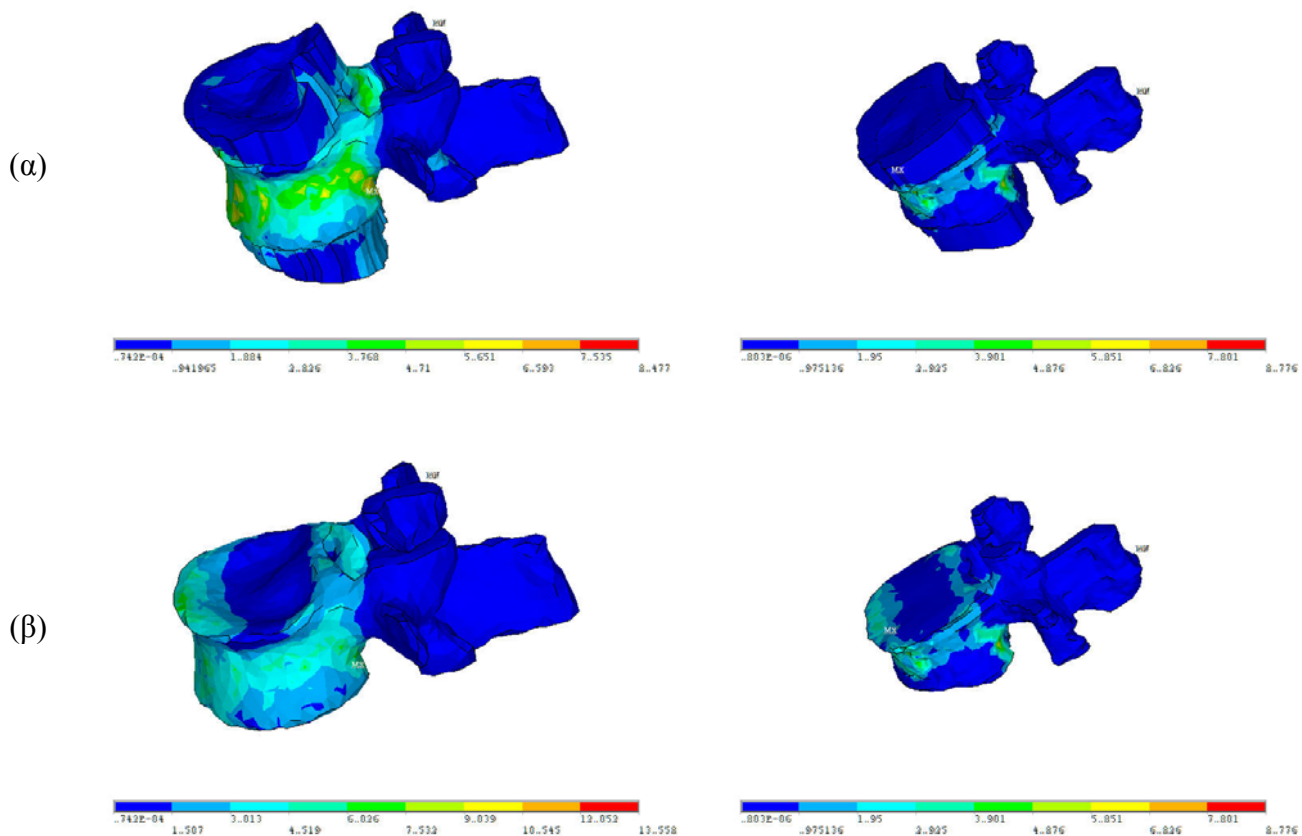
Η εμφάνιση υψηλών μετατοπίσεων στις αποφύσεις οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο είναι καμπτικό και στο μοντέλο δεν έχουν μοντελοποιηθεί οι σύνδεσμοι και γενικότερα οι επιδράσεις των γειτονικών σπονδύλων.

12.3.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises

Στο Σχήμα 12.9 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κατανομές των τάσεων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 12.9 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Ο1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Ο1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Στον Πίνακα 12.6 εμφανίζονται οι αριθμητικές τιμές της μέγιστης ισοδύναμη τάσης κατά Von Mises καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή της από την πρώτη στο δεύτερη κατάσταση.

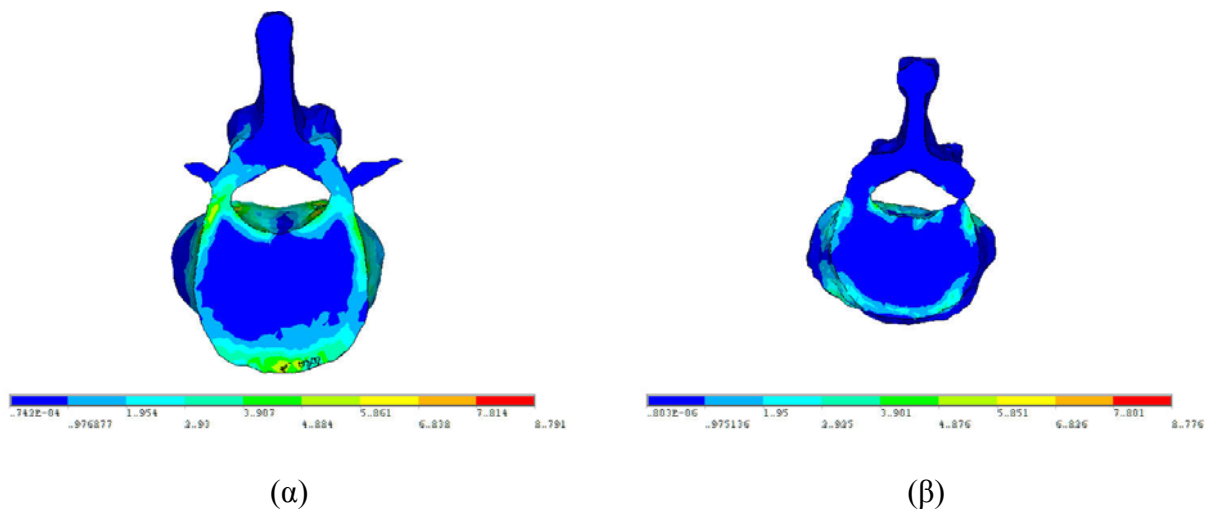
Πίνακας 12.6 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων στο Θ12

	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή
Πρώτη κατάσταση	13.558	-35.27 %
Δεύτερη Κατάσταση	8.776	

Η μέγιστη τάση στο πλήρες μοντέλο είναι ελάχιστα μικρότερη στην πρώτη κατάσταση. Συγκεκριμένα η μέγιστη τάση στην πρώτη κατάσταση στο πλήρες μοντέλο ισούται με 8.477 MPa ενώ στη δεύτερη κατάσταση ισούται με 8.776 MPa. Στο σπόνδυλο Ο1 η μέγιστη τάση στην πρώτη κατάσταση εμφανίζεται στην κάτω επιφυσιακή πλάκα ενώ στη

δεύτερη κατάσταση μέγιστη τάση εμφανίζεται στην ίδια θέση που εμφανίζεται και στην περίπτωση εφαρμογής θλιπτικού φορτίου, δηλαδή στο μπροστινό μέρος του σπονδυλικού σώματος.

Μετά τη γραφική αφαίρεση των μεσοσπονδύλιων δίσκων η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης αυξάνει στην πρώτη κατάσταση ενώ στη δεύτερη παραμένει αμετάβλητα. Παρακάτω στο Σχήμα 12.10 παρατίθενται τα αποτελέσματα μιας τομής κατά τον άξονα Z.



Σχήμα 12.10 Τομή του σπονδύλου κατά τον z-άξονα Ο1 (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση

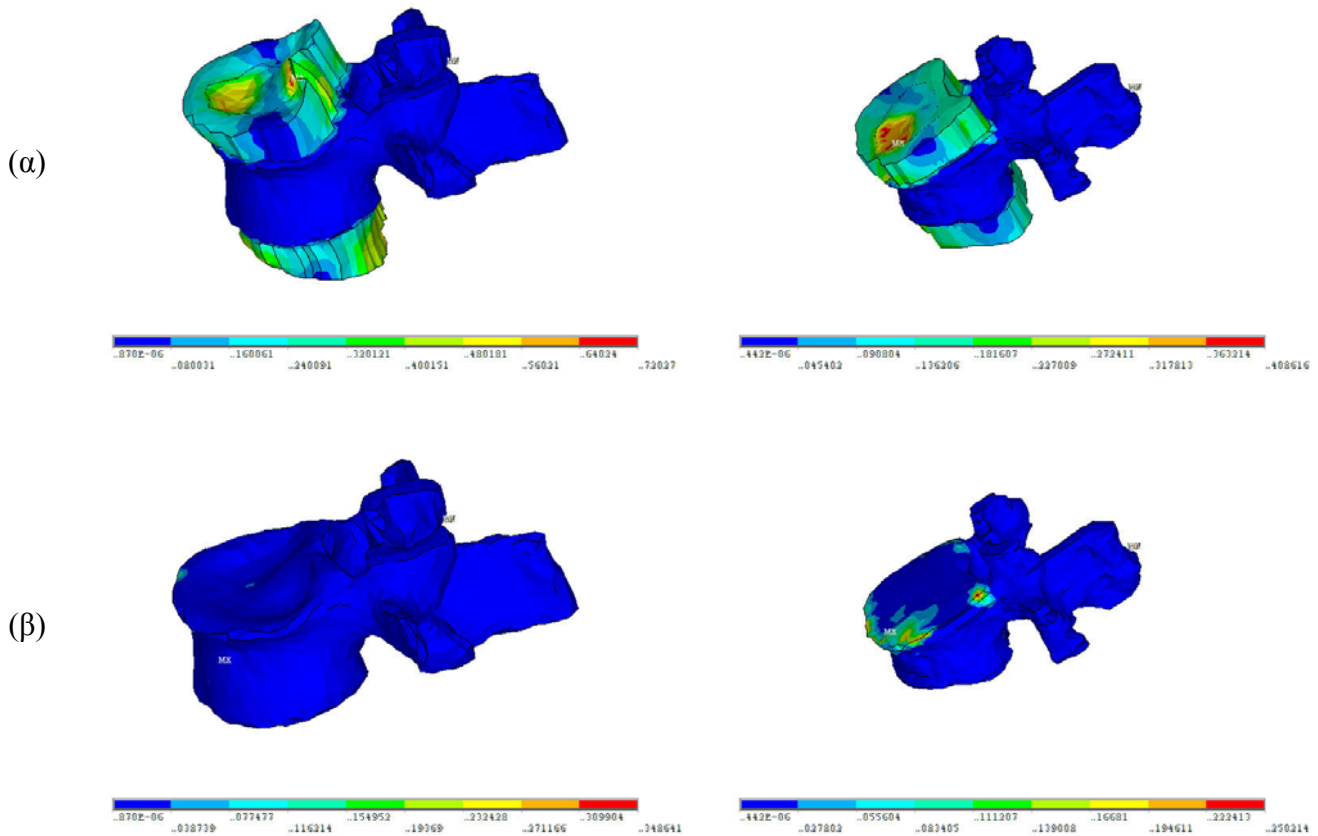
Η κατανομή στις δύο τομές παρουσιάζει διαφορές χωρίς ωστόσο αυτές να είναι σημαντικές. Στην πρώτη κατάσταση παρατηρείται ομαλότερη κατανομή στην περιοχή του φλοιώδους οστού και το εμπρόσθιο τμήμα του σπονδυλικού σώματος παραλαμβάνει περισσότερες φορτίσεις. Το εσωτερικό του σπονδυλικού σώματος δεν παραλαμβάνει τάσεις σε καμία από τις δύο καταστάσεις.

12.3.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 12.11 παρουσιάζονται οι κατανομές των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises. Είναι εμφανές ότι μεγαλύτερες παραμορφώσεις υφίστανται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι. Συγκεκριμένα στη πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στην επιφάνεια διαχωρισμού του ινώδους δακτυλίου με τον πηκτοειδή πυρήνα, ενώ στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στην εμπρόσθια επιφάνεια του άνω πηκτοειδούς πυρήνα. Παρόλα αυτά στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τιμή είναι χαμηλότερη από αυτή της πρώτης.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 12.11 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) του σπονδύλου Ο1 και των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου Ο1 μετά τη γραφική απομάκρυνση των γειτονικών του μεσοσπονδύλιων δίσκων στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

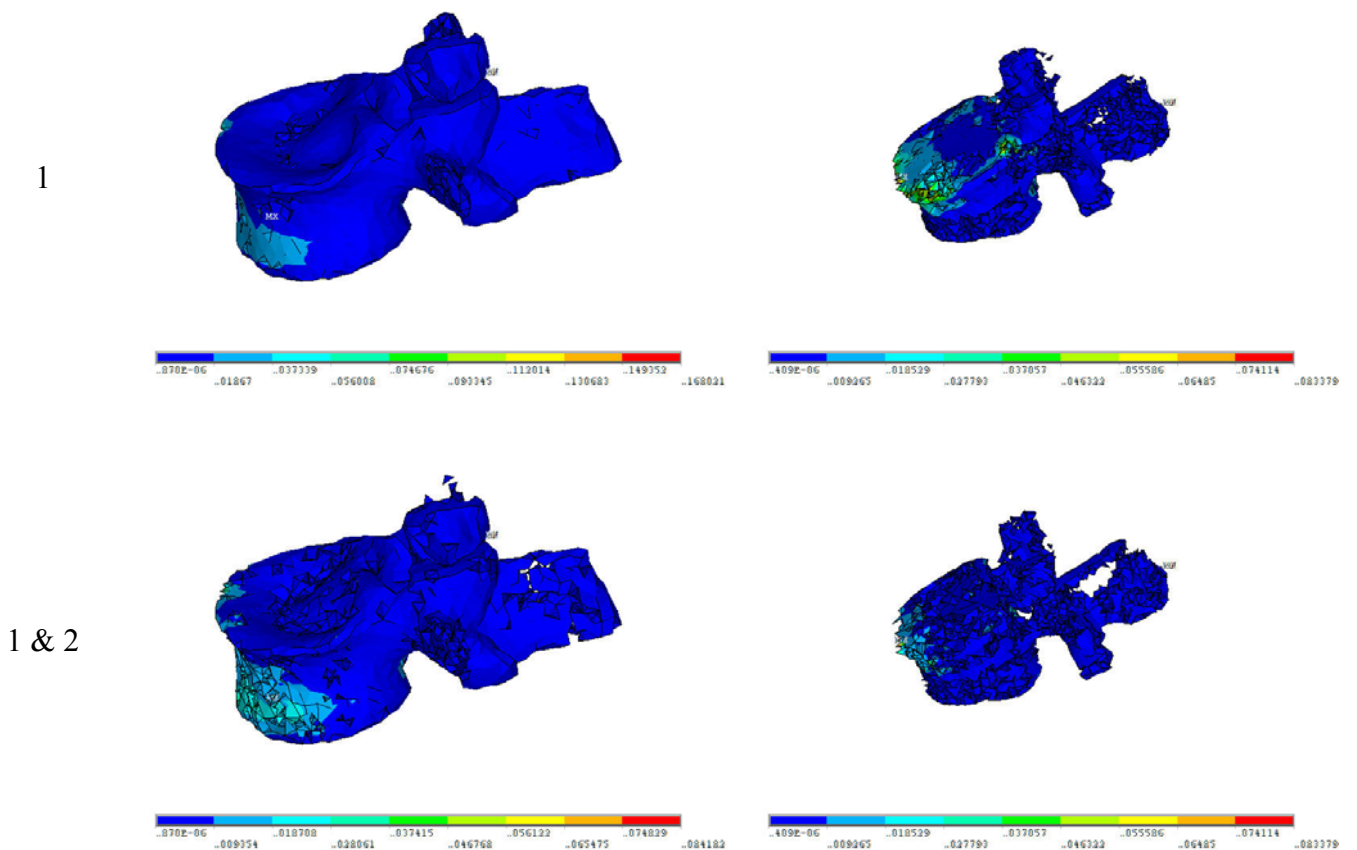
Αφαιρώντας γραφικά τους μεσοσπονδύλιους δίσκους φαίνεται ότι στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση μετατοπίζεται στο εσωτερικό του σπονδύλου, ενώ στη δεύτερη κατάσταση στην άνω επιφυσιακή πλάκα. Στο παρουσιάζεται η κατανομή των ισοδύναμων παραμορφώσεων μετά την αφαίρεση των πρώτων υλικών.

Στο Σχήμα 12.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Ο1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στους εν λόγω σπονδύλους.

Αφαίρεση
υλικού

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



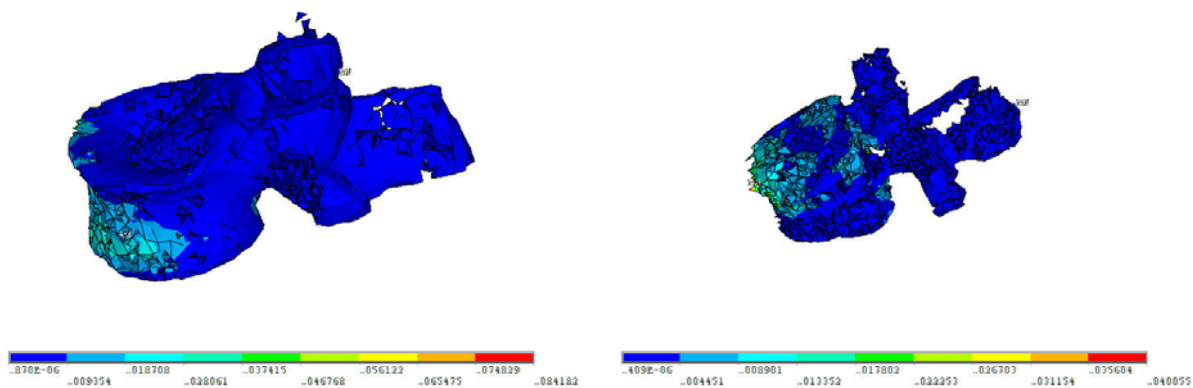
Σχήμα 12.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού παρατηρείται μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση. Οι υψηλές τιμές των παραμορφώσεων συνεχίζουν να εμφανίζονται στην πρώτη κατάσταση στο εσωτερικό του σπονδυλικού σώματος και στη δεύτερη στην άνω επιφυσιακή πλάκα.

Μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού παρατηρείται περαιτέρω μείωση της παραμόρφωσης στην πρώτη κατάσταση. Στη δεύτερη κατάσταση μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού η κατανομή δεν βελτιώνεται σημαντικά. Μελετώντας προσεκτικά το μοντέλο παρατηρεί κανείς ότι η μέγιστη παραμόρφωση εντοπίζεται σε μεμονωμένα στοιχεία, τα οποία μόλις αφαιρεθούν η κατανομή βελτιώνεται αισθητά (Σχήμα 12.13).

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 12.13 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο Θ12 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Στον Πίνακα 12.7 παρατίθενται οι μέγιστες παραμορφώσεις για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 12.7 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Ο1

	Μέγιστη παραμόρφωση (μStrains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Πλήρες μοντέλο	720270	408616
Σπόνδυλος Ο1 μετά την αφαίρεση των Μ.Δ.	348641	250214
Σπόνδυλος Ο1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	168021	83379
Σπόνδυλος Ο1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	84182	83379
Σπόνδυλος Ο1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	84182	40055

Συγκεκριμένα μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού στην πρώτη κατάσταση παρατηρείται μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης κατά 51.8% ενώ στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται κατά 66.7%.

12.4 Συμπέρασμα

Αρχικά να σημειωθεί ότι το ύψος του σπονδυλικού σώματος μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση κατά περίπου 10%, δηλαδή η γεωμετρία του σπονδυλικού σώματος χειροτερεύει.

Στην περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης παρατηρείται ότι η μέγιστη μετατόπιση κατά τον άξονα z στην πρώτη κατάσταση εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση ενώ στη δεύτερη κατάσταση στο εμπρόσθιο αριστερό τμήμα της άνω επιφυσιακής πλάκας. Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης μειώνεται κατά 57%. Όσον αφορά την κατανομή των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises η κατανομή της μεταβάλλεται από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση. Συγκεκριμένα, στην πρώτη κατάσταση αυξημένες τιμές τάσεων εμφανίζονται σε ολόκληρο το σπονδυλικό σώμα, ενώ στη δεύτερη κατάσταση παραλαμβάνει τάσεις το πάνω κομμάτι του σπονδυλικού σώματος, γεγονός που οφείλεται στην κατανομή των υλικών του σπονδύλου στη δεύτερη κατάσταση. Η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης στη δεύτερη κατάσταση μειώνεται κατά 16%. Τέλος, όσον αφορά τις παραμορφώσεις και στις δύο καταστάσεις εντοπίζονται εντονότερες παραμορφώσεις στο εμπρόσθιο τμήμα του σπονδυλικού σώματος. Στη δεύτερη κατάσταση δεν εντοπίζονται παραμορφώσεις στην κάτω πλευρά του σπονδυλικού σώματος γεγονός που οφείλεται στην κατανομή των υλικών στο σπόνδυλο στη δεύτερη κατάσταση ενώ η μέγιστη τιμή τους αυξάνεται.

Όσον αφορά στην καμπτική φόρτιση παρατηρείται ότι η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z είναι παραπλήσια αλλά η μέγιστη τιμή στη δεύτερη κατάσταση είναι μικρότερη κατά περίπου 61%. Όσον αφορά την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises η κατανομή της μεταβάλλεται από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση αλλά και στις δύο καταστάσεις εμφανίζονται υψηλότερες τάσεις στο εμπρόσθιο και το πίσω τμήμα του σπονδυλικού σώματος καθώς ασκείται καμπτική φόρτιση, ωστόσο στη δεύτερη κατάσταση δεν εντοπίζονται τάσεις στο κάτω αριστερό τμήμα του σπονδυλικού σώματος. Η μέγιστη τιμή αυτού του μεγέθους παρουσιάζει μείωση στη δεύτερη κατάσταση κατά 35.27%. τέλος όσον αφορά στις παραμορφώσεις στην πρώτη κατάσταση εντοπίζονται εντονότερες παραμορφώσεις στο εμπρόσθιο κάτω τμήμα του σπονδυλικού σώματος. Στη δεύτερη κατάσταση παρατηρούνται εντονότερες παραμορφώσεις στο εμπρόσθιο τμήμα της άνω επιφυσιακής πλάκας. Μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών η μέγιστη τιμή παραμένει σχεδόν η ίδια.

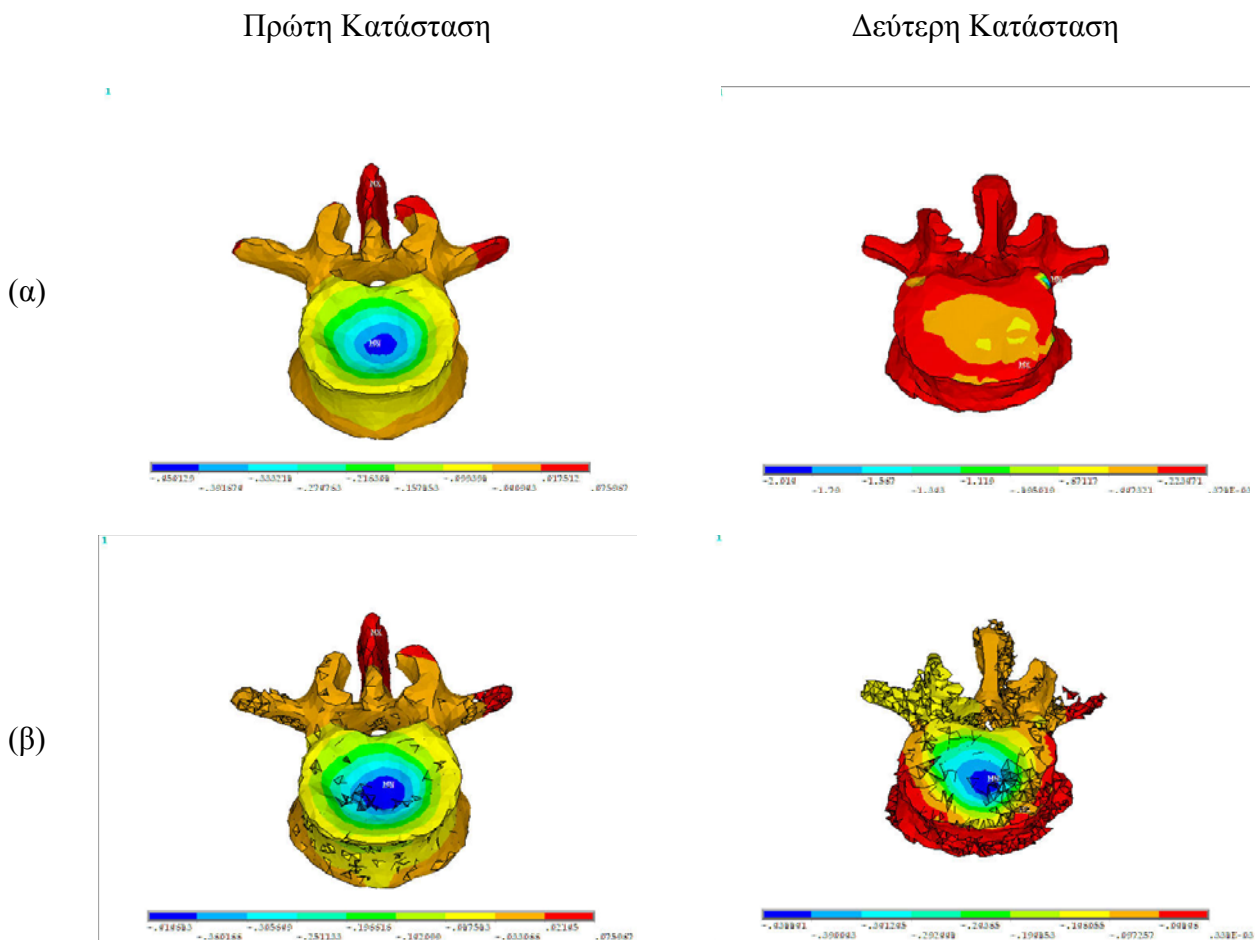
Κεφάλαιο 13ο Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων στο σπόνδυλο O1 του μοντέλου χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους της δεύτερης ασθενούς

13.1 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε θλίψη

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z, των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων, κατά την επιβολή θλιπτικού φορτίου στο σπόνδυλο O1 της δεύτερης ασθενούς, στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου.

13.1.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z

Στο Σχήμα 11.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη μετατόπιση κατά τον οβελιαίο άξονα με και χωρίς το πρώτο υλικό.



Σχήμα 13.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση του υλικού 1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση εντοπίζεται στο μέσο του σπονδυλικού σώματος ενώ στη δεύτερη εντοπίζεται τοπικά στην οπίσθια δεξιά πλευρά του σπονδυλικού σώματος.

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού, το οποίο αντιστοιχεί στο κενό, η κατανομή των μετατοπίσεων στη δεύτερη κατάσταση μοιάζει με την κατανομή των μετατοπίσεων στη δεύτερη κατάσταση. Επίσης, παρατηρείται ότι στη δεύτερη κατάσταση η δεξιά απόφυση του σπονδύλου μετατοπίζεται περισσότερο από την αριστερή.

Στον Πίνακα 13.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Ο1 Πίνακας 13.1 καταγράφονται η μέγιστη και η ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης κατά τον οβελιαίο άξονα και στις δύο καταστάσεις και η μεταβολή της από την πρώτη στη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 13.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου Ο1

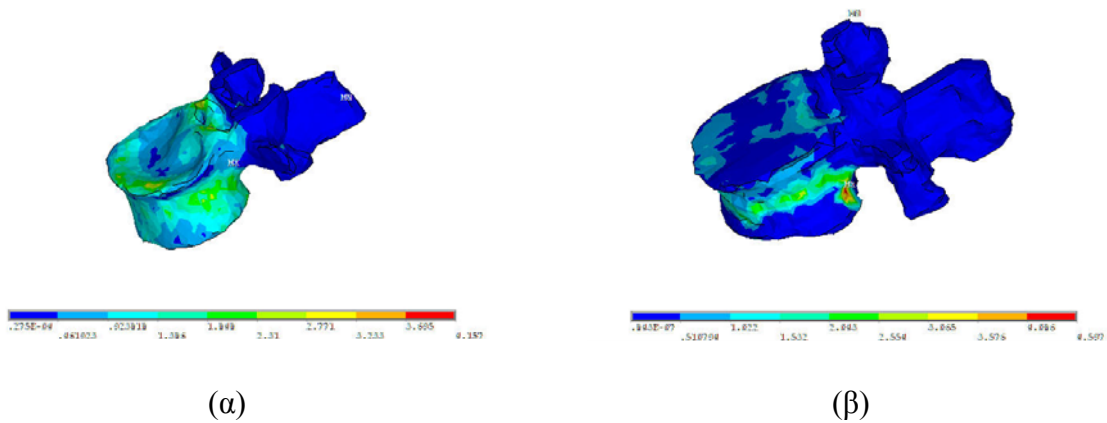
	Πρώτη Κατάσταση		Δεύτερη Κατάσταση		Ποσοστιαία Μεταβολή Zmax
	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Zmin (mm)	Zmax (mm)	
Με το υλικό 1	0.45	0.02	5.98	0.14	600 %
Χωρίς το υλικό 1	0.41	0.02	0.70	0.05	150 %
Ποσοστιαία μεταβολή με την αφαίρεση του υλικού 1	-8.8 %	0 %	-88.2 %	-64.3 %	

Στο μοντέλο όταν περιλαμβάνεται το πρώτο υλικό, η μέγιστη μετατόπιση στη δεύτερη κατάσταση αυξάνεται κατά 600 % σε σχέση με την πρώτη, ωστόσο μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη μετατόπιση αυξάνεται κατά 150 %.

13.1.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων

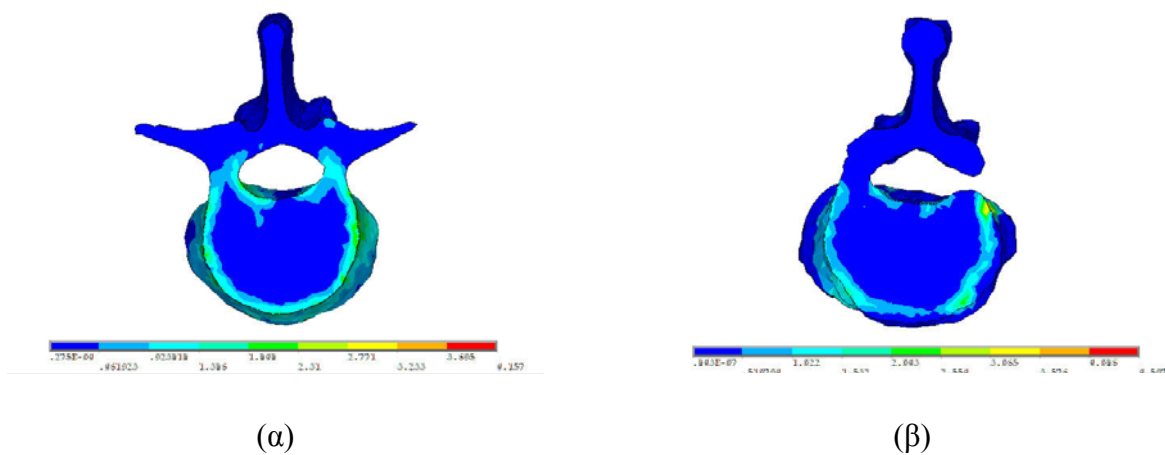
Στο Σχήμα 11.2 παρουσιάζεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises τόσο στην πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση.

Αρχικά, παρατηρείται ότι στην πρώτη κατάσταση υπάρχει ομαλότερη κατανομή των τάσεων στο σπονδυλικό σώμα συγκριτικά με την δεύτερη. Η θέση που εμφανίζεται η μέγιστη τάση είναι στην κάτω επιφυσιακή πλάκα. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τάση εμφανίζεται στην αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος.



Σχήμα 13.2 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση

Πέρα από την κατανομή των τάσεων στο πλήρες μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω και η κατανομή των τάσεων σε μια τομή κατά τον άξονα Z. Στο Σχήμα 13.3 παρουσιάζεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων σε μια τομή του σπονδύλου O1 κατά τον άξονα Z στις δύο διαδοχικές καταστάσεις.



Σχήμα 13.3 Τομή του σπονδύλου O1 κατά τον άξονα Z (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση

Η κατανομή των τάσεων είναι παρεμφερής στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση. Χαρακτηριστικό και των δύο καταστάσεων είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων παραλαμβάνεται από την περιφέρεια του σπονδυλικού σώματος.

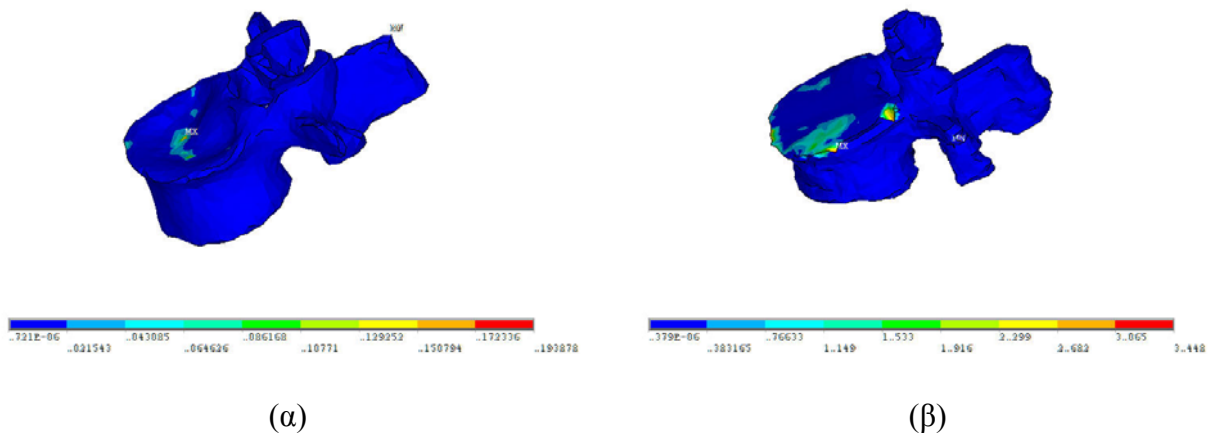
Στον Πίνακα 13.2 φαίνεται η μέγιστη τάση για την κάθε κατάσταση καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή αυτής.

Πίνακας 13.2 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων

	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή
Πρώτη κατάσταση	5.216	-6.2%
Δεύτερη Κατάσταση	4.892	

13.1.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 13.4 που ακολουθεί φαίνονται οι ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises.



Σχήμα 13.4 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση

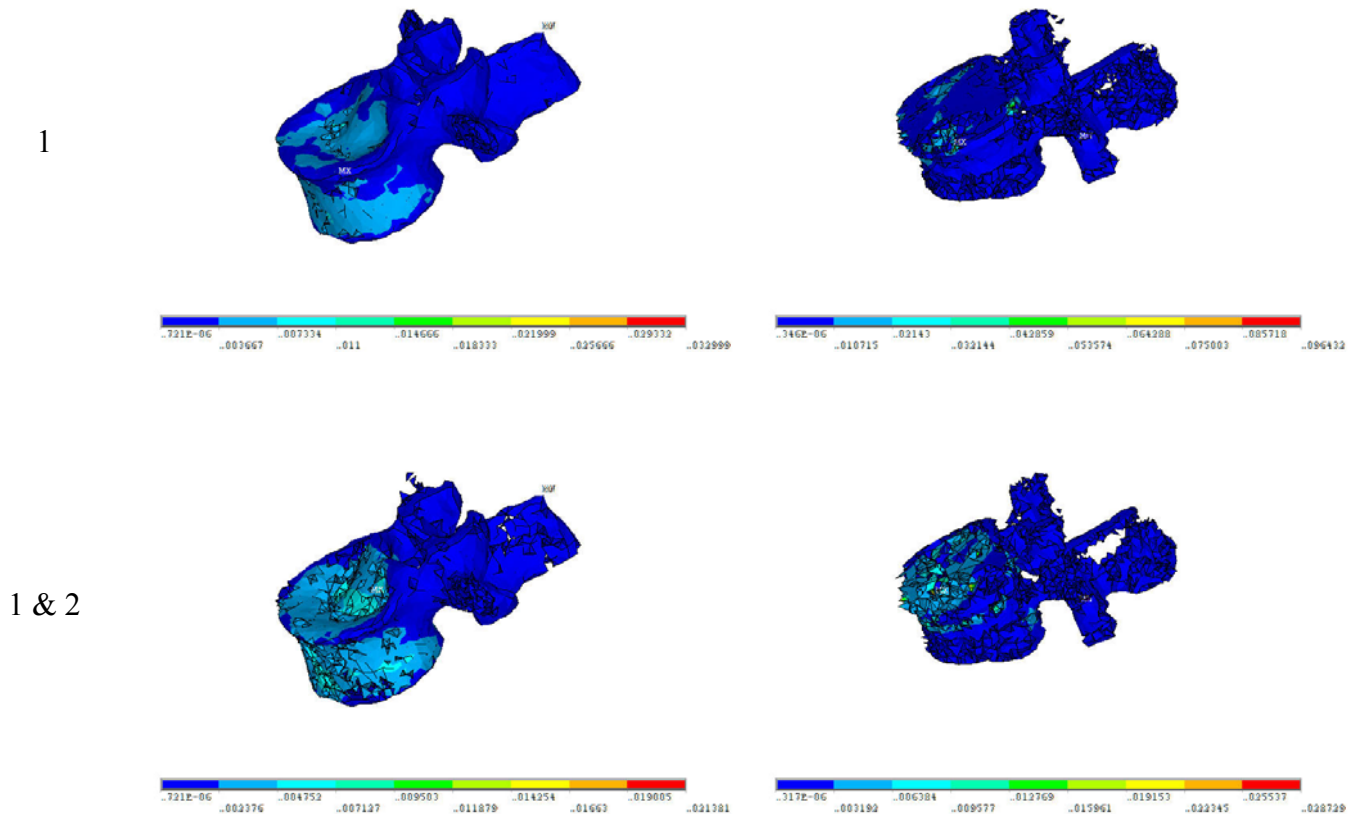
Παρατηρείται ότι οι τιμές των παραμορφώσεων είναι εξαιρετικά μεγάλες και αυτό συμβαίνει γιατί στο σπόνδυλο συμπεριλαμβάνεται το πρώτο υλικό που όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως έχει ιδιότητες κενού δηλαδή πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας. Η μέγιστη παραμόρφωση στο σπονδυλικό σώμα στην πρώτη κατάσταση εμφανίζεται περί το κέντρο του σπονδυλικού σώματος, ενώ στη δεύτερη στην αριστερή πλευρά της άνω επιφυσιακής πλάκας. Η μέγιστη παραμόρφωση στο σπόνδυλο είναι υψηλότερη στη δεύτερη κατάσταση συγκριτικά με την πρώτη.

Στο Σχήμα 13.5 παρουσιάζεται η ίδια κατανομή μετά την αφαίρεση των πρώτων υλικών.

Αφαίρεση
υλικού

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



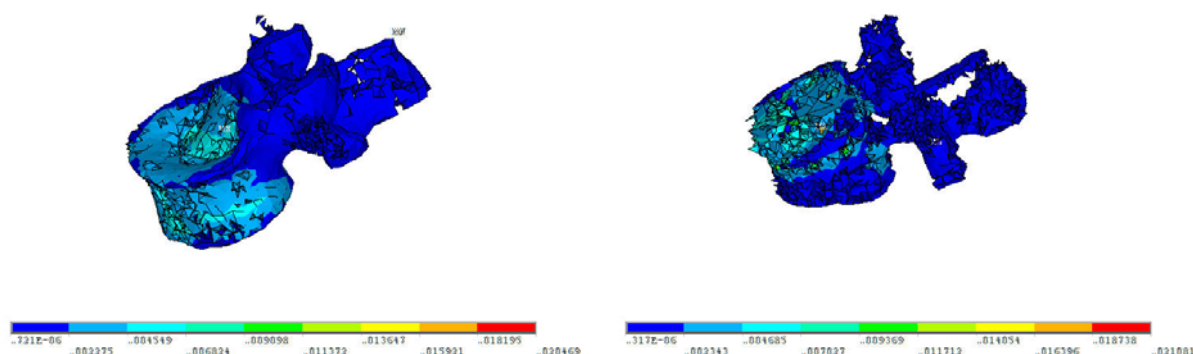
Σχήμα 13.5 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού, παρατηρείται σημαντική μείωση της μέγιστης παραμόρφωσης στην πρώτη και κυρίως στη δεύτερη κατάσταση, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στις θέσεις εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης υπάρχει υψηλή συγκέντρωση του πρώτου υλικού. Μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού παρατηρείται περαιτέρω εξομάλυνση της κατανομής των παραμορφώσεων τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση.

Οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται σε μεμονωμένα ΠΣ. Αφαιρώντας αυτά τα ΠΣ κατ' αντιστοιχία με τη θλίψη προκύπτει το Σχήμα 13.6

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 13.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Στον Πίνακα 13.3 παρατίθενται οι μέγιστες παραμορφώσεις για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 13.3 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο O1

	Μέγιστη παραμόρφωση (μStrains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Σπόνδυλος O1.	193878	3448000
Σπόνδυλος O1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	32999	96432
Σπόνδυλος O1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	21381	28729
Σπόνδυλος O1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	20469	21081

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση στην πρώτη κατάσταση μειώνεται κατά 82.9% ενώ στη δεύτερη κατά 97.2%. Επιπλέον η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται περαιτέρω κατά 35.2 % στη πρώτη κατάσταση ενώ στη δεύτερη κατά 70.2 %. Μετά την αφαίρεση και των μεμονωμένων στοιχείων παρατηρείται μείωση και των δύο τιμών μέγιστων παραμορφώσεων και η δεύτερη κατάσταση έχει 2.5% μεγαλύτερη τιμή μέγιστης παραμόρφωση από την πρώτη.

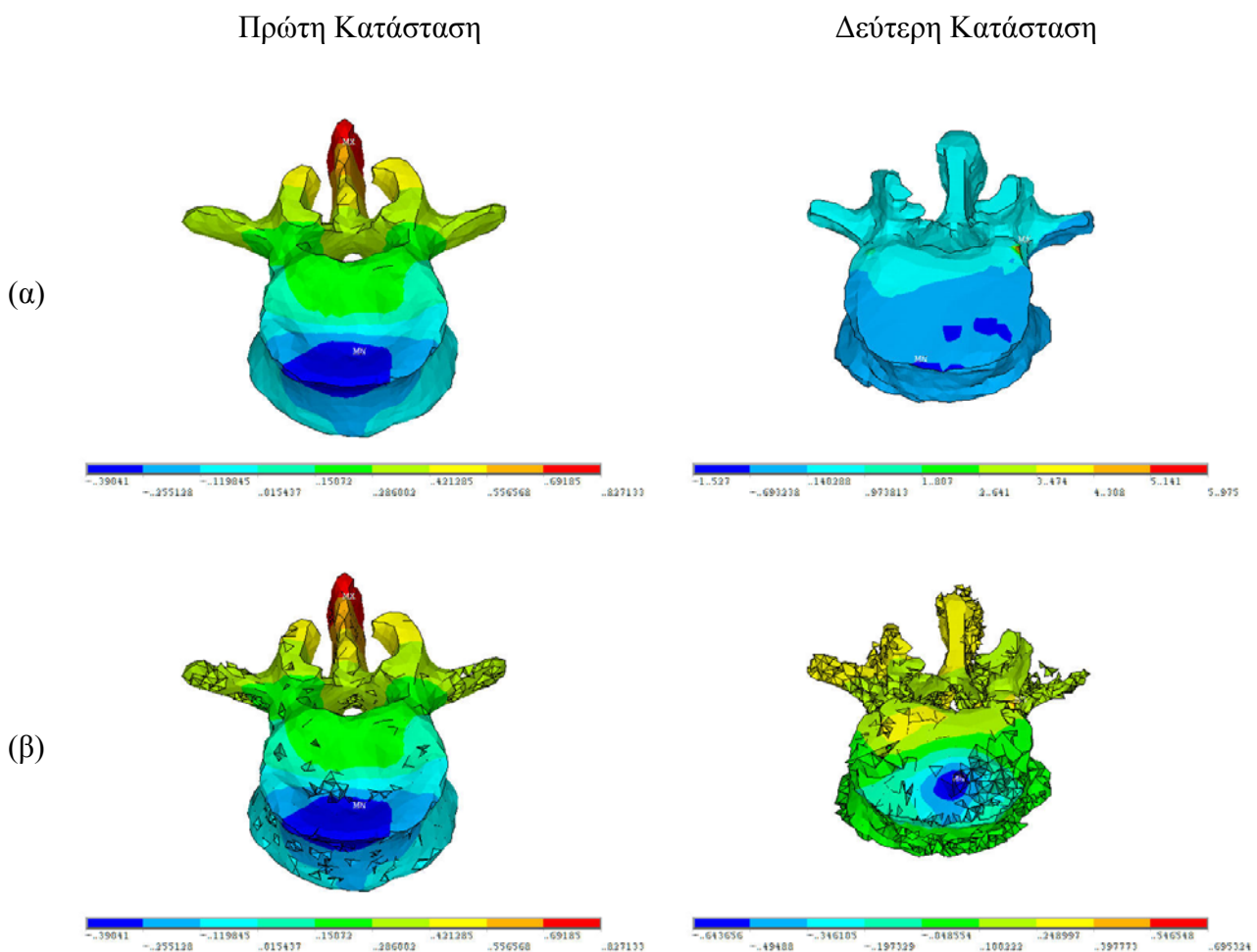
Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα, διαπιστώνει κανείς ότι η μέγιστη παραμόρφωση στη δεύτερη κατάσταση είναι υψηλότερη σε κάθε περίπτωση, παρά το γεγονός ότι η δεύτερη ασθενής έχει ακολουθήσει θεραπευτική αγωγή.

13.2 Ανάλυση και σύγκριση των δύο καταστάσεων σε κάμψη

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z, των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων, κατά την επιβολή καμπτικού φορτίου απευθείας στο σπόνδυλο O1 της δεύτερης ασθενούς, στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

13.2.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 13.7 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης σε φορτίσεις κάμψης, όσον αφορά τη μετατόπιση κατά τον οβελιαίο άξονα τόσο για την πρώτη όσο και για τη δεύτερη κατάσταση.



Σχήμα 13.7 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z (α) του σπονδύλου O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση (β) του σπονδύλου O1 μετά τη γραφική απομάκρυνση του υλικού 1

στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση

Στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση, ενώ στη δεύτερη στην αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος στο άνω πλευρικό ημιγλήνιο. Αντίστοιχα η ελάχιστη μετατόπιση εντοπίζεται και στις δύο καταστάσεις στο εμπρόσθιο τμήμα του σπονδυλικού σώματος.

Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η κατανομή των μετατοπίσεων στη δεύτερη κατάσταση μεταβάλλεται και μοιάζει πλέον στην κατανομή της πρώτης κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μείωση τόσο της μέγιστης όσο και της ελάχιστης παραμόρφωσης στη δεύτερη κατάσταση. Το εμβαδόν της περιοχής ελάχιστης μετατόπισης της δεύτερης κατάστασης αυξάνεται.

Στον Πίνακα 13.4 καταγράφονται η μέγιστη και ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης στον οβελιαίο άξονα και στις δύο καταστάσεις, πριν και μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού.

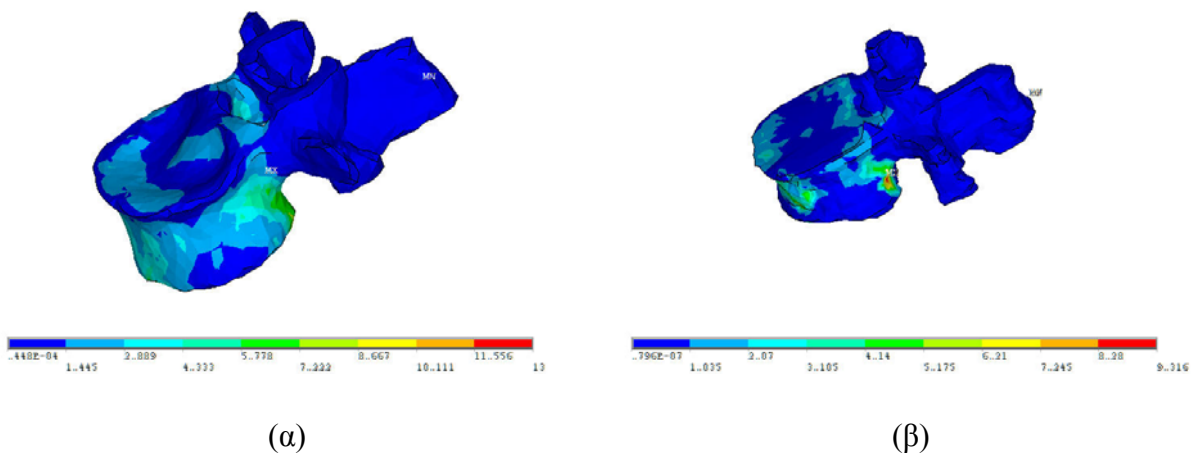
Πίνακας 13.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1

	Πρώτη Κατάσταση		Δεύτερη Κατάσταση		Ποσοστιαία Μεταβολή Zmax
	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Zmin (mm)	Zmax (mm)	
Με το υλικό 1	0.015	0.83	0.14	5.97	620.8 %
Χωρίς το υλικό 1	0.015	0.83	0.049	0.69	-16.8 %
Ποσοστιαία μεταβολή με την αφαίρεση του υλικού 1	0%	0%	-65%	-88.4%	

Πριν την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη μετατόπιση στη δεύτερη κατάσταση είναι κατά 620.8 % μεγαλύτερη από αυτήν της πρώτης, ενώ μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού, που αντιστοιχεί στο κενό, μειώνεται κατά 16.8%.

13.2.2 Αποτελέσματα ισοδύναμων τάσεων

Στο Σχήμα 13.8 παρουσιάζονται οι κατανομές των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον O1 τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση.



Σχήμα 13.8 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση

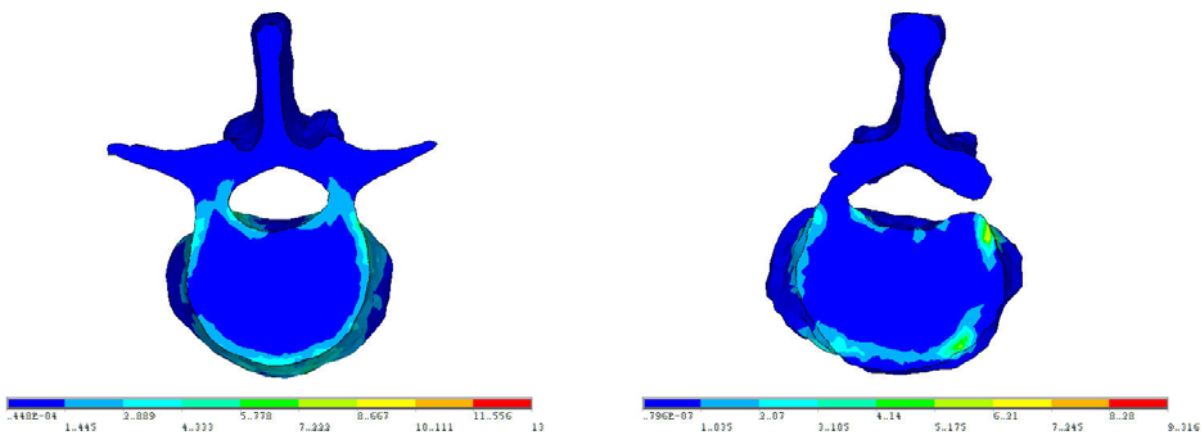
Η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης στην πρώτη κατάσταση εντοπίζεται στην κάτω επιφυσιακή πλάκα, ενώ στη δεύτερη εντοπίζεται στην αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος.

Στον Πίνακα 13.5 παρατίθεται η μέγιστη τάση στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 13.5 Μέγιστη τιμή ισοδύναμων τάσεων

	Τάση (MPa)	Ποσοστιαία Μεταβολή
Πρώτη κατάσταση	13.000	-28.3 %
Δεύτερη Κατάσταση	9.316	

Πέραν των παραπάνω αποτελεσμάτων παρατίθεται και η κατανομή των τάσεων σε μια τομή του άξονα Z, στο Σχήμα 13.9.



(α)

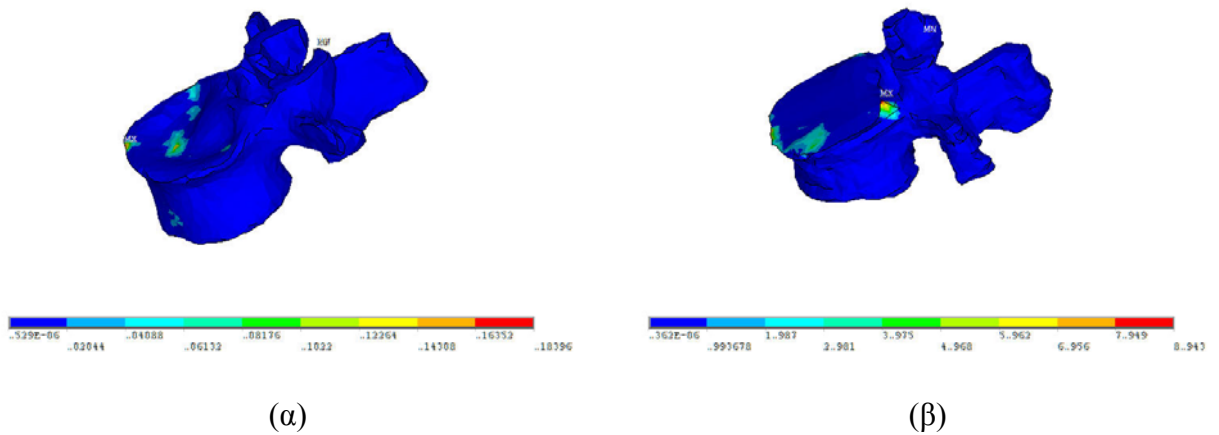
(β)

Σχήμα 13.9 Τομή του σπονδύλου Ο1 κατά τον άξονα Z (α) στην πρώτη κατάσταση (β) στη δεύτερη κατάσταση

Χαρακτηριστικό και των δύο καταστάσεων είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων καταλαμβάνεται από την περιφέρεια του σπονδυλικού σώματος.

13.2.3 Αποτελέσματα ισοδύναμων παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 13.10 που ακολουθεί φαίνονται οι ισοδύναμες παραμορφώσεις κατά Von Mises.



Σχήμα 13.10 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises (α) στην πρώτη (β) στη δεύτερη κατάσταση

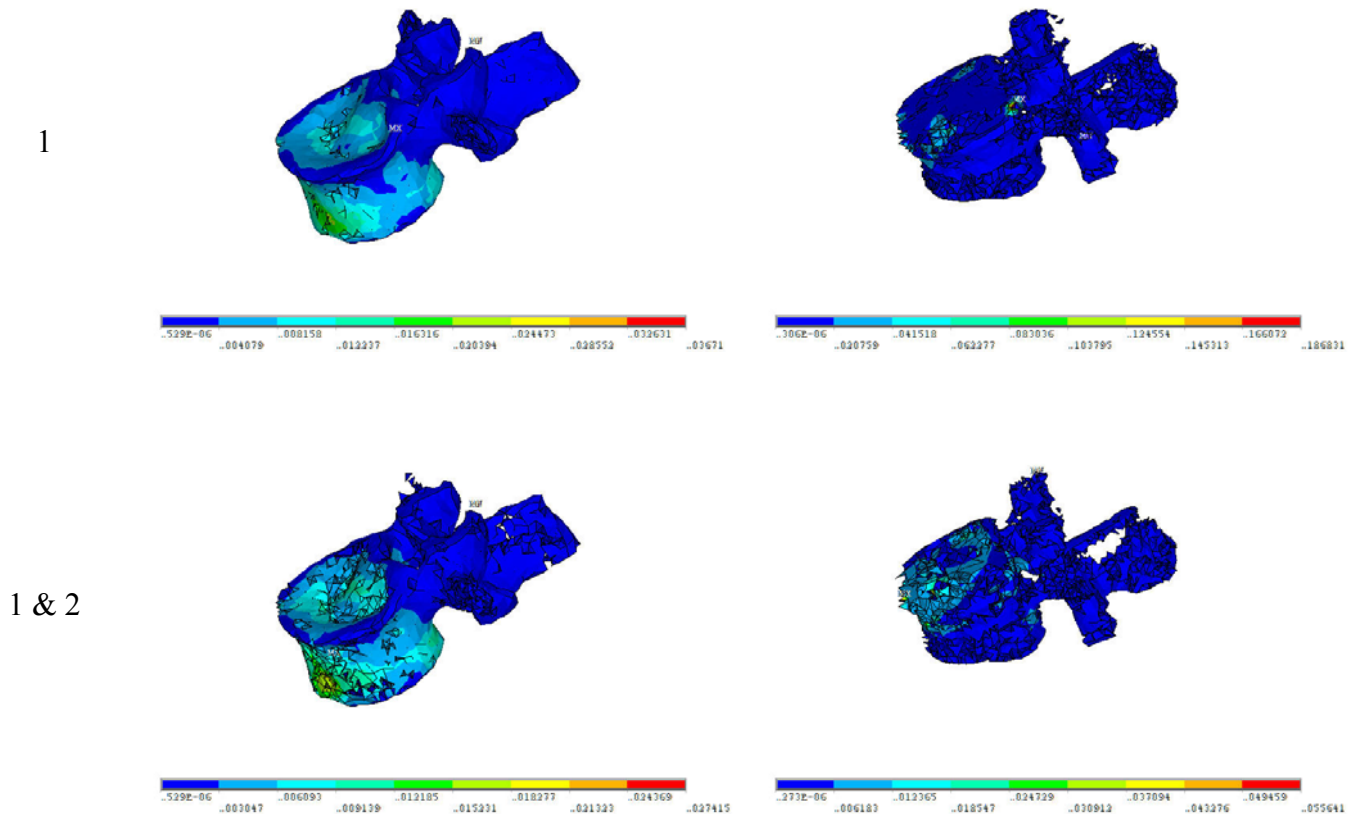
Η μέγιστη παραμόρφωση στο σπονδυλικό σώμα στην πρώτη κατάσταση εμφανίζεται στην μπροστινή μεριά του σπονδυλικού σώματος. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη παραμόρφωση στη δεύτερη κατάσταση εντοπίζεται περί τον αριστερό αυχένα του σπονδυλικού τόξου.

Στο Σχήμα 13.11 παρουσιάζονται οι κατανομές των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises χωρίς το πρώτο και χωρίς το δεύτερο υλικό και για τις δύο καταστάσεις.

Αφαίρεση
υλικού

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



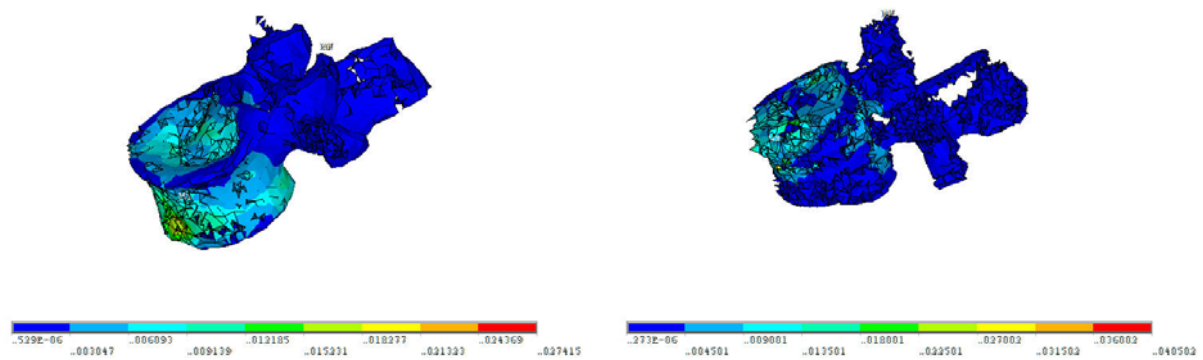
Σχήμα 13.11 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς το υλικό 1 και χωρίς τα υλικά 1 και 2

Στην πρώτη κατάσταση μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η κατανομή των παραμορφώσεων εξομαλύνεται, ενώ όπως ήταν αναμενόμενο η τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης μειώνεται σημαντικά. Στην πρώτη κατάσταση η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στο εσωτερικό του σπονδυλικού σώματος ενώ στη δεύτερη στην άνω επιφυσιακή πλάκα. Στη δεύτερη κατάσταση, αν και η μείωση είναι μεγαλύτερη, η κατανομή δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού η κατανομή μεταβάλλεται κυρίως στη δεύτερη κατάσταση και οι τιμές των μεγίστων μειώνονται και στις δύο καταστάσεις.

Όπως και σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάστηκαν παρατηρείται εμφάνιση της μέγιστης τιμής της παραμόρφωσης σε μεμονωμένα Π.Σ.. Αφαιρώντας τα συγκεκριμένα στοιχεία (Σχήμα 13.12) η κατανομή μεταβάλλεται και η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης μειώνεται περισσότερο.

Πρώτη Κατάσταση

Δεύτερη Κατάσταση



Σχήμα 13.12 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ.

Στον Πίνακα 13.6 παρατίθενται οι μέγιστες παραμορφώσεις για την πρώτη και τη δεύτερη κατάσταση.

Πίνακας 13.6 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο O12

	Μέγιστη παραμόρφωση (μStrains)	
	Κατάσταση 1	Κατάσταση 2
Σπόνδυλος O1.	183960	8943000
Σπόνδυλος O1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1	36710	186831
Σπόνδυλος O1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1 & 2	27415	55641
Σπόνδυλος O1 μετά την αφαίρεση του υλικού 1, 2 & μεμονωμένων Π.Σ.	27415	40502

Στην πρώτη κατάσταση μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση μειώνεται κατά 80% ενώ στη δεύτερη κατάσταση κατά 97.9%. Αφαιρώντας και το δεύτερο υλικό η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης μειώνεται στην πρώτη κατάσταση κατά 25.3 % ενώ στη δεύτερη κατά 70.2%.

13.3 Συμπέρασμα

Στην περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης, παρατηρείται ότι μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z είναι παραπλήσια και στις δύο καταστάσεις. Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης εντοπίζεται στο μέσον της άνω επιφυσιακής

πλάκας αλλά στη δεύτερη κατάσταση αυξάνεται κατά 150%. Όσον αφορά την ισοδύναμη τάση η κατανομή μεταβάλλεται στη δεύτερη κατάσταση. Στην πρώτη κατάσταση αυξημένες τάσεις εντοπίζονται στο σύνολο του σπονδυλικού σώματος ενώ στη δεύτερη κυρίως στα πλάγια του σπονδυλικού σώματος. Όσον αφορά τη μέγιστη τιμή αυτού του μεγέθους μειώνεται στη δεύτερη κατάσταση κατά 6%. Τέλος όσον αφορά τις παραμορφώσεις στη δεύτερη κατάσταση εντοπίζονται εντονότερες παραμορφώσεις στο εμπρόσθιο τμήμα της άνω επιφυσιακής πλάκας ενώ στην πρώτη κατάσταση στο σύνολο του σπονδυλικού σώματος γενικά. Μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων ΠΣ η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης παραμένει σχεδόν η ίδια και στις δύο καταστάσεις.

Όσον αφορά την περίπτωση της καμπτικής φόρτισης, η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z μεταβάλλεται στη δεύτερη κατάσταση. Συγκεκριμένα στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη μετατόπιση εντοπίζεται στο σπονδυλικό σώμα κοντά στο άνω πλευρικό ημιγλήνιο, ενώ στην πρώτη κατάσταση στην ακανθώδη απόφυση. Μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού η μέγιστη τιμή της μετατόπισης μειώνεται κατά περίπου 17% στη δεύτερη κατάσταση. Όσον αφορά στην ισοδύναμη τάση κατά Von Mises, η μέγιστη τιμή της στην πρώτη κατάσταση εντοπίζεται στην κάτω επιφυσιακή πλάκα, ενώ στη δεύτερη κατάσταση εντοπίζεται στην αριστερή πλευρά του σπονδυλικού σώματος. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τάση μειώνεται κατά 28%. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο καταστάσεις οι τάσεις παραλαμβάνονται από την περιφέρεια του σπονδυλικού σώματος. Τέλος, όσον αφορά στις ισοδύναμες παραμορφώσεις η κατανομή τους μεταβάλλεται. Συγκεκριμένα στην πρώτη κατάσταση οι παραμορφώσεις παραλαμβάνονται από το σύνολο του σπονδυλικού σώματος ενώ στη δεύτερη κατάσταση εντονότερα παραμορφώνεται το άνω τμήμα του σπονδυλικού σώματος, ενώ η τιμή της μέγιστης ισοδύναμης παραμόρφωσης μετά την απομάκρυνση των δύο πρώτων υλικών και των μεμονωμένων ΠΣ αυξάνεται κατά 48%.

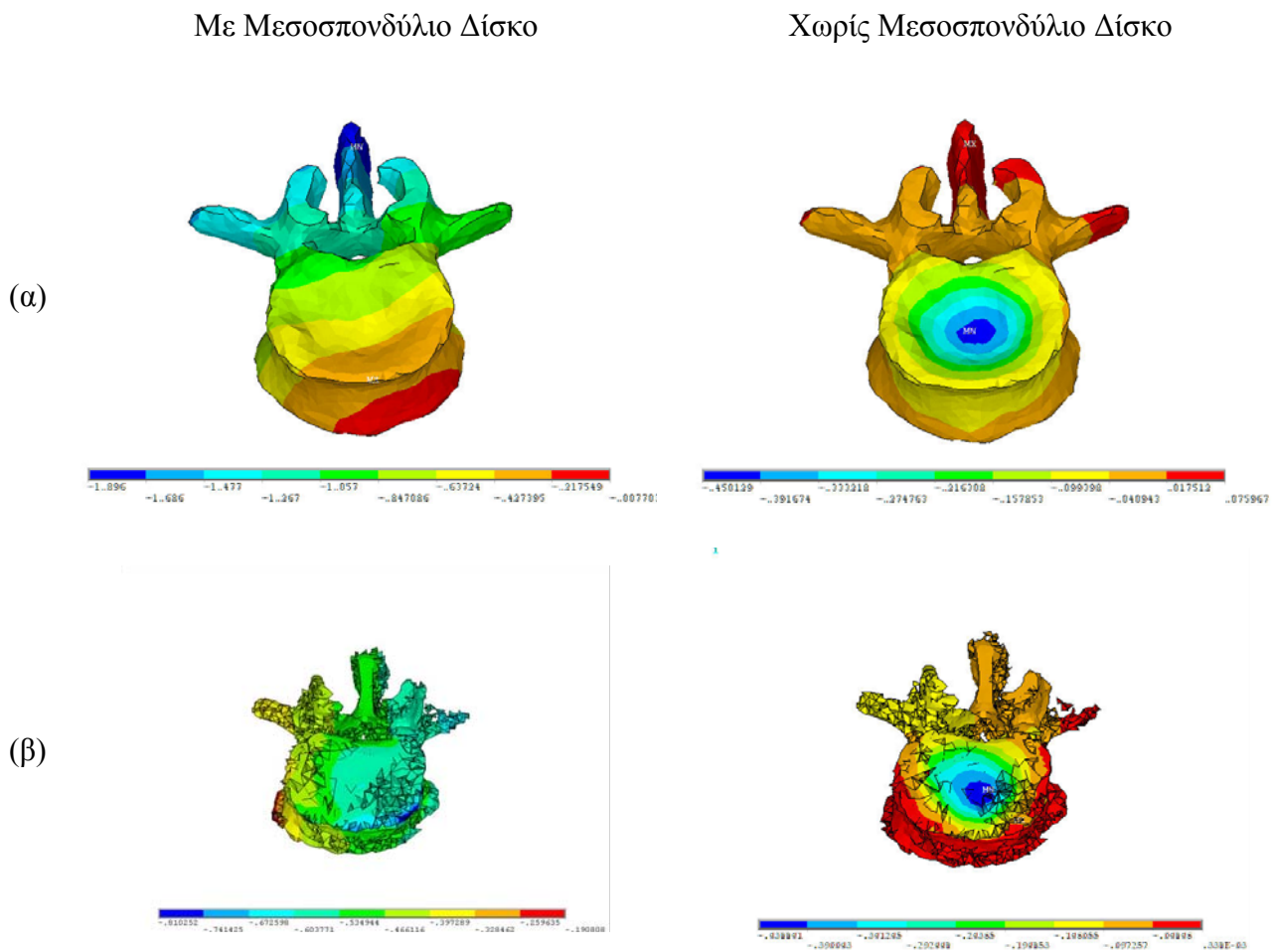
Κεφάλαιο 14ο Σύγκριση των αποτελεσμάτων του σπονδύλου μεταξύ των μοντέλων του σπονδύλου O1 με μεσοσπονδύλιο δίσκο και χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο

14.1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων κατά την επιβολή θλίψης ανάλογα με τη μοντελοποίηση

Παρακάτω συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z, των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων, κατά την επιβολή θλίψης στο μοντέλο με και στο μοντέλο χωρίς μεσοσπονδύλιους του σπονδύλου O1

14.1.1 Σύγκριση των μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 14.1 φαίνεται η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z και για τις δύο καταστάσεις με και χωρίς μεσοσπονδύλιο.



Σχήμα 14.1 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z του σπονδύλου O1 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Οι κατανομές των μετατοπίσεων διαφέρουν πολύ ανάλογα με τη μοντελοποίηση. Στην περίπτωση μοντελοποίησης των μεσοσπονδυλίων δίσκων η μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή μετατόπιση εμφανίζεται στην πρώτη κατάσταση στην ακανθώδη απόφυση, ενώ στη δεύτερη στο εμπρόσθιο αριστερό τμήμα της άνω επιφυσιακής πλάκας. Αντίστοιχα στη μοντελοποίηση χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο η μέγιστη κατ' απόλυτη τιμή μετατόπιση

εμφανίζεται στο κέντρο του σπονδυλικού σώματος, στην άνω επιφυσιακή πλάκα. Όπως προαναφέρθηκε η παρουσία μεγάλου ποσοστού όγκου στοιχείων μικρού μέτρου ελαστικότητας (υλικού 1) στη δεύτερη κατάσταση κάνει απαραίτητη την παρουσίαση των αποτελεσμάτων χωρίς το εν λόγω υλικό.

Στον Πίνακα 14.1 φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη απόλυτη τιμή της μετατόπισης στον οβελιαίο άξονα για την κάθε περίπτωση και η μεταβολή της ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι μεσοσπονδύλιων δίσκων.

Πίνακας 14.1 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1

Μεσοσπονδύλιοι Δίσκοι	Πρώτη Κατάσταση		Δεύτερη Κατάσταση	
	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Zmin (mm)	Zmax (mm)
Ναι	0.07	1.89	0.18	0.82
Όχι	0.02	0.45	0.387x10 ⁻³	2.01
Ποσοστιαία μεταβολή	-75.00%	-76.20%	-99.79%	-145 %

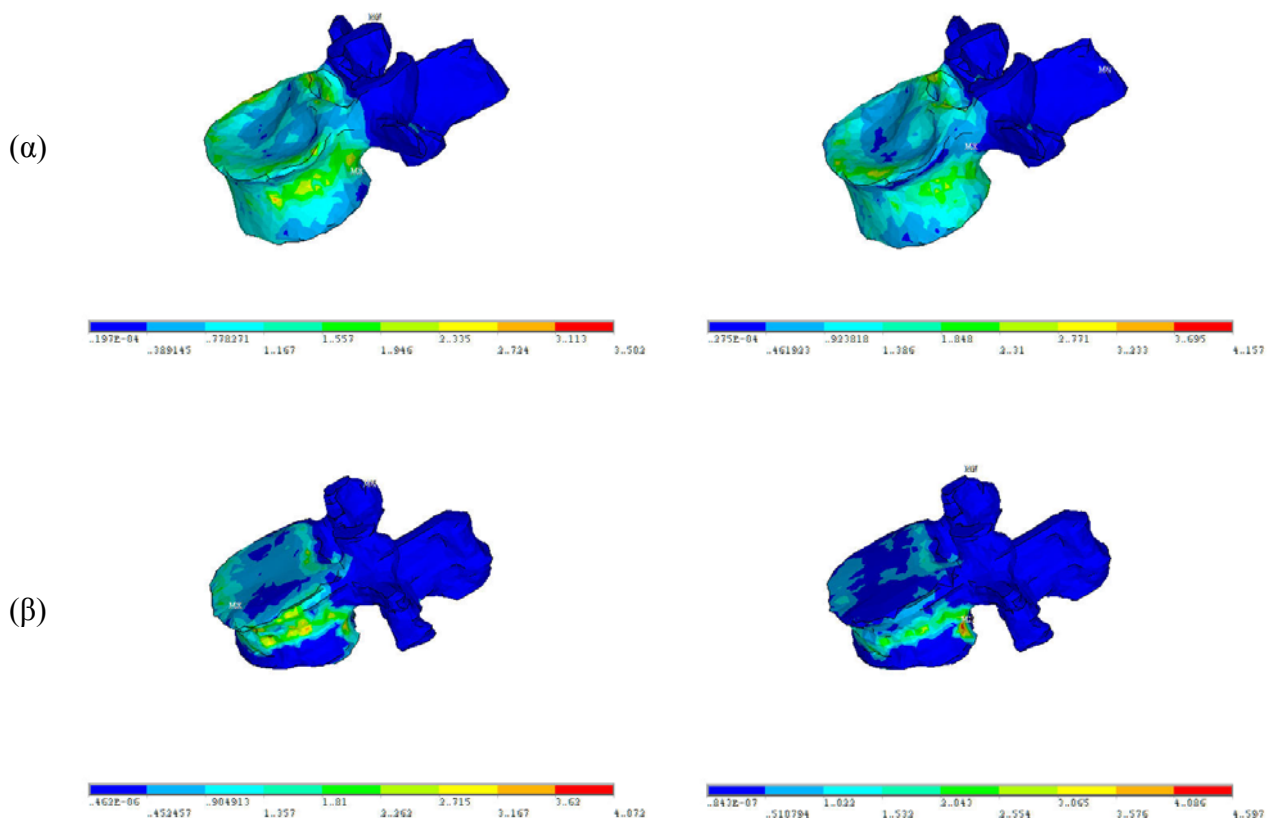
Παρατηρείται στον Πίνακα 14.1 ότι η μέγιστη μετατόπιση στο σπόνδυλο του πλήρους μοντέλου είναι υψηλότερη στην πρώτη κατάσταση από τον αντίστοιχο σπόνδυλο του απλού μοντέλου. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι στα σημεία εμφάνισης μέγιστης μετατόπισης στο απλό μοντέλο, οι αντίστοιχες μετατοπίσεις στο πλήρες μοντέλο είναι κατά 29.7% υψηλότερες στην πρώτη κατάσταση ενώ στη δεύτερη κατάσταση κατά 62.7% μικρότερη.

14.1.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ισοδύναμων τάσεων

Στο Σχήμα 14.2 παρουσιάζονται οι κατανομές ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises στον O1 και για τις δύο καταστάσεις με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.

Με Μεσοσπονδύλιο Δίσκο

Χωρίς Μεσοσπονδύλιο Δίσκο



Σχήμα 14.2 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Τοπολογικά η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων και στις δύο καταστάσεις του κάθε μοντέλου δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές.

Στον Πίνακα 14.2 φαίνονται οι μέγιστες τάσεις για την κάθε περίπτωση και η ποσοστιαία μεταβολή των τάσεων.

Πίνακας 14.2 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο

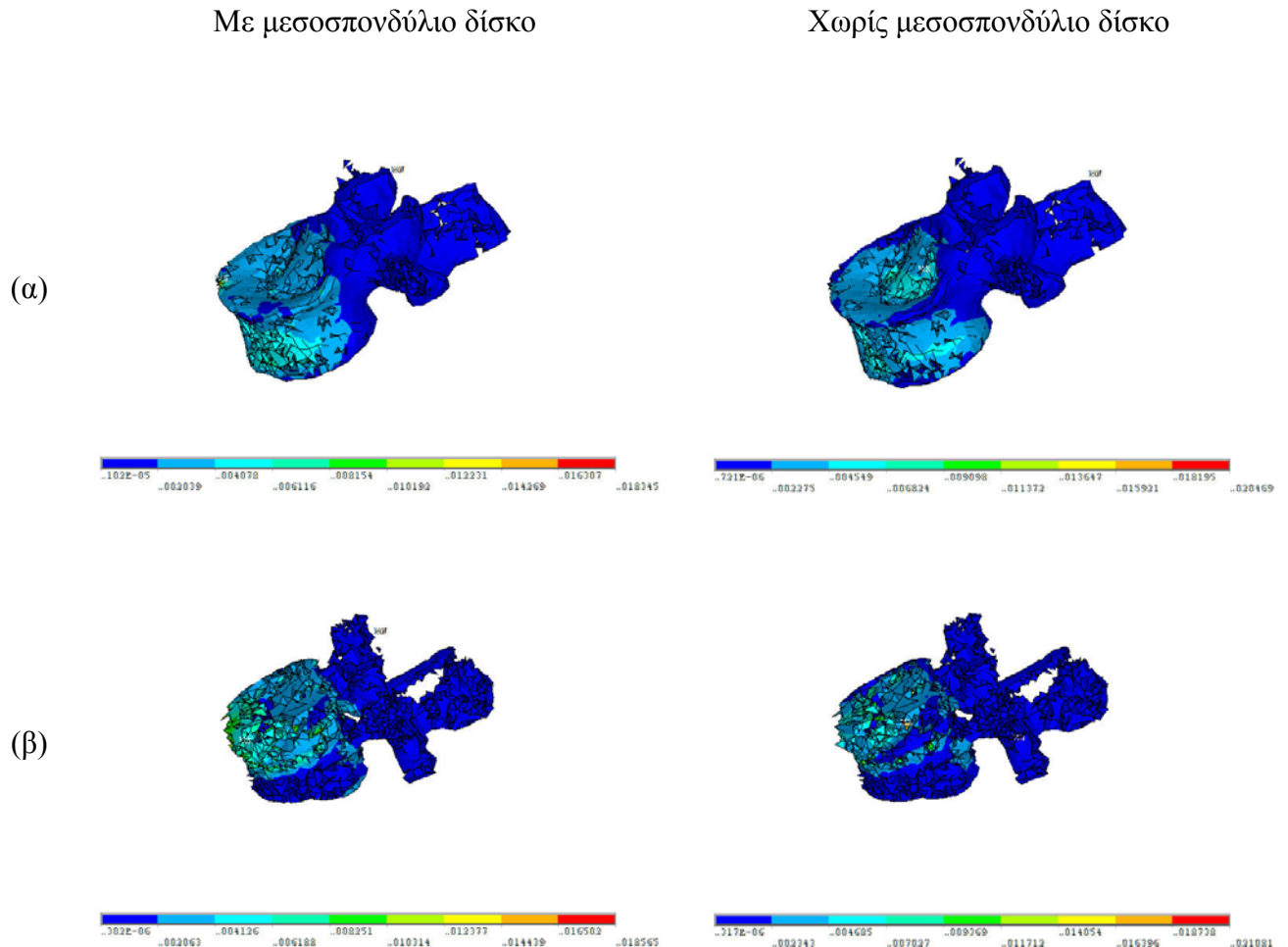
	1η Κατάσταση	2η Κατάσταση
Πλήρες μοντέλο (MPa)	3.502	4.072
Απλό μοντέλο (MPa)	4.157	4.597
Ποσοστιαία Μεταβολή	15.76 %	11.42 %

Η μέγιστη τάση στο μοντέλο χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή του μοντέλου με μεσοσπονδύλιους δίσκους τόσο στην πρώτη όσο και

στη δεύτερη κατάσταση. Στο μοντέλο με μεσοσπονδύλιους δίσκους η μέγιστη τάση αυξάνεται κατά 16.3 % ενώ στο μοντέλο χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους κατά 9.6 %.

14.1.3 Σύγκριση ισοδύναμων παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 14.3 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises και για τις δύο καταστάσεις με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.



Σχήμα 14.3 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην (α) πρώτη και (β) δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ. με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους

Αντίστοιχα με τις τάσεις και στις κατανομές ισοδύναμων παραμορφώσεων, τοπολογικά δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές ανάλογα με τη μοντελοποίηση με ή χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους στην πρώτη κατάσταση.

Στον Πίνακα 14.3 φαίνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 14.3 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο O1 στην περίπτωση του πλήρους και του απλού μοντέλου

	Κατάσταση 1			Κατάσταση 2		
	Πλήρες μοντέλο	Απλό μοντέλο	Ποσοστιαία μεταβολή	Πλήρες μοντέλο	Απλό μοντέλο	Ποσοστιαία μεταβολή
Χωρίς το υλικό 1 (μstrains)	43075	32999	-23.4%	59783	96432	38%
Χωρίς το υλικό 1 και 2 (μstrains)	18345	21381	14.2%	42579	28729	-32.5%
Μετά την αφαίρεση μεμονωμένων στοιχείων (μstrains)	18345	20469	10.4%	18565	21081	11.9%

Στην πρώτη κατάσταση μετά την αφαίρεση και του δεύτερου υλικού η μέγιστη παραμόρφωση στο μοντέλο με τους μεσοσπονδύλιους δίσκους είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτό χωρίς, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στη δεύτερη κατάσταση

Μετά την αφαίρεση και των μεμονωμένων στοιχείων, που αλλοιώνουν την εικόνα των αποτελεσμάτων, τόσο στο μοντέλο με όσο και σε αυτό χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους, η δεύτερη κατάσταση έχει μεγαλύτερη τιμή μέγιστης ισοδύναμης παραμόρφωσης από την πρώτη.

14.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων κατά την επιβολή κάμψης

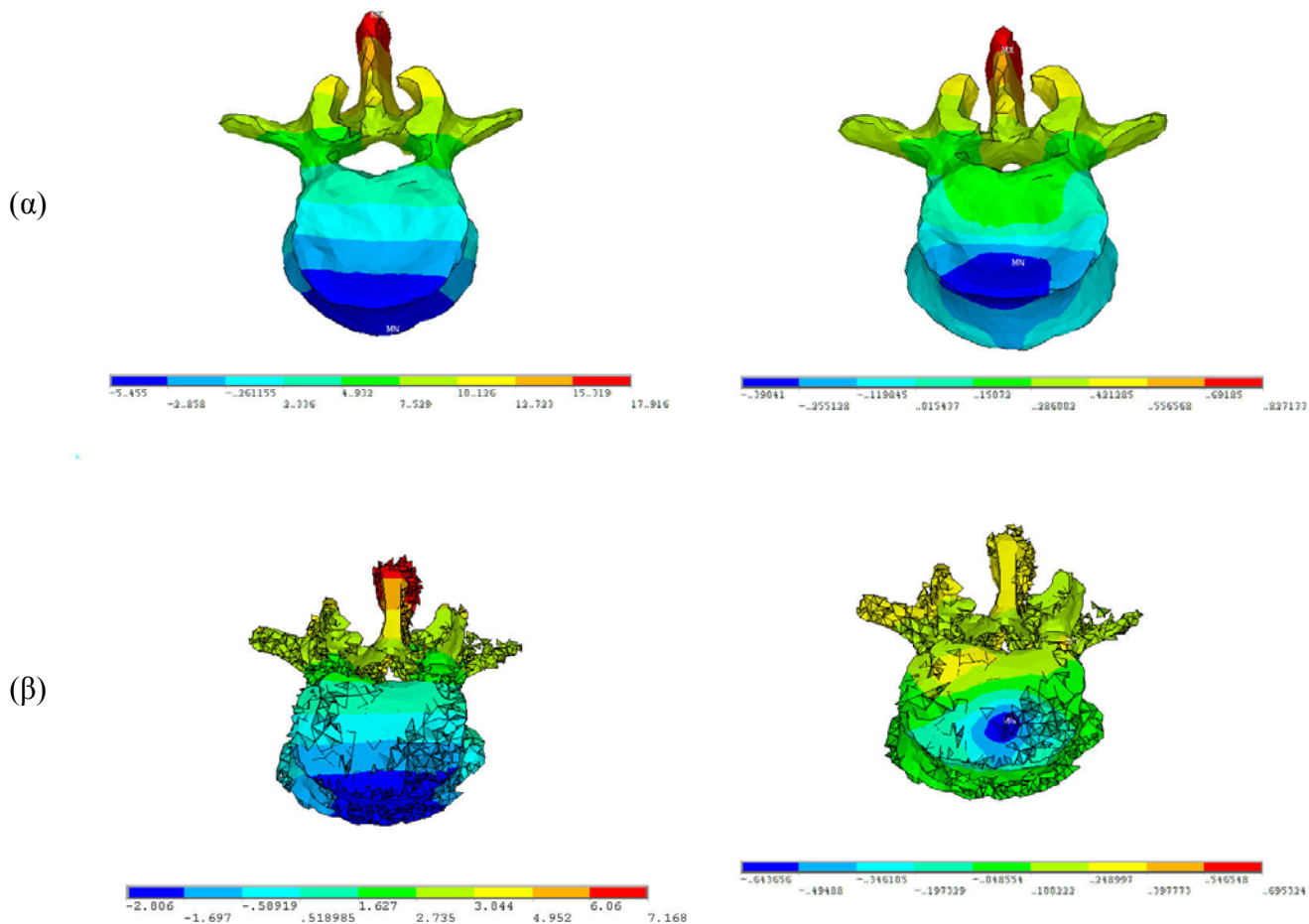
Παρακάτω παρατίθενται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z, των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων, κατά την επιβολή κάμψης στο μοντέλο του σπονδύλου O1 με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.

14.2.1 Σύγκριση μετατοπίσεων κατά τον άξονα z

Στο Σχήμα 14.4 φαίνεται η κατανομή των μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z.

Με Μεσοσπονδύλιο Δίσκο

Χωρίς Μεσοσπονδύλιο Δίσκο



Σχήμα 14.4 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z του σπονδύλου O1 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Τόσο στην πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση η παρουσία ή όχι των Μ.Δ. επηρεάζει την κατανομή των μετατοπίσεων. Η μέγιστη μετατόπιση στο πλήρες μοντέλο τόσο στη πρώτη όσο και στη δεύτερη κατάσταση εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση. Στην ίδια θέση εμφανίζεται και στην πρώτη κατάσταση του απλού μοντέλου, αντίθετα στη δεύτερη κατάσταση του απλού μοντέλου η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στην άνω επιφυσιακή πλάκα και έχει τοπικό χαρακτήρα.

Στον Πίνακα 14.4 φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες μετατοπίσεις για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 14.4 Μέγιστη και ελάχιστη μετατόπιση του σπονδύλου O1

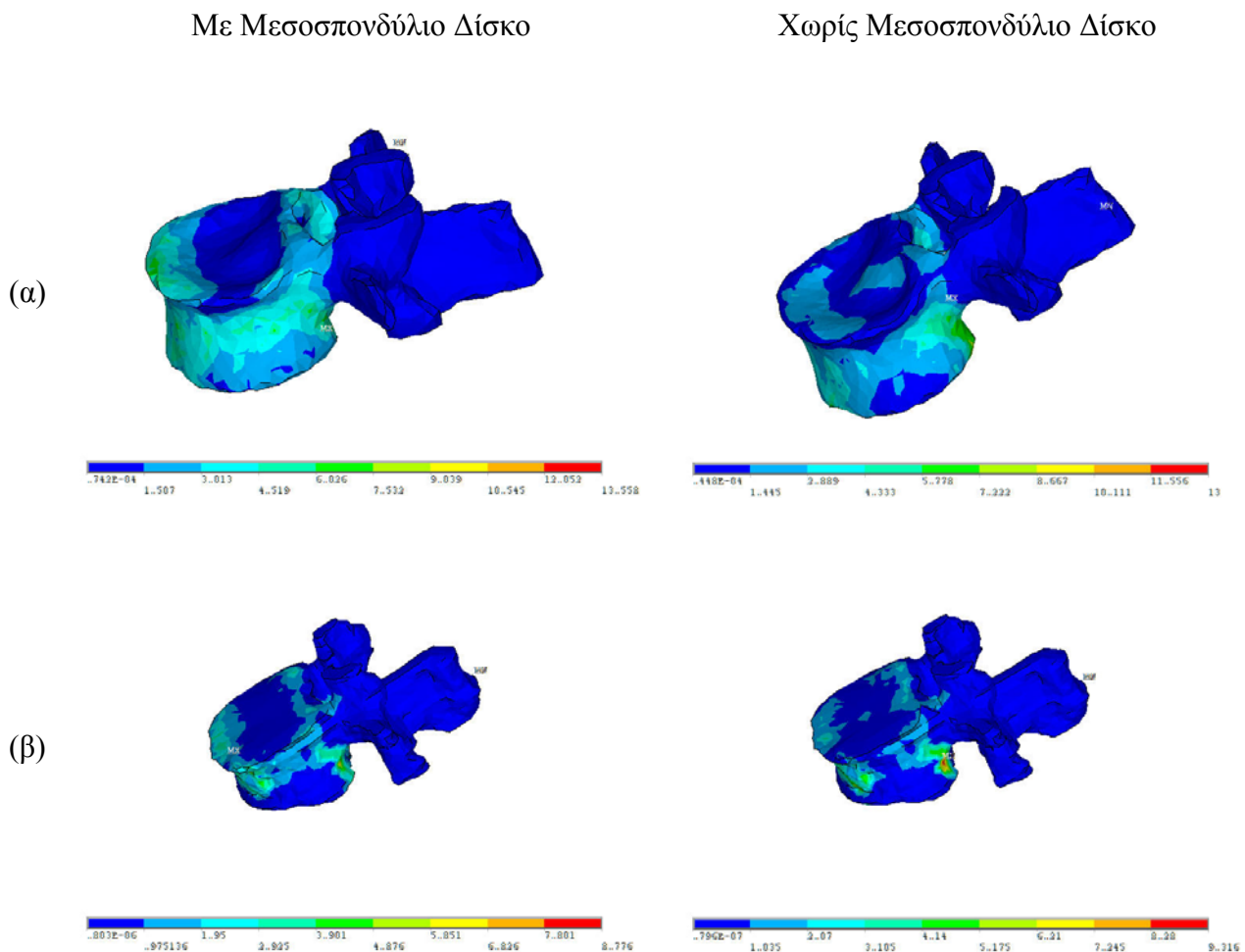
Μεσοσπονδύλιοι Δίσκοι	Πρώτη Κατάσταση		Δεύτερη Κατάσταση	
	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Zmin (mm)	Zmax (mm)

Ναι	0.26	17.916	0.46	7.00
Όχι	0.015	0.83	0.14	5.97
Ποσοστιαία μεταβολή	-94.2%	-95.4%	-69.8%	-14.73%

Στο σημείο εμφάνισης της μέγιστης μετατόπισης στο απλό μοντέλο, η αντίστοιχη μετατόπιση στο πλήρες μοντέλο είναι κατά 55.7% υψηλότερη.

14.2.2 Σύγκριση ισοδύναμων τάσεων

Στο Σχήμα 14.5 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises και για τις δύο καταστάσεις και τις δύο μοντελοποιήσεις.



Σχήμα 14.5 Κατανομή ισοδύναμων τάσεων κατά Von Mises του σπονδύλου Θ12 (α) στην πρώτη και (β) στη δεύτερη κατάσταση με και χωρίς τη μοντελοποίηση του μεσοσπονδύλιου δίσκου

Η μέγιστη τάση στη δεύτερη κατάσταση είναι υψηλότερη στο απλό μοντέλο συγκριτικά με το πλήρες μοντέλο σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στην πρώτη κατάσταση.

Στον Πίνακα 14.5 φαίνονται οι μέγιστες τάσεις για την κάθε περίπτωση και η ποσοστιαία μεταβολή των τάσεων.

Πίνακας 14.5 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων τάσεων στο σπόνδυλο Θ12 στο πλήρες και στο απλό μοντέλο

	1η Κατάσταση	2η Κατάσταση
Πλήρες μοντέλο (MPa)	13.558	8.776
Απλό μοντέλο (MPa)	13	9.316
Ποσοστιαία Μεταβολή	-4.1%	5.8%

Τόσο στο πλήρες μοντέλο όσο και στο απλό μοντέλο στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τάση μειώνεται. Συγκεκριμένα στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τάση στο πλήρες μοντέλο μειώνεται κατά 35.3% ενώ στο απλό μοντέλο κατά 28.3%.

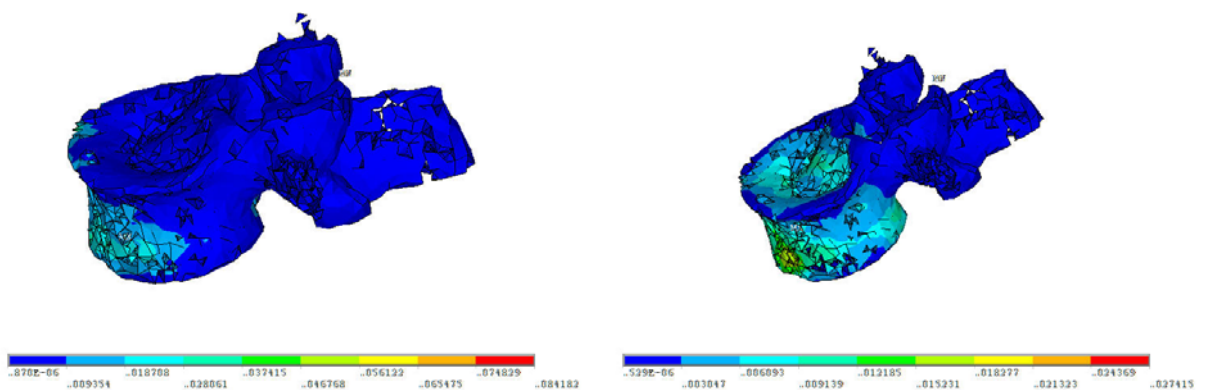
14.2.3 Σύγκριση ισοδύναμων παραμορφώσεων

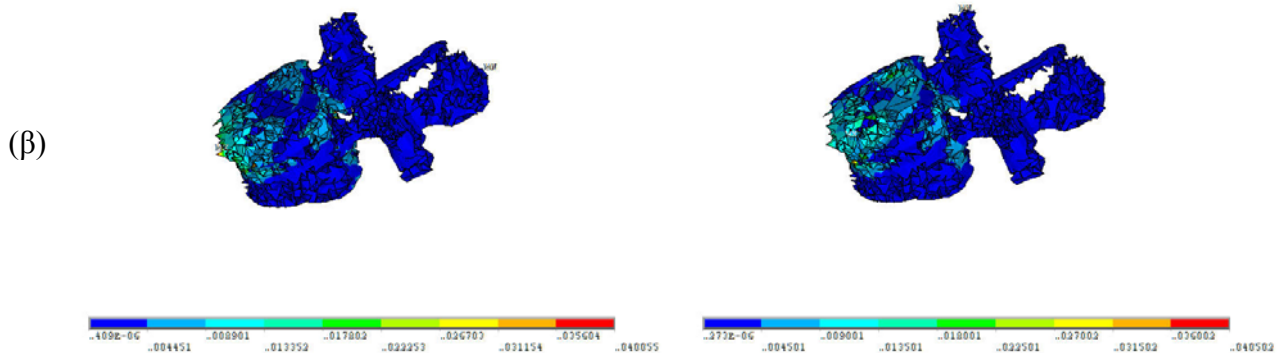
Στο Σχήμα 14.6 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises και για τις δύο καταστάσεις στα μοντέλα με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους.

Με μεσοσπονδύλιο δίσκο

Χωρίς μεσοσπονδύλιο δίσκο

(α)





Σχήμα 14.6 Κατανομή ισοδύναμων παραμορφώσεων κατά Von Mises στον σπόνδυλο O1 στην (α) πρώτη και (β) δεύτερη κατάσταση χωρίς τα υλικά 1 και 2 και μετά την απομάκρυνση μεμονωμένων Π.Σ. με και χωρίς μεσοσπονδύλιους δίσκους

Η μέγιστη παραμόρφωση στο απλό μοντέλο είναι μικρότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη του πλήρους μοντέλου. Αντιθέτως στη δεύτερη κατάσταση η κατανομή των παραμορφώσεων είναι ομαλότερη στο πλήρες μοντέλο και η μέγιστη παραμόρφωση μικρότερη συγκριτικά με το απλό μοντέλο.

Στον Πίνακα 14.6 φαίνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 14.6 Μέγιστη τιμή των ισοδύναμων παραμορφώσεων στο σπόνδυλο Θ12 στην περίπτωση του λήρου και του απλού μοντέλου

	Κατάσταση 1			Κατάσταση 2		
	Πλήρες μοντέλο	Απλό μοντέλο	Ποσοστιαία μεταβολή	Πλήρες μοντέλο	Απλό μοντέλο	Ποσοστιαία μεταβολή
Χωρίς το υλικό 1 (μstrains)	168021	36710	-78.1%	83379	186831	55.3%
Χωρίς το υλικό 1 και 2 (μstrains)	84182	27415	-67.4%	83379	55641	-33.3%
Μετά την αφαίρεση μεμονωμένων στοιχείων (μstrains)	84182	27415	-67.4%	40055	40502	1.1%

Στη δεύτερη κατάσταση μετά την αφαίρεση του δεύτερου υλικού, στο απλό μοντέλο εμφανίζεται μικρότερη παραμόρφωση συγκριτικά με το πλήρες μοντέλο. Ωστόσο μετά

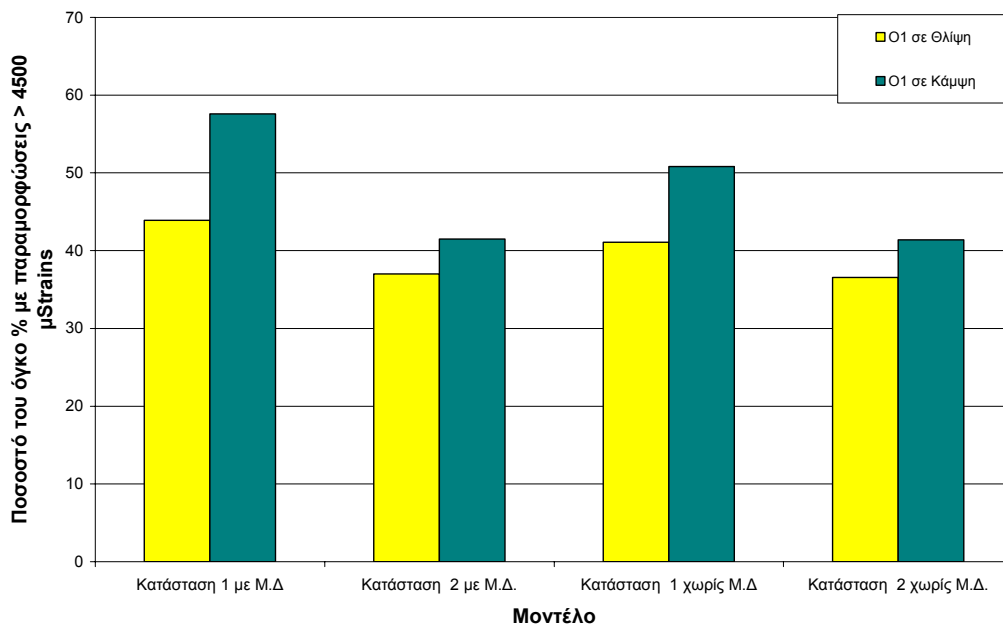
την αφαίρεση των μεμονωμένων στοιχείων, όπου εμφανίζεται τοπικά μέγιστη παραμόρφωση, η παραμόρφωση είναι λίγο μικρότερη στο απλό μοντέλο συγκριτικά με την αντίστοιχη του πλήρους μοντέλου. Τέλος να αναφερθεί ότι η μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή παρατηρείται μετά την αφαίρεση του πρώτου υλικού.

14.3 Συμπέρασμα

Στην περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης οι κατανομές διαφέρουν ανάλογα με τη μοντελοποίηση. Στην πρώτη κατάσταση στο πλήρες μοντέλο η μέγιστη τιμή της μετατόπισης εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση, ενώ στο απλό μοντέλο στο κέντρο του σπονδυλικού σώματος. Επιπλέον η μέγιστη τιμή της μετατόπισης στο απλό μοντέλο είναι κατά 76 % μικρότερη, γεγονός που οφείλεται στην παραλαβή μετατοπίσεων από τους ΜΔ. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τιμή της μετατόπισης στο πλήρες μοντέλο εντοπίζεται στο εμπρόσθιο αριστερό τμήμα της άνω επιφυσιακής πλάκας, ενώ στο απλό μοντέλο στο κέντρο του σπονδυλικού σώματος. Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης είναι υψηλότερη στο απλό μοντέλο. Όσον αφορά τις ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises η κατανομή είναι παρεμφερής και στα δύο μοντέλα. Η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης τάσης στην πρώτη κατάσταση είναι κατά 16% υψηλότερη στο απλό μοντέλο. Στη δεύτερη κατάσταση αντίστοιχα η μέγιστη τάση στο απλό μοντέλο είναι κατά 11% υψηλότερη. Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι στη δεύτερη κατάσταση, η μέγιστη ισοδύναμη τάση μειώνεται ανεξαρτήτως μοντέλου. Τέλος όσον αφορά στις ισοδύναμες παραμορφώσεις παρατηρείται παραπλήσια κατανομή και στα δύο μοντέλα. Μετά την αφαίρεση των δύο πρώτων υλικών και μεμονωμένων ΠΣ οι τιμές είναι παρόμοιες και στα δύο μοντέλα. Επιπλέον η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης αυξάνεται στη δεύτερη κατάσταση ανεξαρτήτως μοντελοποίησης.

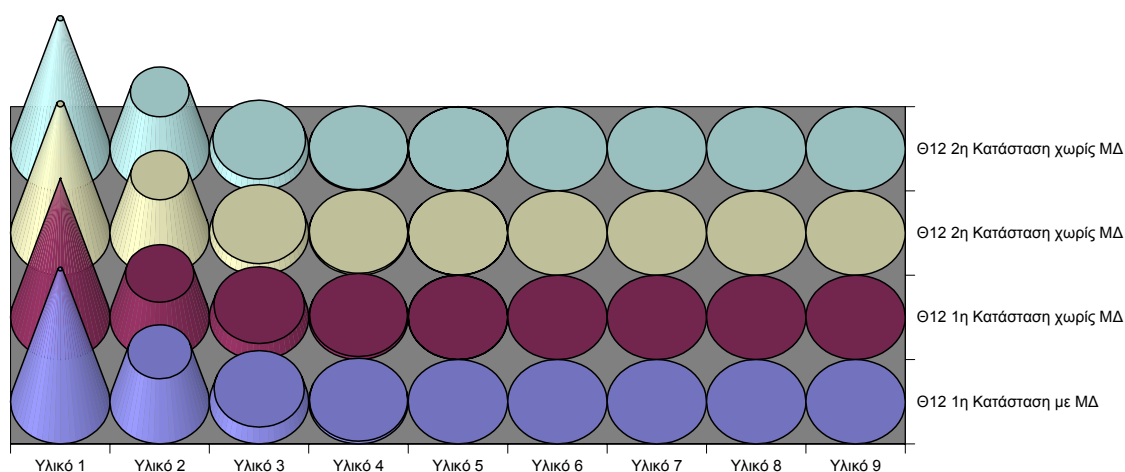
Στην περίπτωση επιβολής καμπτικού φορτίου η κατανομή των ισοδύναμων μετατοπίσεων στην πρώτη κατάσταση είναι παραπλήσια. Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης και στα δύο μοντέλα εντοπίζεται στην ακανθώδη απόφυση. Στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τιμή της μετατόπισης στο απλό μοντέλο εντοπίζεται στην άνω επιφυσιακή πλάκα ενώ στο πλήρες μοντέλο στην ακανθώδη απόφυση. Όσον αφορά στις ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises η κατανομή είναι παραπλήσια και στα δύο μοντέλα. Επίσης ανεξαρτήτως μοντελοποίησης στη δεύτερη κατάσταση η μέγιστη τάση μειώνεται. Τέλος η κατανομή των ισοδύναμων παραμορφώσεων είναι παραπλήσια και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 14.7 παρουσιάζεται το ποσοστό των στοιχείων που εμφανίζουν παραμόρφωση μεγαλύτερη από 4500 μ strains ενώ στο Σχήμα 14.8 παρουσιάζεται το ποσοστό ανά υλικό με παραμόρφωση άνω των 4500 μ strains για το κάθε μοντέλο και στις δύο καταστάσεις του σπονδύλου O1.



Σχήμα 14.7 Ποσοστό όγκου με παραμορφώσεις μεγαλύτερες των 4500 μ Strains τόσο για την πρώτη όσο και τη δεύτερη κατάσταση για θλίψη και κάμψη

Παρατηρώντας τα Σχήματα 14.7 και 14.8 και λαμβάνοντας υπόψη όσα προαναφέρθηκαν, καταλήγει κάνει ότι η χρήση Μ.Δ επηρεάζει σαφώς τα αποτελέσματα ποσοτικά. Ωστόσο μπορούν να διεξαχθούν ασφαλή ποιοτικά αποτελέσματα για τη μηχανική συμπεριφορά του σπονδύλου O1 και χωρίς τη χρήση αυτών.



Σχήμα 14.8 Ποσοστό ανά υλικό με παραμόρφωση άνω των 4500 μ strains για το κάθε μοντέλο και στις δύο καταστάσεις του σπονδύλου O1

Βιβλιογραφία

1. Andrew M. Kaunitz; Osteoporosis: The silent epidemic;
2. Naseem Amarshi, PharmD, MS, J. Allen Scoggin, PharmD, MPA and Stephanie Ensworth, MD ; Osteoporosis: Review of Guidelines and Consensus Statements; The American Journal of Managed Care
3. Andreoli, Griggs, Loscalzo; CECIL Βασική Παθολογία, Πέμπτη έκδοση ; Β' τόμος, ιατρικές εκδόσεις Λίτσα
4. Leonard J. Deftos; Κλινικά στοιχεία φυσιολογίας και διαταραχών του Μεταβολισμού του ασβεστίου των οστών; Ιατρικές εκδόσεις Πασχαλίδης.
5. Χρ. Προβατίδης; Εμβιομηχανική-Βιοϊατρική τεχνολογία; ΕΜΠ 2005
6. Υπολογιστική Αξονική Τομογραφία, Σημειώσεις ; Στάθης Π. Ευσταθόπουλος
7. Στέλιος Ορφανουδάκης, Κώστας Μαριάς; Σημειώσεις V, Υπολογιστική Τομογραφία CT, MRI, PET; Σεπτέμβριος 2003-Φεβρουάριος 2004
8. Shame I.H & Cozzarelli F.A.; Elastic and Inelastic Stress Analysis; Prentice Hall, 1992
9. Μυλωνάς Κ.Π; Μηχανική Παραμορφώσιμων σωμάτων; ΕΜΠ 1992
10. Beer and Watson; Introduction to Finite and Boundary Element Methods for Engineers; John Wiley & sons, 1992
11. Reddy J.N ; Finite Element Method; McGrawHill, 1993
12. Hakim N.S and King, A.I. ; A computer aided technique for generation of a 3-d finite element model of a vertebra; Computers Biology Med., 1978, 8, 187-196
13. Hakim N.S and King, A.I ; A three dimensional finite element dynamic response analysis of a vertebra with experimental verification; J. Biomechanics, 1979, 12, 277-292.
14. Fagan, M. J., Julian, S. and Mohsen, A.; Unpublished results.
15. Whyne, C.M., Hu, S.S., Kilsch, S. and Lotz, J.C. ; Effect of the pedicle and posterior arch on vertebral body strength predictions in finite element modeling; Spine, 1998, 23, 899-907
16. Lavaste, F., Skalli, W., Robin, S., Roy-Camille, R. and Mazel, C. ; Three dimensional geometrical and mechanical modeling of the lumbar spine; J Biomechanics, 1992, 25, 1153-1164.

17. Robin, S., Skalli, W. and Lavaste, F. ; Influence of geometrical factors on the behaviour of lumbar spine segments: a finite element analysis; *Eur. Spine J.*, 1994, 4, 84-90
18. Kong, W. Z., Goel, V. K., Gilberston, L. G., Weinstein, J.N. and Parnianpour, M. ; Effects of muscle dysfunction of lumbar spine mechanics: a finite element study based on a two motion segments model; *Spine*, 1996, 21, 2197-2207.
19. Shirazi-Adl, A., Shrivastava, S. C. and Ahmed, A. M. ; Stress analysis in the lumbar disc body unit in compression; *Spine*, 1984, 9, 120-134.
20. Simon, B. R., Wu, J. S. S., Carlton, M. W., Evans, J. H. and Kazarian, L. E. ; Structural models for human spinal motion segments based on poroelastic view of the intervertebral disc; *J. Biomechanics Engng.*, 1985, 107, 327-335.
21. Laible, J. P., Pflaster, D. S., Krag, M. H., Simon, B. R. and Haught, L. D. ;A poroelastic finite element model with application to the intervertebral disc; *Spine*, 1993, 18, 659-670.
22. Duncan, N. A., Ashford, F.A. and Lotz, J.C.; Experimental validation of poroelastic finite element predictions for the fluid pressure and solid stress in the annulus fibrosis; In proceedings of the 1997 Bioengineering Conference, 1997, BED-Vol. 35, pp. 25-26 (American Society of Mechanical Engineers, New York)
23. Martinez, J. B., Oloyede, V. O. A. and Broom, N. D.; Biomechanics of load bearing of the intervertebral disc an experimental and finite element model; *Med. Engng Phys.*, 1997,19,145-156.
24. Thorbole Chandrashekhar Kalyanrao; Finite element Analysis of vertebral end-plate failure under High Dynamic Axial Load and its relation to age; July 2005
25. Brown, T., Hanson, R., and Yorra, A; Some mechanical tests on the lumbosacral spine with particular reference to the intervertebral disc; *J. Bone joint surg.*, 39A: 1135,1957
26. Markolf, K. L. ; Stiffness and damping characteristics of the thoracic lumbar spine; Proceeding of workshops on Bioengineering Approaches to the problem of the spine
27. Farfan, H. F. ; The effect of torsion on the lumbar intervertebral joints: The role of torsion in the production of disc degeneration; *J. Bone joint surg.*, 52A: 468,1970

28. Nachemson, A., and Morris, J. M. ; In vivo measurement of intradiscal pressure; J. Bone joint Surg., 46:1077, 1964
29. Shah, J. S., and Jayson, M. I. V.; The distribution of surface strain in the cadaveric lumbar spine; J. Bone joint Surg., 60B: 246,1978
30. Tobias Pitzen Fred, H., Geisler Dieter Matthis Hans Muller-Storz, K., Pedersen Wolf-Ingo Steudel; The influence of cancellous bone density on load sharing in human lumbar spine: a comparison between an intact and a surgically altered motion segment; Eur Spine J. 10: 23-29, 2003
31. Jason Tak-Man Cheung, Ming Zhang, Daniel Hung-Kay Chow Biomechanical responses of the intervertebral joints to static and vibrational loading: a finite element study; Clinical Biomechanics 18: 790-799, 2003
32. E. C., Teo, H. W., Ng; 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, 2001
33. Xiaobo Wang, Genevieve A. Dumas; Evaluation of effects of selected factors on intervertebral fusion- a simulation study; Medical Engineering and Physics 2005, vol. 27, no3, pp. 197-207
34. Hendrik Schmidt, Frank Heuer, Ulrich Simon, Annette Kettler, Antonius Rohlmann, Lutz Claes, Hans-Joachim Wilke; Application of a new calibration method for a three-dimensional finite element model of human annulus fibrosus; Clinical Biomechanics Vol. 21 pp. 337-344, 2006
35. P. J., Prendergast; Finite element models in tissue mechanics and orthopaedic implant design; Clinical Biomechanics Vol. 12, No. 6,6,pp. 343-366,1997
36. Anne Polikeit, Msc, Lutz Peter Nolte, PhD, and Stephen J. Ferguson, PhD; The effect of Cement augmentation on the load Transfer in an Osteoporotic functional Spinal Unit; Spine, Vol. 28, Number 10, pp. 991-996,2003
37. Διπλωματική εργασία Γιώργου Σπανού; Ανάπτυξη μοντέλου Πεπερασμένων στοιχείων Μεσοσπονδύλιου δίσκου και μελέτη της επίδρασης του σε υγιή μονάδα; Αθήνα 2006
38. John E. Ware, Jr., PhD; SF-36 Literature, Construction of the SF-36, Version 2.0, Psychometric Considerations Translations Discussion; www.SF-36.org
39. Michael A. Adams, Patricia Dolan; Spine Biomechanics; Journal of Biomechanics, 2005

40. T. Zander, A. Rohlmann, J. Calisse, G Bergmann; Estimation of muscle forces in the lumbar spine during upper-body inclination; *Clinical biomechanics* 16 Supplement No.1, s73-s80, 2001
41. J. Mizrahi, PhD, M. J. Silva, M Eng, T. M. Keanevy, PhD, W. T. Edwards, PhD, W.C. Hayes, PhD; Finite Element Stress Analysis of the Normal and Osteoporotic Lumbar Vertebral Body; *SPINE* Volume 18, Number 14, pp 2088-2096, 1993
42. Jerry L. Old, M.D., Michelle Clavert, M.D.; *Vertebr Compression Fractures in the Elderly*; *American Family Physician*, 2004