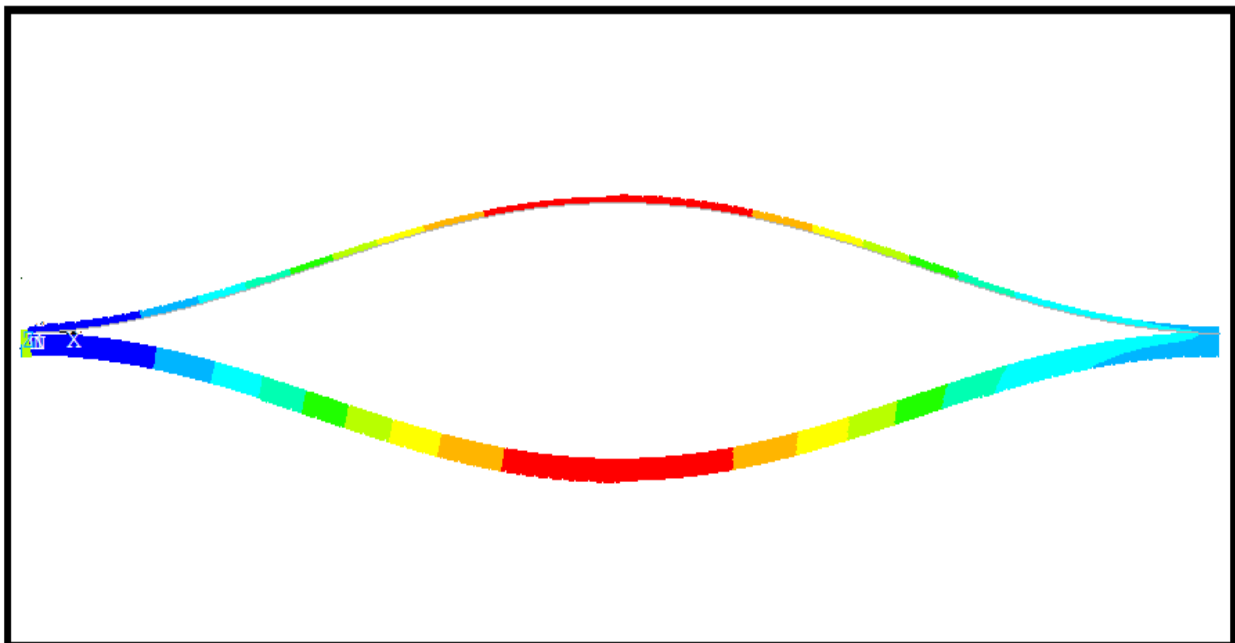


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟ
ΣΤΡΩΣΕΩΝ**

Επιβλέπων : Ν.Τσούβαλης



ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2013

ΒΛΑΧΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
<u>ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΣΕΩΣ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ</u>	1
<u>1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	1
<u>1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΛΥΓΙΣΜΟ</u>	3
<u>1.2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ</u>	3
<u>1.2.2 ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΑ</u>	6
<u>1.2.2.1 ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ</u>	7
<u>1.2.3 Ο ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ</u>	8
<u>1.2.4 ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΔΟΚΩΝ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>1.2.5 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>1.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>1.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>1.3.2 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ</u>	15
<u>1.3.3 ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ</u>	16
<u>1.3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ</u>	17
<u>1.3.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ</u>	17
<u>1.3.5.1 MODE I</u>	18
<u>1.3.5.2 MODE II</u>	19
<u>1.3.5.3 MIXED - MODE</u>	21
<u>1.3.6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΝΟΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>1.5 ΠΕΡΙΛΗΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ Α.ΚΟΥΣΑΘΑΝΑ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>1.5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>1.5.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ</u>	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (Preprocessing) **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.2.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ Α. ΚΟΥΣΑΘΑΝΑ 35

2.2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 37

2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ (SOLUTION) **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.3.1 Ορισμός συνοριακών συνθηκών και φόρτισης..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.3.2 ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ..... 44

2.4 ΜΕΤΑΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ 46

2.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΜΕ COHESIVE ELEMENTS..... 46

2.5.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ COHESIVE ZONE 46

2.5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΡΟΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ COHESIVE ELEMENTS & ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ COHESIVE ZONE 47

2.5.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 47

2.5.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ..... 48

2.5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ COHESIVE ZONE ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.5.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 52

2.5.3.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΔΕΣΜΟΥ & ΤΡΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ... 52

2.5.3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ COHESIVE ZONE..... 54

2.5.3.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ 57

2.5.3.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ (KEYOPTS) . 58

2.5.4 ΜΕΤΑΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ COHESIVE ELEMENTS **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ & ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

2.6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗΣφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

2.6.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

2.6.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΡΩΣΗΣ Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

2.6.2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ 62

2.6.2.3 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ TSAI - WU ...**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.6.2.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.6.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ 67

2.6.3.1 ΕΙΑΓΩΓΗ.....**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

2.6.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ PROGRESSIVE DAMAGE ANALYSIS **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗΣφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ 2D ΜΕ 3D ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ COHESIVE ELEMENTS .Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

3.2.1 ΣΕΙΡΑ A – 100Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

3.2.1.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... 74

3.2.2 ΣΕΙΡΑ A – 200.....Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

3.2.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... 78

3.2.3 ΣΕΙΡΑ A – 300..... 78

3.2.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... 81

3.2.4 ΣΕΙΡΑ B – 100Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

3.2.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... 84

3.2.5 ΣΕΙΡΑ B – 200Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

3.2.5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ..... 87

<u>3.2.6 ΣΕΙΡΑ Β – 300</u>	88
<u>3.2.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	91
<u>3.2.7 ΣΕΙΡΑ ΑΘΙΚΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (INTACT)</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.2.7.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	94
<u>3.2.8 ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ</u>	95
<u>3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	95
<u>3.3.2 ΣΕΙΡΑ Α – 100</u>	95
<u>3.3.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	97
<u>3.3.3 ΣΕΙΡΑ Α – 200</u>	97
<u>3.3.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	99
<u>3.3.4 ΣΕΙΡΑ Α – 300</u>	99
<u>3.3.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	101
<u>3.3.5 ΣΕΙΡΑ Β – 100</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.3.5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	103
<u>3.3.6 ΣΕΙΡΑ Β – 200</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.3.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	74
<u>3.3.7 ΣΕΙΡΑ Β – 300</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.3.7.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	107
<u>3.3.8 ΣΕΙΡΑ INTACT</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.3.8.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	109
<u>3.3.9 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ</u> ..	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ COHESIVE ELEMENTS ΣΤΑ 2D ΜΟΝΤΕΛΑ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4.2 ΣΕΙΡΑ Α – 100</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	113

<u>3.4.3 ΣΕΙΡΑ Α – 200</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	115
<u>3.4.4 ΣΕΙΡΑ Α – 300</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	117
<u>3.4.5 ΣΕΙΡΑ Β – 100</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4.5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	118
<u>3.4.6 ΣΕΙΡΑ Β – 200</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	120
<u>3.4.7 ΣΕΙΡΑ Β – 300</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.4.7.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	122
<u>3.4.8 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.5.1 1^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ-ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.5.1.1 CASE 1</u>	124
<u>3.5.1.2 CASE 2</u>	125
<u>3.5.1.3 CASE 3</u>	126
<u>3.5.2 2^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ-ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.5.2.1 CASE 4</u>	127
<u>3.5.2.2 CASE 5</u>	127
<u>3.5.3 3^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ-ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.5.3.1 CASE 6</u>	128
<u>3.5.3.2 CASE 7</u>	129
<u>3.5.4 4^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ-ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΔΕΣΜΟΥ (COHESIVE ZONE)</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.5.4.1 ΜΕΓΙΣΤΗ ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ σ_{max}</u>	131
<u>3.5.4.2 ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΓΙΑ MODE I (G_{cn})</u>	132

<u>3.5.4.3 ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ τ_{max}</u>	133
<u>3.5.4.4 ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΓΙΑ MODE II (G_{ct})</u>	134
<u>3.5.5 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ</u> Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</u>	135
<u>3.6.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ A 100</u> .. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.6.1.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	136
<u>3.6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ A 200</u> .. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.6.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	136
<u>3.6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ A 300</u> .. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.6.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	137
<u>3.6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ B 100</u> .. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.6.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	138
<u>3.6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ B 200</u> .. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.6.5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	139
<u>3.6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ B 300</u> .. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.6.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	140
<u>3.6.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ INTACT</u> Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.7.1.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	141
<u>3.6.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ</u> ... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.8 ΧΡΗΣΗ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ</u> . Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
<u>3.8.1 ΣΕΙΡΑ INTACT</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

<u>3.8.2 ΣΕΙΡΑ Α 100</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.8.3 ΣΕΙΡΑ Α 200</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.8.4 ΣΕΙΡΑ Α 300</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.8.5 ΣΕΙΡΑ Β 100</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.8.6 ΣΕΙΡΑ Β 200</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.8.7 ΣΕΙΡΑ Β 300</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>3.8.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<u>4.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	149
<u>4.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ</u>	150
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

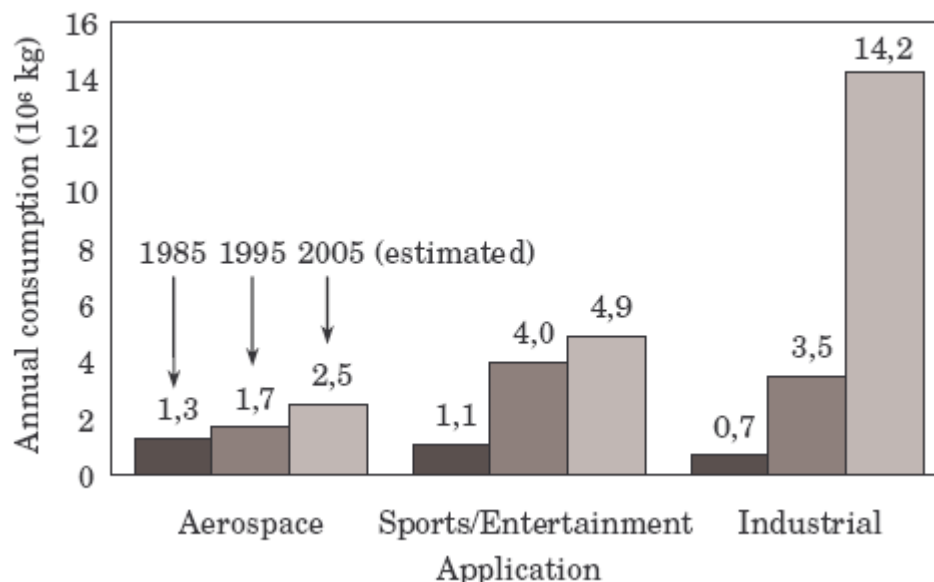
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΣΕΩΣ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση προηγμένων σύνθετων υλικών έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια στον τομέα παραγωγής κατασκευαστικών στοιχείων .Τα σύνθετα υλικά σταδιακά αντικαθιστούν παραδοσιακά υλικά, όπως είναι ο χάλυβας, το αλουμίνιο και το ξύλο, χάρη στις ιδιαίτερες ιδιότητες τους που τα καθιστούν ανώτερα και λειτουργικότερα. Λόγω του αξιοσημείωτα χαμηλού ειδικού βάρους τους, χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές της ειδικής αντοχής και της ειδικής δυσκαμψίας . Αυτό κάνει τα ινώδη σύνθετα υλικά, ειδικότερα αυτά που φέρουν ίνες άνθρακα ή γυαλιού ,ιδεώδη για χρήση σε συγκεκριμένους παραγωγικούς κλάδους. Αρχικά αυτός ο τύπος των υλικών χρησιμοποιούνταν σε εξειδικευμένες και προηγμένες επιστημονικά κατασκευές όπως αυτές που συναντάμε στο χώρο της αεροναυπηγικής. Ωστόσο σήμερα λόγω της τεχνολογικής ανόδου αλλά και της μείωσης του κόστους παραγωγής σύνθετων υλικών, βρίσκουν εφαρμογή και σε τομείς εκτός της αεροναυπηγικής βιομηχανίας όπως είναι η ναυπηγική (από μικρά σκάφη αναψυχής μέχρι ολόκληρα επιβατηγά), η αυτοκινητοβιομηχανία, η ιατρική (π.χ. κατασκευή επιθεμάτων), ο αθλητισμός (

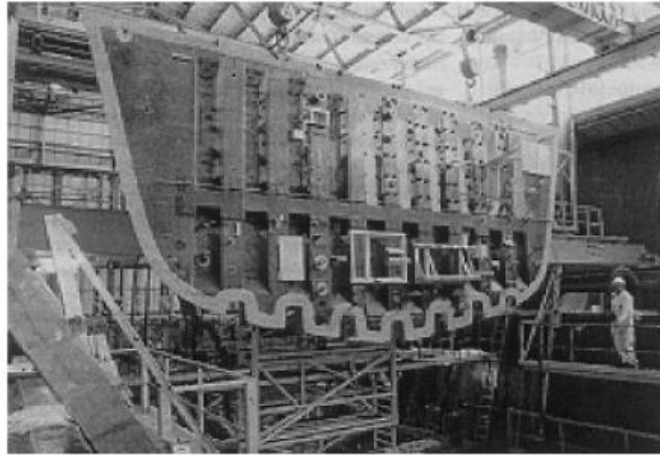
διάφορα εξαρτήματα) και η κατασκευή γεφυρών. Η εικόνα 1.1 που ακολουθεί παρουσιάζει την αυξητική τάση που παρατηρείται στη χρήση σύνθετων υλικών ενισχυμένων από ίνες άνθρακα κατά την τελευταία εικοσαετία σε κάποιους από τους προαναφερθέντες τομείς.



Εικόνα 1.1. Εφαρμογή σύνθετων αποτελούμενων από ίνες άνθρακα κατά τη περίοδο 1985 – 2005 (πηγή : Toray Industries, Tokyo 1999).

Στη ναυπηγική, που αποτελεί και τον τομέα μελέτης μας ,τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή πλοίων μικρότερων των 100 m ,όπως για παράδειγμα σκάφη αναψυχής, αλιευτικά και περιπολικά του λιμενικού, και σε δευτερεύουσες εφαρμογές, όπως στις υπερκατασκευές. Σταδιακά με την πρόοδο της τεχνολογία η χρήση τους επεκτείνεται σε μεγαλύτερου μήκους σκάφη με στόχο να αντικαταστήσουν μεγάλα τμήματα μεταλλικής κατασκευής (π.χ. εγκάρσιες φρακτές και καταστρώματα) μειώνοντας έτσι το συνολικό βάρος του πλοίου. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη μείωση του κατασκευαστικού βάρους είναι η μείωση κατανάλωσης καυσίμου, η αύξηση της μεταφορικής ικανότητας και η μείωση του κέντρου βάρους του πλοίου, που επιδρά θετικά στην ευστάθεια σε διατοιχισμό .

Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε παραδείγματα χρήσης σύνθετων τόσο σε τμήματα κατασκευών του πλοίου όσο και σκάφη εξολοκλήρου κατασκευασμένα από σύνθετα.



Εικόνα 1.2. Φρακτή από σύνθετα υλικά, κατασκευασμένη για εφαρμογή σε πλοίο αποτελούμενο από μεταλλική γάστρα.



Εικόνα 1.3. Κορβέτα του Σουηδικού Ναυτικού κατασκευασμένη από sandwich με πυρήνα από αφρό PVC και ίνες άνθρακα .

Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά, εκτός των πολλών πλεονεκτημάτων που έχουν κρύβουν και κάποια μειονεκτήματα ,το μεγαλύτερο από τα οποία είναι το γεγονός ότι προς το παρόν δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως σε βάθος οι μηχανισμοί ,οι τρόποι και οι λόγοι για τους οποίους αυτά αστοχούν .

Στο πλαίσιο αυτό ακόμα ένα εμπόδιο είναι το γεγονός ότι ο χαρακτηρισμός και η ερμηνεία της συμπεριφοράς των σύνθετων δυσκολεύει, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους.

Το να σχεδιάσουμε ένα νέο σύνθετο δεν απαιτεί μόνο την κατασκευή της γεωμετρίας αλλά και το σχεδιασμό του υλικού εξ αρχής (οι συνδυασμοί τύπων μήτρας ,ινών και τρόπου πλέξης είναι άπειροι). Παραδοσιακά λόγω της μειωμένης γνώσης όσον αφορά τη συμπεριφορά των σύνθετων, η παραπάνω διαδικασία επιτυγχανόταν κάνοντας χρήση διαθέσιμων εμπειρικών δεδομένων και αποτελεσμάτων που είχαν προκύψει από πειράματα. Ωστόσο, το υψηλό κόστος των πειραματικών διαδικασιών για το χαρακτηρισμό των σύνθετων αλλά και το τεράστιο εύρος εφικτών συνδυασμών περιορίζουν αρκετά το πεδίο γνώσης και τη δυνατότητα εφαρμογής των ινωδών σύνθετων υλικών σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Τα τελευταία χρόνια, λύση σε αυτό το πρόβλημα ήρθε να δώσει η χρήση υπολογιστικών πακέτων (π.χ. ANSYS , ABAQUS) τα οποία εκμεταλλεύονται τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθιστούν εφικτή την προσομοίωση των πειραμάτων (τόσο τη γεωμετρική μοντελοποίηση όσο και την επιβολή των διαφόρων φορτίσεων) .

Η παρούσα εργασία κινείται στα πλαίσια της κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευών από ινώδη σύνθετα υλικά τα οποία έχουν ήδη αστοχήσει . Αντικείμενο της αποτελεί ο αποχωρισμός των στρώσεων , ένας συνήθης τρόπος αστοχίας κατασκευών από τέτοια υλικά, και ειδικότερα , η επίδραση αυτού του φαινομένου στη σταδιακή κατάρρευση ολόκληρου του σύνθετου . Επίσης επιχειρείται να γίνει μια ερμηνεία του τρόπου υποβάθμισης των ιδιοτήτων του υλικού , η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στο τρόπο που τελικά το σύνθετο θα αστοχήσει.

Η παραπάνω μελέτη παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον για τα κατασκευαστικά στοιχεία σκαφών από FRP's , οι καταπονήσεις των οποίων είναι δυνατόν να οδηγήσουν τόσο σε αστοχία διαφόρων μορφών, όπως είναι ο αποχωρισμός των στρώσεων ή η κατάρρευση αυτών όσο και σε λυγισμό .

1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΛΥΓΙΣΜΟ

1.2.1 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα συστατικά μέρη από τα οποία αποτελούνται τα ινώδη σύνθετα υλικά είναι η μήτρα (matrix) και οι ενισχυτικές ίνες (fibers) .Οι ίνες μπορούν να τοποθετηθούν με διάφορους τρόπους στη μήτρα , γεγονός που προσδίδει μεγάλη ευκολία στον εκάστοτε κατασκευαστή ή χρήστη .Ενώ οι ίνες είναι αυτές που ουσιαστικά με τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες που διαθέτουν , προσδίδουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά στο σύνθετο, ο ρόλος της μήτρας δεν είναι καθόλου ασήμαντος . Η μήτρα λειτουργεί ως ένα είδος σταθεροποιητή των ιών και ταυτόχρονα τις υποστηρίζει αλλά και τις προστατεύει . Ιδιαίτερα δε ο μηχανισμός με τον οποίο τα διάφορα φορτία φέρονται με διατμητικές τάσεις από τη μήτρα , αποτελεί το σημείο κλειδί της λειτουργίας των συνθέτων καθώς σε περίπτωση που έχουμε αστοχία μιας ίνας αυτή δεν παύει να είναι λειτουργική απλώς το επιπλέον φορτίο φέρεται από άλλες περιοχές της ίνας ή από γειτονικές . Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η αυξημένη αντοχή που παρουσιάζουν τα σύνθετα .

Οι ενισχυτικές ίνες λόγω του τρόπου κατασκευής τους ,διαθέτουν όπως προαναφέρθηκε αυξημένες μηχανικές ιδιότητες όπως μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία στη διεύθυνση του μήκους , ενώ μπορούν να παραλάβουν μόνο εφελκυστικά φορτία χωρίς ωστόσο να είναι ασήμαντη η συνεισφορά τους στις υπόλοιπες τάσεις που μπορεί να δέχεται το υλικό .

Τα περισσότερο διαδεδομένα υλικά για τη κατασκευή ιών είναι το γυαλί ,ο άνθρακας και το aramid , τυπικές ιδιότητες των οποίων παρουσιάζονται στο πίνακα που ακολουθεί :

Πίνακας 1.1. Τυπικές ιδιότητες ενισχυτικών ιών (N.Τσούβαλης , 1998) .

Είδος ίνας	γ ¹	E ²	ν ³	σ_t ⁴	ϵ_t ⁵	α ⁶	κόστος ⁷
		GPa		MPa	%	10 ⁶ °C	\$/lb
Γυαλί-E	2,55	72	0,2	2400	3,0	5,0	1,1
	2,50	88	0,2	3400	3,5	5,6	5,0
Ανθρακας Υ. Α. ^α (Thornell T-40)	1,74	297	-	4100	1,4	-	13,3
Ανθρακας Υ. Α. ^α (Thornell T-700)	1,81	248	-	4500	1,8	-	12,0
Ανθρακας Υ. Α. ^α (Fortafil F-5)	1,80	345	-	3100	0,9	-0,5	13,3
Ανθρακας Υ. Μ. ^β (P-75S)	2,00	520	-	2100	0,4	-1,2	67,0
Ανθρακας Υ. Μ. ^β (P-120)	2,18	826	-	2200	0,3	-	720,0
Aramid (Kevlar® 49)	1,45	124	-	2800	2,5	-2	20

Οι διάφοροι δείκτες του παραπάνω πίνακα έχουν την εξής ερμηνεία :

- ^α Υψηλής αντοχής
- ^β Υψηλού μέτρου ελαστικότητας
- ¹ Ειδικό βάρος
- ² Μέτρο ελαστικότητας του Young
- ³ Λόγος του Poisson
- ⁴ Αντοχή σε εφελκυσμό
- ⁵ Παραμόρφωση μέχρι τη θραύση σε εφελκυσμό
- ⁶ Συντελεστές γραμμικής θερμικής διαστολής
- ⁷ Τιμές 1995

Αντίστοιχα ο πιο διαδεδομένος τύπος μητρώων που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική βιομηχανία είναι αυτός των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών ενώ σε ειδικές περιπτώσεις παρατηρούμε και χρήση θερμοπλαστικών .

Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο στάδιο οι μηχανικές ιδιότητες των ρητινών μπορεί να είναι αρκετά χαμηλότερες από αυτές των ινών όμως τις προστατεύουν και ταυτόχρονα παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και υψηλές θερμοκρασίες .

**Πίνακας 1.2. Τυπικές ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών
(N.Τσούβαλης , 1998).**

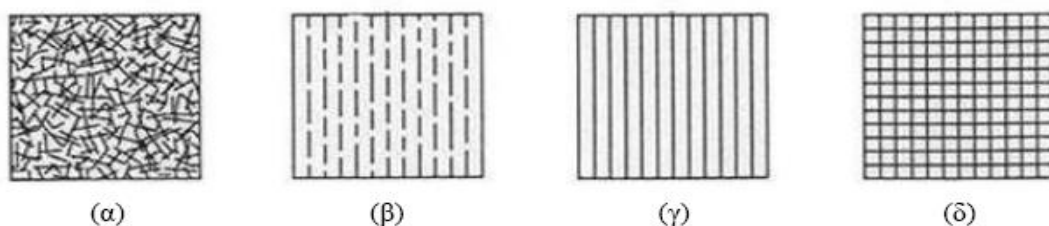
Ρητίνη	γ^1	E^2	ν^3	σ_t^4	ϵ_t^5	σ_c^6	κόστος ⁷
	g/cm ³	GPa		MPa	%	MPa	\$/lb
Πολυεστερική (ορθοφθαλκή)	1,23	3,2	0,36	65	2	130	1,05
Πολυεστερική (ισοφθαλκή)	1,21	3,6	0,36	60	2,5	130	1,19
Βινυλεστερική (Derekane 411-45)	1,12	3,4	-	83	5	120	1,74
Εποξική	1,20	3,0	0,37	85	5	130	3,90
Φαινολική	1,15	3,0	-	50	2	-	1,10

Οι δείκτες στο συγκεκριμένο πίνακα έχουν την εξής ερμηνεία :

- ¹ Ειδικό βάρος
- ² Μέτρο ελαστικότητας του Young
- ³ Λόγος του Poisson
- ⁴ Αντοχή σε εφελκυσμό
- ⁵ Παραμόρφωση μέχρι τη θραύση σε εφελκυσμό
- ⁶ Αντοχή σε θλίψη
- ⁷ Τιμές 1995

Αφού αναλύθηκαν τα συστατικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα ινώδες σύνθετο υλικό μπορούμε πλέον να ασχοληθούμε με τον τρόπο ενίσχυσης.

Οι κυριότεροι τρόποι ενίσχυσης είναι το υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CSM) οι πλεξίδες νημάτων (rovings) ,το υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR) και τα μονοαξονικά υφάσματα (Uni – Directional rovings, UD) . Το υαλοπίλημα είναι ένα «χαλαρό» ύφασμα τυχαίου προσανατολισμού που κατασκευάζεται από κοντές ίνες , συνδεδεμένες μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός ειδικού συνδετικού υλικού . Αντίθετα , τα μονοαξονικά υφάσματα προκύπτουν από την παράλληλη σύνδεση πολλών μακρών ινών , προσανατολισμένων σε μια διεύθυνση . Οι πλεξίδες αποτελούνται από περιορισμένο αριθμό παράλληλα συνδεδεμένων μακρών ινών (1-100) και χρησιμοποιούνται ως έχουν ή συνηθέστερα , πλέκονται κάθετα μεταξύ τους δίνοντας ένα «τραχύ και χοντροκομένο» ύφασμα (υαλοϋφασμα) .Τέλος η πλέξη με απλές ίνες που έχουν υποστεί περιστροφή έχει ως αποτέλεσμα πεπλεγμένα υφάσματα ή υφάσματα «πυκνής πλέξης» . Παρακάτω παραθέτουμε μερικούς από τους προαναφερθέντες τύπους υφασμάτων .



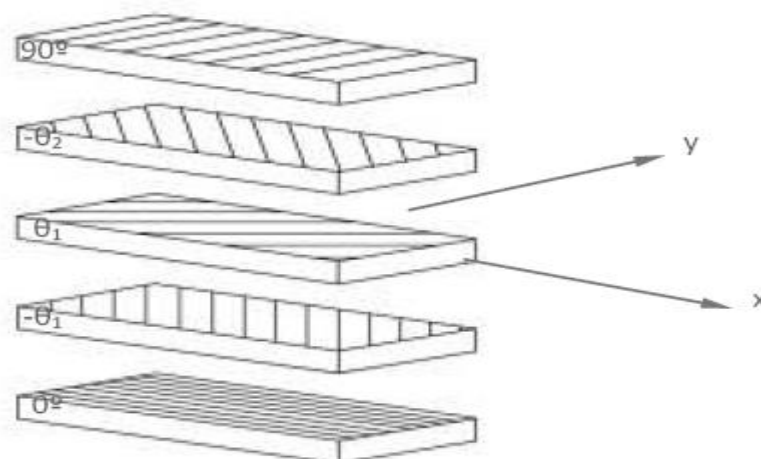
Εικόνα 1.4. Τύποι διάταξης ινών : (α) υαλοπίλημα ,(β) μονοαξονικό ύφασμα με κοντές ίνες ,(γ) μονοαξονικό ύφασμα με μακριές ίνες και (δ) υαλοϋφασμα.

Το στοιχειώδες κατασκευαστικό στοιχείο μιας κατασκευής από ινώδη σύνθετα υλικά είναι η στρώση (lamina) . Στρώση ονομάζουμε μια επίπεδη διαμόρφωση ινών σε μια μήτρα ,όπου οι ενισχυτικές ίνες μπορούν να φέρουν οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες διατάξεις. Κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα κυρίων αξόνων (1,2,3) ,παράλληλων ή κάθετων στις ίνες . Οι άξονες 1 και 2 βρίσκονται στο επίπεδο της , ενώ ο άξονας 3 είναι κάθετος σε αυτό. Επιπλέον ,ο άξονας 1 είναι συνήθως παράλληλος στη διεύθυνση που παρουσιάζονται οι υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες (π.χ για μονοαξονική ενίσχυση ο άξονας 1 συμπίπτει με τον άξονα κατά τον οποίο έχει γίνει η στρώση των ινών) και ο άξονας 2 είναι κάθετος σε αυτήν . Το σύστημα κυρίων αξόνων μιας στρώσης είναι δυνατόν να μη συμπίπτει με εκείνο των γεωμετρικών αξόνων της . Συνεπώς ο άξονας 1 μπορεί να σχηματίζει γωνία με τον άξονα των x , η οποία είναι θετική αντίστροφα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού . Ο προσανατολισμός των κυρίων αξόνων της στρώσης έχει ιδιαίτερη σημασία κατά τη φόρτιση της . Ένα φορτίο στη διεύθυνση ενός κυρίου άξονα συνεπάγεται την ορθοτροπική συμπεριφορά της ,δηλαδή το μέγεθος της παραμόρφωσης της εξαρτάται από τη διεύθυνση της φόρτισης . Αντίθετα ,όταν η στρώση φορτίζεται μη παράλληλα με κάποιον από τους κύριους άξονές της , παρουσιάζει ανισοτροπικό χαρακτήρα ,δηλαδή εκτός της μεταβολής του μεγέθους της παραμόρφωσης της συναρτήσει της διεύθυνσης ,παρατηρούνται συζεύξεις έκτασης – διάτμησης και κάμψης – στρέψης . Από όλα τα παραπάνω συνάγουμε ότι ο προσανατολισμός των στρώσεων είναι καθοριστικός παράγοντας της μηχανικής συμπεριφοράς των πολύστρωτων .

1.2.2 ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΑ

Όπως γίνεται κατανοητό από τα όσα αναπτύχθηκαν στην παραπάνω παράγραφο το βασικότερο κατασκευαστικό στοιχείο που διαμορφώνει μια κατασκευή από σύνθετα υλικά είναι η στρώση. Η χρήση επάλληλων στρώσεων συγκροτεί τα πολύστρωτα ,στα οποία η κάθε στρώση μπορεί να έχει διάφορους προσανατολισμούς των κύριων διευθύνσεων υλικού σε σχέση με τα γεωμετρικά άκρα του πολύστρωτου (Εικόνα 1.4). Τα πολύστρωτα χαρακτηρίζονται από δύο συστήματα συντεταγμένων που είναι, το γεωμετρικό σύστημα αξόνων x,y,z που χαρακτηρίζει ολόκληρο το πολύστρωτο και έχει άξονες παράλληλους με τα άκρα του και το σύστημα αξόνων κύριων αντοχών (ή κυρίων διευθύνσεων υλικού) 1,2,3 που χαρακτηρίζει κάθε στρώση ξεχωριστά και οι άξονες του είναι παράλληλοι με την διεύθυνση των ινών της κάθε στρώσης. Τα πολύστρωτα διακρίνονται βάσει της διεύθυνσης των ινών των στρώσεών τους σε εκείνα με διασταυρούμενες (cross - ply) και εκείνα με διαγώνιες στρώσεις (angle - ply). Στην πρώτη περίπτωση, οι ίνες των στρώσεων ευθυγραμμίζονται με τα γεωμετρικά άκρα του πολύστρωτου(π.χ 0/90) , ενώ στη δεύτερη , μία τουλάχιστον στρώση δεν ικανοποιεί τη συνθήκη αυτή (π.χ. 0/45). Το πολύστρωτο που παρουσιάζεται στην εικόνα 1.4 έχει διαγώνιες στρώσεις. Επιπρόσθετα, ένα πολύστρωτο είναι συμμετρικό όταν για κάθε στρώση στο μισό πάχος του υπάρχει στο άλλο μισό πάχος μία άλλη, συμμετρική ως προς το μέσο επίπεδο στρώση, ίδιου υλικού και προσανατολισμού των ινών. Αντίθετα ,αν τα πρόσημα της γωνίας προσανατολισμού σε κάθε ζεύγος συμμετρικών στρώσεων είναι αντίθετα, τότε καλείται αντισυμμετρικό. Τα πολύστρωτα των παραπάνω τύπων είναι εν γένει ανισοτροπικά, αλλά με αύξηση του αριθμού των στρώσεών τους

(μεγαλύτερου από περίπου οκτώ) τείνουν να αποκτήσουν ορθοτροπικό χαρακτήρα (Τσούβαλης - 1998).



Εικόνα 1.5 . Ανεπτυγμένη όψη ενός πολύστρωτου με στρώσεις διαφορετικών προσανατολισμών (angle - ply).

1.2.2.1 ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

Τα ινώδη σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές εφαρμογές ανήκουν στην κατηγορία των πολύστρωτων. Το χαμηλό ειδικό βάρος τους και οι συνεπαγόμενες υψηλές ειδικές ιδιότητές τους (λόγοι των τιμών των ιδιοτήτων προς το βάρος) αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών ναυπηγικών υλικών καθώς συμβάλλουν στην κατασκευή ελαφρύτερων σκαφών, ανάλογου ή και ανώτερου επιπέδου αντοχής. Οι ιδιότητες των πολύστρωτων είναι στη διεύθυνση των ινών ή κάθετα σε αυτές. Οι τιμές τους σε άλλες διευθύνσεις μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερες εξαιτίας της ανισοτροπικότητας ή συχνότερα, της ορθοτροπικότητας των υλικών αυτών. Το φαινόμενο αυτό αντισταθμίζεται από τη δυνατότητα προσανατολισμού των ενισχυτικών ινών των στρώσεων, άρα και της επίτευξης υψηλής αντοχής και δυσκαμψίας, στις διευθύνσεις των φορτίων. Επίσης τα πολύστρωτα, εκτός από την παραπάνω ευελιξία που διαθέτουν, έχουν και κάποια άλλα βασικά πλεονεκτήματα που τα κάνουν πολύ ανταγωνιστικά και υποσχόμενα υλικά στην ναυπηγική βιομηχανία. Μεταξύ αυτών ξεχωρίζουν η μεγάλη αντίσταση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως το θαλάσσιο, και η εξαιρετική συμπεριφορά έναντι χημικών ενώσεων, όπως τα οξειδωτικά μέσα και οι οργανικές ενώσεις. Επιπλέον, τα υλικά αυτά παρέχουν ευελιξία στην κατασκευή, με αποτέλεσμα μεγάλες και πολύπλοκες κατασκευές να αποτελούνται συχνά από ένα κομμάτι. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα επίτευξης χαμηλών τιμών του συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής, η χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, η εξαιρετική αντοχή σε κόπωση, η απουσία ραφών και ενώσεων, τα πολύ καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης, η εύκολη επισκευή τους και η μικρή συντήρηση που απαιτούν, ιδίως οι μικρές κατασκευές. Επιπλέον χαρακτηριστικά των FRPs είναι το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας του Young και η μικρή δυσκαμψία τους. Από την άλλη ανακύπτουν και κάποια μειονεκτήματα στη

χρήση των πολύστρωτων όπως είναι η δυσκολία και η μεγάλη διάρκεια της επιθεώρησής τους λόγω των μη σταθερών συνθηκών κατασκευής, η πολυπλοκότητα και οι αυξημένες απαιτήσεις των μεθόδων παραγωγής τους, το φαινόμενο του ερπυσμού, η μειωμένη αντοχή σε τριβή και η ευπάθεια σε φωτιά.

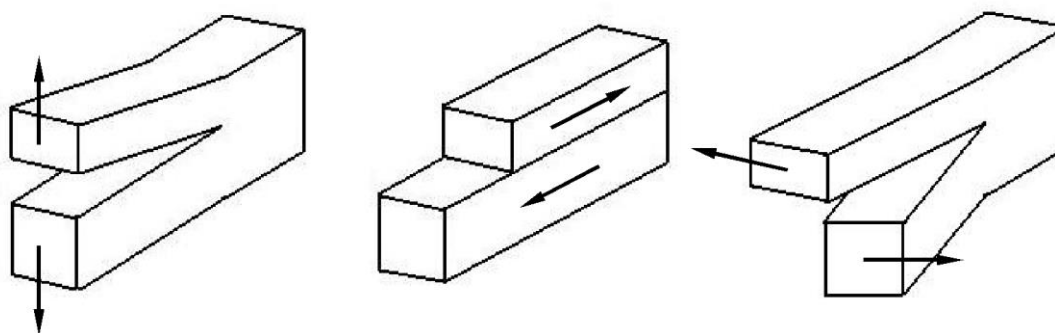
Η χρήση τους στη ναυπηγική περιλαμβάνει την κατασκευή υπερκατασκευών, δεξαμενών και βοηθητικών οργάνων (θόλοι προστασίας οργάνων πλοήγησης, υδροδυναμικά πτερύγια) μεγάλων πλοίων. Επίσης, αποτελούν το βασικό υλικό κατασκευής μικρών σκαφών (βάρκες, σκάφη αναψυχής, σωσίβιες λέμβοι), αλιευτικών, μικρών φορτηγών και επιβατηγών (50 m), πολεμικών σκαφών (ναρκαλιευτικά, περιπολικά, αποβατικά) και σκαφών υψηλής απόδοσης, όπως τα ιστιοπλοϊκά και τα ταχύπλοα.

1.2.3 Ο ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Ένας από τους συνηθέστερους τρόπους αστοχίας ενός πολύστρωτου από ινώδη σύνθετα υλικά είναι ο αποχωρισμός των στρώσεων (delamination). Το αίτιο αποχωρισμού των στρώσεων είναι μία ή περισσότερες τοπικές θραύσεις της μήτρας. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτή η τοπική θραύση μπορεί να είναι διάφοροι. Αρχικά είναι γεγονός ότι οι στρώσεις ενός πολύστρωτου χαρακτηρίζονται εν γένει από διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες λόγω συνήθως των διαφορετικών μεταξύ τους προσανατολισμών. Αυτό έχει ως συνέπεια την τάση κάθε στρώσης να παραμορφωθεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες υπό την επίδραση ενός φορτίου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ορθών και διατμητικών τάσεων μεταξύ της διεπιφάνειας των στρώσεων. Οι διαστρωματικές αυτές τάσεις φτάνουν στις μέγιστες τιμές τους στα άκρα του πολύστρωτου και είναι δυνατόν να υπερβούν το όριο αντοχής του συνδετικού υλικού τους, δηλαδή του υλικού της μήτρας, το οποίο όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως χαρακτηρίζεται από χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Βέβαια οι τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες (π.χ ύπαρξη φυσαλίδων, επιφανειακός τραυματισμός του πολύστρωτου κ.α) που μπορεί να υπάρχουν συντελούν στην επιτάχυνση και υποβοήθηση του φαινομένου. Ιδιαίτερα δε σε περιοχές μακριά από τα άκρα, οι κατασκευαστικές ατέλειες είναι ουσιαστικά ο μοναδικός παράγοντας αποχωρισμού των στρώσεων.

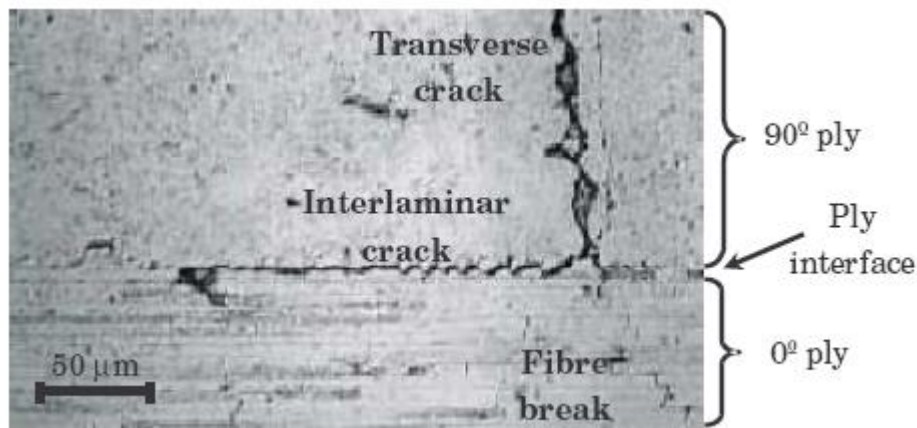
Οι ατέλειες αυτές αποτελούν την απαρχή αστοχίας του πολύστρωτου, καθώς η καταπόνησή του με εναλλασσόμενα ή κρουστικά φορτία οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους αυτών, στην ένωσή τους με άλλες και τελικά, στον τοπικό αποχωρισμό των στρώσεων. Ο αποχωρισμός δύο στρώσεων συμβαίνει σε μία περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ αυτών με τη δημιουργία δύο ξεχωριστών τμημάτων του πολύστρωτου εκατέρωθεν αυτής. Η περιοχή αυτή είναι διαφόρων σχημάτων και μεγεθών και μπορεί να βρίσκεται σε διάφορες θέσεις κατά το μήκος, το πλάτος και το πάχος του πολύστρωτου. Επιπλέον, μία κατασκευή είναι δυνατόν να αστοχήσει με αυτόν τον τρόπο σε περισσότερες από μία περιοχές. Σε κάθε περίπτωση, το αρχικό πολύστρωτο χωρίζεται σε δύο υποπολύστρωτα (sublaminae) στην περιοχή του αποχωρισμού, τα οποία αποτελούνται από μικρότερο αριθμό στρώσεων. Οι λιγότερες στρώσεις των υποπολύστρωτων προκαλούν μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και αύξηση της ανισοτροπικότητας τους, καθιστώντας πιθανές τις μεγαλύτερες και εντονότερα συζευγμένες παραμορφώσεις αυτών. Η ελευθερία παραμόρφωσής τους μπορεί να οδηγήσει σε φορτίσεις μεταξύ αυτών, λόγω της παρεμπόδισης της παραμόρφωσης του ενός από το άλλο, ή στην περαιτέρω θραύση

της μήτρας και τη διεύρυνση της επιφάνειας του αποχωρισμού. Οι βασικοί τύποι αστοχίας των υποπολύστρωτων είναι τρεις και φαίνονται στην εικόνα 1.5 που ακολουθεί. Αυτοί είναι το άνοιγμα, το σχίσσιμο και το γλίστρημα. Το άνοιγμα είναι η απομάκρυνση των δύο υποπολύστρωτων μεταξύ τους που έχει και σαν αποτέλεσμα να γίνεται και διεύρυνση του αποχωρισμού. Χαρακτηριστικό μέγεθος της διεύρυνσης της επιφάνειας του αποχωρισμού των στρώσεων είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας παραμόρφωσης (strain energy release rate) και εξαρτάται από τον τύπο της σχετικής παραμόρφωσης των πολύστρωτων. Το σχίσσιμο ορίζεται ως η περίπτωση που τα δύο υποπολύστρωτα κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση παράλληλα στο y άξονα ενώ το γλίστρημα ως προς τον x άξονα. Συχνά τρόπος αστοχίας ενός πολύστρωτου είναι και συνδυασμός των παραπάνω περιπτώσεων. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τη μικρότερη διασπορά των τάσεων διαμέσου της μήτρας λόγω της τοπικής θραύσης της, οδηγούν στην εξασθένηση της αντοχής του πολύστρωτου. Σε αυτό συμβάλλει επίσης η συγκέντρωση τάσεων στα όρια της επιφάνειας του αποχωρισμού.



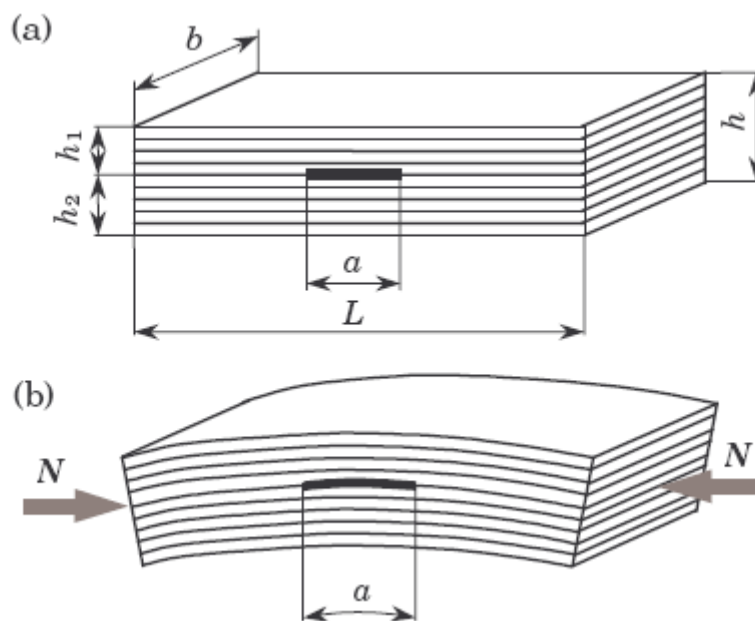
Εικόνα 1.6. Σχηματική αναπαράσταση των βασικών τύπων παραμόρφωσης των υποπολύστρωτων : (α) άνοιγμα ,(β) γλίστρημα ,(γ) σχίσσιμο.

Η θέση που θα ξεκινήσει ο αποχωρισμός σε σχέση με τη διάταξη των στρώσεων παίζει ουσιώδη ρόλο στο ρυθμό διάδοσης του (Greenhalgh & Singh , 1999). Σύμφωνα με το Bolotin (1996 & 2001) μπορούμε να θεωρήσουμε δύο τύπους αποχωρισμών : τους εσωτερικούς και τους επιφανειακούς αποχωρισμούς. Οι εσωτερικοί αποχωρισμοί κάνουν την εμφάνιση τους στο εσωτερικό του πολύστρωτου , στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων και μπορεί να οφείλονται είτε στη ρωγμάτωση της μήτρας είτε σε αστοχία της διεπιφάνειας. Είναι σύνηθες φαινόμενο να παρατηρούμε εμφάνιση αποχωρισμού στη διεπιφάνεια στρώσεων με προσανατολισμό $0/90$ μετά από εγκάρσια διάδοση της ρωγμής στη μήτρα της στρώσης με προσανατολισμό 90° . Στην εικόνα 1.6 που ακολουθεί παρουσιάζεται η παραπάνω συμπεριφορά.



Εικόνα 1.7. Τμήμα από πολύστρωτο αποτελούμενο από διασταυρούμενες στρώσεις μετά από εφαρμογή αξονικής φόρτισης (Gamstedt & Sjogren , 2002).

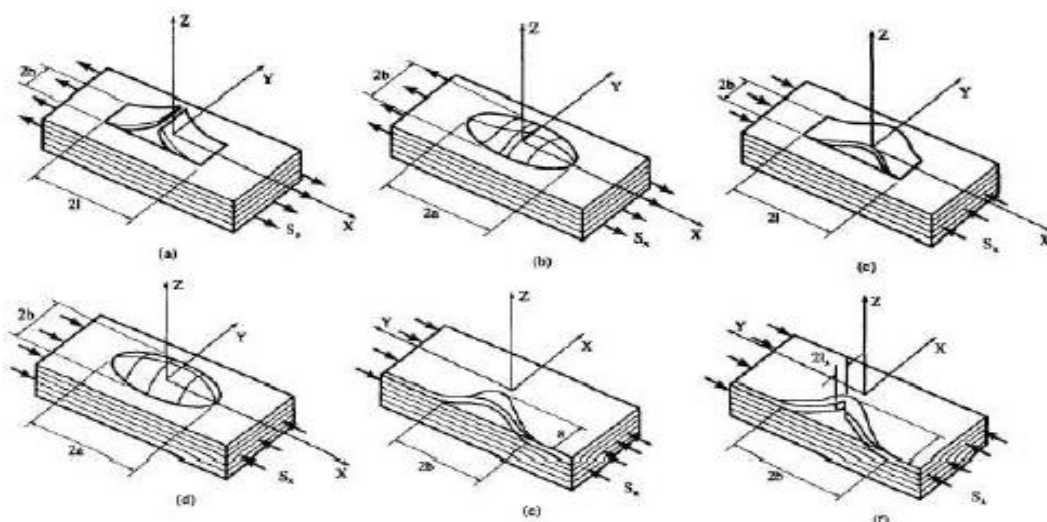
Η εμφάνιση εσωτερικών αποχωρισμών εξασθενεί τη δυνατότητα του πολύστρωτου να φέρει εξωτερικές φορτίσεις . Ειδικότερα όταν ασκούμε κάποιο θλιπτικό φορτίο ,επηρεάζεται έντονα η συνολική ελαστική συμπεριφορά του σύνθετου κάτι που φαίνεται καλύτερα στην εικόνα 1.7 . Παρόλο που ο αποχωρισμός ουσιαστικά χωρίζει το πολύστρωτο σε δυο επιμέρους υποπολύστρωτα ,δεν παύει να υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των δύο μερών .Σε αυτή την αλληλεπίδραση οφείλεται το γεγονός της ομοιόμορφης παραμόρφωσης .



Εικόνα 1.8. Εσωτερικός αποχωρισμός : (α) αστοχία κατά μήκος της στρώσης (β) επιρροή στην ολική ευστάθεια.

Από την άλλη οι επιφανειακοί αποχωρισμοί , όπως γίνεται αντιληπτό και από το όνομα τους εμφανίζονται κοντά στην επιφάνεια του πολύστρωτου και η ερμηνεία τους είναι δυσκολότερη από ότι των εσωτερικών .Εδώ η παραμόρφωση του αποχωρισμένου τμήματος επηρεάζεται λιγότερο από τη παραμόρφωση του υπόλοιπου πολύστρωτου . Έτσι σε πολλές περιπτώσεις το αποχωρισμένο τμήμα δεν

ακολουθεί τη παραμόρφωση του υπόλοιπου πολύστρωτου (π.χ. περίπτωση τοπικού λυγισμού παρακάτω) . Συνεπώς στη περίπτωση των επιφανειακών αποχωρισμών πρέπει να ληφθεί υπόψη εκτός από το ρυθμό αύξησης τους και η τοπική ευστάθεια. Ο Bolotin (1996 & 2001) κατηγοριοποίησε τους διάφορους τύπους επιφανειακών αποχωρισμών που εμφανίζονται σε πλάκες αποτελούμενες από σύνθετα υλικά υπό την επίδραση διαφόρων φορτίσεων (εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.9. Επιφανειακοί αποχωρισμοί : (α) ανοιχτός σε εφελκυσμό ,(β) κλειστός σε εφελκυσμό ,(γ) ανοιχτός με λυγισμό ,(δ) κλειστός με λυγισμό ,(ε) ακραίος λυγισμός ,(στ) ακραίος λυγισμός με επακόλουθη ρωγμάτωση.

Μετά την εμφάνισή τους ,και οι δύο τύποι αποχωρισμού μπορούν να διαδοθούν κάτω από την επίδραση είτε στατικών φορτίσεων είτε λόγω του φαινομένου της κόπωσης . Ιδιαίτερα στις ναυπηγικές κατασκευές που μας ενδιαφέρουν ,η κόπωση λόγω κυματισμών και τα κρουστικά φορτία λόγω σφυρόκρουσης και ατυχημάτων, όπως πτώσεις αντικειμένων, συγκρούσεις και προσαράξεις, είναι δυνατόν να προκαλέσουν αποχωρισμό των στρώσεων σε πολύστρωτα που χρησιμοποιούνται στον πυθμένα, στο κατάστρωμα και στις φρακτές ενός σκάφους. Στις ναυπηγικές κατασκευές ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η επίδραση του αποχωρισμού στο λυγισμό, φαινόμενο που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά των κατασκευαστικών στοιχείων της γάστρας ενός σκάφους και το οποίο αναλύουμε ακριβώς παρακάτω .

1.2.4 ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

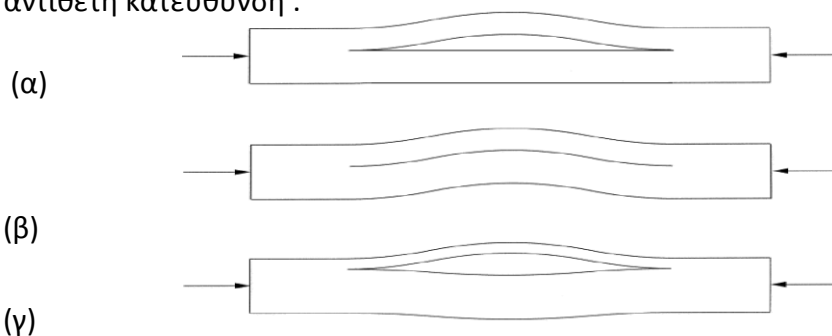
Βασική προϋπόθεση της σχεδίασης μιας κατασκευής αποτελεί η ικανοποίηση διαφόρων κριτηρίων αστοχίας ,τα οποία καθορίζουν μέγιστα όρια τόσο για τα φορτία (τάσεις) που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή όσο και για τις παραμορφώσεις (βέλος κάμψης) που μπορεί να υποστεί. Μεταξύ των παραπάνω κριτηρίων αυτά που χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής είναι τα σχετιζόμενα με το φαινόμενο του λυγισμού (buckling) .

Ο λυγισμός αποτελεί φαινόμενο μη ευσταθούς ισορροπίας μίας κατασκευής, η οποία υπόκειται σε αξονική ή επίπεδη καταπόνηση. Για μικρά φορτία, η κατάσταση ισορροπίας είναι ευσταθής, οπότε η κατασκευή επιστρέφει στην αρχική μορφή της μετά την αποφόρτιση, ενώ η απόκρισή της είναι γραμμική. Όταν όμως τα φορτία γίνουν αρκετά μεγάλα, η κατάσταση ισορροπίας παύει να είναι ευσταθής και η

κατασκευή υφίσταται παραμορφώσεις (οι οποίες αποκτούν πλέον μόνιμο χαρακτήρα) κάθετα στη διεύθυνση ή στο επίπεδο της φόρτισης. Επιπλέον, η συμπεριφορά της γίνεται μη γραμμική, ενώ είναι πιθανή η μείωση της αντοχής της λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων. Το σημείο έναρξης της απόκλισης της κατασκευής από την αρχική επίπεδη μορφή της αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή του φορτίου, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού (critical buckling load, P_{cr}), το οποίο είναι εν γένει μικρότερο από το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή. Ως επί το πλείστον, τάση προς λυγισμό παρουσιάζουν κατασκευές με μία ή δύο διαστάσεις σημαντικά μικρότερες από την τρίτη, όπως οι δοκοί. Στις δοκούς οι διαστάσεις του πάχους και του πλάτους είναι σημαντικά μικρότερες από αυτή του μήκους. Μία κατασκευή θεωρείται δοκός όταν ο λόγος L/B είναι ίσος ή μεγαλύτερος από 10. Η διάσταση του πάχους θεωρείται αμελητέα. Στη ναυπηγική βιομηχανία, στη μελέτη της διαμήκου αντοχής, για την εξαγωγή των πρωτεύουσών τάσεων, το πλοίο αναπαρίσταται σαν μία δοκός. Έτσι είναι κατανοητό ότι η μελέτη λυγισμού πολύστρωτων δοκών και η κατανόηση των τρόπων αστοχίας τους είναι βασικό βήμα για την κατασκευή σκαφών από υλικά τέτοιας κατηγορίας. Σε περιπτώσεις δε που τα μήκη των υπό μελέτη κατασκευών μεγαλώνουν, ο λυγισμός παίζει ακόμα μεγαλύτερο ρόλο.

Η σχετική ελευθερία παραμόρφωσης που έχουν τα πολύστρωτα λόγω του σχετικά χαμηλού σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά μέτρου ελαστικότητας του Young και της μειωμένης δυσκαμψίας τους, όπως επίσης και τα κρουστικά και θλιπτικά φορτία στα οποία υπόκεινται έχει σαν αποτέλεσμα την συχνή εμφάνιση του φαινομένου του λυγισμού όπως επίσης και του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων. Λυγισμός μπορεί να εμφανιστεί με τρεις μορφές. Αυτές οι μορφές είναι ο γενικός, ο τοπικός και ο μικτής μορφής λυγισμός (εικόνα 1.9).

Ο γενικός λυγισμός (global buckling) εμφανίζεται όταν τα δύο υποπολύστρωτα λυγίζουν προς την ίδια κατεύθυνση με ίσα βέλη κάμψης, ο τοπικός λυγισμός (local buckling) όταν μόνο το ένα λυγίζει, ενώ το άλλο δεν παραμορφώνεται και ο μικτής μορφής (mixed mode buckling), όταν το καθένα λυγίζει ξεχωριστά προς την ίδια ή την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 1.10: Σχηματική αναπαράσταση διαφόρων τύπων λυγισμού μίας πλάκας: (α) τοπικός (local mode), (β) γενικός (global mode) και (γ) μεικτής μορφής (mixed mode).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το φαινόμενο του λυγισμού μίας δοκού που έχει υποστεί αποχωρισμό των στρώσεων της είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την ασφάλεια σκαφών από πολυστρωτα υλικά. Η δυνατότητα επιμέρους λυγισμού των εύκαμπτων υποπολύστρωτων της καθιστά πιθανή την αστοχία της για σχετικά χαμηλά επίπεδα καταπονήσεων, λόγω υπέρβασης των επιτρεπόμενων ορίων παραμόρφωσης. Επιπλέον, στην περίπτωση τοπικού λυγισμού, είναι δυνατόν να υπάρξει περαιτέρω διεύρυνση της επιφάνειας του αποχωρισμού, ενώ οι μόνιμες παραμορφώσεις και η πιθανή αστοχία των υποπολύστρωτων, εξαιτίας των υψηλών τάσεων που αναπτύσσονται κατά το λυγισμό, έχουν ως αποτέλεσμα την εξασθένηση της αντίστασης της δοκού σε νέες καταπονήσεις. Συνεπώς, η γνώση του τρόπου με τον οποίο επιδρούν οι παράμετροι του αποχωρισμού των στρώσεων στο λυγισμό των δοκών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή σχεδίαση σκαφών από πολυστρωτα υλικά.

1.2.5 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ

Η πλειοψηφία των μηχανικών και των στατικών στοιχείων που βρίσκονται σε λειτουργία είναι αντιμέτωπες με ένα πλήθος διαφορετικών φορτίσεων ,τόσο όσον αφορά το είδος τους όσο και το μέγεθός τους. Η μηχανική κόπωση και η συνεπαγόμενη υποβάθμιση του υλικού είναι υπεύθυνες για τις περισσότερες αστοχίες. Για αυτό το λόγο η κόπωση αποτελεί αποφασιστικό παράγοντα για την διάρκεια και την αντοχή που θα έχει μια κατασκευή.

Όπως έχουμε αναφέρει επανειλημμένως παραπάνω, τα τελευταία χρόνια είναι ραγδαία η χρήση ινωδών συνθέτων υλικών διαφόρων τύπων για τη κατασκευή μιας μεγάλης γκάμας στοιχείων. Έτσι προκύπτει η ανάγκη γνώσης του τρόπου αντίδρασης των κατασκευών αυτών από σύνθετα στις διάφορες καταπονήσεις.

Παραδοσιακά ο σχεδιασμός των σύνθετων υλικών και η δυνατότητα τους να φέρουν κυκλικές φορτίσεις βασιζόταν σε ένα παραδοσιακό και ημι-εμπειρικό τρόπο ,όπου γινόταν αξιοποίηση εργαστηριακών αποτελεσμάτων. Ωστόσο εξαιτίας της δυνατότητας που έχουμε από τη φύση των σύνθετων για τεράστια αριθμό δυνατών συνδυασμών (σε σχέση με τη σειρά των στρώσεων, τον προσανατολισμό και τη πλέξη των ινών, το είδος αυτών και της μήτρας), είναι στη πράξη αδύνατο να έχουμε πειραματικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις. Επιπλέον η υποβάθμιση που υφίσταται ένα σύνθετο διαφέρει αρκετά από αυτή των παραδοσιακών υλικών εξαιτίας της ανισοτροπικής συμπεριφοράς και της έμφυτης ανομοιογένειας που παρουσιάζουν τα πρώτα. Η μηχανική υποβάθμιση σε ένα μεταλλικό υλικό ορίζεται με βάση την ανάπτυξη μιας αρχικής ρωγμής μέχρι αυτή να φτάσει μια κρίσιμη τιμή. Στα πολυστρωτα πάλι ,η διαδικασία υποβάθμισης των ιδιοτήτων περιλαμβάνει διάφορους μη τοπικούς μηχανισμούς αστοχίας που οδηγούν στη τελική κατάρρευση. Οι συνηθέστεροι τέτοιοι μηχανισμοί είναι το σπάσιμο ή ο λυγισμός των ινών, η ρωγμάτωση της μήτρας ,ο αποχωρισμός μεταξύ μήτρας και ίνας και ο αποχωρισμός μεταξύ γειτονικών στρώσεων (delamination) ,ένα φαινόμενο το οποίο αναλύσαμε εκτενώς παραπάνω.

Η εμφάνιση μια διαστρωματικής ρωγμής ή ενός αποχωρισμού δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το συγκεκριμένο πολυστρωτο δεν μπορεί να φέρει πλέον άλλα φορτία απλώς υπονοεί μια σημαντική μείωση της λειτουργικότητάς του. Οι

αποχωρισμοί υποβοηθούν το πρόωρο λυγισμό της κατασκευής ,την εισαγωγή υγρασίας στα κενά που σχηματίζονται ,την υποβάθμιση της αντοχής ,τη μείωση της κοπωτικής ζωής του σύνθετου κτλ. Καθώς ο παραπάνω μηχανισμός αστοχίας μπορεί να εμφανιστεί μεταξύ δύο εσωτερικών στρώσεων ενός πολύστρωτου καθίσταται δύσκολη η εύρεση των διαστρωματικών ρωγμών και η αντιμετώπιση της περαιτέρω υποβάθμισης του υλικού .

Η ύπαρξη των παραπάνω προβλημάτων που προκύπτουν από την εμφάνιση των αποχωρισμών στα σύνθετα ,δυσκολεύει τη χρήση τους σε τομείς όπου οι απαιτήσεις είναι υψηλές (π.χ. η αεροναυπηγική) .

Παρόλο που έχουν γίνει πολλές έρευνες και δημοσιεύσεις πάνω στο αντικείμενο , υπάρχουν ακόμα αρκετές γκρίζες ζώνες. Σύμφωνα με τους Pagano και Schoerppner (2000), αυτός ο τύπος αστοχίας " έχει συχνά αναφερθεί ότι αποτελεί το πιο επίφοβο τρόπο αστοχίας για κατασκευές από σύνθετα υλικά ". Στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά τα οποία υφίστανται καταπονήσεις ,ο αποχωρισμός είναι η κυριότερη αιτία μείωσης της διάρκειας ζωής τους (Wang , 1983/Chan , 1992/Carlsson & Byron Pipes , 1997). Επιπλέον οι διεπιφανειακές ρωγματώσεις αποτελούν τη κυριότερη μορφή αστοχίας σε κατασκευές που υφίστανται θλιπτικά φορτία (Abrate,1991 & 1994 / Pavier & Clarke , 1996) .

1.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ανάπτυξη των ινωδών σύνθετων υλικών κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 ετών αποτέλεσε μία έκρηξη της τεχνολογίας. Του γεγονότος αυτού προηγήθηκε η δυνατότητα της κατασκευαστικής βιομηχανίας για ανάπτυξη και κατασκευή ινών υψηλής αντοχής και διαφόρων τύπων. Ωστόσο τα πλεονεκτήματα των σύνθετων έναντι των συμβατικών υλικών ήταν γνωστά από τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα ενώ παρατηρούμε από τότε (1936) εφαρμογές στην αεροναυπηγική. Η χρήση των FRP's στις ναυπηγικές κατασκευές χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1950 ,οπότε πραγματοποιήθηκε μαζική παραγωγή μικρών σκαφών από πολυεστερική ρητίνη με ενίσχυση ινών γυαλιού (Strong - 2002). Έκτοτε παρατηρείται μία τάση αντικατάστασης των παραδοσιακών υλικών από αυτά, με αποτέλεσμα σκάφη από FRP's να περιλαμβάνονται στους στόλους όλων των μεγάλων χωρών. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας το 60% των νηολογημένων στην Ιαπωνία αλιευτικών σκαφών ήταν από πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Glass fibre Reinforced Plastics , GRP's) , συμπεριλαμβανομένων των σκαφών με μήκος μέχρι 45m (Τσούβαλης - 1998).

Καθοριστικός παράγοντας της ευρείας και διαρκώς αυξανόμενης χρήσης των ινωδών σύνθετων υλικών είναι η κατανόηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς κατασκευών από τέτοια υλικά υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης που αναμένεται να συναντήσουν κατά τη λειτουργία τους. Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα εδάφια, τα κατασκευαστικά στοιχεία της γάστρας ενός σκάφους , κατασκευασμένης από FRP's , υπόκεινται σε σύνθετες καταπονήσεις, ικανές να προκαλέσουν το λυγισμό αυτών, αλλά και αστοχία με τη μορφή του αποχωρισμού των στρώσεών τους. Συνεπώς, η διερεύνηση του λυγισμού πολύστρωτων δοκών και πλακών και της

επίδρασης τού παραπάνω τρόπου αστοχίας σε αυτόν είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή σχεδίαση και λειτουργία των σκαφών.

Ένα πολύστρωτο από ινώδη σύνθετα υλικά μπορεί υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης να αστοχήσει λόγω θραύσης των ινών ή της μήτρας του, αποσύνδεσης αυτών ή αποχωρισμού των στρώσεων του. Η πρώτη μελέτη πάνω στο πρόβλημα του αποχωρισμού των στρώσεων έγινε από τον Obreimoff (1930), ο οποίος μελέτησε τον τρόπο αστοχίας μεταξύ των στρώσεων. Πιο πρόσφατα, έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για το μηχανισμό που συνοδεύει το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων, καθώς τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται σε όλες και περισσότερες κατασκευές. Η βιβλιογραφία σχετικά με τον αποχωρισμό των στρώσεων σε πολύστρωτα σύνθετα υλικά περιλαμβάνει πολλές θεωρητικές, φαινομενολογικές και αριθμητικές προσεγγίσεις. Η εμφάνιση και η ανάπτυξη των αποχωρισμών καθώς και οι αιτίες που τους προκαλούν, έχουν αποτελέσει το αντικείμενο πολλών μελετών και μοντέλων. Κάποιες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην εμφάνιση και/ή την ανάπτυξη των διεπιφανειακών ρωγμών υπό την επίδραση στατικών φορτίσεων ενώ άλλες ασχολούνται περισσότερο με την εκκίνηση και την ανάπτυξη αστοχιών λόγω της κόπωσης. Είναι λοιπόν επόμενο να υπάρχει ένας τεράστιος όγκος από μελέτες, βιβλία και δημοσιεύσεις σχετικά με το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων και τα όσα αυτό συνεπάγεται. Στη συνέχεια ακολουθεί μια επιδερμική αναφορά σε διάφορες εργασίες-μελέτες που έχουν ασχοληθεί με το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων αλλά και με τη σταδιακή υποβάθμιση των ιδιοτήτων του πολύστρωτου.

1.3.2 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Στις περισσότερες δημοσιεύσεις που ασχολούνται με το πρόβλημα του αποχωρισμού των στρώσεων στα σύνθετα, θεωρείται ότι η διαστρωματική ρωγμή αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο γειτονικών στρώσεων. Η υπόθεση της συγκεκριμένης διεπιφάνειας έχει προκύψει μετά από διάφορα πειράματα, όπου έχει παρατηρηθεί ένα πλούσιο στρώμα ρητίνης μεταξύ των στρώσεων ενώ ταυτόχρονα το να θεωρήσουμε την ύπαρξη διευκολύνει τη μελέτη. Σε αυτό το πλαίσιο έχουν αναπτυχθεί θεωρίες που προσπαθούν να εξηγήσουν τη συμπεριφορά των στρώσεων (effective modulus theory, EMT). Οι συγκεκριμένες θεωρίες υποθέτουν ότι οι στρώσεις είναι ανισοτροπικές αλλά και ομογενείς. Επομένως το φαινόμενο του αποχωρισμού θεωρείται σαν μια διαδικασία θραύσεως μεταξύ δύο ομογενών στρώσεων, παρά το αποτέλεσμα τάσεων και μικρομηχανισμών στο εσωτερικό του πολύστρωτου. Προφανώς η EMT δεν μπορεί να ερμηνεύσει την εντατική κατάσταση στη κεφαλή της ρωγμής του αποχωρισμού κάτι που δεν εμποδίζει την εφαρμογή της στη πράξη. Έρχονται άλλωστε και διάφορες πειραματικές μελέτες να στηρίξουν τα όσα υποθέτει και να τη καταστήσουν εφαρμόσιμη. Ένα παράδειγμα είναι το κριτήριο αστοχίας των Whitney & Nuismer (1974), το οποίο προσπαθεί να προβλέψει την εμφάνιση των αποχωρισμών βασιζόμενο στους υπολογισμούς των τάσεων σε επίπεδο στρώσεων. Ο Wang (1979) και ο Kim με το Hong (1986) υπέθεσαν την ύπαρξη μιας στρώσης από μήτρα στη περιοχή της διεπιφάνειας, θεωρώντας δηλαδή ότι η ρωγμή διαδίδεται σε ένα ομογενές υλικό.

Οι πρώτες μελέτες για τη διαστρωματική εμφάνιση ρωγμών άρχισαν να διαμορφώνονται προς το τέλος της δεκαετίας του 60 και στις αρχές του 70. Ο Hayashi (1967) και ο Purro με τον Evensen (1970) ερεύνησαν θεωρητικά την εμφάνιση αποχωρισμού των στρώσεων στα ελεύθερα άκρα ενός πολύστρωτου. Μια σημαντικότερη ώθηση στη κατανόηση του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων έδωσε η μελέτη των Foye και Baker (1970). Στη μελέτη τους παρατηρούν την εξάρτηση της αντοχής αλλά και του τρόπου αστοχίας πολύστρωτων τα οποία αποτελούνται από όμοιες στρώσεις οι οποίες όμως έχουν διαταχτεί με διαφορετική σειρά. Η επίδραση της σειράς με την οποία έχουν τοποθετηθεί οι στρώσεις στο πολύστρωτο, αποδίδεται στις εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των στρώσεων.

Ακόμη μια σημαντική και ολοκληρωμένη μελέτη πάνω στην εμφάνιση του αποχωρισμού των στρώσεων, παρουσίασαν οι Crasto και Kim (1997). Οι συγκεκριμένοι μελετητές διεξήγαγαν πειράματα που αποσκοπούσαν στη δημιουργία αποχωρισμού, σε πολύστρωτα που έφεραν ενίσχυση σε διάφορες διευθύνσεις, τα οποία υποβλήθηκαν σε διάφορων ειδών φορτίσεις και για διάφορα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας. Κάνοντας χρήση ενός κριτηρίου αστοχίας που υπολογίζει τα επίπεδα φορτίσεων αλλά και τη περιοχή εμφάνισης του αποχωρισμού, κατάφεραν να έρθουν σε ικανοποιητικότερη σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

1.3.3 ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΗ ΜΗΤΡΑ

Κάποιες μελέτες επικεντρώνονται στην εμφάνιση του αποχωρισμού των στρώσεων, ως επακόλουθο μιας προγενέστερης αστοχίας στο πολύστρωτο. Αυτή είναι η περίπτωση αποχωρισμού μετά από τη διάδοση κάποιας ρωγμής στη περιοχή της μήτρας. Πάνω σε αυτό το θέμα έχουν γίνει πάρα πολλές μελέτες, όπως αυτή των Kashtalyan & Soutis (2002), η οποία το αναλύει αρκετά λεπτομερώς. Είναι γεγονός ότι στις περισσότερες μελέτες που ασχολούνται με το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων, μελετάται ο σχηματισμός ρωγμών στη μήτρα, στη στρώση όπου οι ίνες είναι σε διεύθυνση 90° . Στην εργασία των Crossman και Wang (1982) μελετάται ο σχηματισμός εγκάρσιων ρωγμών και η δημιουργία αποχωρισμού των στρώσεων σε ισοσταθμισμένα συμμετρικά πολύστρωτα από ίνες γραφίτη και εποξική ρητίνη $[\pm 25/90_n]_s$, όπου $n=0.5, 1, 2, 3, 4, 6$ και 8 . Για $n \geq 4$ παρατηρήθηκε, ότι το πολύστρωτο υφίσταται αρκετά μικρότερη παραμόρφωση μέχρι την εμφάνιση του αποχωρισμού. Η εμφάνιση και η ανάπτυξη αποχωρισμών σε πολύστρωτα άνθρακα/ρητίνης με ακολουθία στρώσεων $[\pm(30)_2/90/90]_s$ κάτω από την επίδραση κοπωτικών και στατικών φορτίσεων, αναπτύχθηκε από τον O'Brien (1982). Η αντοχή του πολύστρωτου ελαττωνόταν γραμμικά καθώς το μέγεθος του αποχωρισμού αυξανόταν. Οι Takeda και Ogihara (1994) παρατήρησαν την εμφάνιση και συνέχεια την ανάπτυξη των τοπικών αποχωρισμών που ξεκινούσαν από εγκάρσιες ρωγμές της μήτρας σε πολύστρωτα γραφίτη/ρητίνης αποτελούμενα από διασταυρούμενες στρώσεις $[0/90_n]_s$, όπου $n=2, 4$ και 6 . Τα πειράματα που διεξήγαγαν έδειξαν ότι οι αποχωρισμοί εμφανίζονταν και αναπτύσσονταν με μεγαλύτερη ταχύτητα όσο ο αριθμός των στρώσεων των 90° αυξανόταν.

Στη συνέχεια ακολούθησαν και άλλες μελέτες που προσπάθησαν να αναλύσουν περαιτέρω την εξάρτηση της εκκίνησης του φαινομένου του αποχωρισμού με την ύπαρξη ρωγμών στη μήτρα αλλά και τη διαδοχή των στρώσεων στο πολύστρωτο [(Nairn & Hu , 1992) , (Armanios , 1991) , (Zhang,1999)] .

1.3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Τα τελευταία χρόνια, έχει καταστεί εφικτή η επίλυση διαφόρων προβλημάτων που σχετίζονται με το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων ,με εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων αλλά και άλλων αριθμητικών μεθόδων. Επίσης η ανάπτυξη ισχυρών υπολογιστικών πακέτων (π.χ ANSYS & ABAQUS) κάνει ακόμα πιο εύκολη τη μοντελοποίηση των διαφόρων προβλημάτων.

Από τους πρώτους που χρησιμοποίησαν πεπερασμένα στοιχεία ήταν οι Pagano και Pipes (1970) οι οποίοι προσπάθησαν να εξηγήσουν αριθμητικά την εμφάνιση αποχωρισμών στα ελεύθερα άκρα. Ο Rubicki (1971) μελέτησε το ίδιο φαινόμενο κάνοντας χρήση 3D ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ,συνδυάζοντας τις εντατικές σχέσεις του Maxwell. Επίσης , ο Herakonich et al. (1976) ανέπτυξε ένα 2D μοντέλο με πεπερασμένα στοιχεία το οποίο λάμβανε υπόψη την κατανομή των αξονικών μετατοπίσεων. Ωστόσο όλες οι παραπάνω μελέτες ήταν εφαρμόσιμες μόνο για επίπεδες εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις. Οι Wang και Crossman (1976) ήταν οι πρώτοι που κατάφεραν να πάρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για την επίδραση του προβλήματος των ελεύθερων άκρων χρησιμοποιώντας ένα δυσδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Μια από τις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα τελευταία είναι η VCCT (virtual crack closure technique). Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στη μέθοδο του Irwin (Irwin crack closure integral , 1958 ; Rybicki & Kanninen , 1977 ; Broek , 1986) ,η οποία υποθέτει ότι το ποσό ενέργειας ΔE που απελευθερώνεται όταν η ρωγμή αναπτύσσεται κατά Δa ,από ένα αρχικό μήκος α σε α + Δa, είναι ίση με την ενέργεια που αναπτύσσεται για το κλείσιμο της ρωγμής στην αρχική της κατάσταση. Προς το παρόν ,η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρείται ως μια από τις πιο αξιόπιστες για την ανάλυση της ανάπτυξης διαστρωματικών ρωγμών (Camanho & Davila , Kim et al. , 2002 ; Krueger , 2002 ; Tay et al. , 2002) .

Πρόσφατα , μία νέα μεθοδολογία που αρχίζει να κερδίζει όλο και περισσότερους υποστηρικτές στη προσπάθεια για μοντελοποίηση των αποχωρισμών είναι αυτή της ομογενοποίησης (Caiazzo , 2001:Rand , 2001). Η μέθοδος αυτή που είναι αλλιώς γνωστή ως η μέθοδος της διπλής κλίμακας , βασίζεται σε μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και επιλύει ένα υπο-μοντέλο για κάθε επιμέρους στάδιο της ανάλυσης. Τα υπο-μοντέλα χρησιμεύουν στο να γίνει δυνατός ο καθορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς και ο τρόπος αστοχίας του υλικού.

1.3.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

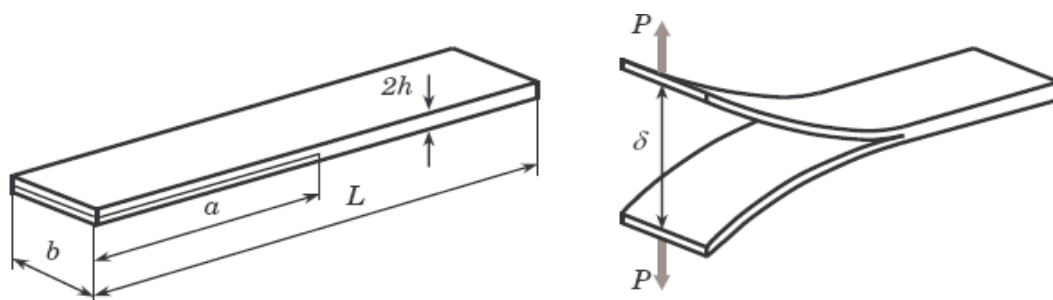
Όπως έχουμε ξανά αναφέρει, ο τρόπος αστοχίας, η ανάπτυξη ή η διάδοση, ενός αποχωρισμού ή μιας ρωγμής σε ένα πολύστρωτο ακολουθεί τις εξής 3 μορφές που απεικονίζονται στο σχήμα 1.5 που παρατέθηκε παραπάνω: (α) άνοιγμα ή mode I, (β) γλίστρημα ή mode II, (γ) σχίσσιμο ή mode III. Φυσικά είναι δυνατό να έχουμε αστοχία που αποτελεί συνδυασμό κάποιων από τις μορφές αυτές. Από τις παραπάνω μορφές αυτές που εφαρμόζονται περισσότερο είναι οι I και II και ο συνδυασμός αυτών, ευρύτερα γνωστός ως mixed-mode.

Για παραδοσιακά ιστροπικά υλικά, γίνεται κυρίως χρήση τεστ όπου έχουμε αστοχία τύπου mode I καθώς η αντοχή σε θραύση είναι η μικρότερη σε αυτό το τύπο αστοχίας. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και σε περίπτωση όπου το υλικό αρχίζει να αστοχεί κατά mode II, είναι δυνατό η ρωγμή που σχηματίζεται να πάρει τέτοια πορεία που η εξέλιξη της αστοχίας να χαρακτηρίζεται από mode I μορφή. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στα σύνθετα υλικά, όπου ο αποχωρισμός μπορεί να "εξαναγκαστεί" να μείνει στη περιοχή μεταξύ των ισχυρών ενισχυμένων στρώσεων, οπότε μπορούμε να έχουμε mode I ή mode II, αναλόγως με το πώς ασκείται η φόρτιση.

Για τον υπολογισμό της αντοχής μεταξύ των στρώσεων χρησιμοποιούνται κυρίως δοκίμια σε μορφή δοκού, τα οποία υποβάλλονται σε φόρτιση. Στις περισσότερες των περιπτώσεων έχουμε την εμφάνιση αποχωρισμού παράλληλα στις στρώσεις χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η περίπτωση να περάσει η ρωγμή από τη διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων σε κάποια από αυτές. Οι λόγοι για τους οποίους μπορεί να έχουμε αυτή την ασυνέχεια στη συμπεριφορά των πολύστρωτων είναι πολλοί και έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης από διάφορους μελετητές (Li & Thouless & Waas & Schroeber & Zavattieri, 2004 & 2005; Banea & da Silva, 2008).

1.3.5.1 MODE I

Η πιο συνηθισμένη πειραματική μέθοδος υπολογισμού της αντοχής σε θραύση κατά mode I (Davies, 1998) είναι η DCB (double cantilever beam), η οποία χρησιμοποιείται είδη από τα μέσα του 60. Στη συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιείται μια δοκός η οποία φέρει ένα αρχικό τεχνητό αποχωρισμό (ASTM D 5528-01, 2003; Davies, 1992) και έχει τη παρακάτω μορφή:



Εικόνα 1.11. Πειραματική δοκιμή DCB χωρίς φόρτιση και υπό φόρτιση.

Συνήθως, σε αυτού του είδους τη δοκιμή η δοκός φέρει ίδιο αριθμό στρώσεων εκατέρωθεν του τεχνητού αποχωρισμού που τοποθετείται στη μέση του πάχους. Για τη δημιουργία του αποχωρισμού χρησιμοποιείται ένα πολύ λεπτό στρώμα

κατασκευασμένο συνήθως από πολυμερές το οποίο εισάγεται μεταξύ των δύο συμμετρικών βραχιόνων.

Ο Whitney (1982) χρησιμοποίησε DCB τεστ για να χαρακτηρίσει την αντοχή σε θραύση διαφόρων ειδών πολύστρωτων.

Τα διάφορα υπολογιστικά πακέτα που κυκλοφορούν δίνουν τη δυνατότητα στους διάφορους ερευνητές να μοντελοποιήσουν τη παραπάνω πειραματική μέθοδο και να μελετήσουν καλύτερα τον τρόπο που αποχωρίζονται οι στρώσεις όταν έχουμε άνοιγμα , δηλαδή mode I. Πλέον το ενδιαφέρον στρέφεται στον όσο πειστικότερη προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων με σκοπό τη δημιουργία αναλυτικών μοντέλων τα οποία θα μπορούν να περιγράψουν πειστικά μια ευρεία γκάμα προβλημάτων (τόσο σε σχέση με τη γεωμετρία όσο και με το τύπο φόρτισης). Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι απαραίτητη η σωστή μοντελοποίηση του τρόπου αστοχίας των πολύστρωτων και των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα.

Πρόσφατα , στη δημοσίευση που έγινε από τους Li , Thouless , Waas , Schroeber και Zavattieri (2004) αναλύθηκε η επίδραση που έχει η χρήση μιας περιοχής συνεκτικότητας (cohesive-zone) στη μοντελοποίηση της αστοχίας κατά mode I δύο σύνθετων πλακών που είναι ενωμένες με κολλητικό υλικό. Η χρήση των cohesive είναι απαραίτητη για να εξηγηθούν κάποιοι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο στρώσεων και δεν μπορούν να εξηγηθούν πλήρως από συμβατικές μεθόδους μηχανικής των θραύσεων. Η σύγκριση του μοντέλου που δημιουργήθηκε με τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από πειραματικές δοκιμές , έδειξε ικανοποιητικότερη σύμπτωση στη συμπεριφορά του κολλητικού δεσμού. Συγκεκριμένα δεν περιγράφηκαν καλά μόνο οι δυνάμεις και οι προκύπτουσες παραμορφώσεις αλλά και η μετάβαση από κατάρρευση του σύνθετου σε κατάρρευση του κολλητικού υλικού της διεπιφάνειας.

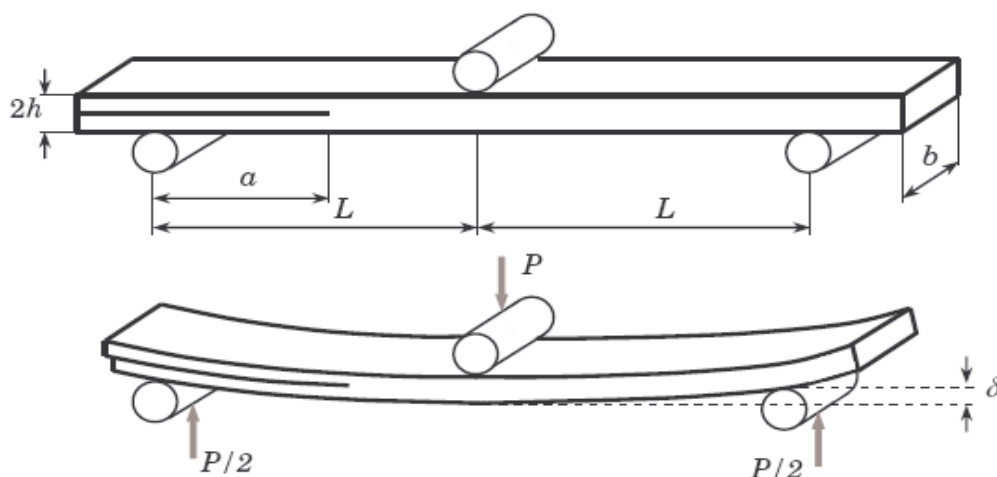
Ακόμα μια εργασία ,που ασχολείται με τη μοντελοποίηση του τρόπου αστοχίας σύνθετων πλακών από ίνες γυαλιού που αστοχούν κατά mode I ,είναι αυτή που δημοσιεύθηκε από τους Τσούβαλη και Ανυφαντή (2011). Η μελέτη αυτή προσπαθεί να προσομοιώσει τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από τη διεξαγωγή DCB πειραμάτων. Στα μοντέλα που δημιουργήθηκαν με χρήση του υπολογιστικού πακέτου ABAQUS , επιχειρείται η προσομοίωση της γεφυρωποιού (bridging-law) δράσης που αναπτύσσουν οι ίνες του πολύστρωτου στο μέτωπο διάδοσης της ρωγμής. Μετά από σύγκριση των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων , διαπιστώθηκε ότι οι υποθέσεις που έγιναν όσον αφορά τους νόμους (traction-separation laws) που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας κατά τη διάδοση της ρωγμής , ήταν ιδιαίτερα επιτυχείς.

1.3.5.2 MODE II

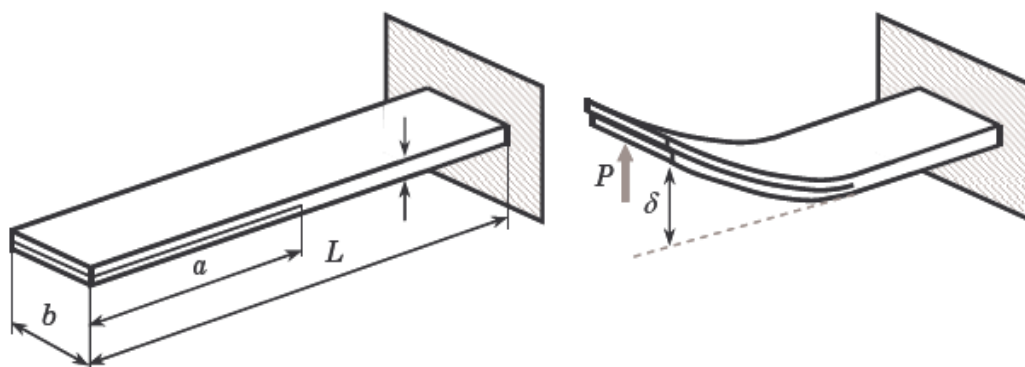
Ο αποχωρισμός κατά mode II χαρακτηρίζεται από την ολίσθηση των δύο επιφανειών που βρίσκονται εκατέρωθεν της ρωγμής. Στο συγκεκριμένο τρόπο αστοχίας, καθώς η ρωγμή αναπτύσσεται έχουμε την εμφάνιση μιας ζώνης που έχει αστοχήσει ,δηλαδή το σχηματισμό μικρό-ρωγμών στη περιοχή μπροστά από το μέτωπο της ρωγμής , οι οποίες τελικά ενώνονται. Έτσι δυσκολεύει ο καθορισμός του πραγματικού μήκους της ρωγμής. Ένας ακόμα παράγοντας που δυσκολεύει την ανάλυση είναι η τριβή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια κατά την ολίσθηση. Τα προβλήματα αυτά

ευθύνονται για τη μεγάλη ποικιλία στα αποτελέσματα που λαμβάνονται από δοκιμές κατά mode II. Συνεπώς η χρήση του συντελεστή απελευθέρωσης ενέργειας G_{IIc} δεν είναι αρκετή για να ερμηνεύσει τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα (Hogkinson & Robinson, 2000).

Κατά βάση, οι πειραματικές δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών κατά mode II είναι οι ENF (end-notched flexure) και ELS (end-loaded split). Οι δοκιμές αυτές χρησιμεύουν στη παρακολούθηση της ανάπτυξης του αποχωρισμού σε περιπτώσεις όπου ο αρχικός αποχωρισμός εξαναγκάζεται να διαδοθεί υπό την επίδραση διατμητικής δύναμης, έτσι ώστε να έχουμε αστοχία κατά mode II. Η γεωμετρία των δοκιμών και ο τρόπος φόρτισης στις παραπάνω πειραματικές δοκιμές φαίνεται παρακάτω :



Εικόνα 1.12. ENF test method.



Εικόνα 1.13. ELS test method.

Από τους πρώτους που χρησιμοποίησαν ENF τεστ ήταν ο Carlsson (1986) ο οποίος προσπάθησε να αναπαράγει γνήσια μορφή αποχωρισμού κατά mode II. Στη συνέχεια ακολούθησαν και άλλοι ερευνητές όπως ο Davies (1992) που εισήγαγε ένα τεχνητό αρχικό αποχωρισμό στο άκρο δοκών που υφίστανται κάμψη 3 σημείων. Ο Davies πειραματίστηκε και με ELS τεστ, όπου ασκώντας ένα φορτίο στη μία από τις δύο δοκούς του δοκιμίου, προσπάθησε να επιτύχει καθαρή αστοχία με γλίστρημα (mode II).

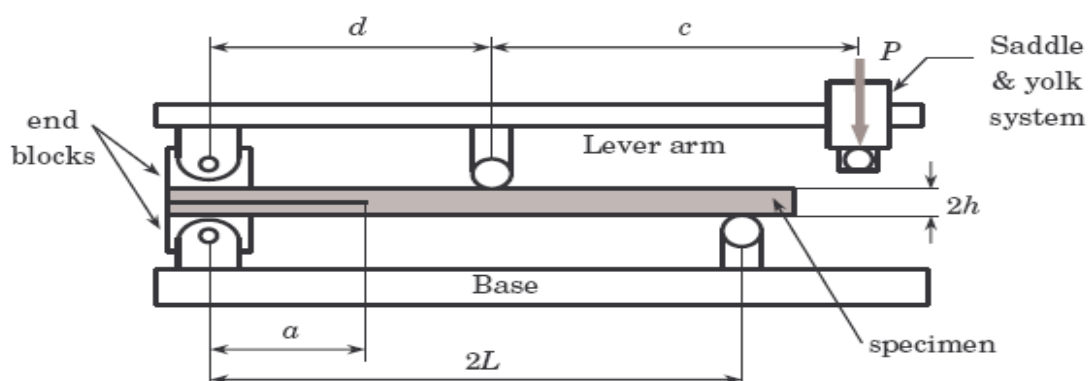
Εφόσον είχαν προηγηθεί διάφορες πειραματικές δοκιμές από πλήθος ερευνητών ήταν επόμενο να ακολουθήσουν αρκετές δημοσιεύσεις που προσπαθούσαν να μοντελοποιήσουν αριθμητικά τον τρόπο αστοχίας κατά mode II. Μία αναλυτική δημοσίευση έγινε από τους Τσούβαλη και Ανυφαντή (2011), όπου επιχειρείται η

“κατασκευή” ενός νόμου που θα ερμηνεύει τη γεφυροποιό δύναμη των ινών στη περιοχή ανάπτυξης της αστοχίας σε σύνθετα που αστοχούν κατά mode II. Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν με χρήση του υπολογιστικού πακέτου ABAQUS συγκρίνονται με ENF τεστ που πραγματοποιήθηκαν σε δοκούς κατασκευασμένες από μονοαξονικές ίνες γυαλιού. Κατά τη μοντελοποίηση προσομοιώθηκαν τόσο η ύπαρξη μιας περιοχής ύπαρξης της γεφυροποιό δύναμης (bridging zone) των ινών ακριβώς μπροστά από το άκρο της ρωγμής, όσο και η ύπαρξη cohesive zone .

1.3.5.3 MIXED - MODE

Λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη πιθανότητα που υπάρχει να αστοχήσει ένα πολύστρωτο με συνδυασμό των μορφών αστοχίας που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω (Tanaka & Tanaka 1997) , ανακύπτει η ανάγκη για πειραματικές δοκιμές που θα μελετούν την διαστρωματική αντοχή σε τέτοιες περιπτώσεις.

Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση των mixed-mode μορφών αστοχίας είναι οι MMB(mixed-mode bending) και MMELS (mixed-mode end load split). Η μέθοδος MMB ,που προτάθηκε από τους Reeder και Crews (1990&1992) φέρει ένα αρχικό τεχνητό αποχωρισμό (εικόνα 1.13) κατά παρόμοιο τρόπο με τη δοκιμή DCB και επιτρέπει τον υπολογισμό της ενέργειας που απαιτείται για θραύση. Τροποποιώντας κατάλληλα διάφορες παραμέτρους της πειραματικής διαδικασίας είναι η εφικτή απόδοση διαφόρων αναλογιών μεικτής αστοχίας (σχετικά με την επιρροή που έχει η mode I και η mode II στο τρόπο αστοχίας).



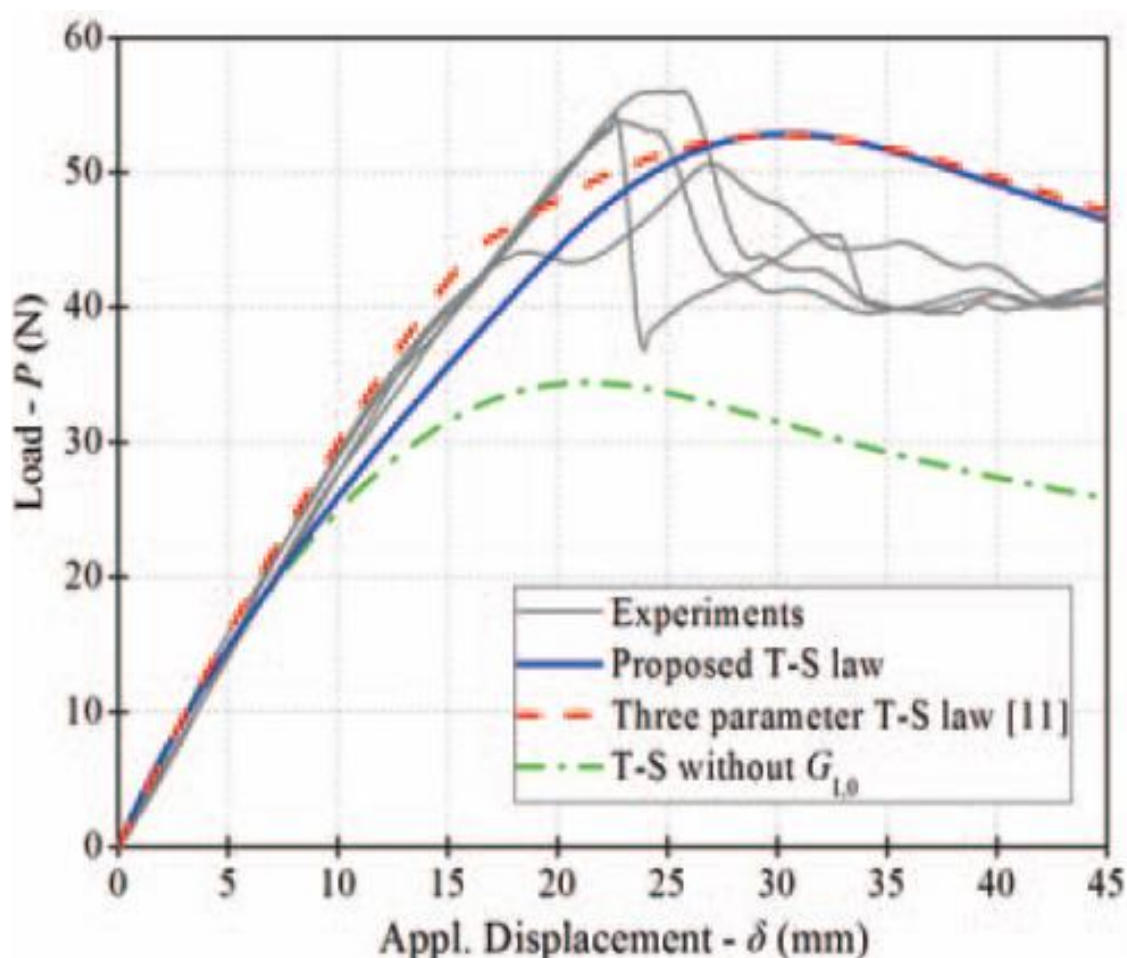
Εικόνα 1.14 MMB test method.

Όπως για τις περιπτώσεις των mode I και mode II έτσι και για την αστοχία μεικτού τύπου έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που προσπαθούν να προσομοιώσουν τον τρόπο αστοχίας. Ως συνέχεια της δημοσίευσης που είχαν κάνει οι Li, Thouless, Waas, Schroeber και Zavattieri για mode I (2004) αναπτύσσουν ένα νέο μοντέλο το οποίο αξιοποιώντας την υπόθεση που έγινε για ύπαρξη cohesive-zone προσπαθεί να περιγράψει τον μεικτό τρόπο αστοχίας (2005) του κολλητικού δεσμού μεταξύ δύο σύνθετων δοκών. Παίρνοντας λοιπόν δεδομένα που έχουν προκύψει από δοκιμές για mode I & II ,ορίζουν τις κατάλληλες ιδιότητες στη cohesive-zone μεταξύ των

στρώσεων και επιτυγχάνουν μια πολύ καλή προσομοίωση του πώς πραγματικά αστοχεί ο δεσμός μεταξύ των σύνθετων κατά mixed-mode.

1.3.6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΝΟΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ

Όλες οι παραπάνω μελέτες που διεξήχθησαν στα πλαίσια της αριθμητικής μοντελοποίησης του τρόπου αστοχίας πολύστρωτων κατά mode I,II και mixed καταφέρνουν να περιγράψουν ιδιαίτερα ικανοποιητικά τον τρόπο που ξεκινά ένας αποχωρισμός καθώς και τη διάδοση αυτού στη περιοχή του κολλητικού δεσμού. Ωστόσο σε περίπτωση που η αστοχία περνάει στις ίδιες τις στρώσεις ,τα μοντέλα αδυνατούν να αποδώσουν τη συμπεριφορά που θα είχε ένα πραγματικό δοκίμιο. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό από τη παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 1.15. Καμπύλες P-δ που προέκυψαν από το προτεινόμενο νόμο αποχωρισμού (Three parameter T-S law) των Τσούβαλη και Ανυφαντή (2011), με χρήση της μεθόδου CBT (data reduction scheme).

Από την εικόνα παρατηρούμε πως ενώ το μοντέλο που προτάθηκε ακολουθεί σχεδόν πιστά τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά τη μορφή της καμπύλης μέχρι την επίτευξη της μέγιστης φόρτισης αλλά και της τιμής που λαμβάνει το μέγιστο φορτίο , αδυνατεί στη συνέχεια να αποδώσει το “κατσάρωμα” των

πειραματικών αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί το μοντέλο είναι κατασκευασμένο για τη μοντελοποίηση της αποκόλλησης στη περιοχή του κολλητικού δεσμού και όχι για φαινόμενα όπως η κατάρρευση περιοχών του πολύστρωτου και συνεπαγόμενη εξασθένηση των ιδιοτήτων του. Για να μπορέσουμε να αποδώσουμε αυτή τη σταδιακή υποβάθμιση που υφίσταται το σύνθετο απαιτείται η εισαγωγή κατάλληλων κριτηρίων αστοχίας στα μοντέλα που προσπαθούν να περιγράψουν το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων.

Μια εργασία που κινείται σε αυτά τα πλαίσια είναι αυτή του Ανυφαντή (2012) όπου με χρήση του υπολογιστικού πακέτου ANSYS επιχειρείται η απόδοση της συμπεριφοράς ενός πολύστρωτου ενισχυμένου με 4 επιμήκεις βραχίονες, υπό την επίδραση θλιπτικού φορτίου.

1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αριθμητική ανάλυση της αντοχής του κολλητικού δεσμού μεταξύ σύνθετων υλικών. Ουσιαστικά επιχειρείται να γίνει μια ερμηνεία του τρόπου που οι στρώσεις ενός πολύστρωτου αποχωρίζονται καθώς και ο τρόπος που τελικά αυτό θα καταρρεύσει (είτε περαιτέρω διάδοση του αποχωρισμού είτε αστοχία του ίδιου του σύνθετου) μετά την επιβολή θλιπτικής φόρτισης. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελεί τη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας του κ. Α. Κουσαθανά (2010) που ασχολήθηκε με την πειραματική και αριθμητική μελέτη της επίδρασης του αποχωρισμού των στρώσεων στον λυγισμό ινωδών σύνθετων υλικών. Ο κ. Κουσαθανάς διεξήγαγε πειραματικές δοκιμές υπό θλιπτική φόρτιση πάνω σε δοκίμια που έφεραν μονοαξονική ενίσχυση από ίνες γυαλιού ενώ περιείχαν και τεχνητό αποχωρισμό. Στη συνέχεια μοντελοποίησε τα παραπάνω πειράματα με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS. Τελικός σκοπός του ήταν η παραγωγή ενός 3D μοντέλου, με το οποίο θα μπορούσε να δώσει μια ικανοποιητική ερμηνεία της επίδρασης που έχει η θέση κατά το πάχος αλλά και το μήκος του τεχνητού αποχωρισμού, στο λυγισμό πολύστρωτων δοκών.

Στη παρούσα διπλωματική δεν μας ενδιαφέρει τόσο η επίδραση της θέσεως και του μήκους του αποχωρισμού όσον αφορά το λυγισμό, αλλά ο τρόπος που αποχωρίζονται οι στρώσεις του πολύστρωτου καθώς αυτό υποβάλλεται σε θλίψη. Ουσιαστικά δημιουργείται ένα 2D μοντέλο το οποίο γεωμετρικά προσομοιώνει το διάμηκες προφίλ των τρισδιάστατων μοντέλων του κ. Κουσαθανά. Με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων μοντελοποιείται η διεπιφάνεια που ενώνει τις δύο στρώσεις του πολύστρωτου αλλά και ο τρόπος που κολλητικός δεσμός θα αρχίσει σιγά σιγά να καταρρέει (delamination analysis). Οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τον κολλητικό δεσμό λαμβάνονται από προηγούμενες πειραματικές δοκιμές που έχουν διεξαχθεί στο εργαστήριο της σχολής. Τέλος για τη μοντελοποίηση της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του σύνθετου καθώς αυτό υποβάλλεται σε θλίψη, αξιοποιούνται οι δυνατότητες του υπολογιστικού πακέτου (built in failure criteria) καθώς και αποτελέσματα από εργασίες που έχουν προηγηθεί (Ανυφαντής, 2012).

Όλα τα παραπάνω αποσκοπούν στη σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων που δίνουν τα μοντέλα με τα αντίστοιχα πειραματικά που προέκυψαν από τις δοκιμές που διεξήγαγε ο κ. Κουσαθανάς.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας έγινε μια εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται μια σύντομη αναφορά στα ινώδη

σύνθετα υλικά και τα πολύστρωτα που προκύπτουν από αυτά. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων, που αποτελεί συνήθη μορφή αστοχίας σε κατασκευές από σύνθετα υλικά, καθώς και του λυγισμού άθικτων ή μη πλακών, ενός εξίσου συχνά εμφανιζόμενου φαινομένου. Ακόμα ένα φαινόμενο που χρήζει ανάλυσης είναι αυτό της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του σύνθετου καθώς η αστοχία εξελίσσεται. Στη συνέχεια ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία γίνεται μια περιληπτική αναφορά σε εργασίες που προηγήθηκαν και καταπιάνονται κυρίως με το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων αλλά και της σταδιακής υποβάθμισης των ιδιοτήτων ενός πολύστρωτου και συνεπώς της αντοχής του. Τέλος γίνεται μια μικρή αναφορά στη διπλωματική εργασία του Α. Κουσαθανά η οποία αποτελεί βάση για τα παρούσα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται περιγραφή της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία. Η περιγραφή αυτή περιέχει τη λογική με την οποία γίνεται η μοντελοποίηση και ο καθορισμός των διαφόρων παραμέτρων του κώδικα. Στη συνέχεια περιγράφονται τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν καθώς και οι διάφορες παραδοχές που έγιναν. Τέλος περιγράφεται ο τρόπος που μοντελοποιήθηκαν τα φαινόμενα του αποχωρισμού των στρώσεων (delamination analysis) και της σταδιακής αστοχίας – υποβάθμισης (progressive damage analysis) του σύνθετου.

Στο τρίτο κεφάλαιο λαμβάνει χώρα η αριθμητική μελέτη όπου επιχειρείται αρχικά η μετατροπή των 3D μοντέλων του κ. Κουσαθανά σε 2D, με σκοπό να ελεγχθεί κατά πόσο τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν με δυσδιάστατα μοντέλα. Εφόσον έχει επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία των 2D μοντέλων, ακολουθεί η εισαγωγή κωδίκων με τα οποία είναι εφικτή η χρήση κριτηρίων αστοχίας (Tsai-Wu & Maximum Stress Criterion). Επόμενο στάδιο είναι η εισαγωγή cohesive elements με σκοπό τη μοντελοποίηση του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων. Στα μοντέλα τα οποία περιέχουν cohesive γίνεται ανάλυση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στο τρόπο με τον οποίο αστοχεί ο κολλητικός δεσμός. Τέλος γίνεται progressive damage analysis στα δισδιάστατα μοντέλα, τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που εξήχθηκαν από τα αποτελέσματα των αριθμητικών μοντελοποιήσεων ενώ γίνεται μια γενικότερη σύγκριση τόσο με τα πειραματικά όσο και με τα αριθμητικά μοντέλα του κ. Κουσαθανά. Γίνεται μια προσπάθεια για αιτιολόγηση τυχόν αποκλίσεων αλλά και προτάσεων προς επίλυση.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια μικρή αναφορά στα μοντέλα του κ. Κουσαθανά.

1.5 ΠΕΡΙΛΗΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ Α.ΚΟΥΣΑΘΑΝΑ

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί συνέχεια αυτής που διεξήχθη από το Α. Κουσαθανά και σκοπό είχε τη πειραματική και αριθμητική μελέτη της επίδρασης του αποχωρισμού των στρώσεων στον λυγισμό ινωδών σύνθετων υλικών.

Για να γίνουν πλήρως κατανοητά τα όσα παρουσιάζονται στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ανακύπτει η ανάγκη μιας μικρής αναδρομής σε όσα μελέτησε ο κ. Κουσαθανάς.

1.5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ

Οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν σε δοκίμια διαστάσεων 600*50*10 τα οποία έφεραν μονοαξονική ενίσχυση και κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο της σχολής. Κάθε δοκίμιο είχε επιστρωθεί με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (hand lay up) και έφερε 16 στρώσεις. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή των δοκιμών ήταν τα ακόλουθα :

1. Ρητίνη: D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin της εταιρείας DOW

CURED PHYSICAL PROPERTIES

Typical Starting Point Formulation	Parts By Weight
D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin	195
Polyamide (i.e. Ancamide 350A ex.Air Products	95
Tensile Strength (MPa)	44.8
Tensile Modulus (GPa)	2.03
Elongation @ Break (%)	6.1
Flexural Strength (MPa)	65
Flexural Modulus (GPa)	1.98

2. Σκληρυντής : EPAMINE PC13 της εταιρείας PO.INT.ER S.r.l

CHEMICAL – PHYSICAL PROPERTIES

Appearance	Clear
Active content	100%
Colour Gardner	2 max
Brookfield Viscosity (mPa.s a 25°C)	70-140
Amine value	325-345 mg KOH/g
Average Hydrogen equivalent	95
PHR in combination with liquid epoxy resin (EE 190)	50
Pot life 150 g at 25°C with liquid epoxy resin (EE 190)	50'
TMF	10°C

CYRING PROPERTIES

Take free time low thickness	5h1/2 : 6h1/2
Take free time high thickness	3h1/2 : 4h

3. Ίνες : UNIE600 Glass της εταιρείας OWENS CORNING

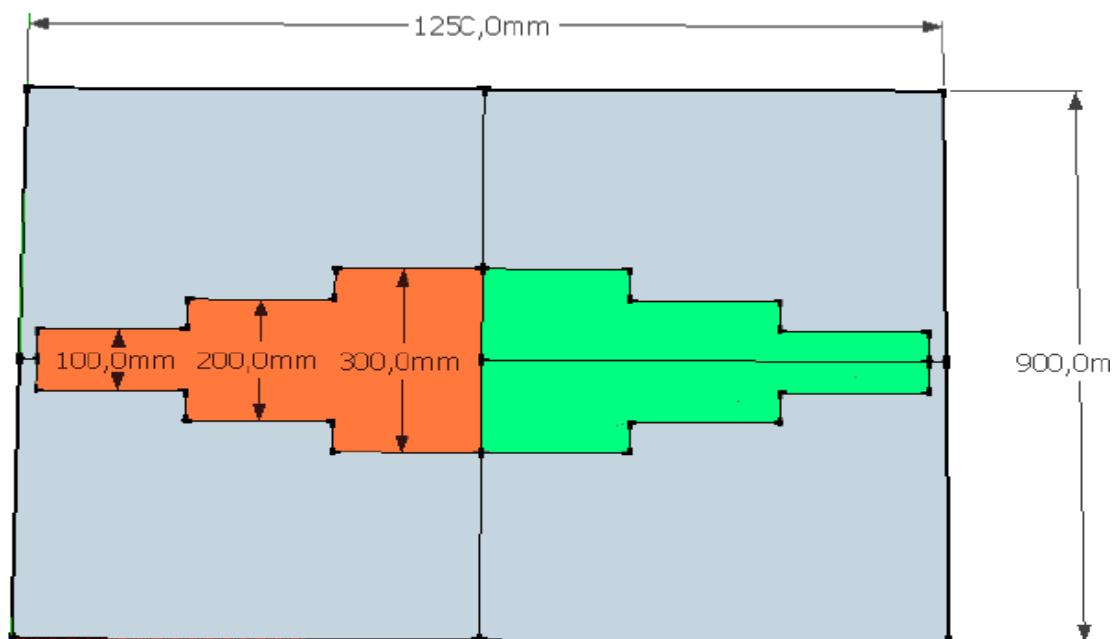
TECHNICAL SPECIFICATION

Product	Legend		Fiber	Weight of layers				Sticing	Total weight
	E	Glass		0°	90°	45°	-45°		
UNIE600	E	Glass	E	600	-	-	-	gr/m ² 4	gr/m ² 604

TYPICAL PROPERTIES FOR THE GLASS FIBER TYPES

Material	Density, bulk annealed, g/cm ²	Tensile Strength (Mpa)				Young Modulus of Elasticity (GPa)	Elongation (%)
		At 190 °C	At 23 °C	At 371 °C	At 538 °C		
E-glass	2.62	5310	3445	2620	1725	At 538 °C 813	4.88

Για τη κατασκευή των δοκιμών εκτός από τα παραπάνω υλικά χρησιμοποιήθηκε και film Teflon με το οποίο διαμορφώθηκε η περιοχή του αρχικού τεχνητού αποχωρισμού. Το film αυτό είχε πάχος 60±5 μm. Κατά τη παρασκευή της πλάκας από την οποία κόπηκαν τα δοκίμια ,έγινε τέτοια διαμόρφωση ώστε να προκύψουν δύο σειρές δοκιμών ,η A και η B. Τα δοκίμια της σειράς A έφεραν το film του τεχνητού αποχωρισμού στο μισό του πάχους τους ενώ της B στα ¾ αυτού. Επίσης για κάθε σειρά παρήχθησαν δοκίμια τα οποία έφεραν τεχνητό αποχωρισμό με μήκος 100,200 και 300 mm αντίστοιχα. Λόγω της ανάγκης για τη κατασκευή των δοκιμών με τις παραπάνω προδιαγραφές ,η πλάκα που δημιουργήθηκε είχε την ακόλουθη “δενδροειδή” μορφή :



Εικόνα 1.16. Διάταξη Teflon σε σχέση με τη πλάκα.

Στη παραπάνω εικόνα με πορτοκαλί χρώμα αναπαριστάται η περιοχή της πλάκας όπου το film του Teflon είναι τοποθετημένο στο μισό του πάχους της ενώ με πράσινο η περιοχή όπου βρίσκεται στα $\frac{3}{4}$ αυτού.

Σε κάθε μια από τις 6 περιοχές (3 για τη σειρά A και 3 για τη B) με διαφορετικό μήκος τεχνητού αποχωρισμού κόπηκαν 3 δοκίμια με πλάτος 50mm και μήκος 900mm. Προέκυψαν δηλαδή 6 σετ δοκιμών αποτελούμενα από 3 δοκίμια το κάθε ένα. Αυτά τα σετ είναι τα ακόλουθα :

Πίνακας 1.3. Μέθοδος αρίθμησης δοκιμών.

Θέση αποχωρισμού κατά το πάχος	Μήκος αποχωρισμού (mm)	Ονοματολογία σειράς δοκιμών
50% του πάχους	100	A 100
	200	A 200
	300	A 300
75% του πάχους	100	B 100
	200	B 200
	300	B 300

Για να είναι η πειραματική διαδικασία πληρέστερη θεωρήθηκε απαραίτητη η κατασκευή μιας επιπλέον πλάκας από την οποία κόπηκαν δοκίμια τα οποία δεν έφεραν τεχνητό αποχωρισμό, ήταν δηλαδή άθικτα. Από τη συγκεκριμένη πλάκα κόπηκαν επίσης 3 δοκίμια από τα οποία προέκυψε μετά από μετρήσεις ένας μέσος όρος των διαστάσεων τους.

Αφού ολοκληρώθηκε η παραπάνω διαδικασία κατηγοριοποίησης, ακολούθησε διαστασιολόγηση των δοκιμών και έγινε εξαγωγή των μέσων όρων των διαστάσεων τους.

Επίσης με καύση περιοχών της πλάκας που περίσσεψαν μετά το κόψιμο των δοκιμών υπολογίσθηκαν οι περιεκτικότητες σε ίνες και ρητίνη για κάθε επιμέρους ομάδα δοκιμών. Η συγκεκριμένη διαδικασία ήταν απαραίτητη για το καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών. Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα παραπάνω .

Πίνακας 1.4. Τελικές τιμές ιδιοτήτων και διαστάσεων των πολύστρωτων.

Σειρά Δοκιμών	Περιεκτικότητα σε ρητίνη (Wm)	Περιεκτικότητα σε ίνες (Wf)	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	Πάχος t (mm)
A 100	43%	57%	32.34	11.3
A 200	47%	53%	30.33	11.8
A 300	47%	53%	30.43	12.1
B 100	46%	54%	30.98	11.3
B 200	46%	54%	30.87	11.6
B 300	48%	52%	29.55	12.2
INTACT	42%	58%	32.96	10.6

Στη συνέχεια ακολούθησε η διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών όπου τα δοκίμια δοκιμάστηκαν σε θλίψη στην υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Κατά τα πειράματα μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις των επιμηκυνσιομέτρων ,η μετατόπιση και η δύναμη που ασκήθηκε από τη μηχανή, καθώς και το βέλος κάμψης του δοκιμίου κατά τον άξονα Υ. Στην εικόνα (1.16) που ακολουθεί παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη.



Εικόνα 1.17. Αρχική διάταξη πειράματος.

1.5.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Στο στάδιο αυτό της μελέτης του Α. Κουσαθανά γίνεται χρήση του υπολογιστικού πακέτου ANSYS για τη μοντελοποίηση των πειραμάτων. Αφού αρχικά πραγματοποιείται μια παραμετρική μελέτη για το καθορισμό των παραμέτρων του κώδικα ,όπως το μέγεθος των στοιχείων και η κατανομή τους στο μοντέλο , στη συνέχεια γίνεται τρέξιμο των προκυπτόντων κωδικών. Οι τιμές που θεωρήθηκαν για τις μηχανικές ιδιότητες του πολύστρωτου ελήφθησαν από αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος MARSTRUCT (Network of Excellence on Marine Structures) και είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 1.5. Μηχανικές ιδιότητες ερευνητικού προγράμματος MARSTRUCT.

Μηχανικές Ιδιότητες	Τιμές (GPa)
E_2	8.501
E_3	8.501
G_{12}	2.034
G_{23}	1.017
G_{13}	1.017
ν_{xy}	0.29
ν_{yz}	0.29
ν_{zx}	0.29

Για το μέτρο ελαστικότητας E_1 δίνεται στο κώδικα κάθε σειράς η τιμή που έχει προκύψει από τις πειραματικές μετρήσεις (τιμές από πίνακα 1.2). Το ίδιο συμβαίνει και για τις γεωμετρικές διαστάσεις του μοντέλου.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατέστη δυνατή οι δημιουργία συγκριτικών διαγραμμάτων για κάθε σειρά δοκιμών μεταξύ των αποτελεσμάτων του κώδικα και των πειραμάτων. Επίσης γίνεται ποιοτική σύγκριση των μορφών λυγισμού που έδωσε ο κώδικας με αυτές που έδωσαν τα πειράματα.

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι οι κώδικες που παρήχθησαν από το κ. Κουσαθανά δεν φέρουν καθόλου cohesive elements αλλά και κατάλληλες εντολές που να καθιστούν ικανή τη χρήση κριτηρίων αστοχίας. Τα παραπάνω συνεπάγονται την αδυναμία των μοντέλων να αποδώσουν αναλυτικά το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων αλλά και της προοδευτικής αστοχίας – υποβάθμισης των ιδιοτήτων του πολύστρωτου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

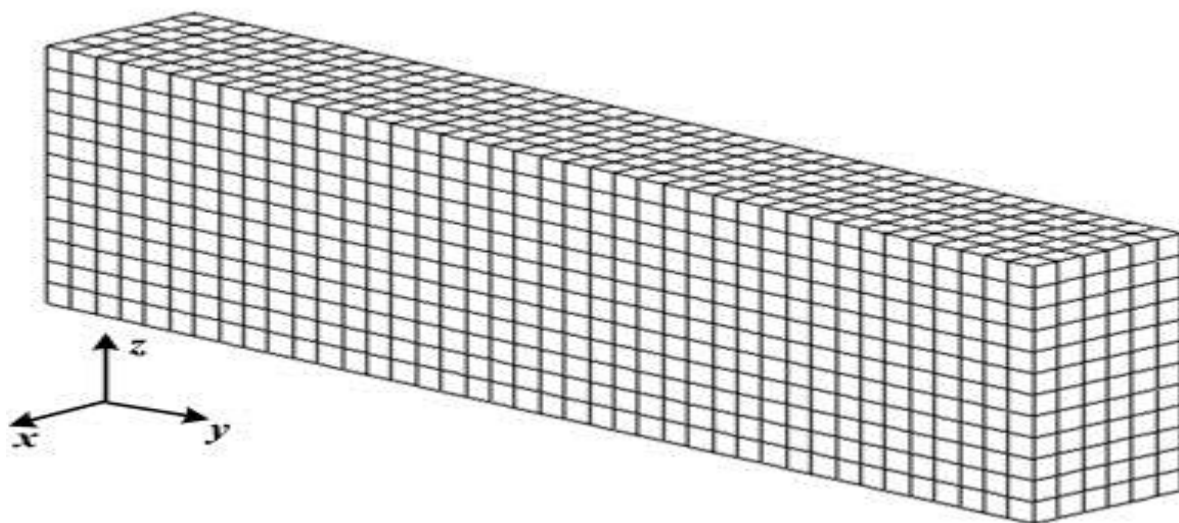
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη ισχυρών υπολογιστικών πακέτων έχει καταστήσει το κλάδο της προσομοίωσης ιδιαίτερα ελπιδοφόρο σχετικά με θέματα που αφορούν την ανάλυση της συμπεριφοράς σύνθετων υλικών. Οι αναλυτικές μέθοδοι δυσκολεύονται να αντιμετωπίσουν προβλήματα των οποίων η γεωμετρία είναι περίπλοκη, ενώ παράλληλα η πολυπλοκότητα που απορρέει από την πεπλεγμένη μορφή των εξισώσεων δημιουργεί επιπλέον προβλήματα που μέχρι στιγμής δεν έχουν αντιμετωπιστεί. Επιπρόσθετα δεν έχουν καταστρωθεί εξισώσεις που να μπορούν να συμπεριλάβουν όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

Στα πλαίσια λοιπόν αυτά έρχεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων να καλύψει το κενό που προκύπτει από τις αδυναμίες των κλασικών αναλυτικών μεθόδων. Οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο αυτών κατηγοριών μεθόδων έγκειται στο τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζουν την κατασκευή και τον τρόπο που ακολουθούν στη διαδικασία επίλυσης. Οι κλασικές μέθοδοι θεωρούν την κατασκευή συνεχή και η συμπεριφορά αυτής περιγράφεται από τμηματικές ή συνεχείς κοινές εξισώσεις. Από την άλλη η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) αποτελεί μια αριθμητική τεχνική προσέγγισης της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Σύμφωνα με αυτήν, η κατασκευή αναπαρίσταται από ένα σύνολο επιμέρους στοιχείων (elements) που συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας. Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων αυτών, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισορροπίας κάθε στοιχείου, μπορούν να υπολογιστούν τα ζητούμενα

μεγέθη σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής. Επομένως, κατά την ανάλυση ενός προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία, λαμβάνεται υπόψη ολόκληρη η κατασκευή και όχι ένα στοιχειώδες τμήμα αυτής, όπως συμβαίνει με τις αναλυτικές μεθόδους, γεγονός που επιτρέπει τη μελέτη πολύπλοκων κατασκευών. Επιπρόσθετα, η ακρίβεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ικανοποιητική και συχνά συγκρίσιμη εκείνης των πειραματικών μεθόδων και εξαρτάται από τις διάφορες παραμέτρους που υπεισέρχονται κατά την εφαρμογή της. Οι παράμετροι αυτές καθορίζονται βάσει του επιθυμητού συνδυασμού της ακρίβειας και της ταχύτητας της ανάλυσης, με τις αντίστοιχες επιλογές να περιορίζονται από τις δυνατότητες του εκάστοτε υπολογιστή. Σε γενικές γραμμές πάντως, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζει τη μικρή διάρκεια της ανάλυσης με την υψηλή αξιοπιστία των αντίστοιχων αποτελεσμάτων και συνεπώς, αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για ένα μεγάλο αριθμό μελετών. Ένα παράδειγμα μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.1. Μοντελοποίηση τμήματος ορθογώνιας δοκού με χρήση πεπερασμένων στοιχείων .

Η εξάπλωση και η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών δημιουργεί την πεποίθηση ή ακόμα και τη βεβαιότητα ότι η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να διαχειριστεί πολύπλοκες μορφές και γεωμετρίες, όπως και να επιλύσει όσο πεπλεγμένες και αν είναι τις μητρικές εξισώσεις. Τα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων όπως αυτά του ANSYS το οποίο χρησιμοποιούμε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχουν εξοπλιστεί με πληθώρα βιβλιοθηκών για υλικά, φορτίσεις, συνθήκες περιορισμού ή στήριξης της κατασκευής καθώς και τρόπων – μοντέλων αστοχίας.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά στάδια τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται σε επιμέρους. Αυτά είναι η Προεπεξεργασία (Preprocessing), η Επίλυση (Solution) και η Μεταεπεξεργασία (Postprocessing).

- **1^ο Στάδιο : Προεπεξεργασία (Preprocessing)**

Το στάδιο αυτό αποτελείται από τα εξής επιμέρους βήματα :

- 1) Μοντελοποίηση της κατασκευής , όπου η κατασκευή διαιρείται σε μικρότερα στοιχεία που είναι τα πεπερασμένα στοιχεία , όπως βλέπουμε και στην εικόνα 2.1. Το στάδιο αυτό είναι από τα κρισιμότερα γιατί ο σωστός ορισμός καθορίζει την ακρίβεια της λύσης που θα λάβουμε για τη δεδομένη γεωμετρία.
- 2) Ορισμός του τύπου των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Εδώ ο χρήστης πρέπει να ορίσει τον τύπο των στοιχείων έχοντας ως κριτήριο τις ιδιότητες τους. Ο ορισμός τους πρέπει να γίνει έτσι ώστε να έχουμε μοντέλο όσο το δυνατόν πιο κοντά στο φυσικό μοντέλο που θέλουμε να προσομοιάσουμε.
- 3) Ακόμα ένα βήμα είναι ο ορισμός των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε.

- **2^ο Στάδιο : Επίλυση (Solution)**

Το στάδιο αυτό αποτελείται από τις εντολές και τις παραμέτρους επίλυσης του προβλήματος. Επιμέρους βήματα είναι τα εξής :

- 1) Εφαρμογή των φορτίων που δέχεται η κατασκευή. Αυτά μπορεί να είναι συγκεντρωμένα φορτία ,κατανεμημένα φορτία, ροπές ,κρουστικά φορτία και μετατοπίσεις. Να τονίσουμε ότι εφαρμογή φορτίων μπορεί να γίνει και στο στάδιο της επίλυσης.
- 2) Ορισμός οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες πρέπει να ορίζονται σύμφωνα με την φύση του προβλήματος, με γνώμονα πάντα την σωστή αναπαράσταση του προβλήματος.

- **3^ο Στάδιο : Μεταεπεξεργασία (Postprocessing)**

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο της ανάλυσης αποτελείται από την εξαγωγή και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των παραπάνω σταδίων ,όπου γίνονται περισσότερα κατανοητά τα διάφορα στάδια της μελέτης.

2.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (Preprocessing)

Όπως αναφέρθηκε, η προεπεξεργασία αποτελεί το πρώτο στάδιο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και είναι ιδιαίτερη σημαντική καθώς οι αποφάσεις που θα παρθούν όσον αφορά τα στοιχεία και τις διάφορες παραμέτρους ,θα επηρεάσουν την περαιτέρω εξέλιξη της ανάλυσης. Η επιλογή διαφόρων παραμέτρων όπως ο τύπος των στοιχείων, η διακριτοποίηση αλλά και η ίδια η γεωμετρία θα είναι τέτοιες ώστε να συμβαδίζουν με τα μοντέλα της διπλωματικής εργασίας του Α. Κουσαθανά πάνω στην οποία βασιζόμαστε.

2.2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μοντελοποίηση μιας δοκού ή στην γενικότερη περίπτωση μιας πλάκας με αποχωρισμό των στρώσεων μπορεί να γίνει με χρήση δισδιάστατων (plane elements) ή τρισδιάστατων στοιχείων (solid elements). Ενώ στην εργασία του κ. Κουσαθανά γίνεται χρήση τρισδιάστατων στοιχείων, στη παρούσα επιλέγουμε δισδιάστατα καθώς μελετάμε το επίπεδο XZ των τρισδιάστατων μοντέλων. Τα δισδιάστατα μοντέλα έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ιδιαίτερα γρήγορα στα "τρεξίματα" τους καθώς αποτελούνται από σχετικά λίγα στοιχεία και κόμβους.

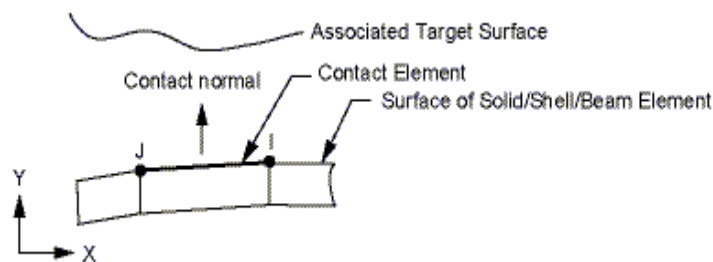
Για την δισδιάστατη λοιπόν μοντελοποίηση το μοντέλο της δοκού που θέλουμε να προσομοιάσουμε χωρίζεται σε δυο τμήματα εκατέρωθεν της περιοχής του τεχνητού αποχωρισμού, τα οποία ενώνονται στην άθικτη περιοχή. Έτσι το μοντέλο που κατασκευάζεται για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα αποτελείται από στρώσεις στοιχείων κατά το πάχος της πλάκας, μια για κάθε υποπολύστρωτο εκατέρωθεν του επιπέδου του αποχωρισμού, οι οποίες ενώνονται στην άθικτη περιοχή (Short et al-2001). Ο τύπος των στοιχείων του μοντέλου επιλέγεται από τη βιβλιοθήκη που παρέχει το ANSYS, όπου ανάλογα με το προς αντιμετώπιση πρόβλημα (or radial) (triangular Option not recommended)

, μπορούμε να επιλέξουμε το στοιχείο με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά.

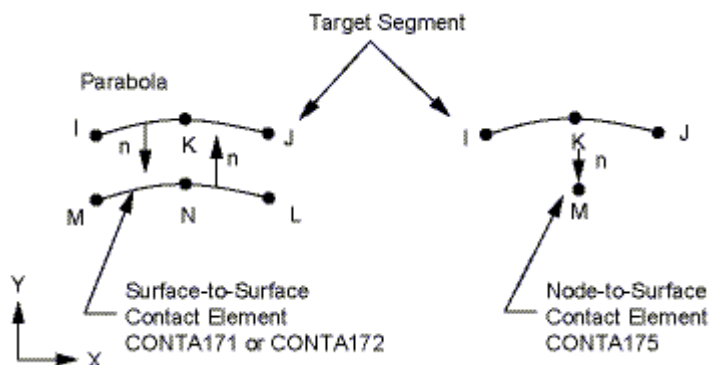
Το δισδιάστατο στοιχείο που επιλέγεται για τη μοντελοποίηση είναι το PLANE42 το οποίο αποτελείται από τέσσερις κόμβους, οι οποίοι καταλαμβάνουν τις γωνίες ενός τετραπλεύρου και επιπλέον χαρακτηρίζονται από δύο βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή τις μετατοπίσεις στις διευθύνσεις των αξόνων x και y του συστήματος συντεταγμένων του στοιχείου (Εικόνα 2.2 – ANSYS 2011). Η χρήση του περιγράφεται παρακάτω.

Εικόνα 2.2. Σχηματική αναπαράσταση του δισδιάστατου στοιχείου PLANE42.

Εκτός των παραπάνω στοιχείων είναι απαραίτητος και ο προσδιορισμός και κάποιων στοιχείων επαφής στη διεπιφάνεια του αποχωρισμού. Αυτό γίνεται γιατί έχει παρατηρηθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει ανεπίτρεπτη διείσδυση του ενός υποπολύστρωτου στο άλλο, γεγονός το οποίο δεν είναι φυσικά αποδεκτό. Έτσι τα στοιχεία επαφής εξασφαλίζουν ότι η διείσδυση δε θα ξεπεράσει τα πολύ μικρά όρια που έχει θέσει ο χρήστης. Η επιλογή του τύπου τους καθορίζεται βάσει του τύπου των στοιχείων που μοντελοποιούν την πλάκα, οπότε δεδομένης της χρήσης του δισδιάστατου, τετράκομβου στοιχείου PLANE42, επιλέγεται το στοιχείο CONTA171 (Εικόνα 2.3, ANSYS - 2011), το οποίο αποτελείται από δύο κόμβους. Επιπρόσθετα, επιλέγεται η δύκομβη εκδοχή του στοιχείου - στόχου (target element) TARG169 (σχήμα 2.4, ANSYS - 2011), το οποίο συνδυάζεται με το CONTA171 για τη μοντελοποίηση της πλάκας στην περιοχή του αποχωρισμού.



Εικόνα 2.3. Σχηματική αναπαράσταση του στοιχείου επαφής CONTACT171.



Εικόνα 2.4. Σχηματική αναπαράσταση του στοιχείου επαφής TARGE169.

2.2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Την επιλογή του κατάλληλου για τη μοντελοποίηση στοιχείου ακολουθεί ο καθορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών του μοντέλου. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών είναι αυτές που προκύπτουν μετά από μετρήσεις στα πειραματικά δοκίμια της εργασίας του κ. Κουσαθανά (Πίνακας 1.2) όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας κατά τον άξονα x (E_1), ενώ οι υπόλοιπες ιδιότητες λαμβάνονται από τα αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος MARSTRUCT (Πίνακας 1.3). Οι ιδιότητες που απαιτούνται για τον πλήρη καθορισμό του μοντέλου υλικών εξαρτώνται από τον τύπο αυτού. Έτσι, δεδομένης της επιλογής του γραμμικά ελαστικού, ορθοτροπικού μοντέλου, και δεδομένου ότι το υλικό θα ήταν UD600 απαιτείται ο ορισμός των μέτρων ελαστικότητας της πλάκας στις διευθύνσεις των γεωμετρικών αξόνων αυτής (E_x , E_y και E_z), τα μμέτρα διάτμησης στα επίπεδα που ορίζονται από τους παραπάνω άξονες (G_{xy} , G_{yz} και G_{zx}) και οι αντίστοιχοι λόγοι του Poisson (ν_{xy} , ν_{yz} και ν_{zx}). Έτσι οι αρχικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Μηχανικές ιδιότητες υλικού που ορίσθηκαν για τους κώδικες του ANSYS.

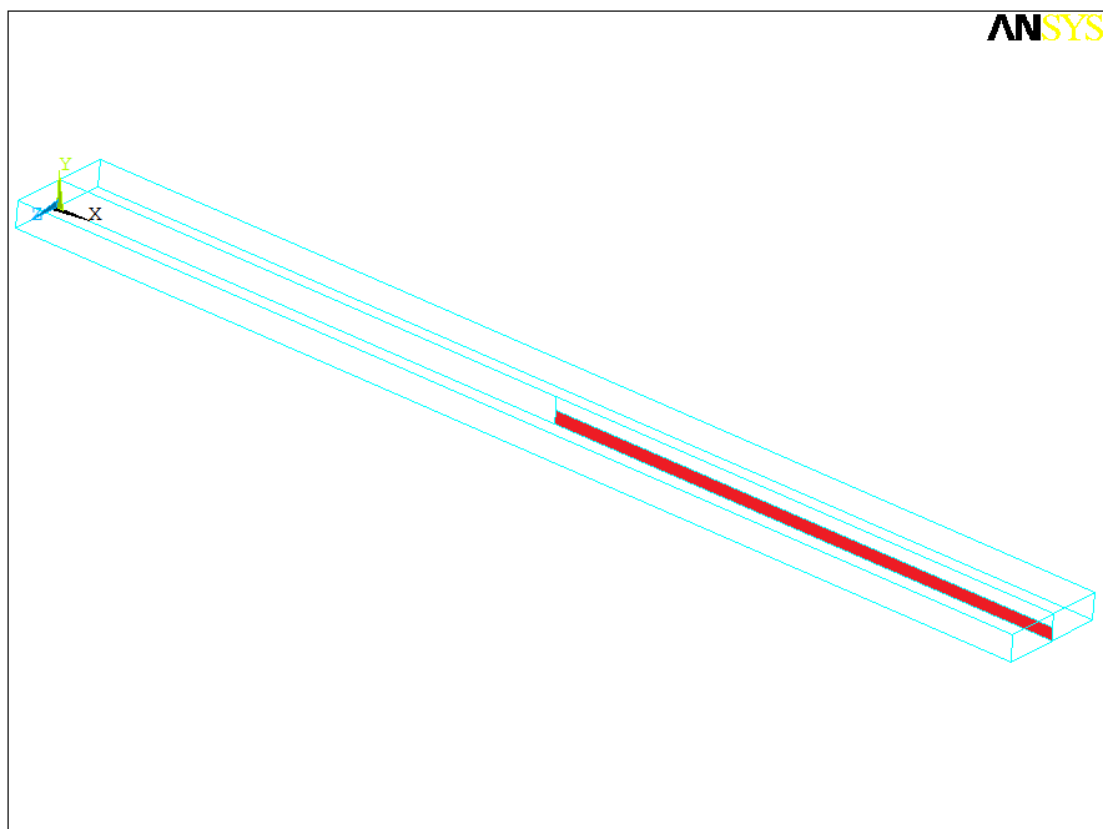
Τιμές Μηχανικών Ιδιοτήτων (MPa)	ΣΕΙΡΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ						
	A 100	A 200	A 300	B 100	B 200	B 300	INTACT
E_1	32340	30330	30430	30980	30870	29550	32960
E_2	8501						
E_3	8501						
G_{12}	2034						
G_{23}	1017						

G_{13}	1017
ν_{xy}	0.29
ν_{yz}	0.29
ν_{zx}	0.29

Οι παραδοχές που γίνονται στον παραπάνω καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων είναι ότι τα μέτρα ελαστικότητας κατά τους κάθετους στην φόρτιση άξονες είναι ίσα, τα μέτρα διάτμησης στα επίπεδα κάθετα στο επίπεδο του αποχωρισμού είναι ίσα με το μισό του μέτρου διάτμησης στο παράλληλο επίπεδο του αποχωρισμού και ότι οι λόγοι του Poisson είναι όλοι ίσοι. Οι παραδοχές αυτές γίνονται στα πλαίσια του προβλήματος λυγισμού δοκού όπου οι ιδιότητες στις διαστάσεις του πλάτους και του πάχους σε σχέση με το μήκος θεωρείται ότι έχουν αμελητέα επίδραση στο αποτέλεσμα της επίλυσης.

2.2.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ Α. ΚΟΥΣΑΘΑΝΑ

Βάση της μοντελοποίησης αποτελεί, όπως έχουμε ξανά αναφέρει αρκετές φορές, το τρισδιάστατο μοντέλο του Κουσαθανά που είναι όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5.

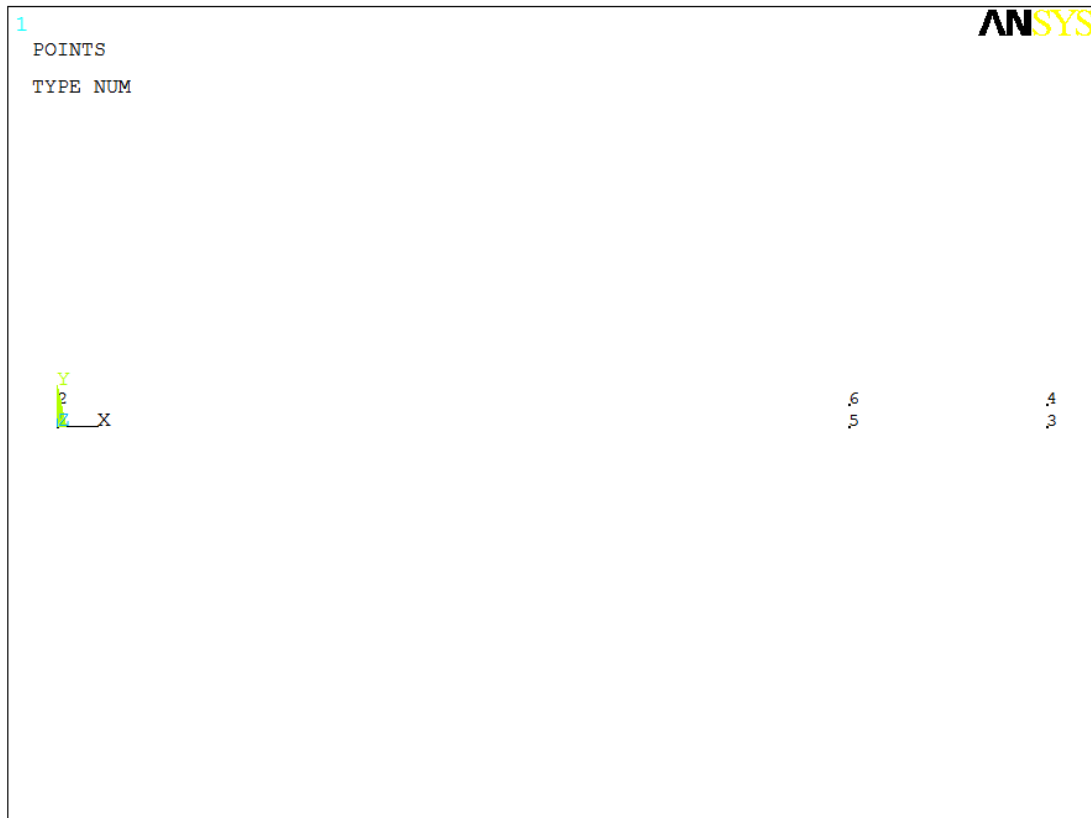


Εικόνα 2.5. Τρισδιάστατη αναπαράσταση δοκού με τεχνητό αποχωρισμό στα $\frac{3}{4}$ του πάχους.

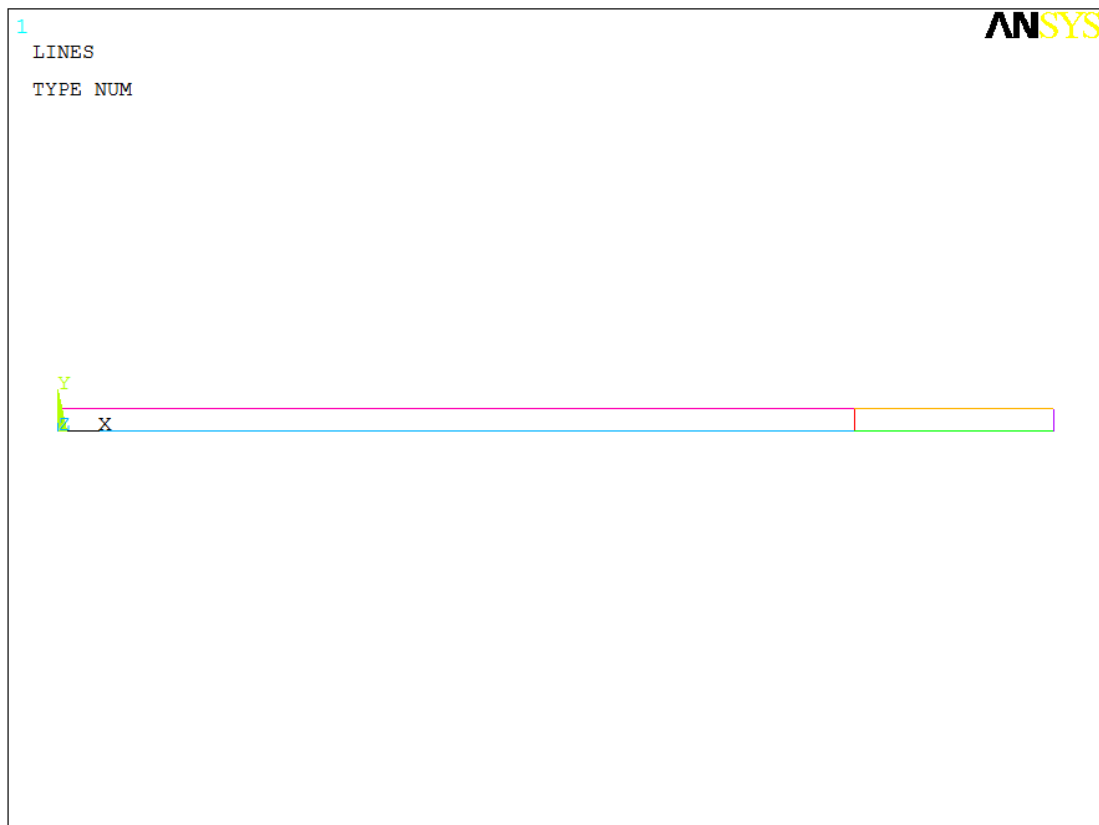
Αντικείμενο μελέτης μας στη παρούσα διπλωματική αποτελεί το επίπεδο XY του εικονιζόμενου μοντέλου. Θεωρούμε ότι οι ιδιότητες παραμένουν σταθερές κατά το

πλάτος οπότε και λαμβάνουμε οποιαδήποτε τομή XY. Αρχικά θα μοντελοποιήσουμε το ¼ του επιπέδου XY (η χρωματισμένη κόκκινη περιοχή στην εικόνα 2.5).

Το πρώτο βήμα του σχεδιασμού στα πλαίσια αυτά είναι ο ορισμός των σημείων που οριοθετούν αυτό το ¼ και τον αποχωρισμό που του αντιστοιχεί όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6. Επόμενο βήμα είναι η σχεδίαση των γραμμών που οριοθετούν την προβολή αυτού του τμήματος της δοκού στο επίπεδο XY (2.7). Οι γραμμές παρουσιάζονται με τη κατάλληλη διαμέριση για το σχεδιασμό των πεπερασμένων στοιχείων.

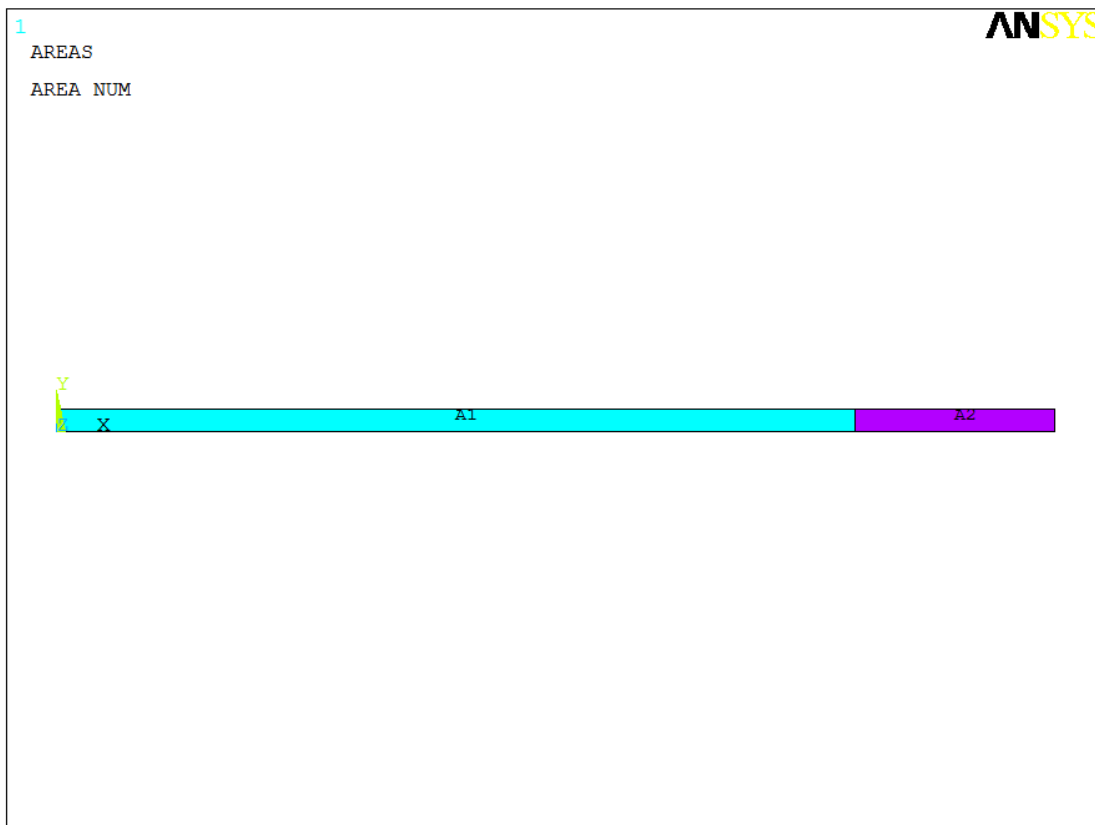


Εικόνα 2.6. Ορισμός των σημείων που οριοθετούν το μοντέλο.



Εικόνα 2.7. Σχεδίαση γραμμών.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο ορισμός των επιφανειών που ορίζουν οι γραμμές (Εικόνα 2.8.). Όπως διακρίνεται στην εικόνα, έχουμε δύο επιφάνειες, την A1 και την A2 .Η A1 ορίζει την άθικτη περιοχή και η A2 την περιοχή του αποχωρισμού. Πλέον η επιφάνεια που έχουμε κατασκευάσει αποτελεί αναπαράσταση της εγκάρσιας τομής της στρώσης που βρίσκεται κάτω από τον τεχνητό αποχωρισμό.



Εικόνα 2.8. Σχεδίαση επιφανειών – επιπέδου XY.

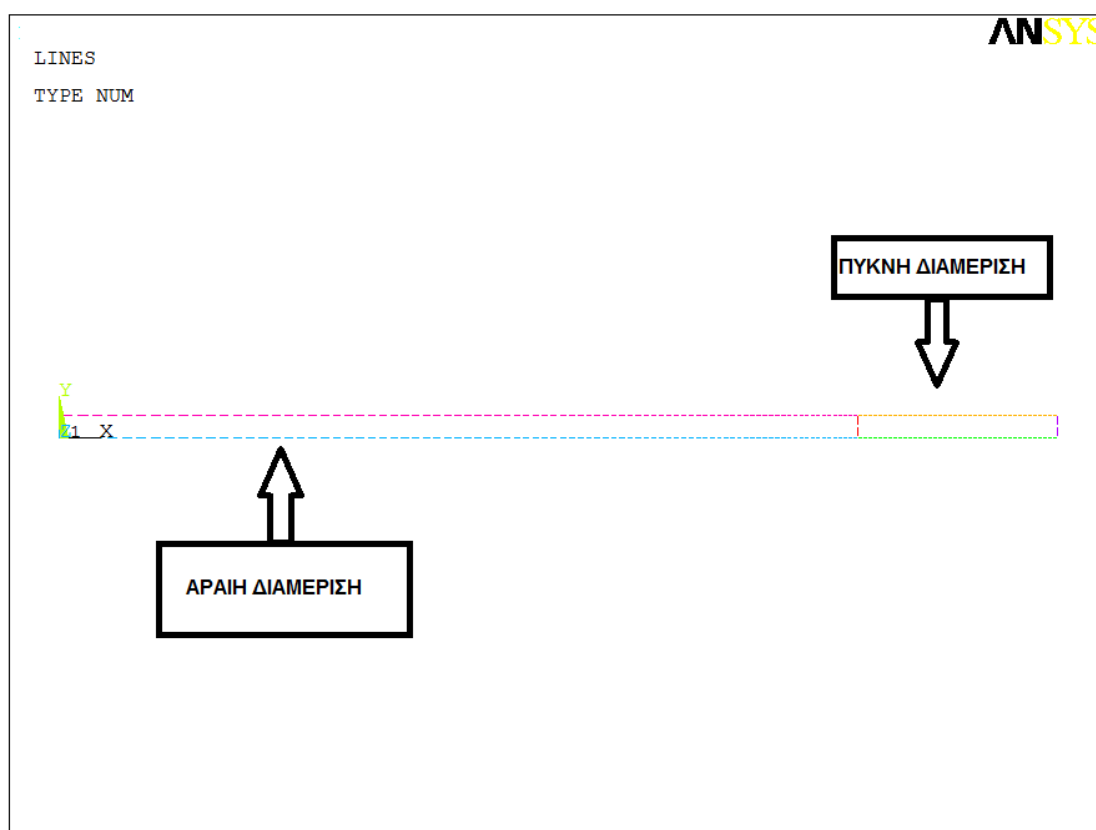
2.2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση καθορίζονται το σχήμα και το πλήθος των στοιχείων του μοντέλου και με βάση αυτά σχηματίζεται ο δισδιάστατος κάρναβος του τμήματος της δοκού που σχεδιάζουμε. Το δεύτερο στάδιο είναι η κατασκευή του τελικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για τις αναλύσεις με βάση τον παραπάνω κάρναβο.

Αρχικά ο σχεδιασμός του κάρναβου ακολουθεί μία συγκεκριμένη διαδικασία η οποία στην πρώτη φάση της γίνεται στο δισδιάστατο μοντέλο που έχει παραχθεί στο στάδιο της γεωμετρικής μοντελοποίησης. Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα οι γραμμές που ορίζουν το μοντέλο να χωριστούν σε τμήματα (Εικόνα 2.7) έτσι ώστε να οριστούν τα στοιχεία. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της εντολής **lesize** στην οποία μας δίνεται η δυνατότητα να ορίσουμε ένα σταθερό μήκος στοιχείου αλλά και μεταβαλλόμενο. Αρχικά επιλέξαμε μεταβαλλόμενο μήκος, το οποίο θα είναι σταθερό στην περιοχή του αποχωρισμού και αυξανόμενο όσο απομακρυνόμαστε από αυτήν την περιοχή, ώστε να είμαστε σε συμφωνία με τα τρισδιάστατα μοντέλα του Κουσαθανά. Η λογική πίσω από αυτό είναι ότι στην περιοχή του αποχωρισμού και κοντά σε αυτή χρειαζόμαστε όσο το δυνατόν ακριβέστερα αποτελέσματα. Για αυτό στην περιοχή του αποχωρισμού έχουμε την διαμέριση του μοντέλου σε πολλά στοιχεία. Όσο απομακρυνόμαστε η διαμέριση γίνεται με μεγαλύτερα στοιχεία με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων αλλά ταυτόχρονη μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Η απόκλιση αυτή είναι αποδεκτή για την παρούσα μελέτη, έτσι συνδυάζονται η ακρίβεια της ανάλυσης με μικρό

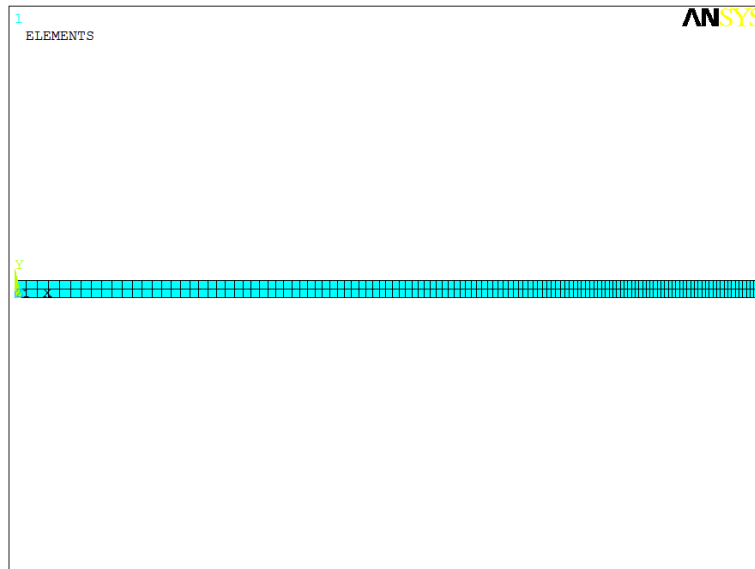
υπολογιστικό χρόνο. Παράλληλα όμως, λόγω των λεπτών όγκων που σχηματίζονται κατά την αναπαράσταση μίας δοκού με λεπτά υποπολύστρωτα, τα δισδιάστατα στοιχεία θα πρέπει να είναι αρκετά μικρά, ώστε κατά την προεκβολή τους, να αποφευχθεί ο σχηματισμός στοιχείων με λόγο ακμών μεγαλύτερο του 20, η χρησιμοποίηση των οποίων δεν ενδείκνυται. Συνέπεια των απαιτήσεων αυτών είναι ο κατακερματισμός των γραμμών της βάσης του μοντέλου σε πολύ μικρά τμήματα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9.

Στη συνέχεια και εφόσον έχουμε επιτύχει σύμπτωση των δισδιάστατων μοντέλων με τα τρισδιάστατα του Κουσαθανά, για τη περαιτέρω ανάλυση χρησιμοποιούμε σταθερή διαμέριση σε διάφορους συνδυασμούς μεγέθους στοιχείων, τόσο κατά το διάμηκες X όσο και κατά το πάχος Y .



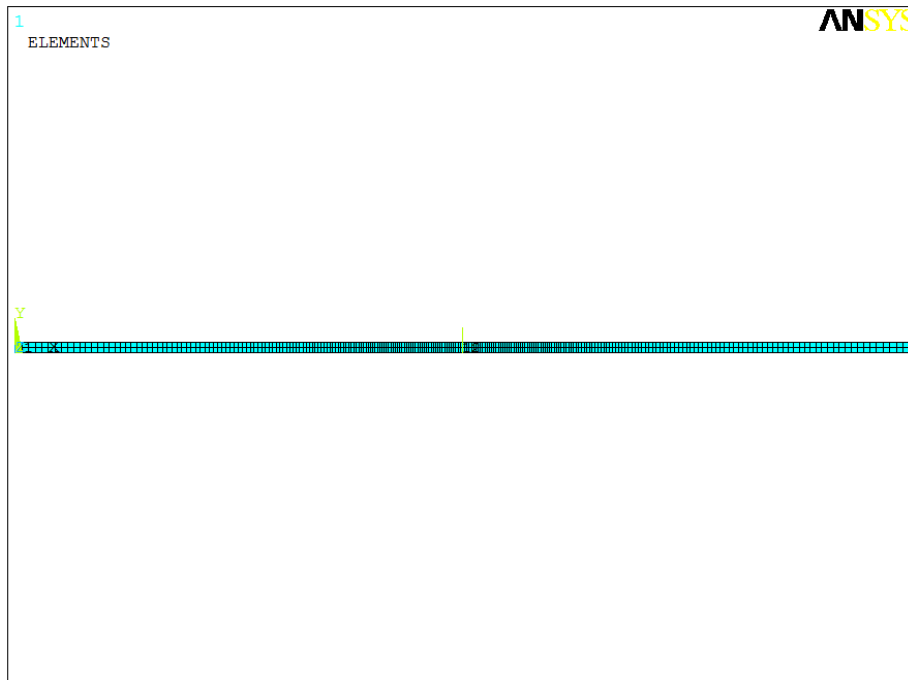
Εικόνα 2.9. Διακριτοποίηση των γραμμών του επιπέδου XY .

Εφόσον με την εντολή **lesize** έχει πραγματοποιηθεί η διαμέριση των γραμμών που περικλείουν την υπό μοντελοποίηση επιφάνεια, μπορεί πλέον να παραχθεί το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με χρήση της εντολής **amesh**. Η εντολή **amesh** παράγει το δισδιάστατο κάναβο της εικόνας 2.10 λαμβάνοντας υπόψη τη διαμέριση των γραμμών αλλά και τις ήδη σχηματισθείσες επιφάνειες A1 και A2. Είναι ευδιάκριτη η διαφορά που υπάρχει στη πυκνότητα των στοιχείων όσο πλησιάζουμε προς το κέντρο του αποχωρισμού.



Εικόνα 2.10. Δισδιάστατη αναπαράσταση του ¼ της επιφάνειας XZ των πειραματικών δοκιμών (XY για το μοντέλο μας).

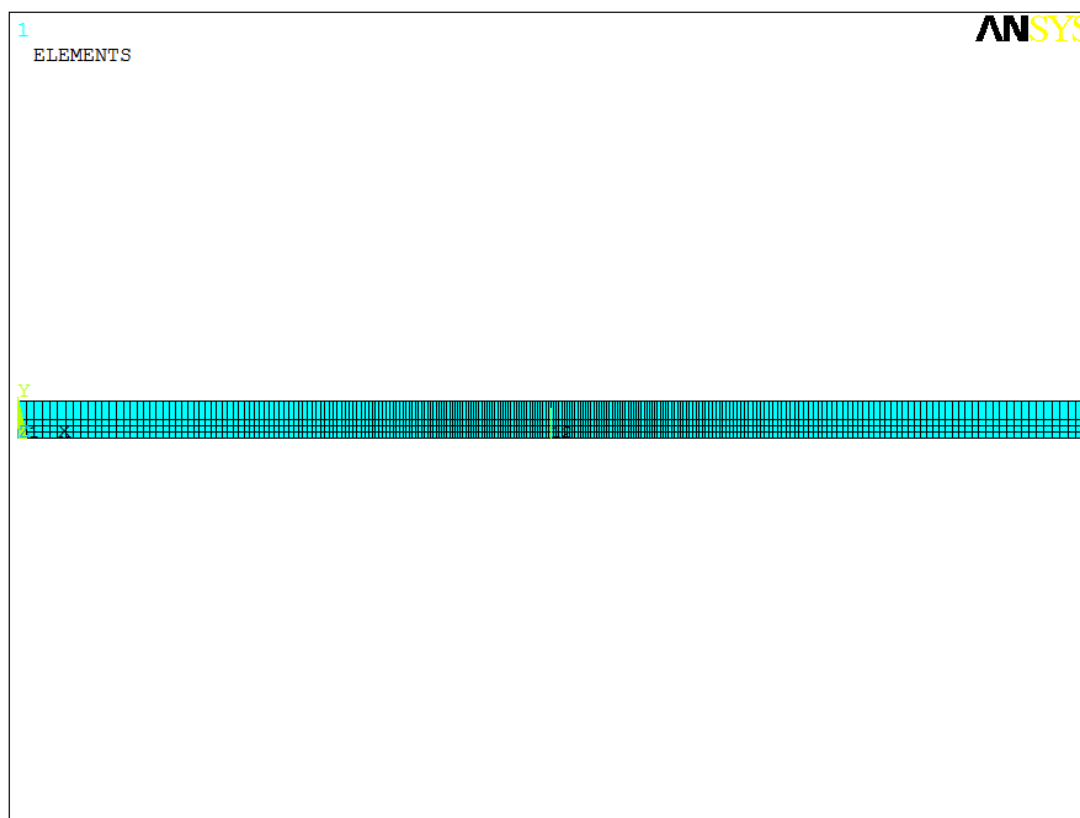
Τώρα για να δημιουργηθεί το υπόλοιπο συμμετρικό ¼ ορίζουμε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων παράλληλο με το αρχικό αλλά στο μέσο του αποχωρισμού και μέσω της επιλογής **arsym** δημιουργούμε τη συμμετρική επιφάνεια όπως φαίνεται στην εικόνα 2.11. Αυτή η εντολή όμως έχει δημιουργήσει κάποιους κοινούς κόμβους οι οποίοι συγχωνεύονται έτσι ώστε να προκύψει ένας ενιαίος κάρναβος. Η συγχώνευση επιτυγχάνεται με χρήση της εντολής **nummrg**.



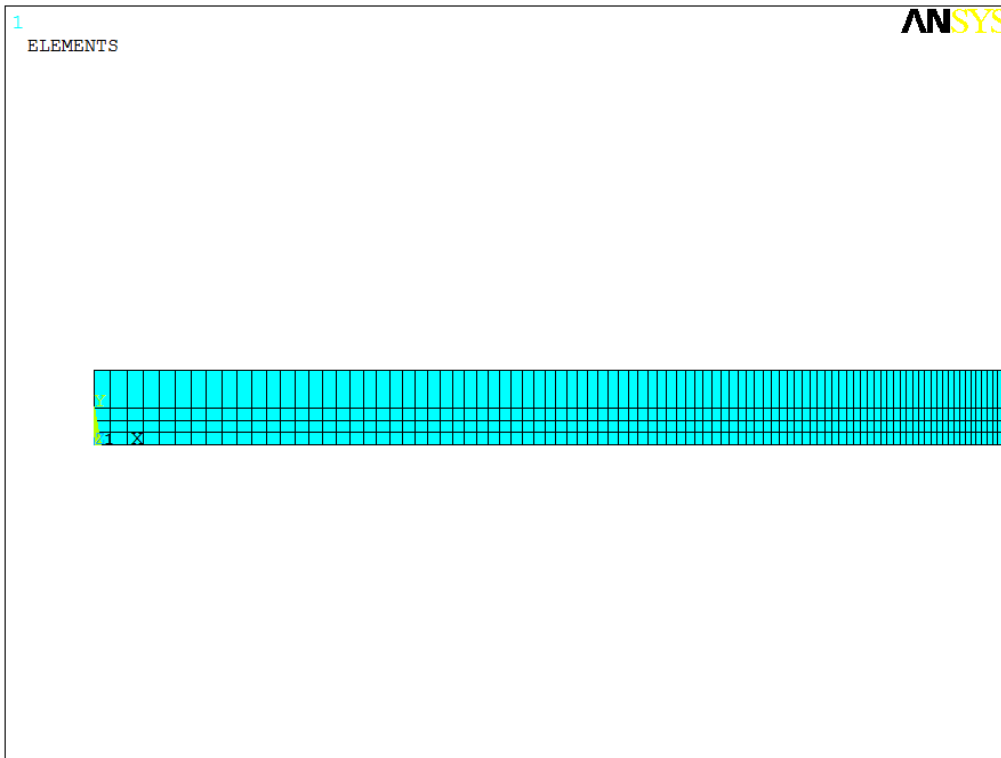
Εικόνα 2.11. Δημιουργία συμμετρικού αντίγραφου – κάτω υποπολύστρωτο (χρήση εντολής **arsym**).

Μέχρι στιγμής έχει αναλυθεί η κατασκευή του μοντέλου που περιλαμβάνει το υποπολύστρωτο κάτω από τον αποχωρισμό. Για τη δημιουργία του πάνω υποπολύστρωτο αρχικά δημιουργείται πάλι μια πανομοιότυπη επιφάνεια με την

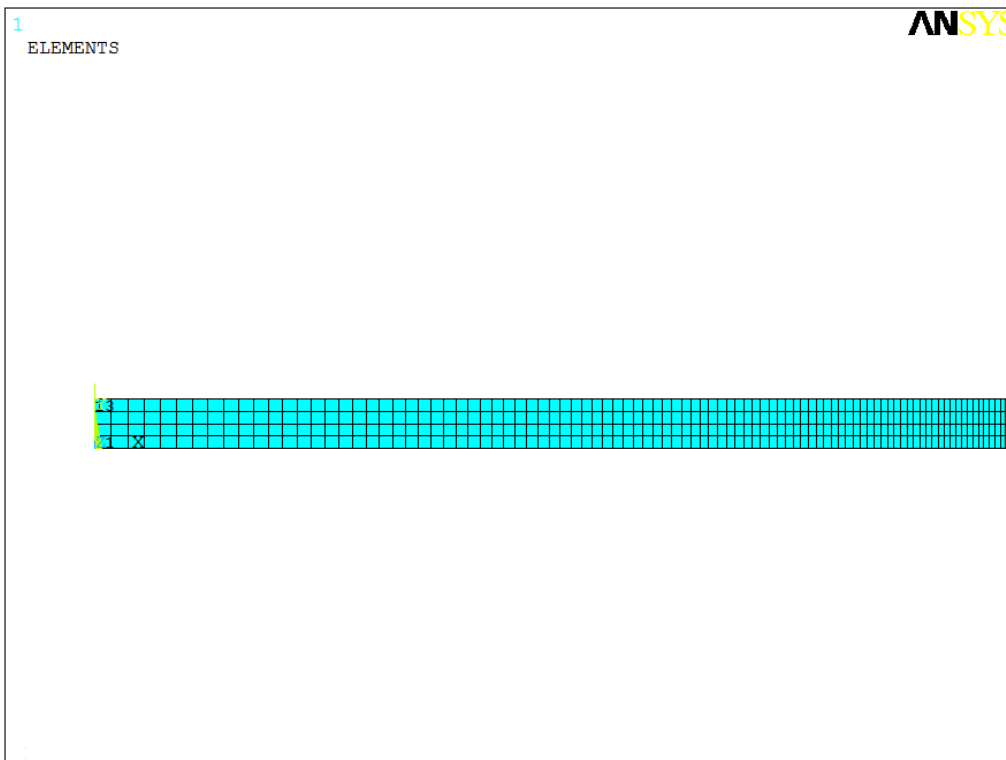
προηγούμενη, του κάτω υποπολύστρωτου, με την εντολή *agen* σε σημείο τέτοιο όπου η κάτω επιφάνεια του ενός να συμπίπτει με την πάνω του άλλου. Στην συνέχεια ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία για τη δημιουργία των στοιχείων (εικόνες 2.12, 2.13) ,όμως το πάχος αυτής της επιφάνειας πρέπει να αλλάξει ανάλογα με την θέση που βρίσκεται ο αποχωρισμός κατά το πάχος της δοκού. Αυτό πραγματοποιείται με την εντολή **arscale** (ANSYS - 2011), οπότε το μοντέλο που προκύπτει αποτελείται από δύο στρώσεις στοιχείων εκατέρωθεν του επιπέδου του αποχωρισμού , με πάχη ίσα με εκείνα των αντίστοιχων υποπολύστρωτων (εικόνα 2.14). Η κατασκευή του τελικού μοντέλου ολοκληρώνεται με την ένωση των κοινών κόμβων των στρώσεων εκτός της περιοχής του αποχωρισμού και στα όρια αυτής, μέσω της εντολής **nummrg**. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι παράλληλα με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της δοκού, σχηματίζεται το αντίστοιχο γεωμετρικό μοντέλο (εικόνα 2.15) , καθώς η εφαρμογή των εντολών **arsym agen** και **arscale** αφορά τόσο στον κάρναβο όσο και στις επιφάνειες που αναπαριστούν το εκάστοτε τμήμα της (ANSYS - 2011). Κατά συνέπεια , η εντολή **nummrg** εφαρμόζεται στους κόμβους και στα αντίστοιχα σημεία των δύο μοντέλων , οπότε εξασφαλίζεται η συμφωνία μεταξύ αυτών. Τέλος , για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, απαιτείται η κατασκευή του μοντέλου της άθικτης πολύστρωτης δοκού. Η διαδικασία κατασκευής είναι ανάλογη εκείνης που έχει ήδη περιγραφεί , με τη διαφορά ότι τα τμήματα του μοντέλου εκατέρωθεν του επιπέδου του αποχωρισμού ενώνονται σε όλη την έκταση της κοινής επιφάνειας (εικόνες 2.16. και 2.17).



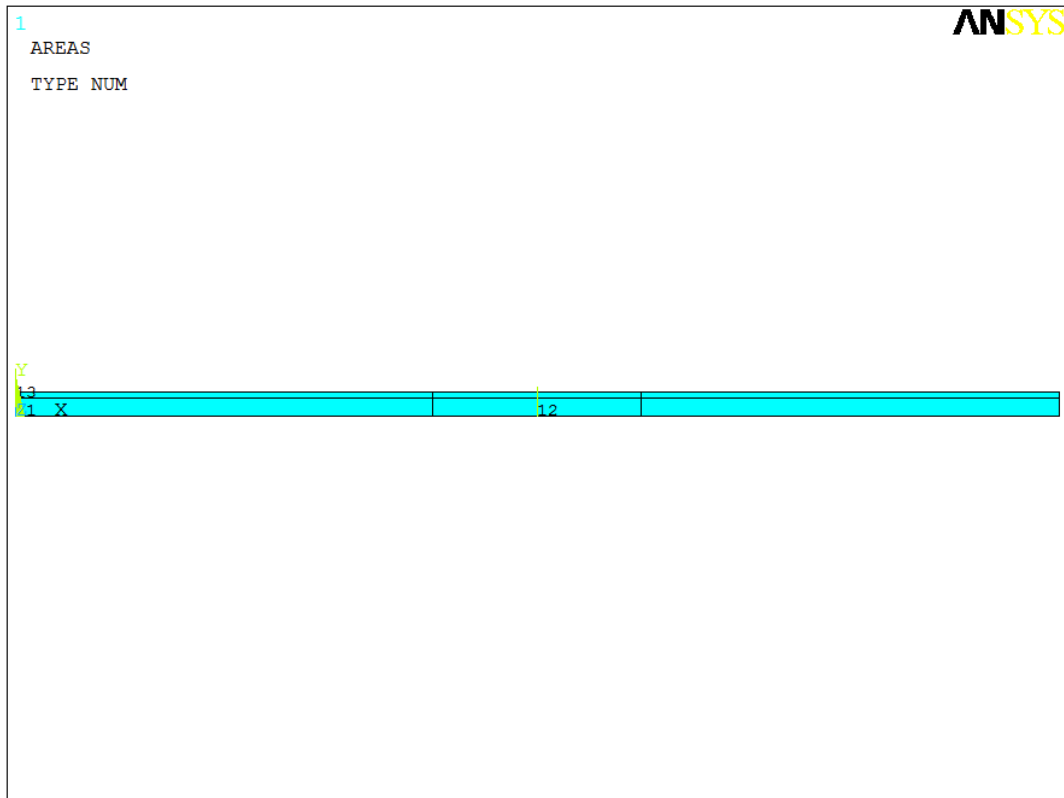
Εικόνα 2.12. Δημιουργία απλού αντίγραφου κατά το πάχος (χρήση εντολής *agen*).



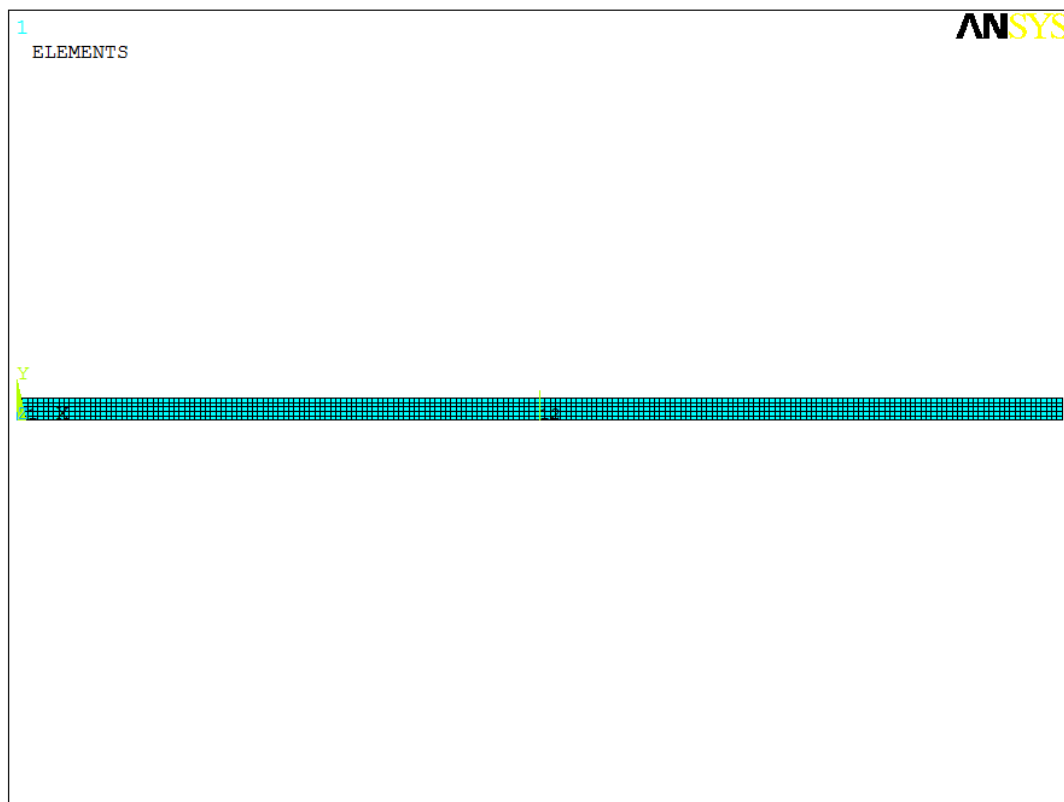
Εικόνα 2.13. Μεγέθυνση του καννάβου που προκύπτει μετά την εφαρμογή της εντολής *agen*.



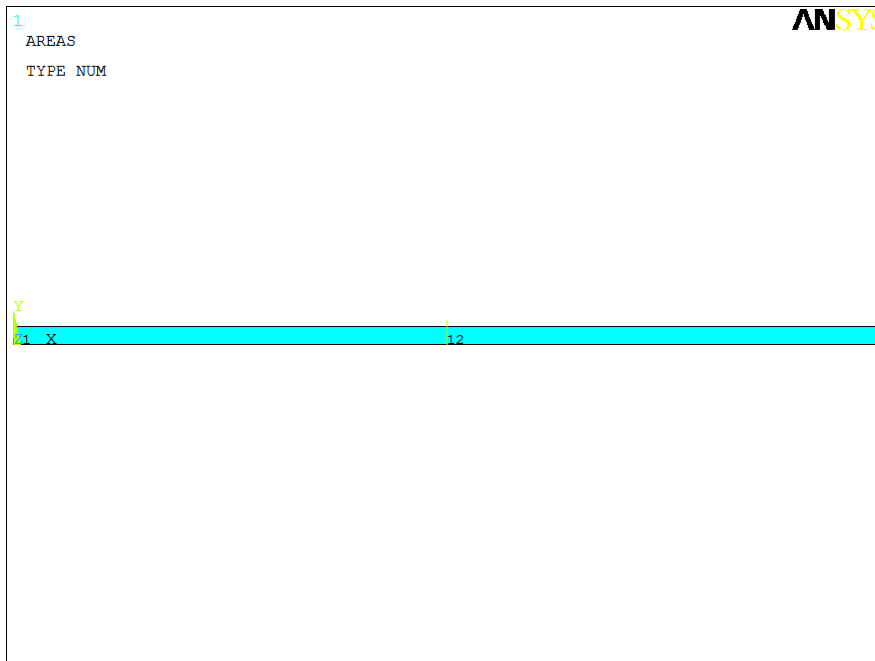
Εικόνα 2.14. Μετασηματισμός του πάχους του άνω υποπολύστρωτου (χρήση εντολής *arscale*).



Εικόνα 2.15. Τελικό γεωμετρικό μοντέλο.



Εικόνα 2.16. Δισδιάστατη αναπαράσταση του καννάβου της επιφάνειας ΧΖ ενός άθικτο δοκιμίου.



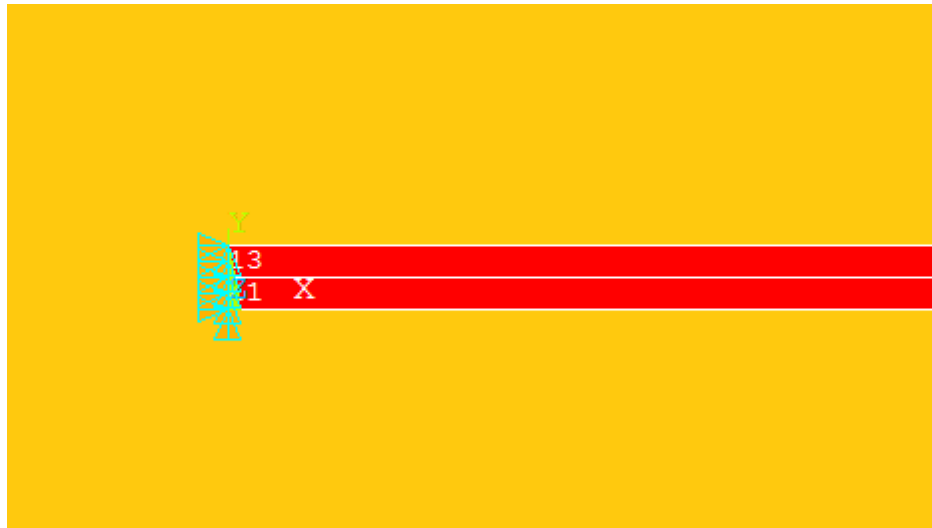
Εικόνα 2.17. Τελικό γεωμετρικό μοντέλο άθικτου δοκιμίου.

2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ (SOLUTION)

Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία έχει κατασκευαστεί το γεωμετρικό μοντέλο και το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό που απομένει είναι ο προσδιορισμός ορισμένων παραμέτρων όχι για το μοντέλο αλλά για την επίλυση του προβλήματος. Αυτές οι παράμετροι είναι οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος δηλαδή οι συνθήκες έδρασης και φόρτισης της δοκού , το φαινόμενο που εξετάζεται αλλά και ο τρόπος επίλυσης του (γραμμικός , μη γραμμικός ή συνδυασμός και των δύο).

2.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο στάδιο, τα δοκίμια τα οποία μοντελοποιούμε δοκιμάστηκαν πειραματικά σε θλίψη. Αυτό σημαίνει πως το μοντέλο θα πρέπει να περιορίζεται έτσι, ώστε η πλευρά του που βρίσκεται απέναντι από την πλευρά που φορτίζεται, να μη μετατοπίζεται και να μην υπάρχει περιστροφή σε καμία διεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του περιορισμού των αντίστοιχων βαθμών ελευθερίας ($u_x, u_y, u_z, \text{rot}_x, \text{rot}_y, \text{rot}_z = 0$) των κόμβων της πλευράς αυτής (Εικόνα 2.18). Οι κόμβοι των πλαϊνών πλευρών δεν περιορίζονται καθόλου με καμία συνοριακή συνθήκη . Μετά την εφαρμογή των παραπάνω επιβάλλονται τα φορτία τα οποία θα εφαρμόζονται στην μία πλευρά της δοκού. Το φορτίο μπορεί να είναι υπό την μορφή πίεσης ή υπό την μορφή μετατόπισης. Στην συγκεκριμένη εργασία προτιμάται η επιβολή μετατόπισης. Αυτό γίνεται επειδή κατά την επιβολή δύναμης υπάρχει παραμόρφωση της επιφάνειας στην οποία επιβάλεται η δύναμη και αυτό δεν αναπαριστά με ακρίβεια τις συνθήκες της εργαστηριακής δοκιμής. Έτσι επιβάλλεται μία θλιπτική μετατόπιση ($u_x < 0$) στην πλευρά επιβολής της μετατόπισης , ενώ όλοι οι υπόλοιποι βαθμοί ελευθερίας περιορίζονται ($u_y, u_z, \text{rot}_x, \text{rot}_y, \text{rot}_z = 0$; Εικόνα 2.19).



Εικόνα 2.18. Περιορισμός όλων των βαθμών ελευθερίας στη μία πλευρά.



Εικόνα 2.19. Περιορισμός όλων των βαθμών ελευθερίας εκτός από την διεύθυνση ux στη πλευρά επιβολής της μετατόπισης.

2.3.2 ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Ο τύπος ανάλυσης του προβλήματος λυγισμού μίας δοκού με αποχωρισμό των στρώσεων μπορεί να είναι γραμμικός και μη γραμμικός. Το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως στατικό από τη στιγμή που δεν υπάρχει διάνοιξη του αποχωρισμού. Το ANSYS παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης είτε με χρήση της γραμμικής ανάλυσης του προβλήματος (ανάλυση ιδιοτιμών, eigenvalue analysis , EIG) είτε μη γραμμικά (nonlinear analysis , N-L).

Ο τύπος της ανάλυσης που θα εφαρμοστεί ,καθορίζεται από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε περίπτωσης. Στην πρώτη περίπτωση της γραμμικής ανάλυσης ο χρόνος είναι πολύ μικρός και εξάγεται μία τιμή για το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Στη δεύτερη περίπτωση ο υπολογιστικός χρόνος είναι μεγαλύτερος και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού εξάγεται από επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Η εφαρμογή της ανάλυσης ιδιοτιμών έχει σαν συνέπεια την επίλυση του προβλήματος κατ'αντιστοιχία με τις αναλυτικές προσεγγίσεις, ενώ παράλληλα, δεν απαιτεί τον καθορισμό πολλών παραμέτρων. Επομένως, εφόσον επιλεγεί αυτή η μέθοδος επίλυσης, καθορίζεται ο αριθμός των μορφών λυγισμού (buckling modes) που θα υπολογιστούν με χρήση της εντολής **mxpand** (ANSYS – 2001).

Αντίθετα, στο πλαίσιο της μη γραμμικής ανάλυσης, εφαρμόζεται η θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων, οπότε η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται σε βήματα. Έτσι, η επιβαλλόμενη παραμόρφωση κατακερματίζεται σε τμήματα, καθένα από τα οποία επιβάλλεται στο μοντέλο ανά βήμα. Σε κάθε βήμα επιχειρείται η σύγκλιση των κριτηρίων που έχουν τεθεί, ενώ μετά την ολοκλήρωση αυτού, το μητρώο δυσκαμψίας της πλάκας προσαρμόζεται στη νέα παραμορφωσιακή κατάσταση, ώστε να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο βήμα. Η ακρίβεια της ανάλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των βημάτων και το μέγεθος τους, έτσι ορίζεται ένα ελάχιστο βήμα στην συγκεκριμένη περίπτωση ίσο με 0.001s και αυτό μεταβάλλεται από το ANSYS με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Το μέγεθος του βήματος οριοθετείται με ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο βήμα που είναι 0.005 και 0.0001 αντίστοιχα. Τα όρια αυτά πρέπει να τοποθετηθούν έχοντας υπόψη τον υπολογιστικό χρόνο αλλά και την ακρίβεια της ανάλυσης. Η εντολή που καθορίζει το μέγεθος του βήματος είναι η **deltim** (ANSYS - 2011). Στο πλαίσιο της μη γραμμικής ανάλυσης ακόμα μία παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και ανάλυση του προβλήματος είναι η αναγκαιότητα ύπαρξης μίας αρχικής γεωμετρικής ατέλειας του μοντέλου, ώστε να εκκινήσει το φαινόμενο του λυγισμού. Αυτή η ατέλεια μπορεί να εφαρμοστεί με τη μεταβολή της γεωμετρίας στην αρχή της μη γραμμικής ανάλυσης. Αυτή η ατέλεια δημιουργείται με τον εξής τρόπο. Πριν τη μη γραμμική ανάλυση, πραγματοποιείται εκείνη των ιδιοτιμών και εν συνεχεία, μέσω της εντολής **upgeom** (ANSYS - 2011) και βάσει της πρώτης κυματομορφής (eigenmode), σε συνδυασμό με ένα συντελεστή σμίκρυνσης, σχηματίζεται η επιθυμητή γεωμετρική ατέλεια. Η επιλογή της πρώτης κυματομορφής οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση λυγισμού, ενώ η μετατόπιση που θα καθορίσει τον συντελεστή σμίκρυνσης λαμβάνεται ίση με το ένα εκατοστό του πάχους της δοκού, ώστε να μη μεταβάλλεται σημαντικά η γεωμετρία του μοντέλου. Επιπροσθέτως, στη μη γραμμική ανάλυση υπάρχει η παράμετρος των στοιχείων επαφής που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Στο πλαίσιο της χρήσης των παραπάνω στοιχείων καθορίζονται ορισμένες παράμετροι σχετικά με τις συνθήκες επαφής που θα επιβληθούν στο μοντέλο. Έτσι, αρχικά καθορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων των στοιχείων, ώστε αυτοί να αφορούν στις μετατοπίσεις στις διευθύνσεις των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων των στοιχείων, κατ'αντιστοιχία με τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων των δισδιάστατων στοιχείων. Επιπρόσθετα, μέσω κατάλληλης ρύθμισης, λαμβάνεται υπόψη η πιθανή αρχική διείσδυση μεταξύ των τμημάτων της δοκού, οφειλόμενη σε γεωμετρική ατέλεια. Παράλληλα, ορίζεται ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο, εντός των οποίων η αρχική διείσδυση είναι αποδεκτή, οπότε αν αυτή βρίσκεται εκτός των ορίων, το ANSYS επιχειρεί να την ελαχιστοποιήσει πριν την έναρξη της ανάλυσης. Τα όρια αυτά είναι 10^{-11} mm και 10^{-4} mm αντίστοιχα.

2.4 ΜΕΤΑΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Μετά την ολοκλήρωση της κάθε ανάλυσης γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων που μας δίνονται. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε τον τρόπο συμπεριφοράς της δοκού καθώς η επιβαλλόμενη μετατόπιση αυξάνεται οπότε η γραμμική ανάλυση και η εύρεση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού είναι εκτός του πεδίου ενδιαφέροντος. Αντίθετα θα επικεντρωθούμε στα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από τη μη γραμμική ανάλυση. Στην περίπτωση της μη γραμμικής ανάλυσης το αποτέλεσμα της μεταεπεξεργασίας δεν είναι μία τιμή για το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αλλά ένα διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η σχέση δύναμης αντίδρασης με την μετατόπιση. Για αυτό τον σκοπό επιλέγεται ένας κόμβος της πλευράς όπου εφαρμόζεται η μετατόπιση, για την εύρεση της αξονικής μετατόπισης της δοκού στη διεύθυνση του φορτίου (άξονας x) ενώ η δύναμη που ασκείται στους κόμβους της πλευράς στήριξης υπολογίζεται με την εντολή *fsum*. Επίσης επιλέγονται όλοι οι κόμβοι του μοντέλου που αντιστοιχούν στην κορυφή του ημικύματος, για την εύρεση της εκτός επιπέδου μετατόπισης για κάθε βήμα της ανάλυσης, τόσο για το κάτω όσο και για το πάνω υποπολύστρωτο.

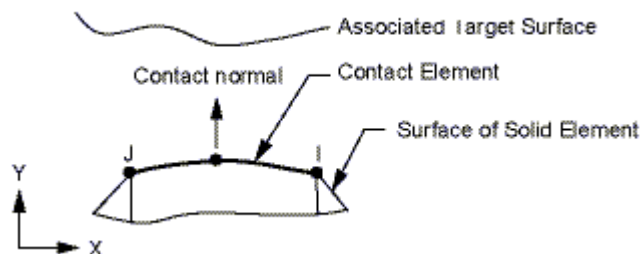
2.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΜΕ COHESIVE ELEMENTS

Η ανάλυση για τα βασικά στάδια της μεθόδου επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία που μόλις περιγράψαμε είναι επαρκής για τα 2D μοντέλα που κατασκευάστηκαν με σκοπό τη σύγκριση τους με τα 3D μοντέλα του Α. Κουσαθανά. Η συγκεκριμένη σύγκριση είναι απαραίτητη για να ελέγξουμε αν οι κώδικες που δημιουργήσαμε για τη μελέτη του ΧΖ επιπέδου του δοκιμίου ,παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με μια οποιαδήποτε διαμήκη τομή που θα παίρναμε αν κόβαμε το τρισδιάστατο μοντέλο κατά ΧΖ. Εφόσον έχουμε επιτύχει τη πολυπόθητη σύμπτωση μπορούμε να ασχοληθούμε με το κατεξοχήν αντικείμενο μελέτης μας ,που είναι το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων. Για να μελετήσουμε όμως το φαινόμενο είναι απαραίτητη η χρήση cohesive elements τα οποία απουσιάζουν από τον τρόπο μοντελοποίησης που ακολούθησε ο κ. Κουσαθανάς. Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των cohesive elements καθώς και επεξήγηση των διάφορων παραμέτρων που λήφθηκαν υπόψη.

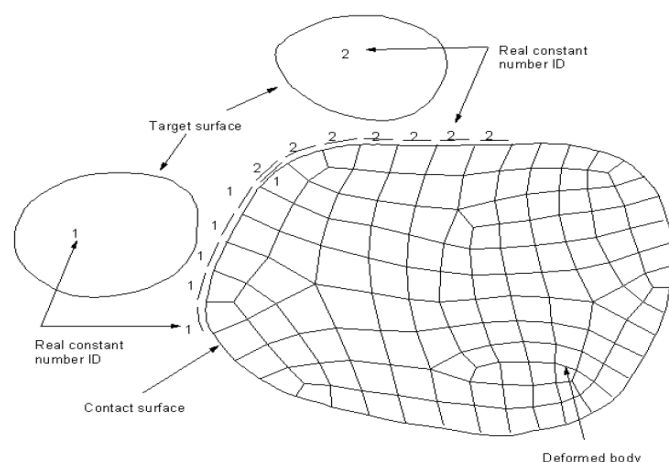
2.5.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ COHESIVE ZONE

Τα μοντέλα στα οποία γίνεται εφαρμογή cohesive elements μοντελοποιούνται με χρήση του δισδιάστατου στοιχείου PLANE42 ,η περιγραφή του οποίου προηγήθηκε. Το γεγονός ότι έχουμε να αντιμετωπίσουμε ένα δισδιάστατο πρόβλημα αλλά και η επιλογή του στοιχείου PLANE42 προκαθορίζουν την επιλογή των στοιχείων επαφής στην διεπιφάνεια του αποχωρισμού. Μέσα από τις βιβλιοθήκες του ANSYS (Mechanical APDL Contact Technology Guide , 2010) διαπιστώνουμε ότι το πρόβλημα μας χαρακτηρίζεται ως επαφής επιφάνειας με επιφάνεια (surface-to-surface contact elements). Για το συγκεκριμένο τύπο επαφής οι μόνοι δυνατοί

συνδυασμοί στοιχείων στόχου (TARGE) και επαφής (CONTA) είναι TARGE169 με CONTA171 ή CONTA172. Κατά τη διάρκεια κατασκευής της επιφάνειας μεταξύ των δύο στρώσεων με χρήση του contact wizard από το command window του προγράμματος επιλέγεται αυτόματα ο συνδυασμός TARGE169 με CONTA172 (Εικόνα 2.20) , τον οποίο και θα διατηρήσουμε. Ένα παράδειγμα συνδυασμού στοιχείων στόχου και στοιχείων επαφής φαίνεται στην εικόνα 2.21 όπου βλέπουμε δύο διαφορετικά target elements να αλληλεπιδρούν με μια κοινή επιφάνεια επαφής.



Εικόνα 2.20. Σχηματική αναπαράσταση του στοιχείου επαφής CONTA172.



Εικόνα 2.21. Αλληλεπίδραση στοιχείων επιφανειακής επαφής

2.5.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΡΟΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ COHESIVE ELEMENTS & ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ COHESIVE ZONE

2.5.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είχε αναφερθεί και στο εισαγωγικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μια διεπιφάνεια σχηματίζεται στη περιοχή που δύο υλικά ενώνονται. Η περιοχή αυτή της διεπιφάνειας χρήζει ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στη περίπτωση των σύνθετων υλικών , επειδή όταν κατασκευές από σύνθετα υποβάλλονται σε συγκεκριμένους τύπους φορτίσεων ,αστοχούν με το χαρακτηριστικό τρόπο του αποχωρισμού των στρώσεων (delamination). Η θραύση ή η δημιουργία αποχωρισμού στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρώσεων ενός πολύστρωτου παίζει σημαντικότατο ρόλο στην μείωση της αντοχής και της ολκιμότητας της κατασκευής. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω αρνητικών επιπτώσεων έχουν γίνει πολλές έρευνες στα φαινόμενα που οδηγούν στη θραύση μιας διεπιφάνειας.

Ο αποχωρισμός που λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια μπορεί να προσομοιωθεί με εφαρμογή μεθόδων μηχανικής των θραύσεων (π.χ nodal release technique).

Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές οι οποίες εισάγουν άμεσα τη μηχανική των θραύσεων στο πρόβλημα, με το να υιοθετούν σχέσεις χαλάρωσης μεταξύ των ελκτικών τάσεων και των προκύπτοντων αποχωρισμών. Με αυτό τον τρόπο έρχεται στο προσκήνιο το μέγεθος της κρίσιμης ενέργειας θραύσης (critical fracture energy) η οποία είναι η απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται για να "σπάσει" ο κολλητικός δεσμός. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι ευρέως γνωστή ως cohesive zone material (CZM) model.

Για τη προσομοίωση μιας διεπιφάνειας αλλά και του τρόπου που αστοχεί απαιτείται αρχικά ο χωρισμός του μοντέλου σε δύο μέρη ή ομάδες στοιχείων και στη συνέχεια η χρήση ενός μοντέλου CZM το οποίο θα χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του κολλητικού δεσμού.

Το μοντέλο CZM αποτελείται από μία καταστατική σχέση μεταξύ της ελκτικής δύναμης T που ασκείται στην διεπιφάνεια και του προκύπτοντος διεπιφανειακού αποχωρισμού δ .

Ο αναλυτικός καθορισμός των δύο αυτών μεγεθών εξαρτάται από το είδος των στοιχείων αλλά και το υλικό που χρησιμοποιούμε κατά τη μοντελοποίηση.

Το ANSYS μας δίνει δύο επιλογές για τη μοντελοποίηση μιας διεπιφάνειας που είναι οι εξής :

1) Μοντελοποίηση με Interface Elements

2) Μοντελοποίηση με Contact Elements

Τελικά επιλέγουμε τη χρησιμοποίηση contact elements για το σχηματισμό της διεπιφάνειας και η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται στη συνέχεια. Η επιλογή των contact elements έναντι των interface έγινε κυρίως διότι ο προγραμματισμός τους είναι αρκετά πιο εύκολος ενός προσφέρουν και τη δυνατότητα για καλύτερη περιγραφή των φαινομένων που συναντήθηκαν στη μελέτη. Επίσης ο συγκεκριμένος τρόπος μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενες εργασίες πάνω σε σχετικά παρεμφερή προβλήματα (Καρατζάς Β., 2009), και έδειξε πολύ καλή συμπεριφορά όσον αφορά την απόδοση των διαφόρων μηχανισμών αστοχίας.

2.5.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.

Η εμφάνιση αποχωρισμού σε μοντελοποιήσεις που έχουν γίνουν με contact elements αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως debonding. Ο αποχωρισμός που δημιουργείται μεταξύ των δύο μερών που απαρτίζουν το κολλητικό δεσμό ορίζεται με όρους όπως κενό (contact gap), διείσδυση (penetration) αλλά και απόσταση επαπτομενικής ολίσθησης (tangential slip distance). Οι τιμές που θα προκύψουν για τους παραπάνω όρους εξαρτώνται από το τύπο του συνεκτικού στοιχείου αλλά και από το σημείο στο οποίο εφαρμόζεται.

Για τη μοντελοποίηση της περιοχής συνεκτικότητας θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που αξιοποιεί τους δι-γραμμικούς αλγόριθμους (bilinear cohesive zone

material model) το οποίο έχει βασιστεί σε παλιότερες έρευνες (Alfano & Crisfield,2001).

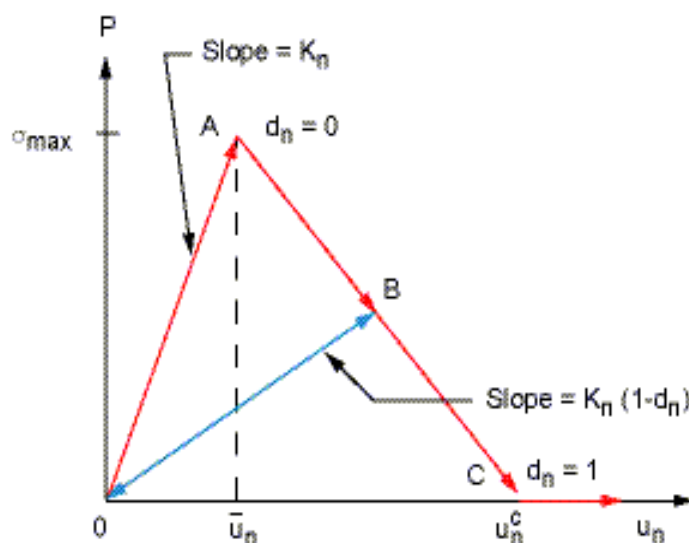
Η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου έγινε λόγω της αποδεδειγμένα καλής λειτουργίας σε πρότερες μελέτες (Ανυφαντής 2012 , Καρατζάς 2007).

Το μοντέλο αυτό που κάνει είναι να χωρίζει επιμέρους την ανάλυση ανάλογα με το κατά ποιο τρόπο αστοχεί η περιοχή του κολλητικού δεσμού ,δηλαδή αν έχουμε mode I,II ή mixed-mode.

MODE I DEBONDING

Σε περιπτώσεις που έχουμε αστοχία κατά mode I , η διεπιφάνεια χαρακτηρίζεται κυρίως από απομάκρυνση κάθετα στην περιοχή μεταξύ των δύο επιφανειών , ενώ αντίθετα η ολίσθηση μεταξύ τους είναι αμελητέα. Η σχέση μεταξύ της ορθής τάσης που ασκείται στην περιοχή και του ανοίγματος που προκαλεί φαίνονται στην εικόνα 2.21. Παρατηρούμε ότι αρχικά το μοντέλο παρουσιάζει μια γραμμική ελαστική συμπεριφορά φόρτισης που φτάνει μέχρι το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση (περιοχή OA) , ενώ στη συνέχεια αποφορτίζεται εξίσου γραμμικά (περιοχή AC). Το φαινόμενο του αποχωρισμού αρχίζει να λαμβάνει χώρα στο σημείο A που έχουμε τη μέγιστη τάση ενώ ολοκληρώνεται στο σημείο C όπου η ορθή τάση γίνεται μηδέν. Στη συνέχεια η διάδοση μπορεί να συνεχιστεί ανεμπόδιστα χωρίς να τη συγκρατεί κάποια τάση ,έχουμε δηλαδή πλήρη κατάρρευση της αντοχής του κολλητικού δεσμού.

Το εμβαδό που σχηματίζεται κάτω από τη καμπύλη OAC ισούται με την ενέργεια που απελευθερώνεται εξαιτίας του αποχωρισμού , η οποία είναι η γνωστή κρίσιμη ενέργεια θραύσης. Η κλίση που εμφανίζει η καμπύλη OA καθορίζει το άνοιγμα που δημιουργείται τη στιγμή που η τάση φτάνει τη μέγιστη τιμή της και συνεπώς χαρακτηρίζει τον τρόπο που η ορθή τάση μειώνεται καθώς οι στρώσεις ανοίγουν όλο και περισσότερο , ανεξαρτήτως του αν η θραύση είναι ψαθυρή ή όλκιμη. Εφόσον έχει γίνει εκκίνηση της αποκόλλησης (περιοχή από το σημείο A και μετά) και στη συνέχεια για κάποιο λόγο σταματήσει η φόρτιση, σε μελλοντική φόρτιση η καμπύλη που θα χαρακτηρίζει τη σχέση τάσης-ανοίγματος θα είναι η OB (Εικόνα 2.21).



Εικόνα 2.21. Καμπύλη ορθής τάσης-ανοίγματος για μοντέλα που κάνουν χρήση του δι-γραμμικού αλγόριθμου .

Τα μεγέθη που παρουσιάζονται στην εικόνα 2.21 έχουν τις εξής ερμηνείες :

- $P = K_n * u_n * (1 - d_n)$ είναι ορθή τάση επαφής (έλξη)
- σ_{max} = μέγιστη ορθή τάση επαφής
- K_n = μέτρο ακαμψίας έναντι της ορθής τάσης επαφής
- u_n = κενό-άνοιγμα επαφής
- u_n^c = άνοιγμα επαφής στο τέλος της αποκόλλησης
- d_n = συντελεστής αποκόλλησης

Ο συντελεστής αποκόλλησης d_n για mode I ισούται με :

$$d_n = \left(\frac{u_n - \bar{u}_n}{u_n} \right) * \left(\frac{u_n^c}{u_n^c - u_n} \right)$$

όπου για

$$\Delta_n \leq 1 \Rightarrow d_n = 0$$

και για

$$\Delta_n > 1 \Rightarrow 0 < d_n \leq 1$$

με το Δ_n να ισούται με

$$\frac{u_n}{u_n}$$

Η κρίσιμη ενέργεια θραύσεως (G_{cn}) που ισούται με το εμβαδό του τριγώνου OAC εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση : $G_{cn} = \frac{1}{2} * \sigma_{max} * u_n^c$

MODE II DEBONDING

Όταν έχουμε αστοχία κατά mode II αυτή που κυριαρχεί είναι η εφαπτομενική τάση έναντι της ορθής οπότε η διεπιφάνεια αστοχεί κυρίως ολισθαίνοντας. Το τρίγωνο της εικόνας 2.21 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη περίπτωση που έχουμε αστοχία με γλίστρημα αρκεί να γίνουν οι κατάλληλες τροποποιήσεις (π.χ αντί για σ_{max} πλέον έχουμε τ_{max}).

Η σχέση που συνδέει την εφαπτομενική τάση με την αντίστοιχη μετατόπιση λόγω γλιστρήματος είναι η ακόλουθη :

$$\tau_t = K_t * u_t * (1 - d_t)$$

όπου τα μεγέθη $K_t u_t$ και d_t είναι τα αντίστοιχα των $K_n u_n$ και d_n που είχαμε για mode I. Επίσης οι σχέσεις που απαιτούνται για τους υπολογισμούς των διαφόρων μεγεθών είναι ανάλογες με τη περίπτωση που έχουμε άνοιγμα του κολλητικού δεσμού και έχουν ως εξής :

$$d_t = \left(\frac{u_t - \bar{u}_t}{u_t} \right) * \left(\frac{u_t^c}{u_t^c - u_t} \right)$$

όπου για

$$\Delta_t \leq 1 \Rightarrow d_t = 0$$

και για

$$\Delta_t > 1 \Rightarrow 0 < d_t \leq 1$$

με το Δ_t να ισούται με

$$\frac{u_t}{u_t}$$

Η κρίσιμη ενέργεια θραύσεως (G_{ct}) που ισούται με το εμβαδό του τριγώνου OAC εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση : $G_{ct} = \frac{1}{2} * t_{\max} * u_t^c$

MIXED-MODE DEBONDING

Σε αυτήν την περίπτωση αστοχίας τόσο η ορθή τάση όσο και η εφαπτομενική συμβάλουν αρκετά στη διαδικασία αστοχίας του κολλητικού δεσμού μεταξύ των σύνθετων στρώσεων.

Ο συντελεστής αποκόλλησης d_m για mixed-mode ισούται με :

$$d_n = \left(\frac{\Delta_m - 1}{\Delta_m} \right) * x$$

όπου για

$$\Delta_m \leq 1 \Rightarrow d_m = 0$$

και για

$$\Delta_m > 1 \Rightarrow 0 < d_m \leq 1$$

με το Δ_m να ισούται με

$$\sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_t^2}$$

και το x με

$$\left(\frac{u_n^c}{u_n^c - u_n} \right) = \left(\frac{u_t^c}{u_t^c - u_t} \right).$$

Όταν ο αποχωρισμός είναι μεικτού τύπου τόσο η ορθή τάση όσο και η εφαπτομενική συμβάλουν στην ενέργεια που απαιτείται για την εκκίνηση και εξέλιξη της θραύσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι να έχει αστοχήσει οριστικά ο κολλητικός δεσμός πριν φτάσουμε τις κρίσιμες ενέργειες θραύσεως G_{cn} και G_{ct} . Για αυτόν το λόγο στη περίπτωση που έχουμε mixed-mode ο νόμος που θα εκφράζει την ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση θα είναι ο ακόλουθος :

$$\left(\frac{G_t}{G_{ct}} \right) + \left(\frac{G_n}{G_{cn}} \right) = 1$$

όπου

$$G_n = \int P^* d^* u_n \quad \text{και} \quad G_t = \int P^* d^* u_t .$$

2.5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ COHESIVE ZONE ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

2.5.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα δισδιάστατα μοντέλα ,που έχουν ήδη κατασκευαστεί με τον τρόπο που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα , θα εισάγουμε κατάλληλους κώδικες που καθιστούν εφικτή τη δημιουργία cohesive zone αλλά και τη σωστή λειτουργία αυτής. Είναι σημαντικό να έχει γίνει σωστός προγραμματισμός του μοντέλου που προσομοιώνει την περιοχή του κολλητικού δεσμού , καθώς τυχόν λάθη μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα (π.χ. πιθανή διείδυση της μιας στρώσης στην άλλη, σημαντική απόκλιση της πραγματικής συμπεριφοράς του κολλητικού δεσμού με τη μοντελοποιημένη). Για τους παραπάνω λόγους ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των αποφάσεων που πάρθηκαν αλλά και των εντολών που χρησιμοποιήθηκαν στην πορεία της μοντελοποίησης με χρήση cohesive elements. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε σαν βάση είναι το δισδιάστατο B 100 (αποχωρισμός μήκους 100 mm στα $\frac{3}{4}$ του πάχους της δοκού).

2.5.3.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΔΕΣΜΟΥ & ΤΡΟΠΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Ανάλογα με το είδος της αστοχίας που περιμένουμε να εμφανίσει το μοντέλο μας, θα πρέπει να εισάγουμε και τις κατάλληλες πληροφορίες. Το μοντέλο το οποίο μελετάμε αποτελεί ουσιαστικά προσομοίωση μιας δοκού η οποία φέρει θλιπτική φόρτιση στο ένα άκρο της ενώ το άλλο είναι πακτωμένο. Επίσης φέρει τεχνητό αποχωρισμό παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης. Με δεδομένα αυτά περιμένουμε

τόσο την εμφάνιση γλιστρήματος μεταξύ των εκατέρωθεν του αποχωρισμού στρώσεων, όσο και άνοιγμα της διατομής καθώς η δοκός θα λυγίζει. Έχουμε δηλαδή να κάνουμε με mixed-mode debonding. Για την εισαγωγή των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τόσο τις ιδιότητες του κολλητικού δεσμού όσο και του τρόπου αστοχίας θα κάνουμε χρήση των εντολών **tb** και **tbddata** (ANSYS-2011). Αρχικά επιλέγουμε με την εντολή **tb** να αναλυθεί η περιοχή του κολλητικού δεσμού με χρήση των δι-γραμμικών αλγορίθμων (bilinear law). Ο συγκεκριμένου τύπου αλγόριθμος μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε μεταξύ δύο διαφορετικών τρόπων χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων της συνεκτικής επιφάνειας. Αυτοί είναι οι **CBDD** και **CBDE**. Αν χρησιμοποιηθεί το CBDD η περιοχή που περιβάλλεται από την καμπύλη OAC της εικόνας 2.21 μπορεί να οριστεί με εισαγωγή της μέγιστης τάσης και της μέγιστης απομάκρυνσης. Αντίθετα με χρήση του CBDE χρειάζεται ο ορισμός της μέγιστης τάσης και της κρίσιμης ενέργειας θραύσης. Επιλέγουμε την επίλυση με CBDE καθώς έχουμε δεδομένα από παλιότερες πειραματικές δοκιμές που καθιστούν ευκολότερο το προγραμματισμό.

Στη συνέχεια με την εντολή **tbddata** εισάγουμε τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη cohesive zone. Για mixed-mode οι παράμετροι αυτές είναι έξι και αναπαρίστανται ως C1,C2,C3,C4,C5,C6. Οι τιμές που λαμβάνουν έχουν ληφθεί από παλαιότερες πειραματικές δοκιμές του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, πάνω σε δοκίμια ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, τα οποία αστόχησαν είτε κατά mode I είτε κατά mode II. Βεβαίως έγινε ένας έλεγχος ευαισθησίας (τρεξίματα με \pm της αρχικής τιμής κάθε παραμέτρου) για να διαπιστωθεί κατά πόσο εναρμονίζονται με το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παράμετροι με τις τιμές στις οποίες τελικά καταλήξαμε με επεξήγηση των μεγεθών που αναπαριστούν.

Πίνακας 2.2. Χαρακτηρισμός παραμέτρων για σχηματισμό της συνεκτικής επιφάνειας.

Συμβολισμός Παραμέτρου	Χαρακτηρισμός Παραμέτρου	Τιμή Παραμέτρου
C1	σ_{max} = μέγιστη ορθή τάση επαφής	0.66 (MPa)
C2	G_{cn} = κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode I	1.16 (N/mm)
C3	τ_{max} = μέγιστη εφαπτομενική τάση επαφής	15.3 (MPa)
C4	G_{ct} = κρίσιμη ενέργεια θραύσεως για mode II	1.72 (N/mm)
C5	η = artificial damping coefficient	0.0000001
C6	β = flag for tangential slip under compressive normal contact stress	1

Από τις παραπάνω 6 παραμέτρους οι μόνες που δεν έχουν αναλυθεί ως τώρα είναι οι συντελεστές η και β . Ο συντελεστής η χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν διάφορα προβλήματα σύγκλισης που ανακύπτουν κατά την επίλυση με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson. Ο β πάλι χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του εφαπτομενικού "γλιστρήματος" στη περιοχή του κολλητικού δεσμού. Οι τιμές που χρησιμοποιήσαμε για αυτούς τους 2 συντελεστές είναι αυτές που προτείνονται αυτόματα από το πρόγραμμα. Τις διατηρήσαμε καθώς μετά από έλεγχο παρατηρήσαμε πώς δουλεύουν σωστά.

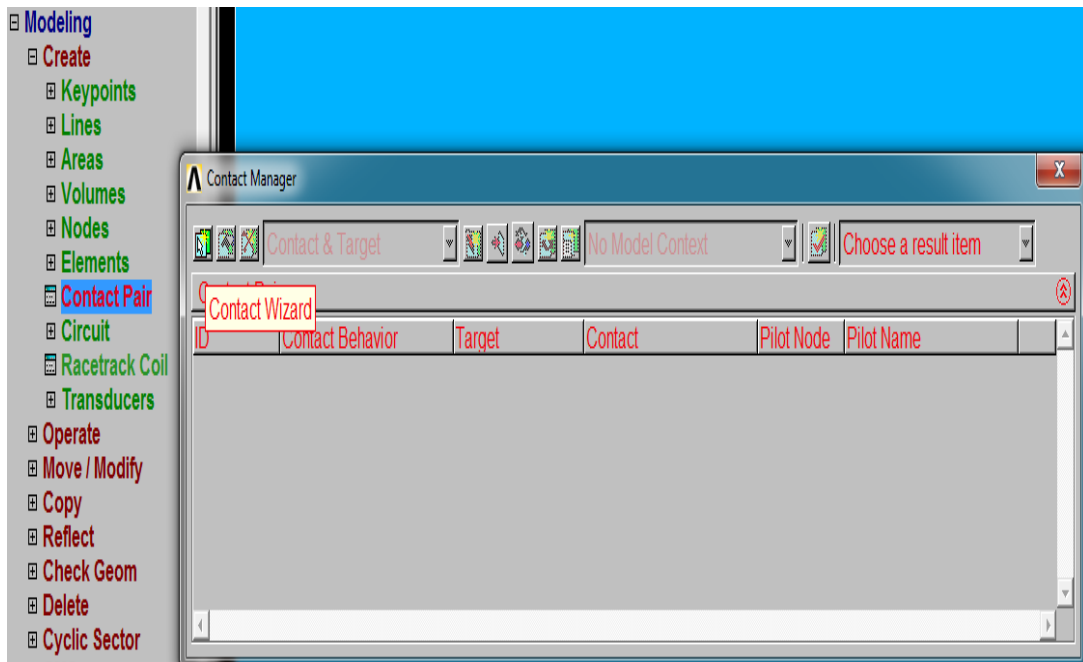
Παρακάτω παραθέτουμε ένα κομμάτι κώδικα για να γίνει κατανοητό πώς εισάγουμε τις ιδιότητες με χρήση των εντολών **tb** και **tbddata**.

```
! TB, Lab, MAT, NTEMP, NPTS, TBOPT,  
! TBDATA, STLOC, C1, C2, C3, C4, C5, C6  
*SET,Smax,0.66          !maximum normal contact stress [MPa]  
*SET,Gcn , 1.16         !critical fracture energy for normal seperation [N/mm]  
*SET,Tmax , 15.3       !maximum equivalent tangential xontact stress [MPa]  
*SET,Gct , 1.72        !Critical fracture energy for tangential slip [N/mm]  
*SET,hta , 1e-5        !artificial damping coefficient (1000 fores mikrotero apo to  
minimum time step)  
*SET,beta , 1          !flag for tangential slip under compressive normal contact stress  
TB,CZM,2,1,1,CBDE     ! bilinear behavior with tractions and separation distances  
TBDATA,1,Smax,Gcn,Tmax,Gct,hta,beta
```

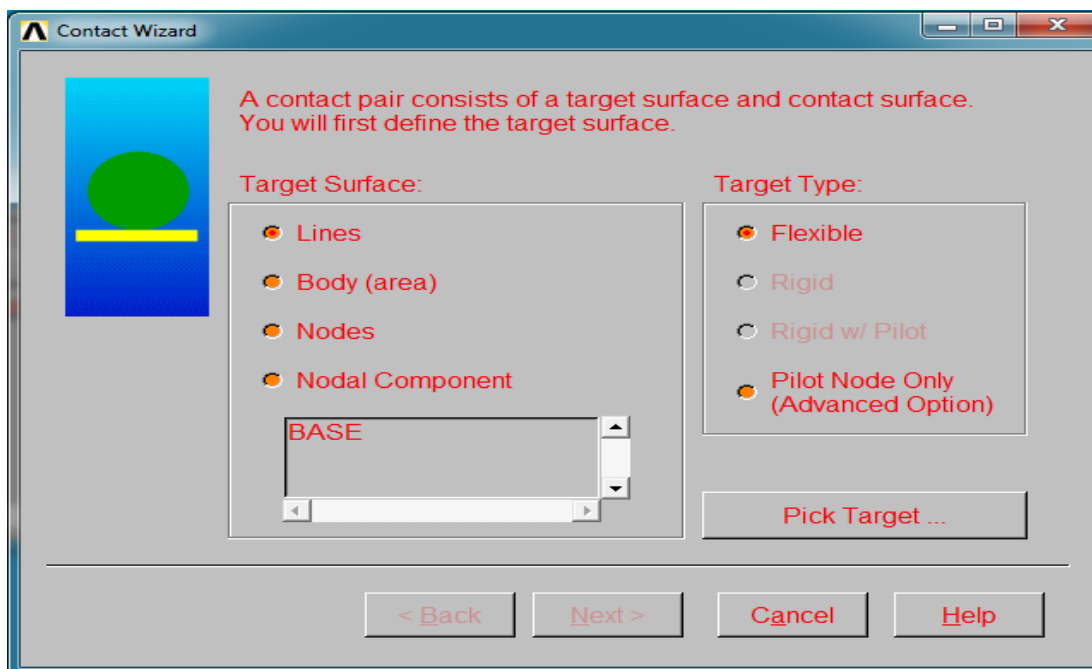
Στο παραπάνω κώδικα με ! ορίζουμε την περιοχή των σχολίων ενώ με την εντολή *SET ορίζουμε τιμές σε μεταβλητές που τις ονοματίζουμε όπως θέλουμε.

2.5.3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ COHESIVE ZONE

Εφόσον έχουμε ορίσει τις προδιαγραφές της επιφάνειας συνεκτικότητας όσον αφορά το νόμο (bilinear law) που ακολουθεί αλλά και τις ιδιότητές της, μπορούμε πλέον να την κατασκευάσουμε. Ο σχηματισμός του contact pair θα γίνει με τη βοήθεια του command window του περιβάλλοντος του ANSYS. Αφού επιλέξουμε contact pair μας εμφανίζεται στη συνέχεια το παράθυρο με την ονομασία contact manager από όπου επιλέγουμε την επιλογή contact wizard (Εικόνα 2.22). Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι θα χρησιμοποιήσουμε ξεχωριστά contact pairs για την άθικτη περιοχή και την περιοχή του αποχωρισμού. Αρχικά θα κατασκευάσουμε το contact pair της άθικτης περιοχής ξεκινώντας από την επιλογή του στοιχείου στόχου (Εικόνα 2.23).

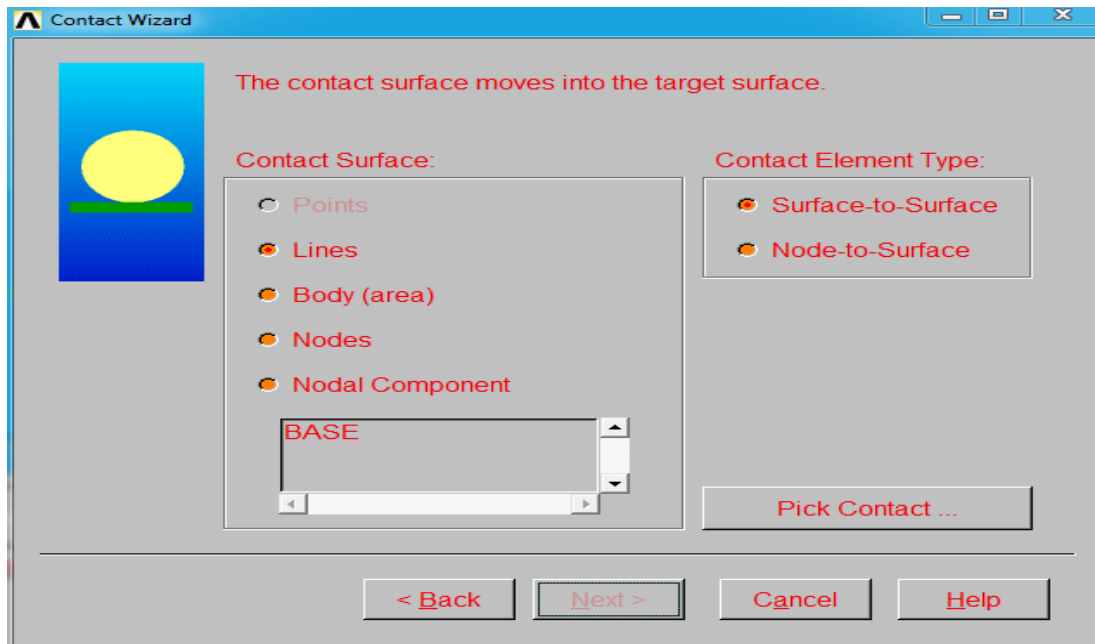


Εικόνα 2.22. Χρήση Contact Wizard για κατασκευή Contact Pair.

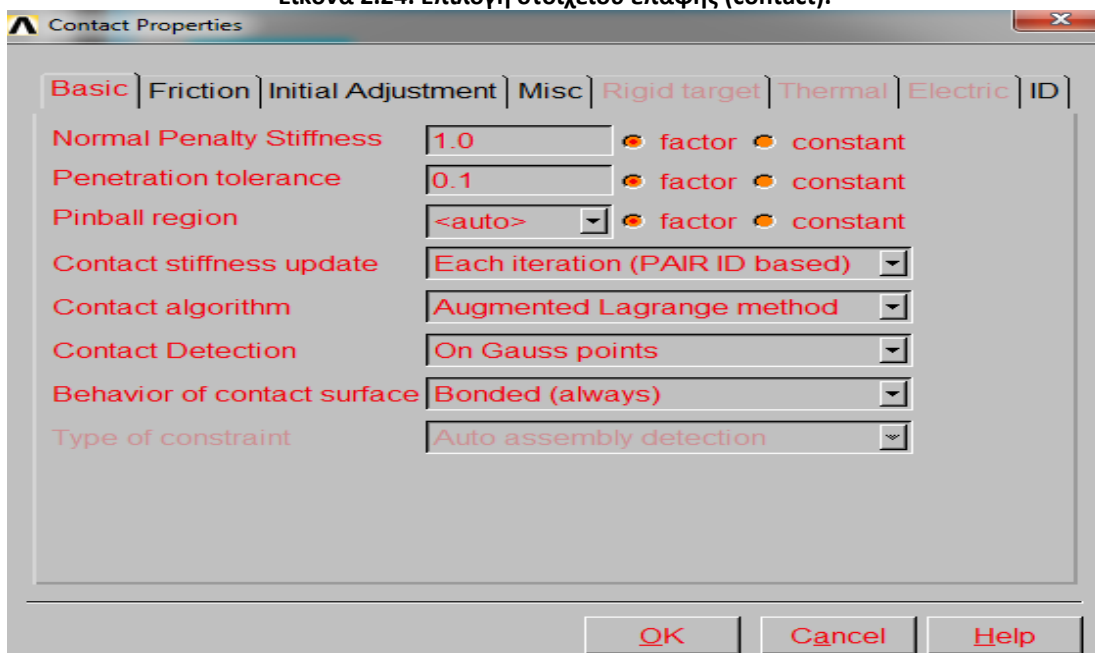


Εικόνα 2.23. Επιλογή στοιχείου στόχου (target).

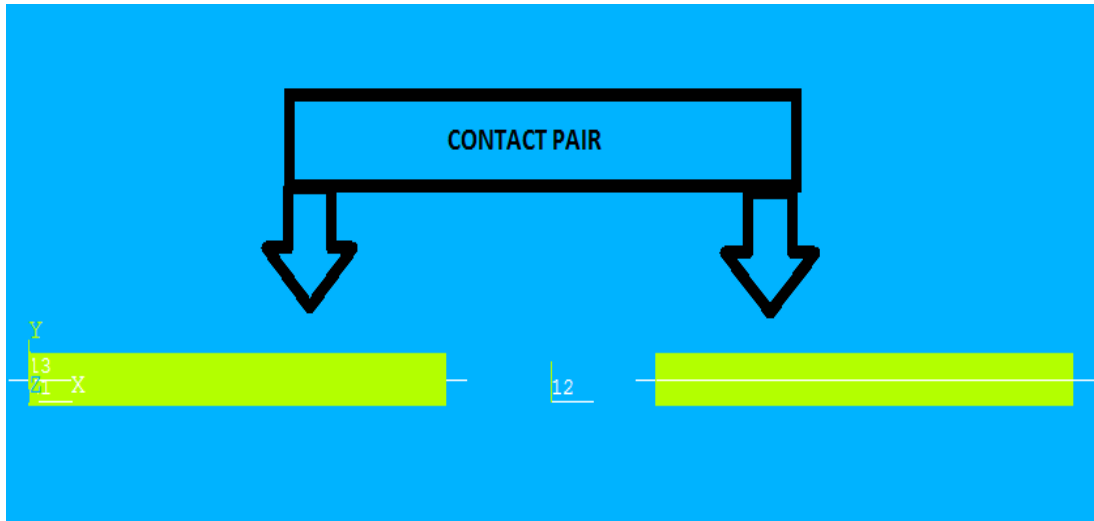
Επόμενο βήμα μας αποτελεί ο ορισμός του στοιχείου επαφής (Εικόνα 2.24) το οποίο θα πρέπει να είναι σε συμφωνία με το είδη επιλεγθέν στοιχείο στόχο. Στη συνέχεια επιλέγουμε το υλικό που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο ζεύγος καθώς και το είδος του δεσμού μεταξύ των δύο στοιχείων (Εικόνα 2.25). Εφόσον όλες οι κατάλληλες επιλογές έχουν γίνει δημιουργούμε το ζεύγος επαφής το οποίο αναπαριστάται όπως φαίνεται στην εικόνα 2.26.



Εικόνα 2.24. Επιλογή στοιχείου επαφής (contact).

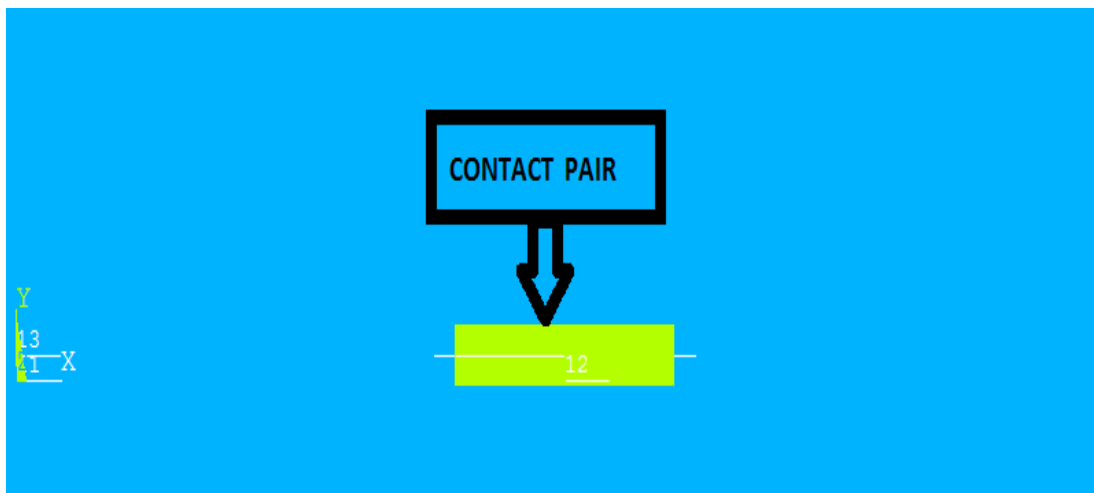


Εικόνα 2.25. Επιλογή συμπεριφοράς επιφάνειας επαφής.



Εικόνα 2.26. Contact Pair άθικτης περιοχής.

Ο σχεδιασμός του contact pair για την περιοχή του αποχωρισμού γίνεται ακολουθώντας ακριβώς τα ίδια βήματα με τη διαφορά ότι ορίζουμε μηδενικές μηχανικές ιδιότητες ($C1, C2, C3, C4=0$) ενώ αντί για bonded always ορίζουμε standard τύπο δεσμού καθώς δεν υπάρχει κάποια δύναμη που να συγκρατεί τα επιμέρους μέρη όπως αντίθετα συμβαίνει με την άθικτη περιοχή. Η αναπαράσταση του contact pair της άθικτης περιοχής είναι αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.27 που ακολουθεί.

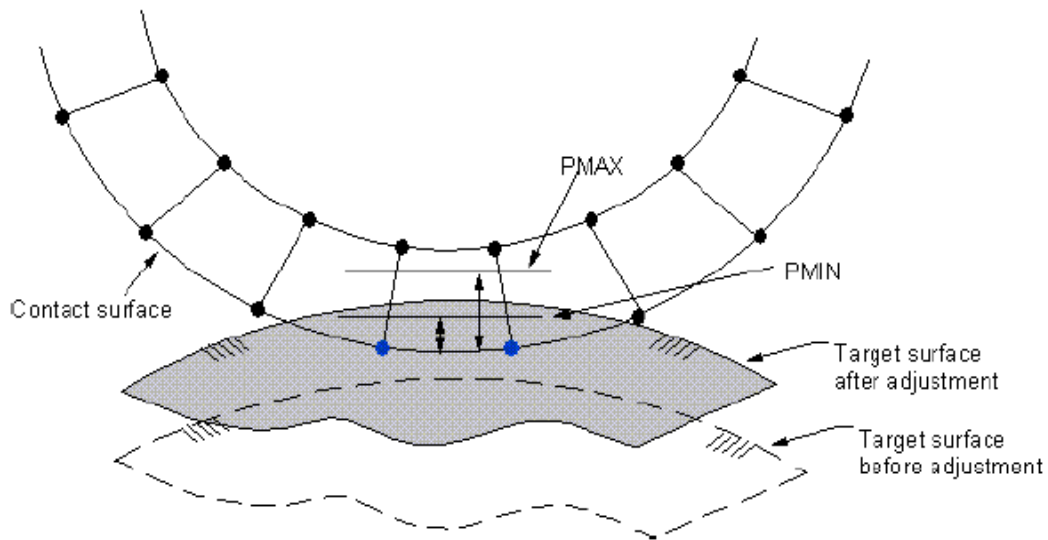


Εικόνα 2.27. Contact Pair τεχνητού αποχωρισμού.

2.5.3.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Στο στάδιο κατασκευής του contact pair το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα χειρισμού διάφορων παραμέτρων-σταθερών με τις οποίες ελέγχουμε διάφορα χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης σύνδεσης όπως τη μέγιστη και την ελάχιστη επιτρεπτή απομάκρυνση μεταξύ των μερών που την συνιστούν, την επιτρεπόμενη διείσδυση, την αντίσταση σε ολίσθηση κ.α. Για το λόγο αυτό γίνεται μια μικρή περιγραφή των κυριότερων σταθερών οι οποίες έχουν ως εξής :

- **FKN** (normal penalty stiffness factor) : η συγκεκριμένη σταθερά χαρακτηρίζει την αντοχή της σύνδεσης έναντι των ορθών τάσεων και εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού του μοντέλου ,από το μέγεθος των στοιχείων του και τον συνολικό αριθμό των βαθμών ελευθερίας του. Το FKN λαμβάνει τιμές από 1 έως 0.01 όπου το 1 χαρακτηρίζει τις περιπτώσεις όπου έχουμε ομοιόμορφη παραμόρφωση των επιμέρους μερών τις σύνδεσης. Για τη μελέτη μας μια τιμή ίση με τη μονάδα δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όπως προέκυψε μετά από διερεύνηση.
- **FTOLN** (penetration tolerance factor) : με τη χρήση του ftoln γίνεται έλεγχος του κατά πόσο έχει ξεπεραστεί μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή που αφορά τη διείσδυση μεταξύ των επιφανειών. Αν η διείσδυση ξεπεράσει τη τιμή που έχουμε ορίσει, τότε η συνολική λύση του προβλήματος δεν συγκλίνει ακόμα και αν όλες οι άλλες απαιτήσεις πληρούνται. Σαν μέγιστη τιμή διείσδυση επιλέγουμε 0.1*το πάχος του στοιχείου στη περιοχή του κολλητικού δεσμού. Αυτή η τιμή είναι η αυτόματη που εισάγει το πρόγραμμα και στα πλαίσια της διείσδυσης που θέλουμε να έχουμε για τη μελέτη μας δουλεύει ικανοποιητικά , δηλαδή οι προκύπτουσες διεισδύσεις είναι σε επιτρεπτά όρια και δεν ξεπερνάνε τη μέγιστη τιμή που έχουμε ορίσει. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ακόμα μικρότερη τιμή για τη μέγιστη επιτρεπτή διείσδυση έτσι ώστε να επιτύχουμε ακόμα σύνδεση αλλά κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει είτε σε αδυναμία επίλυσης είτε σε μεγάλη χρονική καθυστέρηση της επίλυσης .
- **PMAX** και **PMIN** : οι δύο αυτές σταθερές ορίζουν τη μέγιστη και την ελάχιστη διείσδυση μεταξύ των στοιχείων στη περιοχή σύνδεσης κατά την αρχική κατάσταση. Αν σε κάποια περιοχή δεν τηρούνται τα όρια το πρόγραμμα την αναπροσαρμόζει. Επιλέγουμε να ορίσουμε τιμή 0 και για τις δύο σταθερές ,δηλαδή μηδενική αρχική διείσδυση. Στην εικόνα 2.28 βλέπουμε τον τρόπο λειτουργίας των παραμέτρων.
- **FKOP** (contact opening stiffness) : με την παράμετρο αυτή ελέγχεται η αντοχή του κολλητικού δεσμού έναντι ανοίγματός του. Η τιμή που ορίζουμε πολλαπλασιάζεται με τη τιμή της σ_{max} που έχουμε ορίσει σε πρότερο στάδιο. Για την ανάλυση θεωρούμε σκόπιμο να δώσουμε μια τιμή ίση με τη μονάδα στη συγκεκριμένη παράμετρο.
- **FKT** (tangent penalty stiffness factor) : η παράμετρος FKT αποτελεί το αντίστοιχο της FKN αλλά υπό την επίδραση εφαπτομενικών τάσεων. Και εδώ μια τιμή ίση με τη μονάδα δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για να καταλήξουμε στη μονάδα εκτελέσαμε δοκιμές και με τιμές που κυμαίνονταν από 1 έως 0.8 και παρατηρήσαμε ότι οι διαφοροποιήσεις όσον αφορά την αντοχή της σύνδεσης είναι ανεπαίσθητες ενώ αντίθετα ο χρόνος επίλυσης αυξάνει αρκετά και σε κάποιες περιπτώσεις δεν είχαμε σύγκλιση της λύσης.



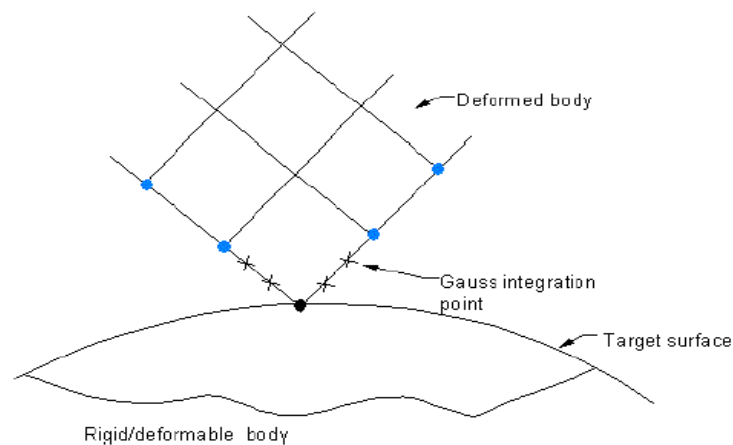
Εικόνα 2.28. Τρόπος λειτουργίας παραμέτρων PMAX και PMIN.

2.5.3.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ (KEYOPTS)

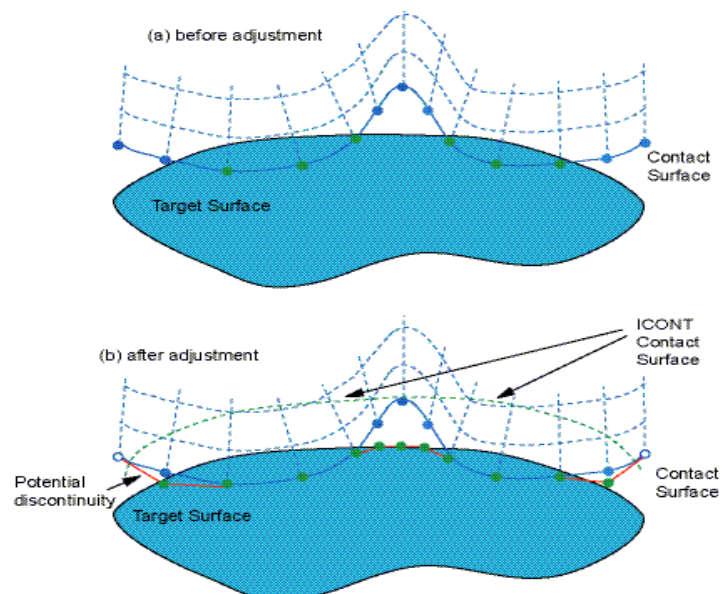
Στο στάδιο δημιουργίας του contact pair παρέχεται η δυνατότητα τροποποίησης διαφόρων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία με σκοπό την επίτευξη κατάλληλων ιδιοτήτων του κολλητικού δεσμού. Αυτές οι παράμετροι φέρουν την ονομασία KEYOPT και είναι διαφορετικές για κάθε στοιχείο. Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο στάδιο ,το στοιχείο επαφής που επιλέγουμε είναι το CONTA172. Οι σημαντικότερες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του είναι οι ακόλουθες :

- **KEYOPT(1)** : επιλέγονται οι βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου. Καθώς αντιμετωπίζουμε δισδιάστατο πρόβλημα οι μόνοι επιτρεπόμενοι είναι οι UX και UY.
- **KEYOPT(2)** : επιλογή του αλγόριθμου που χαρακτηρίζει την επαφή. Χρησιμοποιείται η επαυξημένη λαγκρανζιανή μέθοδος (Augmented Lagrangian) η οποία αποτελεί και την αυτόματη επιλογή του προγράμματος. Το υπολογιστικό πακέτο μας παρέχει τη δυνατότητα χρήσης και άλλων μεθόδων ωστόσο επιλέγουμε τη συγκεκριμένη καθώς έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε παλαιότερες μελέτες (Καρατζάς 2007) .
- **KEYOPT(3)** : εδώ γίνεται επιλογή της εντατικής κατάστασης που χαρακτηρίζει τη περιοχή του κολλητικού δεσμού. Επιλέγουμε επίπεδη εντατική κατάσταση με εισαγωγή του πάχους έτσι ώστε να αποδώσουμε καλύτερη τη φύση των δοκιμών τα οποία είναι τρισδιάστατα σε αντίθεση με τα δισδιάστατα μοντέλα μας.
- **KEYOPT(4)** : η συγκεκριμένη επιλογή χρησιμεύει σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη η εξομάλυνση γωνιών των στοιχείων του κολλητικού δεσμού (Εικόνα 2.29). Να τονίσουμε ότι πολλές φορές ο απαιτούμενος τύπος εξομάλυνσης μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία σύγκλισης της ανάλυσης.
- **KEYOPT(5)** : η παράμετρος αυτή λειτουργεί σε συνδυασμό με τις πραγματικές σταθερές PMAX και PMIN με στόχο τη κατάλληλη προσαρμογή των στοιχείων επαφής έτσι ώστε να επιτευχθούν οι κατάλληλες ανοχές (άνοιγμα και διείδυση) στη περιοχή της σύνδεσης (Εικόνα 2.30).

- **KEYOPT(7)** : η επιλογή αυτή ελέγχει τη χρονική διακριτοποίηση (time step) που λαμβάνει χώρα κατά το στάδιο της επίλυσης, έτσι ώστε ανάλογα με τις ανάγκες που παρουσιάζονται σε κάθε μελέτη να γίνεται η σωστή επιλογή.
- **KEYOPT(9)** : η συγκεκριμένη παράμετρος δουλεύει σε συνδυασμό με τη (4) και λαμβάνει υπόψη της την επίδραση στο μοντέλο της ύπαρξη αρχικής διείσδυσης ή ανοίγματος. Ανάλογα με τη μελέτη επιλέγεται αν θα λάβουμε υπόψη μας την ύπαρξη και των δύο καταστάσεων (διείσδυση και άνοιγμα) ,μίας εξ αυτών ή καμίας.
- **KEYOPT(10)** : αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους ,καθώς συμβάλλει στην αυτόματη ενημέρωση της αντοχής του κολλητικού δεσμού έναντι των εφαρμοζόμενων τάσεων σε κάθε βήμα της ανάλυσης.
- **KEYOPT(12)** : μέσω αυτής της παραμέτρου γίνεται ο ορισμός της συμπεριφοράς του κολλητικού δεσμού και όπως έχουμε αναφέρει στο στάδιο της περιγραφής της κατασκευής του contact pair ,επιλέγουμε bonded always contact για την άθικτη περιοχή και standard για τον αποχωρισμό. Επιλέγουμε το συγκεκριμένο τύπο κολλητικού δεσμού καθώς έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε προηγούμενες μελέτες (Ανυφαντής , 2012 ; Καρατζάς , 2007) ενώ και από δοκιμαστικά τρεξίματα προέκυψε πως δίνει σωστότερα αποτελέσματα για την ανάλυση που επιχειρούμε.



Εικόνα 2.29. Αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας της παραμέτρου KEYOPT (4).



Εικόνα 2.30. Αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας της παραμέτρου KEYOPT (5).

2.5.4 ΜΕΤΑΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ COHESIVE ELEMENTS

Το ANSYS παρέχει μια μεγάλη γκάμα εντολών για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επίλυση κωδίκων που περιέχουν cohesive elements. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται κάποιες από αυτές.

Πίνακας 2.3. Εντολές για μεταεπεξεργασία των αποτελεσμάτων που μελετούν το φαινόμενο του αποχωρισμού με χρήση cohesive elements.

ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΕΝΤΟΛΗΣ	ΜΕΓΕΘΟΣ	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΓΕΘΟΥΣ
PRES	P	Ορθή τάση επαφής
SFRIC	τ_t	Εφαπτομενική τάση επαφής
TAUR & TAUS	τ_y & τ_z	Εφαπτομενικές τάσεις κατά y και z
GAP	u_n	Άνοιγμα επαφής
SLIDE	u_t	Γλίστρημα επαφής
TASR & TASS	u_y & u_z	Γλίστρημα κατά y και z
DTSTART	-----	Χρονική ιστορία εξέλιξης του αποχωρισμού
DPARAM	d_n , d_t ή d_m	Παράμετροι σχετικές με τον αποχωρισμό
DENERI & DENERII	G_n & G_t	Ενέργειες θραύσεως

2.6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ & ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

2.6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει προκύψει από πλήθος πειραματικών δοκιμών σε κατασκευές από ινώδη σύνθετα υλικά, αυτά μπορεί να αστοχήσουν είτε στην περιοχή σύνδεσης των στρώσεων είτε να αστοχήσουν οι ίδιες οι στρώσεις. Η αστοχία στην περιοχή της σύνδεσης των στρώσεων επηρεάζεται από το φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων και ο τρόπος μοντελοποίησης της αναλύθηκε παραπάνω. Αντίθετα η αστοχία των στρώσεων συμβαίνει όταν λόγω των επιβαλλόμενων φορτίσεων ξεπεραστούν τα όρια αντοχής των υλικών που τις συνιστούν. Εφόσον εμφανιστεί κάποια αστοχία στις στρώσεις, στη συνέχεια και υποθέτοντας ότι συνεχίζουν να φορτίζονται, η αντοχή τους αρχίζει σιγά σιγά να ελαττώνεται επιταχύνοντας την κατάρρευση της κατασκευής. Έχουμε δηλαδή σταδιακή αστοχία της κατασκευής που οφείλεται στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Τα εργαλεία του ANSYS μας παρέχουν τη δυνατότητα να μελετήσουμε τόσο την εμφάνιση αστοχίας στα μοντέλα όσο και τη σταδιακή της εξέλιξη.

2.6.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

2.6.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Οι αντοχές ενός υλικού καθορίζονται πειραματικά με τη διεξαγωγή τυποποιημένων δοκιμών. Κατά τις δοκιμές αυτές επιβάλλονται φορτία σε δοκίμια και

δημιουργούνται απλά τασικά πεδία σε συγκεκριμένες διατομές του δοκιμίου. Το φορτίο στο οποίο παρουσιάζεται θραύση είναι και η αντοχή του υλικού.

Όταν σχεδιάζεται μια κατασκευή, ελετάται η ικανότητά της ή ενός τμήματος αυτής να φέρει φορτία μέσα από μία διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει ανάλυση τάσεων της κατασκευής και σύγκριση των υπολογιζόμενων τασικών πεδίων με τις αντοχές του υλικού (Τσούβαλης, 1998). Όταν το τασικό πεδίο είναι απλό, όπως στην περίπτωση των δοκιμίων των τυποποιημένων πειραματικών μέτρησης των αντοχών, μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση και να καθοριστεί η ικανότητα της κατασκευής να φέρει το φορτίο ή όχι. Αντίθετα, όταν έχουμε να αντιμετωπίσουμε ένα πολύπλοκο τασικό πεδίο, είναι λάθος να προβούμε σε άμεση σύγκριση. Στην πραγματικότητα, οι κατασκευές υπόκεινται σε διαξονικές εντατικές καταστάσεις, για κάθε μια από τις οποίες είναι ανέφικτος ο εκ των προτέρων υπολογισμός της αντοχής του υλικού. Το κενό καλύπτεται από τα κριτήρια αστοχίας με τα οποία καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός της αντοχής των υλικών σε συνθήκες διαξονικής εντατικής κατάστασης, χρησιμοποιώντας μάλιστα τις αντοχές σε μονοαξονικές εντατικές καταστάσεις. Στα ισοτροπικά υλικά, τα κριτήρια αστοχίας διατυπώνονται συναρτήσει των κυρίων τάσεων και των ορίων αντοχής σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση. Έτσι η ικανότητα μιας κατασκευής από ισοτροπικό υλικό να φέρει φορτία μπορεί να προβλεφθεί γνωρίζοντας μόνο τις τρεις αυτές αντοχές.

Ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουμε να κάνουμε με σύνθετα υλικά τα οποία είναι ορθοτροπικά. Η ανάλυση των ορθοτροπικών υλικών παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες σε σχέση με αυτή των ισοτροπικών καθώς τόσο οι αντοχές τους όσο και οι ελαστικές τους σταθερές, μεταβάλλονται στις διάφορες διευθύνσεις. Επομένως, σε ένα ορθοτροπικό υλικό, μπορεί να μετρηθεί άπειρος αριθμός αντοχών, ακόμη και με τη διεξαγωγή μιας μονοαξονικής δοκιμής, ανάλογα με τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου.

Επειδή οι βασικές αντοχές ενός ορθοτροπικού υλικού σε μονοαξονικά φορτία είναι γνωστές μόνο στις κύριες διευθύνσεις υλικού, το πρώτο βήμα σε όλους τους υπολογισμούς της αντοχής τους πρέπει να είναι η μετατροπή του πραγματικού τασικού πεδίου στις διευθύνσεις αυτές, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκριση με τις αντίστοιχες αντοχές. Όμως, όταν το τασικό πεδίο στους κύριους άξονες του υλικού δεν είναι μονοαξονικό, δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των τάσεων με τις αντοχές και πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα κριτήριο αστοχίας. Όλα τα κριτήρια αστοχίας των ορθοτροπικών υλικών εκφράζονται μέσω των τάσεων στις κύριες διευθύνσεις του υλικού.

Σήμερα υπάρχουν πολλά κριτήρια αστοχίας για τα ορθοτροπικά υλικά. Αρκετά έχουν αναπτυχθεί με βάση κριτήρια αστοχίας των ισοτροπικών υλικών, ενώ άλλα δεν έχουν γενική εφαρμογή και ισχύουν μόνο για μερικές συγκεκριμένες περιπτώσεις σύνθετων υλικών. Το υπολογιστικό περιβάλλον του ANSYS παρέχει τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων κριτηρίων αστοχίας, καθιστώντας έτσι δυνατή την αντιμετώπιση διαφορετικών προβλημάτων.

Τα κριτήρια που θα χρησιμοποιήσουμε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής είναι της Μέγιστης Τάσης (Maximum Stress) και το Tsai-Wu τα οποία ενεργοποιούνται όταν οι σχέσεις που τα εκφράζουν ξεπεράσουν μια τιμή ίση με τη μονάδα. Οι διάφορες τάσεις και μετατοπίσεις που απαιτούνται για τους υπολογισμούς των κριτηρίων λαμβάνονται από τους κόμβους των στοιχείων που χρησιμοποιούμε για τη μοντελοποίηση.

2.6.2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό ,παρουσιάζεται αστοχία όταν οποιαδήποτε από τις τάσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού υπερβεί την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή. Επομένως για την αποφυγή της αστοχίας ,όταν οι τάσεις είναι εφελκυστικές πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες ανισότητες :

$$\frac{\sigma_{xt}}{\sigma_{xt}^f} < 1 \quad \& \quad \frac{\sigma_{yt}}{\sigma_{yt}^f} < 1 \quad \& \quad \frac{\sigma_{zt}}{\sigma_{zt}^f} < 1$$

ενώ όταν οι τάσεις είναι θλιπτικές πρέπει να ικανοποιούνται οι ανισότητες :

$$\frac{\sigma_{ct}}{\sigma_{ct}^f} < 1 \quad \& \quad \frac{\sigma_{yc}}{\sigma_{yc}^f} < 1 \quad \& \quad \frac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zc}^f} < 1$$

σε περίπτωση που έχουμε επίδραση διατμητικών τάσεων οι ανισότητες που πρέπει να ικανοποιούνται είναι :

$$\frac{|\sigma_{xy}|}{\sigma_{xy}^f} < 1 \quad \& \quad \frac{|\sigma_{yz}|}{\sigma_{yz}^f} < 1 \quad \& \quad \frac{|\sigma_{xz}|}{\sigma_{xz}^f} < 1$$

Σε περίπτωση που οποιαδήποτε από τις παραπάνω ανισότητες παραβιαστεί , σημαίνει πως η στρώση αστοχεί με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο. Παρακάτω ακολουθεί επεξήγηση των όρων που περιέχονται στις ανισότητες.

- $\sigma_x =$ τάση κατά τη διεύθυνση x
- $\sigma_y =$ τάση κατά τη διεύθυνση y
- $\sigma_z =$ τάση κατά τη διεύθυνση z
- $\sigma_{xy} =$ εφαπτομενική τάση κατά το xy επίπεδο
- $\sigma_{yz} =$ εφαπτομενική τάση κατά το yz επίπεδο
- $\sigma_{xz} =$ εφαπτομενική τάση κατά το xz επίπεδο
- $\sigma_{xt} = \begin{cases} 0 \\ \sigma_x \end{cases}$ όποια τιμή από τις δύο είναι μεγαλύτερη
- $\sigma_{xc} = \begin{cases} 0 \\ \sigma_x \end{cases}$ όποια τιμή από τις δύο είναι μικρότερη
- $\sigma_{yt} = \begin{cases} 0 \\ \sigma_y \end{cases}$ όποια τιμή από τις δύο είναι μεγαλύτερη
- $\sigma_{yc} = \begin{cases} 0 \\ \sigma_y \end{cases}$ όποια τιμή από τις δύο είναι μικρότερη
- $\sigma_{zt} = \begin{cases} 0 \\ \sigma_z \end{cases}$ όποια τιμή από τις δύο είναι μεγαλύτερη

- $\sigma_{zc} = \begin{cases} 0 \\ \sigma_z \end{cases}$ όποια τιμή από τις δύο είναι μικρότερη
- $\sigma_{xt}^f =$ εφελκυστική τάση θραύσεως κατά τη διεύθυνση x
- $\sigma_{xc}^f =$ θλιπτική τάση θραύσεως κατά τη διεύθυνση x
- $\sigma_{yt}^f =$ εφελκυστική τάση θραύσεως κατά τη διεύθυνση y
- $\sigma_{yc}^f =$ θλιπτική τάση θραύσεως κατά τη διεύθυνση y
- $\sigma_{zt}^f =$ εφελκυστική τάση θραύσεως κατά τη διεύθυνση z
- $\sigma_{zc}^f =$ θλιπτική τάση θραύσεως κατά τη διεύθυνση z
- $\sigma_{xy}^f =$ εφαπτομενική τάση θραύσεως κατά το xy επίπεδο
- $\sigma_{yz}^f =$ εφαπτομενική τάση θραύσεως κατά το yz επίπεδο
- $\sigma_{xz}^f =$ εφαπτομενική τάση θραύσεως κατά το xz επίπεδο

2.6.2.3 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ TSAI – WU

Στην περίπτωση μιας ορθοτροπικής στρώσης για να μην συμβεί αστοχία σύμφωνα με το κριτήριο Tsai – Wu θα πρέπει να ισχύει η ακόλουθη ανισότητα :

$A + B < 1$ όπου

$$A = -\frac{(\sigma_x)^2}{\sigma_{xt}^f * \sigma_{xc}^f} - \frac{(\sigma_y)^2}{\sigma_{yt}^f * \sigma_{yc}^f} - \frac{(\sigma_z)^2}{\sigma_{zt}^f * \sigma_{zc}^f} + \frac{(\sigma_{xy})^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} + \frac{(\sigma_{yz})^2}{(\sigma_{yz}^f)^2} + \frac{(\sigma_{xz})^2}{(\sigma_{xz}^f)^2} + \frac{C_{xy} * \sigma_x * \sigma_y}{\sqrt{\sigma_{xt}^f * \sigma_{xc}^f * \sigma_{yt}^f * \sigma_{yc}^f}} + \frac{C_{yz} * \sigma_y * \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{yt}^f * \sigma_{yc}^f * \sigma_{zt}^f * \sigma_{zc}^f}} + \frac{C_{xz} * \sigma_x * \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{xt}^f * \sigma_{xc}^f * \sigma_{zt}^f * \sigma_{zc}^f}}$$

&

$$B = \left(\frac{1}{\sigma_{xt}^f} + \frac{1}{\sigma_{xc}^f} \right) * \sigma_x + \left(\frac{1}{\sigma_{yt}^f} + \frac{1}{\sigma_{yc}^f} \right) * \sigma_y + \left(\frac{1}{\sigma_{zt}^f} + \frac{1}{\sigma_{zc}^f} \right) * \sigma_z$$

Οι μόνες νέες μεταβλητές στις παραπάνω σχέσεις είναι οι συντελεστές συσχέτισης C_{xy} , C_{yz} , C_{xz} οι οποίοι χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα για την επίλυση και λαμβάνουν τιμή ίση με -1. Οι υπόλοιπες έχουν την ίδια ερμηνεία με τις αντίστοιχες του κριτηρίου μέγιστης τάσης.

2.6.2.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Στο στάδιο αυτό ,θα γίνει παραγωγή των κωδικών που απαιτούνται έτσι ώστε τα μοντέλα να αναγνωρίζουν τη στιγμή που κάποιο κριτήριο αστοχίας παραβιάζεται. Η εντολή με την οποία εισάγουμε τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε το πρόγραμμα να κάνει χρήση των κριτηρίων αστοχίας είναι η **FC**. Η συγκεκριμένη εντολή παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής έως 12 μεταβλητών οι οποίες αντιπροσωπεύουν βασικά μεγέθη ,απαραίτητα για την επίλυση. Τα μεγέθη αυτά είναι τα εξής :

Πίνακας 2.4. Ερμηνεία μεταβλητών εντολής FC.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
XTEN	Επιτρεπόμενη τάση εφελκυσμού κατά X (λαμβάνει θετική τιμή)	MPa
XCMP	Επιτρεπόμενη θλιπτική τάση κατά X (λαμβάνει αρνητική τιμή)	MPa
YTEN	Επιτρεπόμενη τάση εφελκυσμού κατά Y (θετική τιμή)	MPa
YCMP	Επιτρεπόμενη θλιπτική τάση κατά Y (λαμβάνει αρνητική τιμή)	MPa
ZTEN	Επιτρεπόμενη τάση εφελκυσμού κατά Z (θετική τιμή)	MPa
ZCMP	Επιτρεπόμενη θλιπτική τάση κατά Z (λαμβάνει αρνητική τιμή)	MPa
XY	Επιτρεπόμενη εφαπτομενική τάση στο επίπεδο XY (θετική τιμή)	MPa
YZ	Επιτρεπόμενη εφαπτομενική τάση στο επίπεδο YZ (θετική τιμή)	MPa
XZ	Επιτρεπόμενη εφαπτομενική τάση στο επίπεδο XZ (θετική τιμή)	MPa
XYCP	Συντελεστής συσχέτισεως για το επίπεδο XY	-----
YZCP	Συντελεστής συσχέτισεως για το επίπεδο YZ	-----
XZCP	Συντελεστής συσχέτισεως για το επίπεδο XZ	-----

Για τη συμπλήρωση των τιμών των παραπάνω μεγεθών κάνουμε χρήση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το ερευνητικό πρόγραμμα MARSTRUCT οπότε τελικά θα προκύψει ο πίνακας 2.5.

Πίνακας 2.5. Τιμές μεταβλητών εντολής FC με χρήση αποτελεσμάτων ερευνητικού προγράμματος MARSTRUCT.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΤΙΜΗ
XTEN	559 (MPa)
XCMP	-253 (MPa)
YTEN	60 (MPa)
YCMP	-59 (MPa)
ZTEN	60 (MPa)
ZCMP	-59 (MPa)
XY	15.5 (MPa)
YZ	15.5 (MPa)
XZ	31 (MPa)
XYCP	-1

YZCP	-1
XZCP	-1

Στη συνέχεια παραθέτουμε ένα παράδειγμα του δημιουργούμενου κώδικα.

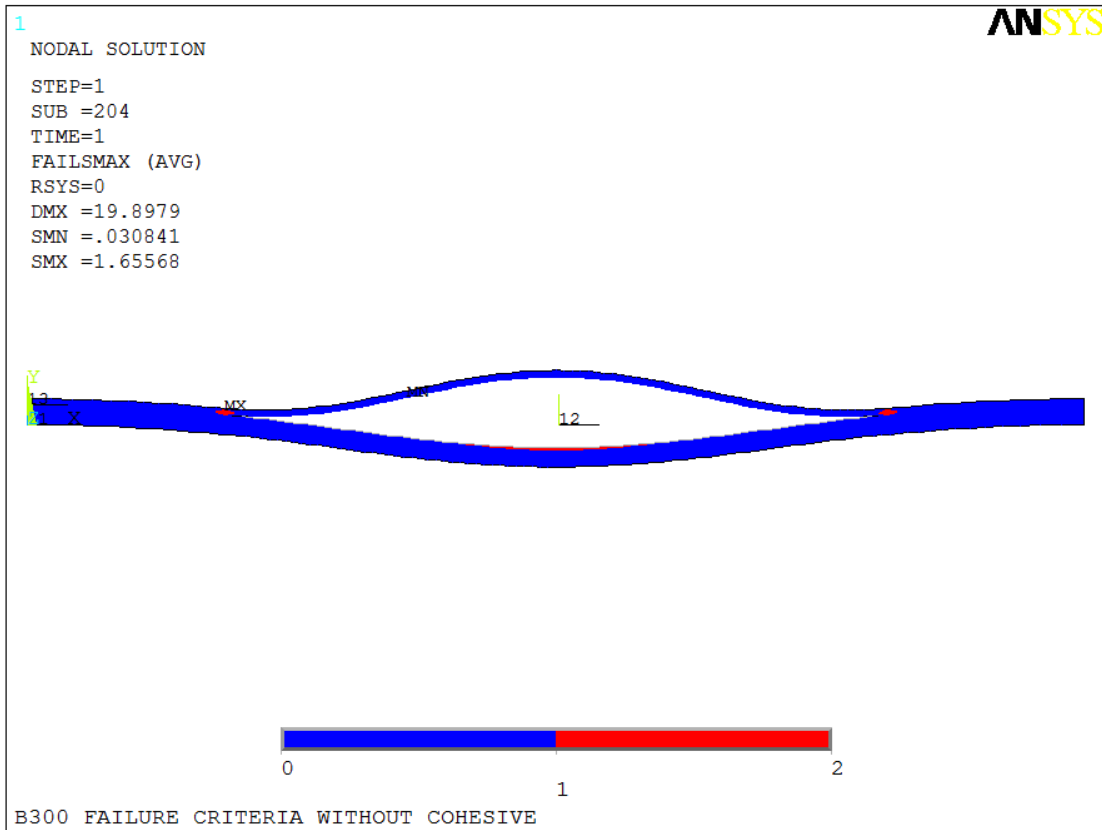
```

FC,1,S,XTEN,559 !XTEN = Allowable tensile stress in the x-direction.
FC,1,S,YTEN,60 !YTEN = Allowable tensile stress in the Y-direction
FC,1,S,ZTEN,60 !ZTEN = Allowable tensile stress in the z-direction
FC,1,S,XCMP,-253 !XCMP = Allowable compressive stress in the x-direction
FC,1,S,YCMP,-59 !YCMP = Allowable compressive stress in the y-direction
FC,1,S,ZCMP,-59 !ZCMP = Allowable compressive stress in the z-direction
FC,1,S,XY,15.5 !XY = Allowable tensile stress in the x-direction
FC,1,S,YZ,15.5 !YZ= Allowable tensile stress in the x-direction.
FC,1,S,XZ,31 !XZ = Allowable tensile stress in the x-direction
FC,1,S,XYCP,-1 !XYCP = Allowable tensile stress in the x-direction
FC,1,S,YZCP,-1 !YZCP = Allowable tensile stress in the x-direction
FC,1,S,XZCP,-1 !XZCP = Allowable tensile stress in the x-direction

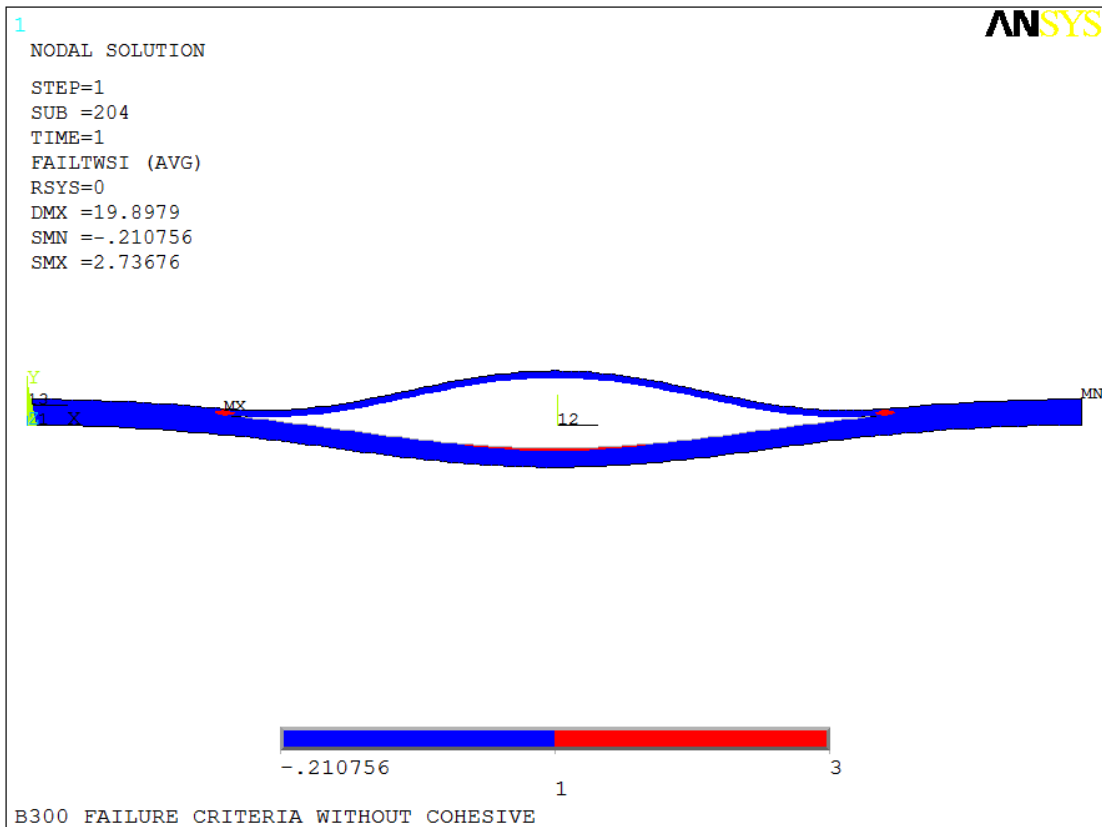
```

Στο παραπάνω κώδικα το 1 συμβολίζει τον αριθμό του υλικού για το οποίο εισάγουμε τις μεταβλητές με τις τιμές των ιδιοτήτων ενώ το S σημαίνει ότι αυτές οι μεταβλητές αναπαριστούν τάσεις.

Αφού πλέον έχουμε προγραμματίσει το κώδικα τρέχουμε το μοντέλο. Στο στάδιο της μεταπεξεργασίας μας δίνεται οι δυνατότητα να μελετήσουμε τόσο γραφικά όσο και αριθμητικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά από τη χρήση των κριτηρίων αστοχίας. Λέγοντας γραφικά εννοούμε τη δυνατότητα απεικόνισης που μας παρέχει το πρόγραμμα όσον αφορά της περιοχές του μοντέλου που έχουν αστοχήσει με βάση το εκάστοτε κριτήριο αστοχίας (2.31 & 2.32) . Αντίστοιχα τα όσα παρουσιάζονται γραφικά μπορούμε να τα μελετήσουμε και αριθμητικά με χρήση πινάκων όπου παρουσιάζεται αναλυτικά το κατά πόσο έχει εμφανιστεί αστοχίας σε κάποια περιοχή του μοντέλου , το χρονικό στιγμιότυπο που συμβαίνει η αστοχία αλλά και με βάση πιο κριτήριο. Στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι τα δύο κριτήρια παρουσιάζουν διαφορές στη χρονική εξέλιξη της αστοχίας και γενικότερα το Tsai – Wu είναι πιο συντηρητικό (οι περιοχές του μοντέλου αστοχούν νωρίτερα και για μικρότερες φορτίσεις).



Εικόνα 2.31. Γραφική απεικόνιση λειτουργίας κριτηρίου Μέγιστης Τάσης



Εικόνα 2.32. Γραφική απεικόνιση λειτουργίας κριτηρίου Tsai – Wu

Στις παραπάνω εικόνες με κόκκινο συμβολίζονται οι περιοχές που έχουν αστοχήσει με βάση τα κριτήρια αστοχίας ενώ με μπλε αυτές που είναι ακόμα άθικτες. Παρατηρούμε πώς για το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση και τα δύο κριτήρια δίνουν ως περιοχές αστοχίας τα δύο άκρα του τεχνητού αποχωρισμού καθώς και την εσωτερική πλευρά του κάτω υποπολύστρωτου.

2.6.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

2.6.3.1 ΕΣΑΓΩΓΗ

Τα κριτήρια αστοχίας που περιγράψαμε παραπάνω και τα οποία εισάγαμε με τη μορφή κώδικα μπορεί να μας βοηθούν στο να καταλάβουμε σε ποιο στάδιο της ανάλυσής μας αρχίζουν οι στρώσεις να αστοχούν αλλά αδυνατούν να περιγράψουν τη συμπεριφορά που θα είχε ένα πραγματικό δοκίμιο του οποίου οι στρώσεις θα άρχιζαν να αστοχούν. Προκύπτει δηλαδή η ανάγκη για την εύρεση ενός τρόπου μοντελοποίησης όπου το δημιουργούμενο μοντέλο θα αντιλαμβάνεται τότε κάποιο στοιχείο του αστοχεί κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, και όχι μόνο θα "αναφέρει" την αστοχία (Εικόνες 2.31 & 2.32) ,αλλά θα αναπροσαρμόζει και τις τιμές των ιδιοτήτων αυτού. Ουσιαστικός λοιπόν στόχος μας είναι η μοντελοποίηση της σταδιακής αστοχίας της στρώσης η οποία είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως *progressive damage analysis*.

Μέχρι πριν λίγα χρόνια, υπήρχε μια αδυναμία στοΝ τρόπο μοντελοποίησης της συγκεκριμένης συμπεριφοράς. Ωστόσο πρόσφατες εξελίξεις-βελτιώσεις των υπάρχοντων υπολογιστικών πακέτων κατέστησαν εφικτή σε ικανοποιητικό βαθμό την ανάλυση της σταδιακής αστοχίας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής θα χρησιμοποιήσουμε κατάλληλες εντολές από τις βιβλιοθήκες του ANSYS , που θα μας βοηθήσουν να αναλύσουμε την προοδευτική αστοχία αλλά και το τύπο αυτής , δηλαδή αν έχουμε να κάνουμε με αστοχία της μήτρας ή των ινών.

2.6.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ PROGRESSIVE DAMAGE ANALYSIS

Η πρόσφατη έκδοση του ANSYS 14 παρέχει τη δυνατότητα στο σχεδιαστή μηχανικό να προσομοιώσει την απαρχή της αστοχίας και την εξέλιξη αυτής στα ινώδη σύνθετα υλικά. Ενώ στις παλαιότερες εκδόσεις ήταν εφικτή μόνο η αναγνώριση της ύπαρξης αστοχίας (χρήση κριτηρίων αστοχίας όπως το Tsai – Wu) ,πλέον μπορεί να μελετηθεί η συμπεριφορά της αντοχής του υλικού υπό την επίδραση μιας μεγάλης γκάμας φορτίσεων καθώς και οι αλλαγές που επέρχονται από άποψη αντοχής εν τη εξέλιξη της αστοχίας.

Από το πρόγραμμα παρέχονται δύο διαφορετικά μοντέλα με τα οποία γίνεται ο καθορισμός των νόμων που διέπουν την εμφάνιση αλλά και την εξέλιξη της αστοχίας. Τα μοντέλα αυτά φέρουν τις ονομασίες **DMGI** και **DMGE** και είναι εφαρμόσιμα σε γραμμικά ελαστικά υλικά όπως τα προσομοιωμένα ινώδη σύνθετα υλικά. Τα συγκεκριμένα μοντέλα δουλεύουν πάντα σε συνδυασμό ,δηλαδή δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μόνο το ένα, ενώ της εφαρμογής τους προηγείται αυτή ενός μοντέλου με το οποίο θα ορίζονται τα όρια αντοχής του υπό μελέτη

υλικού. Τέτοια εντολή είναι η **FCLI** που υπάρχει στις βιβλιοθήκες του ANSYS. Ακολουθεί περιγραφή των μοντέλων που αναφέραμε.

FCLI

Το συγκεκριμένο μοντέλο εισάγεται στα πλαίσια της εντολής **tb** που περιγράψαμε σε προηγούμενο στάδιο και σε συνδυασμό με την εντολή **tbddata**. Αυτό που κάνουμε είναι να ορίσουμε τις τιμές των μέγιστων τάσεων που μπορεί να φέρει στις διάφορες διευθύνσεις του υλικού, είτε αυτές είναι εφελκυστικές, θλιπτικές ή εφαπτομενικές. Οι τιμές λαμβάνονται από το πίνακα 2.5 και ο τρόπος με τον οποίο προγραμματίζεται η διαδικασία είναι ο ακόλουθος :

```
TB,FCLI,1,1,20, ! Specify strength terms
TBDATA,1,559,-253,60,-59,60,-59 ! Specify value for XTEN , XCMP , YTEN , YCMP ,
ZTEN , ZCMP
TBDATA,7,15.5,15.5,31 ! Specify value for XY , YZ , XZ
```

ΕΝΤΟΛΗ DMGI

Το μοντέλο DMGI είναι αυτό με το οποίο ορίζεται το κριτήριο που θα χρησιμοποιηθεί ώστε να ελεγχθεί το πότε εκκινεί η αστοχία. Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει μέσα από μια ικανοποιητική γκάμα κριτηρίων αυτό που νομίζει ότι ταιριάζει στο τύπο αστοχίας που θα έχει η στρώση. Ακολουθεί παρουσίαση των διαθέσιμων μορφών αστοχίας καθώς και των κυριότερων κριτηρίων.

Πίνακας 2.6. Μορφές αστοχίας μοντέλου DMGI.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΕΡΜΗΝΕΙΑ
C1	Αστοχία ινών σε εφελκυσμό
C2	Αστοχία ινών σε θλίψη
C3	Αστοχία μήτρας σε εφελκυσμό
C4	Αστοχία μήτρας σε θλίψη

Πίνακας 2.7. Κριτήρια αστοχίας μοντέλου DMGI.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΕΡΜΗΝΕΙΑ
1	Maximum strain
2	Maximum stress
3	Puck
4	Hashin

Για τη μελέτη μας επιλέγουμε χρήση του κριτηρίου Hashin οπότε ο κώδικας που θα εισάγουμε θα έχει ως εξής :

```
TB,DMGI,1,1,4,FCRT ! Specify damage initiation Hashin
TBDATA,1,4,4,4 ! Specify failure criteria for C1,C2,C3,C4
```

Ο τελευταίος όρος της εντολής TB ορίζει την επιλογή κριτηρίου αστοχίας από το χρήστη ενώ οι τέσσερις τελευταίοι όροι της εντολής TBDATA το είδος του κριτηρίου. Το κριτήριο Hashin παρέχει τη δυνατότητα στον προγραμματιστή να μελετήσει ξεχωριστά κατά πόσο προκύπτει αστοχία στη μήτρα ή στις ίνες των στρώσεων.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι σχέσεις που χρησιμοποιεί το κριτήριο τόσο για τον υπολογισμό της ενδεχόμενης αστοχίας στη μήτρα όσο και στις ίνες.

A) Hashin fiber failure criterion

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{xt}^f} \right) + \frac{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} \rightarrow \text{if } \dots \sigma_x > 0 \\ \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{xc}^f} \right)^2 \rightarrow \text{if } \dots \sigma_x \leq 0 \end{array} \right\} < 1$$

Όταν η παραπάνω σχέση ξεπεράσει τη μονάδα ο κώδικας θεωρεί πως οι ίνες του πολύστρωτου αρχίζουν να αστοχούν .

B) Hashin matrix failure criterion

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\sigma_y + \sigma_z}{\sigma_{yt}^f} \right)^2 + \frac{\sigma_{yz}^2 - \sigma_y * \sigma_z}{(\sigma_{yz}^f)^2} + \frac{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} \rightarrow \text{if } \dots \sigma_y + \sigma_z > 0 \\ \frac{1}{\sigma_{yc}^f} * \left(\left(\frac{\sigma_{yc}^f}{2\sigma_{yz}^f} \right)^2 - 1 \right) * (\sigma_y + \sigma_z) + \left(\frac{\sigma_y + \sigma_z}{2\sigma_{yz}^f} \right)^2 + \frac{\sigma_{yz}^2 - \sigma_y * \sigma_z}{(\sigma_{xy}^f)^2} + \frac{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} \rightarrow \text{if } \dots \sigma_y + \sigma_z \leq 0 \end{array} \right\} < 1$$

Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις έχουν ακριβώς την ίδια ερμηνεία με αυτή των συντελεστών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των κριτηρίων μέγιστης τάσης και Tsai – Wu.

ΕΝΤΟΛΗ DMGE

Αντίστοιχα το DMGE καθορίζει τον νόμο με βάση τον οποίο θα εξελίσσεται η αστοχία στο υλικό. Ουσιαστικά , αυτό που κάνει είναι να αναπροσαρμόζει την αντοχή του υλικού σε κάθε βήμα της ανάλυσης από τη στιγμή που αυτό θα αστοχήσει.

Όπως και στη περίπτωση του DMGI έτσι και εδώ παρέχεται η δυνατότητα ανάλυσης διαφορετικών μορφών αστοχίας (Πίνακας 2.6.). Το κατά πόσο θα υποβαθμιστούν οι ιδιότητες της στρώσης εξαρτάται από τον εκάστοτε σχεδιαστή , ο οποίος μπορεί να επιλέξει το ποσοστό υποβάθμισης των ιδιοτήτων από μια κλίμακα που ξεκινάει από το μηδέν 0 όπου θεωρείται ότι δεν έχουμε καθόλου υποβάθμιση της αντοχής ενός

στοιχείου της στρώσης έως το 1 όπου πλέον το στοιχείο δεν έχει καθόλου αντοχή και δεν συνεισφέρει πλέον στην αντοχή της στρώσης.

Για τα μοντέλα μας επιλέγουμε διαφορετικό ποσοστό υποβάθμισης των στοιχείων μας ανάλογα με ποιό τρόπο αυτά αστοχούν (Πίνακας 2.6.). Ο κώδικας που τελικά θα προκύψει είναι ακόλουθος :

TB,DMGE,1,1,4,MPDG ! Specify damage evolution law Hashin

TBDATA,1,0.93,0.86,0.8,0.6 ! Specify degradation percentage for C1 , C2 , C3 , C4

Τα 4 τελευταία στοιχεία της εντολής TBDATA εκφράζουν το ποσοστό υποβάθμισης της αντοχής του στοιχείου όταν έχουμε κατά σειρά αστοχία τύπου C1, C2, C3 και C4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο 2 που προηγήθηκε έγινε αναφορά στον τρόπο μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε με σκοπό την όσο το δυνατόν πειστικότερη απόδοση της συμπεριφοράς δοκών ενισχυμένων με μονοαξονικές ίνες ,οι οποίες υποβάλλονται σε θλίψη. Στα πλαίσια αυτά αναλύθηκαν οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα τόσο μεταξύ των στρώσεων (delamination) όσο και στις ίδιες τις στρώσεις (progressive failure) καθώς και αιτιολόγηση των αποφάσεων που πάρθηκαν.

Αφού λοιπόν έχει αποσαφηνιστεί το θεωρητικό μέρος της μοντελοποίησης και έχουν κατασκευαστεί οι διάφοροι κώδικες ,μπορούμε πλέον να περάσουμε στο κομμάτι της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα διάφορα "τρεξίματα". Στα πλαίσια της αξιολόγησης συγκρίνονται τα δεδομένα των πειραματικών δοκιμών του Α. Κουσαθανά με αυτά των μοντέλων ,ενώ γίνεται και διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραμέτρων στην προκύπτουσα συμπεριφορά.

3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ 2D ΜΕ 3D ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ COHESIVE ELEMENTS

Όπως έχουμε αναφέρει επανειλημμένα σε προηγούμενα στάδια της ανάλυσης μας , τα δισδιάστατα μοντέλα που κατασκευάσαμε προσπαθούν να προσομοιάσουν τη συμπεριφορά των δοκών από τα πειράματα του κ. Κουσαθανά. Για να διασφαλίσουμε ότι η μοντελοποίησή μας κινείται στα σωστά πλαίσια θα πρέπει να συγκρίνουμε τα δισδιάστατα μοντέλα μας με τα τρισδιάστατα του κ. Κουσαθανά τα οποία παρουσιάζουν σχετικά καλή σύμπτωση με τα πειράματα όσον αφορά τις μορφές αστοχίας και το μέτρο ακαμψίας. Βέβαια η συνολική απόκριση των πειραματικών μοντέλων και οι μέγιστες φορτίσεις που αυτά παρουσιάζουν διαφέρουν αρκετά από αυτές των τρισδιάστατων μοντέλων. Στα πλαίσια της διπλωματικής θα προσπαθήσουμε να γεφυροποιήσουμε αυτή την απόκλιση με χρήση cohesive elements και progressive damage analysis.

Επανερχόμενοι στη σύγκριση 2D και 3D , αυτή θα γίνει στα πλαίσια των διαγραμμάτων δύναμης-αξονικής μετατόπισης , παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης και δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης. Επίσης θα γίνει σύγκριση των εξαγόμενων μορφών λυγισμού , για ανάλογες τιμές φόρτισης . Ακολουθεί η σύγκριση για κάθε σειρά δοκιμών ξεχωριστά.

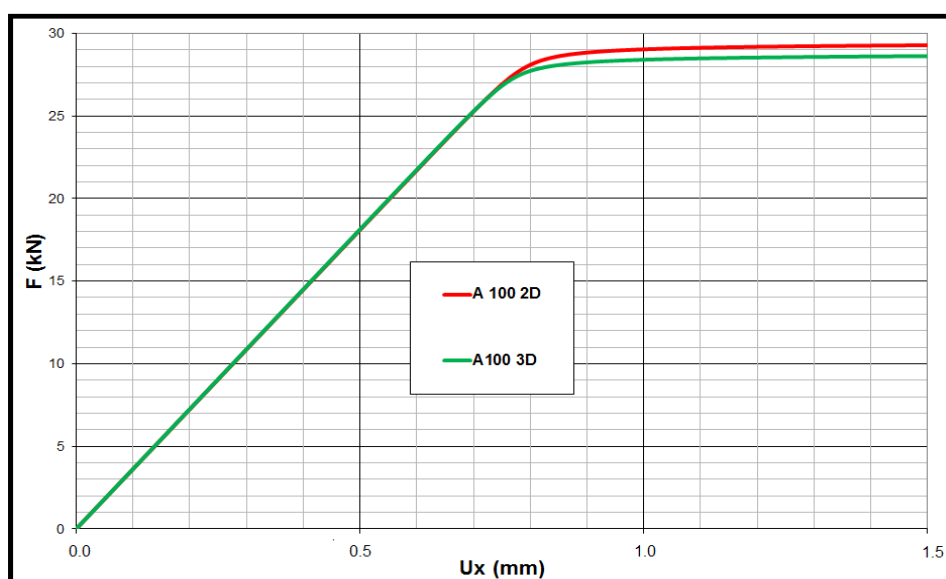
3.2.1 ΣΕΙΡΑ A – 100

Τα μοντέλα της σειράς A – 100 έχουν μοντελοποιηθεί έτσι ώστε να έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 100mm που βρίσκεται στο 50% του πάχους του δοκιμίου. Οι διαστάσεις και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι οι εξής :

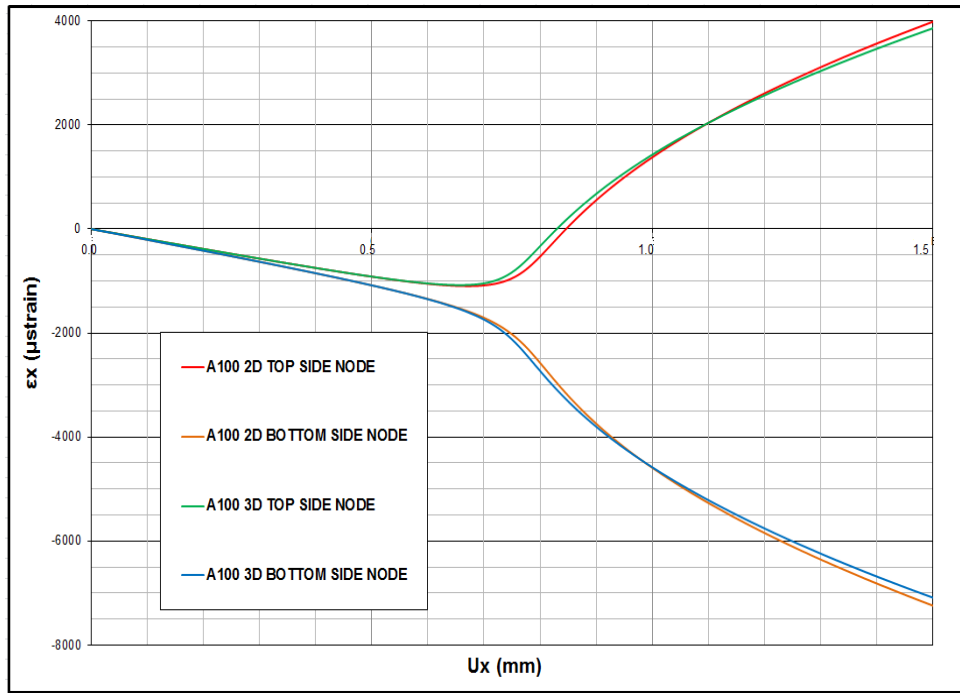
Πίνακας 3.1 Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς A – 100.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ)
L	500 (mm)
t	11.3 (mm)
E_x	32340 (MPa)
Average delamination element size ($l*t$)	2.5*2.83 (mm)

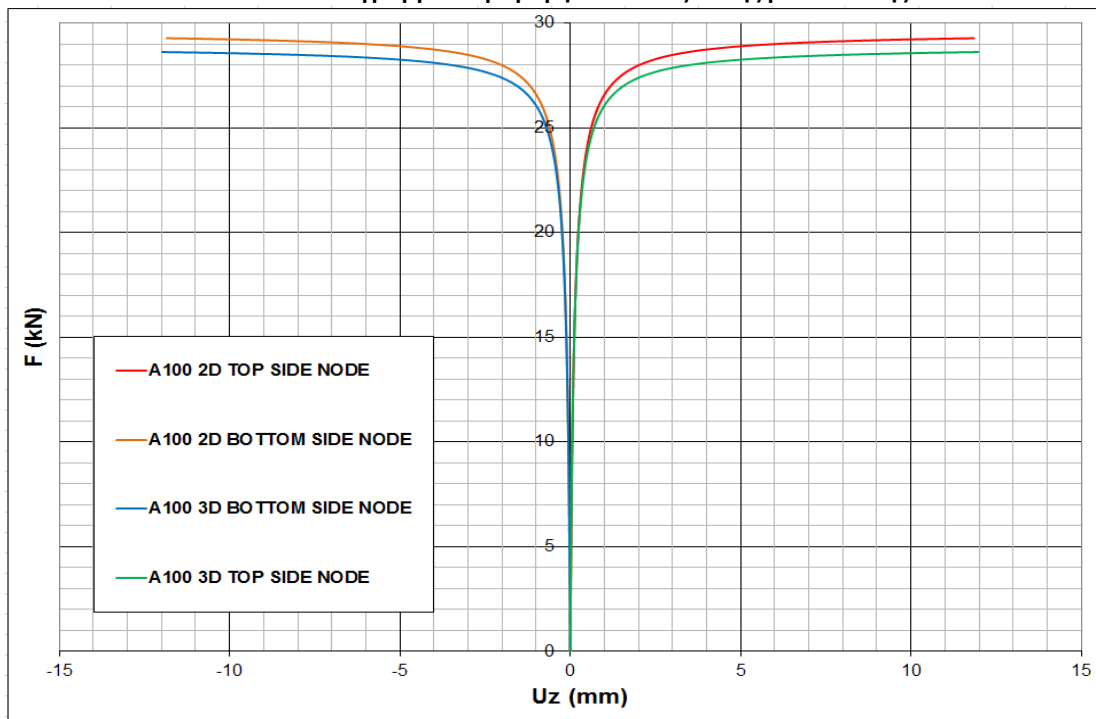
Στο παραπάνω πίνακα καθώς και στους επόμενους που θα ακολουθήσουν για τις υπόλοιπες σειρές μοντέλων με l συμβολίζεται το μήκος του στοιχείου και με t το πάχος του.



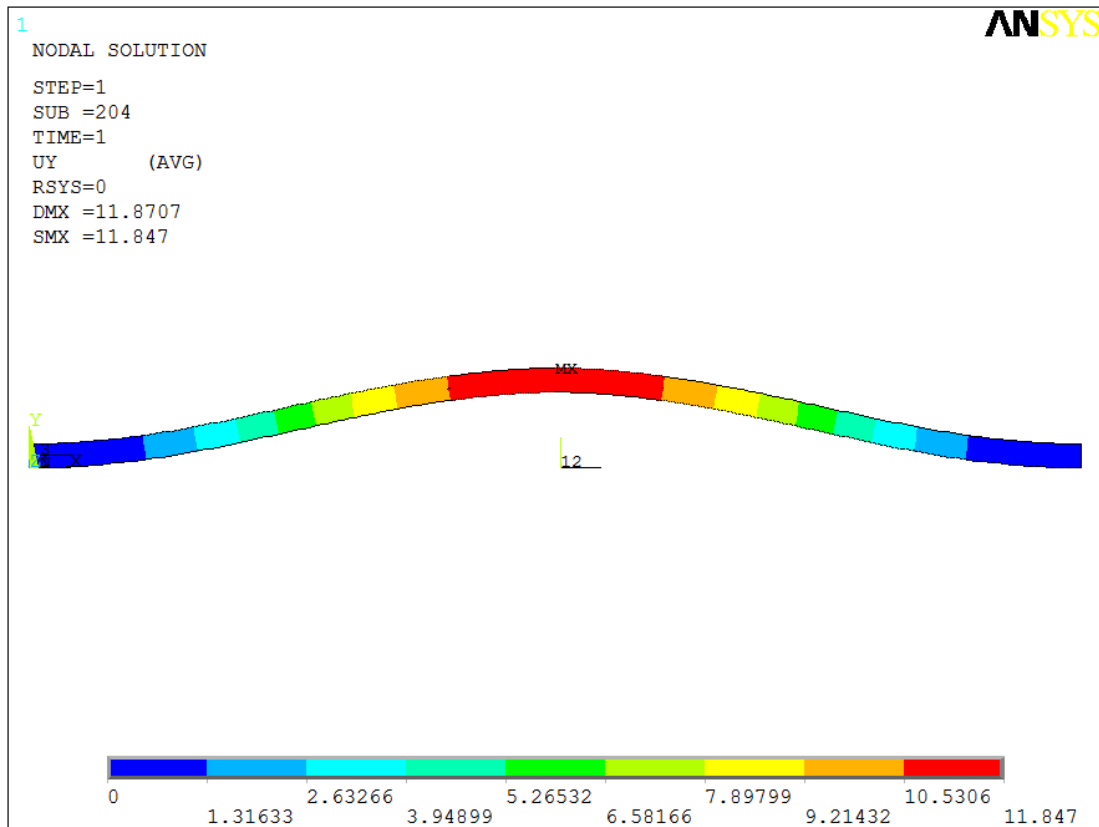
Εικόνα 3.1. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



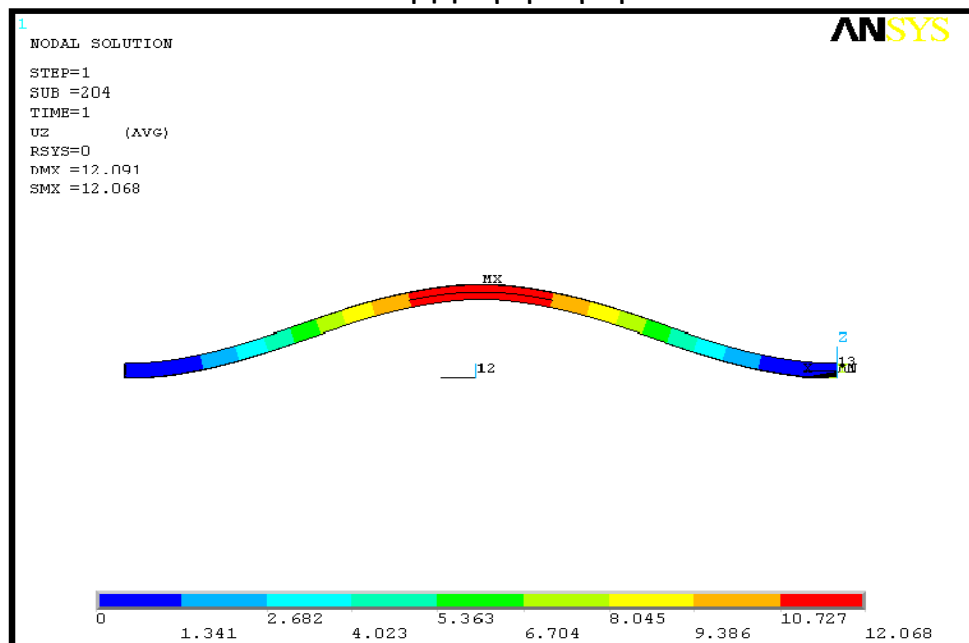
Εικόνα 3.2. Διάγραμμα παραμορφώσεων-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.3. Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης.



Εικόνα 3.4. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 2D



Εικόνα 3.5. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 3D

3.2.1.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Αρχικά να αναφέρουμε ότι τόσο τα strains όσο και η εγκάρσια μετατόπιση μετριοούνται από τους κόμβους (node) top side και bottom side. Ο top side node βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια της επάνω στρώσεως του πολύστρωτου και στο

μέσο του μήκους του , δηλαδή στο $x = 250 \text{ mm}$. Αντίστοιχα ο bottom side node βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια της κάτω στρώσεως και πάλι στο μέσο του μήκους. Η συγκεκριμένη πρακτική ακολουθείται έτσι ώστε να υπάρχει αρμονία με τις πειραματικές μετρήσεις , όπου τα strain gauges είχαν τοποθετηθεί στις αντίστοιχες θέσεις των πειραματικών δοκιμών. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία μέτρησης των παραμορφώσεων και των εγκάρσιων μετατοπίσεων ακολουθείται για όλες τις σειρές μοντέλων.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι παρατηρήσεις που αφορούν τη σειρά A 100 με χρήση των διαγραμμάτων και των σχημάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

- Από το διάγραμμα της εικόνας 3.1 παρατηρούμε ότι η ακαμψία είναι η ίδια και για τα δύο είδη μοντέλων ενώ το δισδιάστατο μοντέλο προβλέπει περίπου 2% μεγαλύτερη μέγιστη φόρτιση.
- Η γωνία που παρουσιάζεται στις καμπύλες και των δύο μοντέλων σχετίζεται με την έναρξη του λυγισμού. Μέχρι φορτίσεις της τάξεως των 27 kN έχουμε μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ της επιβαλλόμενης μετατόπισης και της προκύπτουσας φόρτισης. Από τη στιγμή που ξεπερνιέται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού , τα μοντέλα παρουσιάζουν όλο και μεγαλύτερες μετατοπίσεις χωρίς να παρατηρείται έντονη αύξηση των φορτίσεων.
- Επίσης από το διάγραμμα παραμορφώσεων-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε μια πάρα πολύ καλή σύμπτωση των αποτελεσμάτων, τα οποία ακολουθούν σχεδόν παντού την ίδια μορφή πλην κάποιων ανεπαίσθητων διαφορών.
- Στην εικόνα 3.2 παρατηρούμε πώς αρχικά τόσο ο κόμβος της άνω στρώσης όσο και ο κόμβος της κάτω λαμβάνουν αρνητικές παραμορφώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο βρίσκεται σε θλίψη. Στη συνέχεια όμως που το μοντέλο αρχίζει να λυγίζει , η καμπύλη του άνω κόμβου κινείται προς θετικές τιμές παραμορφώσεων ενώ αντίθετα η καμπύλη του κάτω κόμβου συνεχίζει να λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές. Αυτή η συμπεριφορά είναι απολύτως λογική καθώς στο μοντέλο της συγκεκριμένης σειράς προκύπτει ομοιόμορφος λυγισμός όπου η επάνω στρώση εφελκύεται (θετικές τιμές παραμορφώσεων) και η κάτω θλίβεται .
- Όσον αφορά το διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης , οι μορφές των καμπυλών είναι ίδιες μέχρι φορτία της τάξης των 25 KN ενώ στη συνέχεια τα δισδιάστατα μοντέλα αποκλίνουν λίγο και τελικά επιτυγχάνουν την ίδια εγκάρσια μετατόπιση με τα τρισδιάστατα αλλά για 2% μεγαλύτερη φόρτιση.
- Οι καμπύλες δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης του άνω και κάτω κόμβου παρουσιάζουν συμμετρική συμπεριφορά ως προς τον άξονα των δυνάμεων παρόλο που θα έπρεπε να συμπίπτουν , εξαιτίας του γεγονότος ότι έχουμε ομοιόμορφο λυγισμό . Αυτή η ανωμαλία οφείλεται στο τρόπο ορισμού των αξόνων για την κάτω και την επάνω στρώση. Στην πάνω στρώση ως θετική μετατόπιση U_z λαμβάνεται αυτή που μετράται από το μέσο του πάχους και προς την εξωτερική πλευρά της στρώσης. Αντίθετα για την κάτω στρώση ως θετική λαμβάνεται η μετατόπιση προς το εξωτερικό της κάτω στρώσης. Έτσι για ομοιόμορφο λυγισμό η μετατόπιση του κάτω κόμβου είναι αρνητική καθώς κινείται προς τα αρνητικά του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του.

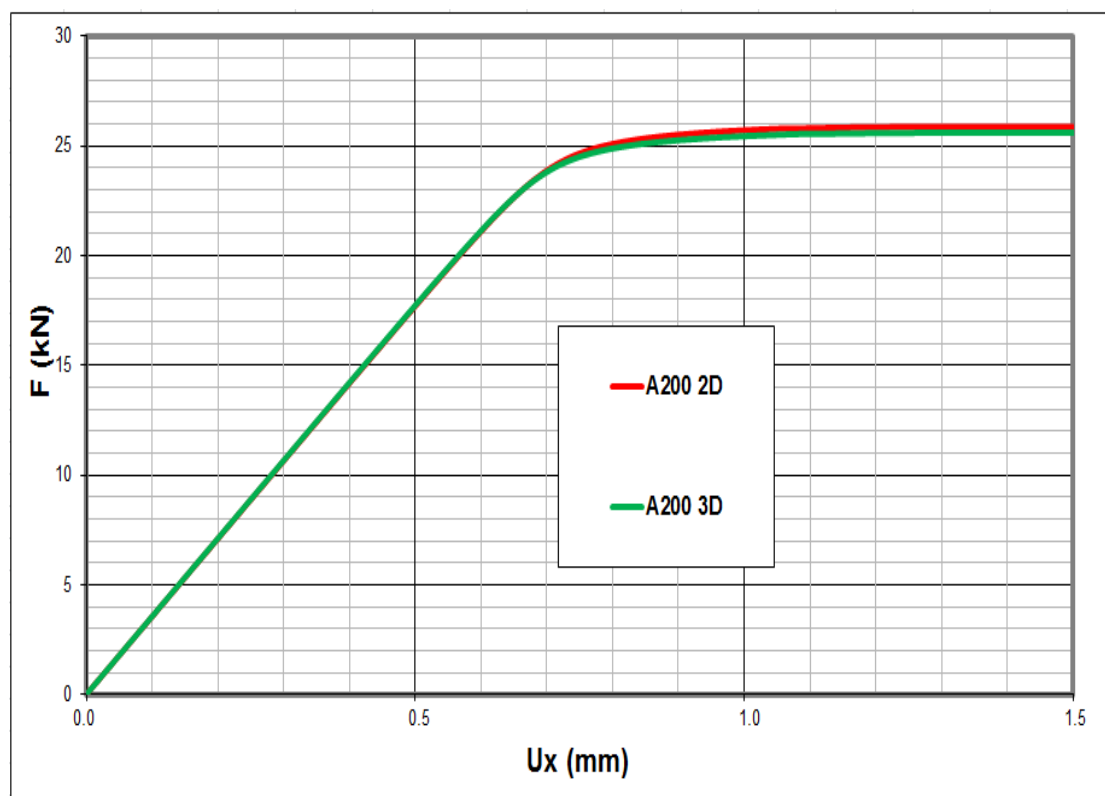
- Τέλος όπως φαίνεται και από τις εικόνες 3.4 και 3.5 η μορφή λυγισμού που προκύπτει με το πέρας της ανάλυσης είναι ταυτόσημη.

3.2.2 ΣΕΙΡΑ Α – 200

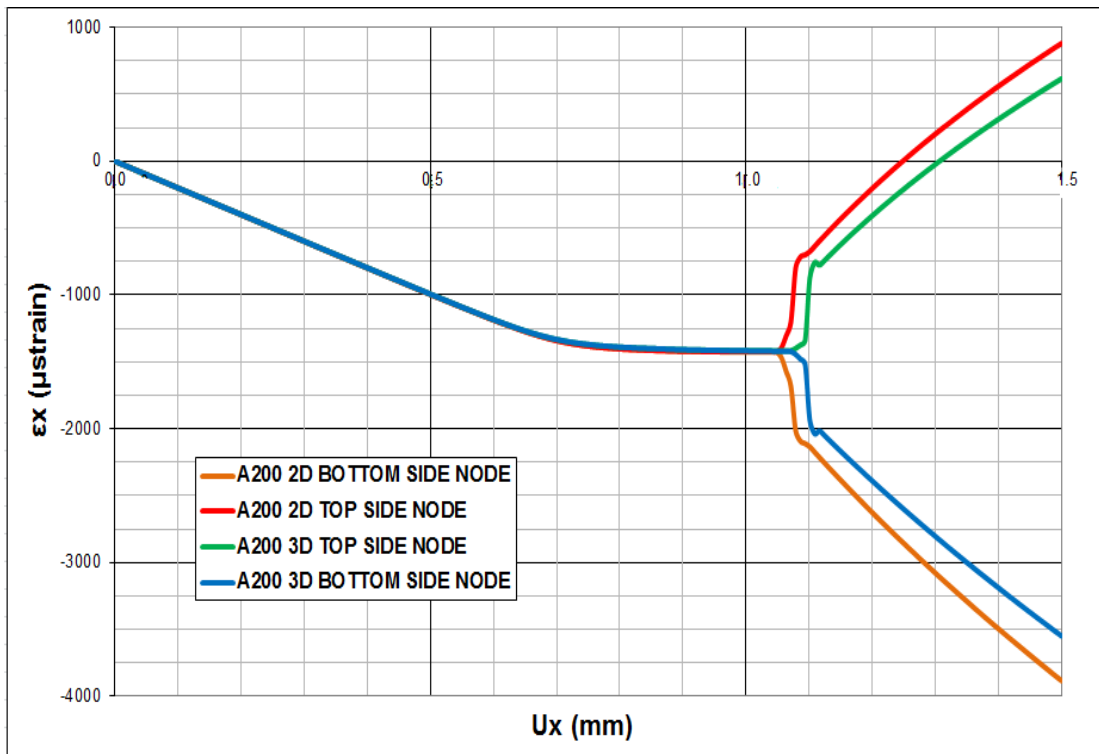
Τα μοντέλα της σειράς Α – 200 έχουν μοντελοποιηθεί έτσι ώστε να έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 200mm που βρίσκεται στο 50% του πάχους του δοκιμίου. Οι διαστάσεις και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι οι εξής :

Πίνακας 3.2 Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς Α – 200

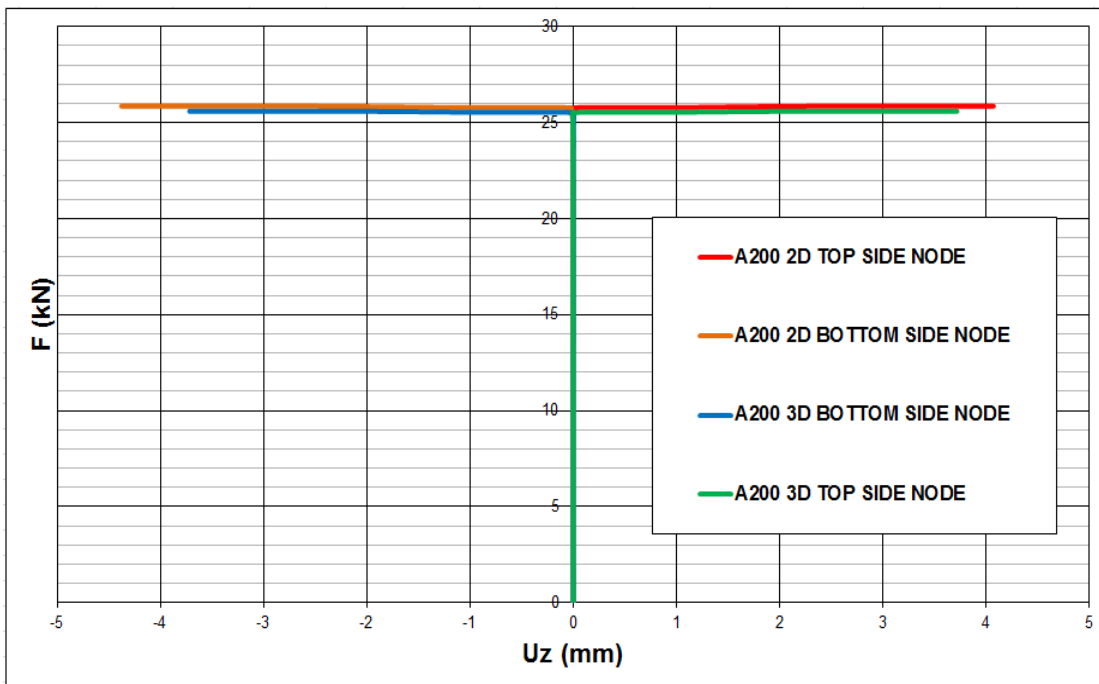
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ)
L	500 (mm)
t	11.8 (mm)
E_x	30330 (MPa)
Average delamination element size (l*t)	2.5*2.95 (mm)



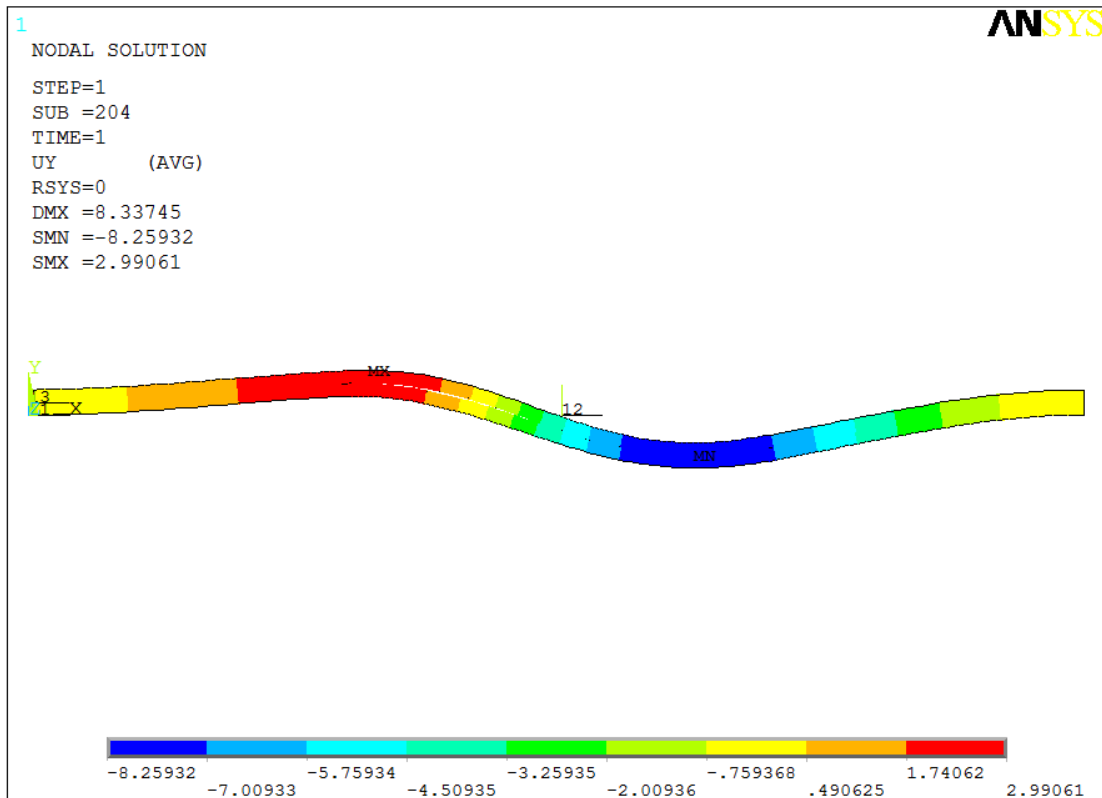
Εικόνα 3.6. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



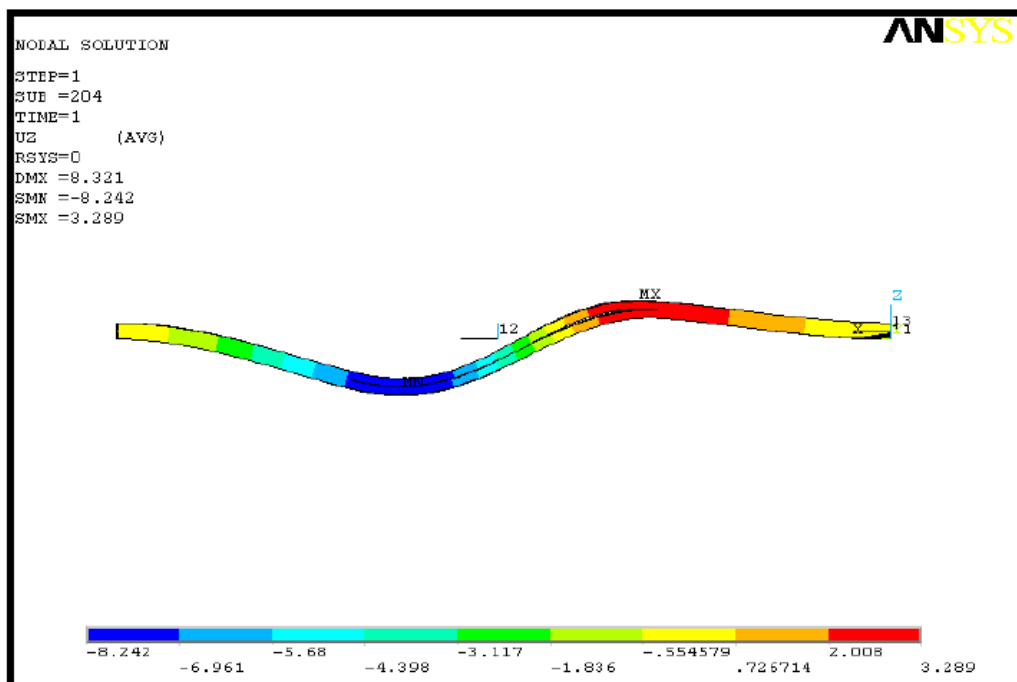
Εικόνα 3.7. Διάγραμμα παραμορφώσεων-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.8. Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης.



Εικόνα 3.9. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 2D.



Εικόνα 3.10. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 3D.

3.2.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Σε γενικές γραμμές οι μορφές των διαγραμμάτων της σειράς A 200 έχουν την ίδια ερμηνεία με αυτές της σειράς A 100. Το μόνο διάγραμμα στο οποίο έχουμε

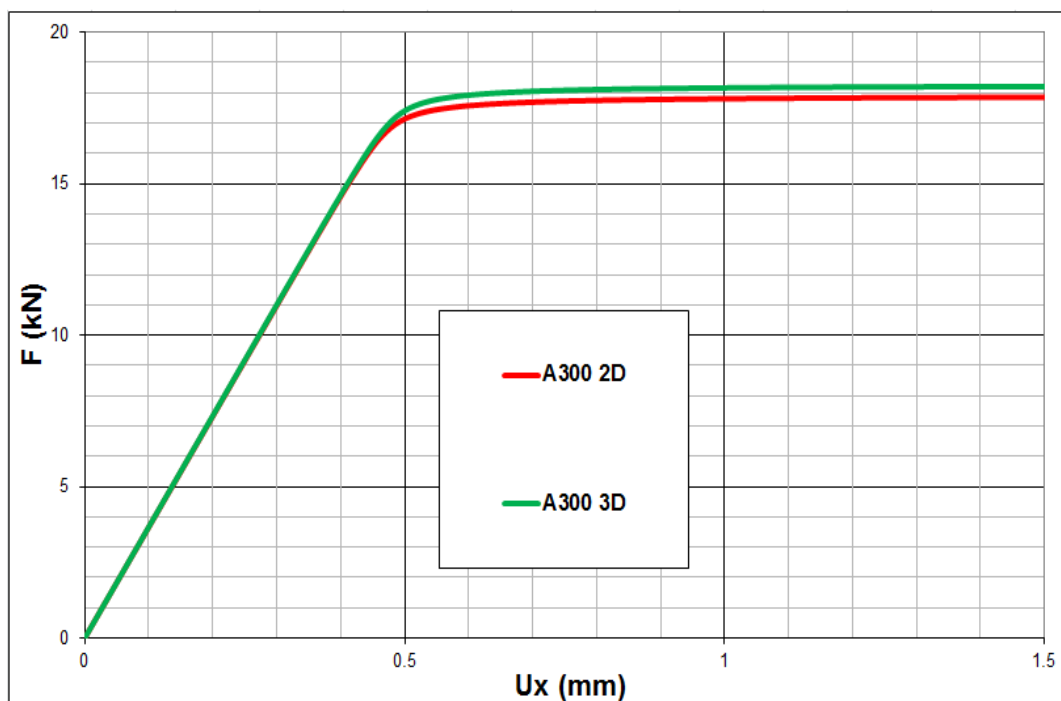
απόκλιση είναι το παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης όπου για μετατοπίσεις μέχρι περίπου 1.03 mm τόσο ο κόμβος της άνω στρώσης όσο και της κάτω λαμβάνουν ακριβώς την ίδια παραμόρφωση. Στη συνέχεια λόγω του ότι το μοντέλο λυγίζει αποκτώντας τη χαρακτηριστική μορφή ημι-κύματος (εικόνα 3.9) έχουμε διαφοροποίηση όσον αφορά το πρόσημο των παραμορφώσεων, με την επάνω στρώση να λαμβάνει θετικές-εφελκυστικές τιμές στη περιοχή γύρω από το μέσο του μήκους της και την κάτω αρνητικές-θλιπτικές στην αντίστοιχη περιοχή. Αν πάλι είχαμε επιλέξει να μετρήσουμε τις παραμορφώσεις σε διαφορετική περιοχή κατά το διάμηκες, μπορεί να συναντούσαμε περιπτώσεις όπου θα είχαμε εφελκυσμό της κάτω στρώσης και θλίψη της επάνω.

3.2.3 ΣΕΙΡΑ A – 300

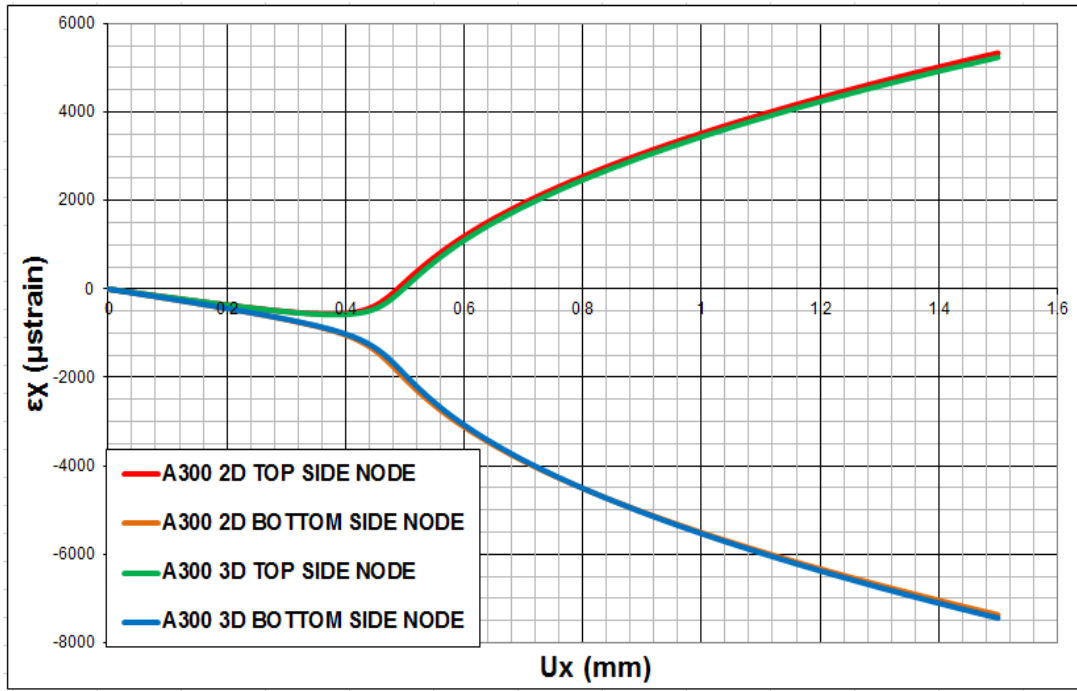
Τα μοντέλα της σειράς A – 300 έχουν μοντελοποιηθεί έτσι ώστε να έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 300mm που βρίσκεται στο 50% του πάχους του δοκιμίου. Οι διαστάσεις και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι οι εξής :

Πίνακας 3.3 Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς A – 300

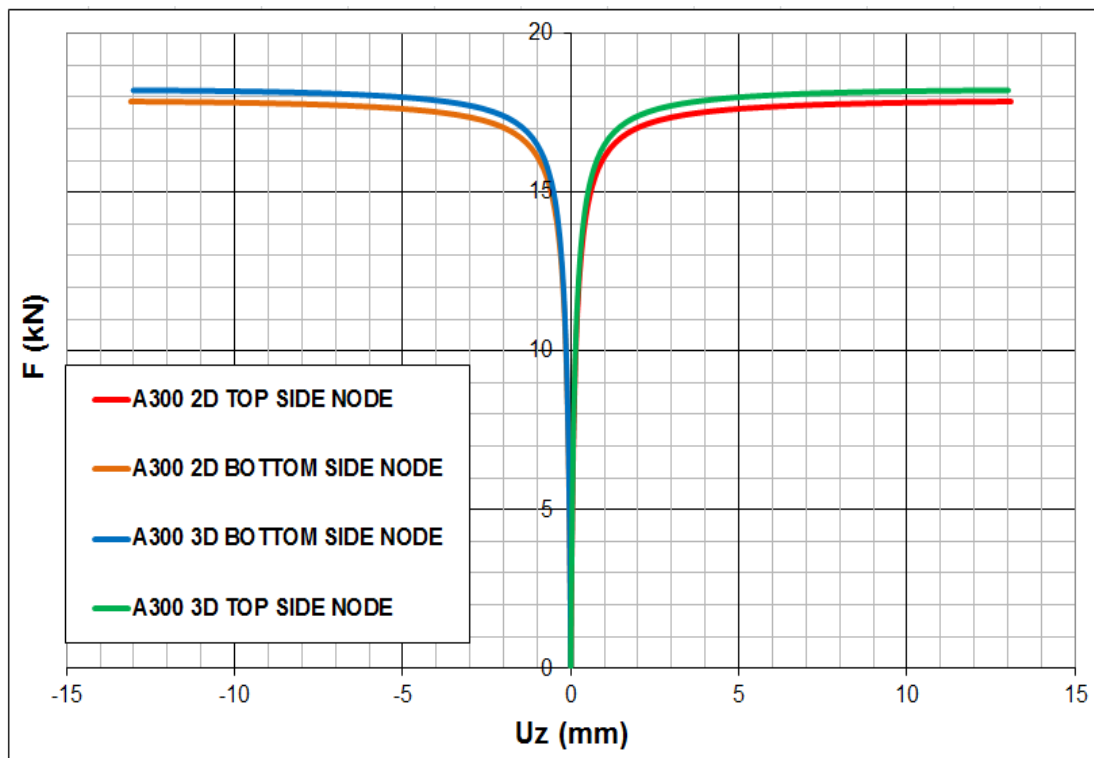
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ)
L	500 (mm)
t	12.1 (mm)
E _x	30430 (MPa)
Average delamination element size (l*t)	2.5*3.025 (mm)



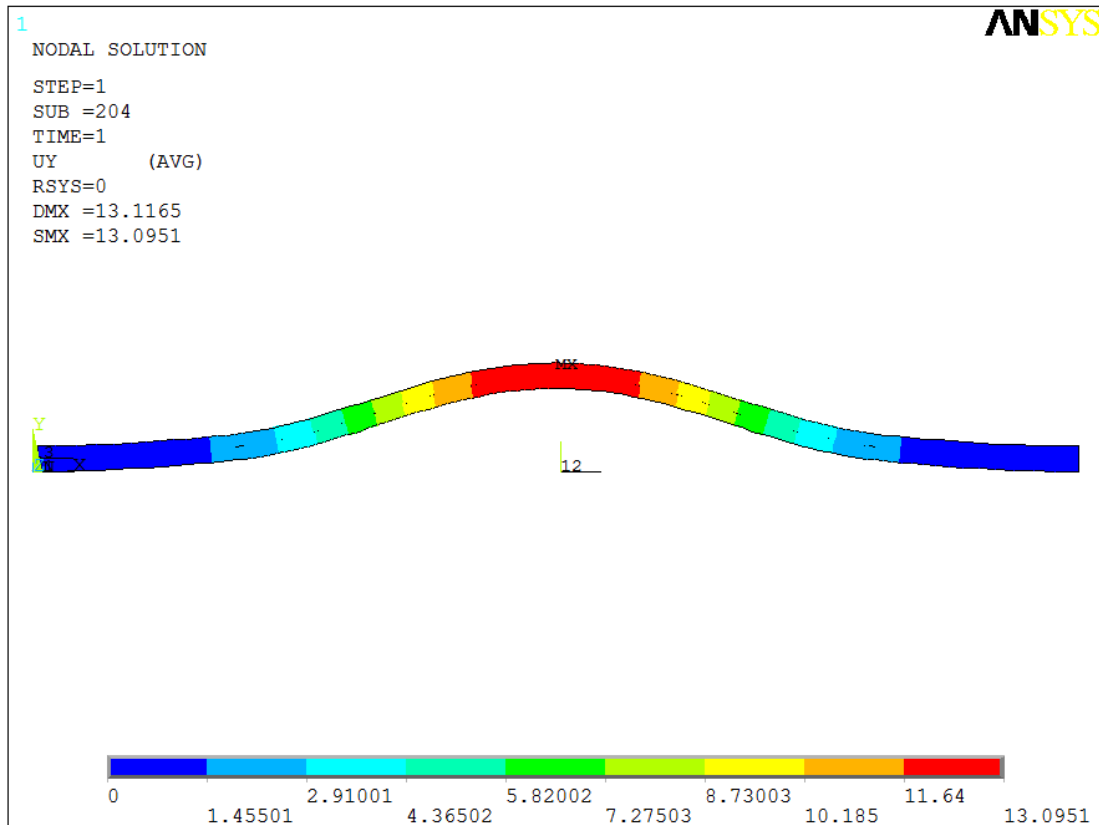
Εικόνα 3.11. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



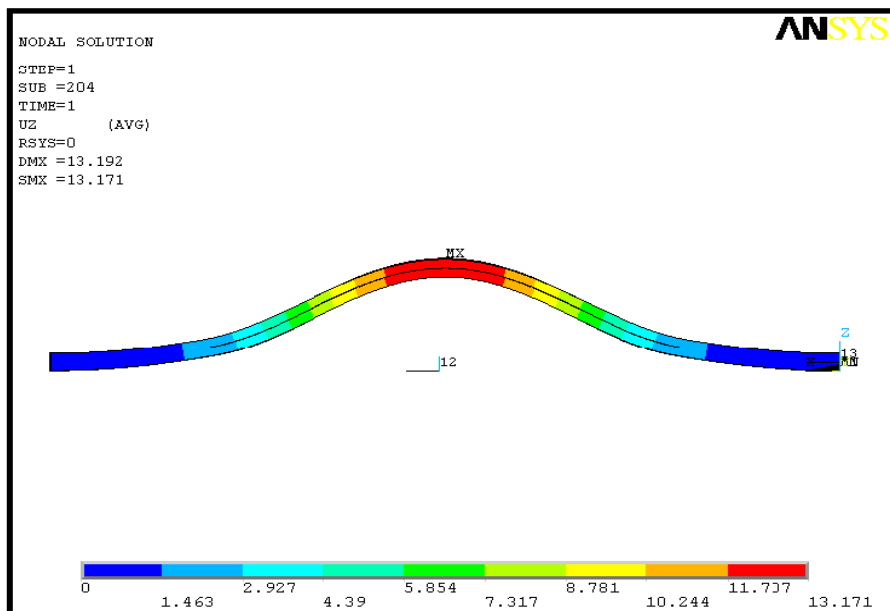
Εικόνα 3.12. Διάγραμμα παραμορφώσεων-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.13. Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης.



Εικόνα 3.14. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 2D.



Εικόνα 3.15. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 3D.

3.2.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

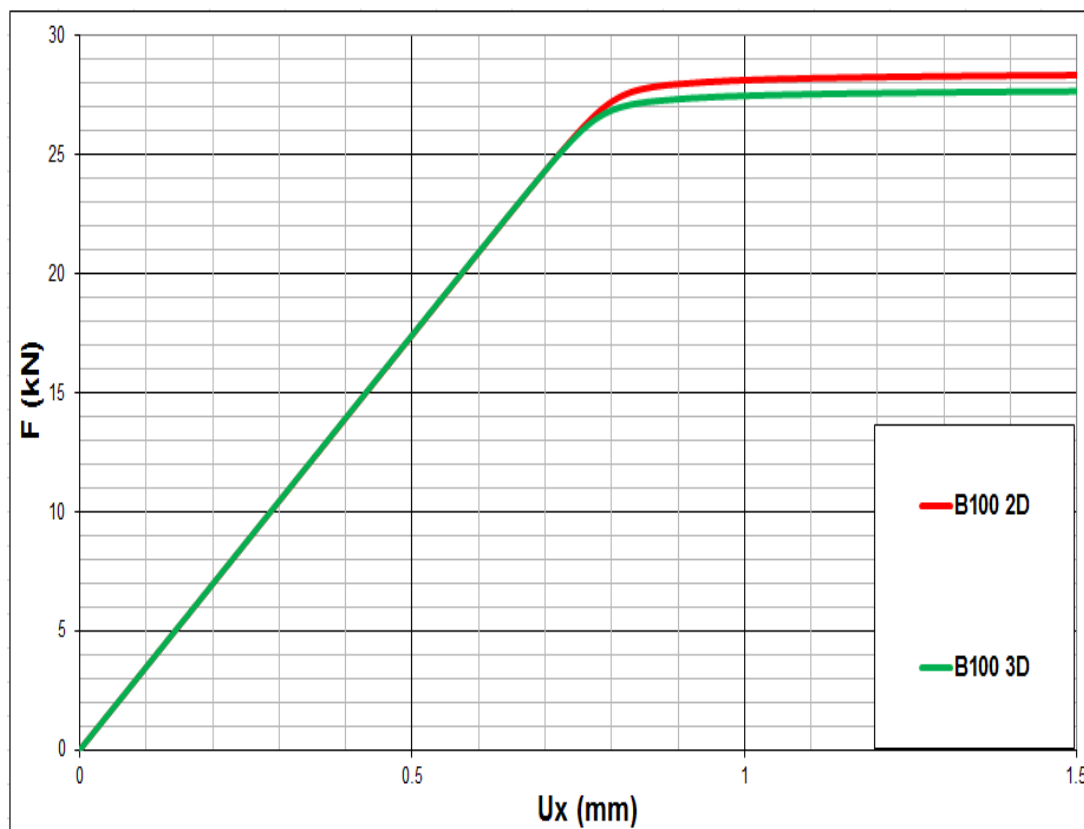
Το μοντέλο A 300 αστοχεί με το χαρακτηριστικό τρόπο (γενικός λυγισμός) που παρατηρήσαμε και στο μοντέλο A 100 , οπότε η ανάλυση των καμπύλων των διαγραμμάτων 3.11-3.13 κινείται στα ίδια ακριβώς πλαίσια.

3.2.4 ΣΕΙΡΑ Β – 100

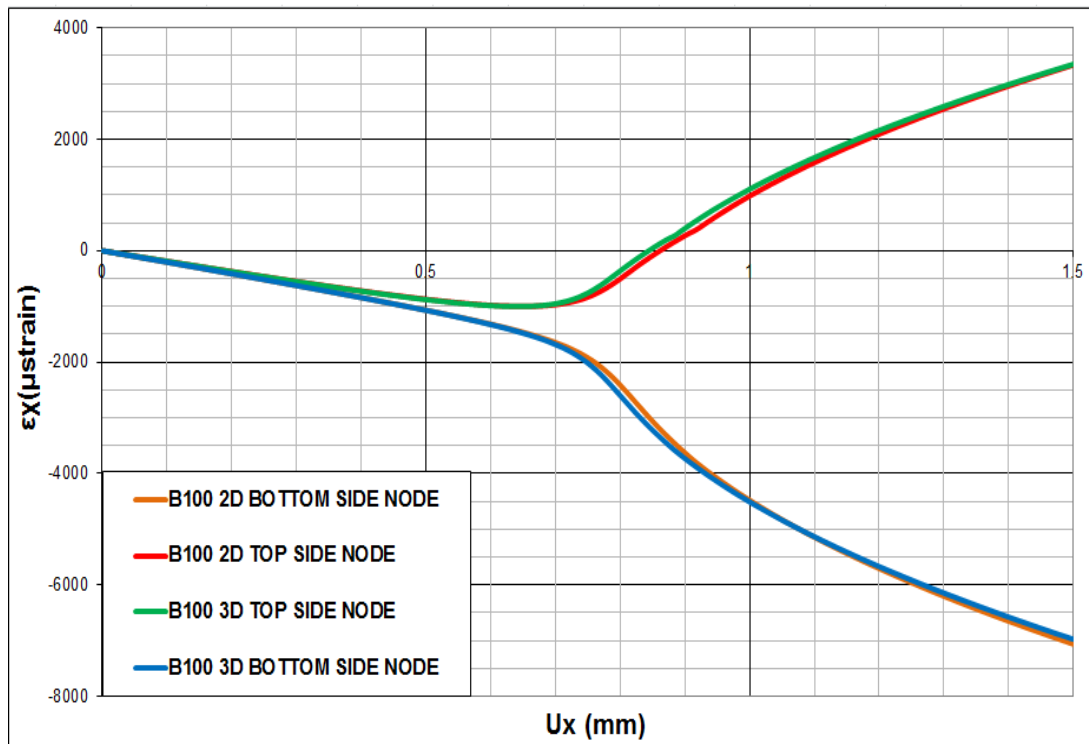
Τα μοντέλα της σειράς Β – 100 έχουν μοντελοποιηθεί έτσι ώστε να έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 100mm που βρίσκεται στο 75% του πάχους του δοκιμίου. Οι διαστάσεις και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι οι εξής :

Πίνακας 3.4 Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς Β – 100.

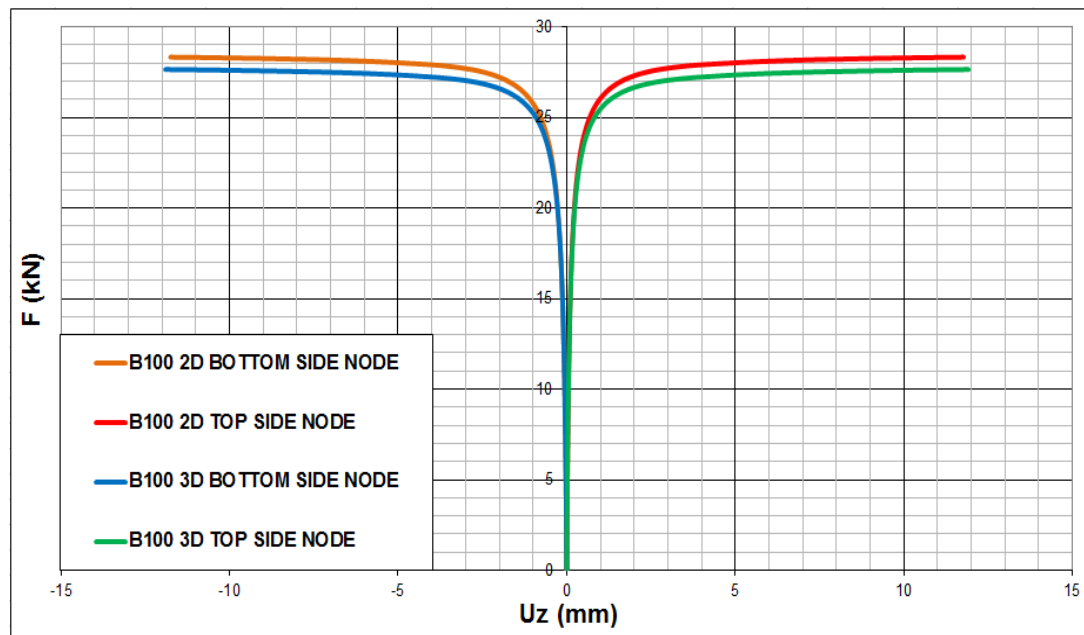
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ)
L	500 (mm)
t	11.3 (mm)
E_x	30980 (MPa)
Average delamination element size ($l*t$)	2.5*2.83 (mm)



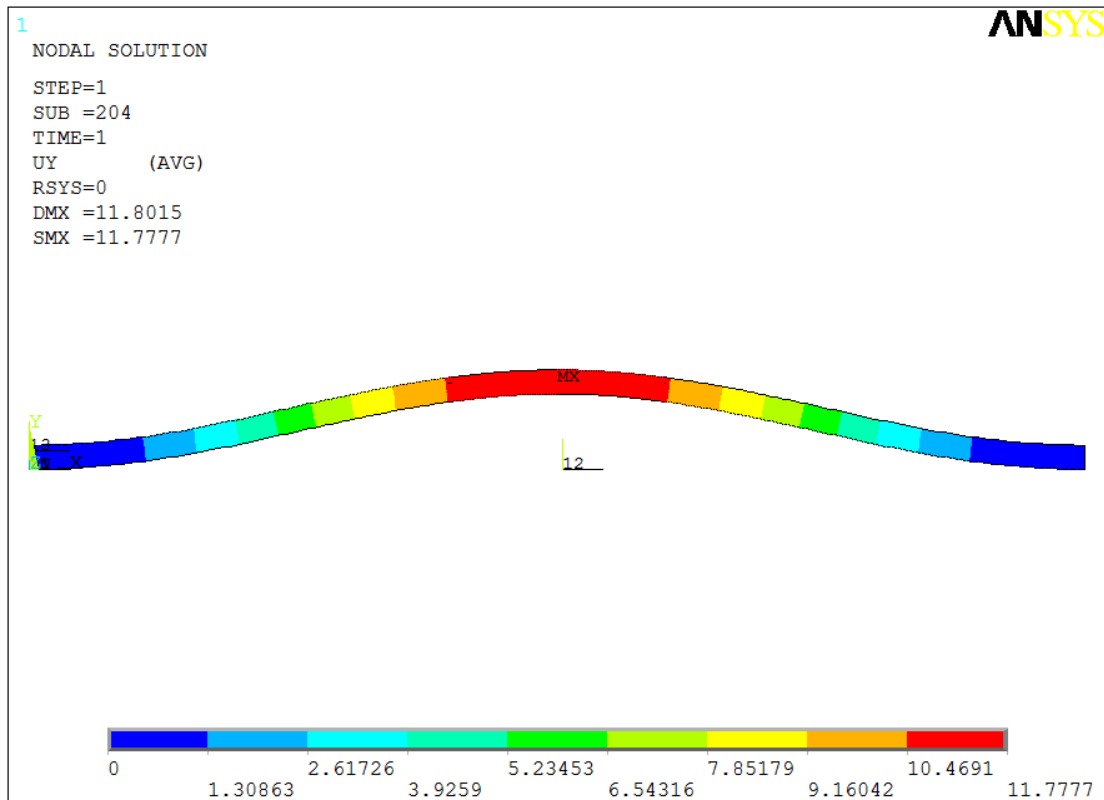
Εικόνα 3.16. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



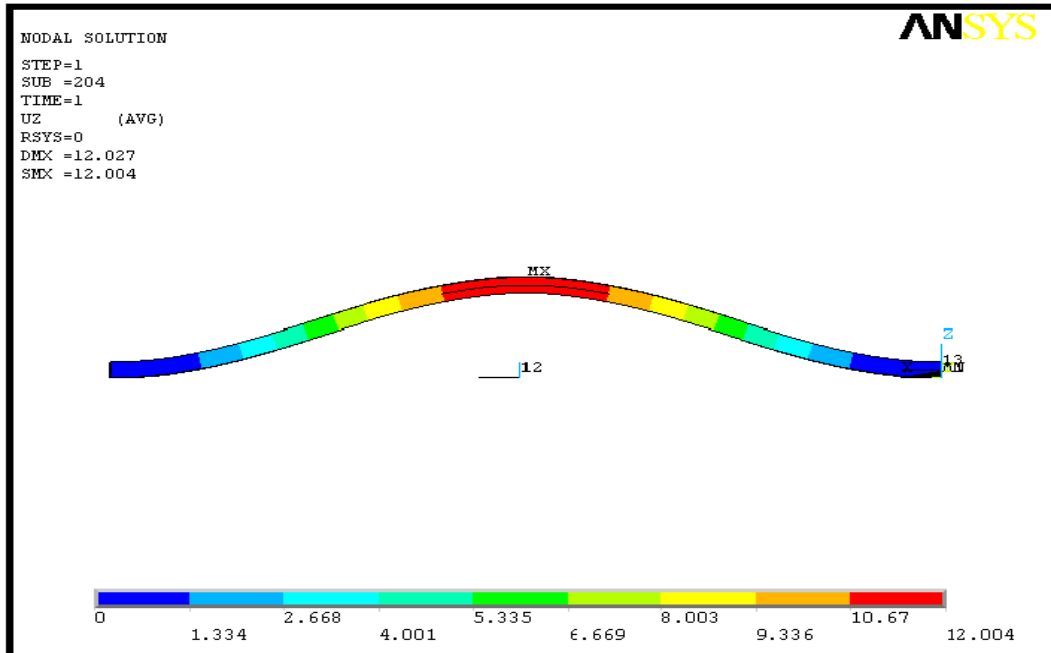
Εικόνα 3.17. Διάγραμμα παραμορφώσεων-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.18. Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης.



Εικόνα 3.19. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 2D.



Εικόνα 3.20. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 3D.

3.2.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Το μοντέλο B 100 λυγίζει ομοιόμορφα προς τη πλευρά της άνω στρώσης , παρουσιάζοντας δηλαδή γενικό λυγισμό όπως τα μοντέλα των σειρών A 100 και A

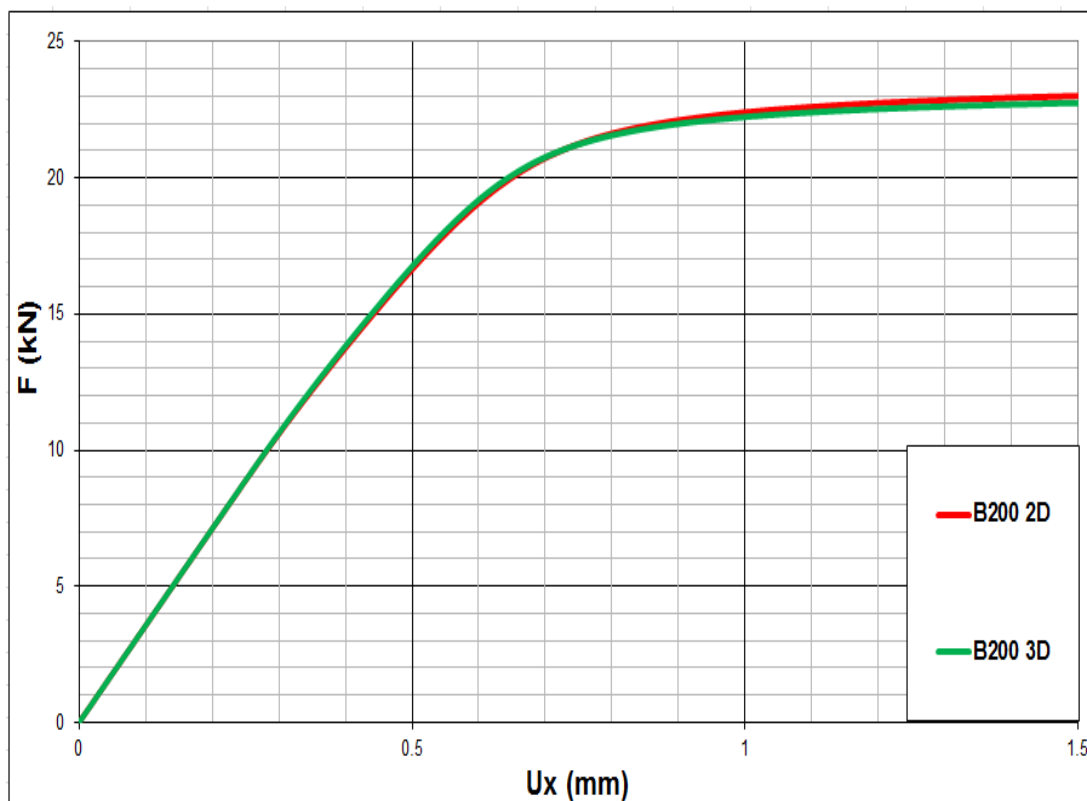
300. Οι καμπύλες που προκύπτουν στα διαγράμματα των εικόνων 3.16-3.18 έχουν παρόμοια μορφή με τα αντίστοιχα των A 100 και A 300 και αιτιολογούνται ανάλογα.

3.2.5 ΣΕΙΡΑ B – 200

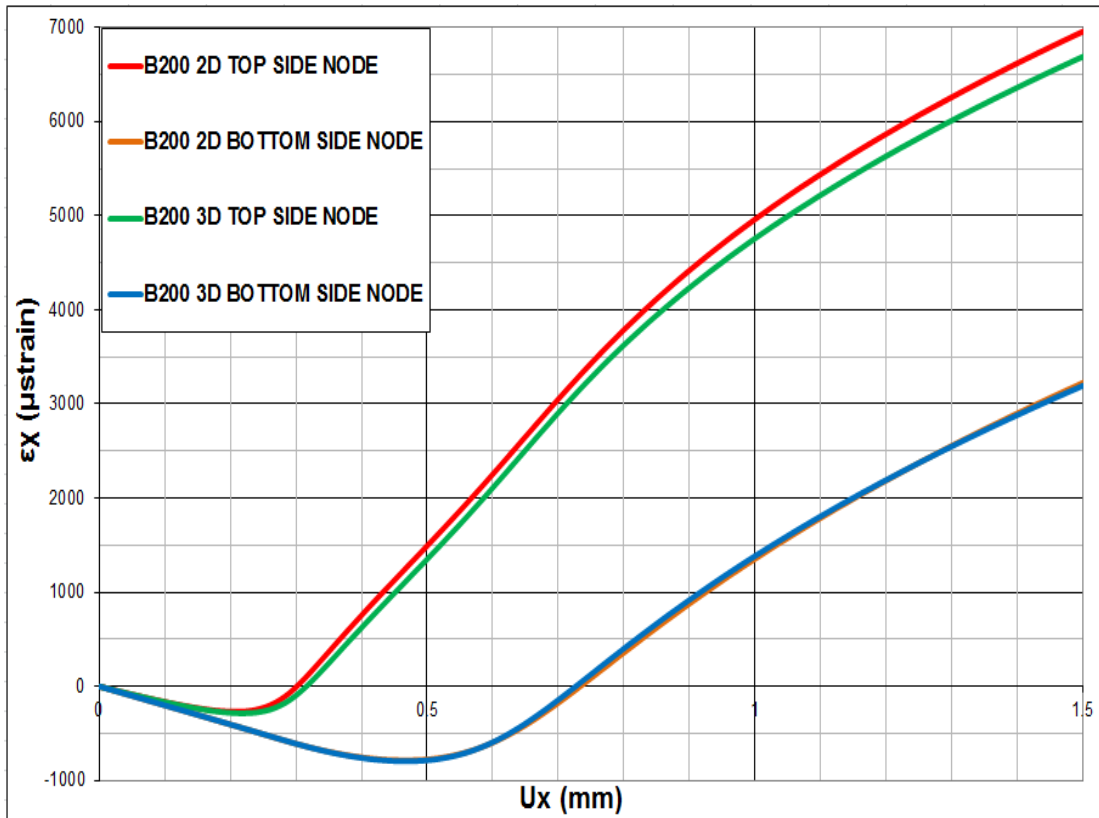
Τα μοντέλα της σειράς B – 200 έχουν μοντελοποιηθεί έτσι ώστε να έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 200mm που βρίσκεται στο 75% του πάχους του δοκιμίου. Οι διαστάσεις και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι οι εξής :

Πίνακας 3.5 Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς B – 200.

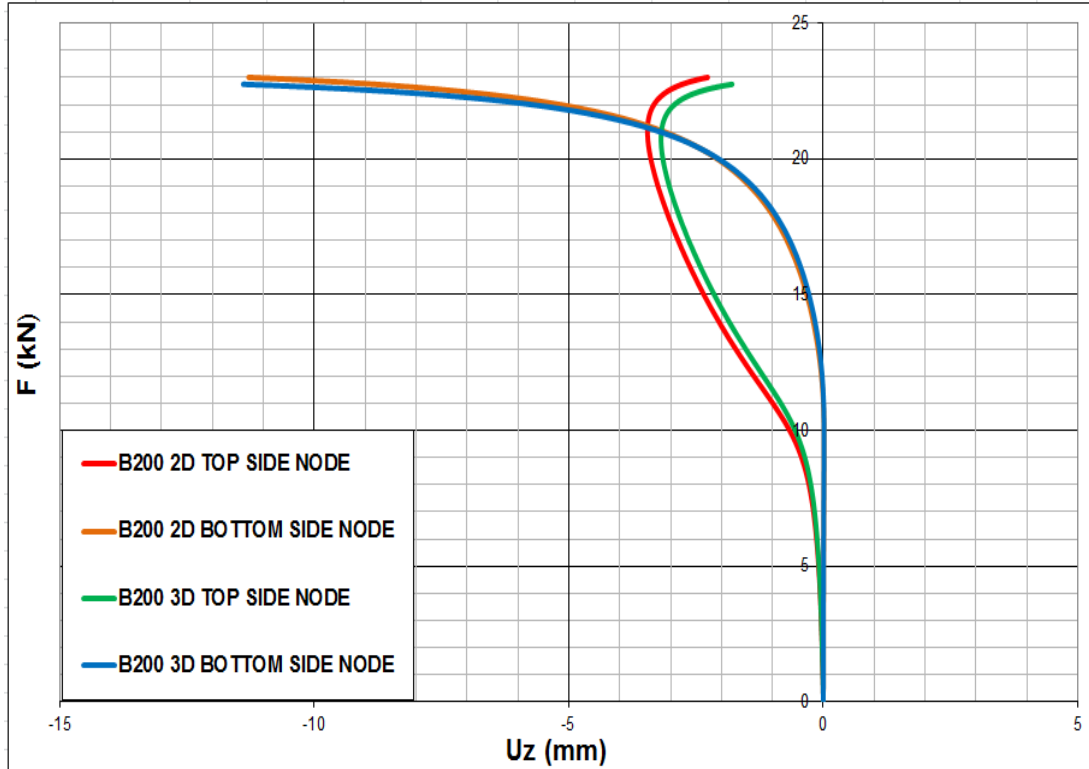
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ)
L	500 (mm)
t	11.6 (mm)
E_x	30870 (MPa)
Average delamination element size (l*t)	2.5*2.9 (mm)



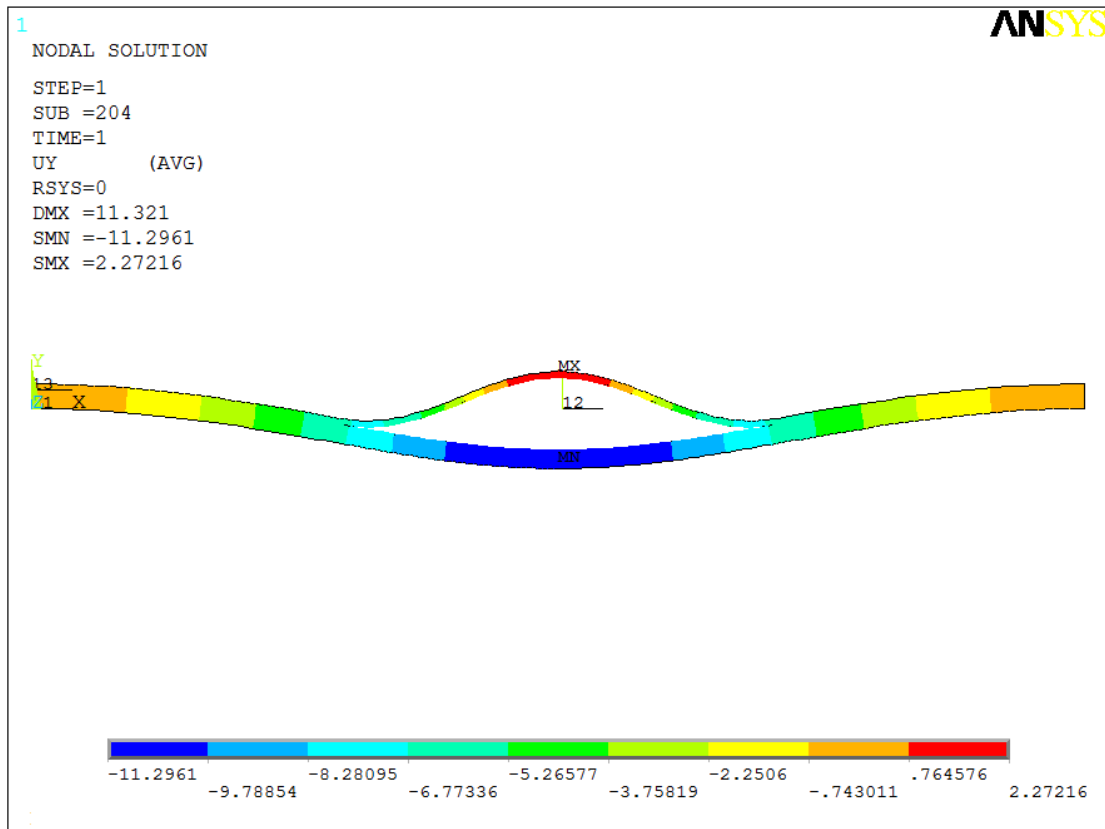
Εικόνα 3.21. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



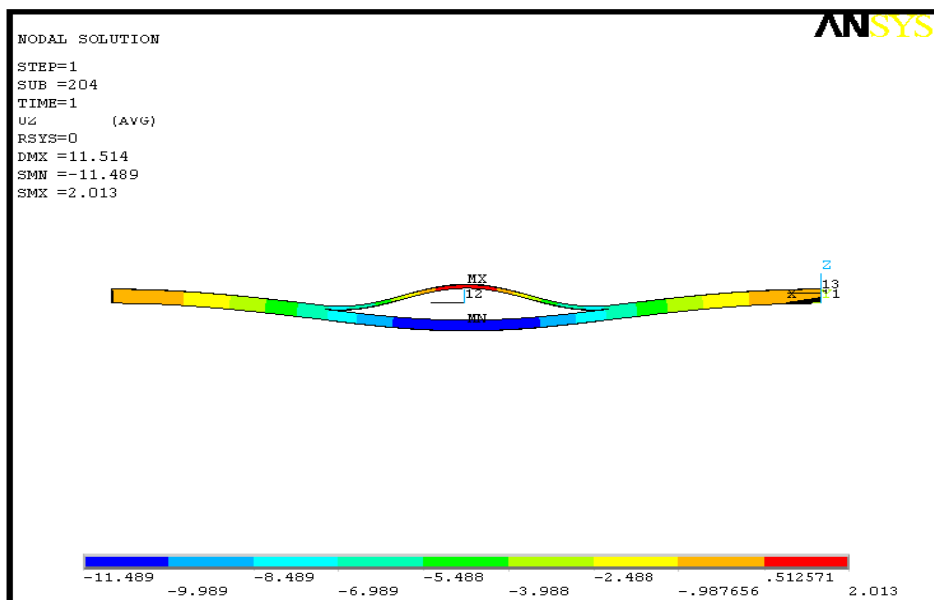
Εικόνα 3.22. Διάγραμμα παραμορφώσεων-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.23. Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης.



Εικόνα 3.24. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 2D.



Εικόνα 3.25. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 3D.

3.2.5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στο συγκεκριμένο μοντέλο παρατηρούμε διαφορετικό τρόπο αστοχίας σε σχέση με τις σειρές μοντέλων ,των οποίων η ανάλυση προηγήθηκε. Ενώ αρχικά και οι δύο στρώσεις λυγίζουν ομοιόμορφα προς την ίδια κατεύθυνση , κάποια στιγμή για μια περιοχή φορτίσεων μεταξύ 20 και 21 kN η άνω λεπτή στρώση απομακρύνεται από

τη κάτω και λυγίζει προς την αντίθετη κατεύθυνση , έχουμε δηλαδή λυγισμό μεικτής μορφής. Αυτό το φαινόμενο όπου έχουμε απότομη μετάβαση από γενικό λυγισμό σε μεικτής μορφής , ορίζεται ως snap through.

Στη συνέχεια ακολουθεί μικρή περιγραφή για κάθε τύπο διαγράμματος ξεχωριστά.

- Από το διάγραμμα της εικόνας 3.20 παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των μοντέλων συμπίπτουν σχεδόν τέλεια , με τα δισδιάστατα να παρουσιάζουν οριακά (της τάξης του 0.5%) μεγαλύτερη μέγιστη φόρτιση.

- Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού λαμβάνει μια τιμή κοντά στα 20 kN και γίνεται εύκολα αντιληπτό από τη γωνία που παρουσιάζεται στη καμπύλη δύναμης-αξονικής μετατόπισης η οποία αρχικά αναπτυσσόταν γραμμικά ενώ στη συνέχεια λαμβάνει τη χαρακτηριστική μορφή του σχηματιζόμενου πλατό , που εμφανίζεται στα δοκίμια που έχουν εισέλθει στη περιοχή λυγισμού.

- Επίσης από το διάγραμμα παραμόρφωσεων-αξονικής μετατόπισης , παρατηρούμε ότι οι καμπύλες τόσο των δισδιάστατων όσο και των τρισδιάστατων μοντέλων ακολουθούν ουσιαστικά την ίδια μορφή. Αρχικά λαμβάνουν αρνητικές παραμορφώσεις καθώς το μοντέλο βρίσκεται υπό θλίψη και λυγίζει ελαφριά προς την ίδια κατεύθυνση . Στη συνέχεια και εφόσον το φαινόμενο του snap through λαμβάνει χώρα , οι στρώσεις λυγίζουν αντίθετα μεταξύ τους και έτσι τόσο η εξωτερική πλευρά τις άνω στρώσης όσο και η αντίστοιχη τις κάτω εφελκύνονται (θετικές τιμές στο διάγραμμα των παραμορφώσεων).

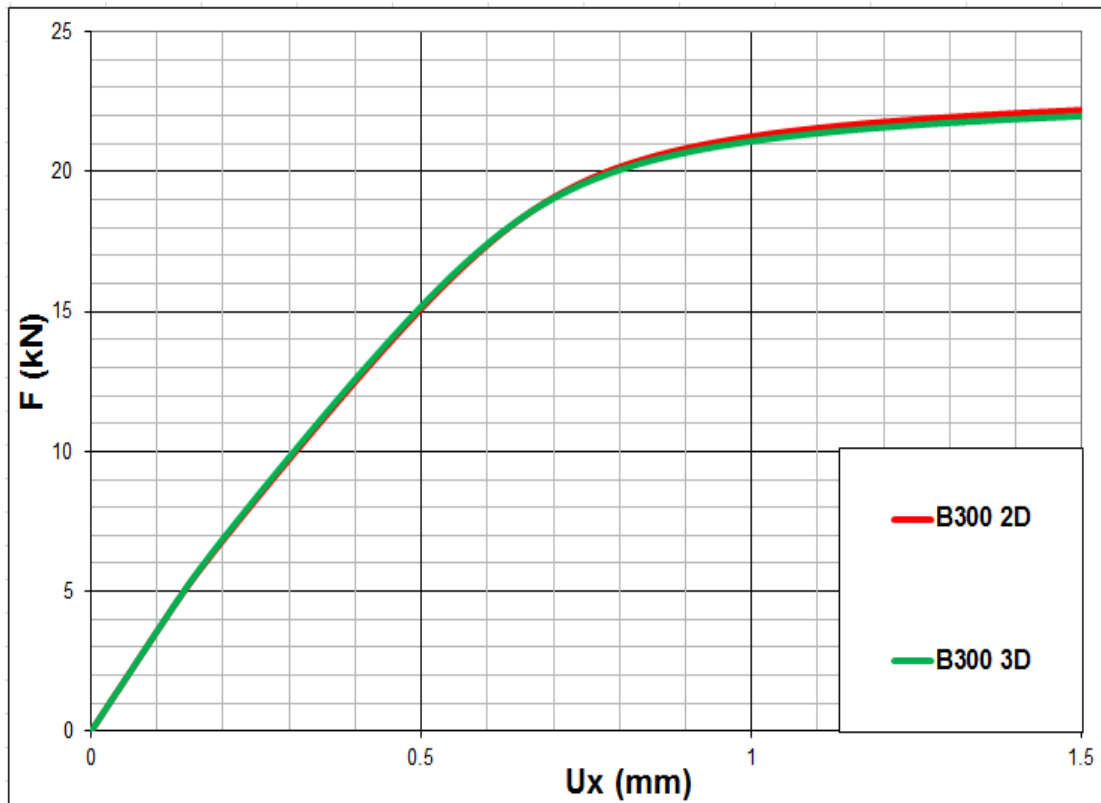
- Αντίστοιχα και στο διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης γίνεται αντιληπτή η επίδραση του snap through καθώς ενώ αρχικά και οι δύο στρώσεις λαμβάνουν μετατοπίσεις προς την ίδια κατεύθυνση , για F_x κοντά στα 20 kN η καμπύλη που χαρακτηρίζει το κόμβο της άνω λεπτής στρώσης αντιστρέφεται και τείνει να μετατοπιστεί προς τα θετικά του άξονα U_z .

3.2.6 ΣΕΙΡΑ B – 300

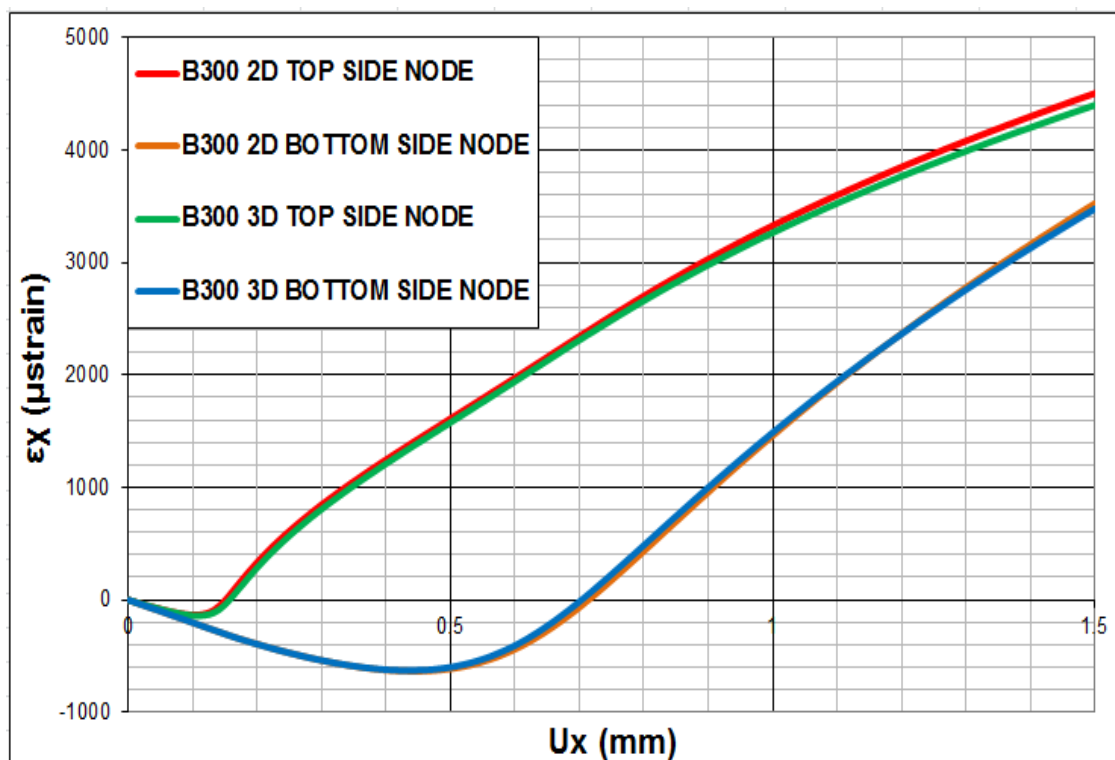
Τα μοντέλα της σειράς B – 300 έχουν μοντελοποιηθεί έτσι ώστε να έχουν μήκος αποχωρισμού των στρώσεων 300mm που βρίσκεται στο 75% του πάχους του δοκίμιου. Οι διαστάσεις και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι οι εξής :

Πίνακας 3.6 Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμίων σειράς B – 300

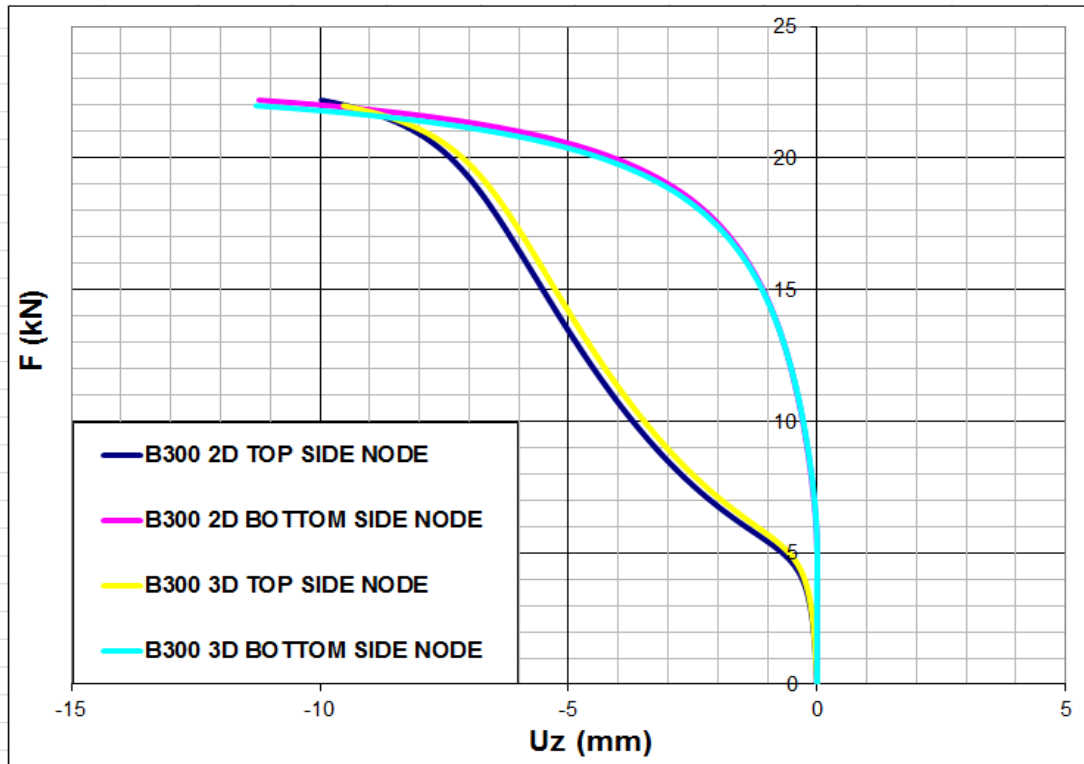
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ)
L	500 (mm)
t	12.2 (mm)
E_x	29550 (MPa)
Average delamination element size (l^*t)	2.5*3.05 (mm)



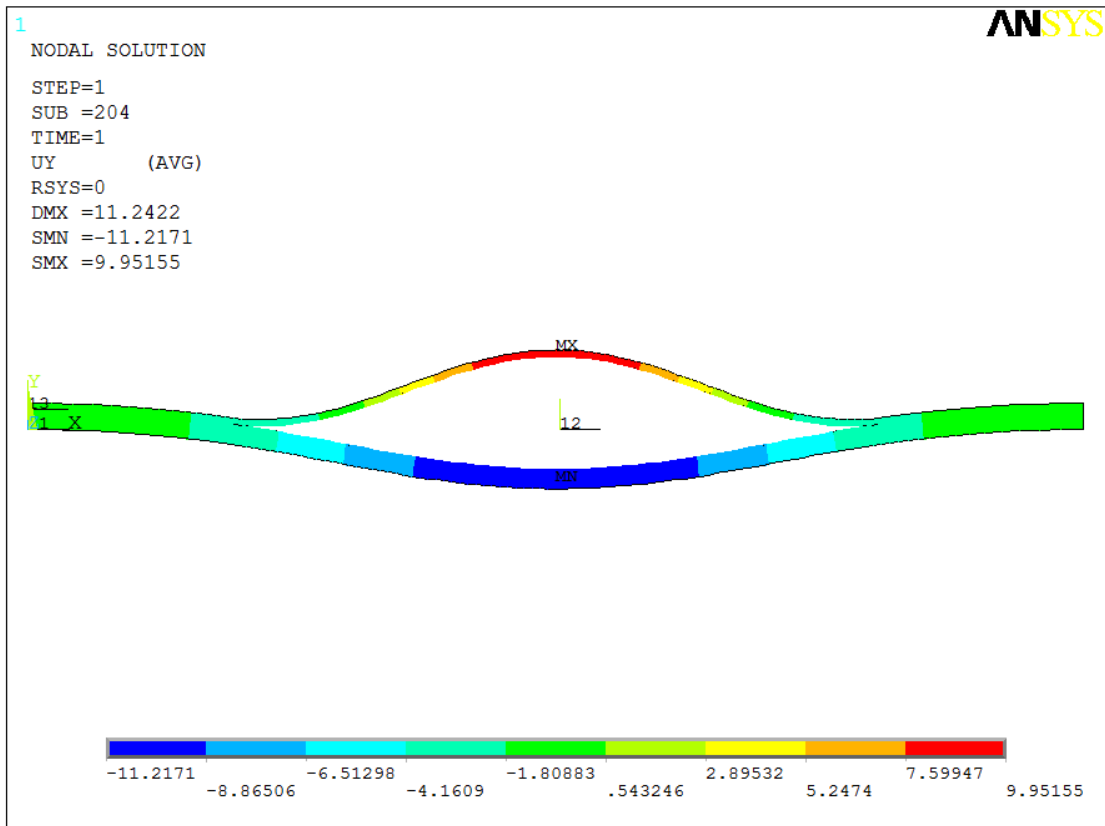
Εικόνα 3.26. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



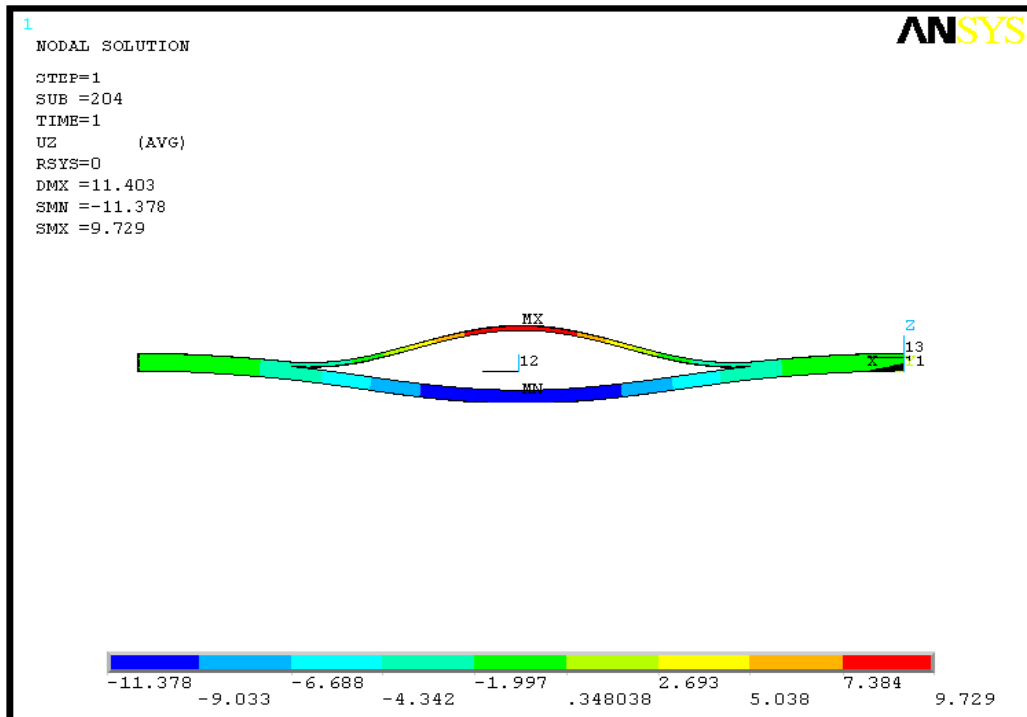
Εικόνα 3.27. Διάγραμμα παραμορφώσεων-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.28. Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης.



Εικόνα 3.29. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 2D.



Εικόνα 3.30. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 3D.

3.2.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

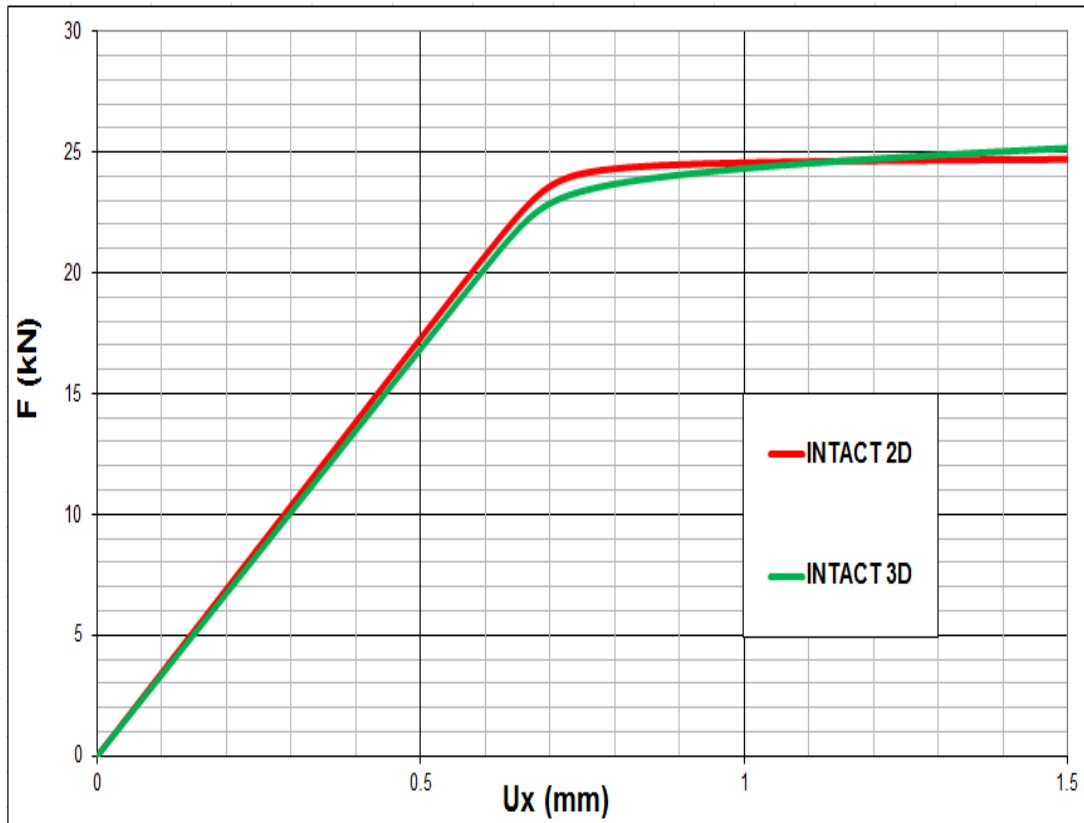
Το μοντέλο B 300 παρουσιάζει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με το B 200 οπότε η ανάλυση τόσο του τρόπου λυγισμού όσο και των διαγραμμάτων κυμαίνεται ακριβώς στα ίδια πλαίσια και δεν χρήζει περαιτέρω μελέτη.

3.2.7 ΣΕΙΡΑ ΑΘΙΚΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (INTACT)

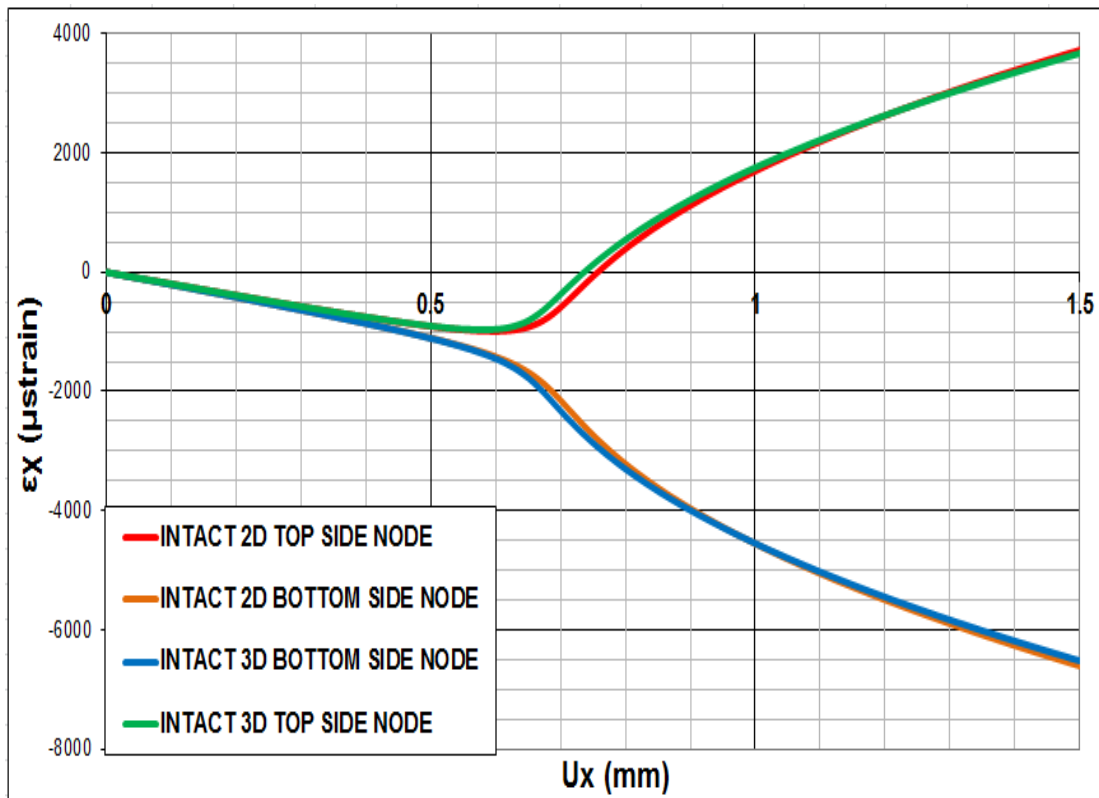
Τα μοντέλα της σειράς INTACT είναι άθικτα δοκίμια ,τα οποία έχουν μοντελοποιηθεί για λόγους σύγκρισης με αυτά που έχουν τεχνητό αποχωρισμό. Οι διαστάσεις και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι οι εξής :

Πίνακας 3.7 Διαστάσεις και ιδιότητες δοκιμών σειράς INTACT

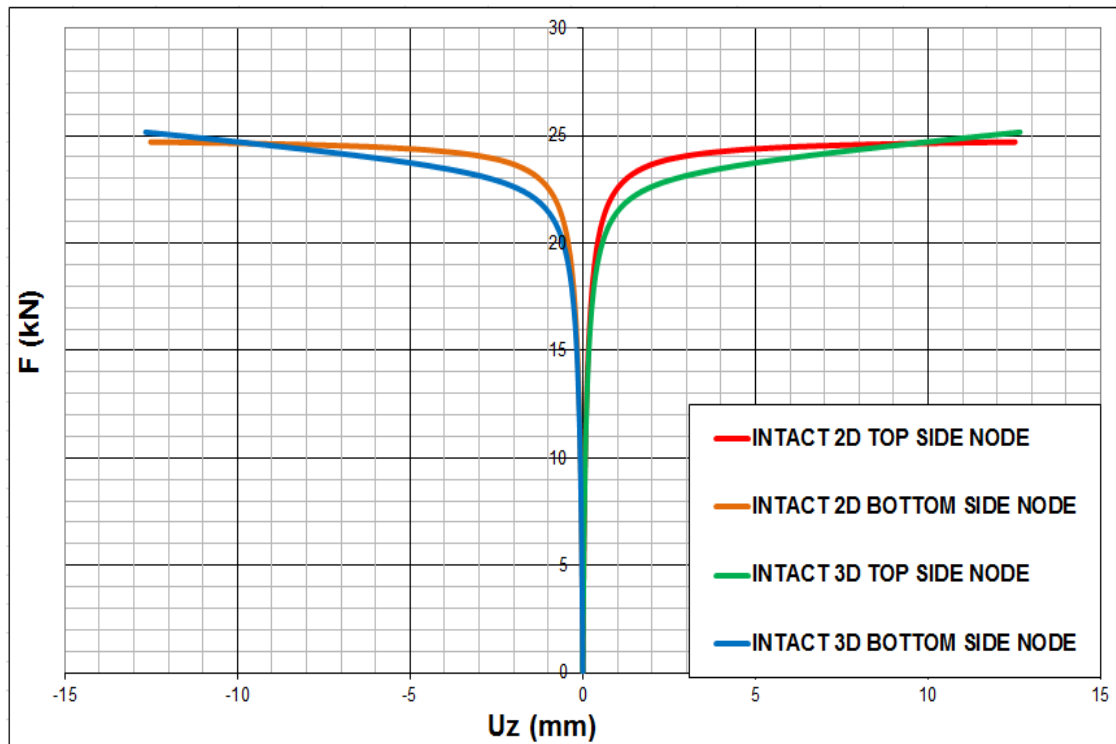
ΜΕΓΕΘΟΣ	ΤΙΜΗ (ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ)
L	500 (mm)
t	10.54 (mm)
Ex	32960 (MPa)
Average delamination element size (l*t)	2.5*3.05 (mm)



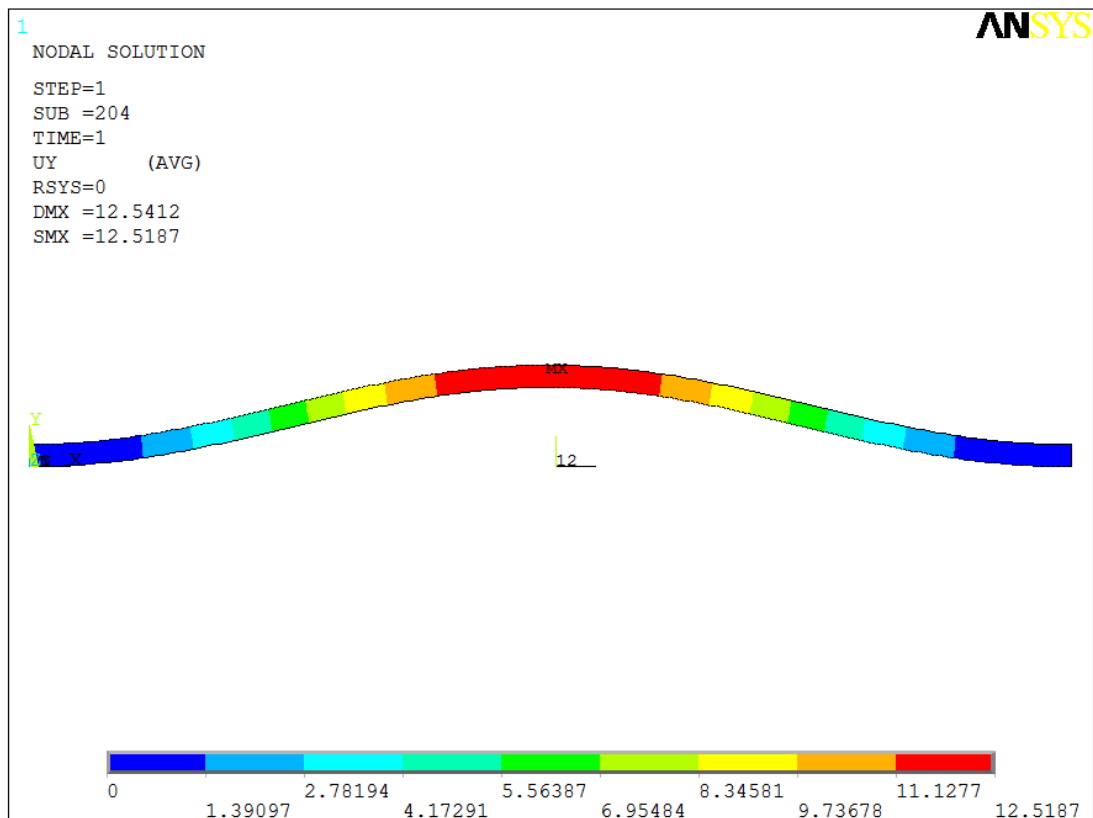
Εικόνα 3.31. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



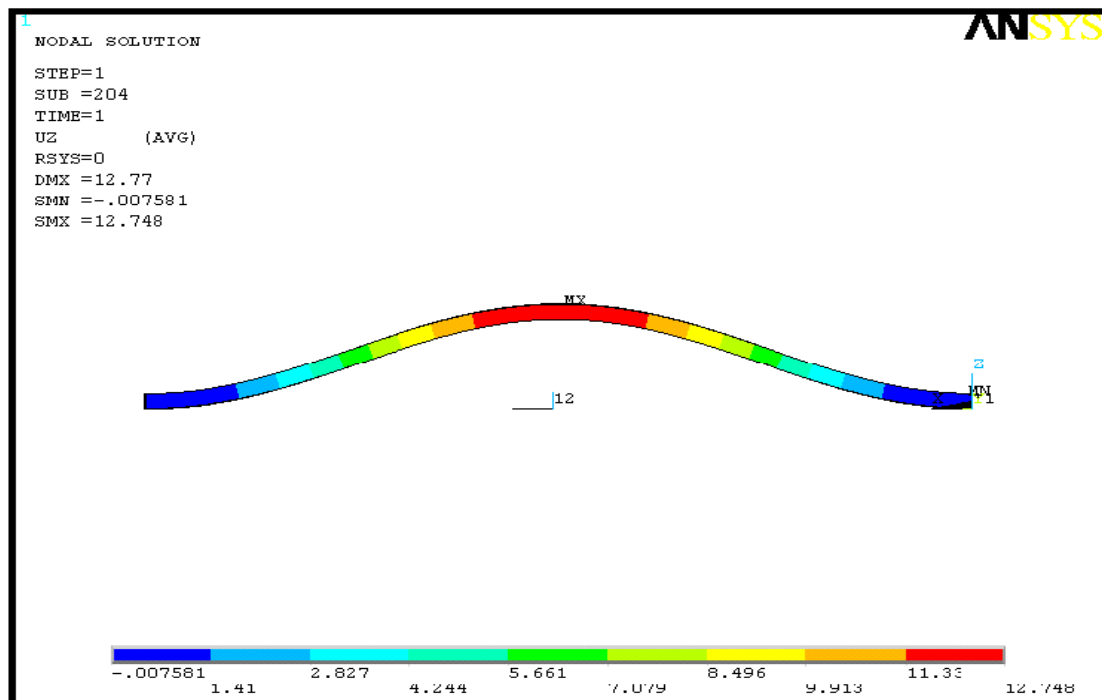
Εικόνα 3.32. Διάγραμμα παραμορφώσεων-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.33. Διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης.



Εικόνα 3.34. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 2D.



Εικόνα 3.35. Μορφή λυγισμού για μοντέλο 3D.

3.2.7.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Το άθικτο μοντέλο λυγίζει ομοιόμορφα όπως τα μοντέλα των σειρών A 100 , A 300 και B 100 ενώ και οι καμπύλες των διαγραμμάτων του παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά , κάτι αναμενόμενο αφού αστοχεί με ανάλογο τρόπο.

Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων , προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις :

- Από το διάγραμμα της εικόνας 3.30 παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των μοντέλων συμπίπτουν σχεδόν τέλεια ,με τα δισδιάστατα να παρουσιάζουν οριακά μεγαλύτερη ακαμψία.
- Επίσης από το διάγραμμα παραμόρφωσης-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε ότι η καμπύλες ακολουθούν την ίδια μορφή από την αρχή μέχρι το τέλος της ανάλυσης, με ανεπαίσθητες μικροδιαφορές που δεν χρήζουν σχολιασμού .
- Όσον αφορά το διάγραμμα δύναμης-εγκάρσιας μετατόπισης ,οι μορφές των καμπυλών είναι ίδιες μέχρι μια φόρτιση της τάξης των 18KN ενώ στη συνέχεια παρατηρούνται κάποιες μικροδιαφοροποιήσεις.

Τέλος όπως φαίνεται και από τις εικόνες 3.34 και 3.35 η μορφή λυγισμού που προκύπτει με το πέρας της ανάλυσης είναι ταυτόσημη.

3.2.8 ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ

Από την παραπάνω ανάλυση διαπιστώνουμε ότι υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση των αποτελεσμάτων που δίνουν τα δισδιάστατα μοντέλα με αυτά των τρισδιάστατων. Οι διάφορες μικρό-αποκλίσεις που παρατηρούνται μπορεί να οφείλονται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι κάποια φαινόμενα δεν μπορούν να εκφραστούν πλήρως στο επίπεδο εντατικό πρόβλημα των 2D μοντέλων. Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι οι κώδικές μας λαμβάνουν υπόψη τους το πλάτος των πραγματικών τρισδιάστατων δοκιμίων με χρήση της επιλογής *plane stress with thickness* που παρέχεται στο στάδιο ορισμού των ιδιοτήτων του στοιχείου που θα χρησιμοποιήσουμε για να μοντελοποιήσουμε (PLANE42).

Σε συνάρτηση με τα παραπάνω, ακόμα ένας λόγος που τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αποκλίσεις είναι η χρήση διαφορετικών στοιχείων μοντελοποίησης μεταξύ των δύο περιπτώσεων (SOLID45 για τα 3D έναντι PLANE2 για τα 2D).

Τέλος πολλές μικροδιαφορές μπορεί να οφείλονται στο γεγονός ότι από τη φύση του το υπολογιστικό πακέτο μπορεί να δώσει μικρές αποκλίσεις στα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τον ίδιο κώδικα αλλά τα οποία έχουν επιλυθεί σε διαφορετικές εκδόσεις του ANSYS (ο Κουσαθανάς χρησιμοποιεί την έκδοση 7 ενώ εμείς την 14). Κάτι τέτοιο έγινε αντιληπτό και στη πράξη καθώς μετά από τρεξίματα που έγιναν μεταξύ των εκδόσεων 13 και 14 του ANSYS παρατηρήθηκαν μικρό-αποκλίσεις ενώ και στα tutorials που παρέχει του πανεπιστήμιο της Alberta (ANSYS 7.0 tutorials , University of Alberta , 2001) γίνεται αναφορά στη πιθανή εμφάνιση της συγκεκριμένης απόκλισης.

3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

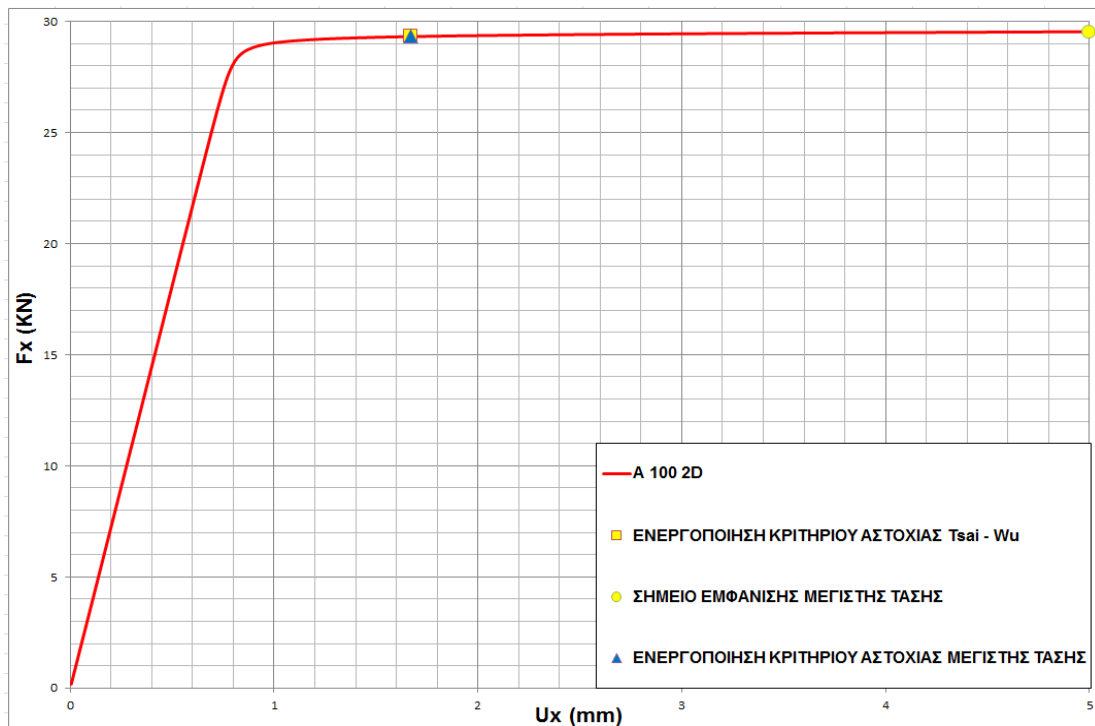
Εφόσον έχουμε διασφαλίσει από τη προηγούμενη ενότητα (3.2) ότι τα μοντέλα δισδιάστατα μοντέλα μας λειτουργούν ικανοποιητικά, μπορούμε πλέον να τα χρησιμοποιήσουμε ως βάση για τη μελέτη φαινομένων τα οποία μας απασχολούν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά θα προσπαθήσουμε να μελετήσουμε την εμφάνιση αστοχίας στις στρώσεις του σύνθετου με χρήση των κριτηρίων αστοχίας Tsai – Wu και Μέγιστης Τάσης. Τα μοντέλα στα οποία θα εφαρμόσουμε τους κώδικες για την ενεργοποίηση των κριτηρίων , σε πρώτη φάση έχουν δημιουργηθεί χωρίς *cohesive elements* στη διεπιφάνεια σύνδεσης των στρώσεων. Στη συνέχεια ακολουθεί ξεχωριστή ανάλυση για κάθε σειρά μοντέλων , η οποία θα περιλαμβάνει την εξαγωγή διαγράμματος συνολικής δύναμης αξονικής μετατόπισης , ποιοτική και ποσοτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε κριτήριο αστοχίας. Επίσης θα γίνει καταγραφή του σημείου εμφάνισης της μέγιστης τάσης για το εκάστοτε μοντέλο , για το εύρος της ανάλυσης που επιλέγουμε (μέγιστη επιβαλλόμενη θλιπτική μετατόπιση).

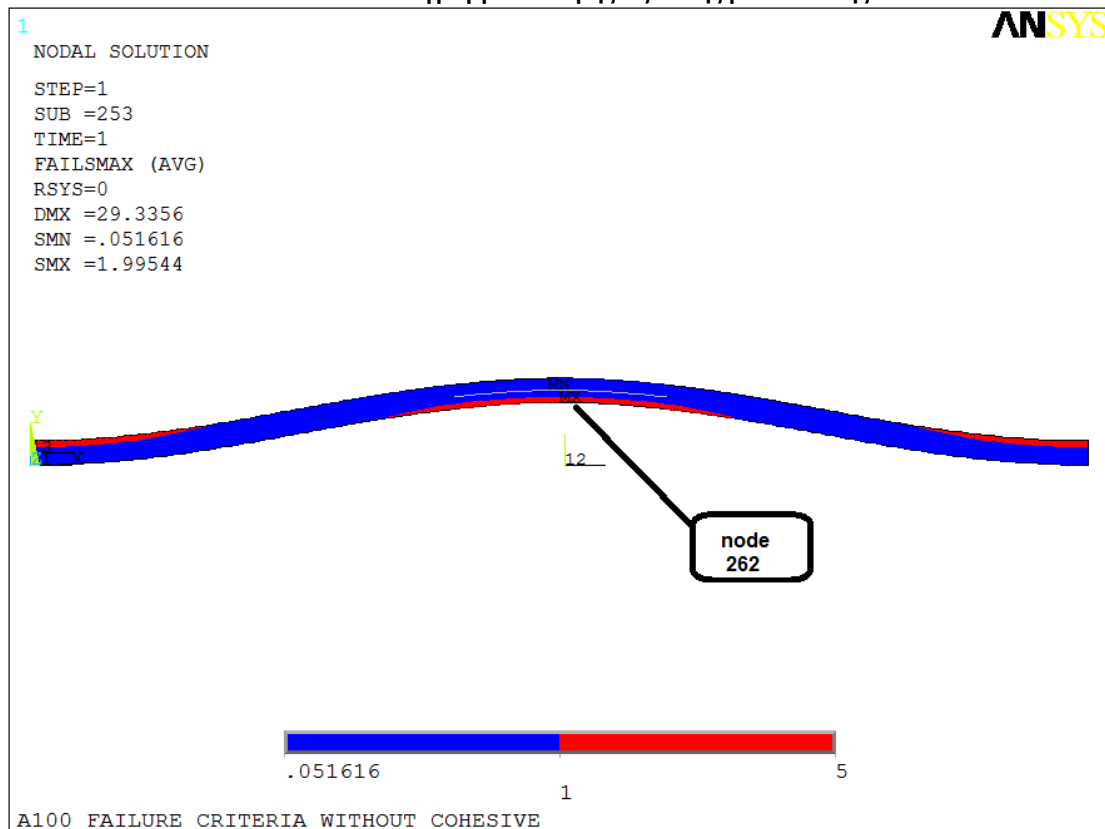
3.3.2 ΣΕΙΡΑ Α – 100

Αρχικά κατασκευάζουμε το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης με αξιοποίηση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται στο στάδιο της μεταεπεξεργασίας

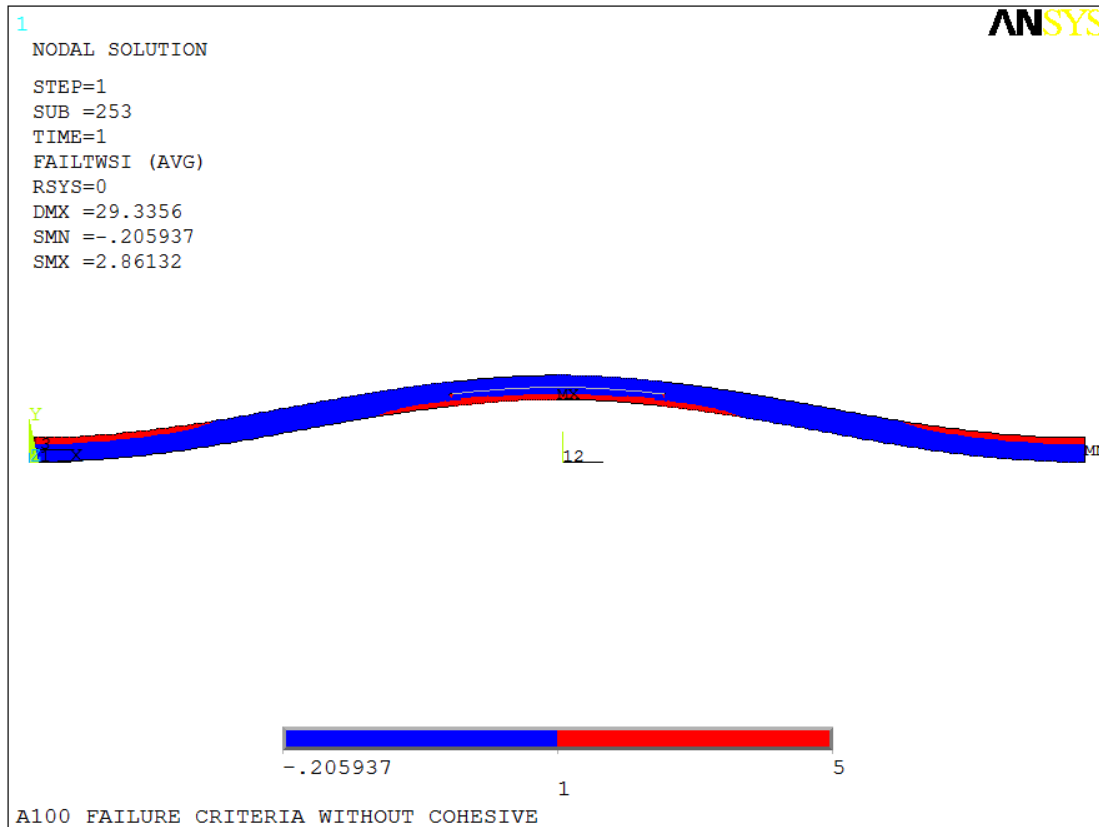
της ανάλυσης. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται το σημείο όπου αρχίζει η αστοχία με βάση το κάθε κριτήριο αστοχίας, καθώς και το σημείο που παρουσιάζεται η μέγιστη τάση.



Εικόνα 3.36. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.37. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Μέγιστης Τάσης.



Εικόνα 3.38. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Tsai – Wu. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα των παραπάνω εικόνων παρουσιάζονται σε πινακοποιημένη μορφή.

Πίνακας 3.8. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση κριτηρίων αστοχίας.

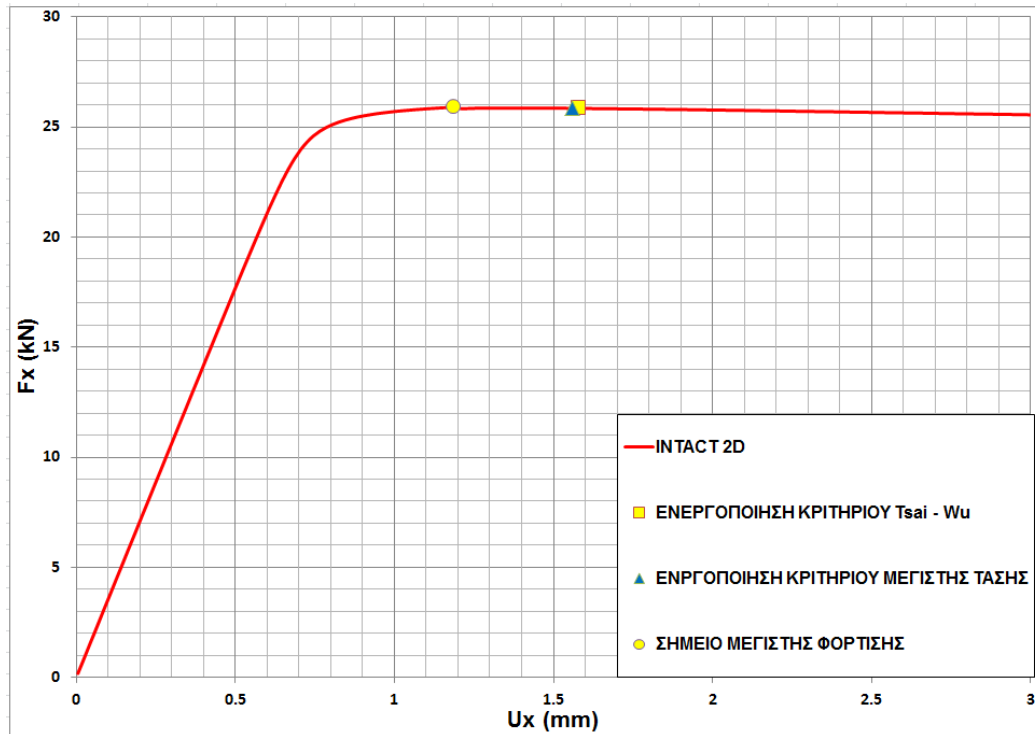
Είδος κριτηρίου	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Κόμβος που αστοχεί (node)	Μετατόπιση (U_x)
Tsai - Wu	29.314 KN	56.1 (MPa)	262	1.7 (mm)
Μέγιστης Τάσης	29.314 KN	56.1 (MPa)	262	1.7 (mm)

3.3.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

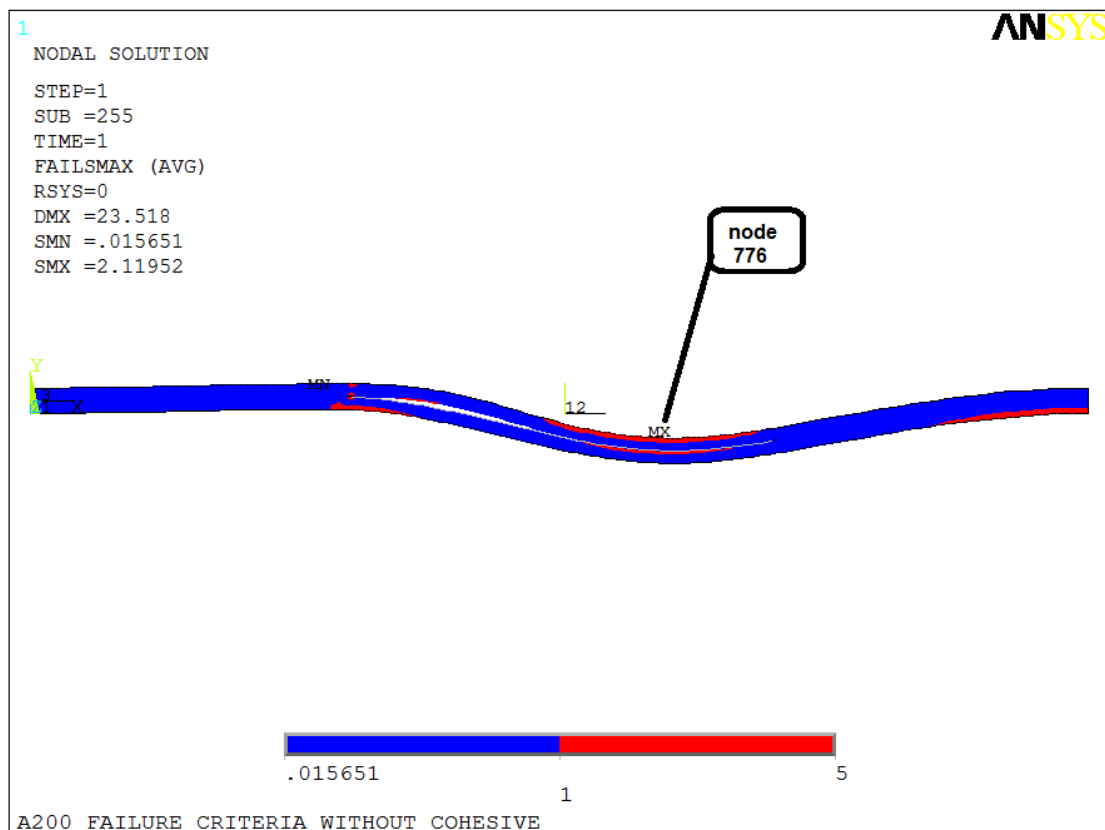
- Από το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε ότι και τα δύο κριτήρια ενεργοποιούνται ταυτόχρονα. Κάτι τέτοιο δεν αποτελεί το κανόνα απλώς συμβαίνει στη συγκεκριμένη περίπτωση.
- Για το εύρος της ανάλυσης που επιλέγουμε (εφαρμογή μέγιστης θλιπτικής μετατόπισης της τάξης των 5mm) παρατηρούμε ότι η δύναμη που παραλαμβάνει το μοντέλο συνεχίζει να αυξάνεται (φτάνει τα 29.532KN στο τέλος της ανάλυσης).
- Ωστόσο τα κριτήρια που υποδεικνύουν την έναρξη της αστοχίας έχουν "χτυπήσει" αρκετά νωρίτερα πράγμα που σημαίνει ότι στην πραγματικότητα η καμπύλη θα έπρεπε ήδη να έχει αρχίσει να πέφτει.

- Στην εικόνα 3.38 παρατηρούμε ότι η αστοχία ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια του κάτω υποπολύστρωτου και περί το μέσο της δοκού.

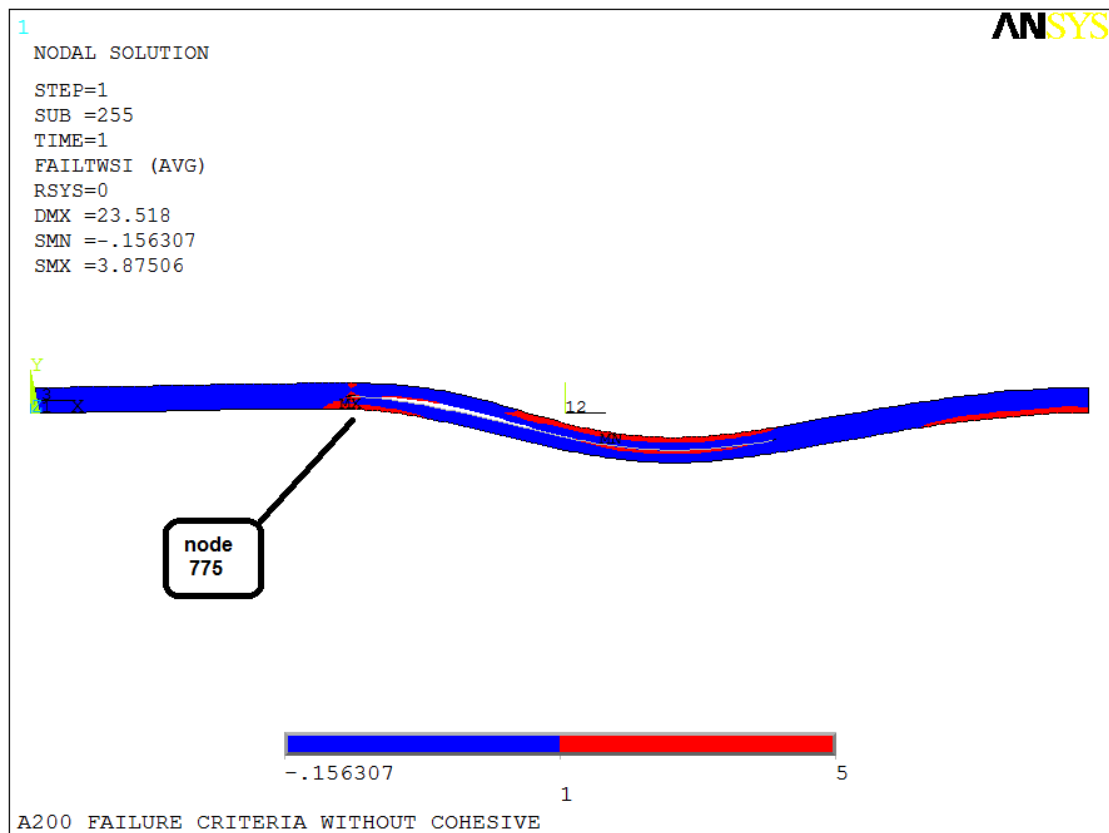
3.3.3 ΣΕΙΡΑ A – 200



Εικόνα 3.39. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.40. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Μέγιστης Τάσης.



Εικόνα 3.41. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Tsai – Wu.

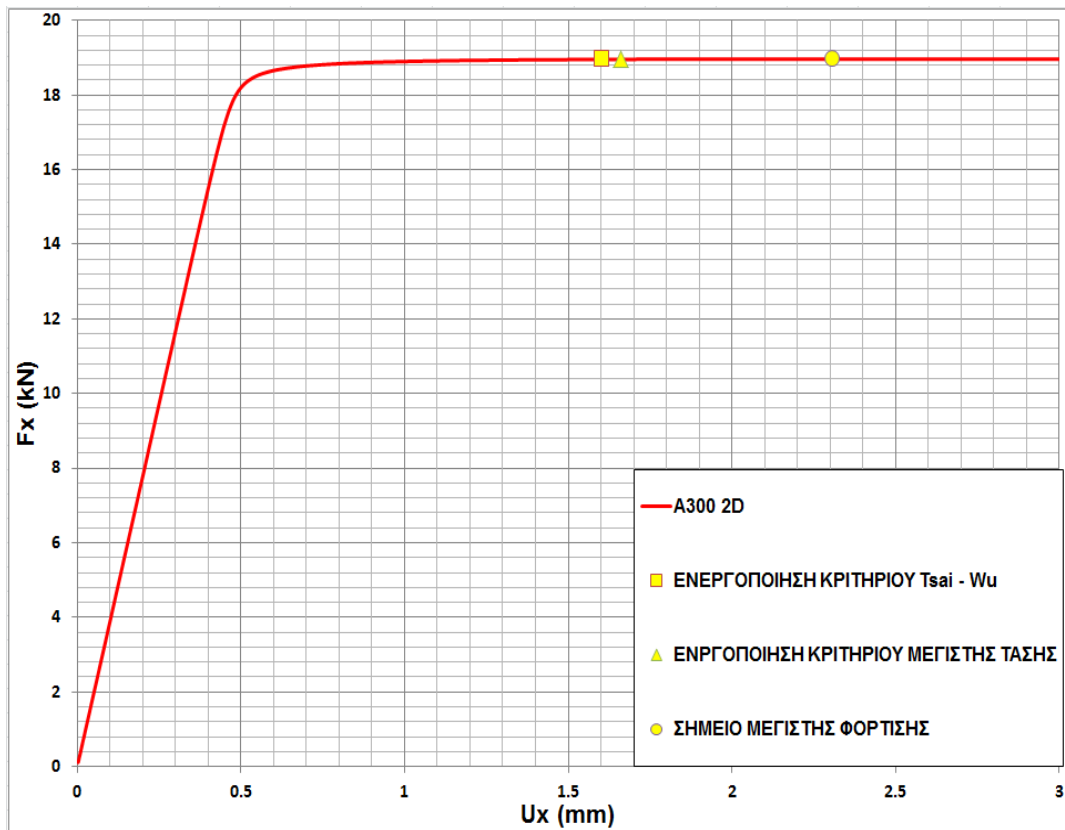
Πίνακας 3.9. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση κριτηρίων αστοχίας.

Είδος κριτηρίου	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Κόμβος που αστοχεί (node)	Μετατόπιση (U_x)
Tsai - Wu	25.845 KN	44.2 (MPa)	775	1.6 (mm)
Μέγιστης Τάσης	25.845 KN	44.2 (MPa)	776	1.6 (mm)

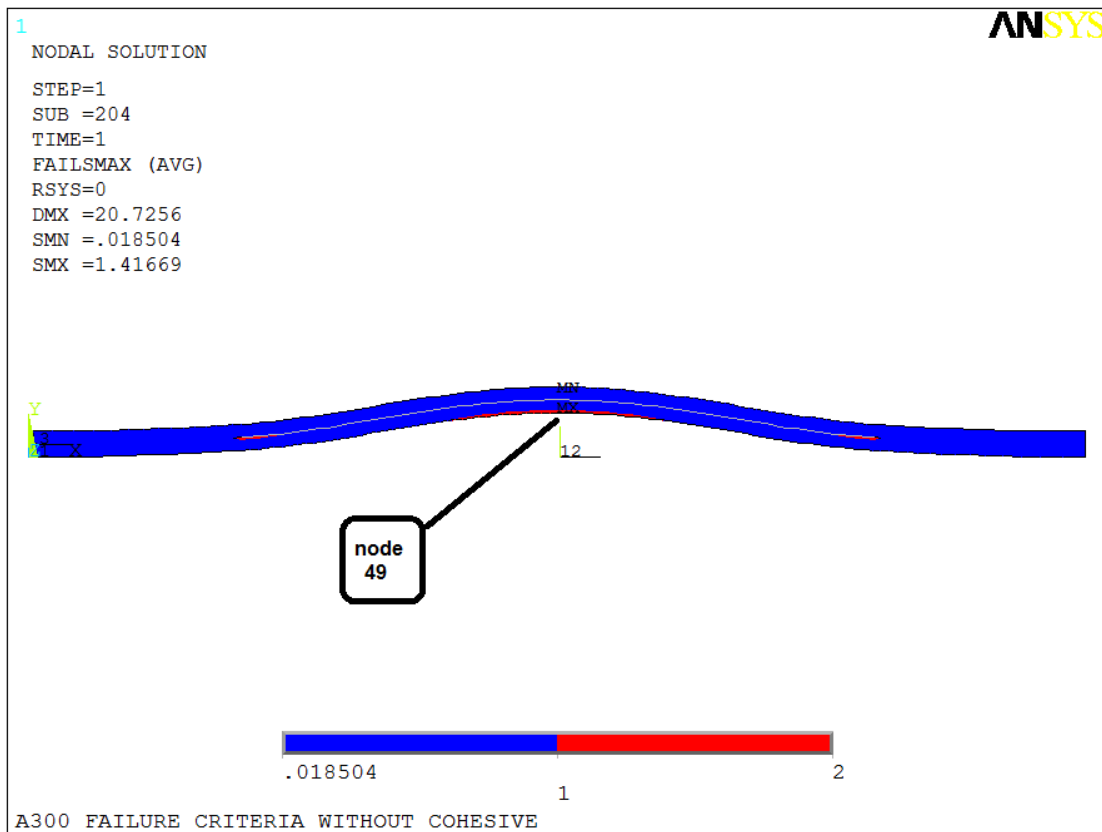
3.3.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε ότι τα δύο κριτήρια ενεργοποιούνται ταυτόχρονα.
- Παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο ($F_x=25.890KN$) εμφανίζεται πριν από την ενεργοποίηση των κριτηρίων.
- Στην εικόνα 3.40 παρατηρούμε ότι η αστοχία με βάση το κριτήριο μέγιστης τάσης ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια της άνω στρώσης, κοντά στο μέσο του μοντέλου ενώ αντίθετα για το κριτήριο Tsai – Wu από την εξωτερική επιφάνεια της κάτω στρώσης και ειδικότερα στο σημείο που γεινιάζουν ο τεχνητός αποχωρισμός και η άθικτη περιοχή.

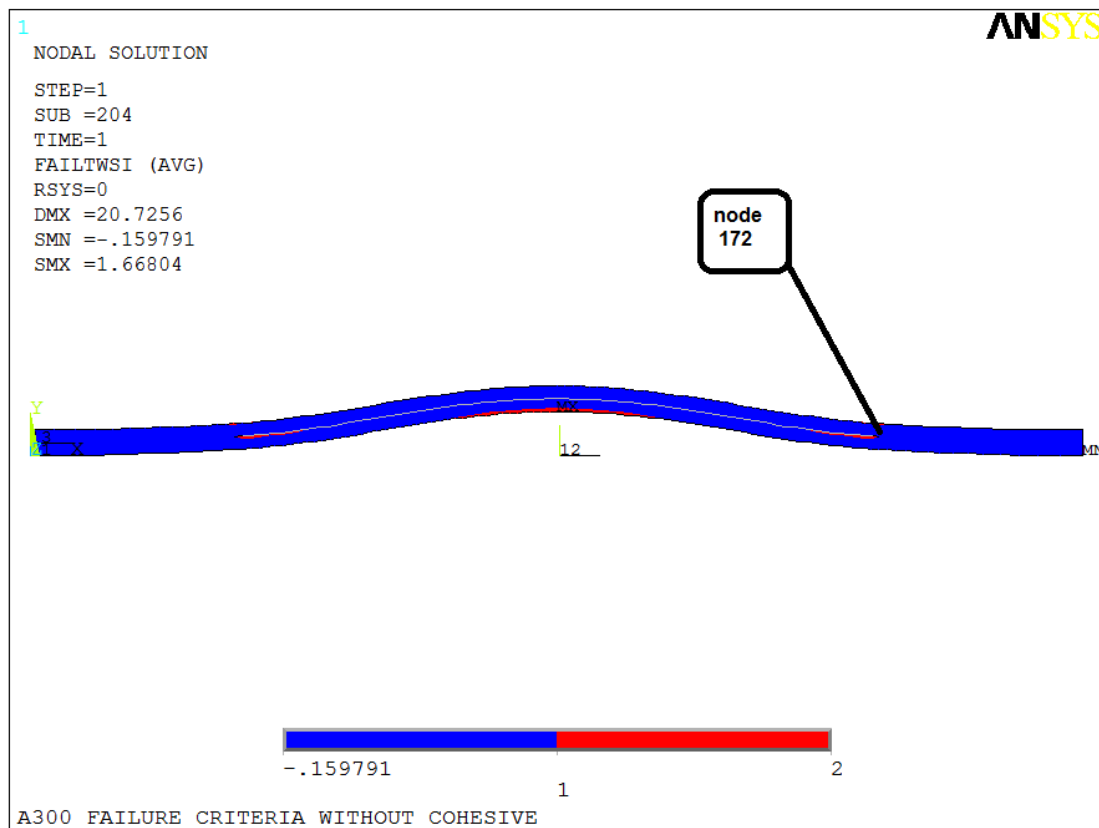
3.3.4 ΣΕΙΡΑ Α – 300



Εικόνα 3.42. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.43. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Μέγιστης Τάσης.



Εικόνα 3.44. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Tsai – Wu.

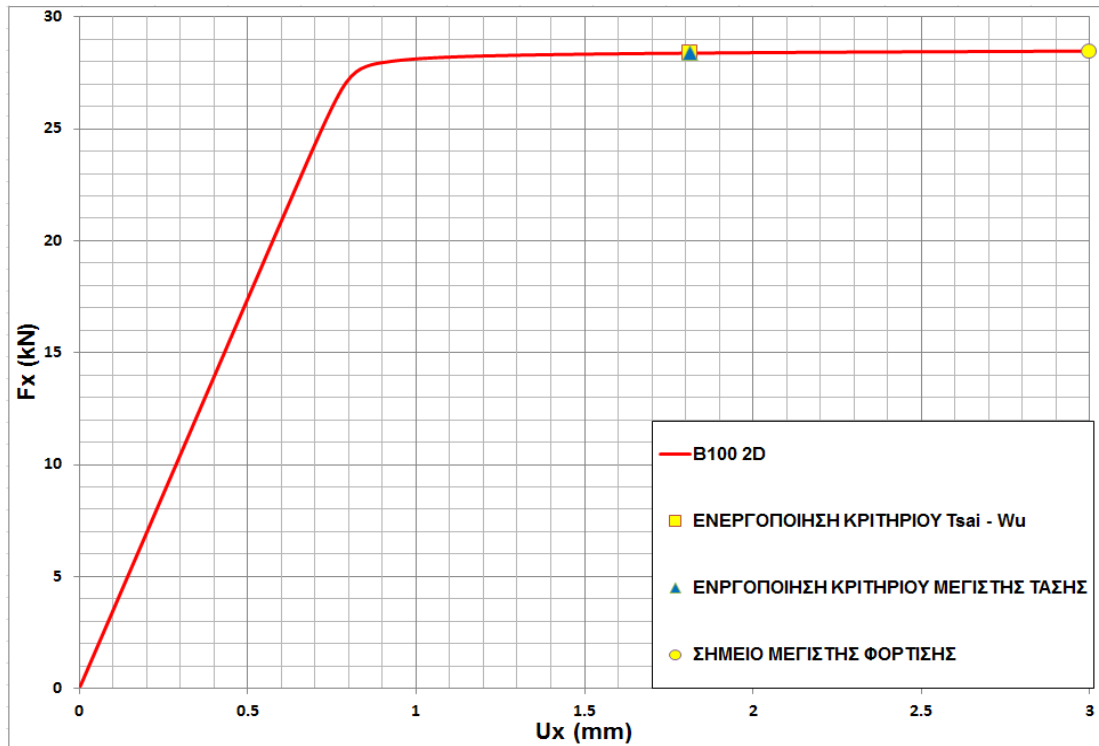
Πίνακας 3.10. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση κριτηρίων αστοχίας.

Είδος κριτηρίου	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Κόμβος που αστοχεί (node)	Μετατόπιση (U_x)
Tsai - Wu	18.955 KN	31.5 (MPa)	49	1.6 (mm)
Μέγιστης Τάσης	18.957 KN	31.5 (MPa)	172	1.7 (mm)

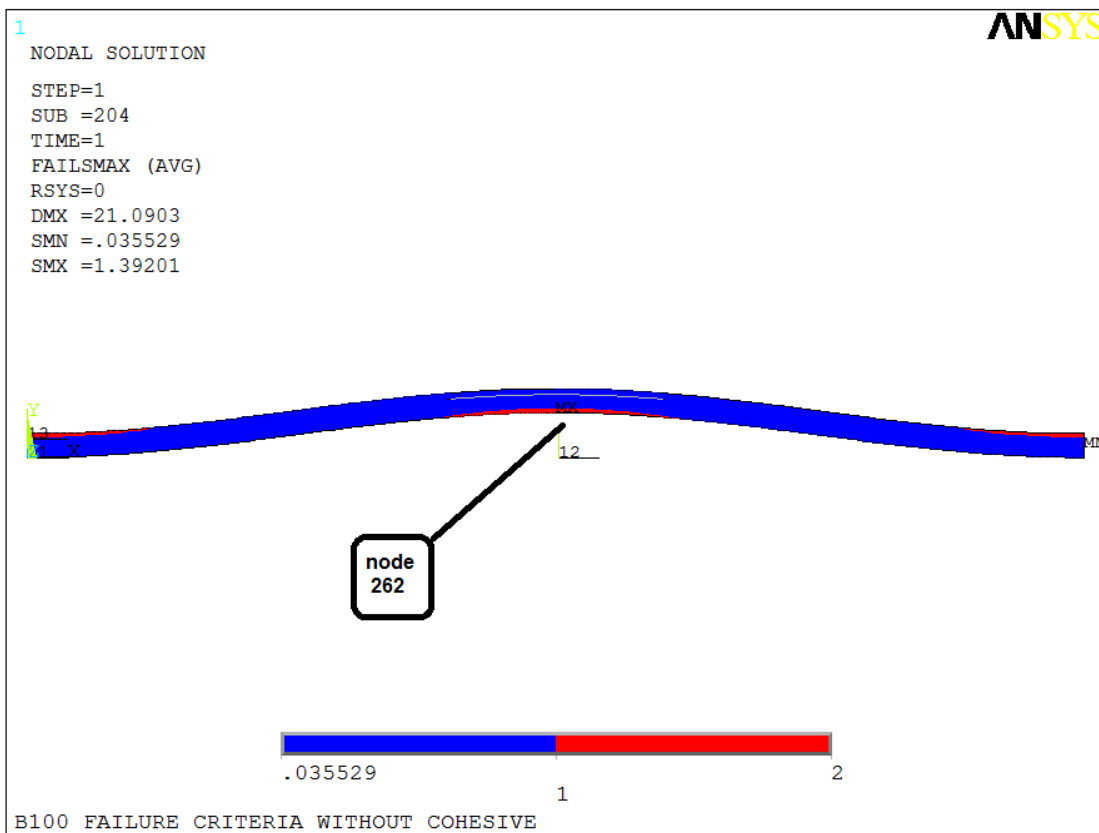
3.3.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε ότι πρώτα ενεργοποιείται το κριτήριο Tsai – Wu και ύστερα το Μέγιστης Τάσης.
- Παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο ($F_x=18.965\text{KN}$) εμφανίζεται αρκετά μετά την ενεργοποίηση των κριτηρίων Tsai – Wu και Μέγιστης Τάσης.
- Στην εικόνα 3.44 παρατηρούμε ότι η αστοχία ξεκινάει από το μέσο του πάχους της στρώσης και ειδικότερα στο σημείο που γειτνιάζουν ο τεχνητός αποχωρισμός και η άθικτη περιοχή με βάση το κριτήριο Tsai – Wu. Αντίθετα το κριτήριο Μέγιστης Τάσης θεωρεί ότι πρώτα αστοχεί η εξωτερική επιφάνεια της κάτω στρώσης στο μέσο του μήκους της.

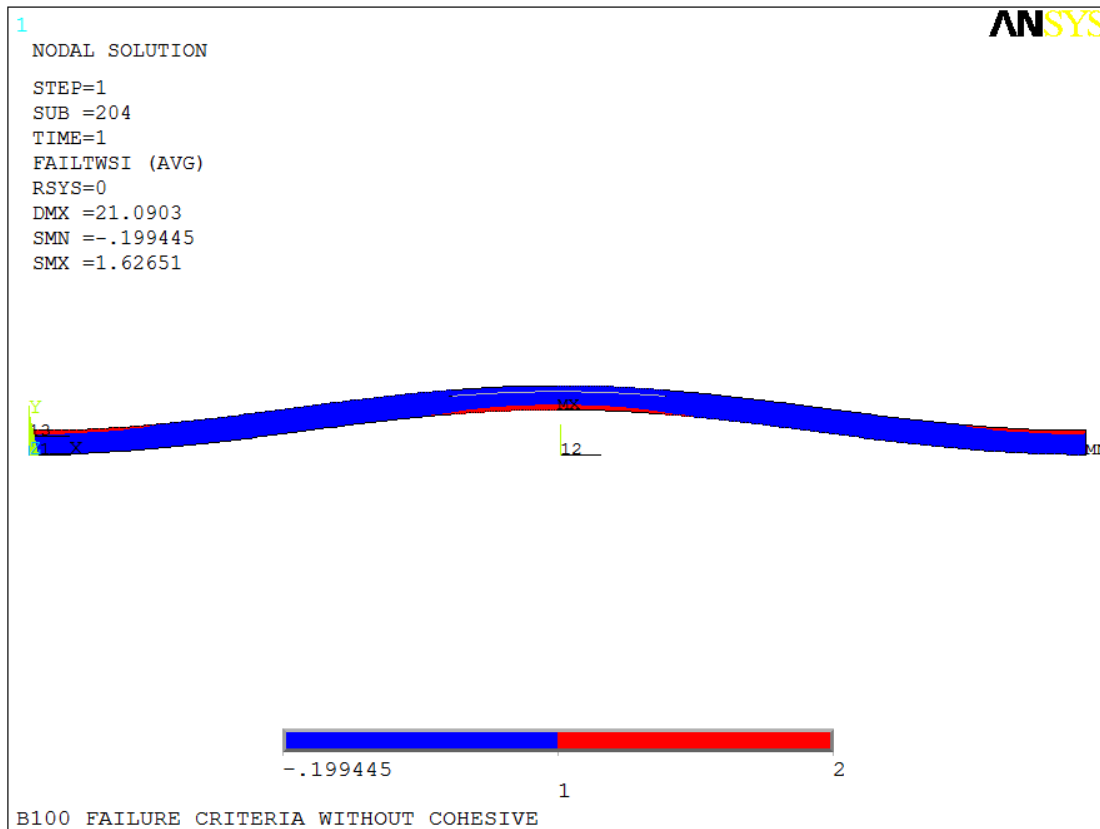
3.3.5 ΣΕΙΡΑ Β – 100



Εικόνα 3.45. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.46. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Μέγιστης Τάσης.



Εικόνα 3.47. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Tsai – Wu.

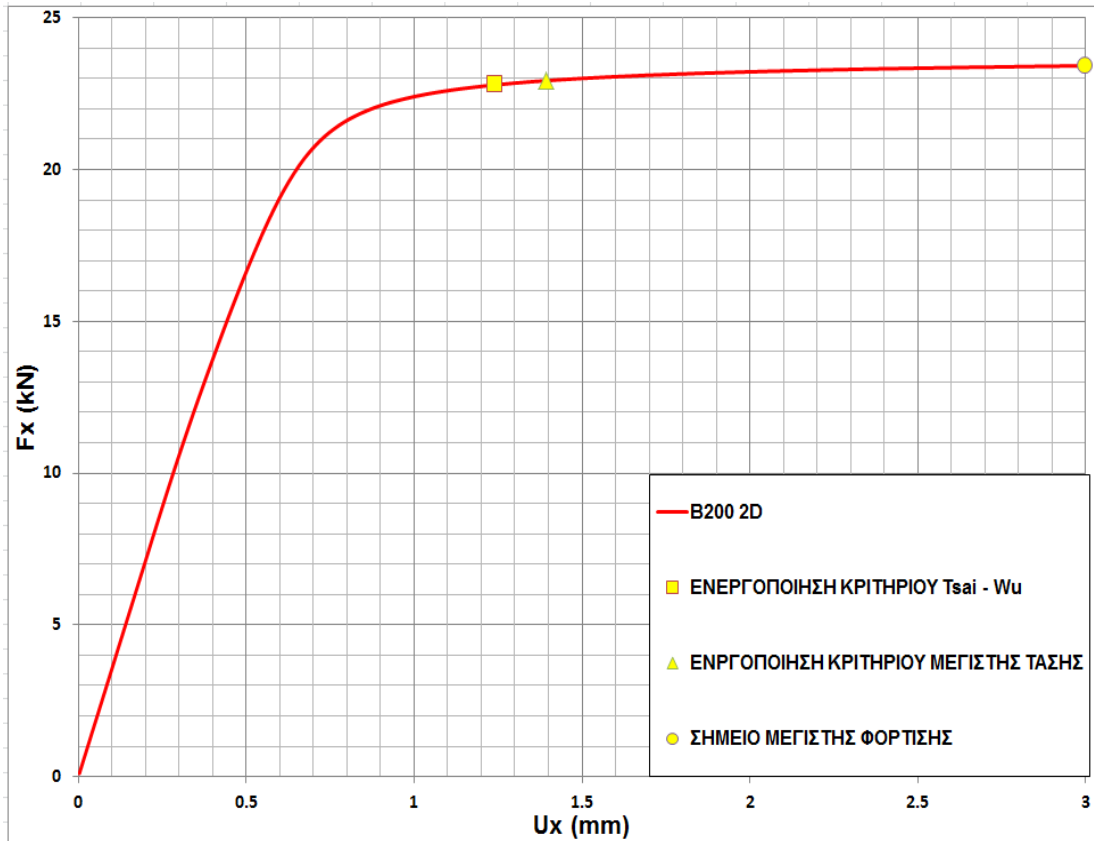
Πίνακας 3.11. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση κριτηρίων αστοχίας.

Είδος κριτηρίου	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Κόμβος που αστοχεί (node)	Μετατόπιση (U_x)
Tsai - Wu	28.314 KN	50.5 (MPa)	262	1.8 (mm)
Μέγιστης Τάσης	28.314 KN	50.5 (MPa)	262	1.8 (mm)

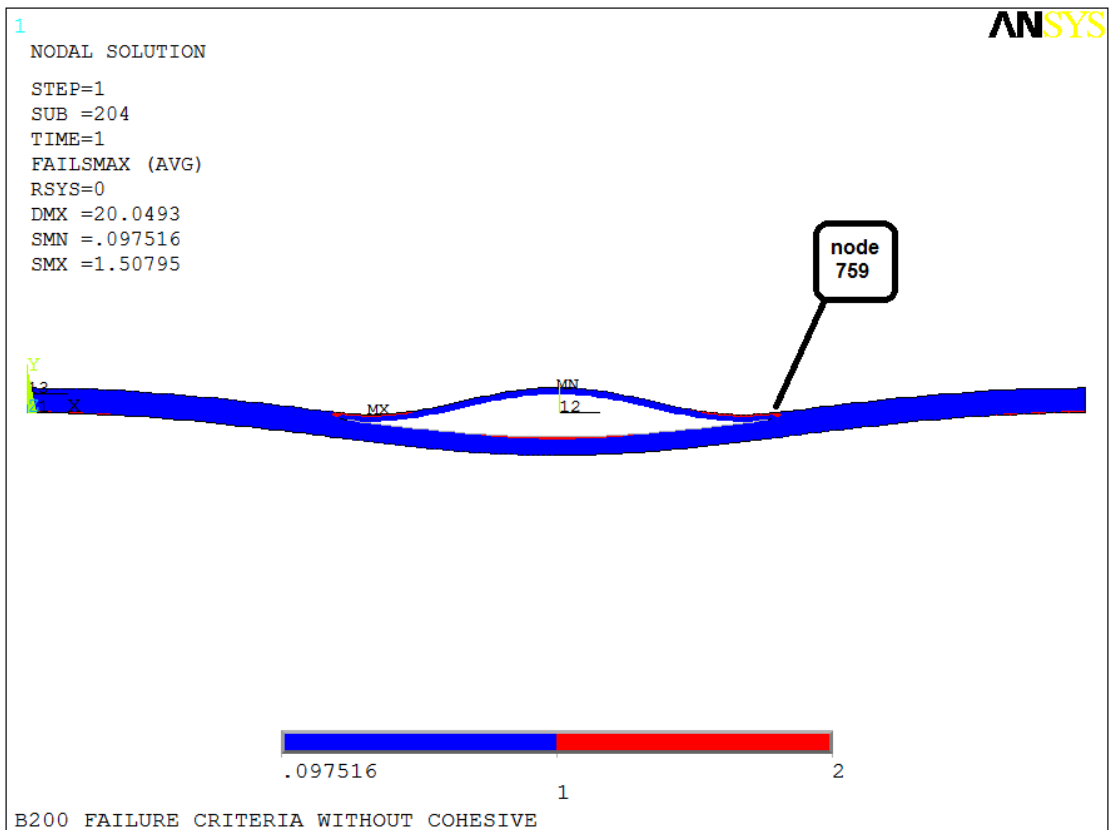
3.3.5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε ότι και τα δύο κριτήρια ενεργοποιούνται ταυτόχρονα.
- Για το εύρος της ανάλυσης που επιλέγουμε (εφαρμογή μέγιστης θλιπτικής μετατόπισης της τάξης των 3 mm) παρατηρούμε ότι η δύναμη που παραλαμβάνει το μοντέλο συνεχίζει να αυξάνεται έχοντας την τιμή των 28.471KN στο τέλος της.
- Στην εικόνα 3.46 παρατηρούμε ότι η αστοχία ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια του κάτω υποπολύστρωτου και περί το μέσο της δοκού.

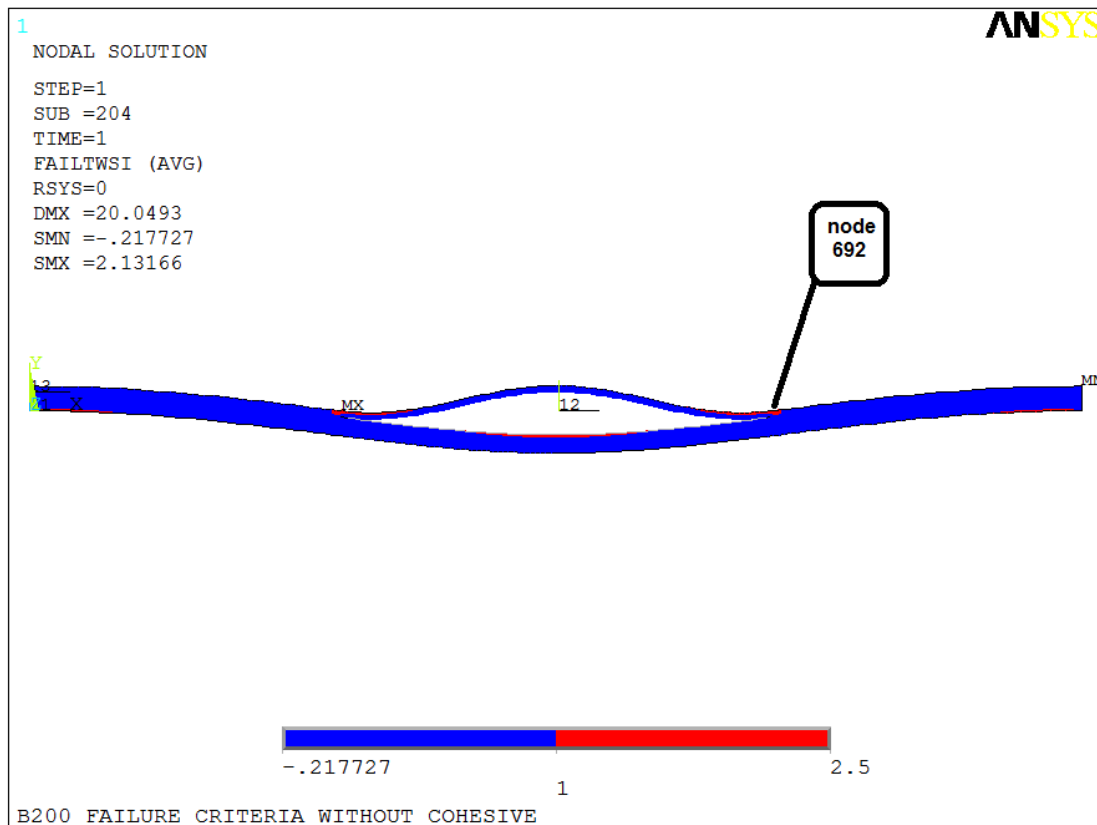
3.3.6 ΣΕΙΡΑ Β – 200



Εικόνα 3.48. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.49. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Μέγιστης Τάσης.



Εικόνα 3.50. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Tsai – Wu.

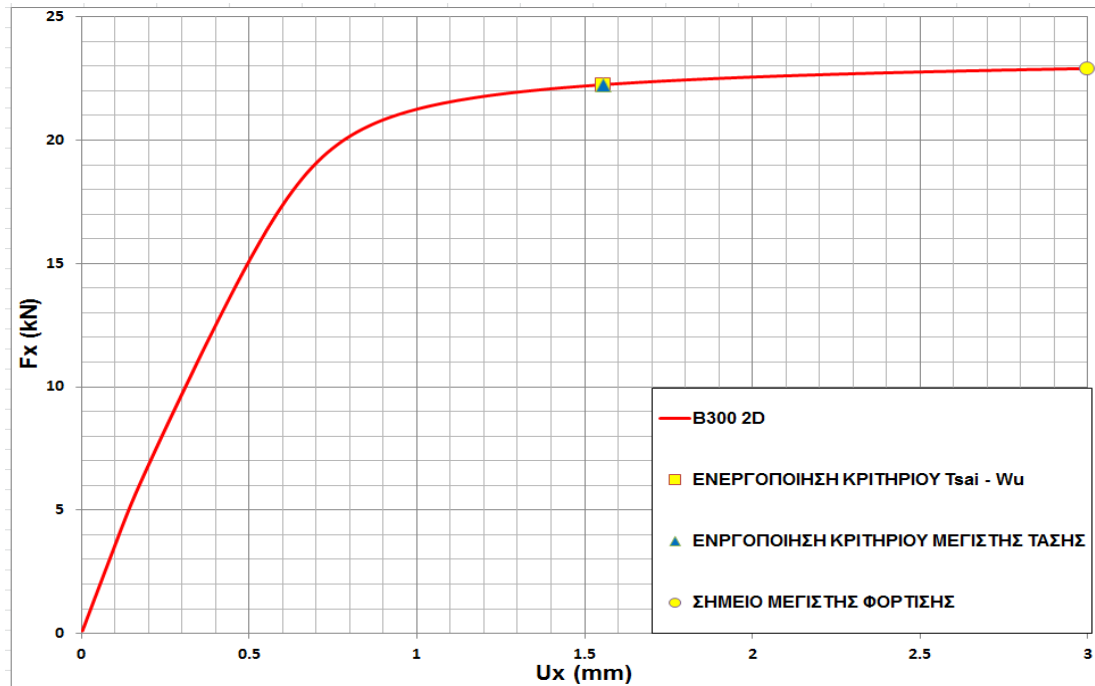
Πίνακας 3.12. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση κριτηρίων αστοχίας.

Είδος κριτηρίου	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Κόμβος που αστοχεί (node)	Μετατόπιση (U_x)
Tsai - Wu	22.795 KN	39.5 (MPa)	759	1.2 (mm)
Μέγιστης Τάσης	22.932 KN	39.8 (MPa)	692	1.4 (mm)

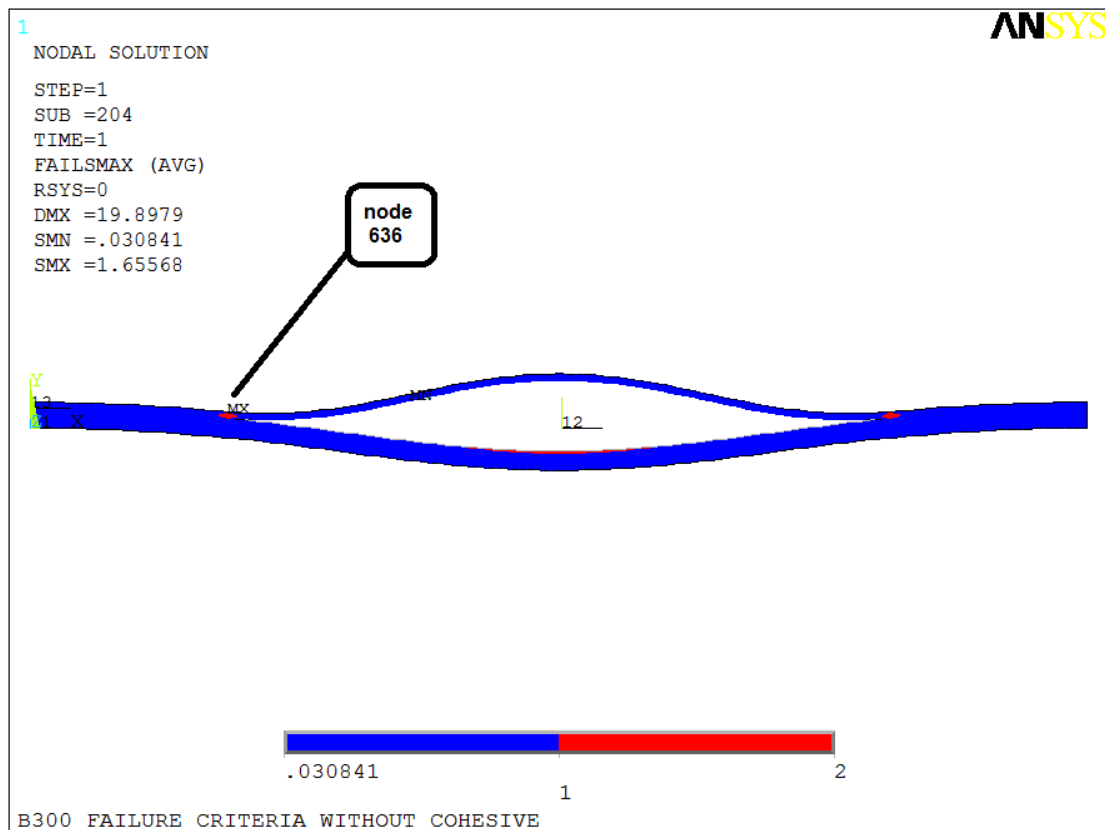
3.3.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε ότι πρώτα ενεργοποιείται το κριτήριο Tsai – Wu και ύστερα το Μέγιστης Τάσης.
- Για το εύρος της ανάλυσης που επιλέγουμε (εφαρμογή μέγιστης θλιπτικής μετατόπισης της τάξης των 3mm) παρατηρούμε ότι η δύναμη που παραλαμβάνει το μοντέλο συνεχίζει να αυξάνεται (στο τέλος της ανάλυσης $F_x=23.423$ KN). Ωστόσο τα κριτήρια που υποδεικνύουν την έναρξη της αστοχίας έχουν "χτυπήσει" αρκετά νωρίτερα πράγμα που σημαίνει ότι στην πραγματικότητα η καμπύλη θα έπρεπε ήδη να έχει αρχίσει να πέφτει.
- Στην εικόνα 3.50 παρατηρούμε ότι η αστοχία ξεκινάει από το μέσο του πάχους της στρώσης και ειδικότερα στο σημείο που γειτνιάζουν ο τεχνητός αποχωρισμός και η άθικτη περιοχή με βάση και τα δύο κριτήρια.

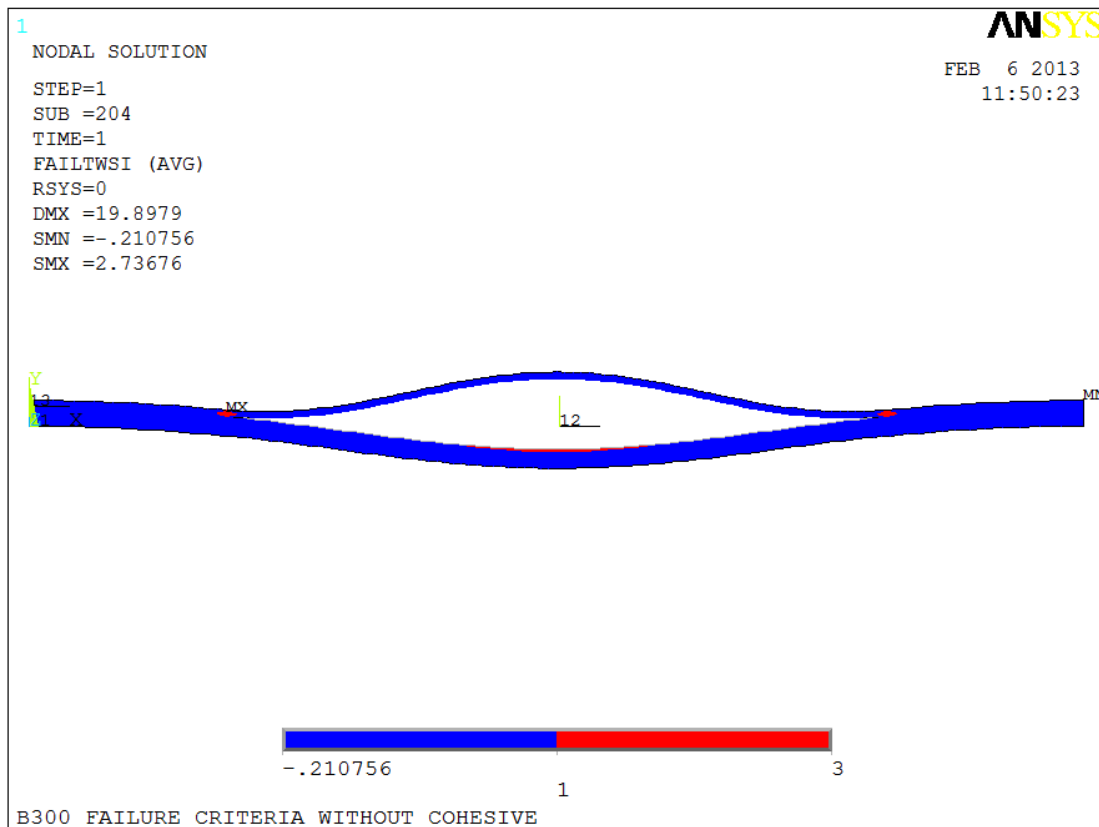
3.3.7 ΣΕΙΡΑ Β – 300



Εικόνα 3.51. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.52. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Μέγιστης Τάσης.



Εικόνα 3.53. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Tsai – Wu.

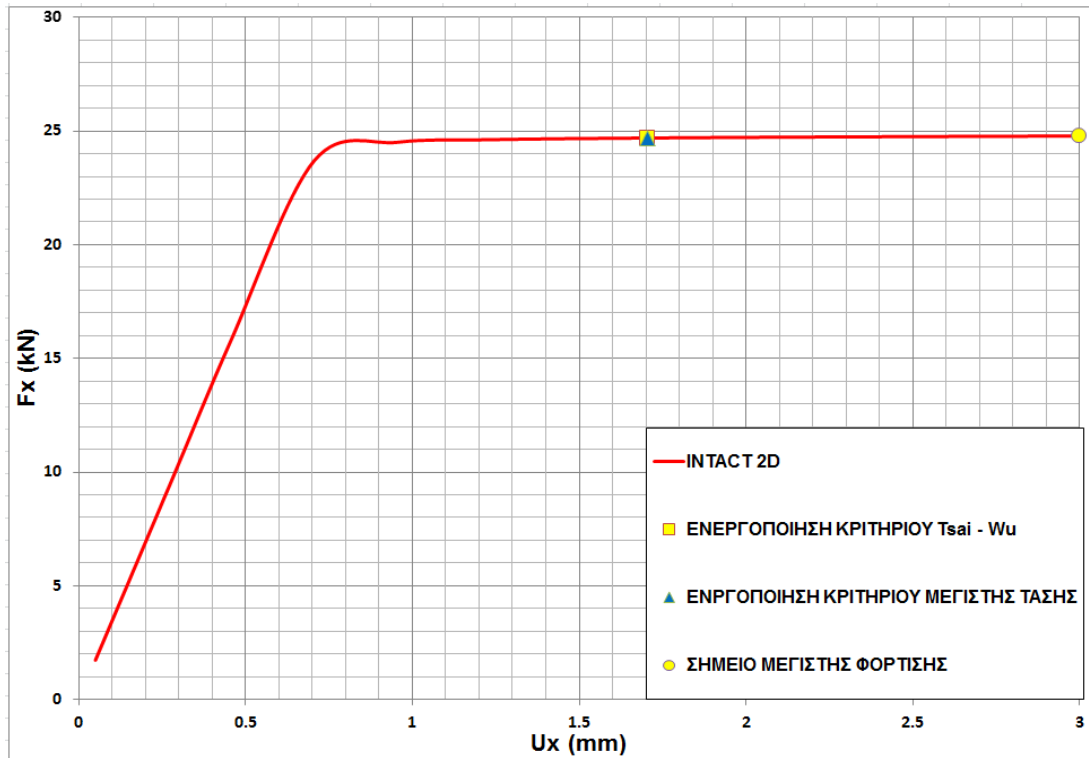
Πίνακας 3.13. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση κριτηρίων αστοχίας.

Είδος κριτηρίου	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Κόμβος που αστοχεί (node)	Μετατόπιση (U_x)
Tsai - Wu	22.256 KN	36.7 (MPa)	636	1.6 (mm)
Μέγιστης Τάσης	22.256 KN	36.7 (MPa)	636	1.6 (mm)

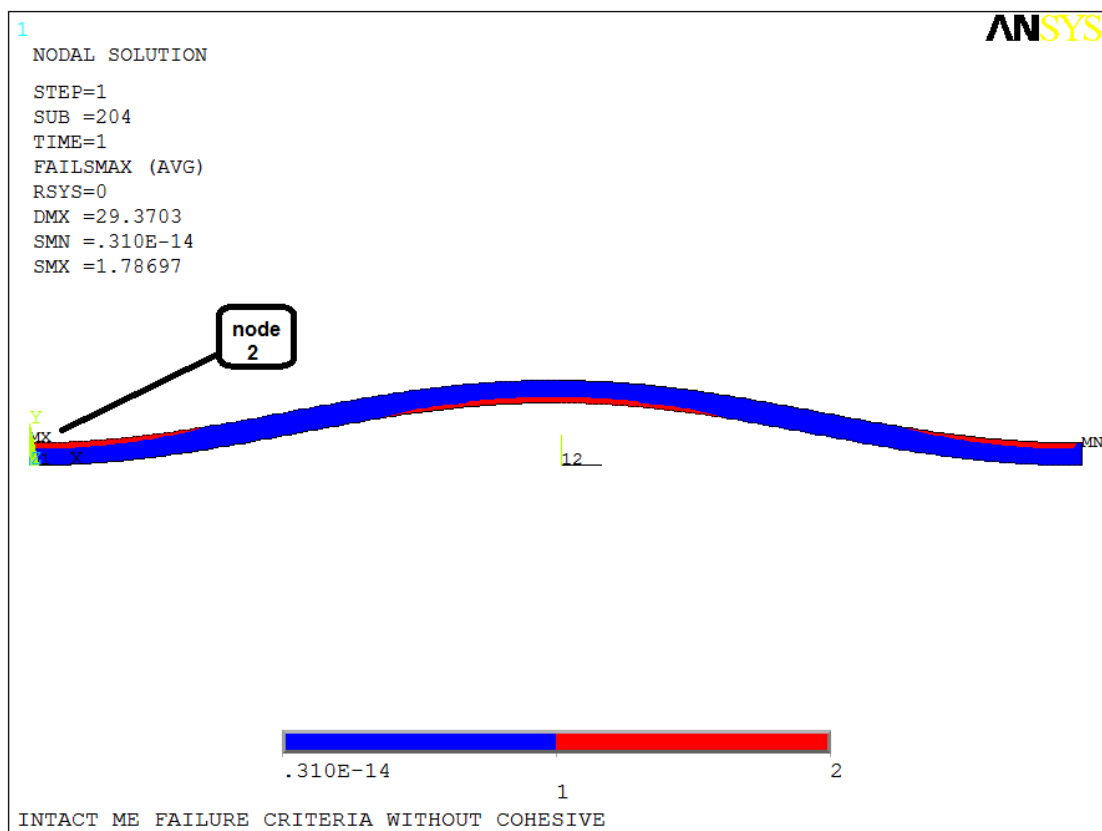
3.3.7.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε ότι και τα δύο κριτήρια ενεργοποιούνται ταυτόχρονα.
- Για το εύρος της ανάλυσης που επιλέγουμε (εφαρμογή μέγιστης θλιπτικής μετατόπισης της τάξης των 3 mm) παρατηρούμε ότι η δύναμη που παραλαμβάνει το μοντέλο συνεχίζει να αυξάνεται (φτάνει στα 22.909 KN στο τέλος της συγκεκριμένης ανάλυσης).
- Στην εικόνα 3.53 παρατηρούμε ότι η αστοχία ξεκινάει από το μέσο του πάχους της στρώσης και ειδικότερα στο σημείο που γειτνιάζουν ο τεχνητός αποχωρισμός και η άθικτη περιοχή με βάση και τα δύο κριτήρια.

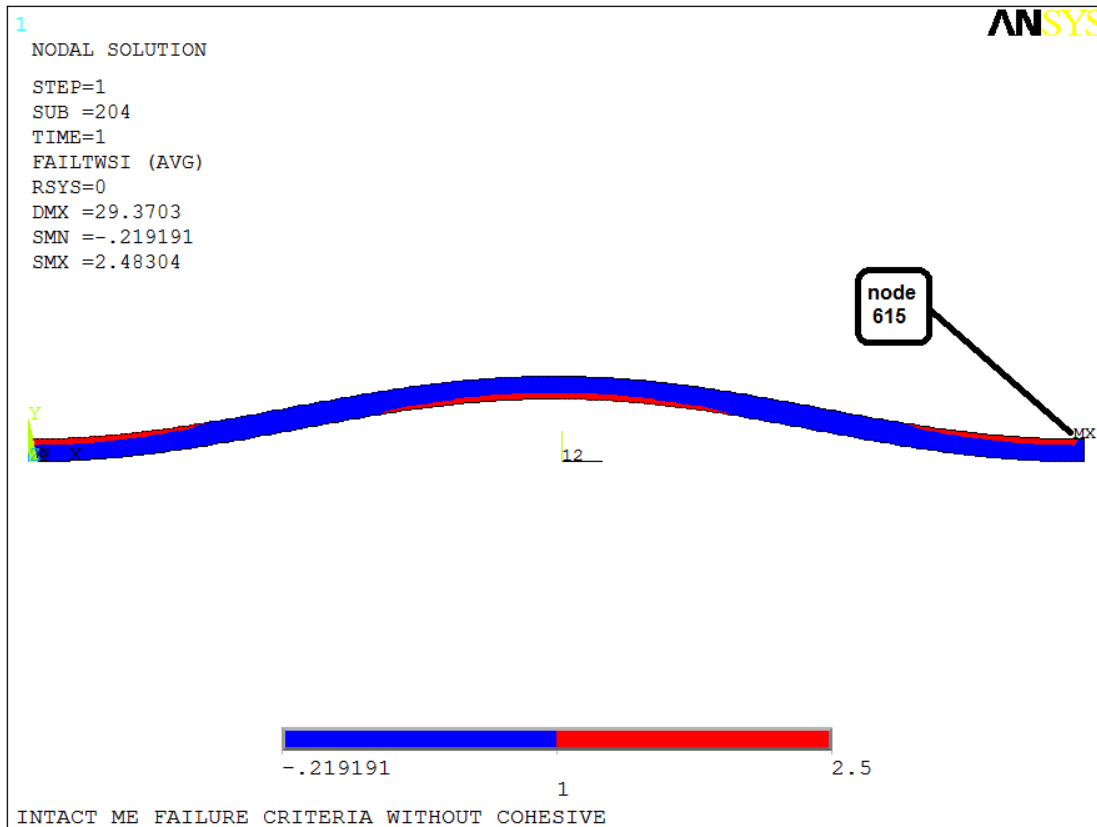
3.3.8 ΣΕΙΡΑ INTACT



Εικόνα 3.54. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.55. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Μέγιστης Τάσης.



Εικόνα 3.56. Ποιοτική απεικόνιση των περιοχών αστοχίας με βάση το κριτήριο Tsai – Wu.

Στη συνέχεια τα αποτελέσματα των παραπάνω εικόνων παρουσιάζονται σε πινακοποιημένη μορφή.

Πίνακας 3.14. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση κριτηρίων αστοχίας.

Είδος κριτηρίου	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Κόμβος που αστοχεί (node)	Μετατόπιση (U_x)
Tsai - Wu	24.694 KN	47.2 (MPa)	615	1.7 (mm)
Μέγιστης Τάσης	24.710 KN	47.3 (MPa)	2	1.7 (mm)

3.3.8.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης παρατηρούμε ότι και τα δύο κριτήρια ενεργοποιούνται σχεδόν ταυτόχρονα , με το κριτήριο Tsai – Wu να προηγείται λίγο.
- Για το εύρος της ανάλυσης που επιλέγουμε (εφαρμογή μέγιστης θλιπτικής μετατόπισης της τάξης των 3 mm) παρατηρούμε ότι η δύναμη που παραλαμβάνει το μοντέλο συνεχίζει να αυξάνεται.
- Στην εικόνα 3.56 παρατηρούμε ότι η αστοχία ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια του άνω υποπολύστρωτου και για τα δύο κριτήρια. Ωστόσο για το μεν Tsai – Wu εμφανίζεται στο άκρο εφαρμογής της φόρτισης ενώ για το δε Μέγιστης Τάσης στο άκρο στήριξης της δοκού.

3.3.9 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

- Παρατηρούμε ότι τα μοντέλα , με την εξαίρεση των A 200 και A300, συνεχίζουν να παραλαμβάνουν όλο και μεγαλύτερες φορτίσεις για το εύρος των αναλύσεων που έχουμε επιλέξει παρόλο που από τα κριτήρια αστοχίας φαίνεται ότι οι στρώσεις έχουν ήδη αστοχήσει. Το συγκεκριμένο πρόβλημα συμπεριφοράς ανακύπτει από το γεγονός ότι με τους συγκεκριμένους κώδικες αναγνωρίζεται μεν η αστοχία αλλά δεν γίνεται αναπροσαρμογή της συμπεριφοράς των στρώσεων έτσι ώστε να αποδώσουν την συνεπαγόμενη υποβάθμιση. Λύση θα δώσει η ανάλυση σταδιακής αστοχίας (progressive damage analysis) που θα ακολουθήσει σε παρακάτω στάδιο καθώς και η εισαγωγή cohesive elements στη περιοχή της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων.

- Γενικά βλέπουμε ότι το κριτήριο αστοχίας Tsai – Wu ενεργοποιείται πρώτο εκτός από κάποιες περιπτώσεις που συμπίπτει με το Μέγιστης Τάσης. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο καθώς το Tsai – Wu είναι πιο συντηρητικό όπως προκύπτει και από τη βιβλιογραφία (Jones,1975).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε πινακοποιημένη μορφή τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την ανάλυση όλων των σειρών μοντέλων .

Πίνακας 3.15. Συγκεντρωτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση κριτηρίων αστοχίας.

Σειρά Μοντέλου	Κριτήρια Αστοχίας					
	Μέγιστης Τάσης			Tsai – Wu		
	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Μετατόπιση (U_x)	Φορτίο πρώτης αστοχίας (Ενεργοποίησης κριτηρίου)	Τάση πρώτης αστοχίας (σ_{fail})	Μετατόπιση (U_x)
A 100	29.314 kN	56.1MPa	1.7 mm	29.314 kN	56.1MPa	1.7 mm
A 200	25.845 kN	44.2MPa	1.6 mm	25.845 kN	44.2MPa	1.6 mm
A 300	18.957 kN	31.5MPa	1.7 mm	18.955 kN	31.5MPa	1.6 mm
B 100	28.314 kN	50.5MPa	1.8 mm	28.314 kN	50.5MPa	1.8 mm
B 200	22.932 kN	39.8MPa	1.4 mm	22.795 kN	39.5MPa	1.2 mm
B 300	22.256 kN	36.7MPa	1.6 mm	22.256 kN	36.7MPa	1.6 mm
INTACT	24.710 kN	47.3MPa	1.7 mm	24.694 kN	47.MPa	1.7 mm

Με βάση τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι καθώς το μήκος του τεχνητού αποχωρισμού μεγαλώνει , το φορτίο πρώτης αστοχίας λαμβάνει όλο και μικρότερες

τιμές. Επίσης βλέπουμε ότι γενικά (με εξαίρεση τα μοντέλα A 300 και B 300) η μετατόπιση του αποχωρισμού προς το εξωτερικό των στρώσεων οδηγεί στη μείωση του φορτίου πρώτης αστοχίας .

3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ COHESIVE ELEMENTS ΣΤΑ 2D ΜΟΝΤΕΛΑ

3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο στάδιο αυτό γίνεται μελέτη των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση cohesive elements στην περιοχή που συνδέονται οι δύο επιμέρους στρώσεις που συνιστούν τη δοκό. Θα γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα των μοντέλων που δεν φέρουν cohesive έτσι ώστε να φανεί η επίδραση τους στην αντοχή αλλά και στο φαινόμενο του αποχωρισμού των στρώσεων. Επίσης θα μελετηθεί ποιοτικά αλλά και ποσοτικά το φαινόμενο του αποχωρισμού. Κατά τη ποιοτική ανάλυση θα γίνει χρήση των εργαλείων που παρέχονται από το υπολογιστικό πακέτο. Το ANSYS παρέχει τη δυνατότητα χαρακτηρισμού της περιοχής μεταξύ των στρώσεων ανάλογα με το προκύπτον "άνοιγμα". Οι διαθέσιμη χαρακτηρισμοί είναι 4 και έχουν ως εξής :

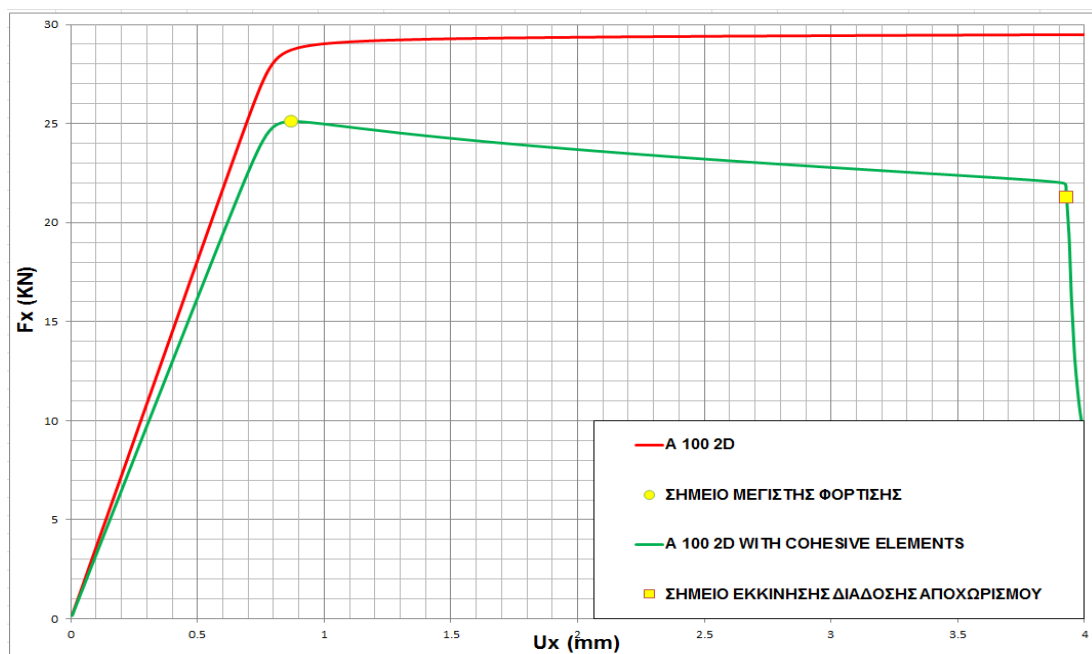
Πίνακας 3.16. Τρόποι χαρακτηρισμού της περιοχής μεταξύ των στρώσεων κατά ANSYS.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΥ
Sticking	Οι στρώσεις είναι ενωμένες και δεν υπάρχει κάποια μετακίνηση
Sliding	Οι στρώσεις αρχίζουν να ολισθαίνουν τοπικά ή μία προς την άλλη
Near Contact	Σε περιοχές τις σύνδεσης έχουν παρουσιαστεί μικρά ανοίγματα
Far Open	Τα ανοίγματα έχουν λάβει μεγαλύτερες διαστάσεις-εμφανής αποχωρισμός

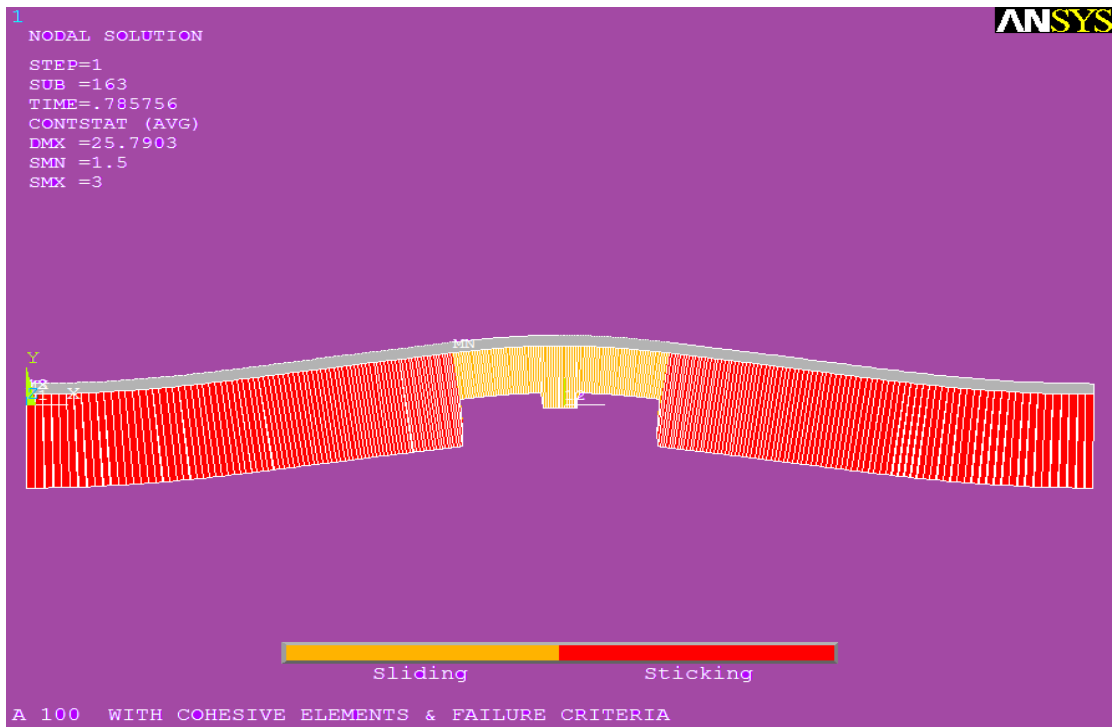
Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση των διαγραμμάτων δύναμης-αξονικής μετατόπισης για κάθε σειρά μοντέλου , έτσι ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ των

καμπυλών όπου λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των cohesive elements και αυτών που την αγνοούν (τα αρχικά δισδιάστατα μοντέλα που αναλύθηκαν προηγουμένως). Επίσης παρουσιάζεται σχηματικά η διάδοση του αποχωρισμού κατά μήκος της διεπιφάνειας των στρώσεων με χρήση των επιλογών του πίνακα 3.16 που μας παρέχει το πρόγραμμα.

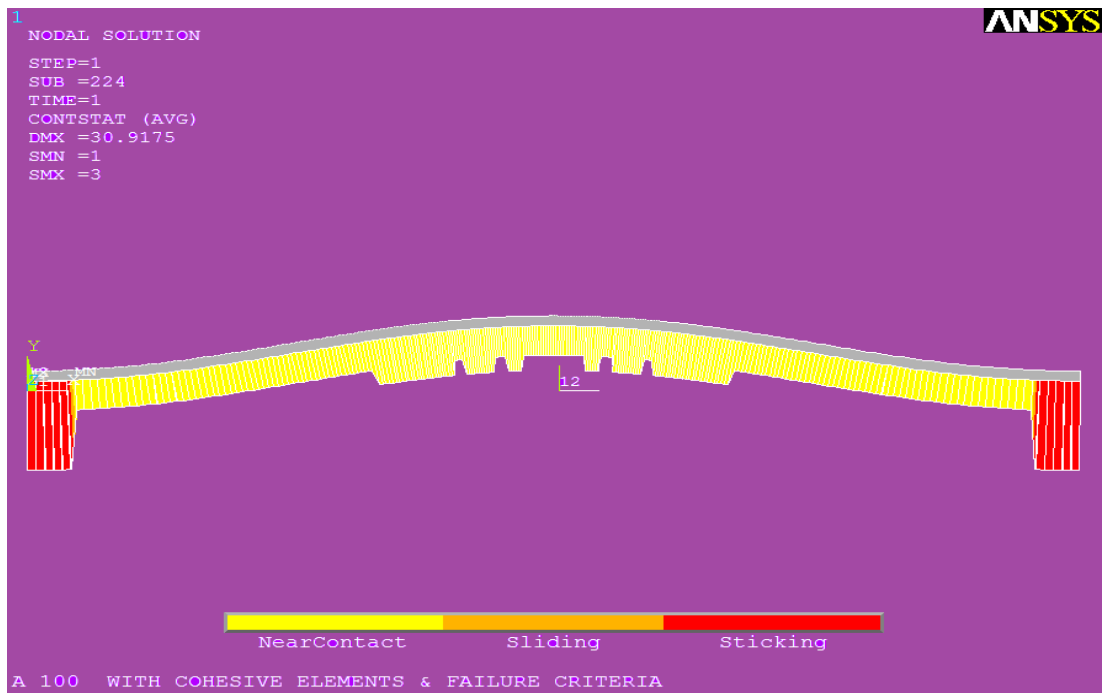
3.4.2 ΣΕΙΡΑ Α – 100



Εικόνα 3.57. Επίδραση των cohesive elements στην καμπύλη δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.58. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά την εκκίνηση επέκτασης του αποχωρισμού.



Εικόνα 3.59. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά το τέλος της ανάλυσης.

Πίνακας 3.17. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση cohesive.

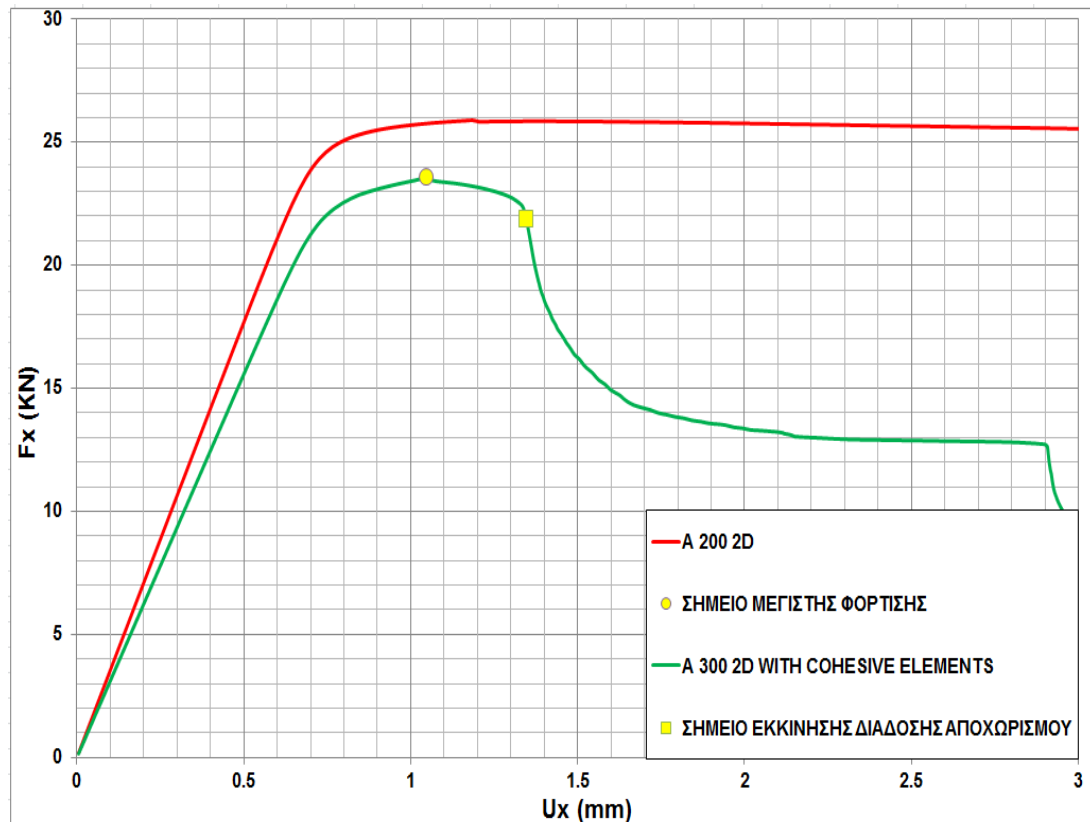
ΜΕΓΕΘΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (Fmax)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ	ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ
--------	-----------------------	-------------------------------	--	---

		(U_{Fmax})	(F_{del})	ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ (U_{Fdel})
ΤΙΜΕΣ	25.105 KN	0.9 mm	21.281 KN	3.9 mm

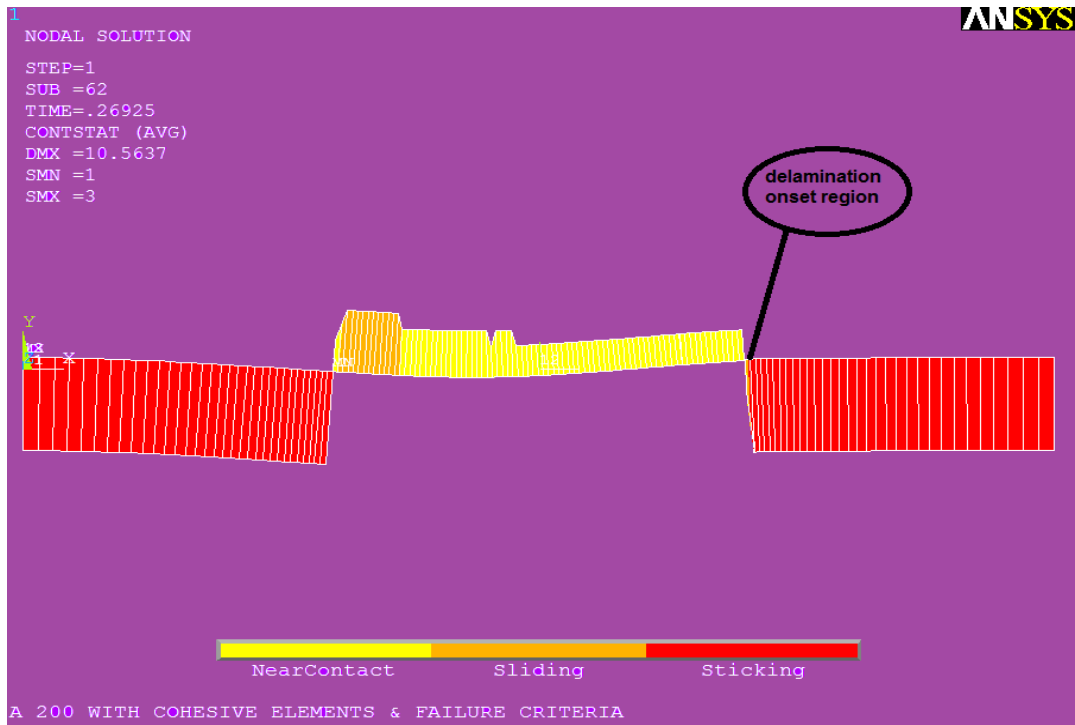
3.4.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης αξονικής μετατόπισης (Εικόνα 3.58) παρατηρούμε ότι με χρήση cohesive η καμπύλη φτάνει μέχρι μία μέγιστη φόρτιση και στη συνέχεια αρχίζει να αποφορτίζεται ομαλά μέχρι τη στιγμή που ενεργοποιείται η επέκταση του αρχικού τεχνητού αποχωρισμού των στρώσεων, οπότε έχουμε και απότομη πτώση του φορτίου.
- Η μέγιστη φόρτιση που παρουσιάζουν τα δοκίμια που φέρουν cohesive elements είναι 15% μικρότερη αυτής των αρχικών απλών 2D μοντέλων.

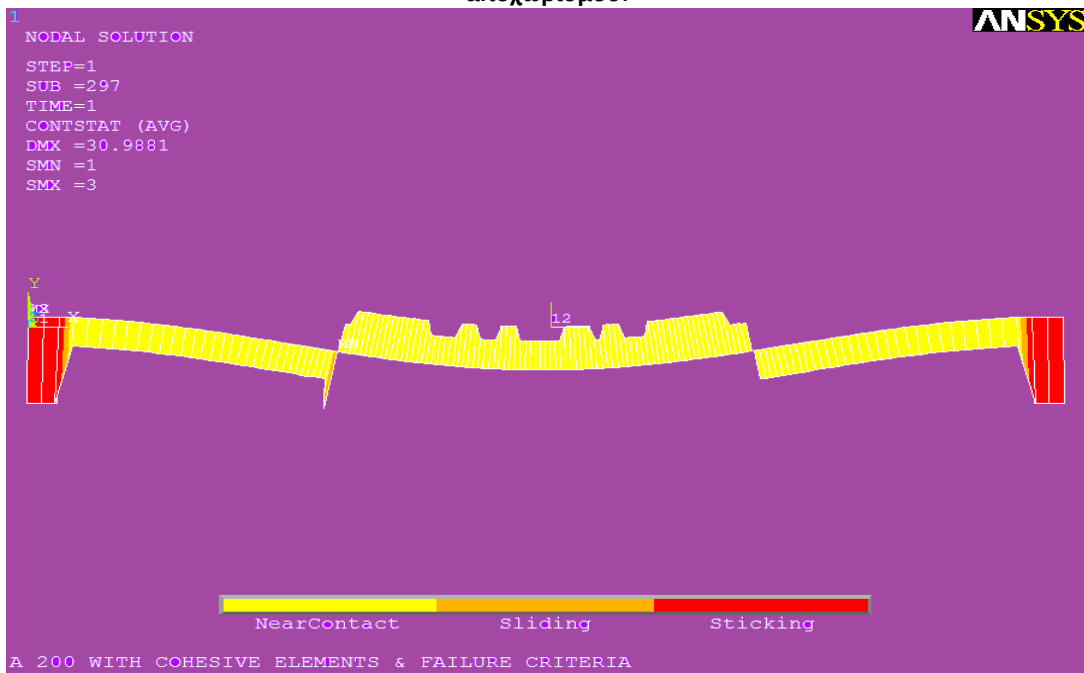
3.4.3 ΣΕΙΡΑ Α – 200



Εικόνα 3.60. Επίδραση των cohesive elements στη καμπύλη δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.61. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά την εκκίνηση επέκτασης του αποχωρισμού.



Εικόνα 3.62. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά το τέλος της ανάλυσης.

Πίνακας 3.18. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση cohesive.

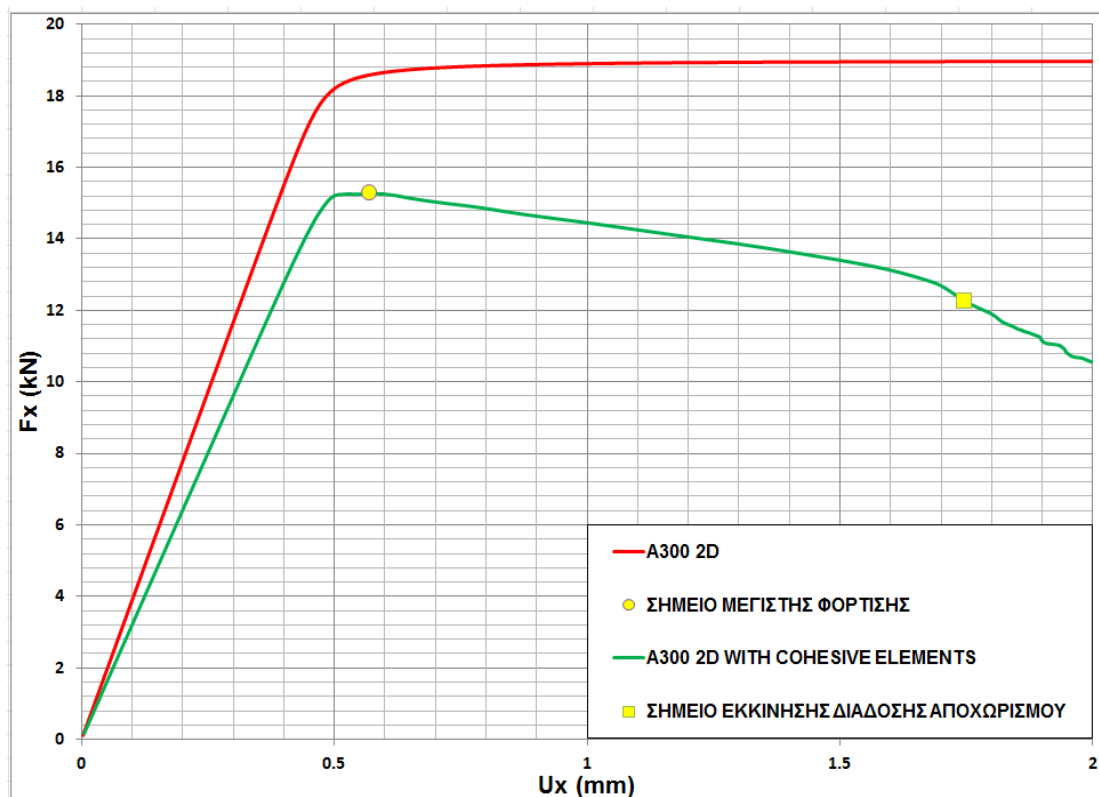
ΜΕΓΕΘΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (Fmax)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (U _{Fmax})	ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ (Fdel)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ
--------	-----------------------	--	---	---

				(U_{Fdel})
ΤΙΜΕΣ	23.591 KN	1.0 mm	21.862 KN	1.4 mm

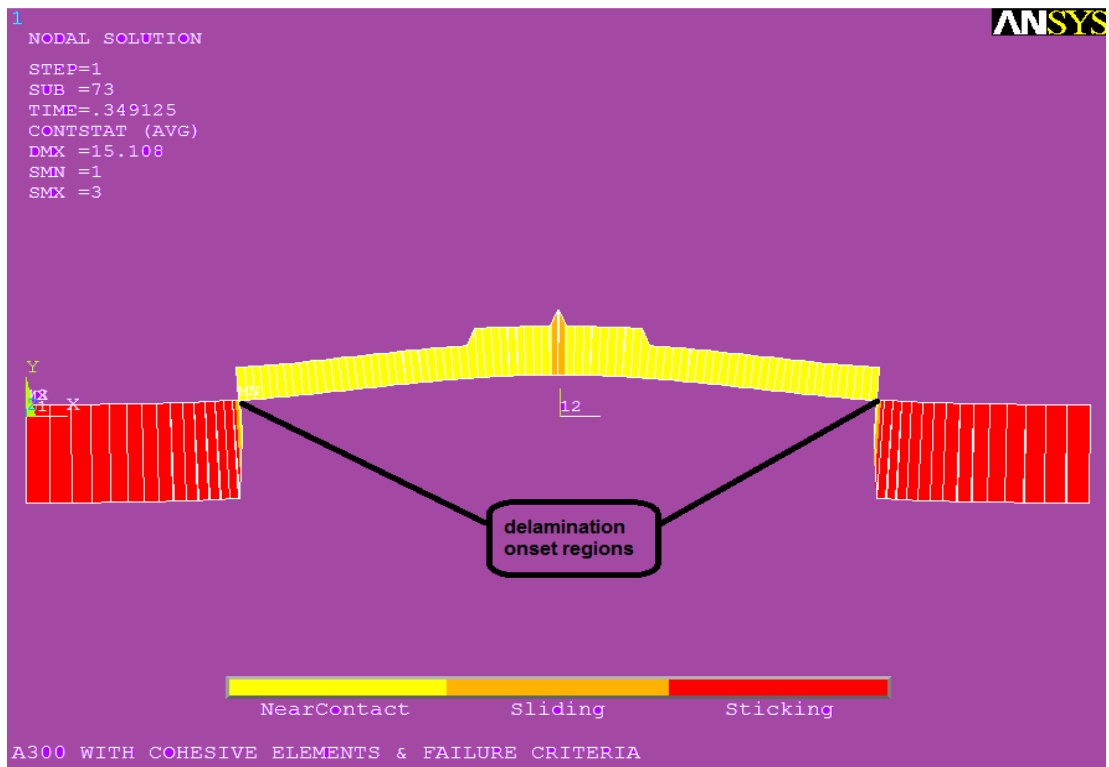
3.4.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης αξονικής μετατόπισης (Εικόνα 3.61) παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση με χρήση cohesive η καμπύλη φτάνει μέχρι μία μέγιστη φόρτιση και στη συνέχεια αρχίζει να αποφορτίζεται ομαλά μέχρι τη στιγμή που ενεργοποιείται ο αποχωρισμός των στρώσεων οπότε έχουμε κάπως πιο απότομη πτώση. Στη συνέχεια η καμπύλη σταθεροποιείται πράγμα που σημαίνει ότι η διάδοση του αποχωρισμού έχει ακινητοποιηθεί κατά κάποιο τρόπο. Η διάδοση εκκινά πάλι για $U_x \approx 2.9$ mm.
- Η μέγιστη φόρτιση που παρουσιάζουν τα δοκίμια που φέρουν cohesive elements είναι 8.5% μικρότερη αυτής των αρχικών απλών 2D μοντέλων.

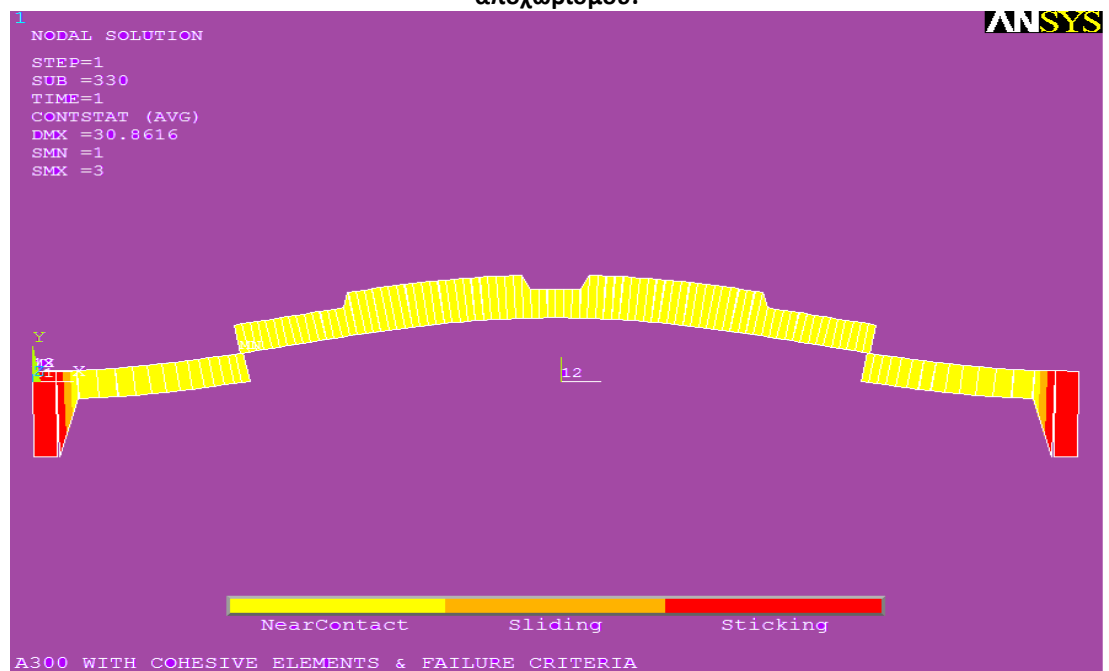
3.4.4 ΣΕΙΡΑ Α – 300



Εικόνα 3.63. Επίδραση των cohesive elements στη καμπύλη δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.64. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά την εκκίνηση επέκτασης του αποχωρισμού.



Εικόνα 3.65. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά το τέλος της ανάλυσης.

Πίνακας 3.19. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση cohesive.

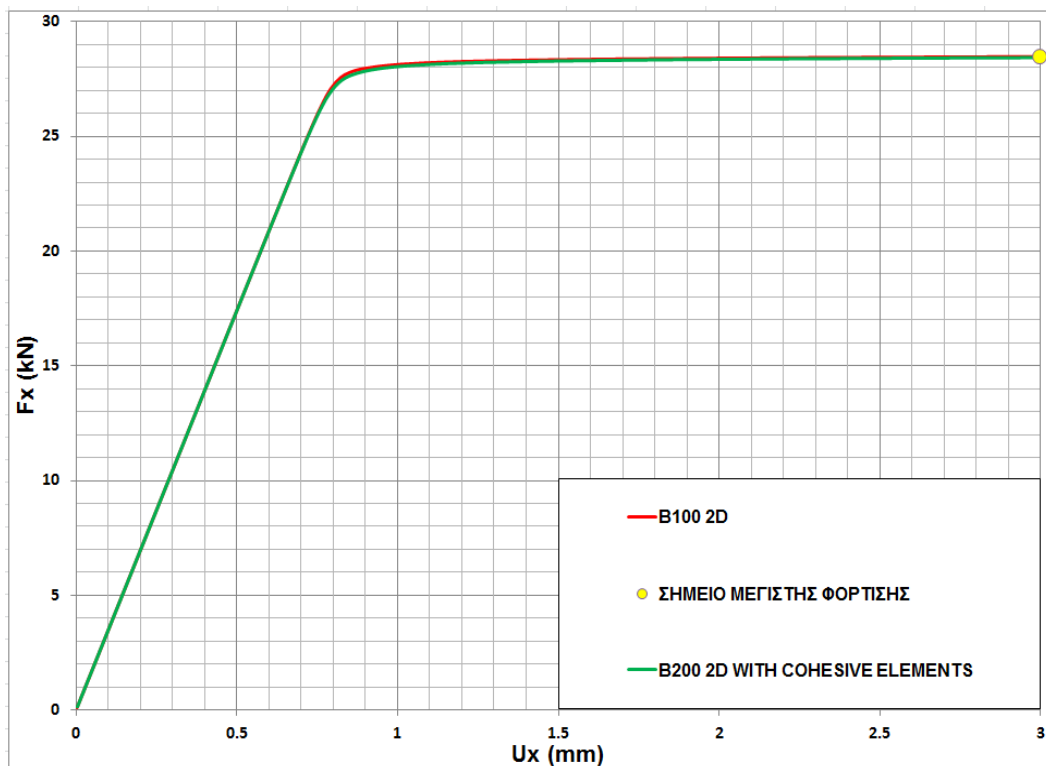
ΜΕΓΕΘΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (Fmax)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (U _{Fmax})	ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ (Fdel)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ
--------	-----------------------	--	---	---

				(U_{Fdel})
ΤΙΜΕΣ	15.268 kN	0.6 mm	12.266 kN	1.7 mm

3.4.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης αξονικής μετατόπισης (Εικόνα 3.64) παρατηρούμε ότι και για τις σειρές A 100 και A 200 , ότι με χρήση cohesive η καμπύλη φτάνει μέχρι μία μέγιστη φόρτιση και στη συνέχεια αρχίζει να αποφορτίζεται ομαλά μέχρι τη στιγμή που ο αρχικός τεχνητός αποχωρισμός των στρώσεων αρχίζει να επεκτείνεται ($U_x \approx 1.75$ mm) , οπότε έχουμε το σχηματισμό κατσαρωμάτων στη καμπύλη καθώς αποφορτίζεται. Τα κατσαρώματα αναπαριστούν τη σταδιακή διάδοση του αποχωρισμού που γίνεται στοιχείο στοιχείο.
- Η μέγιστη φόρτιση που παρουσιάζουν τα δοκίμια που φέρουν cohesive elements είναι 19.5% μικρότερη αυτής των αρχικών απλών 2D μοντέλων.

3.4.5 ΣΕΙΡΑ Β – 100

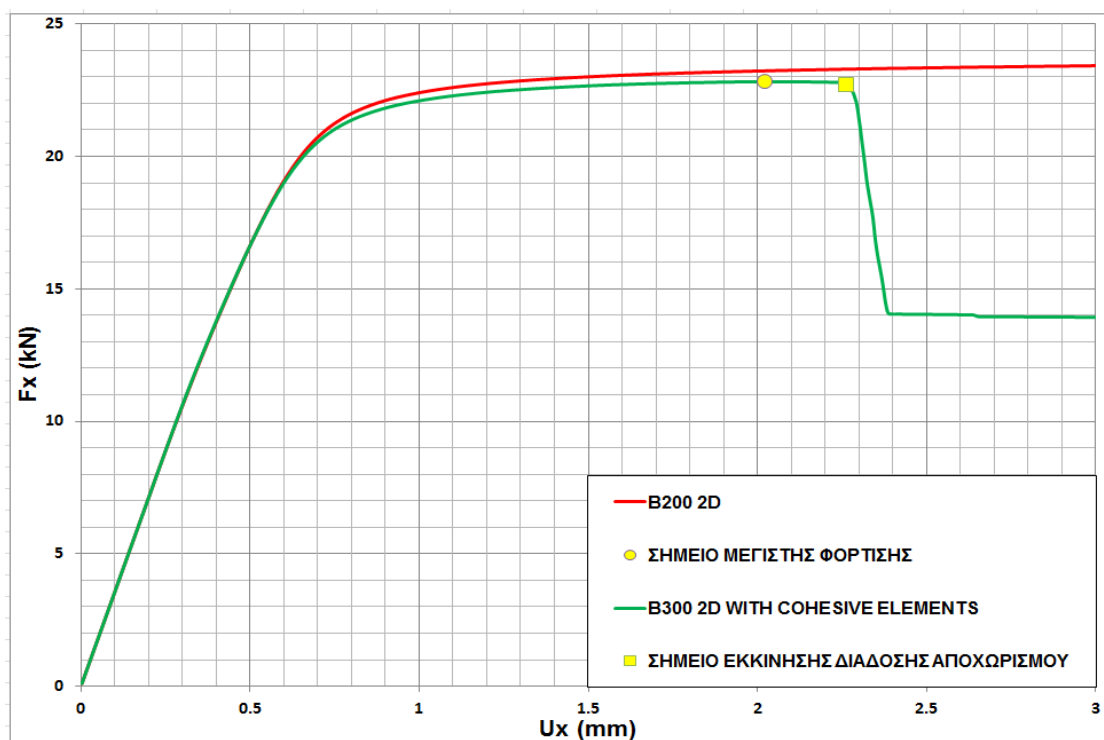


Εικόνα 3.66. Επίδραση των cohesive elements στη καμπύλη δύναμης-αξονικής μετατόπισης.

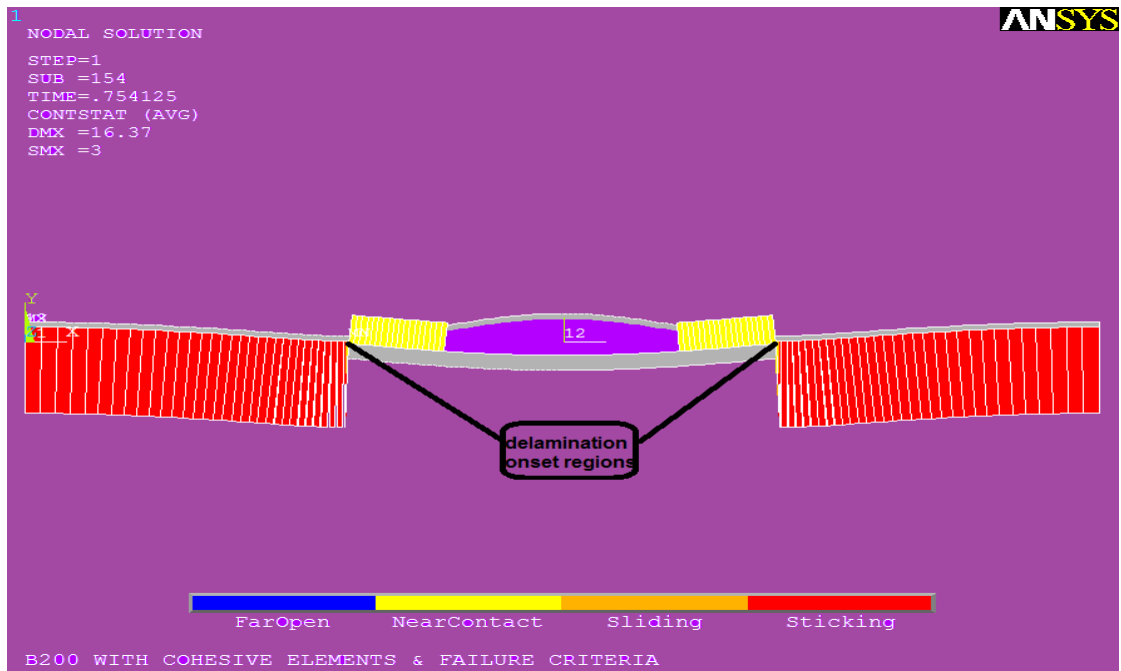
3.4.5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Στο συγκεκριμένο μοντέλο για το εύρος της ανάλυσης που επιλέχθηκε δεν εμφανίζεται αποχωρισμός των στρώσεων. Μετά από δοκιμές που έγιναν σε άλλα μοντέλα φάνηκε ότι για να επιτύχουμε αποχωρισμό στα μοντέλα τύπου B 100 θα πρέπει να ασκηθεί αρκετά μεγάλη μετατόπιση (της τάξης των 8mm και άνω).

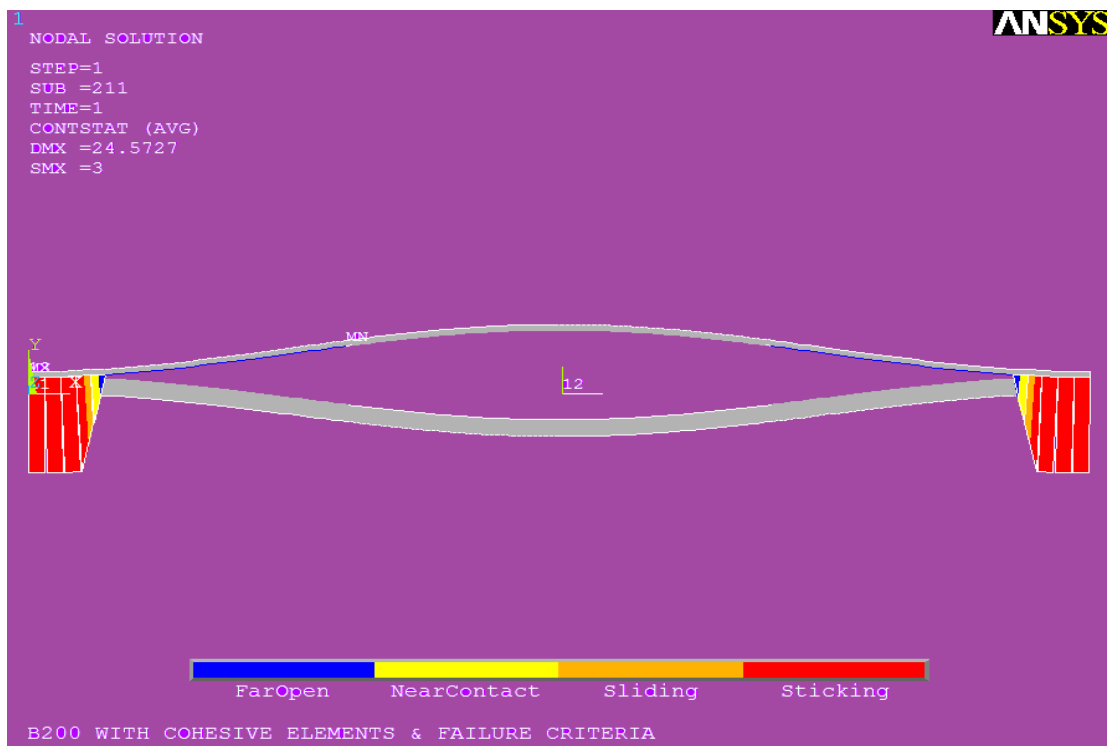
3.4.6 ΣΕΙΡΑ Β – 200



Εικόνα 3.67. Επίδραση των cohesive elements στη καμπύλη δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.68. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά την εκκίνηση επέκτασης του αποχωρισμού.



Εικόνα 3.69. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά το τέλος της ανάλυσης.

Πίνακας 3.20. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση cohesive.

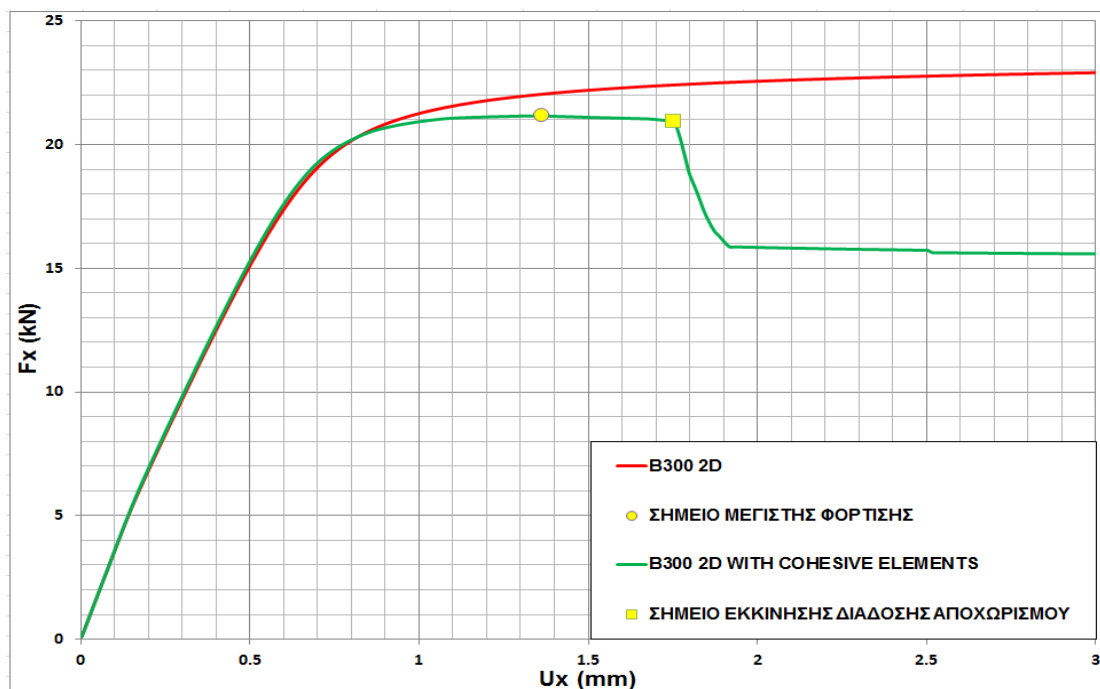
ΜΕΓΕΘΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (Fmax)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ	ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ
--------	-----------------------	-------------------------------	--	---

		(U_{Fmax})	(F_{del})	ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ (U_{Fdel})
ΤΙΜΕΣ	22.820 KN	2.0 mm	22.700 KN	2.3 mm

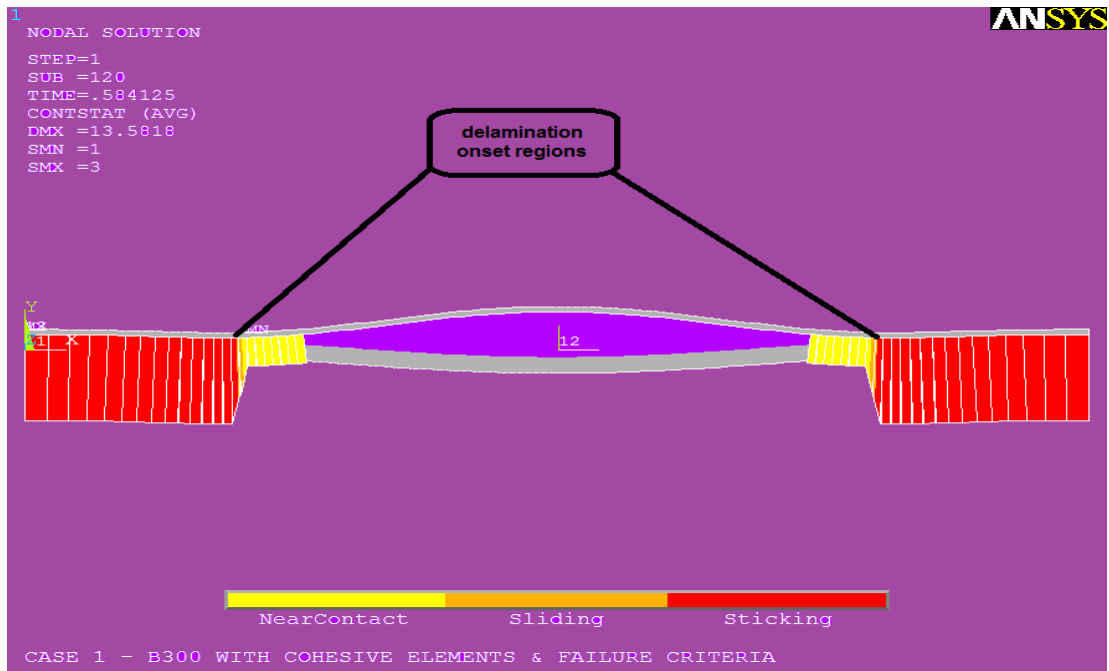
3.4.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης αξονικής μετατόπισης (Εικόνα 3.67) παρατηρούμε ότι με χρήση cohesive η καμπύλη τείνει ασυμπτωτικά σε μια τιμή κοντά στα 23KN. Αφού πιάσει τη μέγιστη φόρτιση (22.7 KN) στη συνέχεια παρουσιάζεται μια πολύ ελαφριά αποφόρτιση μέχρι τη που ενεργοποιείται ο αποχωρισμός των στρώσεων ($U_x \approx 2.26\text{mm}$) οπότε η καμπύλη παρουσιάζει απότομη πτώση του φορτίου (καταλήγει σε μια τιμή κοντά στα 14 KN). Στη συνέχεια φαίνεται ότι αναστέλλεται προσωρινά η διάδοση του αποχωρισμού (περιοχή από $U_x \approx 2.4\text{mm}$ και μετά).
- Η μέγιστη φόρτιση που παρουσιάζουν τα δοκίμια που φέρουν cohesive elements είναι 2 με 3% μικρότερη αυτής των αρχικών απλών 2D μοντέλων.

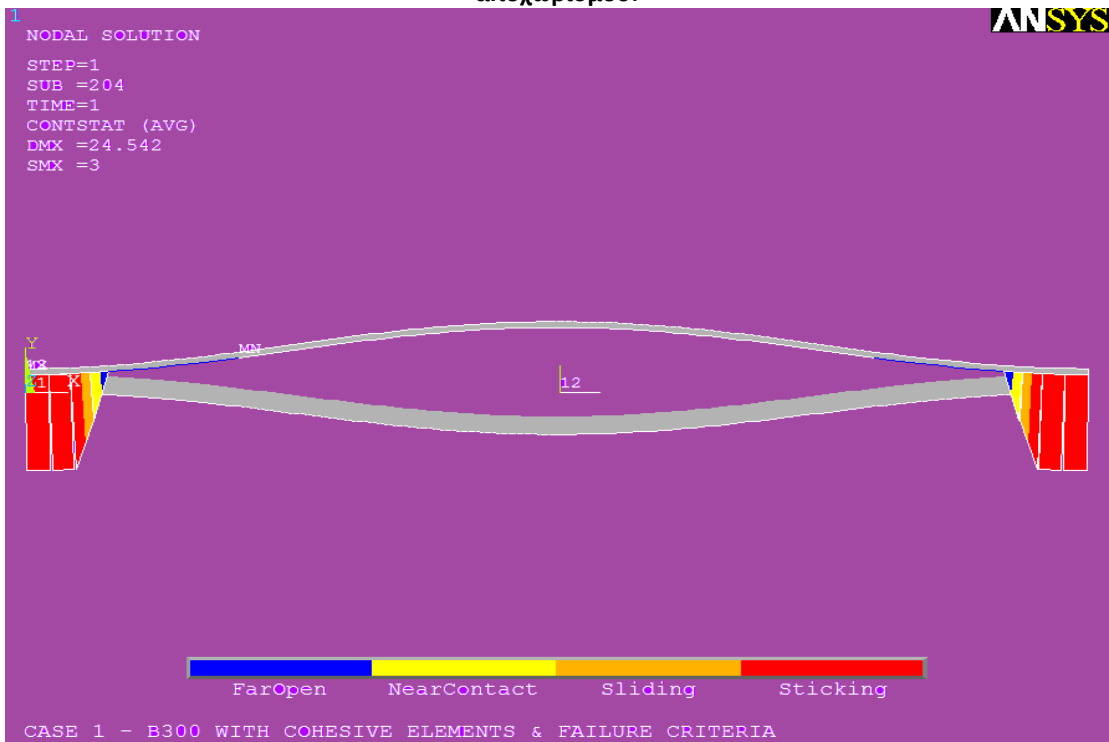
3.4.7 ΣΕΙΡΑ Β – 300



Εικόνα 3.70. Επίδραση των cohesive elements στη καμπύλη δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.71. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά την εκκίνηση επέκτασης του αποχωρισμού.



Εικόνα 3.72. Κατάσταση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων κατά το τέλος της ανάλυσης.

Πίνακας 3.21. Ποσοτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση cohesive.

ΜΕΓΕΘΗ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (Fmax)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (U_{Fmax})	ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ (Fdel)	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ
--------	-----------------------	--	---	---

				(U_{Fdel})
ΤΙΜΕΣ	21.166 kN	1.4 mm	20.952 kN	1.8 mm

3.4.7.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα δύναμης αξονικής μετατόπισης (Εικόνα 3.70) παρατηρούμε ότι και εδώ έχουμε παρόμοια συμπεριφορά με τη καμπύλη του μοντέλου B 200. Η καμπύλη σχηματίζει μια περιοχή όπου το φορτίο κυμαίνεται στα 21 kN (επιρροή φαινομένου λυγισμού) η οποία ξεκινάει από $U_x \approx 1$ και σταματάει για $U_x \approx 1.75$ οπότε αρχίζει να διαδίδεται ο αποχωρισμός και έχουμε απότομη πτώση.
- Η μέγιστη φόρτιση που παρουσιάζουν τα δοκίμια που φέρουν cohesive elements είναι 8% μικρότερη αυτής των αρχικών απλών 2D μοντέλων.

3.4.8 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Στο σύνολο των μοντέλων παρατηρούμε πως η χρήση cohesive elements οδηγεί σε μείωση των επιτευχθέντων μέγιστων φορτίσεων, η οποία είναι άλλοτε πιο έντονη (A100, A200, A300 & B300) και άλλοτε όχι και τόσο (B100 & B200).
- Επίσης τα μοντέλα της σειράς A (100, 200 & 300) παρουσιάζουν μείωση της ακαμψίας στην περίπτωση που γίνεται χρήση cohesive elements.
- Στην περίπτωση του μοντέλου B100 οι στρώσεις δεν έχουν αρχίσει ακόμα να αποχωρίζονται για την επιλεχθείσα θλιπτική μετατόπιση των 3mm.
- Παρατηρούμε ότι σε περιπτώσεις όπως των μοντέλων A200, B200 και B300 η περιοχή που ακολουθεί λίγο μετά την εκκίνηση της διάδοσης του αποχωρισμού παρουσιάζει μια σταθεροποίηση της επαγόμενης φόρτισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αφού ο αποχωρισμός διαδοθεί αρχικά πολύ έντονα, στη συνέχεια απαιτείται περαιτέρω ενέργεια για να προχωρήσει στην άθικτη περιοχή. Μέχρι να βρεθεί αυτή η απαραίτητη ενέργεια ο αποχωρισμός ακινητοποιείται.
- Τέλος για όλα τα μοντέλα έχουμε επίτευξη της μέγιστης φόρτισης πριν τη διάδοση του αποχωρισμού κάτι που είναι λογικό και το αναμέναμε.

Στη συνέχεια ακολουθεί συγκριτική παρουσίαση των παραπάνω αποτελεσμάτων στο πίνακα 3.22.

Πίνακας 3.22. Συγκριτική παρουσίαση εξαγόμενων αποτελεσμάτων από χρήση cohesive elements.

ΣΕΙΡΑ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (F _{max})	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (U _{Fmax})	ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ (F _{del})	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ (U _{Fdel})
A 100	25.105 kN	0.9 mm	21.181 kN	3.9 mm
A 200	23.591 kN	1.0 mm	21.862 kN	1.4 mm
A 300	15.268 kN	0.6 mm	12.266 kN	1.7 mm
B 100	-----	-----	-----	-----
B 200	22.820 kN	2.0 mm	22.700 kN	2.3 mm
B 300	21.166 kN	1.4 mm	20.952 kN	1.8 mm

3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στην έως τώρα ανάλυση έγινε μελέτη της επίδρασης της θέσης του τεχνητού αποχωρισμού κατά το πάχος καθώς επίσης και του μήκους του. Ακόμα έγινε παρουσίαση της επιρροής των cohesive elements στη συμπεριφορά των μοντέλων. Αφού έχουν προηγηθεί τα συγκεκριμένα βήματα , πλέον μπορούμε να ασχοληθούμε με τον τρόπο επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στα μοντέλα και στον τρόπο που αυτά παραμορφώνονται , αποχωρίζονται και αστοχούν. Αυτό που επιδιώκουμε μέσα από αυτήν την ανάλυση ευαισθησίας , ουσιαστικά είναι να καταλήξουμε σε μια τελική ομάδα μοντέλων που θα έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αυτή την τελική βελτιστοποιημένη ομάδα θα τη χρησιμοποιήσουμε για την εφαρμογή progressive damage analysis αλλά και για την τελική σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

3.5.1 1^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ-ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η επιλογή των διαστάσεων των στοιχείων του μοντέλου είναι μια διαδικασία πολύ μεγάλης σημασίας για την δημιουργία του μοντέλου , διότι είναι ο παράγοντας που καθορίζει την ορθότητα αλλά και τη σύγκλιση της ανάλυσης. Αυτό συμβαίνει διότι οι διαστάσεις των στοιχείων καθορίζουν και τον αριθμό των στοιχείων ενός μοντέλου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων του μοντέλου τόσο η επίλυση του συγκλίνει στην πραγματική τιμή. Βέβαια όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων τόσο αυξάνεται ο χρόνος της ανάλυσης. Έτσι οι διαστάσεις των στοιχείων πρέπει να επιλεγούν με βάση την υπάρχουσα υπολογιστική δύναμη των συστημάτων , τον χρόνο επίλυσης αλλά και τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

Τα αρχικά μοντέλα πάνω στα οποία εφαρμόσαμε τα κριτήρια αστοχίας αλλά και τα cohesive elements είχαν μη σταθερή διαμέριση στοιχείων ,η οποία πύκνωνε στη περιοχή του τεχνητού αποχωρισμού και αραιώνει προς τα άκρα. Επίσης για όλες τις σειρές μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν 4 στοιχεία κατά το πάχος. Οι μέσες διαστάσεις των στοιχείων στη περιοχή του αποχωρισμού παρουσιάζονται παρακάτω :

Πίνακας 3.23. ΜΕΣΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

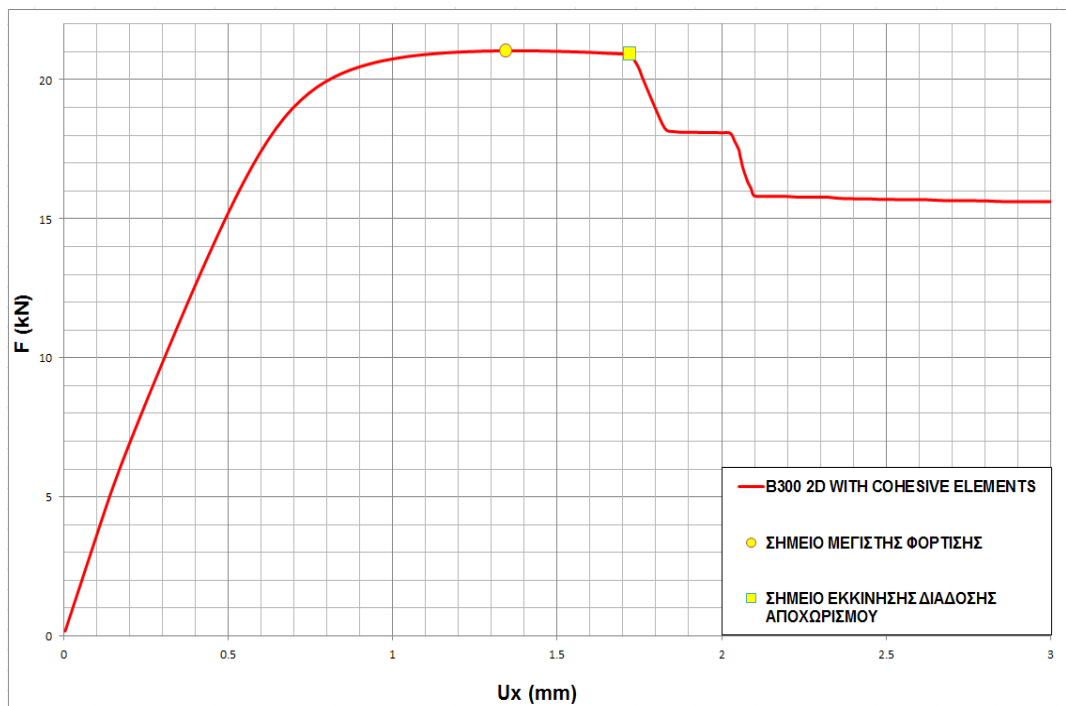
ΣΕΙΡΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	ΜΕΣΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΠΟΧΩΡΙΣΜΟΥ (l*t)
A 100	2.5*2.83
A 200	2.5*2.95
A 300	2.5*3.025
B 100	2.5*2.83
B 200	2.5*2.9
B 300	2.5*3.05

INTACT	2.5*2.64
--------	----------

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής θεωρούμε προτιμότερη τη χρήση σταθερής διαμέρισης στοιχείων έναντι της μη σταθερής που είχε χρησιμοποιηθεί από το Α. Κουσαθανά και υιοθετήσαμε στα πρώτα στάδια της μελέτης μας. Έχοντας ως βάση το μοντέλο B 300 , το οποίο θα μοντελοποιήσουμε με διάφορους τρόπους όσον αφορά το πλήθος στοιχείων κατά το διάμηκες αλλά και κατά το εγκάρσιο , θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε όσο καλύτερα την επιρροή του μεγέθους των στοιχείων στη μοντελοποίηση.

3.5.1.1 CASE 1

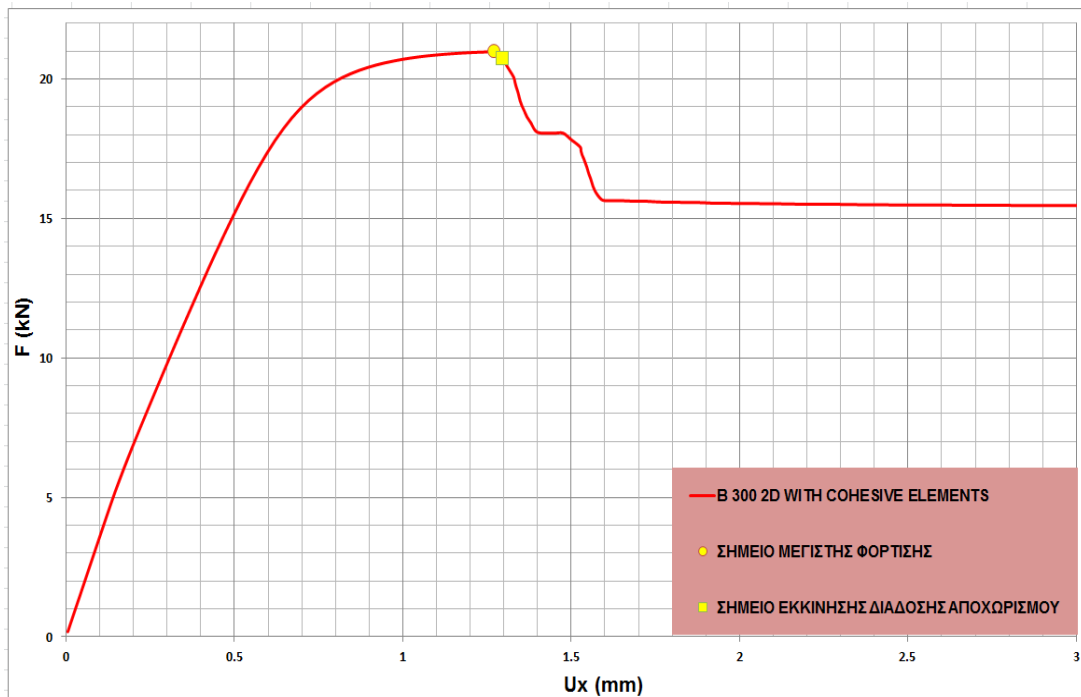
Ως CASE 1 θα ορίσουμε το μοντέλο το οποίο μοντελοποιείται με χρήση 200 στοιχείων κατά τη x διεύθυνση και τεσσάρων κατά τη y , δηλαδή η παχιά κάτω στρώση θα φέρει 3 στοιχεία κατά το πάχος της ενώ η άνω 1. Τα στοιχεία που προκύπτουν έχουν διαστάσεις 2.5 mm * 3.05 mm για όλη την έκταση της δοκού. Με βάση αυτή τη μοντελοποίηση θα προκύψει το ακόλουθο διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης.



Εικόνα 3.73. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για CASE 1.

3.5.1.1 CASE 2

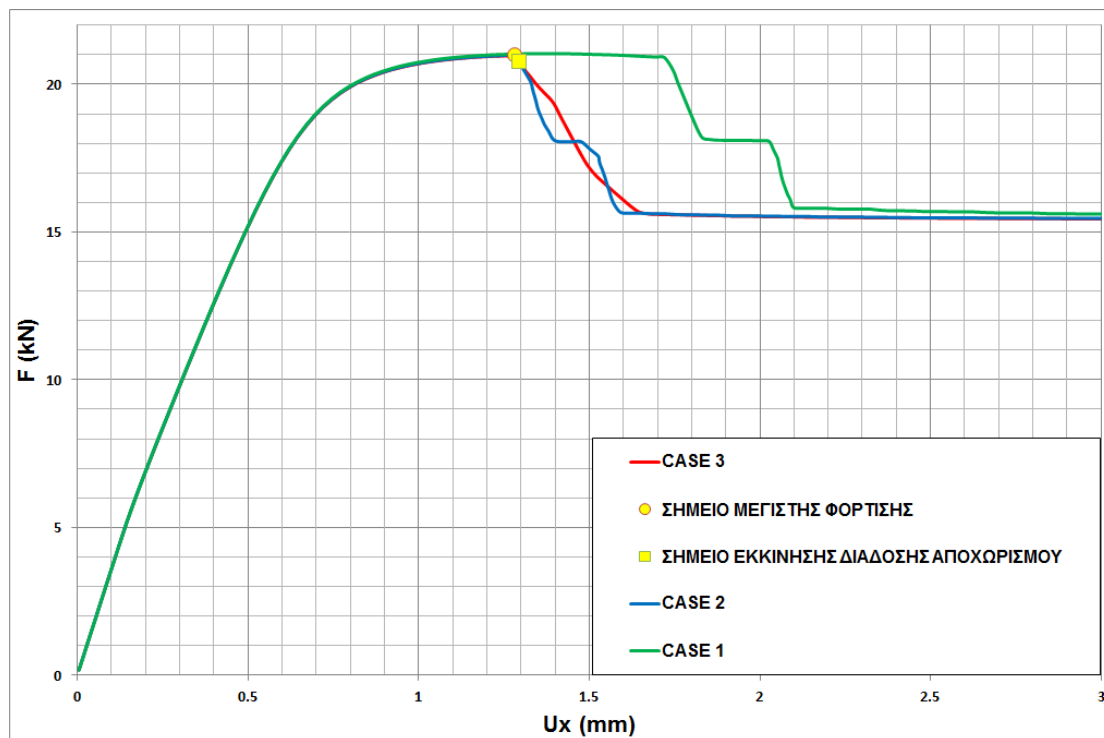
Στο CASE 2 διπλασιάζουμε τον αριθμό των στοιχείων που χρησιμοποιήσαμε στο 1 τόσο κατά x όσο και κατά y . Δηλαδή πλέον έχουμε 400 στοιχεία κατά το διάμηκες και 8 κατά το εγκάρσιο (6 στοιχεία για τη παχιά στρώση και 2 για τη λεπτή). Οι διαστάσεις των στοιχείων θα είναι 1.25mm*1.525mm. Το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης διαμορφώνεται ως εξής :



Εικόνα 3.74. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για CASE 2.

3.5.1.1 CASE 3

Στη τρίτη περίπτωση μοντελοποίησης διπλασιάζουμε τον αριθμό των στοιχείων που χρησιμοποιήσαμε στο CASE 2 κατά τη χ διεύθυνση , δηλαδή πλέον έχουμε 800 στοιχεία κατά το διάμκηες και 8 κατά το εγκάρσιο (6 στοιχεία για τη παχιά στρώση και 2 για τη λεπτή). Οι διαστάσεις των στοιχείων θα είναι 0.625mm*1.525mm. Το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης διαμορφώνεται ως εξής :



Εικόνα 3.75. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για CASE 1 , 2 και 3.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες και των τριών CASES ώστε να είναι πιο εύκολα αντιληπτό το πώς επηρεάζεται η ανάλυση από το μέγεθος και τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση.

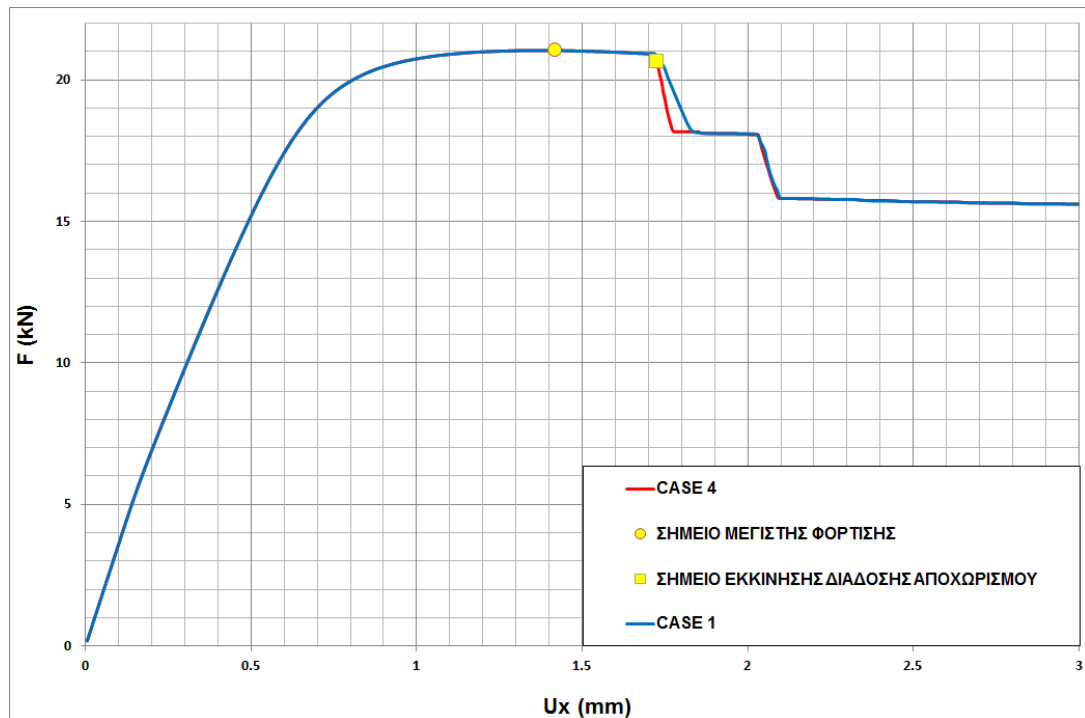
Παρατηρούμε ότι όσο πιο αναλυτικό είναι το mesh τόσο πιο νωρίς εμφανίζεται η διάδοση του αποχωρισμού των στρώσεων (μικρότερο U_x). Αντίθετα το φορτίο στο οποίο ο αποχωρισμός αρχίζει να διαδίδεται παραμένει ανεπηρέαστο ενώ το ίδιο συμβαίνει και με την ακαμψία. Επίσης συγκρίνοντας τις περιπτώσεις 2 και 3 γίνεται αντιληπτό πώς το σημείο εκκίνησης της διάδοσης του αποχωρισμού είναι ίδιο με τη διαφορά όμως ότι στη περίπτωση του CASE 3 το φορτίο μειώνεται ομαλά μέχρι τη περιοχή αναστολής της περαιτέρω διάδοσης του αποχωρισμού (περιοχή για $U_x > 1.6 \text{ mm}$). Αντίθετα ο τρόπος αποφόρτισης για το CASE 2 παρουσιάζει "σκαλοπάτια" τα οποία ερμηνεύονται ως διάδοση του αποχωρισμού με μη σταθερό-ομαλό ρυθμό.

3.5.2 2^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ-ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ

Άλλη μια παράμετρος που επηρεάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση είναι ο αριθμός των βημάτων (sub steps) που χρησιμοποιούμε για την επίλυση. Γενικά όσο πιο πολλά στάδια χρησιμοποιούμε τόσο μεγαλύτερη ανάλυση επιτυγχάνουμε ,εις βάρος όμως του υπολογιστικού χρόνου. Στο κεφάλαιο 2 αναφέραμε τη δυνατότητα που παρέχεται από το πρόγραμμα για αυτόματη προσαρμογή του μεγέθους των sub steps ανάλογα με το βαθμό δυσκολίας που παρουσιάζει η επίλυση στο εκάστοτε βήμα. Στα πλαίσια αυτά χρησιμοποιήσαμε την εντολή **deltim** με την οποία ορίζουμε το μέγιστο και το ελάχιστο επιτρεπτό sub step. Έτσι , για να δούμε το πώς επιδρά ο αριθμός των sub steps στην ανάλυση , θα δοκιμάσουμε διάφορες τιμές για το μέγιστο επιτρεπτό sub step ενώ το ελάχιστο θα το κρατήσουμε σταθερό. Να αναφέρουμε ότι για τα CASE που προηγήθηκαν στη παράγραφο 3.5.1 το μέγιστο sub step ήταν 0.005 (η συνολική επίλυση θεωρούμε ότι ολοκληρώνεται για χρόνο 1 οπότε κάθε sub step αποτελεί υποσύνολο αυτού του χρόνου).

3.5.2.1 CASE 4

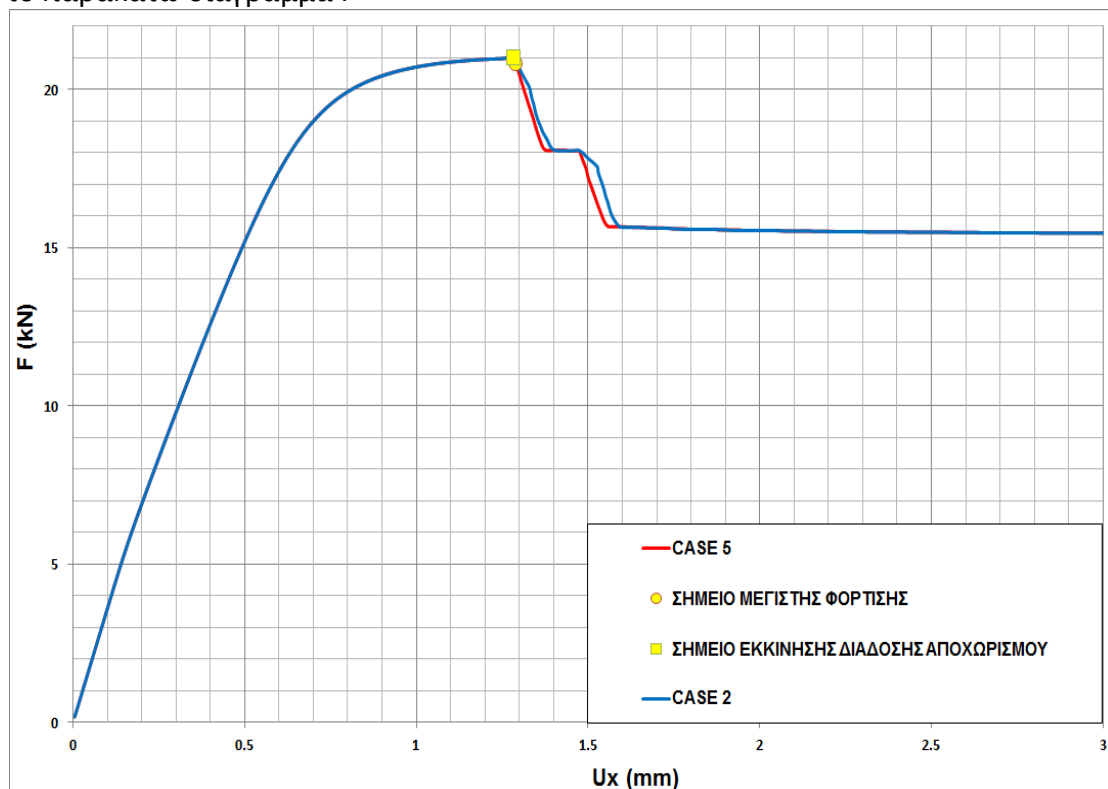
Το συγκεκριμένο CASE χρησιμοποιεί την μοντελοποίηση του CASE 1 όσο αφορά το μέγεθος και τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων στοιχείων ενώ το μέγεθος του επιλεγόμενου μέγιστου sub step ορίζεται στο 0.001. Με βάση τις συγκεκριμένες τιμές λαμβάνουμε το ακόλουθο διάγραμμα:



Εικόνα 3.76. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για CASE 1 και 4.

3.5.2.2 CASE 5

Εδώ έχουμε εφαρμογή μέγιστου sub step μεγέθους 0.001 στο CASE 2. Θα λάβουμε το παρακάτω διάγραμμα :



Εικόνα 3.77. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για CASE 2 και 5.

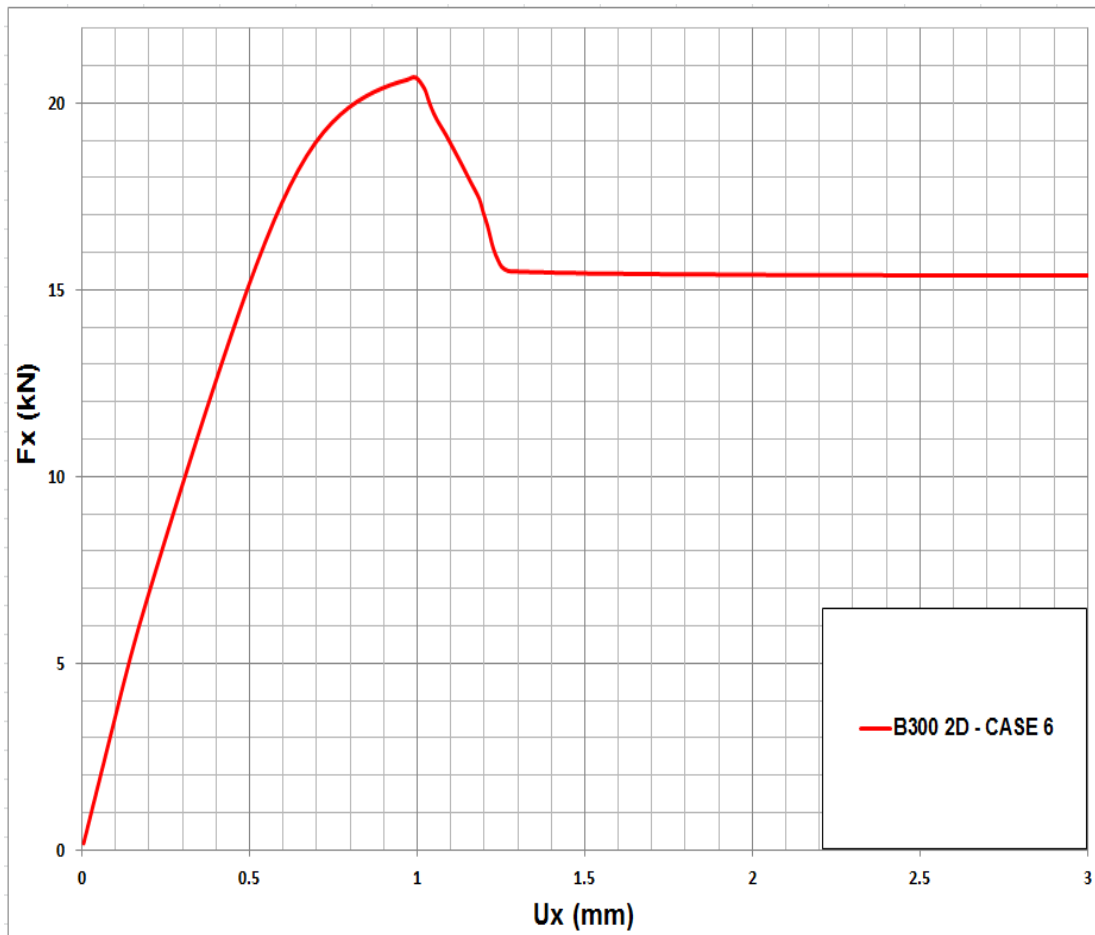
Από τα διαγράμματα των εικόνων 3.76 και 3.77 συμπεραίνουμε πώς η επίδραση του μεγέθους του sub step φαίνεται να είναι πολύ μικρή και ουσιαστικά το μόνο αξιοσημείωτο είναι η εμφάνιση ελαφρά πιο απότομης μείωσης του φορτίου καθώς οι στρώσεις αρχίζουν να αποχωρίζονται για τα μοντέλα που κάνουν χρήση πιο αναλυτικού sub step.

3.5.3 3^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ-ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Τα πειραματικά δοκίμια των οποίων τη συμπεριφορά προσπαθούμε να προσομοιάσουμε αποτελούνται από 16 στρώσεις μονοαξονικών ινών σε αντίθεση με τα μοντέλα τα οποία φέρουν μόνον δύο. Είναι λογικό λοιπόν να παρουσιάζεται διαφορά στην αντοχή μεταξύ δοκιμίων και μοντέλων. Αυτή η διαφορά θα ερευνήσουμε αν και κατά πόσο μπορεί να μειωθεί αν μοντελοποιήσουμε με χρήση περισσότερων στρώσεων.

3.5.3.1 CASE 6

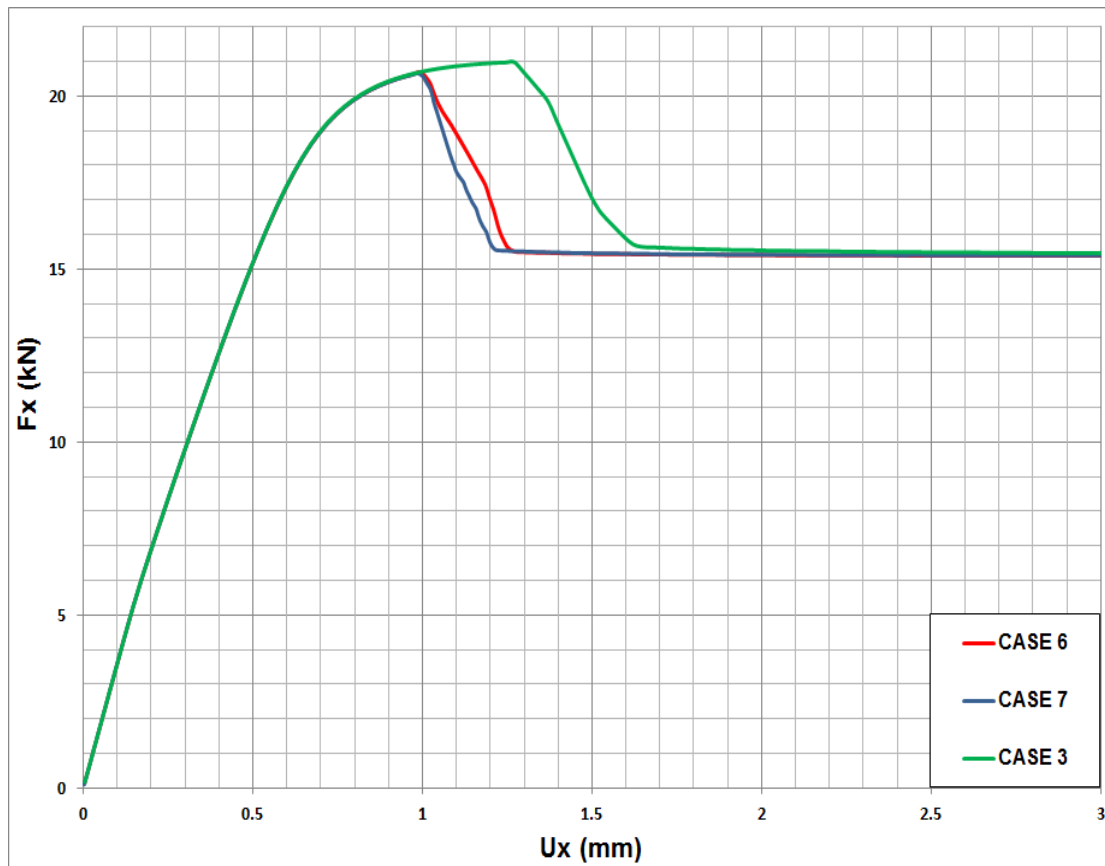
Το μοντέλο της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι χωρισμένο σε 5 στρώσεις οι οποίες ενώνονται με cohesive elements. Οι τρεις πρώτες είναι ισομεγέθεις όσον αφορά το πάχος και φτάνουν τα $\frac{3}{4}$ του πάχους της δοκού ενώ οι δύο ανώτερες στρώσεις έχουν πάχος ίσο με το $\frac{1}{8}$ του συνολικού η κάθε μία. Όσον αφορά το meshing που έχουμε ακολουθήσει ,αυτό έχει ως εξής : α) 800 στοιχεία κατά το διάμηκες χ β) 2 στοιχεία κατά το πάχος για τις 3 χοντρές στρώσεις και 1 στοιχείο για τις 2 λεπτότερες , σύνολο 8 στοιχεία κατά το γ. Το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης που θα προκύψει θα έχει ως εξής :



Εικόνα 3.78. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για CASE 6.

3.5.3.2 CASE 7

Το μοντέλο της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι χωρισμένο σε 8 στρώσεις οι οποίες ενώνονται με cohesive elements. Οι στρώσεις είναι ισομεγέθεις όσον αφορά το πάχος και φτάνουν 1/8 του συνολικού η κάθε μία. Όσον αφορά το meshing που έχουμε ακολουθήσει ,αυτό έχει ως εξής : α) 800 στοιχεία κατά το διάμηκες χ β) 2 στοιχεία κατά το πάχος για κάθε στρώση, σύνολο 16 στοιχεία κατά το γ. Το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης που θα προκύψει θα έχει ως εξής :



Εικόνα 3.79. Συγκριτικό διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για CASE 3 , 6 και 7.

Η υιοθέτηση περισσότερων των 2 στρώσεων για τη μοντελοποίηση δεν φανερώνει επιρροή στο μέγεθος της ακαμψίας ενώ ταυτόχρονα οδηγεί σε ελαφρά μείωση των μέγιστων φορτίσεων, της τάξης του 1.5%. Ωστόσο αυξάνοντας τις στρώσεις από 2 σε 5 αρχικά παρατηρούμε ότι η έναρξη της διάδοσης του αποχωρισμού των στρώσεων παρουσιάζεται αρκετά νωρίτερα (20% μικρότερη μετατόπιση για το σημείο εκκίνησης της διάδοσης του αποχωρισμού) .

Η μοντελοποίηση με 5 στρώσεις δεν παρουσιάζει ουσιαστικές διαφορές με αυτή όπου έχουμε 8. Το μόνο σημείο ασυμφωνίας είναι το γεγονός ότι το μοντέλο με 8 στρώσεις παρουσιάζει ελαφρά πιο απότομη μείωση του φορτίου.

3.5.4 4^η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ-ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΔΕΣΜΟΥ (COHESIVE ZONE)

Στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής αναφερθήκαμε στις τιμές που λαμβάνουμε για το χαρακτηρισμό της περιοχής του κολλητικού δεσμού. Η επιλογή που θα κάνουμε θα επηρεάσει την αντοχή της σύνδεσης σε αστοχίας τύπου mode I, II και mixed-mode. Τελικά ορίζουμε τις τιμές που παρουσιάζονται στο πίνακα 2.2 και έχουν προκύψει από δοκιμές που έχουν γίνει σε ενισχυμένα από ίνες σύνθετα υλικά. Επειδή όμως οι δοκιμές δεν έχουν γίνει στα δοκίμια τα οποία εμείς προσομοιώνουμε θα πρέπει να ελέγξουμε αν οι προκύπτουσες τιμές λειτουργούν σωστά στα μοντέλα. Ο έλεγχος που θα κάνουμε περιλαμβάνει ξεχωριστά τρεξίματα για κάθε μεταβλητή με τιμές $\pm 20\%$ των αρχικά επιλεχθέντων. Για τις δοκιμές χρησιμοποιούμε το CASE 3 του μοντέλου B 300 που αναλύσαμε προηγουμένως.

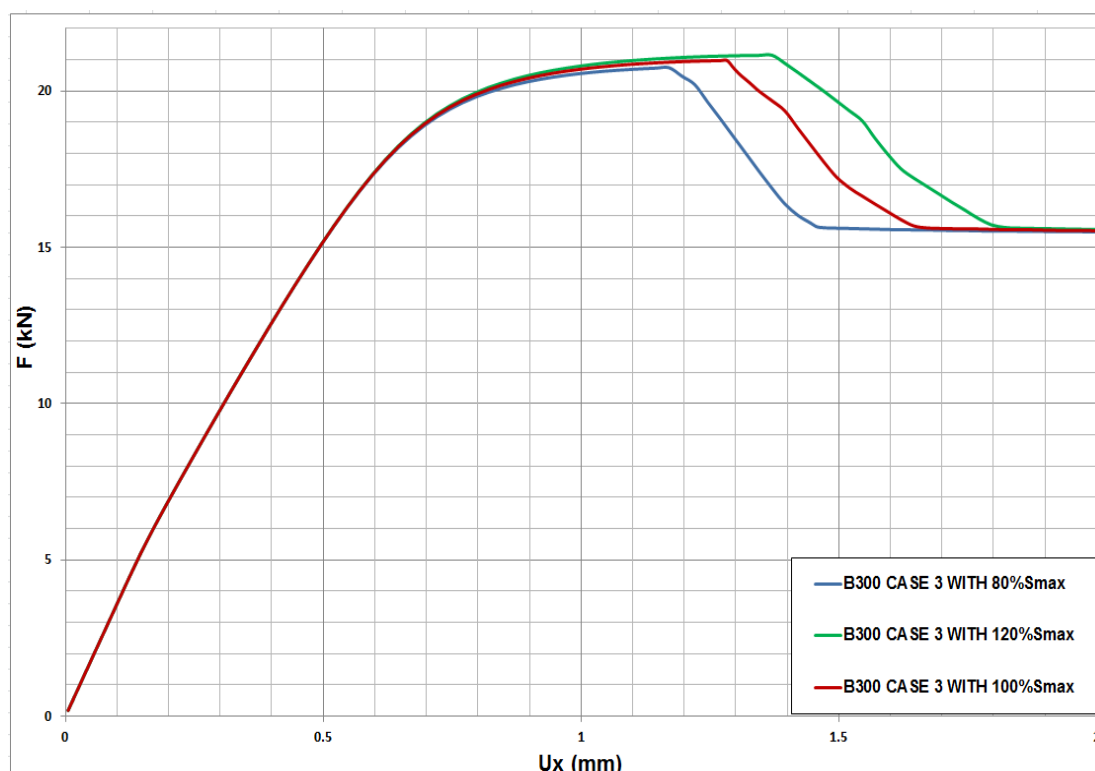
3.5.4.1 ΜΕΓΙΣΤΗ ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ σ_{max}

Οι τιμές του σ_{max} για 80 , 100 και 120 % είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 3.24. Τιμές σ_{max} για έλεγχο ευαισθησίας.

Ποσοστό επί % της αρχικά ορισθείσας τιμής	80%	100%	120%
Τιμή (MPa)	0.528	0.66	0.792

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά και οι τρεις περιπτώσεις.



Εικόνα 3.80. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για διάφορα % του σ_{max} .

Παρατηρούμε πώς καθώς η τιμή της σ_{max} αυξάνεται , η εκκίνηση της διάδοσης του αποχωρισμού μετατίθεται όλο και πιο δεξιά στον άξονα των μετατοπίσεων. Δηλαδή αύξηση της μέγιστης ορθής τάσης επαφής οδηγεί σε αύξηση της αντοχής έναντι της διάδοσης του αποχωρισμού.

Αντίθετα η σ_{max} δεν φαίνεται να επηρεάζει το ίδιο έντονο τις μέγιστες φορτίσεις που λαμβάνει το μοντέλο.

Η συγκεκριμένη συμπεριφορά του μοντέλου ερμηνεύεται από το γεγονός ότι ο κυρίαρχος τρόπος αστοχίας του είναι κατά mode II , δηλαδή οι στρώσεις ανοίγουν μεταξύ τους . Οπότε με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε στο εδάφιο 2.5.2.2 γίνεται αντιληπτό πώς η παράμετρος που επηρεάζει κατά κύριο λόγο τον τρόπο αποκόλλησης στην περιοχή της διεπιφάνειας είναι η μέγιστη ορθή τάση επαφής.

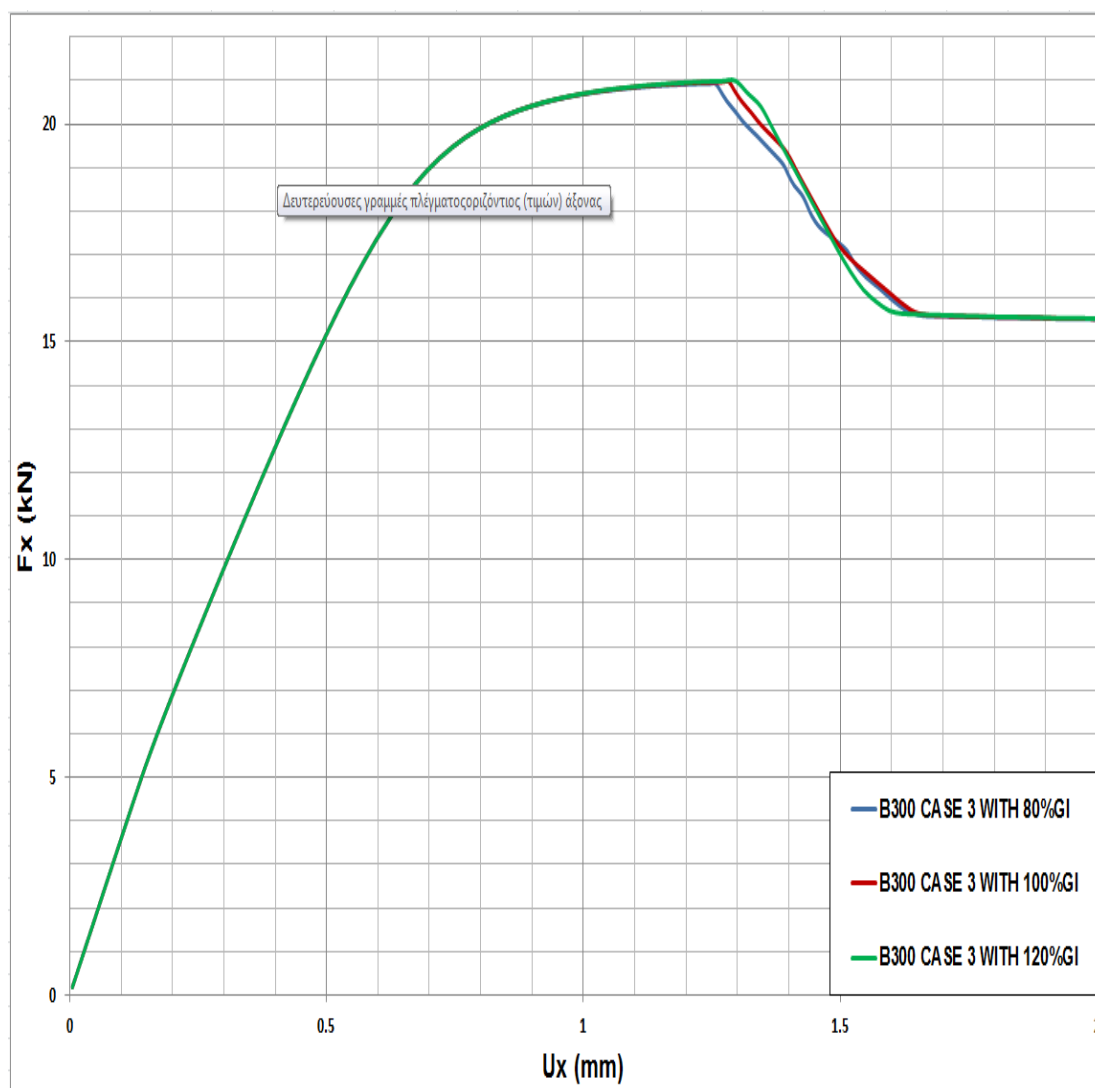
3.5.4.2 ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΓΙΑ MODE I (G_{cn})

Οι τιμές της G_{cn} για 80 , 100 και 120 % είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 3.24. Τιμές G_{cn} για έλεγχο ευαισθησίας.

Ποσοστό επί % της αρχικά ορισθείσας τιμής	80%	100%	120%
Τιμή (N/mm)	0.928	1.16	1.392

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά και οι τρεις περιπτώσεις.



Εικόνα 3.81. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για διάφορα % της G_{cn} .

Η συγκεκριμένη παράμετρος δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα τον τρόπο εξέλιξης της αστοχίας. Η μόνη διαφοροποίηση που διακρίνεται είναι ότι καθώς η κρίσιμη ενέργεια θραύσεως αυξάνεται , το σημείο εκκίνησης της διάδοσης του αποχωρισμού οδηγείται σε ελαφρά υψηλότερες τιμές φορτίσεων και μετατοπίσεων.

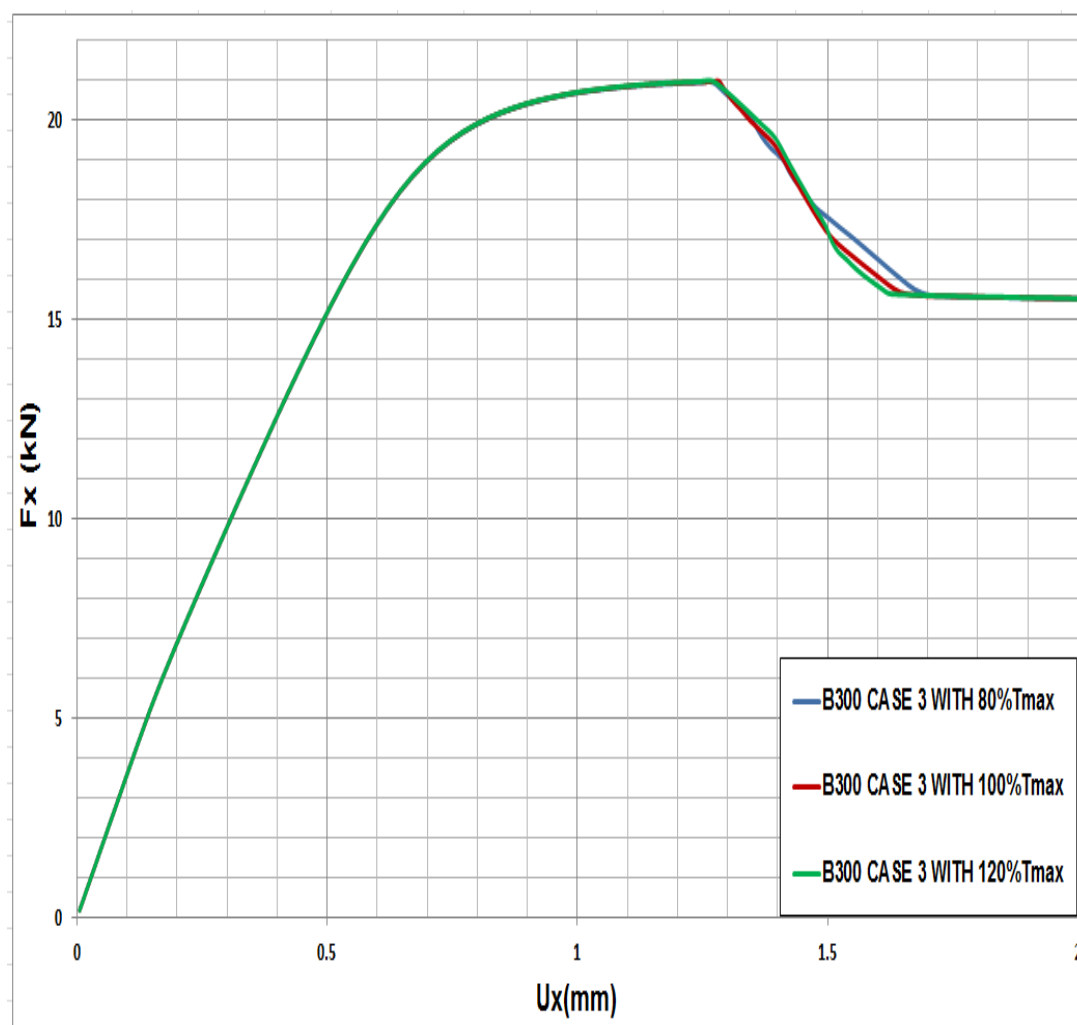
3.5.4.3 ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ τ_{max}

Οι τιμές του τ_{max} για 80 , 100 και 120 % είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 3.26. Τιμές τ_{max} για έλεγχο ευαισθησίας.

Ποσοστό επί % της αρχικά ορισθείσας τιμής	80%	100%	120%
Τιμή (MPa)	12.24	15.3	18.36

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά και οι τρεις περιπτώσεις.



Εικόνα 3.82. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για διάφορα % της G_{cn} .

Διαπιστώνουμε πώς η επίδραση της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης είναι ανεπαίσθητη στο τρόπο που αστοχεί το μοντέλο. Σημαντικό ρόλο στη συγκεκριμένη συμπεριφορά παίζει το γεγονός πώς οι τιμές που ορίζουμε για την τ_{max} είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές της σ_{max} οπότε οι στρώσεις θα έχουν ανοίξει ήδη πριν προλάβουν να ολισθήσουν μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο το διαπιστώνουμε και από τον τρόπο αστοχίας του μοντέλου B 300 (εικόνα 3.72).

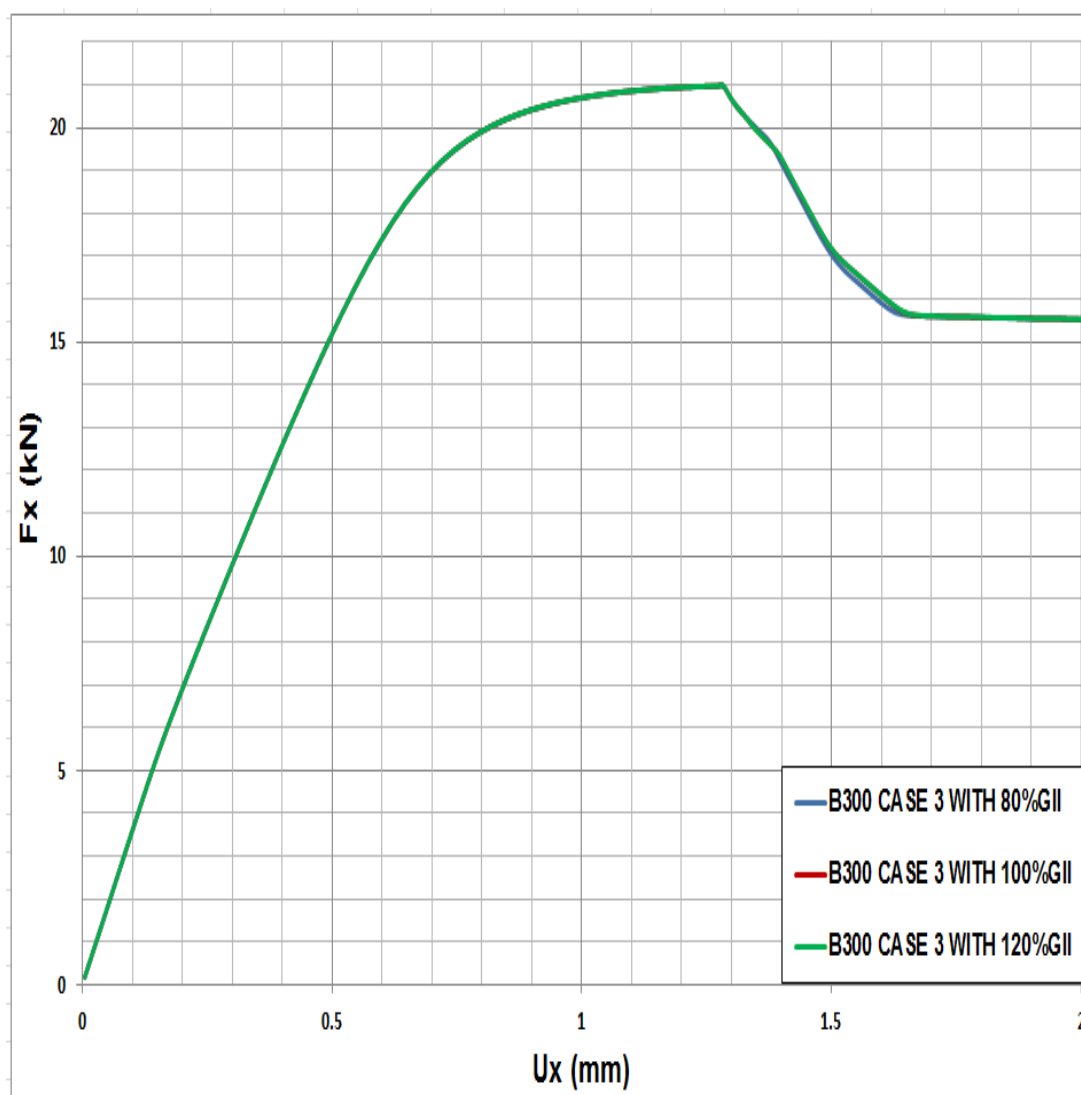
3.5.4.4 ΚΡΙΣΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΡΑΥΣΕΩΣ ΓΙΑ MODE II (G_{ct})

Οι τιμές της G_{ct} για 80 , 100 και 120 % είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 3.27. Τιμές G_{ct} για έλεγχο ευαισθησίας.

Ποσοστό επί % της αρχικά ορισθείσας τιμής	80%	100%	120%
Τιμή (N/mm)	0.928	1.16	1.392

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά και οι τρεις περιπτώσεις.



Εικόνα 3.83. Διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης για διάφορα % της G_{ct} .

Όπως και η τ_{max} έτσι και η συγκεκριμένη παράμετρος επηρεάζει ανεπαίσθητα τη συμπεριφορά του μοντέλου για του λόγους που προαναφέραμε στο εδάφιο 3.5.4.3 .

3.5.5 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των διαφόρων παραμέτρων , καταλήγουμε στον εξής τρόπο μοντελοποίησης :

Πίνακας 3.28. Χαρακτηριστικά και ιδιότητες τελικού μοντέλου

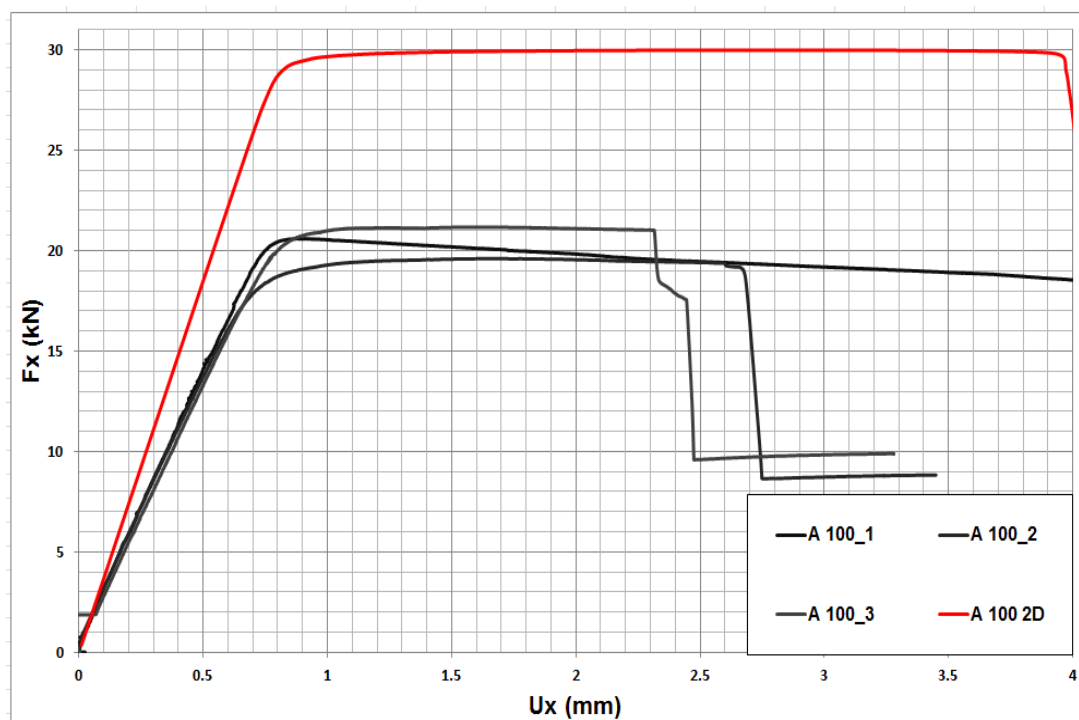
Meshing (x*y)	Sub step size	Number of layers	σ_{max}	G_{cn}	τ_{max}	G_{ct}
400*8	0.003	2	0.66 (MPa)	1.16 (N/mm)	15.3 (MPa)	1.72 (N/mm)

Ο λόγος που δεν επιλέγουμε μεγαλύτερο αριθμό στρώσεων από 2 είναι ότι τα οφέλη δεν αντισταθμίζουν αρκετά το κόστος σε υπολογιστικό χρόνο.

3.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Εφόσον έχουμε επιλέξει από την ενότητα 3.5 τα τελικά χαρακτηριστικά των μοντέλων μας μπορούμε πλέον να τα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα πειραματικά για να δούμε κατά πόσο συμπίπτουν. Θα ακολουθήσει σύγκριση για κάθε σειρά μοντέλων ξεχωριστά. Η σύγκριση θα γίνει επί των διαγραμμάτων δύναμης-αξονικής μετατόπισης.

3.6.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ A 100

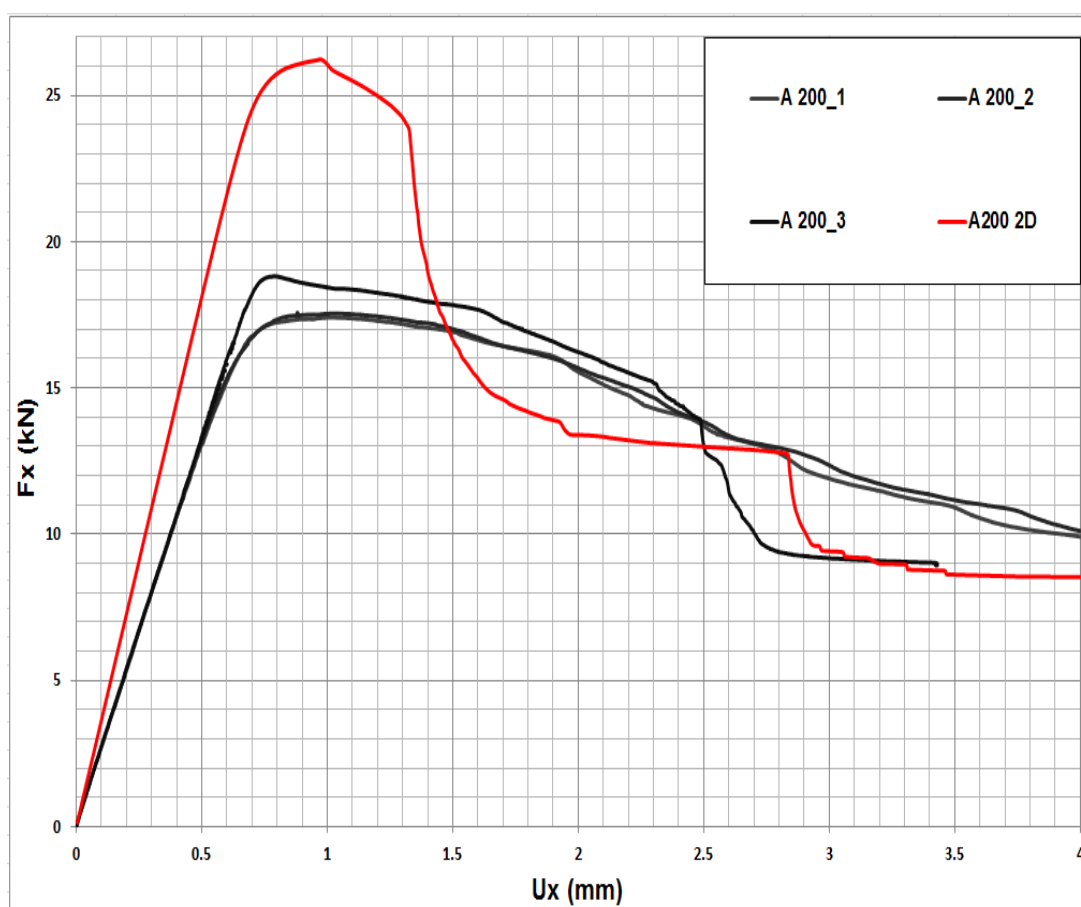


Εικόνα 3.84. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων σειράς A 100 με πειραματικά.

3.6.1.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το μοντέλο παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία από τα τρία πειραματικά ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει μέγιστο φορτίο κατά 30% περίπου μεγαλύτερο από το μέσο όρο των πειραματικών.
- Η καμπύλη του μοντέλου αρχίζει να αποφορτίζεται έντονα για $U_x \approx 3.95$ mm ενώ τα δοκίμια A 100_2 και A 100_3 έχουν παρουσιάσει ήδη έντονη αποφόρτιση για μετατόπιση 2.7 και 2.3mm αντίστοιχα.

3.6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ A 200

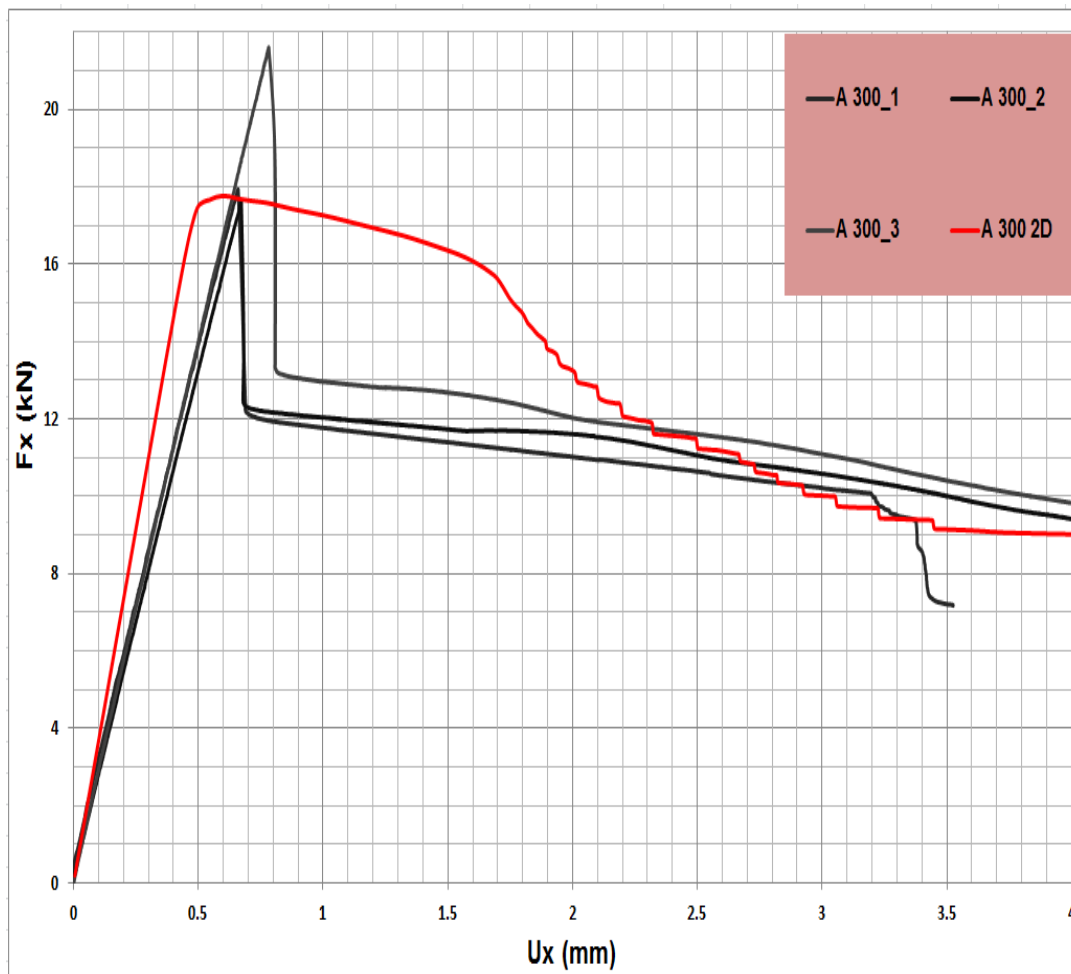


Εικόνα 3.85. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων σειράς A 200 με πειραματικά.

3.6.2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση, το μοντέλο παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία από τα τρία πειραματικά ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει μέγιστο φορτίο κατά 30% περίπου μεγαλύτερο από το μέσο όρο των πειραματικών.
- Η καμπύλη του μοντέλου παρουσιάζει μέγιστη φόρτιση $U_x \approx 1$ mm και στη συνέχεια αρχίζει να αποφορτίζεται. Αντίστοιχα τα πειραματικά δοκίμια φτάνουν στη μέγιστη φόρτιση για $U_x \approx 0.9$ κατά μέσο όρο και στη συνέχεια ακολουθούν πιο ομαλή μείωση του φορτίου.

3.6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ A 300

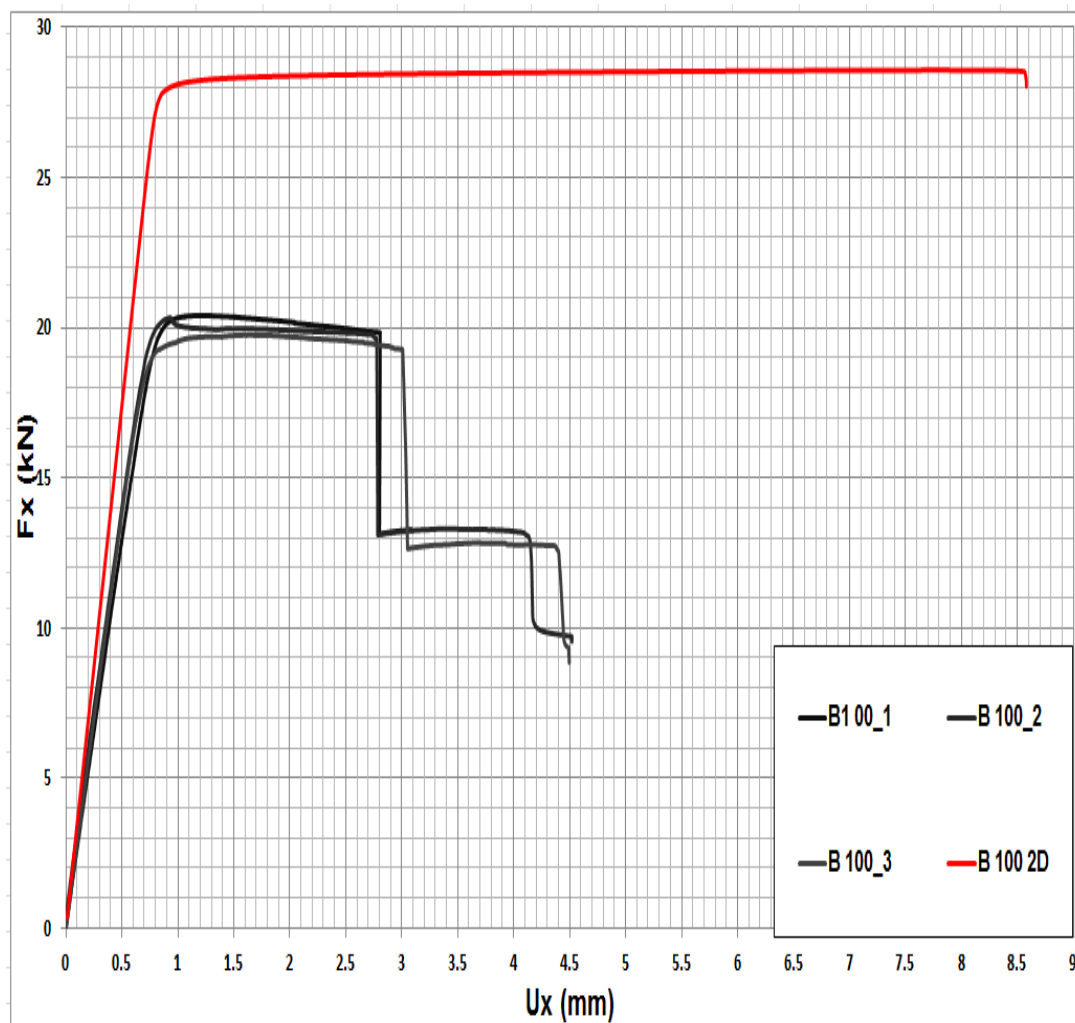


Εικόνα 3.86. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων σειράς A 300 με πειραματικά.

3.6.3.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το μοντέλο παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερη ακαμψία από τα τρία πειραματικά ενώ ταυτόχρονα αν εξαιρέσουμε τη περίπτωση του δοκιμίου A 100_3 , υπολογίζει μέγιστο φορτίο το οποίο ισούται με το μέσο όρο των υπόλοιπων πειραματικών δοκιμών.
- Μια σημαντική διαφορά είναι ότι ενώ στο μοντέλο η αποφόρτιση γίνεται ομαλά , στα δε πειραματικά έχουμε απότομη πτώση του φορτίου αμέσως μετά την επίτευξη της μέγιστης φόρτισης (χαρακτηριστική οξεία μορφή) η οποία στη συνέχεια ακολουθείται από μια περιοχή ομαλότερης αποφόρτισης.
- Στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι εμφανής η σταδιακή διάδοση του αποχωρισμού που γίνεται αντιληπτή από τα "σκαλοπάτια" της καμπύλης.
- Η καμπύλη του μοντέλου αρχίζει να αποφορτίζεται για $U_x \approx 0.6\text{mm}$ ενώ των δοκιμών για 0.7mm κατά μέσο όρο.

3.6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ B 100

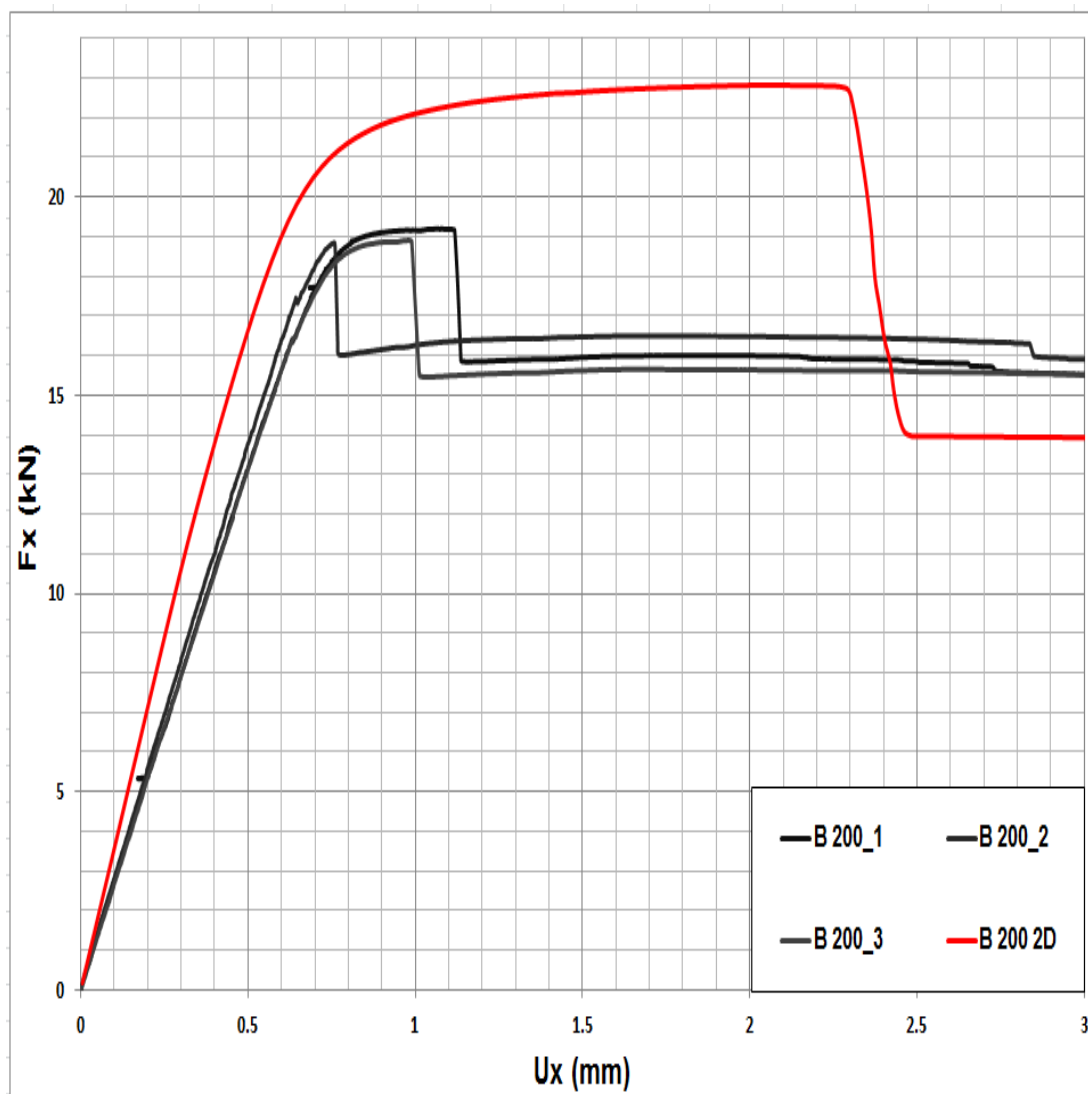


Εικόνα 3.87. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων σειράς B 100 με πειραματικά.

3.6.4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το μοντέλο παρουσιάζει ελαφρά μεγαλύτερη ακαμψία από τα τρία πειραματικά ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει μέγιστο φορτίο κατά 30% περίπου μεγαλύτερο από το μέσο όρο των πειραματικών.
- Για το μοντέλο έντονη αποφόρτιση, που συνεπάγεται την εκκίνηση της διάδοσης του αποχωρισμού συμβαίνει για μετατόπιση κοντά στα 8.5mm ενώ αντίστοιχα τα δοκίμια παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική απότομη πτώση για μια μέση τιμή του U_x κοντά στα 2.9 mm.

3.6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ B 200

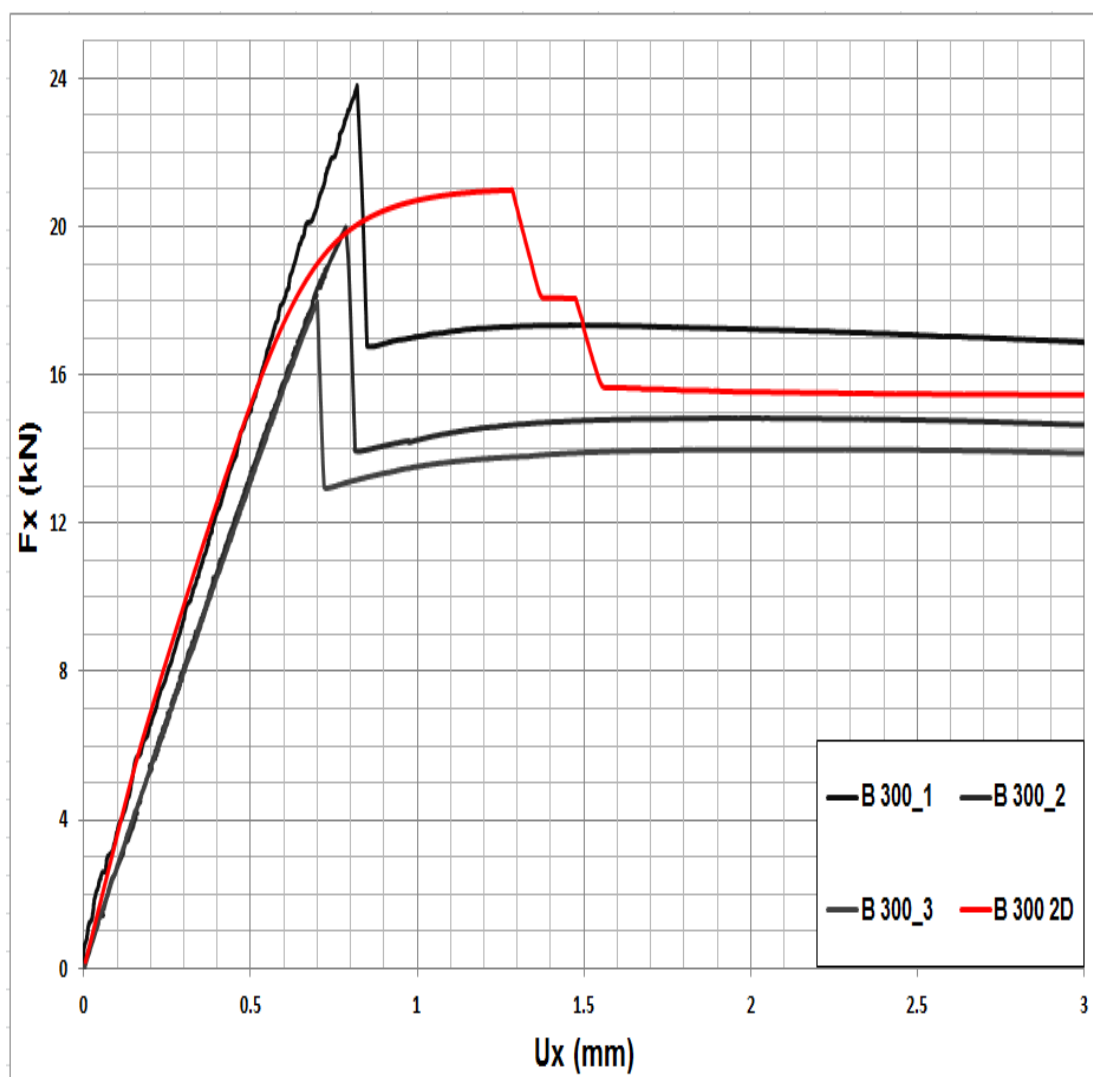


Εικόνα 3.88. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων σειράς B 200 με πειραματικά.

3.6.5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι και εδώ το μοντέλο παρουσιάζει ελαφρά μεγαλύτερη ακαμψία από τα τρία πειραματικά ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει μέγιστο φορτίο κατά 17.5% περίπου μεγαλύτερο από το μέσο όρο των πειραματικών.
- Η καμπύλη του μοντέλου προσομοιάζει πάρα πολύ αυτή των πειραματικών σχηματίζοντας ένα πλατό (περιοχή λυγισμού) πριν την επίτευξη της μέγιστης φόρτισης ενώ στη συνέχεια ακολουθεί απότομη αποφόρτιση. Την έντονη πτώση του φορτίου ακολουθεί μια περιοχή σταθεροποίησης αυτού. Βέβαια για το μοντέλο απαιτείται γύρω στο 60% μεγαλύτερη μετατόπιση για να έχουμε την εμφάνιση της έντονης αποφόρτισης.

3.6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ B 300

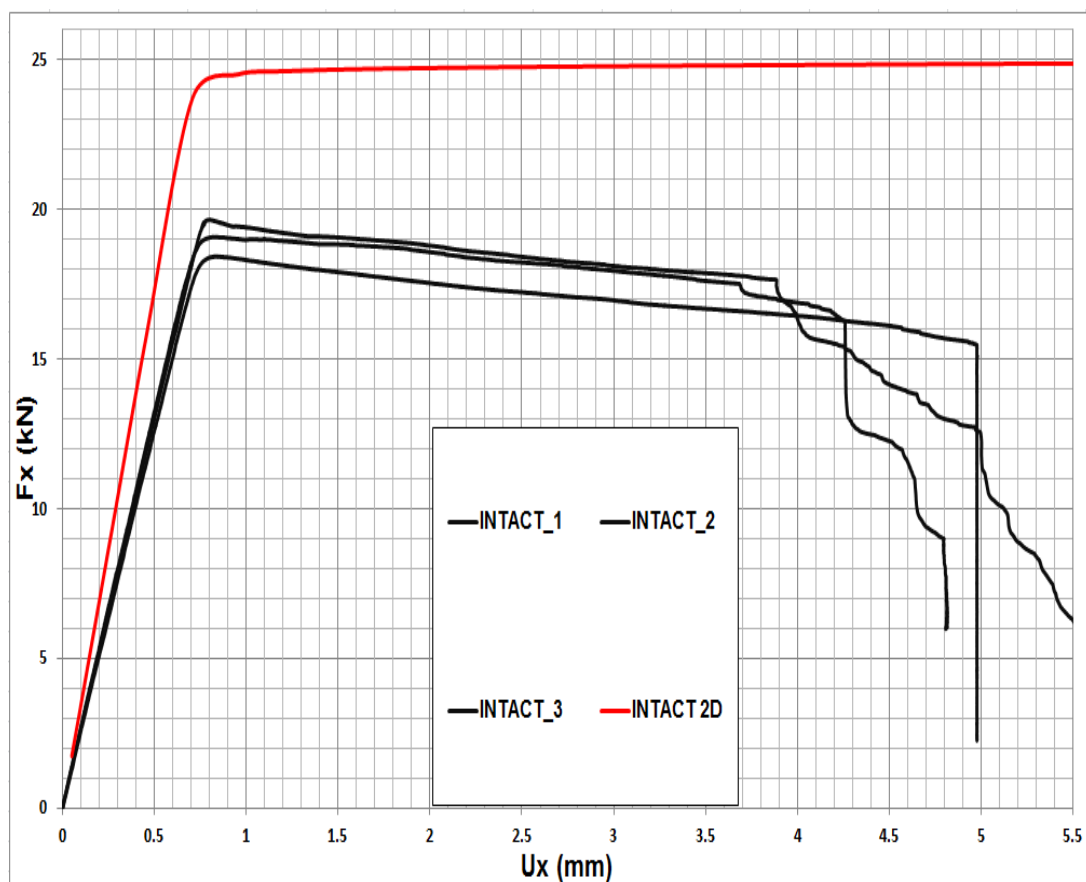


Εικόνα 3.89. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων σειράς B 300 με πειραματικά.

3.6.6.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά παρόμοια ακαμψία με τρία πειραματικά (ίδια ακαμψία με το B 300_1 αλλά ελαφρά μεγαλύτερη από τα άλλα δύο) ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει μέγιστο φορτίο κατά 3% περίπου μεγαλύτερο από το μέσο όρο των πειραματικών.
- Η καμπύλη του μοντέλου παρουσιάζει τη χαρακτηριστική μορφή με το πλατό που συναντήσαμε και στο μοντέλο της σειράς B 200 έναντι της έντονης οξείας μορφής των πειραματικών.
- Η απότομη πτώση του φορτίου στο μοντέλο ξεκινάει για $U_x \approx 1.3$ mm ενώ στα δοκίμια για 0.77 mm.

3.6.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕΙΡΑΣ INTACT



Εικόνα 3.90. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων σειράς INTACT με πειραματικά.

3.6.7.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

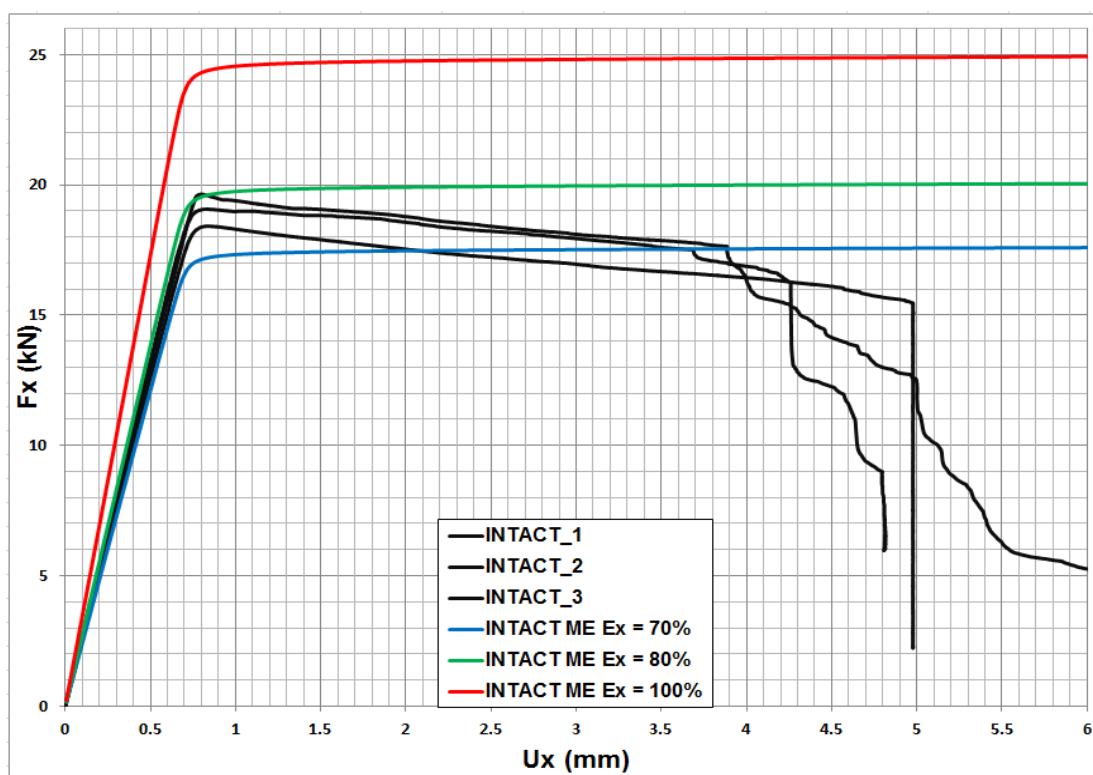
- Και για το άθικτο μοντέλο βλέπουμε ότι οι φορτίσεις που λαμβάνει είναι κατά 25 με 30% μεγαλύτερες των πειραματικών.
- Επίσης το μοντέλο συνεχίζει να λαμβάνει όλο και μεγαλύτερα φορτία χωρίς να παρουσιάζει σημεία κάμψης για το εύρος της ανάλυσης που έχουμε επιλέξει. Αντίθετα τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν μια κορύφωση για μετατόπιση κοντά στα 0.8mm και στη συνέχεια ακολουθούν μια φθίνουσα πορεία.

3.6.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση που ακολουθήσαμε μας έδειξε ότι σε γενικές γραμμές τα μοντέλα παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερη ακαμψία από τα δοκίμια ενώ και τα μέγιστα φορτία που επιτυγχάνουν φτάνουν σε αρκετά μεγαλύτερες τιμές. Οι μόνες σειρές μοντέλων που μπορούμε να πούμε ότι παρουσιάζουν μια κάπως καλύτερη σύμπτωση είναι οι A 300 και B 300. Για να αντιμετωπίσουμε τα συγκεκριμένα προβλήματα σύγκλισης αποφασίστηκε να αλλάξουμε την τιμή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού που αρχικά είχε οριστεί για την ανάλυση. Η διαδικασία που περιγράφει τον τρόπο επιλογής του καινούριου μέτρου ελαστικότητας ακλουθεί στη συνέχεια.

3.7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ως βάση για την επιλογή του μέτρου ελαστικότητας που θεωρήθηκε για τα μοντέλα, χρησιμοποιήθηκε το άθικτο μοντέλο το οποίο είναι αρκετά ευκολότερο στην ανάλυση του από τα υπόλοιπα. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιελάμβανε την ανάλυση ευαισθησίας του μέτρου ελαστικότητας, με σκοπό τη σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά του μοντέλου. Έγιναν τρεξίματα του μοντέλου για δύο περιπτώσεις μειωμένου μέτρου ελαστικότητας. Μία για $E' = 80\%E1$ και άλλη μια για $E' = 70\%E1$. Τα προκύπτοντα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά στην Εικόνα 3.91 που ακολουθεί.



Εικόνα 3.91. Έλεγχος ευαισθησίας του μέτρου ελαστικότητας στο άθικτο μοντέλο.

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι μια τιμή του μέτρου ελαστικότητας γύρω στο 75% της αρχικής θα δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο από άποψη ακαμψίας όσο και μέγιστης φόρτισης.

3.8 ΧΡΗΣΗ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

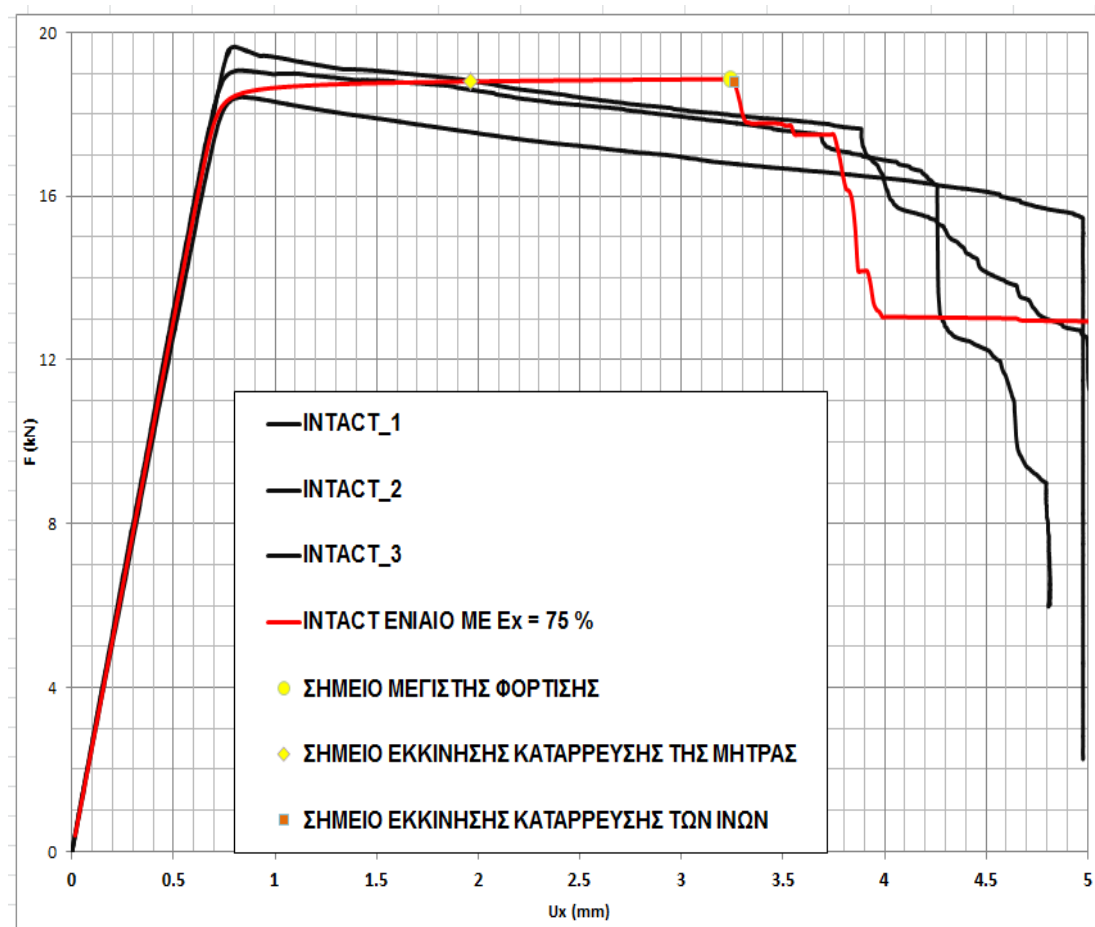
Στο στάδιο αυτό που αποτελεί και το τελικό της μελέτης μας , συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά που λαμβάνουμε μετά από την εφαρμογή στα μοντέλα κωδίκων που αντιλαμβάνονται και προσομοιώνουν τη σταδιακή αστοχία των στρώσεων. Οι κώδικες που χρησιμοποιήσαμε μας επιτρέπουν την αναγνώριση του είδους της αστοχίας που συμβαίνει στις στρώσεις , δηλαδή αν έχουμε κατάρρευση της μήτρας ή των ινών.

Η εφαρμογή κωδίκων που ερμηνεύουν τη σταδιακή αστοχία θεωρείται απαραίτητη για να επιτύχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Στις ενότητες που προηγήθηκαν παρατηρήθηκε πώς τα μοντέλα υπολογίζουν γενικά μεγαλύτερες φορτίσεις από τα πειραματικά ενώ και η αστοχία τους λαμβάνει χώρα για πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις από αυτές των πειραματικών. Θεωρήθηκε πώς υπεύθυνη για αυτή τη διαφοροποίηση ήταν η αδυναμία των μοντέλων να προσομοιώσουν την αστοχία των στρώσεων.

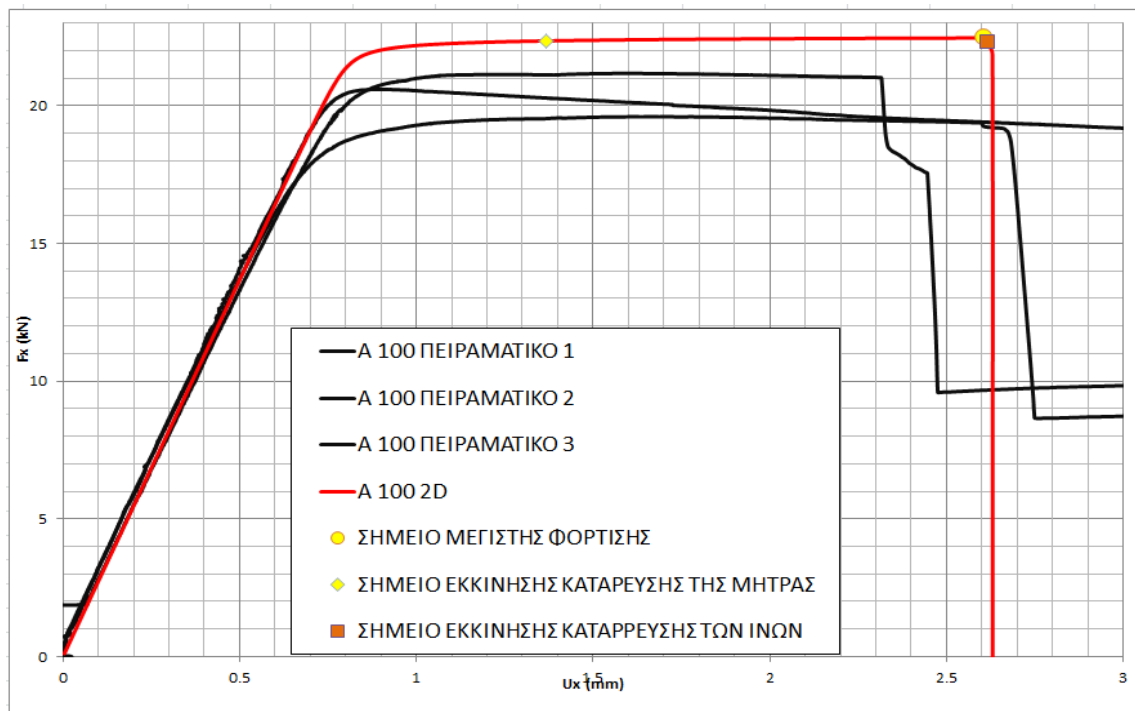
Ακολουθεί ξεχωριστή σύγκριση για κάθε σειρά όπου και γίνεται καταγραφή των παραπάνω. Τα μοντέλα στα οποία θα γίνει μελέτη της σταδιακής αστοχίας έχουν μέτρο ελαστικότητας μειωμένο κατά 25% σε σχέση με το αρχικό τους με βάση τα όσα αναφέραμε στην υποενότητα 3.7.

3.8.1 ΣΕΙΡΑ INTACT



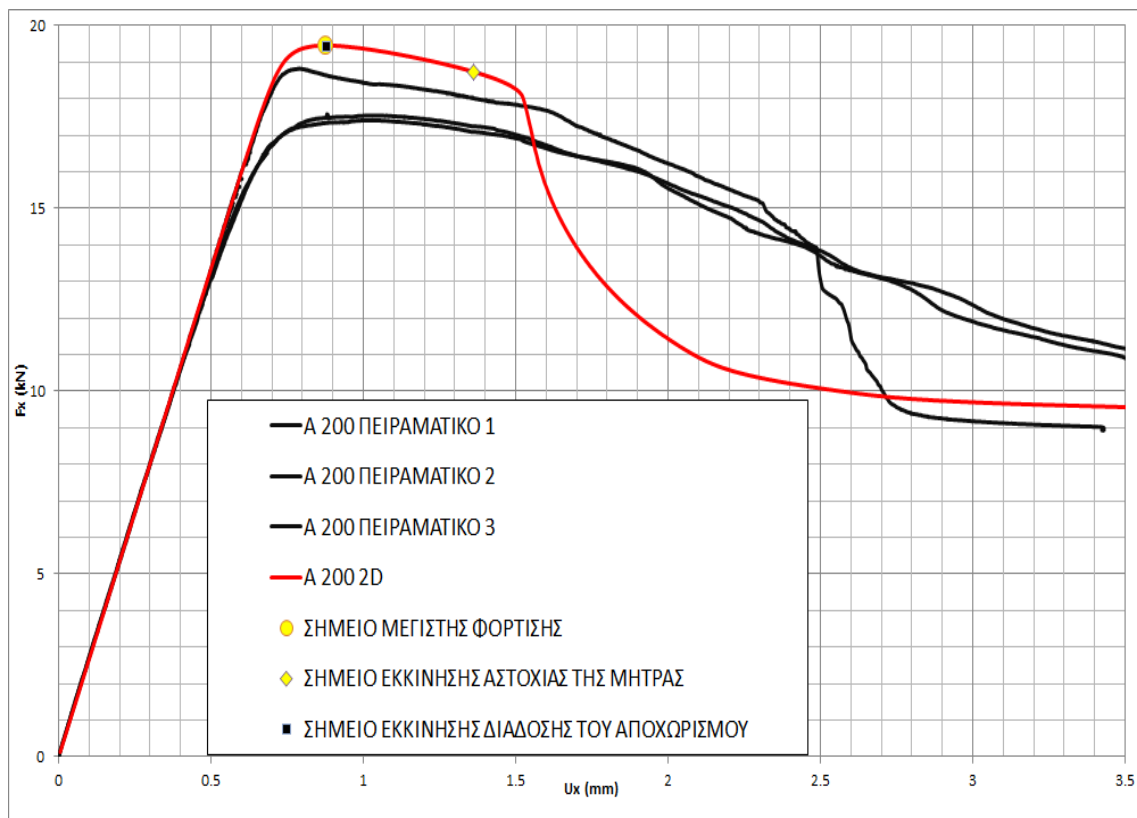
Εικόνα 3.93. Συμπεριφορά άθικτου μοντέλου με χρήση progressive damage analysis.

3.8.2 ΣΕΙΡΑ A 100



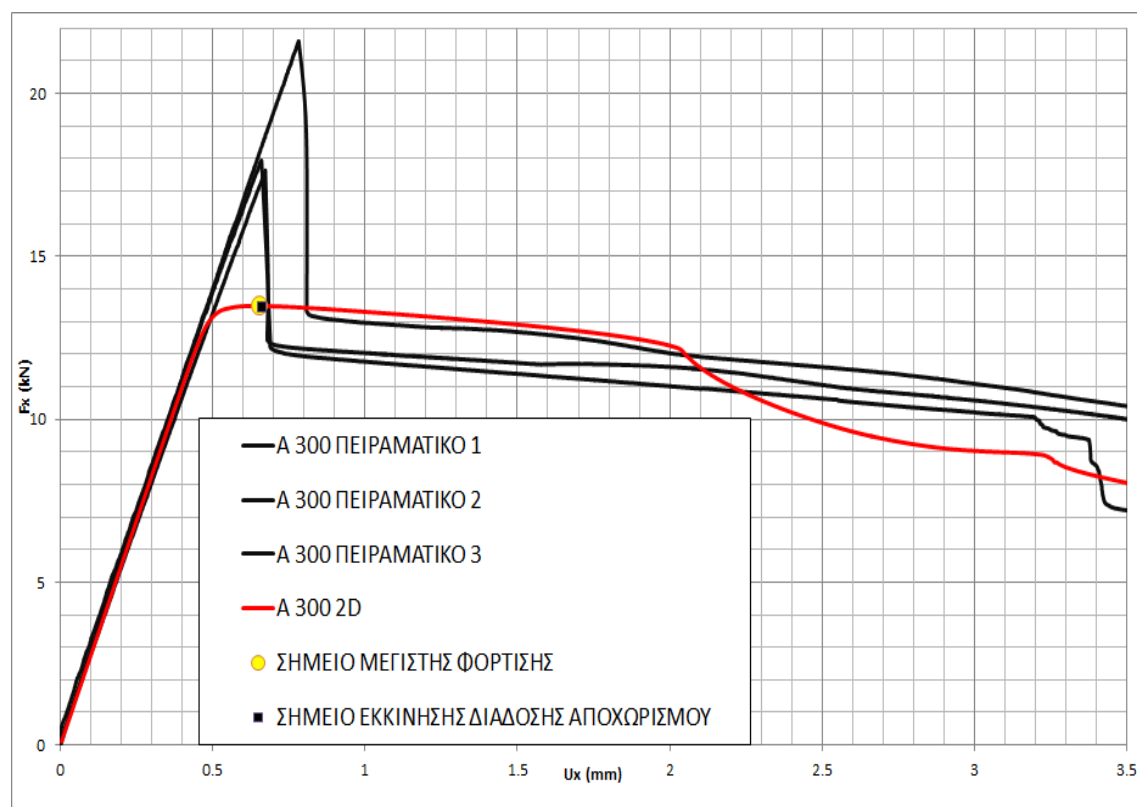
Εικόνα 3.94. Συμπεριφορά μοντέλου A 100 με χρήση progressive damage analysis.

3.8.3 ΣΕΙΡΑ A 200



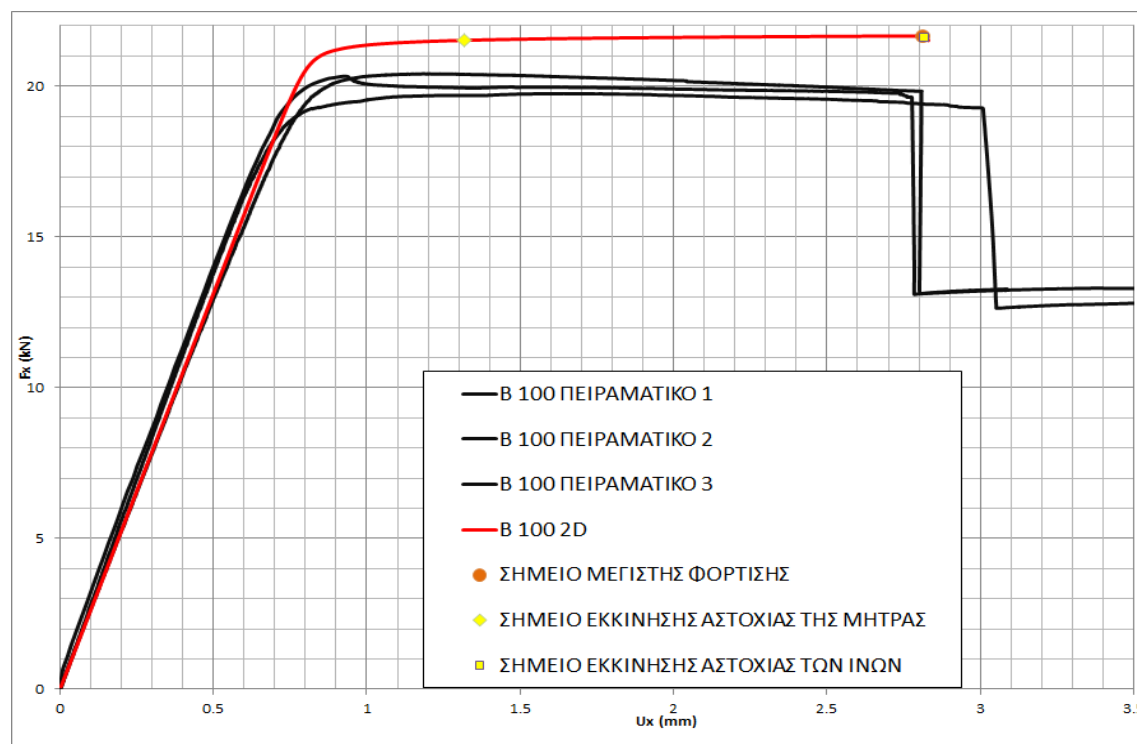
Εικόνα 3.95. Συμπεριφορά μοντέλου A 200 με χρήση progressive damage analysis.

3.8.4 ΣΕΙΡΑ Α 300



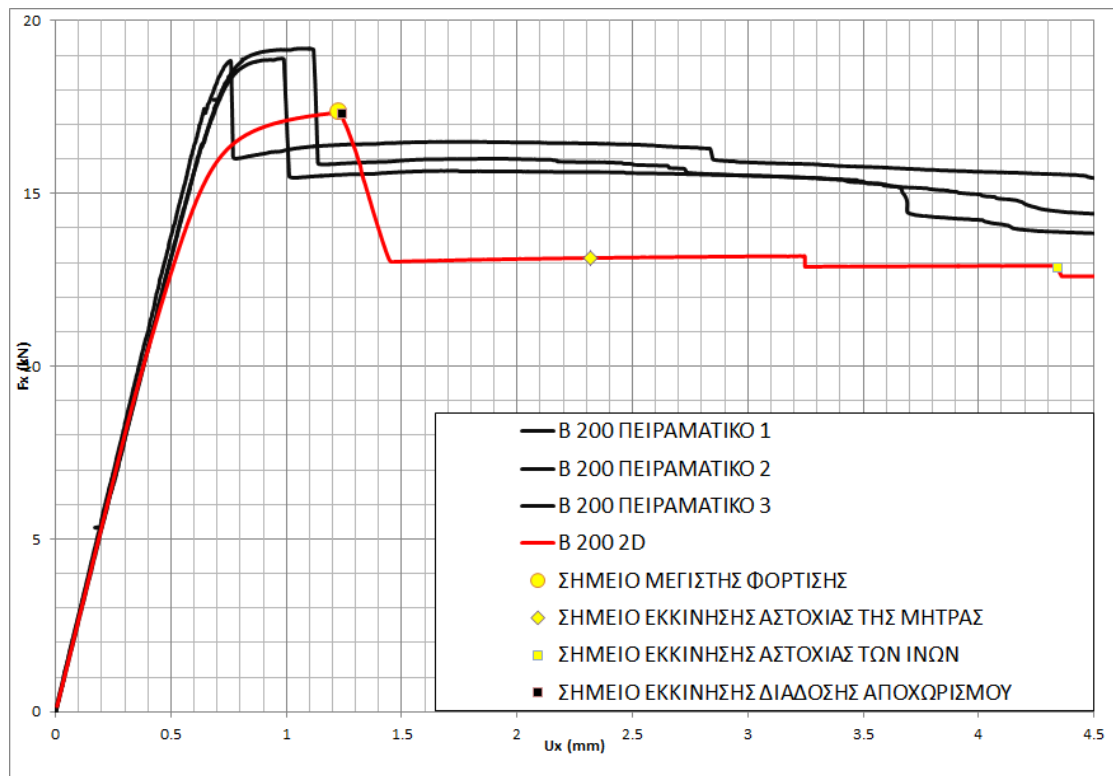
Εικόνα 3.96. Συμπεριφορά μοντέλου A 300 με χρήση progressive damage analysis.

3.8.5 ΣΕΙΡΑ Β 100



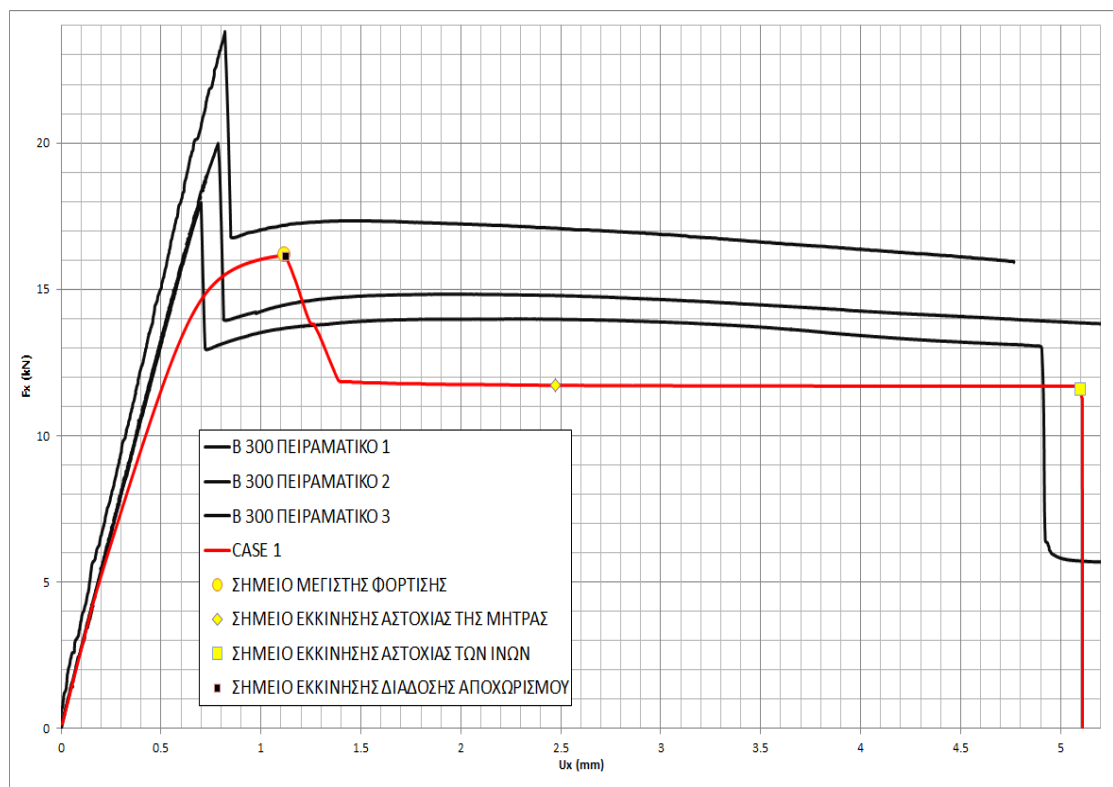
Εικόνα 3.97. Συμπεριφορά μοντέλου B 100 με χρήση progressive damage analysis.

3.8.6 ΣΕΙΡΑ B 200



Εικόνα 3.98. Συμπεριφορά μοντέλου B 200 με χρήση progressive damage analysis.

3.8.7 ΣΕΙΡΑ B 300



Εικόνα 3.99. Συμπεριφορά μοντέλου B 300 με χρήση progressive damage analysis.

3.8.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

- Γενικά παρατηρούμε ότι ενώ μπορεί να έχει ήδη εμφανιστεί αστοχία στη μήτρα , οι στρώσεις συνεχίζουν να δέχονται όλο και μεγαλύτερες φορτίσεις. Αντίθετα από τη στιγμή που θα εμφανιστεί αστοχία στις ίνες ,η αποφόρτιση που επακολουθεί είναι ραγδαία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς εξ ορισμού στα σύνθετα υλικά οι ίνες είναι αυτές που συμβάλλουν κατά κύριο λόγο στην αντοχή.
- Ο τρόπος που αστοχεί το άθικτο μοντέλο , με βάση πάντα το διάγραμμα δύναμης-αξονικής μετατόπισης (εικόνα 3.93) , φαίνεται να μοιάζει αρκετά με αυτό των πειραματικών , όσον αφορά την περιοχή στην οποία αρχίζει να αστοχεί έντονα. Βέβαια τα πειραματικά δοκίμια παρουσιάζουν μια μεγάλη περιοχή όπου αποφορτίζονται ομαλά και η οποία προηγείται της απότομης κατάρρευσης. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει με το άθικτο μοντέλο το οποίο δέχεται όλο και μεγαλύτερες φορτίσεις μέχρι τη στιγμή που αρχίζουν να αστοχούν οι ίνες του όποτε και καταρρέει έντονα.
- Για τα μοντέλα A 100 και B 100 η χρήση progressive damage analysis δίνει πολύ καλά αποτελέσματα καθώς τα μοντέλα ακολουθούν με πάρα πολύ καλή ακρίβεια τη συμπεριφορά των πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Το μοντέλο B 200 καταφέρνει να προσομοιώσει τη συμπεριφορά του αντίστοιχου πειραματικού όσον αφορά τον τρόπο που εξελίσσεται η φόρτιση. Ωστόσο υπάρχει μια διαφορά της τάξης του 10% στην τιμή των φορτίσεων.
- Στο B 300 πάλι η χρήση κωδίκων που αναγνωρίζουν τη σταδιακή αστοχία βοηθάει μόνο στη προσομοίωση της περιοχής που περιγράφει τα τελικά στάδια αστοχίας των δοκιμίων (για $U_x \geq 4.8\text{mm}$).
- Το εύρος της ανάλυσης που έχουμε επιλέξει για το δοκίμιο A 200 περιλαμβάνει την εμφάνιση αστοχίας μόνο για τη μήτρα. Θα πρέπει να ασκηθεί μεγαλύτερη θλιπτική μετατόπιση για να αστοχήσουν και οι ίνες.
- Στο μοντέλο A 300 φαίνεται πως πρέπει να ασκήσουμε μεγαλύτερη μετατόπιση για να αστοχήσει είτε η μήτρα είτε οι ίνες.
- Στα μοντέλα A 100 ,A 200 και B 100 έχουμε πρώτα αστοχία των στρώσεων και ύστερα του αποχωρισμού (delamination).
- Τέλος συμπεραίνουμε πως η μοντελοποίηση της σταδιακής αστοχίας δίνει καλύτερα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις όπου αστοχούν πρώτα οι στρώσεις των μοντέλων και ύστερα ο κολλητικός δεσμός.

Στη συνέχεια ακολουθεί συγκριτικός πίνακας όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των μοντέλων καθώς και των αντίστοιχων άθικτων δοκιμίων. Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται καταγραφή των σημείων μέγιστης φόρτισης τόσο για τα μοντέλα όσο και για τα δοκίμια καθώς και υπολογισμός των σημείων εκκίνησης διάδοσης του αποχωρισμού , εκκίνησης αστοχίας της μήτρας και εκκίνησης αστοχίας των ινών των μοντέλων.

Σειρά Μοντέλου	Πειραματικές τιμές	Αριθμητικές Τιμές			
		F_{max} (kN)	F_{max} (kN)	$F_{matrix_failure}$ (kN)	$F_{fiber_failure}$ (kN)
INTACT	19.057	18.859	18.800	18.793	-----
A 100	20.417	22.460	22.353	22.333	-----
A 200	17.946	19.453	18.737	-----	19.452
A 300	18.821	13.477	-----	-----	13.476
B 100	20.100	21.668	21.523	21.656	-----
B 200	19.000	17.349	13.135	12.860	17.335
B 300	20.660	16.169	11.723	11.599	16.156

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της σύνταξης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς του κολλητικού δεσμού που σχηματίζεται μεταξύ των στρώσεων ενός ινώδους σύνθετου υλικού. Στα πλαίσια αυτά κατασκευάζονται μοντέλα τα οποία βασιζόμενα στα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών προσπαθούν να περιγράψουν τη συμπεριφορά του φαινομένου του αποχωρισμού των στρώσεων. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα έτσι ώστε να αρχίσουν να αποχωρίζονται οι στρώσεις καθώς και ο τρόπος που τελικά θα αποχωριστούν. Επίσης μελετάται και η περίπτωση αστοχίας των ιδίων των στρώσεων.

Τα μοντέλα πάνω στα οποία βασίζεται η ανάλυση έχουν κατασκευαστεί με χρήση πεπερασμένων στοιχείων που τους παρέχουν τη δυνατότητα να ερμηνεύσουν όσο πιο πιστά γίνεται τη συμπεριφορά των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα για τη κατάρρευση μιας κατασκευής από σύνθετα. Αναλύοντας την επίδραση διαφόρων παραμέτρων μοντελοποίησης καταλήγουμε στο μοντέλο το οποίο περιγράφει καλύτερα τα πραγματικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μια κατασκευή από σύνθετα καθώς αυτή αστοχεί υπό την επίδραση συνεπίπεδης θλιπτικής φόρτισης.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της Μεθόδου Πεπερασμένων στοιχείων προέκυψαν τα εξής βασικά συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση των παραμέτρων μοντελοποίησης:

- 1) Η ύπαρξη πυκνού mesh οδηγεί σε ακριβέστερη μοντελοποίηση του τρόπου διάδοσης του αποχωρισμού μεταξύ των στρώσεων. Ειδικότερα όσο πιο αναλυτική είναι η μοντελοποίηση κατά τη διεύθυνση της διάδοσης του αποχωρισμού, τόσο γρηγορότερα ενεργοποιείται το φαινόμενο. Η επιλογή 400 στοιχείων κατά το διάμηκες δείχνει να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- 2) Η διακριτοποίηση της ανάλυσης σε περισσότερα sub steps δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα τα εξαγόμενα αποτελέσματα.
- 3) Η υιοθέτηση περισσότερων στρώσεων κατά το στάδιο της μοντελοποίησης παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις όσον αφορά τις μετατοπίσεις που απαιτούνται για την εκκίνηση της διάδοσης του U_x . Βέβαια η μοντελοποίηση με περισσότερες από 5 στρώσεις δεν δείχνει να προσφέρει κάποια σημαντικά οφέλη.
- 4) Από τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την περιοχή του κολλητικού δεσμού, σημαντική επίδραση δείχνει να έχει μόνο η μέγιστη ορθή τάση επαφής σ_{max} .
- 5) Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού επηρεάζει σημαντικά τις μέγιστες φορτίσεις που μπορούν να λάβουν τα μοντέλα. Παρατηρήθηκε ότι μια μείωση της τάξης του 75 % δίνει καλά αποτελέσματα για τη μελέτη που διεξάγουμε.

6) Η χρήση cohesive elements φαίνεται πώς χρησιμεύει πολύ σε περιπτώσεις μοντελοποίησης όπου παρουσιάζεται αστοχία με αποχωρισμό των στρώσεων ενός πολύστρωτου .

7) Η χρήση κωδίκων που αντιλαμβάνονται και εφαρμόζουν τη σταδιακή αστοχία των στρώσεων φαίνεται να είναι ουσιαστική σε περιπτώσεις που οι στρώσεις αστοχούν πριν από τον κολλητικό δεσμό , οπότε και η αντοχή του σύνθετου χαρακτηρίζεται ουσιαστικά από την αντοχή των στρώσεων. Αντίθετα σε περιπτώσεις όπου εμφανίζεται διάδοση του αποχωρισμού η σταδιακή αστοχία δεν εμφανίζει κάποια ιδιαίτερη χρησιμότητα καθώς τα μοντέλα έχουν ήδη αστοχήσει με διάδοση του αρχικού τεχνητού αποχωρισμού .

8) Αστοχία με αποχωρισμό των στρώσεων προκύπτει στα μοντέλα που φέρουν τεχνητό αποχωρισμό με μήκος ίσο ή μεγαλύτερο των 200 mm. Αντίθετα τόσο για το άθικτο μοντέλο όσο και για τα A 100 και B 100 παρουσιάζεται αστοχία των στρώσεων.

9) Γενικά φαίνεται πώς η τοποθέτηση του τεχνητού αποχωρισμού κοντά στην εξωτερική επιφάνεια οδηγεί σε γρηγορότερη εκκίνηση της διάδοσης του αποχωρισμού (για μικρότερα U_x).

4.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Με βάση τα όσα προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης , οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πώς η κατασκευή μοντέλων που θα φέρουν τεχνητούς αποχωρισμούς σε διάφορες περιοχές κατά το διάμηκες αλλά και κατά το εγκάρσιο , θα μπορούσε να βοηθήσει στη καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν στην αστοχία με λυγισμό , πολύστρωτων σύνθετων υλικών που βρίσκονται υπό την επίδραση θλιπτικών φορτίσεων.

Επίσης θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί η περίπτωση ύπαρξης περισσότερων από μία εστιών διάδοσης του αποχωρισμού (π.χ. μοντελοποίηση με κατασκευή 2 περιοχών αρχικού τεχνητού αποχωρισμού).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Ανουφαντής , Κ. (2012) , Analysis and Design of Composite-to-Metal Adhesively Bonded Joints, Διακτορική Διατριβή , Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Γαργανίδης , Γ. (2009) , Η Επίδραση του Αποχωρισμού των Στρώσεων στο Λυγισμό Πλακών από Σύνθετα Υλικά , Διπλωματική Εργασία , Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καρατζάς , Β. (2009) , Αριθμητική και Πειραματική Μελέτη Ενώσεων Σύνθετων και Μεταλλικών Υλικών , Διπλωματική Εργασία , Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κουσαθανάς , Α. (2010) , Πειραματική και Αριθμητική Μελέτη της Επίδρασης του Αποχωρισμού των Στρώσεων στον Λυγισμό Ινωδών Σύνθετων Υλικών , Διπλωματική Εργασία , Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παπάζογλου , Β. (1995) , Ναυπηγική Τεχνολογία , Σημειώσεις Μαθήματος , Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τσούβαλης και Ανουφαντής , (2011) , Determination of the fracture process zone under Mode I fracture in glass fiber composites , Journal of Composite Materials.

Τσούβαλης και Ανουφαντής , (2011) , Experimental and numerical investigation of Mode II fracture in fibrous reinforced composites , Journal of Composite Materials.

Τσούβαλης , Ν. (1998) , Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά , Σημειώσεις Μαθήματος , Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Διεθνής

Ansys Release 14 , (2011) , ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide.

Ansys Release 14 , (2011) , Basic Analysis Guide.

Ansys Release 14 , (2011) , Modeling and Meshinf Guide.

Ansys Release 14 , (2011) , Element Reference.

Bolotin , V.V , (1996) , Delaminations in composite structures: Its origin , buckling , growth and stability , Composite Part B-Engineering 27 (2) , p.p , 129-145.

Bolotin , V.V , (2001) , Mechanics of delaminations in laminate composite structures , Mechanics of Composite Materials 37 (5-6) , p.p , 367-380.

D.Trias , (2011) , Fracture mechanics for the structural design , Universitat de Girona.

Greenhagl , E. , Singh , S. , (1999) , Investigation of the failure mechanisms for delamination growth from embedded defects , Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials , Paris (France).

M D Banea and L F M da Silva , (2009) , Adhesively bonded joints in composite materials :An overview , Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part L: Journal of Materials Design and Applications.

Noberto Blanco Villaverde , (2004) , Variable mixed-mode delamination in composite laminates under fatigue conditions: testing and analysis , PhD Thesis , Universitat de Girona.

Qingda Yang and Brian Cox , Modelling damage evolution in laminated composites using cohesive zone models , Rockwell Scientific Company.

S.Li , M.D. Thouless , A.M. Waas , J.A. Schroeder , P.D. Zavattieri , (2005) , Mixed-mode cohesive-zone models for fracture of an adhesively bonded polymer-matrix composite , Engineering Fracture Mechanics , Elsevier.

S.Li , M.D. Thouless , A.M. Waas , J.A. Schroeder , P.D. Zavattieri , (2005) , Computing failure mechanisms in mixed-mode fracture of an adhesively bonded polymer-matrix composite , Engineering Fracture Mechanics , Elsevier.

S.Li , M.D. Thouless , A.M. Waas , J.A. Schroeder , P.D. Zavattieri , (2005) , Use of mode-I cohesive-zone models to describe the fracture of an adhesively-bonded polymer-matrix composite , Engineering Fracture Mechanics , Elsevier.

S.Rajendran and D.Q.Song , (1998) , Finite element modeling of delamination buckling of composite panel using Ansys , Proceedings of 2nd Asian Ansys user conference.

Strong, A.B. , (2002) , History of Composite Materials - opportunities and necessities , Brigham Young University.

Williams, T.O. & Addesio , F.L. , (1997) , A general theory for laminated plates with delaminations , International Journal of Solids and Structures , Vol. 34, No 16 , pg. 2003-2024.