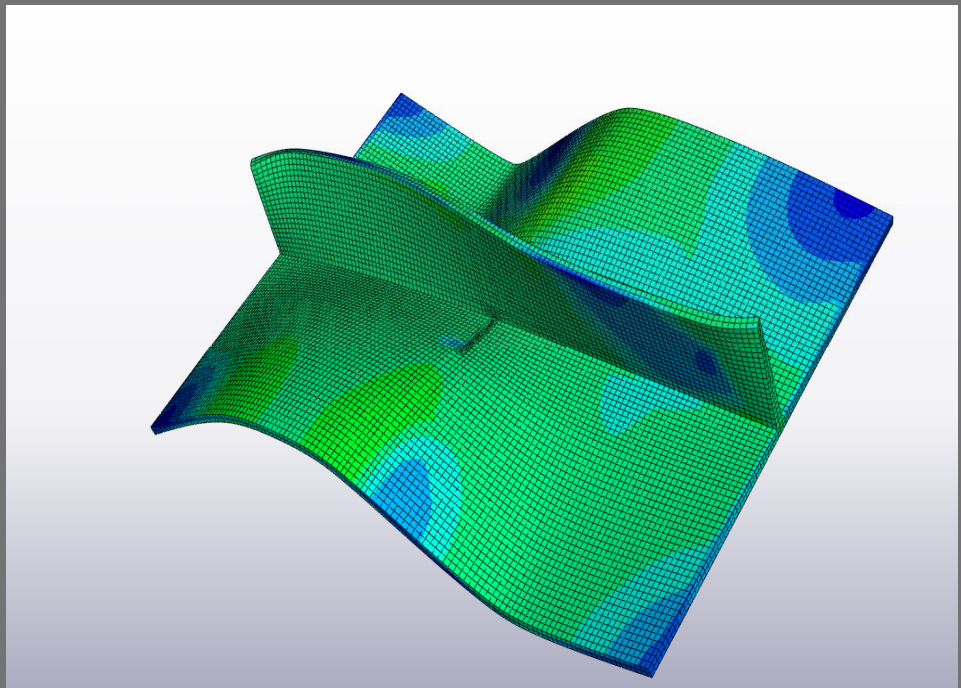


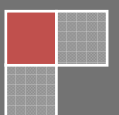
2007

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΡΗΓΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ
ΥΠΟ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ
[ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ]

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΑΡΓΑΡΙΤΗΣ



ΠΡΟΛΟΓΟΣ	XXVI
-----------------	-------------

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	XXIX
-----------------	-------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	- 1 -
-------------------	--------------

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ	- 1 -
--	--------------

ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	- 1 -
-------------------	--------------

1.1 Γενικά	- 1 -
------------	-------

1.2 Η φύση της αστοχίας	- 1 -
-------------------------	-------

1.3 Κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου	- 3 -
--	-------

1.4 Το υλικό κατασκευής των πλοίων και οι ιδιότητες αυτού	- 5 -
---	-------

1.4.1 Παραμένουσες τάσεις	- 6 -
---------------------------	-------

1.4.2 Αρχικές παραμορφώσεις – αποκλίσεις	- 8 -
--	-------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	- 14 -
-------------------	---------------

ΛΥΓΙΣΜΟΣ - ΘΡΑΥΞΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ	- 14 -
--	---------------

2.1 Γενικά	- 14 -
------------	--------

2.2 Έναρξη ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα	- 15 -
--	--------

2.3 Λυγισμός ενισχυμένων ελασμάτων	- 17 -
------------------------------------	--------

2.3.1 Μαθηματική προσέγγιση του λυγισμού	- 18 -
--	--------

2.3.2 Μετάβαση στο μη ελαστικό λυγισμό - κατάρρευση	- 23 -
---	--------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	- 30 -
-------------------	---------------

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ	
--	--

ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	- 30 -
-----------------------------	---------------

3.1 Γενικά	- 30 -
------------	--------

3.2 Στάδια της προσομοίωσης	- 31 -
-----------------------------	--------

3.3 Παρουσίαση των στοιχείων συνεχούς μέσου	- 33 -
---	--------

3.4 Μη γραμμική ανάλυση	- 39 -
-------------------------	--------

3.5 Συνοριακές συνθήκες	- 40 -
-------------------------	--------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 **- 44 -**

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	- 44 -
4.1 Γενικά	- 44 -
4.2 Γεωμετρικές διαστάσεις	- 44 -
4.3 Αρχικές ατέλειες	- 45 -
4.4 Συνοριακές συνθήκες	- 52 -
4.5 Ανάπτυξη του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων	- 57 -
4.6 Προσομοίωση στην περιοχή της ρωγμής	- 58 -
4.7 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων – Διαδικασία υπολογισμών	- 59 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 **- 63 -**

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΠΛΑΤΟΣ $A/B=1$	- 63 -
5.1 Γενικά	- 63 -
5.2 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1$ χωρίς ρωγμές	- 64 -
5.2.1 Μοντέλο $a/b=1$ με τέσσερα (4) στοιχεία κατά το πάχος	- 64 -
5.2.2 Έλεγχος επιρροής της συνολικής παραμόρφωσης της κατασκευής (global deflection)	- 67 -
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων $a/b=1$ χωρίς ρωγμές	- 71 -
5.4 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=72\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό	- 78 -
5.5 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=144\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό	- 83 -
5.6 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=72\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό και ρωγμή $c_w=14.7\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	- 86 -
5.7 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=144\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό και ρωγμή $c_w=14.7\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	- 93 -
5.8 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=72\text{mm}$ ασύμμετρη ως προς το ενισχυτικό από $y=228\text{mm}$ έως $y=300\text{mm}$.	- 100 -
5.8 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=144\text{mm}$ ασύμμετρη ως προς το ενισχυτικό από $y=228\text{mm}$ έως $y=300\text{mm}$.	- 105 -

5.9 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=72\text{mm}$ ασύμμετρη ως προς το ενισχυτικό από $y=228\text{mm}$ έως $y=300\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή ενισχυτικού	- 111 -
5.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Αξιολόγηση – Συμπεράσματα	- 122 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - 131 -

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΠΛΑΤΟΣ $A/B=1.5$	- 131 -
6.1 Γενικά	- 131 -
6.2 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ χωρίς ρωγμές	- 132 -
6.3 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 138 -
6.4 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με συμμετρική ρωγμή $c=96\text{mm}$	- 145 -
6.5 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$ και ρωγμή $c=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	- 152 -
6.6 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με συμμετρική ρωγμή $c=96\text{mm}$ και ρωγμή $c=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	- 159 -
6.7 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ από $y=152\text{mm}$ και $y=200\text{mm}$	- 165 -
6.8 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$ από $y=152\text{mm}$ και $y=200\text{mm}$	- 171 -
6.9 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ από $y=152\text{mm}$ και $y=200\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό	- 176 -
6.10 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$ από $y=152\text{mm}$ και $y=200\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό	- 181 -
6.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Αξιολόγηση – Συμπεράσματα	- 186 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - 198 -

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΠΛΑΤΟΣ $A/B=3$	- 198 -
7.1 Γενικά	- 198 -
7.2 Ενισχυμένα ελάσματα $a/b=3$ χωρίς ρωγμή	- 199 -
7.2.1 Ενισχυμένο έλασμα με αρχική παραμόρφωση ενός (1) ημικύματος ($n=1$)-	199 -

7.2.2	Ενισχυμένα ελάσματα με αρχική παραμόρφωση πολλαπλών κυματώσεων (n=3,5) συμμετρικής μορφής στα δύο (2) τμήματα της πλάκας	- 201 -
7.2.3	Ενισχυμένα ελάσματα με αρχική παραμόρφωση πολλαπλών κυματώσεων (n=3,5) αντισυμμετρικής μορφής στα δύο (2) τμήματα της πλάκας.	- 204 -
7.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ της συμμετρικής και αντισυμμετρικής μορφής κυματώσεων αρχικών μετατοπίσεων	- 207 -
7.3	Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με συμμετρική ρωγμή $c=24\text{mm}$	- 210 -
7.4	Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 215 -
7.5	Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με συμμετρική ρωγμή $c=24\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	- 220 -
7.6	Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	- 225 -
7.7	Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=24\text{mm}$ στην πλάκα από $y=76\text{mm}$ έως $y=100\text{mm}$.	- 229 -
7.8	Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ στην πλάκα από $y=76\text{mm}$ έως $y=100\text{mm}$.	- 234 -
7.9	Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=24\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	- 238 -
7.10	Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	- 243 -
7.11	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα - Αξιολόγηση - Συμπεράσματα	-248-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8		- 260 -

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑ ΛΟΓΟ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΠΛΑΤΟΣ (ASPECT RATIO) ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ		- 260 -
8.1	Γενικά	- 260 -
8.2	Σύγκριση μέγιστης αντοχής	- 260 -
8.3	Σύγκριση ισοδύναμων πλατών πλάκας	- 263 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 **- 267 -**

**ΘΕΩΡΗΣΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΩΣ ΜΕΡΟΥΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑΣ** **- 267 -**

9.1 Γενικά - 267 -

9.2 Ανάλυση ενισχυμένων ελασμάτων (stiffened plating) με πεπερασμένα
στοιχεία - 267 -

9.3 Συμπεράσματα – Αξιολόγηση των μεθόδων - 275 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 **- 277 -**

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ **- 277 -**

10.1 Συμπεράσματα - 277 -

10.2 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση - 279 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **- 282 -**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

XXXII

E.1 . Ενισχυμένα ελάσματα στον πυθμένα πλοίου XXIX

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- 1 -

1.1 Ορολογία ενισχυμένων ελασμάτων..... - 4 -

1.2 Συνήθεις διατομές σε ενισχυμένα ελάσματα - 4 -

1.4.1 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων..... - 7 -

1.4.2 Διάφορες μορφές αρχικών ατελειών λόγω συγκόλλησης..... - 9 -

1.4.3 Μορφή αρχικών ατελειών για πρακτικούς λόγους..... - 9 -

1.4.4 Μορφές αρχικών αποκλίσεων βάσει μετρήσεων σε εμπορικά πλοία - 10 -

1.4.5 Εξιδανίκευση μορφής αρχικών αποκλίσεων κατά το πλάτος
κατασκευαστικού στοιχείου - 10 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- 14 -

2.1 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για τον έλεγχο υπέρβασης του φορτίου
σχεδιασμού - 14 -

2.2 Καμπύλες S – N - 17 -

2.3 Τύποι προσανατολισμού ρωγμών σε ενισχυτικά ελάσματα - 18 -

2.4 Πλάκα με απλή στήριξη σε ομοιόμορφη συμπίεση - 19 -

2.5 Διάγραμμα του συντελεστή λυγισμού c σε σχέση με aspect ratio - 20 -

2.6 Διάκριση των περιοχών λυγισμού στην πλάκα - 24 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- 30 -

3.1 Παράδειγμα διακριτοποίησης μιας πλατφόρμας με πεπερασμένα
στοιχεία - 32 -

3.2 Διακριτοποίηση κατασκευής με στοιχεία continuum elements 20 κόμβων
δευτέρου βαθμού. - 33 -

3.3 Μεταφορά από το γεωμετρικό στο φυσικό σύστημα συντεταγμένων - 34 -

3.4 Διαφοροποίηση συντοριακών συνθηκών σε ελάσματα κατασκευαστικού στοιχείου (bays) υπό διαμήκη συμπίεση	- 40 -
3.5 Σταδιακή διαφοροποίηση της παραμόρφωσης σε πλάκα υπό ομοαξονική συμπίεση καθώς προστίθενται συντοριακές συνθήκες απλής στήριξης στις αφόρτιστες πλευρές	- 41 -
3.6 Το ενισχυμένο έλασμα ως μέρος μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας.....	- 42 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 **- 44 -**

4.1 Μορφή αρχικών ατελειών στην πλάκα ($a/b=1$).....	- 46 -
4.2 Μορφή αρχικών ατελειών στο ενισχυτικό ($a/b=1$)	- 46 -
4.3 Λεπτομέρεια αρχικής ατέλειας για $a/b=1.5$	- 47 -
4.4 Συμμετρική μορφή αρχικής παραμόρφωσης με τρία (3) κύματα για aspect ratio $a/b=3$	- 48 -
4.5 Συμμετρική μορφή αρχικής παραμόρφωσης με πέντε (5) κύματα για aspect ratio $a/b=3$	- 49 -
4.6 Αντίστοιχη αντισυμμετρική μορφή παραμόρφωσης με πέντε (5) κύματα. ...	- 49 -
4.7 Παραμόρφωση των πεπερασμένων στοιχείων του ενισχυτικού λόγω global deflection.....	- 52 -
4.8 Κόμβοι στοιχείων της πλευράς $y=0$ με κοινή μετατόπιση u_y	- 53 -
4.9 Επιβολή φορτίου στην πλευρά $x=a$	- 54 -
4.10 Φόρτιση στοιχείων κατά το πάχος της πλάκας στους κόμβους πλευράς .	- 55 -
4.11 Φόρτιση στοιχείων κατά το πάχος της πλάκας στους κεντρικούς κόμβους της πλευράς	- 55 -
4.12 Μετατόπιση u_x στα στοιχεία πλάκας – ενισχυτικού ($x=a$).....	- 56 -
4.14 Σχετική κίνηση των δύο επιφανειών στο άκρο της ρωγμής (συμπίεση στην διεύθυνση $0x$).....	- 59 -
4.15 Μέσες τάσεις στους κόμβους των στοιχείων	- 60 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 **- 63 -**

5.1 Λεπτομέρεια μοντέλου $a/b=1$ με τέσσερα στοιχεία στο πλάτος.....	- 65 -
5.2 Παραμορφωμένη κατασκευή στο τέλος της φόρτισης.....	- 65 -

5.3 Σύγκριση μέγιστης αντοχής στο έλασμα με διαφοροποίηση των στοιχείων κατά το πάχος.....	- 66 -
5.4 Σύγκριση μέγιστης αντοχής στο ενισχυτικό με διαφοροποίηση των στοιχείων κατά το πάχος.....	- 66 -
5.5 Σύγκριση συνολικής μέγιστης αντοχής με διαφοροποίηση των στοιχείων κατά το πάχος.....	- 67 -
5.6 Μοντέλο $a/b=1$ με μηδενικό global deflection.....	- 68 -
5.7 Μοντέλο $a/b=1$ με $w_{op}=(1/4)w_{os}$	- 68 -
5.8 Μοντέλο $a/b=1$ με $w_{op}=(1/2)w_{os}$	- 69 -
5.9 Επίδραση global deflection στη συνολική αντοχή.....	- 69 -
5.10 Μείωση της μέγιστης αντοχής με την αύξηση της συνολικής παραμόρφωσης.....	- 70 -
5.11 Διαφοροποίηση βέλους κάμψης U3 στη θέση $y=0$ με αλλαγή του global deflection σε χρόνο φόρτισης $E11/E11(0)=1.018$	- 70 -
5.12 Πλαστική παραμόρφωση κατασκευής (μεταβλητή PEEQ) για $E11/E11(0)=0.7636$	- 71 -
5.13 Πλαστική παραμόρφωση κατασκευής (μεταβλητή PEEQ) για $E11/E11(0)=1.018$	- 72 -
5.14 Πλαστική παραμόρφωση κατασκευής (μεταβλητή PEEQ) για $E11/E11(0)=1.2726$	- 72 -
5.15 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα $a/b=1$	- 73 -
5.16 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους b_e ανά στάδιο φόρτισης.....	- 74 -
5.17 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης.....	- 74 -
5.18 Κατανομή της τάσεως στη φορτισμένη πλευρά με αναφορά στο Σχ.5.16.....	- 75 -
5.19 Κατανομή της τάσεως στη φορτισμένη πλευρά με αναφορά στο Σχ.5.17..	-75-
5.20 Κατανομή U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	- 76 -
5.21 Κατανομή U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	- 76 -
5.22 Συνολική πλάτυνση ανά στάδιο φόρτισης.....	- 77 -
5.23 Λεπτομέρεια ρωγμής $c=72\text{mm}$ στην πλάκα συμμετρική ως προς το ενισχυτικό.....	- 78 -
5.24 Πλαστικοποίηση για $E11/E11(0)=1.2989$	- 78 -
5.25 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος με ρωγμή $c=72\text{mm}$ στο τέλος της φόρτισης.....	- 79 -

5.26 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό.	79 -
5.27 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$	80 -
5.28 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$	81 -
5.29 Μεταβολή της πλάτυνσης της πλάκας με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$	81 -
5.30 Σύγκριση βέλων κάμψης U3 ελάσματος χωρίς ρωγμή με το αντίστοιχο με ρωγμή $c=72\text{mm}$ για την πλευρά $y=0$	82 -
5.31 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος με ρωγμή $c=144\text{mm}$ στο τέλος της φόρτισης.....	83 -
5.32 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό.	84 -
5.33 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=144\text{mm}$	85 -
5.34 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=144\text{mm}$	85 -
5.35 Μεταβολή της πλάτυνσης της πλάκας με συμμετρική ρωγμή $c=144\text{mm}$..	86 -
5.36 Προσομοίωση ρωγμής στο ενισχυτικό	87 -
5.37 Πλαστικοποίηση για $E_{11}/E_{11(0)}=0.8399$	87 -
5.38 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμές $c=72\text{mm}$ συμμετρική και $c_w=14.7\text{mm}$	88 -
5.39 Σύγκριση των περιπτώσεων ρηγματοποιημένης πλάκας $c=72\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό.	88 -
5.39 Σύγκριση των συνολικών ισοδύναμων πλατών για τα μοντέλα με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού	89 -
5.40 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης	90 -
5.41 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού	91 -
5.42 Διακύμανση βέλων κάμψης U3 στα ίδια επίπεδα συμπίεσης σε έλασμα $c=72\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού για $y=0$	92 -
5.43 Διακύμανση βέλων κάμψης U3 στα ίδια επίπεδα συμπίεσης σε έλασμα $c=72\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού για $y=b$	92 -

5.44 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος με ρωγμή $c=144\text{mm}$ με επιπλέον ρωγμή $c_w=14.7\text{mm}$ στο ενισχυτικό.....	- 93 -
5.45 Ανάπτυξη της πλαστικής ροής στα άκρα των ρωγμών με την αύξηση του φορτίου συμπίεσης	- 94 -
5.46 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμές $c=144\text{mm}$ συμμετρική και $c_w=14.7\text{mm}$	- 95 -
5.47 Σύγκριση της συνολικής αντοχής ρηγματοποιημένης πλάκας $c=144\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό.....	- 95 -
5.48 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμές $c=144\text{mm}$ και $c_w=14.7\text{mm}$	- 96 -
5.49 Μεταβολή ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης για μοντέλο με ρωγμή $c=144\text{mm}$ και $c_w=14.7\text{mm}$	- 97 -
5.50 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική ρωγμή $c=144\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού.....	- 97 -
5.51 Έναρξη επαφής σημείων της ρωγμής της κατασκευής με ρωγμές σε πλάκα $c=144\text{mm}$ συμμετρική και στο ενισχυτικό $c_w=14.7\text{m}$	- 98 -
5.52 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού.....	- 98 -
5.53 Διακύμανση βέλων κάμψης U3 στα ίδια επίπεδα συμπίεσης σε έλασμα $c=144\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού για $y=0$	- 99 -
5.54 Διακύμανση βέλων κάμψης U3 στα ίδια επίπεδα συμπίεσης σε έλασμα $c=144\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού για $y=b$	- 99 -
5.55 Απεικόνιση ρωγμής $c=72\text{mm}$ στο ένα τμήμα της πλάκας	- 100 -
5.56 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72\text{mm}$ στη μία πλευρά της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2$	- 101 -
5.57 Σύγκριση συνολικής αντοχής μεταξύ των κατασκευών με ρωγμή μήκους $c=72\text{mm}$ στη μία πλευρά/ δύο πλευρές της πλάκας	- 102 -
5.58 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72\text{mm}$ στο ένα τμήμα της πλάκας	- 103 -
5.59 Διακύμανση των ισοδύναμων πλατών για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72\text{mm}$ στο ένα τμήμα της πλάκας	- 103 -
5.60 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=72\text{mm}$ στην πλάκα.....	- 104 -

5.61 Σύγκριση βελών κάμψης U3 στην πλευρά $y=0$ για συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=72\text{mm}$ στην πλάκα.....	- 104 -
5.62 Σύγκριση βελών κάμψης U3 στην πλευρά $y=b$ με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=72\text{mm}$ στην πλάκα.....	- 105 -
5.63 Κατάσταση ρωγμής σε θέση $(a/2, b/2-t_w)$ στο τέλος της φόρτισης	- 106 -
5.64 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144\text{mm}$ στη μία πλευρά της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2$	- 107 -
5.65 Σύγκριση συνολικής αντοχής μεταξύ των κατασκευών με ρωγμή μήκους $c=144\text{mm}$ στη μία πλευρά/ δύο πλευρές της πλάκας	- 107 -
5.66 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144\text{mm}$ στο ένα τμήμα της πλάκας	- 108 -
5.67 Διακύμανση των ισοδύναμων πλατών για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144\text{mm}$ στο ένα τμήμα της πλάκας	- 109 -
5.68 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=144\text{mm}$ στην πλάκα.	- 109 -
5.69 Σύγκριση U3 σε τρία (3) στάδια φόρτισης μεταξύ της ασύμμετρης/ συμμετρικής ρωγμής στην πλάκα $c=144\text{mm}$ για $y=0$	- 110 -
5.70 Σύγκριση U3 σε τρία (3) στάδια φόρτισης μεταξύ της ασύμμετρης/ συμμετρικής ρωγμής στην πλάκα $c=144\text{mm}$ για $y=b$	- 111 -
5.71 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια ρωγμής $c=72\text{mm}$ $c_w=14.7\text{mm}$	- 112 -
5.72 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72\text{mm}$ στην πλευρά από $y=0$ έως $y=b/2$ και $c_w=14.7\text{mm}$	- 113 -
5.73 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72\text{mm}$ στην πλάκα, επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό $c_w=14.7\text{mm}$...	- 114 -
5.74 Διακύμανση των ισοδύναμων πλατών για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72\text{mm}$ στην πλάκα και επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό $c_w=14.7\text{mm}$	- 114 -
5.75 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών στο τμήμα της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ για τις περιπτώσεις με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό	- 115 -
5.76 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών στο τμήμα της πλάκας από $y= b/2+t_w$ έως $y=b$ για τις περιπτώσεις με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό	- 115 -
5.77 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με χωρίς/ με ρωγμή ενισχυτικού	- 116 -
5.78 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ με/ άνευ ρωγμή ενισχυτικού	- 116 -
5.79 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=b$ με/ άνευ ρωγμή ενισχυτικού	- 117 -

5.80 Απεικόνιση της κίνησης των δύο επιφανειών της ρωγμής	118 -
5.81 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή c=144mm στην πλευρά από $y=0$ έως $y=b/2$ και $c_w=14.7\text{mm}$	119 -
5.82 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή c=144mm στην πλάκα, επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό $c_w=14.7\text{mm}$. -	120 -
5.83 Διακύμανση των ισοδύναμων πλατών για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή c=144mm στην πλάκα και επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό $c_w=14.7\text{mm}$	120 -
5.84 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών στο τμήμα της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ για τις περιπτώσεις με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό	121 -
5.85 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών στο τμήμα της πλάκας από $y= b/2+t_w$ έως $y=b$ για τις περιπτώσεις με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό	121 -
5.86 Διάγραμμα μέγιστης αντοχής προς το μήκος της ρωγμής για το λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=1$	122 -
5.87 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης της πλάκας για συμμετρική ρωγμή	123 -
5.88 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυτικού για συμμετρική ρωγμή	123 -
5.89 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης της πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή.....	124 -
5.90 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυτικού για ασύμμετρη ρωγμή.....	124 -
5.91 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης της πλάκας για ρωγμή $c=72\text{mm}$	125 -
5.92 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυτικού για ρωγμή $c=72\text{mm}$	125 -
5.93 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης της πλάκας για ρωγμή $c=144\text{mm}$	126 -
5.94 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυτικού για ρωγμή $c=144\text{mm}$	126 -
5.95 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών για ρωγμή μήκους $c=72\text{mm}$	127 -
5.96 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών για ρωγμή μήκους $c=144\text{mm}$	128 -
5.97 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών για όλα τα μοντέλα με $a/b=1$	128 -
5.98 Σύγκριση κατανομής τάσεως N_{xx} στη φορτισμένη πλευρά.....	128 -
5.99 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης κατά την ανάλυση.....	129 -
5.100 Κατάσταση της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης όλων των μοντέλων .-	130 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

- 131 -

6.1 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1.5$ άνευ ρωγμής	132 -
6.2 Πλαστική ροή στην εξέλιξη της συμπίεσης.....	133 -
6.3 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$	134 -
6.4 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$	135 -

6.5 Μεταβολή ισοδυνάμων πλατών στα δύο τμήματα της πλάκας.....	135 -
6.6 Μεταβολή του βέλους κάμψης U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης.	136 -
6.7 Μεταβολή του βέλους κάμψης U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης.	137 -
6.8 Μεταβολή του βέλους κάμψης U_2 στο ενισχυτικό σε διαδοχική φόρτιση .-	137 -
6.10 Λεπτομέρεια ρωγμής $c=48\text{mm}$ (α) Στην αρχή της φόρτισης (β) Τελική κατάσταση.....	139 -
6.11 Τελική κατάσταση πλαστικοποίησης(μέγεθος P_{EEQ}) στη ρωγμή.....	139 -
6.12 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή συμμετρική $c=48\text{mm}$ στην πλάκα.....	140 -
6.13 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=48\text{mm}$ συμμετρική	141 -
6.14 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας	141 -
6.15 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	142 -
6.16 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	142 -
6.17 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή	143 -
6.18 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή	143 -
6.19 Διακύμανση U_2 στο ενισχυτικό σε διαδοχικά φορτία.....	144 -
6.20 Σύγκριση U_2 στο ενισχυτικό για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή -	144 -
6.21 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης για μοντέλο με/ χωρίς ρωγμή	145 -
6.22 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1$ με ρωγμή $c=96\text{mm}$	146 -
6.23 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή συμμετρική $c=96\text{mm}$ στην πλάκα.....	146 -
6.24 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=96\text{mm}$ συμμετρική	147 -
6.25 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας.....	148 -
6.26 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	148 -
6.27 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	149 -
6.28 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή	149 -
6.29 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή	150 -

6.30 Σύγκριση U2 στο ενισχυτικό για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c/b=0.12$ και $c/b=0.24$	- 151 -
6.31 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης μοντέλου με ρωγμή $c=96\text{mm}$	- 151 -
6.32 Πλαστική ροή σε τομή της ρωγμής πλάκας – ενισχυτικού.....	- 152 -
6.33 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή συμμετρική $c=48\text{mm}$ στην πλάκα και $c_w=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό.....	- 153 -
6.34 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=48\text{mm}$ συμμετρική και ρωγμή $c_w=9.798$ στο ενισχυτικό	- 154 -
6.35 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας.....	- 154 -
6.36 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	- 155 -
6.37 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	- 155 -
6.38 Σύγκριση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=48\text{mm}$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού.....	- 156 -
6.39 Σύγκριση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=48\text{mm}$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού.....	- 156 -
6.40 Σύγκριση U2 στο ενισχυτικό για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή πλάκας $c=48\text{mm}$ και με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό (επιλεγμένα στάδια φόρτισης) .	- 157 -
6.41 Τελική μορφή διακύμανσης U2 (ως 6.40).....	- 157 -
6.42 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με ρωγμή $c=48\text{mm}$ και με/ άνευ ρωγμή στο ενισχυτικό	- 158 -
6.43 Λεπτομέρεια ρωγμής $c=96\text{mm}/ c_w=9.798\text{mm}$ στην αρχή και στο τέλος της φόρτισης	- 159 -
6.44 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή συμμετρική $c=96\text{mm}$ στην πλάκα και $c_w=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό.....	- 160 -
6.45 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=96\text{mm}$ συμμετρική και ρωγμή $c_w=9.798$ στο ενισχυτικό	- 161 -
6.46 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας.....	- 161 -
6.47 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	- 162 -
6.48 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	- 162 -
6.49 Σύγκριση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=96\text{mm}$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού.....	- 163 -
6.50 Σύγκριση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=96\text{mm}$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού.....	- 163 -
6.51 Διακύμανση βέλους κάμψης U2 στο ενισχυτικό	- 164 -

6.52 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με ρωγμή $c=96\text{mm}$ και με/ άνευ ρωγμή στο ενισχυτικό	- 164 -
6.53 Λεπτομέρεια ασύμμετρης ρωγμής $c=48\text{mm}$	- 165 -
6.54 Πλαστική ροή στην περιοχή του ενισχυτικού άνωθεν της ασύμμετρης ρωγμής	- 165 -
6.55 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή ασύμμετρη $c=48\text{mm}$	- 166 -
6.56 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=48\text{mm}$ ασύμμετρη.....	- 167 -
6.57 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας.....	- 167 -
6.58 Διακύμανση $U3$ στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	- 168 -
6.59 Διακύμανση $U3$ στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	- 168 -
6.60 Σύγκριση $U3$ στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με ασύμμετρη/ συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 169 -
6.61 Σύγκριση $U3$ στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ για ενισχυμένο έλασμα με ασύμμετρη/ συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 169 -
6.62 Διακύμανση βέλους κάμψης $U2$ στο ενισχυτικό	- 170 -
6.63 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 170 -
6.64 Πλαστική ροή στην περιοχή της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης.....	- 171 -
6.65 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή ασύμμετρη $c=96\text{mm}$	- 172 -
6.66 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=96\text{mm}$ ασύμμετρη.....	- 173 -
6.67 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας.....	- 173 -
6.68 Διακύμανση $U3$ στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	- 174 -
6.69 Διακύμανση $U3$ στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	- 174 -
6.70 Διακύμανση βέλους κάμψης $U2$ στο ενισχυτικό	- 175 -
6.71 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$	- 176 -
6.72 Πλαστική ροή/ Κατάσταση ρωγμής στην περιοχή του ενισχυτικού	- 177 -
6.73 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή ασύμμετρη $c=48\text{mm}$ στην πλάκα και $c_w=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό	- 178 -
6.74 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με ασύμμετρη $c=48\text{mm}$ στην πλάκα και επέκταση ρωγμής στο ενισχυτικό $c_w=9.798\text{mm}$	- 178 -
6.75 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας.....	- 179 -

6.76 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	- 179 -
6.77 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	- 180 -
6.78 Διακύμανση βέλους κάμψης U2 στο ενισχυτικό	- 180 -
6.79 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ στην πλάκα με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό	- 181 -
6.80 Πλαστικοποίηση (μεταβλητή PEEQ) στην περιοχή της ρωγμής.....	- 182 -
6.81 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή ασύμμετρη $c=96\text{mm}$ στην πλάκα και $c_w=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό	- 182 -
6.82 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με ασύμμετρη $c=96\text{mm}$ στην πλάκα και επέκταση ρωγμής στο ενισχυτικό $c_w=9.798\text{mm}$	- 183 -
6.83 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας.....	- 183 -
6.84 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$	- 184 -
6.85 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$	- 184 -
6.86 Διακύμανση βέλους κάμψης U2 στο ενισχυτικό	- 185 -
6.87 Καμπύλες μήκους ρωγμής/ μέγιστη αντοχή ελάσματος $a/b=1.5$	- 186 -
6.88 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για συμμετρική ρωγμή.....	- 187 -
6.89 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για συμμετρική ρωγμή	- 187 -
6.90 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή	- 189 -
6.91 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή	- 189 -
6.92 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ρωγμή πλάκας $c=48\text{mm}$...	- 190 -
6.93 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για ρωγμή πλάκας $c=48\text{mm}$	- 190 -
6.94 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ρωγμή πλάκας $c=96\text{mm}$...	- 191 -
6.95 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για ρωγμή πλάκας $c=96\text{mm}$	- 192 -
6.96 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας με ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 193 -
6.97 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας με ρωγμή $c=96\text{mm}$	- 193 -
6.98 Συγκεντρωτική διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας	- 194 -
6.99 Διακύμανση βέλους κάμψης U2 ενισχυτικού στο τέλος της φόρτισης ...	Error!
Bookmark not defined.	
6.100 Συγκεντρωτική διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης.....	- 195 -
6.101 Παραμορφωμένη κατάσταση των μοντέλων στο τέλος συμπίεσης	- 196 -
6.102 Κατάσταση ρωγμής στο τέλος της φόρτισης όλων των περιπτώσεων	- 197 -

7.1 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυμένου ελάσματος $a/b=3$ ($n=1$).....	199 -
7.2 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στην εξέλιξη της συμπίεσης	200 -
7.3 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα δύο (2) τμήματα της πλάκας	200 -
7.4 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης μοντέλου $a/b=3$	201 -
7.5 Μειωτικές καμπύλες για έλασμα (πλάκα) $a/b=3$ με κύματα $n=1,3,5$	202 -
7.6 Μειωτικές καμπύλες για ενισχυτικό $a/b=3$ με κύματα $n=1,3,5$	202 -
7.7 Μειωτικές καμπύλες για ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ και $n=1,3,5$	202 -
7.8 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών πλάκας για $n=3$	203 -
7.8 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών πλάκας για $n=5$	203 -
7.9 Διακύμανση συνολικών ισοδύναμων πλατών με $n=1,3,5$	203 -
7.10 Μειωτικές καμπύλες για έλασμα (πλάκα) $a/b=3$ $n=1,3,5$ (antisymm)	204 -
7.11 Μειωτικές καμπύλες για ενισχυτικό $a/b=3$ $n=1,3,5$ (antisymm)	204 -
7.12 Μειωτικές καμπύλες για ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ $n=1,3,5$ (antisymm)-	205 -
7.13 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών πλάκας για $n=3$ (antisymm).....	205 -
7.14 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών πλάκας για $n=5$ (antisymm).....	206 -
7.15 Διακύμανση συνολικών ισοδύναμων πλατών με $n=1,3,5$ (antisymm)...	206 -
7.16 Επίδραση αριθμού κυμάτων και μορφής στη μέγιστη αντοχή.....	207 -
7.17 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών σύμφωνα με αριθμό – μορφή κυμάτων.....	207 -
7.18 Μειωτικές καμπύλες πλάκας σύμφωνα με αριθμό – μορφή κυμάτων	208 -
7.19 Μειωτικές καμπύλες ενισχυτικού σύμφωνα με αριθμό – μορφή κυμάτων.....	208 -
7.20 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος ανά αριθμό – μορφή κύματος .	209 -
7.21 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής σε τελικό στάδιο συμπίεσης.....	210 -
7.22 Μειωτικές καμπύλες ενισχυμένου ελάσματος $a/b=3$ με ρωγμή $c=24\text{mm}$	211 -
7.23 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή $c=24\text{mm}$	212 -
7.24 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας	212 -
7.25 Διακύμανση $U3$ στην πλευρά $y=0$ στο στάδιο λυγισμού με κύματα.....	213 -
7.26 Διακύμανση $U3$ στην πλευρά $y=b$ στο στάδιο λυγισμού με κύματα.....	213 -
7.27 Διακύμανση $U2$ στο ενισχυτικό στο στάδιο λυγισμού με κύματα.....	214 -

7.28 Δημιουργία κυματώσεως στο ενισχυτικό	- 214 -
7.29 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης μοντέλων άνευ/ με ρωγμή $c=24\text{mm}$	- 215 -
7.30 Πλαστική ροή στο ενισχυτικό άνωθεν ρωγμής πλάκας	- 216 -
7.31 Μειωτικές καμπύλες ενισχυμένου ελάσματος $a/b=3$ με ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 216 -
7.32 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 217 -
7.33 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας	- 217 -
7.34 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ στο στάδιο μέγιστης αντοχής.....	- 218 -
7.35 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ στο στάδιο μέγιστης αντοχής.....	- 218 -
7.36 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 219 -
7.37 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης άνευ/ με ρωγμή $c=24/48\text{mm}$	- 220 -
7.38 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης	- 221 -
7.39 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ρωγμή $c=24\text{mm}/ c_w=4.9\text{mm}$	- 221 -
7.40 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή συμμετρική $c=24\text{mm}/c_w=4.9\text{mm}$	- 222 -
7.41 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας	- 222 -
7.42 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 223 -
7.43 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 223 -
7.44 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 224 -
7.45 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ρωγμή $c=24\text{mm}$ και $c_w=4.9\text{mm}$	- 224 -
7.46 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης	- 225 -
7.47 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ρωγμή $c=48\text{mm}/ c_w=4.9\text{mm}$	- 226 -
7.48 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή συμμετρική $c=48\text{mm}/c_w=4.9\text{mm}$	- 226 -
7.49 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας	- 227 -
7.50 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 227 -
7.51 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 228 -
7.52 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 228 -
7.53 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ρωγμή $c=48\text{mm}$ και $c_w=4.9\text{mm}$	- 229 -
7.54 Πλαστική ροή στο ενισχυτικό άνωθεν της ρωγμής στο τέλος συμπίεσης-	230 -

7.55 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ασύμμετρη $c=24\text{mm}$	230 -
7.56 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή ασύμμετρη $c=24\text{mm}$	231 -
7.57 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας	231 -
7.58 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	232 -
7.59 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	232 -
7.60 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης	233 -
7.61 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ασύμμετρη ρωγμή $c=24\text{mm}$..	233 -
7.62 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης	234 -
7.63 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ασύμμετρη $c=48\text{mm}$	235 -
7.64 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή ασύμμετρη $c=48\text{mm}$	235 -
7.65 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας	236 -
7.66 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	236 -
7.67 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	237 -
7.68 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης	237 -
7.69 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$..	238 -
7.70 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης	239 -
7.71 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ασύμμετρη ρωγμή $c=24\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	239 -
7.72 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή ασύμμετρη $c=24\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	240 -
7.73 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας	240 -
7.74 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	241 -
7.75 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	241 -
7.76 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης	242 -
7.77 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ασύμμετρη ρωγμή $c=24\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό	242 -
7.78 Πλαστική ροή στη ρωγμή του ενισχυτικού στο τέλος της φόρτισης	243 -
7.79 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.	244 -
7.80 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή ασύμμετρη $c=48\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.....	244 -
7.81 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας	245 -

7.82 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 246 -
7.82 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 246 -
7.83 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης	- 247 -
7.84 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό	- 247 -
7.85 Σύγκριση μέγιστης αντοχής $a/b=3$ ανάλογα με τον τύπο της ρωγμής	- 248 -
7.86 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για συμμετρική ρωγμή.....	- 249 -
7.87 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για συμμετρική ρωγμή	- 249 -
7.88 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή	- 250 -
7.89 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή	- 250 -
7.90 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ρωγμή πλάκας $c=24\text{mm}$...	- 251 -
7.91 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για ρωγμή πλάκας $c=24\text{mm}$	- 252 -
7.92 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ρωγμή πλάκας $c=48\text{mm}$...	- 252 -
7.93 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για ρωγμή πλάκας $c=48\text{mm}$	- 253 -
7.94 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας με ρωγμή $c=24\text{mm}$	- 254 -
7.95 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας με ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 255 -
7.96 Συγκεντρωτική διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας	- 255 -
7.97 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης για ρωγμή $c=24\text{mm}$	- 256 -
7.98 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης για ρωγμή $c=48\text{mm}$	- 256 -
7.99 Μορφή παραμόρφωσης ελάσματος $a/b=3$ στο τέλος της φόρτισης	- 258 -
7.100 Κατάσταση ρωγμής στο τέλος της φόρτισης όλων των περιπτώσεων .	- 259 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

- 260 -

8.1 Καμπύλη μέγιστης αντοχής/ aspect ratio για την ασύμμετρη ρωγμή πλάκας	- 261 -
8.2 Καμπύλη μέγιστης αντοχής/ aspect ratio για την συμμετρική ρωγμή πλάκας	- 262 -
8.3 Σύγκριση καμπυλών μέγιστης αντοχής/ aspect ratio για τις δύο (2) θέσεις ρωγμής στην πλάκα.....	- 262 -
8.4 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους ανά a/b για συμμετρική ρωγμή.....	- 265 -

8.5 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους ανά a/b για συμμετρική ρωγμή και ρωγμή ενισχυτικού.....	- 265 -
8.6 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους ανά a/b για ασύμμετρη ρωγμή	- 265 -
8.7 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους ανά a/b για ασύμμετρη ρωγμή και ρωγμή ενισχυτικού.....	- 265 -
8.8 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης ανά aspect ratio	- 266 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

- 267 -

9.1 Ανάλυση ενισχυμένου ελάσματος με σύνδεση διαφορετικού τύπου στοιχείων	- 268 -
9.2 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών φόρτισης για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης	- 269 -
9.3 Εισαγωγή ρωγμής σε μοντέλο διαφορετικού τύπου στοιχείων.....	- 269 -
9.4 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών φόρτισης για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης ελάσματος $a/b=1.5$ με την ύπαρξη ρωγμής.....	- 270 -
9.5 Ανάλυση ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1$ με ρωγμές $c=72\text{mm}/c_w=14.7\text{mm}$	- 270 -
9.6 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών φόρτισης για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης ελάσματος $a/b=1$ με την ύπαρξη ρωγμής.....	- 271 -
9.7 Ανάλυση ελάσματος τριών (3) ενισχυτικών επί μέρους λόγων $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$	- 272 -
9.8 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών φόρτισης για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης ελάσματος $a/b=1.5$ (stand alone – stiffened plating)	- 273 -
9.9 Μεταβολή U_2 στους κόμβους που αντιστοιχούν στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ μέχρι του σημείου μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος	- 273 -
9.10 Μεταβολή U_2 στους κόμβους που αντιστοιχούν στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ μετά το σημείο μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος.....	- 274 -
9.11 Μεταβολή U_2 στους κόμβους που αντιστοιχούν στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ μέχρι του σημείου μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος	- 274 -
9.12 Μεταβολή U_2 στους κόμβους που αντιστοιχούν στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ μετά το σημείο μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος.....	- 274 -

ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ

A_w	Επιφάνεια διατομής του ενισχυτικού
A_p	Επιφάνεια διατομής στην πλάκα
a	Μήκος του ενισχυμένου ελάσματος
b	Πλάτος του ενισχυμένου ελάσματος
a/b	Λόγος μήκους προς πλάτος
h_w	Ύψος του ενισχυτικού
t_p	Πάχος του ελάσματος (πλάκα)
t_w	Πάχος του ενισχυτικού
β_p	Συντελεστής λυγηρότητας της πλάκας
β_w	Συντελεστής λυγηρότητας του ενισχυτικού
E	Μέτρο ελαστικότητας του υλικού
D	Στρεπτική ακαμψία της πλάκας
ν	Λόγος Poisson στην ελαστική περιοχή
c	Συντελεστής λυγισμού
σ_E	Ελαστική τάση λυγισμού
σ_Y	Τάση διαρροής του υλικού
N	Μητρώο των συναρτήσεων σχήματος
d_e	Διάνυσμα κομβικών μετατοπίσεων
B	Μητρώο παραμορφώσεως
J	Ιακωβιανό μητρώο
K_e	Μητρώο ακαμψίας πεπερασμένου στοιχείου
u_x	Μετατόπιση κατά τον άξονα x στο στοιχείο
u_y	Μετατόπιση κατά τον άξονα y στο στοιχείο
u_z	Μετατόπιση κατά τον άξονα z στο στοιχείο
Φ_x	Ροπή περί τον άξονα x
Φ_y	Ροπή περί τον άξονα y
Φ_z	Ροπή περί τον άξονα z
w_{op}	Μέγιστη τιμή αρχικής ατέλειας στην πλάκα (u_z)
w_{os}	Μέγιστη τιμή αρχικής ατέλειας στην κατασκευή (global deflection u_z)
w_s	Μέγιστη τιμή αρχικής ατέλειας στο ενισχυτικό (u_y)

n_p	Αριθμός κυματώσεων στις αρχικές ατέλειες στην πλάκα
u_j	Μετατόπιση στους κόμβους των στοιχείων της φορτισμένης πλευράς (όπου $j=1,2,3,4,5$)
u_{Cj}	Μετατόπιση στους κόμβους των στοιχείων της φορτισμένης πλευράς (όπου $j=1,2,3$)
N_{xx}	Τάση ανά μονάδα μήκους στη φορτισμένη πλευρά
σ_{panel}	Συνολική τάση στην πλάκα
σ_w	Συνολική τάση στο ενισχυτικό
$\sigma_{ολ}$	Συνολική τάση στο ενισχυμένο έλασμα
σ_{xmax1}	Μέγιστη τάση στη διεύθυνση x στο τμήμα πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$
σ_{xmax2}	Μέγιστη τάση στη διεύθυνση x στο τμήμα πλάκας από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$
σ_{xav1}	Μέση τάση στη διεύθυνση x στο τμήμα πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$
σ_{xav2}	Μέση τάση στη διεύθυνση x στο τμήμα πλάκας από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$
b_{e1}	Ισοδύναμο πλάτος στο τμήμα της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$
b_{e2}	Ισοδύναμο πλάτος στο τμήμα της πλάκας από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$
b_e	Συνολικό ισοδύναμο πλάτος
c	Μήκος της ρωγμής στην πλάκα
c_w	Μήκος της ρωγμής στο ενισχυτικό
s	Απόσταση του κέντρου της ρωγμής από την αρχή των αξόνων
U_1	Μετατόπιση κατά τον άξονα x στην κατασκευή
U_2	Μετατόπιση κατά τον άξονα y στην κατασκευή
U_3	Μετατόπιση κατά τον άξονα z στην κατασκευή
PEEQ	Πλαστική παραμόρφωση στο μοντέλο
E11	Ανηγγμένη παραμόρφωση κατά τον άξονα x

E11(0)	Ανηγμένη παραμόρφωση κατά τον άξονα x σε τάση διαρροής του υλικού
E11/E11(0)	Λόγος ανηγμένης παραμόρφωσης
dU2	Διάστημα πλάτυνσης του μοντέλου κατά την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των ρηγματοποιημένων ενισχυμένων ελασμάτων διαφόρων λόγων μήκους προς πλάτος (aspect ratio), με την επιβολή ομοιόμορφης μονοαξονικής θλίψης, με αντίστοιχη παραμετρική διαφοροποίηση του λόγου μήκους της διαμπερούς ρωγμής προς το πλάτος πλάκας (c/b). Επιπρόσθετα, κατά την ανάλυση θα διαφοροποιείται η θέση της ρωγμής στο έλασμα αφενός με συμμετρία αυτής στα δύο (2) τμήματα της πλάκας, αφετέρου μόνο στο ένα τμήμα αυτής (ασυμμετρία). Συναφώς, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απόσταση των επιφανειών της ρωγμής κρατήθηκε σε σταθερή απόσταση (0.3mm), όπως επίσης σε αριθμό μοντέλων εισήχθη ρωγή στο ενισχυτικό αντίστοιχων χαρακτηριστικών με το έλασμα. Η αριθμητική επίλυση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Η εργασία διαιρείται σε δέκα (10) κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται βασικές αρχές της κατασκευαστικής σχεδίασης – ανάλυσης των θαλασσίων κατασκευών, εστιάζοντας στα κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου, στη φύση της αστοχίας αυτών, τα χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής και τέλος σε παράγοντες που υπεισέρχονται κατά τη φάση της κατασκευής αυτών και επηρεάζουν τη μέγιστη αντοχή, είτε επί μέρους είτε συνολικά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη μονοαξονική συμπίεση των ρηγματοποιημένων ελασμάτων και συγκεκριμένα θραύση – πλαστικός λυγισμός, καθώς και η μαθηματική ανάλυση αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, τα στοιχεία της εν λόγω μεθόδου που θα χρησιμοποιηθούν κατά την αριθμητική επίλυση των μοντέλων, όπως επίσης και σημαντικές παραδοχές για τα ενισχυμένα ελάσματα που πρέπει να οριοθετηθούν για την καλύτερη προσομοίωση της κατασκευής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των ενισχυμένων ελασμάτων που έλαβε χώρα κατά την ανάλυση αυτών και συγκεκριμένα οι διαστάσεις των μοντέλων, η μέθοδος εισαγωγής των αρχικών ατελειών στα

ελάσματα, οι συνοριακές συνθήκες της προσομοίωσης, η σχεδίαση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων με έμφαση στην περιοχή της ρωγμής και τέλος η διαδικασία υπολογισμού – παρουσίασης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα για ενισχυμένα ελάσματα λόγου μήκους προς πλάτος $a/b=1$, στο έκτο για $a/b=1.5$ και τέλος στο έβδομο για λόγο $a/b=3$. Τα αποτελέσματα συνοδεύονται από γραφικές παραστάσεις όλων των μεγεθών ενδιαφέροντος για την προσφορότερη κατανόηση των φαινομένων που υπεισέρχονται ανά aspect ratio. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι **λόγω της εκτάσεως των αποτελεσμάτων – γραφικών παραστάσεων ανά μοντέλο που πιθανόν, να δυσχεραίνουν τον αναγνώστη, στο τέλος κάθε ανωτέρω κεφαλαίου, πραγματοποιείται σύγκριση των γραφικών παραστάσεων ανά μέγεθος και μια συνοπτική εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Ενθαρρύνεται λοιπόν η αρχική ανάγνωση του τμήματος συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων ανά κεφάλαιο και η περαιτέρω αναδρομή σε συγκεκριμένη περίπτωση όπου απαιτείται. Ο μεγάλος αριθμός σχημάτων – γραφικών παραστάσεων συμπεριλήφθηκε για λόγους πληρότητας της εργασίας.**

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συγκρίσεις συγκεκριμένων μεγεθών ανά λόγο μήκους προς πλάτος των ενισχυμένων ελασμάτων (a/b) που αναλύθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο ένατο κεφάλαιο περιγράφεται η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ του μονού ενισχυμένου ελάσματος και του αντίστοιχου ως μέρους μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας (π.χ. πλαίσιο) σύμφωνα με συγκεκριμένη μέθοδο που περιλαμβάνεται στις δυνατότητες του προγράμματος ABAQUS.

Τέλος, στο δέκατο κεφάλαιο καταγράφονται τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, καθώς επίσης υποβάλλονται συγκεκριμένες προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στον τομέα των Θαλασσίων Κατασκευών του τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά τη χρονική περίοδο Ιανουάριος 2006 έως Σεπτέμβριος 2007 υπό την επίβλεψη του Δρ. Μ. Τούλιου. Ο σεβασμός προς το πρόσωπό του είναι καθολικός και τον ευχαριστώ για την αμέριστη συμπαράσταση, καθοδήγηση και προτροπή κατά την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

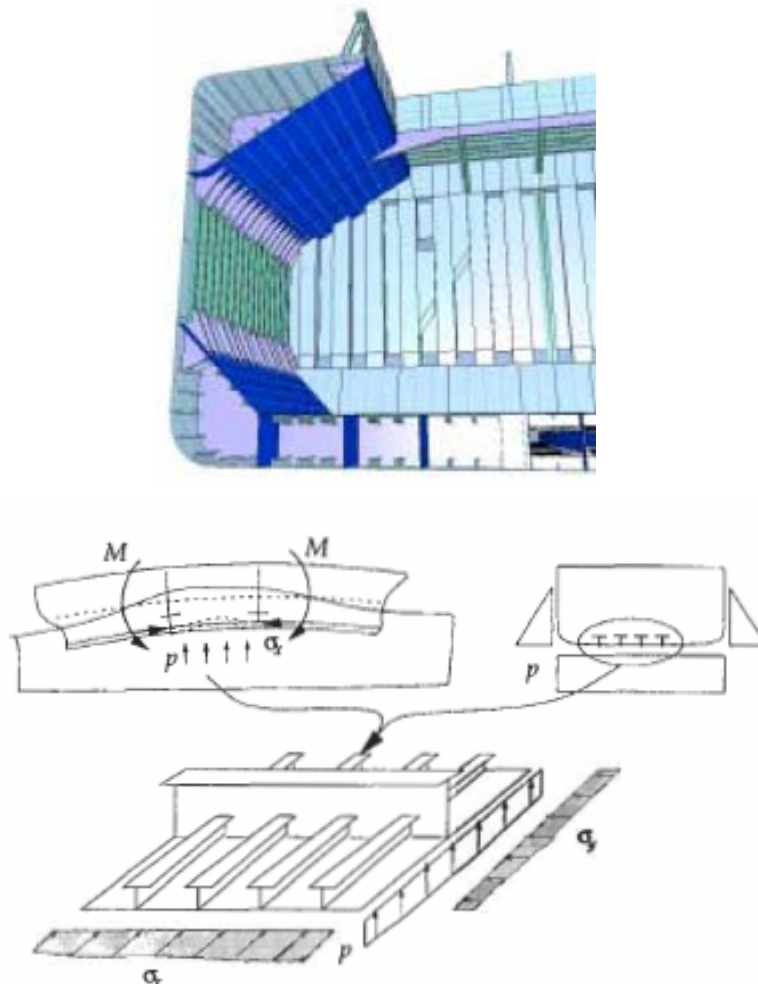
Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους Καθηγητές Ν. Τσούβαλη και Ε. Σαμουηλίδη για τη συμμετοχή τους στην επιτροπή αξιολόγησης της παρούσης. Επίσης, απευθύνω τις ευχαριστίες μου στον υποψήφιο διδάκτορα Γ. Βουδούρη για την πάντα, σημαντική του βοήθεια, όπως και για το γεγονός ότι η συναναστροφή μου, μαζί του αποτελούσε συνεχώς εφελκυστικό νέων γνώσεων σε θέματα ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Ευχαριστώ τους γονείς μου γιατί μου παρείχαν αφειδώς και με προσωπική τους θυσία, τα εφόδια ώστε εγώ να μπορώ να υλοποιώ σήμερα τα όνειρά μου, τον κ. Ε. Τσαμαδιά για τους λόγους που ο ίδιος γνωρίζει καθώς και όλους τους ανθρώπους που βρίσκονται κοντά μου, προεξέχουσας της συζύγου μου.

Τέλος, ευχαριστώ το Θεό που μου έδωσε την ευκαιρία, χωρίς να το αξίζω, να γνωρίσω ένα απειροελάχιστο από τους κανόνες που εμφύσησε στο δημιούργημά Του.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα χαλύβδινα ενισχυμένα ελάσματα βρίσκουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής στα πλοία και σε άλλες λεπτότοιχες κατασκευές, εξαιτίας αφενός της απλότητας κατά την κατασκευή και αφετέρου του εξαιρετικού λόγου αντοχής προς το βάρος. Το εν λόγω δομικό στοιχείο υπόκειται σε φορτία τα οποία είναι κάθετα στο στοιχείο καθώς και σε έτερα τα οποία βρίσκονται επί του επιπέδου αυτού. Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα ενισχυμένο έλασμα το οποίο βρίσκεται στο κάτω/ πλευρικό κέλυφος του πλοίου. Σε κατάσταση hogging, όπως στο σχήμα Ε.1, στα εν λόγω ελάσματα δρουν θλιπτικά φορτία λόγω της κάμψης της μεταλλικής κατασκευής.



Σχήμα Ε.1 . Ενισχυμένα ελάσματα στον πυθμένα πλοίου

Τα σχεδιαστικά κριτήρια της μεταλλικής κατασκευής που ακολουθούνται για την αποφυγή του σημείου οριακής αντοχής βασίζονται κυρίως στο μη - ελαστικό λυγισμό. Συγκεκριμένα, η έναρξη της διαρροής συνήθως λαμβάνει χώρα στο πιο φορτωμένο τμήμα των κατασκευαστικών στοιχείων. Καθώς το τμήμα που διαρρέει εξαπλώνεται, η καμπτική αντίσταση του στοιχείου μειώνεται με αποτέλεσμα να κυριαρχεί ο λυγισμός. Πέραν όμως του λυγισμού, υπάρχουν και άλλα φαινόμενα που δύναται να επηρεάσουν την τιμή της οριακής αντοχής.

Οι θαλάσσιες κατασκευές, με την πάροδο των χρόνων, ρέπουν προς την αντιμετώπιση διαφόρων τύπων φθορών. Η διάβρωση και η ρηγματοποίηση λόγω κόπωσης είναι δύο από τους πιο σημαντικούς τύπους φθορών σε πεπεπαιωμένες κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευές οι οποίες κατά την ενεργοποίησή τους να ήταν κατάλληλες και μέσα στα θεσπισμένα όρια ασφαλείας των διεθνών κανονισμών, υπάρχει η πιθανότητα να καταλήξουν σε οριακά επίπεδα λειτουργικότητας κατά τη διάρκεια της υπηρεσιακής ζωής τους, ή με μια πιο απαισιόδοξη ματιά, σε επίπεδα καταστροφικής κατάρρευσης.

Για τους ανωτέρω λόγους η εκτίμηση των υπολοίπων αντοχής των φθαρμένων θαλασσίων κατασκευών είναι εξαιρετικής σημασίας. Για παράδειγμα, είναι ουσιώδης η έρευνα και η αναζήτηση ορθολογιστικών προτύπων για τον έλεγχο της κατασκευαστικής ακεραιότητας των γερασμένων κατασκευών, χωρίς οικονομικές επιβαρύνσεις όσον αφορά την επισκευή και συντήρηση που λαμβάνουν χώρα στον κύκλο ζωής της κατασκευής. Κατά τα ανωτέρω και με γνώμονα τον έλεγχο της Απόλυτης Οριακής Κατάστασης (Ultimate Limit State), στην παρούσα εργασία θα εκτιμηθεί η οριακή αντοχή ρηγματοποιημένων δομικών στοιχείων διαφόρων διαστάσεων κατά την ανάπτυξη μονοτονικών, ακραίων θλιπτικών φορτίων εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες που μας παρέχει η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Κάτω από την εφαρμογή κύκλου φορτίσεως, είναι δυνατό να εμφανιστούν ρωγμές λόγω κόπωσης στα δομικά στοιχεία των θαλασσίων κατασκευών και συγκεκριμένα στις περιοχές όπου υφίσταται συγκέντρωση τάσεων. Επιπρόσθετα, οι ρωγμές μπορούν να δημιουργηθούν και στη συνέχεια να εξαπλωθούν, λόγω

των κατασκευαστικών ατελειών που ενσωματώνονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Πέραν των επαναλαμβανομένων φορτίων, η ρηγματοποίηση των δομικών στοιχείων των θαλασσίων κατασκευών μπορεί να αναπτυχθεί με τρόπο ασταθή κάτω από μονοτονικά αυξανόμενα ακραία φορτία, μια περίπτωση που μοιραία θα οδηγήσει στην καταστροφική κατάρρευση της κατασκευής. Αυτή η πιθανότητα όμως, περιορίζεται από την ολκιμότητα του υλικού κατασκευής και την παρουσία περιοχών μειωμένων εντατικών καταστάσεων, που δύναται να υπάρξουν σε μια σύνθετη κατασκευή και μπορεί να αναστείλουν την εξάπλωση. Αν μία ρωγμή γίνει εμφανής συχνά πραγματοποιείται μία προσωρινή επιδιόρθωση εν πλω, με το άνοιγμα μια τρύπας στο άκρο της ρωγμής, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο το συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων. Αυτή είναι μια συνηθισμένη προσωρινή διαδικασία. Η ανησυχία μεγαλώνει κατά πολύ, αν το υλικό δεν είναι τόσο όλκιμο, όσο ο μαλακός χάλυβας, διότι τότε δεν έχει τόση ικανότητα διάχυσης του φορτίου. Επιπλέον, ένας χάλυβας με υψηλό όριο διαρροής χρησιμοποιείται συχνά σε σημεία, όπου προσδοκείται μια υψηλή τιμή τάσης, έτσι ώστε οι ρωγμές να μην μπορούν να εξαπλώνονται σε περιοχές περιορισμένης τάσης και να σταματούν.

Συγκεκριμένα και με βάση τις ανωτέρω περιπτώσεις θα αναλυθεί η επίδραση στην αντοχή λόγω της ύπαρξης πλήρως ανεπτυγμένων ρωγμών, του απλού συστήματος ελάσματος- ενισχυτικού διαφόρων λόγων μήκους – πλάτους κατά την επιβολή μονοαξονικού θλιπτικού φορτίου, θεωρώντας ότι το εν λόγω σύστημα αποτελεί δομικό στοιχείο (υποσύνολο) μιας μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας της θαλάσσιας κατασκευής. Αυτό είναι βέβαια επιτρεπτό, αν οι οριακές συνθήκες του κατασκευαστικού στοιχείου αντιπροσωπεύονται επαρκώς από τις δυνάμεις και ροπές που εφαρμόζονται από τα γειτονικά κατασκευαστικά στοιχεία.

Συναφώς , θα πρέπει να σημειωθούν τα ακόλουθα:

(1) Οι διαστάσεις των ενισχυμένων ελασμάτων που εξετασθήκαν είχαν λόγο μήκους προς πλάτος (aspect ratio) $a/b=1, 1.5$ και 3 . Στα εν λόγω ελάσματα εισήχθησαν ρωγμές με λόγο μήκους ρωγμής προς πλάτος $c/b=0.12$ και 0.24 με διαφοροποίηση της θέσης της ρωγμής, καθώς επίσης και κατά περίπτωση την

εισαγωγή ρωγμής στο ενισχυτικό σταθερού λόγου αυτής προς το ύψος ενισχυτικού $c_w/h_w=0.12$. Πέραν των ρωγμών, στα κατασκευαστικά στοιχεία θα εισαχθούν αρχικές μετατοπίσεις, με σκοπό την περαιτέρω μείωση της αντοχής αυτών, ενώ επιπρόσθετα για λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=3$, θα εισαχθούν κυματώσεις ($n=3,5$) στις αρχικές ατέλειες προκειμένου να ελεγχθούν εκ νέου τα περιθώρια της αντοχής.

(2) Κατά την ανάλυση δεν εισήχθησαν παραμένουσες τάσεις στα μοντέλα, ως αρχικές ατέλειες.

(3) Για το σχεδιασμό των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PATRAN, ενώ για την επίλυση και ανάλυση αυτών αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες του λογισμικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Τα στοιχεία πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση των ρηγματοποιημένων κατασκευών είναι συνεχούς μέσου (continuum elements) C3D20R λόγω των ιδιοτήτων αυτών για την καλύτερη μοντελοποίηση της επαφής των επιφανειών της ρωγμής.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι περιορισμένες έως ελάχιστες οι αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία σε εργασίες ελέγχου των κατασκευαστικών στοιχείων κατά την ύπαρξη ρωγμών σε μονοτονικά αυξανόμενα θλιπτικά φορτία με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

1.1 Γενικά

Για την καλύτερη ανάλυση του πλοίου και συγκεκριμένα για τον υπολογισμό των φορτίων, ροπών, τάσεων που εφαρμόζονται σε αυτό, το θεωρούμε ως μία κοίλη κιβωτοειδής δοκό. Πολλά από τα φορτία που επιβάλλονται σε αυτό, προέρχονται από τη θάλασσα, γεγονός που προκαλεί δυσκολίες στον ακριβή προσδιορισμό της φόρτισης. Μερικά όμως από τα φορτία στα οποία υποβάλλεται η κατασκευή είναι γνωστά με κάποια ακρίβεια. Οι δοκιμές πίεσης νερού, που εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια της ανέγερσης (για παράδειγμα στις δεξαμενές), παρέχουν συχνά το μέγιστο φορτίο στο οποίο υποβάλλεται η κατασκευή κατά τη διάρκεια της ζωής της. Οι φρακτές δεν είναι δυνατό να υποβληθούν σε πίεση μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στο υψηλότερο υδατοστεγές κατάστρωμα, εκτός αν το επιβάλλουν η μετατόπιση φορτίου ή η κίνηση υγρών. Οι δυνάμεις που επιβάλλονται από το μηχανοστάσιο είναι γενικά γνωστές με κάποια ακρίβεια. Φορτία επιτάχυνσης λόγω της κίνησης μπορεί να είναι στατιστικά γνωστά. Παράλληλα εκτελείται συλλογή στοιχείων και στατιστική ανάλυση αυτών για την κατανόηση και άλλου είδους δυνάμεων, όπως για παράδειγμα κρουστικών φορτίων που επιβάλλει η θάλασσα σε ορισμένες περιοχές του πλοίου. Έχοντας καταγράψει μεγάλο μέρος των φορτίων που είναι δυνατό να επιβληθούν σε ένα πλοίο, ελέγχουμε στη συνέχεια την απόκριση αυτών στη θαλάσσια κατασκευή και προσπαθούμε να προβλέψουμε αν οδηγούν ή όχι, σε επί μέρους – συνολική αστοχία του υλικού.

1.2 Η φύση της αστοχίας

Από την οπτική πλευρά της κατασκευαστικής ανάλυσης υπάρχουν τέσσερις (4) πιθανοί τρόποι αστοχίας:

(1) **Άμεση αστοχία.** Μπορεί να προκληθεί, όταν ένα τμήμα της κατασκευής πλησιάσει τη μέγιστη εφελκυστική, θλιπτική, διατμητική ή θραυστική τάση. Εκτός αν μεταλλουργικοί ή γεωμετρικοί παράγοντες αναστέλλουν τη διαδικασία, ένα κατά τα άλλα εύκαμπτο υλικό μπορεί να αστοχήσει πριν από την αναμενόμενη ονομαστική αντοχή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαρροή δεν μπορεί από μόνη της να προκαλέσει αστοχία της κατασκευής.

(2) **Αστοχία λόγω κόπωσης.** Η ελαστική κόπωση που εμφανίζεται σε δοκίμια υλικών είναι καλά τεκμηριωμένη. Η ελαστική κόπωση που εμφανίζεται σε πολύπλοκες κατασκευές δεν είναι ακριβώς τεκμηριωμένη από δοκιμές. Η κόπωση σε διαβρωτικό περιβάλλον αποτελεί μια ειδική περίπτωση επιταχυνόμενης αστοχίας.

(3) **Αστάθεια.** Σε μια διαδοκίδα (strut) ο λυγισμός προκαλεί μια αυξημένη πλευρική εκτροπή. Σε ένα έλασμα από πλάκες (plating panel), μπορεί να προκαλέσει διαρροή του φορτίου από το panel ή να δημιουργήσει πτυχώσεις. Σε ένα κύλινδρο υπό ακτινική πίεση, η αστάθεια μπορεί να προκαλέσει κυματώσεις στην περιφέρεια του κύκλου. Σε ένα ενισχυτικό ελάσματος μπορεί να προκαλέσει στρεπτική παραμόρφωση. Οι περισσότεροι από αυτούς τους τύπους αστοχίας χαρακτηρίζονται από μια σχετικά γρήγορη αύξηση της παραμόρφωσης για μια μικρή αύξηση φορτίου και θα πρέπει να θεωρείται ως αστοχία, αν σχετίζεται με ολόκληρη την κατασκευή. Όταν έχουμε διαρροή του φορτίου μόνο σε ένα μέρος της κατασκευής, όπως συμβαίνει για παράδειγμα, με ελάσματα στο μέσο νομέα, δεν είναι απαραίτητο να προκύψει ολική αστοχία.

(4) **Παραμόρφωση.** Μια περιορισμένη παραμόρφωση μπορεί να προκαλέσει φυσικό πρόβλημα στο μηχανοστάσιο ή μπορεί απλώς να προκαλέσει ανησυχία στους επιβάτες, αν και στην πραγματικότητα δεν υπάρχει κίνδυνος. Από υπερβολική παραμόρφωση μπορεί να διαταραχθεί η ευθυγράμμιση των κυρίων μηχανημάτων. Τέτοιου είδους παραμόρφωση μπορεί να συμβεί στην ελαστική ή στην ελαστοπλαστική περιοχή. Η αντοχή μιας κατασκευής μπορεί να προκαλέσει αύξηση των κραδασμών σε μία συχνά χρησιμοποιούμενη συχνότητα.

Οποιοσδήποτε από τους παραπάνω τύπους μπορεί να προκαλέσει αστοχία. Κατά το σχεδιασμό λοιπόν θα πρέπει να ελέγχεται το είδος του φόρτισης που θα επιβληθεί στα κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου και να εξετάζονται οι τρόποι με τους οποίους κρίνεται ότι η συγκεκριμένη μονάδα αστοχεί.

1.3 Κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι κατασκευαστικών στοιχείων:

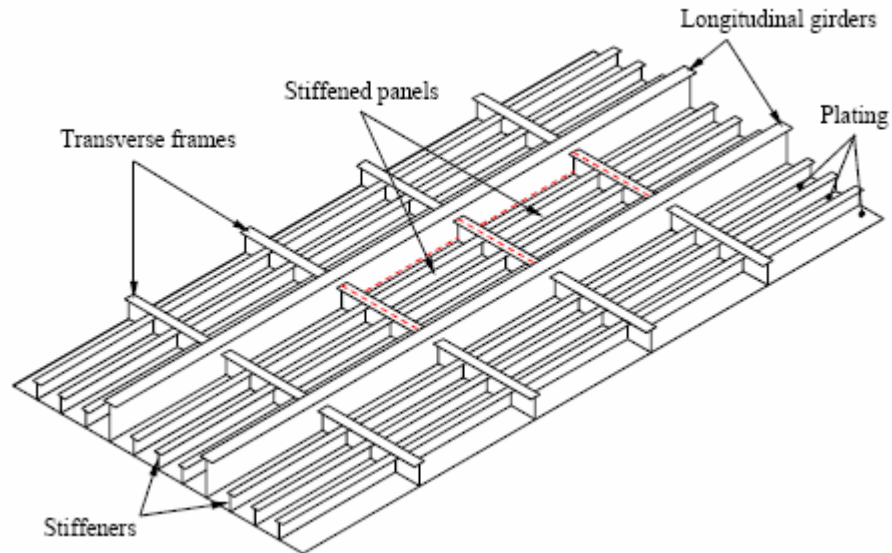
(1) **Συνδυασμοί ελάσματος ενισχυτικού.** Η απλούστερη μορφή αυτού του τύπου είναι μια απλή δοκός προσαρμοσμένη σε μία πλάκα. Πολλοί παράλληλοι δοκοί που στηρίζουν μια πλάκα αποτελούν ένα πλέγμα με μονοκατευθυνσιακή ενίσχυση. Δοκοί, οι οποίες διασταυρώνονται σε ορθές γωνίες αποτελούν ένα ορθογώνια ενισχυμένο πλέγμα. Αυτές οι διάφορες μονάδες μπορεί αρχικά να είναι επίπεδες ή καμπύλες, φορτισμένες κατά οποιαδήποτε κατεύθυνση και διαθέτουν μια ποικιλία σχημάτων και συντοριακών συνθηκών.

(2) **Ελάσματα από πλάκες (panel of plating).** Αυτά είναι συνήθως ορθογωνικά, στηρίζονται σε τέσσερις άκρες και υποβάλλονται σε κάθετα ή ομοεπίπεδα φορτία. Αρχικά μπορεί να είναι επίπεδα ή καμπύλα.

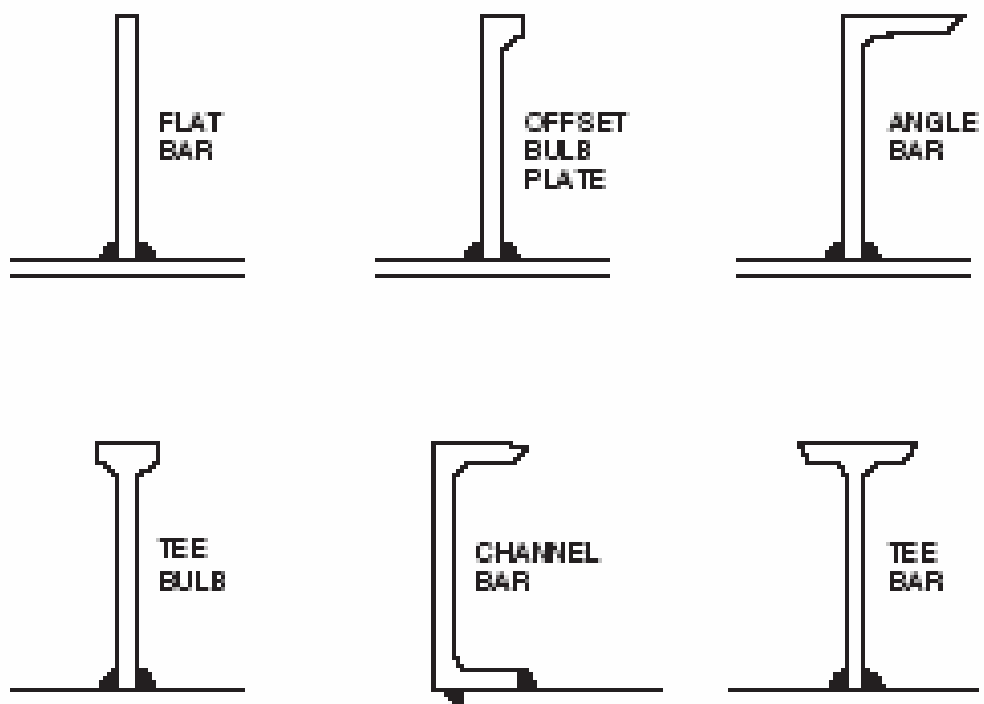
(3) **Πλαίσια – Δικτυώματα.** Αυτά μπορεί να είναι αψιδοειδείς πλαισιακές κατασκευές με ένα ή περισσότερα επίπεδα. Τα ενισχυτικά πλαίσια μπορεί να αποτελούνται από εγκάρσιους δακτυλίους των πλευρικών ενισχυτικών και από τις δοκούς του καταστρώματος ή από το διαμήκη δακτύλιο της δοκού του καταστρώματος, από ενισχυτικά φρακτών και από διαμήκη ενισχυτικά. Μπορεί επίσης να είναι κυκλικά όπως σε ένα υποβρύχιο. Τα φορτία μπορεί να είναι κατανεμημένα ή συγκεντρωμένα στις κατευθύνσεις του επιπέδου του πλαισίου ή κάθετα προς το επίπεδο αυτό.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με το απλό μοντέλο πλάκας – ενισχυτικού σε μονοαξονική συμπίεση. Στο σχήμα 1.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η σύνθεση ενός συνόλου ενισχυμένων ελασμάτων (stiffened

plating), ενώ στο σχήμα 1.2 φαίνονται οι διάφοροι τύποι ενισχυμένων ελασμάτων εκ των οποίων θα χρησιμοποιήσουμε την περίπτωση της απλής λάμας (flat bar) .



Σχήμα 1.1 Ορολογία ενισχυμένων ελασμάτων



Σχήμα 1.2 Συνήθεις διατομές σε ενισχυμένα ελάσματα

1.4 Το υλικό κατασκευής των πλοίων και οι ιδιότητες αυτού

Το υλικό που χρησιμοποιείται για τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου είναι συνήθως ο μαλακός χάλυβας με περιεκτικότητα από 0.15 έως 0.23 τοις εκατό σε άνθρακα, καθώς και υψηλή περιεκτικότητα σε μαγγάνιο. Το θείο και ο φώσφορος που περιέχονται στο χάλυβα κρατούνται σε χαμηλά επίπεδα (λιγότερο από 0.05 τοις εκατό). Υψηλότερα ποσοστά των δύο στοιχείων είναι επιζήμια κατά τη διαδικασία συγκόλλησης του χάλυβα και ρωγματώσεις μπορεί να αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια της εξέλασης, ειδικά όταν η περιεκτικότητα σε θείο είναι μεγάλη.

Οι διεθνείς οργανώσεις αρχικά είχαν διαφορετικά τυποποιημένα χαρακτηριστικά για το χάλυβα, αλλά το έτος 1959, οι μεγαλύτεροι οργανισμοί συμφώνησαν στην τυποποίηση των απαιτήσεών τους, προκειμένου να μειώσουν τις απαιτούμενες βαθμίδες χάλυβα στο ελάχιστο δυνατό. Τη σημερινή εποχή υπάρχουν πέντε (5) διαφορετικές ποιότητες χάλυβα που αξιοποιούνται από τη ναυπηγική βιομηχανία. Αυτές είναι Grade A, B, C, D, E. Ο χάλυβας Grade A είναι ο συνηθισμένος μαλακός χάλυβας σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Lloyd's Register και χρησιμοποιείται στην κατασκευή πλοίων. Ο τύπος Grade B είναι καλύτερης ποιότητας μαλακός χάλυβας από τον προηγούμενο και ενδείκνυται σε περιοχές κριτικής σημασίας. Οι τύποι Grade C, D και E επιδεικνύουν αυξημένα χαρακτηριστικά χάραξης, με τον τύπο Grade C να συναντά τις απαιτήσεις του American Bureau of Shipping (ABS). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο διαχωρισμός στους ανωτέρω τύπους πηγάζει από τη μέθοδο παραγωγής τους [1].

Χάλυβες που διαθέτουν υψηλότερη αντοχή από αυτήν του μαλακού χάλυβα χρησιμοποιούνται σε ζώνες συγκέντρωσης υψηλών τάσεων σε μεγάλα δεξαμενόπλοια, container - ships και φορτηγά πλοία. Η χρησιμοποίησή τους επιτρέπει τη μείωση του πάχους στο κατάστρωμα, στο κοίλο του σκάφους και στους νομείς που βρίσκονται ιδιαίτερα στο μέσο τμήμα των μεγάλων πλοίων. Αναπόφευκτα όμως οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Οι δυνατότητες συγκόλλησης τους είναι ένας σημαντικός προβληματισμός κατά τη χρησιμοποίησή τους σε θαλάσσιες κατασκευές και το ερωτηματικό της μειωμένης ζωής τους σε καταστάσεις κόπωσης πρέπει να συνυπολογιστεί. Επίσης η επίδραση της

διάβρωσης στα ελάσματα λόγω του μειωμένου πάχους των ελασμάτων θα απαιτεί συχνότερη και επισταμένη επιθεώρηση των κρίσιμων σημείων.

Συναφώς με τα ανωτέρω, οι διεθνείς οργανισμοί ορίζουν και τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων που θα πρέπει να λαμβάνονται για τους διάφορους σχεδιαστικούς υπολογισμούς. Έτσι, για παράδειγμα για το ναυπηγικό χάλυβα το μέτρο ελαστικότητας E ισούται με 207 GPa, ενώ ο λόγος Poisson παίρνει την τιμή 0.3 (οι τιμές αφορούν θερμοκρασία δωματίου). Με το ίδιο σκεπτικό καθορίζεται και η μικρότερη τιμή της τάσεως διαρροής. Έτσι για τους χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι τιμές των τάσεων διαρροών κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 205 – 290 MPa [2]. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα θεωρήσουμε σαν τάση διαρροής $\sigma_y=245$ MPa. Επιπρόσθετα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι κατά την ανάλυση παραλήφθηκε η μηχανική σκλήρυνση του υλικού, κάτι που είναι συμβατό για το μαλακό χάλυβα.

1.4.1 Παραμένουσες τάσεις

Όσο καλή και να είναι η σχεδίαση της τοπικής κατασκευής και οι επί μέρους λεπτομέρειες, υπάρχει μια σημαντική επιρροή στον καθορισμό των αποδεκτών επιπέδων των τάσεων. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των θαλασσίων κατασκευών θα έχει εξελαθεί (rolled) και, τελικά, συγκολληθεί. Οι τάσεις που παραμένουν στα κατασκευαστικά στοιχεία είναι γνωστές ως *παραμένουσες τάσεις*. Το μέγεθος των εν λόγω τάσεων προσδιορίζεται συνήθως με την αφαίρεση διαμηκών τμημάτων και μετρώντας την παραμόρφωση που προκύπτει. Μόνο οι διαμήκεις τάσεις μετρούνται συνήθως. Για να υπάρχει ισορροπία στο στοιχείο που εξετάζουμε, θα πρέπει η αξονική δύναμη και ροπή που προκύπτει από την ολοκλήρωση αυτών των παραμενουσών τάσεων σε κάθε διατομή του στοιχείου να είναι μηδενικές.

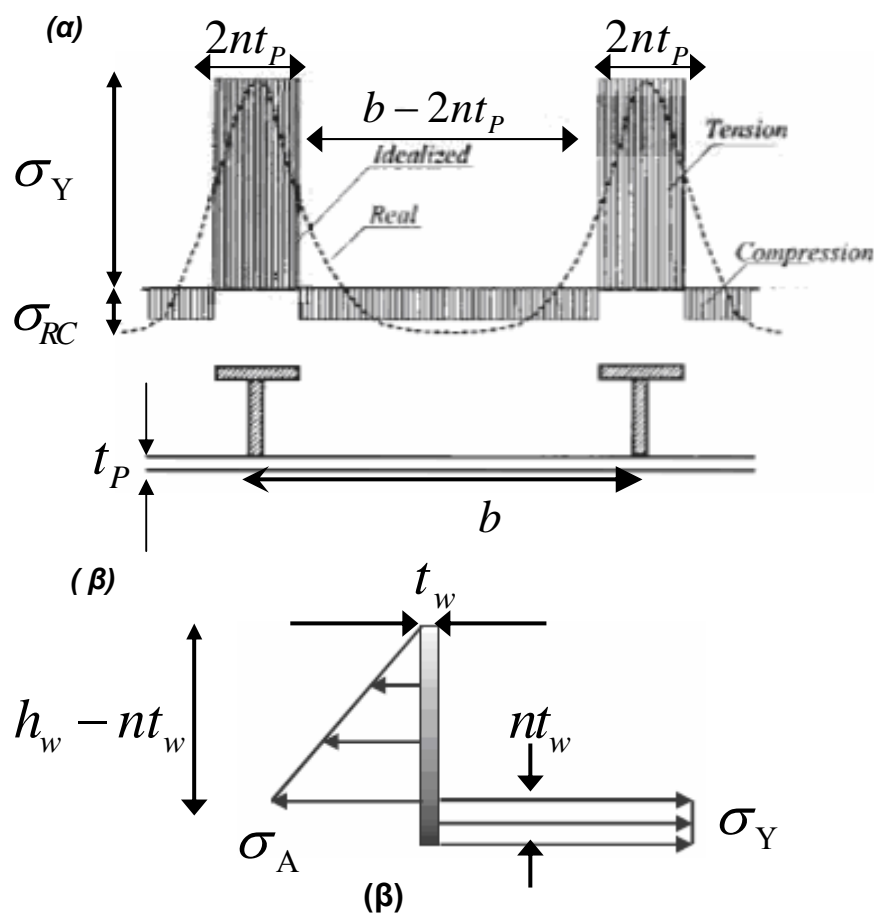
Η μορφή των παραμενουσών τάσεων σε ένα ενισχυμένο έλασμα φαίνεται στο Σχήμα 1.4.1α, που περιλαμβάνει ένα τμήμα εφελκυστικό σε μέτρο τάσεως διαρροής στην ένωση με το ενισχυτικό, το οποίο εξισορροπείται από μια ζώνη ομοιόμορφης συμπίεσης στο κεντρικό τμήμα της πλάκας. Το μέτρο των

παραμενουσών τάσεων υπό συμπίεση μπορεί να υπολογιστεί από πλευράς ισοροπίας από τη σχέση 1.1:

$$\frac{\sigma_{RC}}{\sigma_Y} = \frac{2n}{\frac{b}{t_P} - 2n} \quad (1.1) \text{ (αφορά το έλασμα)}$$

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_Y} = \frac{2nt_w}{(h_w - nt_w)} \quad (1.2) \text{ (αφορά το ενισχυτικό)}$$

Η τιμή του συντελεστή n τείνει να είναι μεγάλη για συγκολλητές κατασκευές. Όμως, όταν το κατασκευαστικό στοιχείο υπόκειται σε εναλλακτικά φορτία κατά τη λειτουργία του στη θάλασσα, η τιμή των παραμενουσών τάσεων τείνει να μειωθεί λόγω shakeout από περιστασιακά εφελκυστικά φορτία [3]. Ο Faulkner (1975) πρότεινε ο συντελεστής n να λαμβάνει τιμές από 3 έως 4.5 κατά το σχεδιασμό.

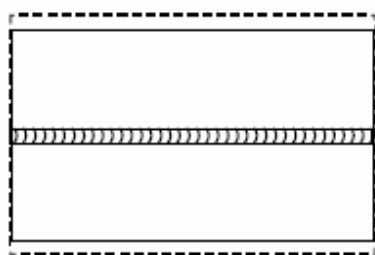


Σχήμα 1.4.1 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων
(α) Για το έλασμα (β) Για το ενισχυτικό

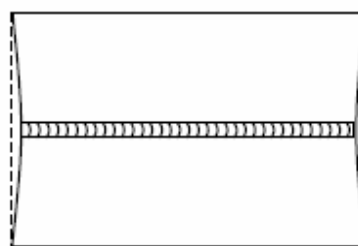
Τα επίπεδα τιμών και η κατανομή των παραμενουσών τάσεων στα ελάσματα και στα ενισχυτικά διαφέρουν ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής καθώς και τις μεθόδους παραγωγής που χρησιμοποιούνται, όπως εξέλαση, συγκόλληση, μηχανική και θερμική κατεργασία. Οι ειδικοί χάλυβες υψηλής αντοχής επιτρέπουν τη δημιουργία μεγάλων ζωνών θερμική επίδρασης (heat affected zones) με τη συνεπακόλουθη ανάπτυξη, σημαντικού μέτρου, παραμενουσών τάσεων. Υψηλές τιμές παραμενουσών τάσεων μπορεί να αποτελέσουν ένα σημαντικότατο παράγοντα απώλειας της κατασκευαστικής αντοχής.

1.4.2 Αρχικές παραμορφώσεις – αποκλίσεις

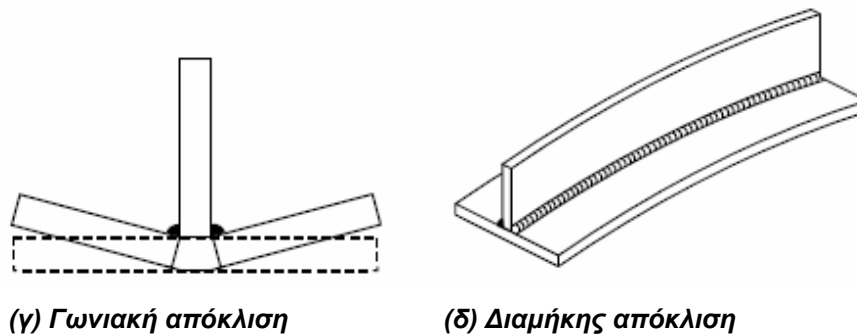
Ένας άλλος παράγοντας απώλειας μηχανικής αντοχής αποτελούν και οι αρχικές αποκλίσεις των ελασμάτων που ενσωματώνονται σε αυτά κατά τη συγκόλληση, κατασκευή, θερμική κατεργασία, μεταφορά και αποθήκευση [4]. Η επίδραση των αρχικών αυτών, ατελειών στη μέγιστη αντοχή των ελασμάτων εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το σχήμα τους. Στις περισσότερες θεωρητικές μελέτες, οι αρχικές ατέλειες λαμβάνονται έτσι ώστε να έχουν το σχήμα της ιδιομορφής λυγισμού (buckling mode), και αυτό γιατί οι αρχικές παραμορφώσεις έχουν σημαντική επιρροή στη μέγιστη αντοχή όταν η μορφή τους συμπίπτει με την αντίστοιχη ιδιομορφή. Στο Σχήμα 1.4.2 παρουσιάζονται διάφοροι τύποι αρχικών παραμορφώσεων που οφείλονται σε διαδικασίες συγκολλήσεων [5]. Πρακτικά όμως, οι γωνιακές μεταβολές και η διαμήκης καμπτική απόκλιση είναι μεγαλύτερου ενδιαφέροντος, τη στιγμή που οι διαμήκεις ή οι εγκάρσιες συρρικνώσεις μπορούν να αμεληθούν [1].



(α) Εγκάρσια συρρίκνωση



(β) Διαμήκης συρρίκνωση

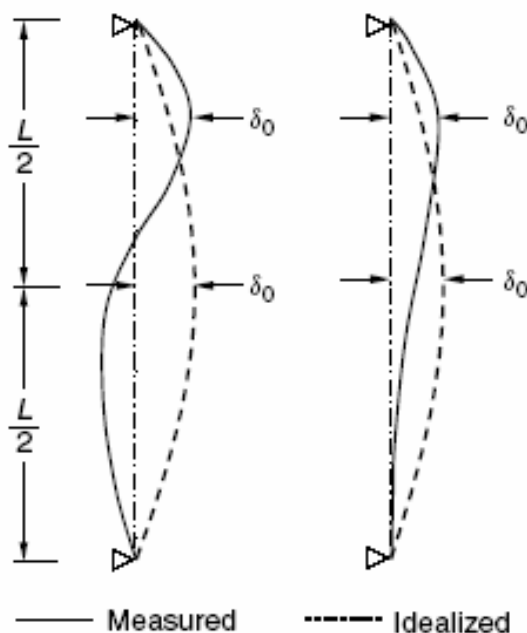


(γ) Γωνιακή απόκλιση (δ) Διαμήκης απόκλιση
Σχήμα 1.4.2 Διάφορες μορφές αρχικών ατελειών λόγω συγκόλλησης

Για λόγους πρακτικούς κατά τη σχεδίαση – ανάλυση , η αρχική απόκλιση λόγω συγκολλησεως ενός ενισχυμένου ελάσματος λαμβάνεται ιδεατά σύμφωνα με τη διακεκομμένη γραμμή του Σχήματος 1.4.3, που μπορεί να αποδοθεί σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

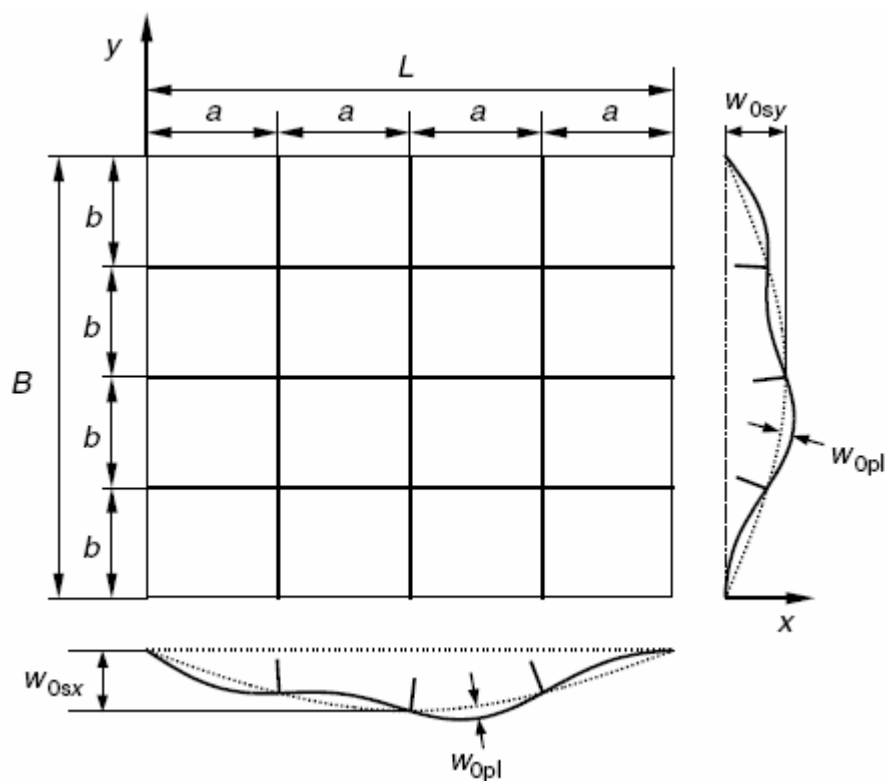
$$w_0 = \delta_0 \sin \frac{\pi x}{L} \quad (1.3)$$

όπου δ_0 είναι το μέτρο της αρχικής απόκλισης, ενώ L είναι το μήκος του στοιχείου μεταξύ των στηρίξεων.

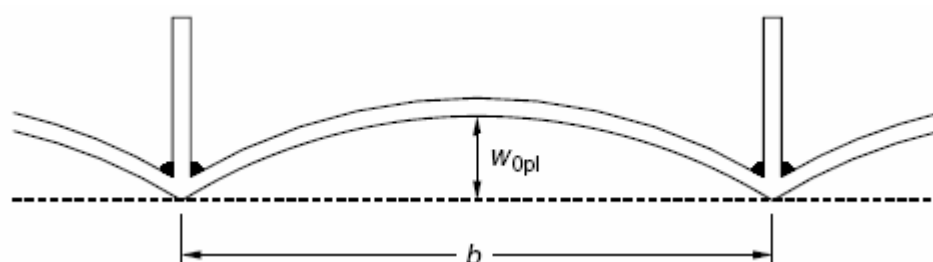


Σχήμα 1.4.3 Μορφή αρχικών ατελειών για πρακτικούς λόγους

Στο Σχήμα 1.4.4 παρουσιάζεται η μορφή των αρχικών ατελειών σε ενισχυμένα ελάσματα διαφόρων κατασκευών. Οι μορφές αυτές προέκυψαν από μετρήσεις που εκτελέστηκαν στη μεταλλική κατασκευή εμπορικών πλοίων (Carlsen & Czuko 1978, Antoniou 1980, Kmiecik et al. 1995 [5]) και όπως μπορεί να φανεί η γεωμετρική απεικόνιση αυτών είναι εξαιρετικά σύνθετη. Και πάλι όμως για πρακτικούς λόγους, είναι απαραίτητη περαιτέρω εξιδανίκευση. Οι μετρήσεις των αρχικών ατελειών σε στοιχεία ελασμάτων σε χαλύβδινες κατασκευές δείχνουν ότι στη διαμήκη κατεύθυνση είναι κυρίαρχη η μορφή πολλαπλών κυμάτων, ενώ στην εγκάρσια κατεύθυνση βρίσκουμε ένα ημικύμα, όπως στο σχήμα 1.4.5.



Σχήμα 1.4.4 Μορφές αρχικών αποκλίσεων βάσει μετρήσεων σε εμπορικά πλοία



Σχήμα 1.4.5 Εξιδανίκευση μορφής αρχικών αποκλίσεων κατά το πλάτος κατασκευαστικού στοιχείου

Ο Smith συγκεντρώνοντας αρκετά στοιχεία μετρήσεων των αρχικών ατελειών σε ελάσματα πλοίων είτε σε ενέργεια, είτε αμέσως μετά την κατασκευή τους και εφαρμόζοντας λογαριθμικές κατανομές, κατέληξε στη διακριτοποίηση των αρχικών αποκλίσεων σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τον Πίνακα 1.1 [6]. Όπως φαίνεται και από τον εν λόγω πίνακα, το μέτρο της απόκλισης βρέθηκε να είναι ανάλογο του β^2 , όπου β είναι ο συντελεστής λυγηρότητας του ελασματος, για τον οποίο θα αναφερθούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 1.1 Προτάσεις Smith για αρχικές γεωμετρικές ατέλειες

Χαρακτηρισμός αρχικής απόκλισης	w_0/t
Μικρού μεγέθους (Slight)	$0.025 \beta^2$
Μεσαίου μεγέθους (Average)	$0.1 \beta^2$
Μεγάλου μεγέθους (Severe)	$0.3 \beta^2$

Πέραν του Smith και άλλοι ερευνητές πρότειναν σχέσεις για την προσεγγιστική εύρεση της μέγιστης τιμής αρχικής απόκλισης των ελασμάτων μεταξύ των ενισχυτικών, όταν δεν υφίστανται ανάλογες μετρήσεις και λαμβάνοντας πάντα τη μορφή παραμόρφωσης που αναλύθηκε στις ανωτέρω παραγράφους. Μερικές από αυτές παρουσιάζονται ως ακολούθως [5]:

- Faulkner (1975):

$$\frac{w_{0pl}}{t} = \begin{cases} k\beta^2(t_w/t) & \text{for } t_w < t \\ k\beta^2 & \text{for } t_w \geq t \end{cases} \quad (1.4)$$

όπου β ο συντελεστής λυγηρότητας, t_w το πάχος του ενισχυτικού, t το πάχος του ελασματος, ενώ K συντελεστής, ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0.05 – 0.15 για θαλάσσιες κατασκευές και λιγότερο από 0.1 για κατασκευές ξηράς. Ο Faulkner για τις μετρήσεις του, χρησιμοποιούσε τις τιμές $K=0.12$ για β μικρότερο ή ίσο του 3 και $K=0.15$ για μεγαλύτερο του 3, τη στιγμή που ο Αντωνίου πρότεινε $K=0.091$ για πάχος ενισχυτικού, μικρότερο του πάχους ελασματος και $K=0.0628$ για το αντίθετο.

- Carlsen & Czujko (1978):

$$\frac{w_{0pl}}{t} = 0.016 \frac{b}{t} - 0.36 \quad \text{for } \frac{b}{t} > 40 \quad (1.5)$$

- Αντωνίου (1980) (τροποποιώντας την ανωτέρω σχέση):

$$\frac{w_{0pl}}{t} = \begin{cases} 0.018b/t - 0.55 & \text{for } t \leq 14 \text{ mm} \\ 0.014b/t - 0.32 & \text{for } t > 14 \text{ mm} \end{cases} \quad (1.6)$$

- Masaoka (1996):

$$\frac{w_{0pl}}{t} = k \left(\frac{b}{t} \right)^2 \quad (1.7)$$

όπου ο συντελεστής $K = 8 \cdot 10^{-5}$ για εμπορικά πλοία.

Διεθνείς οργανισμοί καθορίζουν τα όρια των μέγιστων τιμών στα κατασκευαστικά στοιχεία με σκοπό οι αρχικές παραμορφώσεις στην παραγομένη κατασκευή να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές. Σε περίπτωση που τα όρια παραβιάζονται, οι αρχικές ατέλειες θα πρέπει να επισκευάζονται. Μερικά παραδείγματα των εν λόγω ορίων είναι ως ακολούθως:

- Det Norske Veritas (DNV) [7], [8]:

$$\frac{w_{0pl}}{b} \leq 0.01 \quad (1.8)$$

- Ποιοτικός έλεγχος Ναυπηγείων Ιαπωνίας και Γερμανίας:

$$\begin{aligned} w_{0pl} &\leq 7 \text{ mm for bottom plate} \\ w_{0pl} &\leq 6 \text{ mm for deck plate} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Στην παρούσα εργασία θα εισαχθούν αρχικές παραμορφώσεις στο στοιχείο έλασμα – ενισχυτικό σύμφωνα με τις εξιδανικευμένες παραδοχές που αναλύθηκαν ανωτέρω, ήτοι ένα ημιτονοειδές κύμα στη διαμήκη κατεύθυνση και ένα ημικύμα στις δύο πλευρές του ελάσματος κατά το πλάτος, ενώ σαν μέγιστες τιμές θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές που πηγάζουν από την έρευνα του Smith (Average imperfections). Δεδομένου ότι οι εν λόγω ατέλειες επηρεάζουν σημαντικά τη μετρούμενη μέγιστη αντοχή που προκύπτει από την ανάλυση των πεπερασμένων

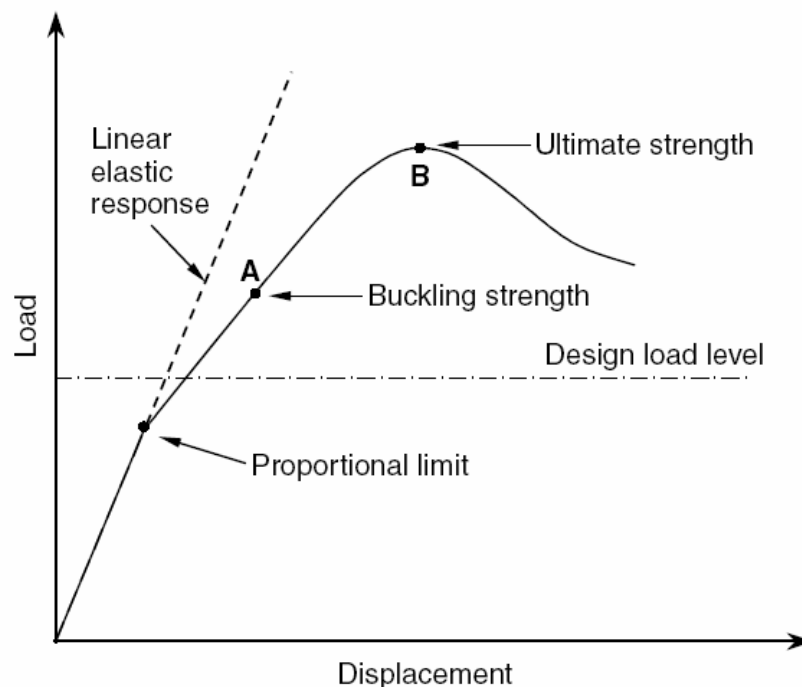
στοιχείων, κατά την παρουσίαση των μοντέλων σε επόμενο κεφάλαιο, θα επανερχόμαστε στο θέμα των παραμορφώσεων, αναλύοντας το, διεξοδικά κατά περίπτωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΛΥΓΙΣΜΟΣ - ΘΡΑΥΣΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

2.1 Γενικά

Τα φαινόμενα που ενέχονται κατά τη συμπίεση των ρηγματοποιημένων ενισχυμένων ελασμάτων είναι αρχικά ο λυγισμός, η μεταλυγισμική συμπεριφορά και τέλος, η κατάρρευση του κατασκευαστικού στοιχείου λόγω πλήρους πλαστικοποίησης που το καθιστά ανίκανο στην πρόσληψη κάποιου φορτίου. Ο σχεδιαστής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα ανωτέρω φαινόμενα και να υπολογίζει τις διαστάσεις – μορφή – μηχανικές ιδιότητες των κατασκευαστικών στοιχείων, έτσι ώστε να αντέχουν τα προβλεπόμενα φορτία (αποφεύγοντας φυσικά και την πιθανότητα έναρξης ρωγμών). Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε τα εν λόγω φαινόμενα που συνοψίζονται στον έλεγχο της συμπεριφοράς των κατασκευαστικών τμημάτων από το σχεδιαστή με βάση τις μειωτικές καμπύλες φόρτισης (load end shortening), όπως στο Σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για τον έλεγχο υπέρβασης του φορτίου σχεδιασμού

2.2 Έναρξη ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα

Κάτω από την επίδραση κύκλου φόρτισης είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ρωγμές σε περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Επίσης οι ρωγμές είναι δυνατόν να δημιουργηθούν από ελαττώματα που ενσωματώνονται στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Η έναρξη των ρωγμών εν γένει είναι συνδεδεμένη με τη μικροσκοπική συμπεριφορά του υλικού. Για παράδειγμα, σε μεγάλο βαθμό ελαττώματα που προέρχονται από κακή συγκόλληση, υφίστανται τόσο εσωτερικά του υλικού, όσο και στη συγκολληθείσα επιφάνεια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ρωγμές δεν μπορούν να αποφευχθούν, αλλά σίγουρα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν. Είναι σημαντικό να εντοπίζονται και να εκτιμώνται πριν προκαλέσουν καταστροφική αστοχία.

Οι μορφές της κατασκευαστικής θραύσης που συνδέονται με την εμφάνιση των ρωγμών μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες [4], [5]:

(1) **Ψαθυρή θραύση** (brittle fracture): Συμβαίνει όταν η παραμόρφωση του υλικού κατά τη θραύση είναι πολύ μικρή. Αυτός ο τύπος της θραύσης είναι ιδιαίτερα ανησυχητικός, καθώς είναι δυνατόν η ταχύτητα εξάπλωσης της ρωγμής λόγω κόπωσης να φτάσει έως 500 m/sec[2]. Οι κρίσιμοι παράγοντες για την εμφάνιση της εν λόγω θραύσης είναι το επίπεδο της συγκέντρωσης τάσεων (παραμενουσών και μη) και η σκληρότητα του υλικού, με το τελευταίο να εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ρυθμό παραμόρφωσης.

(2) **Όλκιμη θραύση** (ductile fracture): Συμβαίνει σε μεταλλικές κατασκευές από όλκιμο υλικό που διαθέτει υψηλή αντίσταση έναντι στη θραύση, με υψηλές θραυστικές παραμορφώσεις. Εξαρτάται από το βαθμό φόρτισης καθώς και από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η διάβρωση και η θερμοκρασία.

(3) **Πλήρης διάρρηξη** (rupture): Συμβαίνει κατά το “σκίσιμο” της κατασκευής συνοδευμένη από μεγάλη πλαστική ροή. Η εν λόγω θραύση ευνοείται από υψηλές τριαξονικές (εφελκυστικές) τάσεις, οι οποίες κατ’ επέκταση ευνοούνται όταν αυξηθεί το πάχος του ελάσματος.

Από τα παραπάνω συνάδει ότι το φαινόμενο της όλκιμης θραύσης είναι ενδιάμεσο μεταξύ των άλλων δύο τύπων θραύσης. Η εξέλιξη της εν λόγω

θραύσης μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις (4) περιοχές, στη δημιουργία της αρχικής κορυφής ρωγμής, στην έναρξη της ανάπτυξης της ρωγμής, στη σταθερή ανάπτυξη της ρωγμής και τέλος στην ασταθή εξάπλωση της ρωγμής (Shih et al 1977). Στην παρούσα εργασία θα θεωρήσουμε ότι τα ελάσματα βρίσκονται στην τρίτη περιοχή όγκιμης θραύσης και δέχονται ξαφνική, μονοτονικά αυξανόμενη, μονοαξονική συμπίεση. Αυτό μπορούμε να το υποθέσουμε με ασφάλεια, καθώς τα όγκιμα υλικά παραμένουν αρκετό χρόνο στην τρίτη περιοχή, παρουσιάζουν δηλαδή χαμηλή ταχύτητα αύξησης της ρωγμής, που συνοδεύεται από υπολογίσιμη πλαστική παραμόρφωση.

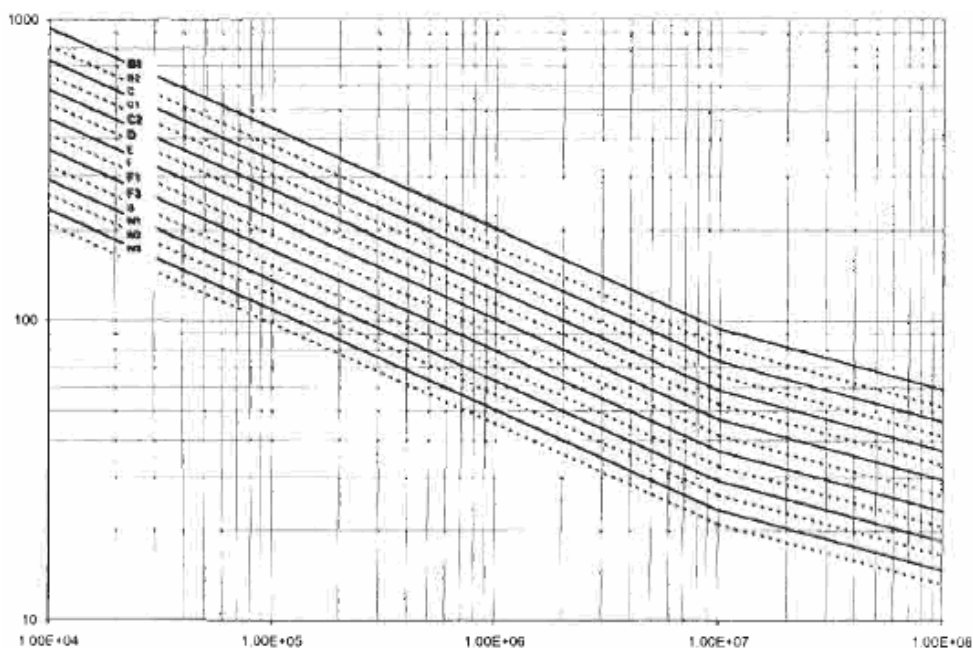
Γενικότερα, οι ρωγμές δημιουργούνται όταν η συσσωρευμένη ενέργεια κύκλου φορτίων που δέχεται η κατασκευή, φθάνει σε ένα κρίσιμο επίπεδο. Η κόπωση της κατασκευής μπορεί να χωριστεί σε δύο (2) κατηγορίες: την υψηλής συχνότητας (μικρών τάσεων) και τη χαμηλής συχνότητας (υψηλών τάσεων). Τυπικά η αστοχία λόγω κόπωσης καλείται ως χαμηλής συχνότητας όταν ο αριθμός των κύκλων είναι κάτω από 10^4 . Ο αριθμός των κύκλων σε υψηλής συχνότητας κόπωση είναι της τάξεως των εκατομμυρίων. Για τις θαλάσσιες κατασκευές το τελευταίο είδος αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Για το σχεδιαστή είναι εξαιρετικά σημαντικό να συμπεριλαμβάνει την κόπωση στους υπολογισμούς του, στο μέτρο του δυνατού. Ο σχεδιασμός για την κόπωση είναι θέμα σχεδιασμού των λεπτομερειών και κυρίως θέμα σχεδιασμού των συγκολλήσεων. Οι δύο (2) μέθοδοι προεκτίμησης των δυνατοτήτων στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες είναι οι καμπύλες S – N και η θραυστομηχανική. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η πρώτη, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται κυρίως για τον καθορισμό του κατάλληλου μήκους του ελαττώματος στην κατασκευή. Ένα δείγμα τέτοιων λογαριθμικών καμπύλων, παρατηρούμε στο Σχήμα 2.2. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εν λόγω καμπύλες προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα στη διάρκεια των οποίων, τα υλικά υποβάλλονται σε φορτία ελεγχόμενων τάσεων, καταλήγοντας στη συνέχεια στην ακόλουθη σχέση:

$$N = K * S^{-m} \quad (2.1)$$

όπου N είναι ο αριθμός των κύκλων ζωής για την πιθανή έναρξη της ρωγμής, S το

εύρος τάσεων και m , K σταθερές υλικού, που εξαρτώνται κυρίως από το περιβάλλον και τις συνθήκες του πειράματος.



Σχήμα 2.2 Καμπύλες $S - N$

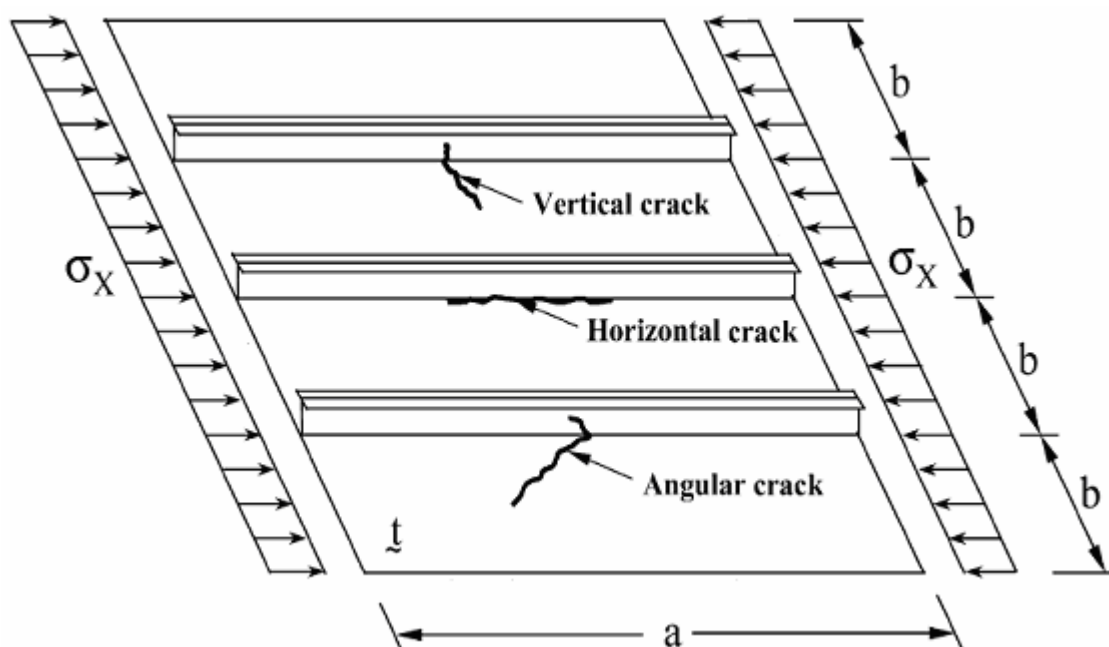
2.3 Λυγισμός ενισχυμένων ελασμάτων

Για τη διευκόλυνση στην παρουσίαση του φαινομένου θέματος, περιορίζουμε την εξέταση στα ελάσματα που βρίσκονται μεταξύ των ενισχυτικών. Καθώς οι επικρατούσες θλιπτικές τάσεις φτάνουν σε μια κρίσιμη τιμή, το έλασμα λυγίζει, με αποτέλεσμα την πολύ γρήγορη αύξηση της κάθετης προς το φορτίο, παραμόρφωσης και συνεπακόλουθη τη σημαντική μείωση της ομοεπίπεδης στο φορτίο, ακαμψίας. Ουσιαστικά, ο λυγισμός ενεργοποιεί τις φυσικές διαδικασίες που οδηγούν στην αστοχία του ελάσματος.

Το φαινόμενο του λυγισμού κατηγοριοποιείται (με βάση την πλαστικότητα) σε τρεις (3) τύπους, τον ελαστικό, τον ελαστοπλαστικό και τον καθαρά πλαστικό λυγισμό, με τους δύο τελευταίους τύπους να αναφέρονται και ως μη ελαστικοί. Ο ελαστικός λυγισμός συμβαίνει μόνο στην ελαστική περιοχή. Ο ελαστοπλαστικός λυγισμός συμβαίνει αφού μια τοπική ζώνη στην πλάκα παραμορφώνεται πλαστικά. Ο πλαστικός λυγισμός σηματοδοτεί ότι το φαινόμενο λαμβάνει χώρα στην περιοχή μεγάλης διαρροής, για παράδειγμα αφού το έλασμα έχει διαρρεύσει σε μεγάλες ζώνες αυτού. Τα λεπτά ελάσματα παρουσιάζουν συνήθως ελαστικό λυγισμό, τη

στιγμή που, αντίστοιχα μεγαλύτερου πάχους, αντιμετωπίζουν μη ελαστικό λυγισμό. Η λυγισμική συμπεριφορά των ελασμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως γεωμετρικές διαστάσεις, ιδιότητες του υλικού, χαρακτηριστικά του επιβαλλόμενου φορτίου, συνοριακές συνθήκες, αρχικές ατέλειες, τοπικά ελαττώματα (π.χ διατρήσεις).

Η θραύση λόγω κόπωσης συνήθως παρατηρείται στα ενισχυμένα ελάσματα κατά μήκος της συγκολλησθείσας επιφάνειας ανάμεσα στην πλάκα και στο ενισχυτικό, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3 . Ο προσανατολισμός της ρωγμής μπορεί να διακριθεί σε τρεις (3) ομάδες και συγκεκριμένα σε κάθετη, οριζόντια και γωνιακή [9]. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με ρωγμές κάθετες στο ενισχυτικό και στην επιβαλλόμενη συμπίεση.



Σχήμα 2.3 Τύποι προσανατολισμού ρωγμών σε ενισχυτικά ελάσματα

2.3.1 Μαθηματική προσέγγιση του λυγισμού

Η μαθηματική λύση συγκεκριμένων προβλημάτων λυγισμού απαιτεί την ικανοποίηση των συνοριακών συνθηκών και των εξισώσεων ισορροπίας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με την απευθείας ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων της επίπεδης πλάκας ή με τη χρησιμοποίηση αριθμητικών μεθόδων που μπορεί να μην ικανοποιούν επακριβώς τις ανωτέρω συνθήκες. Η

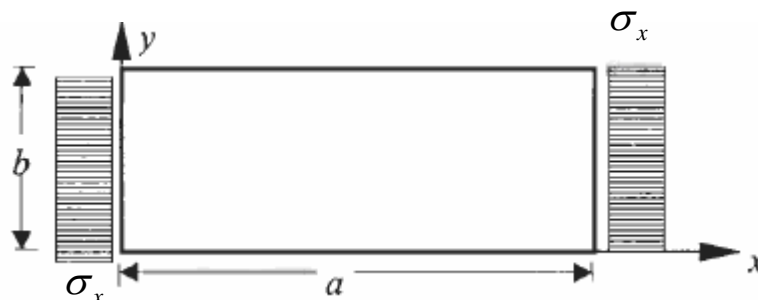
δεύτερη μέθοδος βασίζεται κυρίως στην ολοκλήρωση ενεργειακών εξισώσεων και παρόλο που είναι προσεγγιστική, είναι πολύ ακριβής. Η ανάγκη για προσεγγιστικές μεθόδους πηγάζει από το γεγονός ότι ακριβείς λύσεις μπορούν να υπάρξουν μόνο για περιορισμένο αριθμό προβλημάτων λυγισμού με πρακτικό ενδιαφέρον.

Η διαδικασία για τον υπολογισμό του ελαστικού φορτίου λυγισμού προκύπτει από την εφαρμογή ομοεπίπεδης ομοιόμορφης συμπίεσης σε ένα αρχικά επίπεδο έλασμα (όπως στο σχήμα 2.4). Η εξίσωση ισορροπίας της πλάκας δίνεται ως ακολούθως:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = -\frac{1}{D} (N_x t \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} t \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y t \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}) \quad (2.2)$$

όπου w είναι η κάθετη παραμόρφωση, N_x, N_y, N_{xy} είναι οι τάσεις ανά μονάδα μήκους στην αντίστοιχη διεύθυνση και D είναι η καμπτική ακαμψία της πλάκας που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.4 Πλάκα με απλή στήριξη σε ομοιόμορφη συμπίεση

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ακαμψία της πλάκας δεν έχει την ίδια τιμή στη μη ελαστική περιοχή, καθώς διαφοροποιείται η τιμή του λόγου Poisson. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ακριβείς λύσεις της εξίσωσης (2.1) με πρακτικό ενδιαφέρον είναι περιορισμένης κλίμακας. Μια από αυτές τις περιπτώσεις είναι η λύση για την περίπτωση του Σχήματος 2.3. Για αυτή την περίπτωση η εξίσωση 2.1 γράφεται

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = -\frac{1}{D} (N_x t \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}) \quad (2.3)$$

καθώς μηδενίζονται οι τάσεις N_y, N_{xy} .

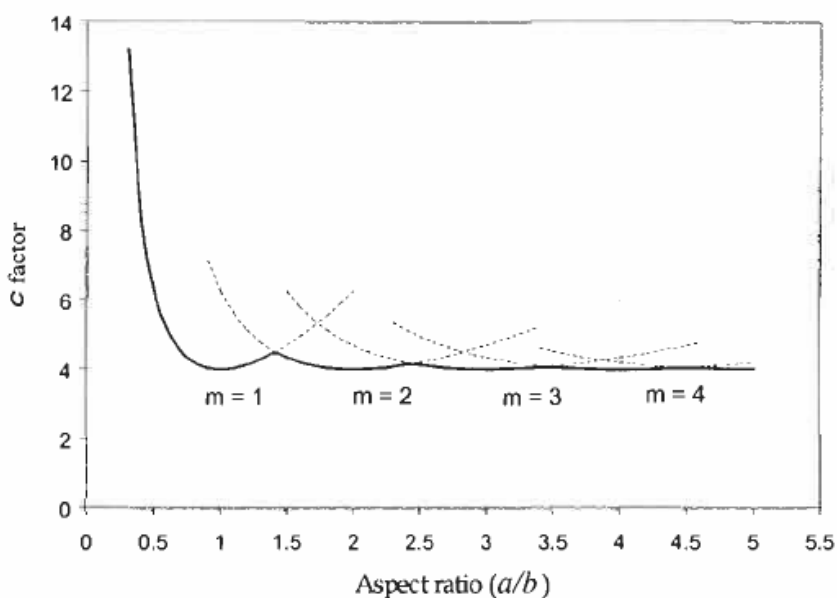
Με βάση τώρα τις συνοριακές συνθήκες και για τον υπολογισμό μιας λύσης που να ικανοποιεί την εξίσωση (2.3), υποθέτουμε την ακόλουθη συνάρτηση εκτοπίσματος

$$w = C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.4)$$

με σκοπό την αναζήτηση των συντελεστών C_{mn} . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι m και n είναι οι αριθμοί των ημικυμάτων στη x και y διεύθυνση. Η ακριβής λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.4) μας δίνει την έκφραση της ελαστικής τάσης λυγισμού, ως ακολούθως:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 c = \frac{\pi^2 D}{tb^2} c \quad (2.5)$$

όπου c είναι ένας συντελεστής που συνδέεται με τις γεωμετρικές διαστάσεις της πλάκας και συγκεκριμένα με το λόγο μήκους προς πλάτος a/b (aspect ratio). Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται ένα διάγραμμα που φανερώνει τη σχέση του aspect ratio (a/b) με τον εν λόγω συντελεστή c .



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα του συντελεστή λυγισμού c σε σχέση με aspect ratio

Όσον αφορά στις ενεργειακές μεθόδους εύρεσης λύσης, αυτές βασίζονται στη θεώρηση ότι η συνολική δυναμική ενέργεια του συστήματος πλάκας -επιβαλλόμενου φορτίου προκύπτει από τη διαφορά δύο ολοκληρωμάτων,

όπως εμφανίζεται στη σχέση (2.6) για την περίπτωση του ελαστικού λυγισμού της ανωτέρω πλάκας.

$$\Delta W = \frac{D}{2} \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy - \frac{1}{2} \iint \left[N_x t \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2N_y \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy$$

(2.6)

Το πρώτο ολοκλήρωμα της ανωτέρω σχέσεως (2.6) παριστάνει την αύξηση της ενέργειας παραμόρφωσης εξαιτίας της κάμψης και της στροφής του ελάσματος κατά την έναρξη του λυγισμού, ενώ το δεύτερο συνδέεται με την ενέργεια των μεμβρανικών τάσεων ως απόρροια της κάθετης παραμόρφωσης. Αν οι φορτισμένες πλευρές της πλάκας είναι δεσμευμένες κατά το λυγισμό, το τελευταίο παριστάνει την ενέργεια των μεμβρανικών τάσεων. Στην περίπτωση όμως, που οι εν λόγω πλευρές υπόκεινται σε σχετική αλλαγή, το δεύτερο ολοκλήρωμα παριστάνει το έργο του εξωτερικού φορτίου [10].

Γενικά από όλες τις συναρτήσεις παραμόρφωσης που ικανοποιούν τις γεωμετρικές συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, η στάσιμη τιμή της συνολικής δυναμικής ενέργειας ΔW του συστήματος θα είναι μηδέν για εκείνη τη συνάρτηση που ικανοποιεί τη διαφορική εξίσωση ισορροπίας. Αυτή η συνάρτηση θα αποτελεί την ακριβή λύση του προβλήματος. Επειδή όμως, ακριβείς λύσεις μπορούν να βρεθούν σε λίγες περιπτώσεις, τα ενεργειακά ολοκληρώματα είναι εξαιρετικής χρησιμότητας στην εύρεση προσεγγιστικών λύσεων που ικανοποιούν επακριβώς τις συνοριακές συνθήκες και προσεγγιστικά τη διαφορική εξίσωση. Έτσι, από τις διάφορες συναρτήσεις που ικανοποιούν τις συνοριακές συνθήκες αλλά όχι απαραίτητα τη διαφορική, η συνάρτηση για την οποία η διαφορά των ενεργειακών ολοκληρωμάτων είναι ελάχιστη, συγκροτεί την καλύτερη προσεγγιστική λύση της διαφορικής. Η πλέον πιο διαδεδομένη ενεργειακή μέθοδος για την εύρεση της τάσεως λυγισμού των λεπτών πλακών είναι η μέθοδος Rayleigh – Ritz. Η εν λόγω μέθοδος συνίσταται από τα ακόλουθα βήματα:

(1) Η παραμορφωμένη επιφάνεια του λυγισμένου ελάσματος εκφράζεται με τη ανεπτυγμένη μορφή αθροίσματος μεγάλου αριθμού (θεωρητικά άπειρων)

συναρτήσεων, με απροσδιόριστους συντελεστές. Γενικά κάθε όρος του ανωτέρω αθροίσματος, θα πρέπει να ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.

(2) Η συνολική δυναμική ενέργεια του συστήματος φορτίο — πλάκα υπολογίζεται από την εξίσωση (2.6) για την εν λόγω παραμορφωμένη επιφάνεια και ελαχιστοποιείται με τη χρήση των απροσδιόριστων συντελεστών.

(3) Αυτή η διαδικασία ελαχιστοποίησης οδηγεί σε ένα σύστημα γραμμικών ομογενών εξισώσεων με αγνώστους τους εν λόγω συντελεστές. Αυτές οι εξισώσεις έχουν μη προφανείς λύσεις μόνο αν η ορίζουσα των συντελεστών είναι μηδενική. Η εξίσωση της ορίζουσας με το μηδέν παρέχει την εξίσωση που πρέπει να λυθεί για την εύρεση της τάσεως λυγισμού.

Οι τάσεις λυγισμού που λαμβάνονται από τις προσεγγιστικές μεθόδους είναι πάντοτε μεγαλύτερες από την σωστή λύση, παρόλο που θεωρούνται ότι είναι εξαιρετικά ακριβείς. Αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η συνάρτηση παραμόρφωσης προσεγγίζει προς την ακριβή μορφή λυγισμού, με συνέπεια η συνολική δυναμική ενέργεια του συστήματος που προκύπτει από τη χρήση της προσεγγιστικής συνάρτησης να είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Στην περίπτωση που η συνάρτηση παραμόρφωσης είναι η πραγματική λύση, τότε μια ακριβής λύση της διαφορικής εξίσωσης έχει επιτευχθεί. Εάν υπάρξει συνάρτηση παραμόρφωσης που να ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες προσεγγιστικά, είναι πιθανόν να πλησιάσουμε μία ακριβής λύση του συστήματος, αυτή τη φορά όχι από τη μέγιστη τιμή, αλλά από την ελάχιστη. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί από μία παραλλαγή της μεθόδου Rayleigh – Ritz γνωστής και ως μεθόδου πολλαπλασιαστών Lagrangian.

Η εν λόγω μέθοδος ακολουθεί σε γενικές γραμμές τη μέθοδο Rayleigh – Ritz με μία, όμως ειδοποιό διαφορά. Ο περιορισμός του προαναφερθέντος βήματος (1), δηλαδή ότι οι οριακές συνθήκες θα πρέπει να ικανοποιούνται για κάθε όρο του αναπτύγματος που περιγράφει την παραμορφωμένη επιφάνεια, αγνοείται και αντικαθίσταται από τη συνθήκη, ότι το ανάπτυγμα θα πρέπει στο σύνολό του να ικανοποιεί τις εν λόγω συνθήκες. Αυτή η συνθήκη, μαθηματικά ικανοποιείται στο βήμα (2) κατά τη διάρκεια της

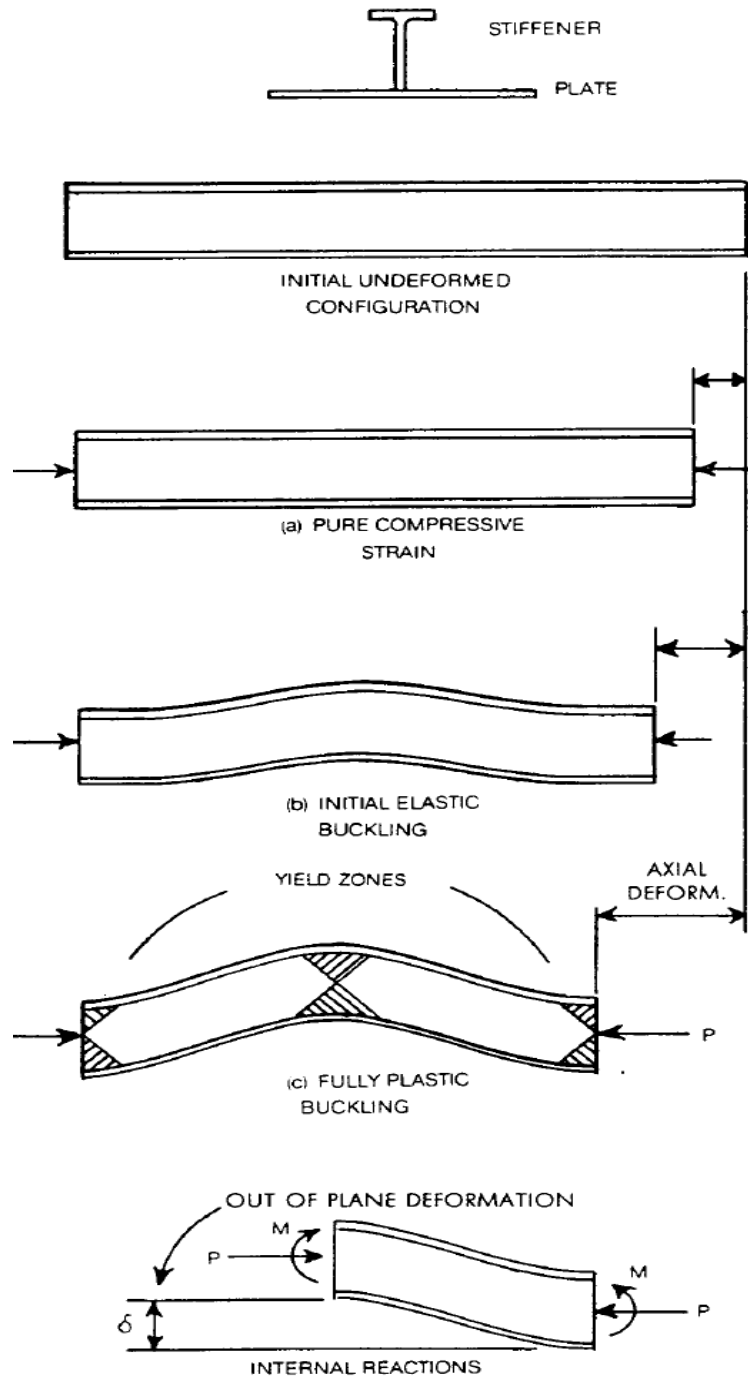
ελαχιστοποίησης της στάσιμης τιμής ενέργειας με τη χρήση των πολλαπλασιαστών Lagrange. Το πλεονέκτημα της μεθόδου των πολλαπλασιαστών έγκειται στο γεγονός ότι με την παράλειψη της αναγκαιότητας εκπλήρωσης των συνοριακών σε κάθε όρο, η επιλογή του αναπτύγματος δεν είναι πλέον τόσο περιορισμένη. Για παράδειγμα, σε πρόβλημα συμπίεσης πλάκας με συνοριακές συνθήκες πάκτωσης, ένα απλό ανάπτυγμα Fourier μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αντί πολύπλοκων συναρτήσεων που απαιτεί η μέθοδος Rayleigh – Ritz.

Εκτός των δύο (2) προαναφερθέντων μεθόδων που βασίζονται στη συνολική ενέργεια του συστήματος, υπάρχουν και άλλες προσεγγιστικές μέθοδοι για τη λύση των προβλημάτων του λυγισμού και οι οποίες διαπραγματεύονται τη λύση της διαφορικής εξίσωσης ισορροπίας. Κύριο ρόλο έχει εδώ, η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών σε συνδυασμό με την μέθοδο της δυναμικής χαλάρωσης, κυρίως όταν η συμπεριφορά της κατασκευής είναι μη γραμμική [11].

2.3.2 Μετάβαση στο μη ελαστικό λυγισμό - κατάρρευση

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, το έλασμα είναι δυνατό με την αύξηση του φορτίου να περάσει από την ελαστική περιοχή στην ελαστο – πλαστική και στη συνέχεια με την περαιτέρω αύξηση να εισέλθει στην πλαστική περιοχή. Η διάκριση των εν λόγω φάσεων του ελάσματος φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2.6. Ουσιαστικά η αντίσταση της πλάκας προέρχεται από την ανάπτυξη των μεμβρανικών τάσεων και διάχυση αυτών, ενάντια στο επιβαλλόμενο φορτίο και τη συνεπακόλουθη μετατόπιση. Αξίζει να παρατηρήσουμε στο εν λόγω σχήμα, τις περιοχές (παρουσιάζονται γραμμοσκιασμένες) που πέρασαν αρχικά στην πλαστική ζώνη και είναι στην περιοχή του επιβαλλόμενου φορτίου καθώς και στη μέση του ελάσματος που υπόκειται την αύξηση της κάθετης παραμόρφωσης. Αυτές οι περιοχές όταν αναπτυχθούν κατά το πάχος του ελάσματος καλούνται πλαστικές «αρθρώσεις» (hinges). Η ένωση πολλών τέτοιων «αρθρώσεων» συνεπάγεται την ταχεία

παραμόρφωση της πλάκας και την προσέγγιση της μέγιστης τάσης της πλάκας [13].

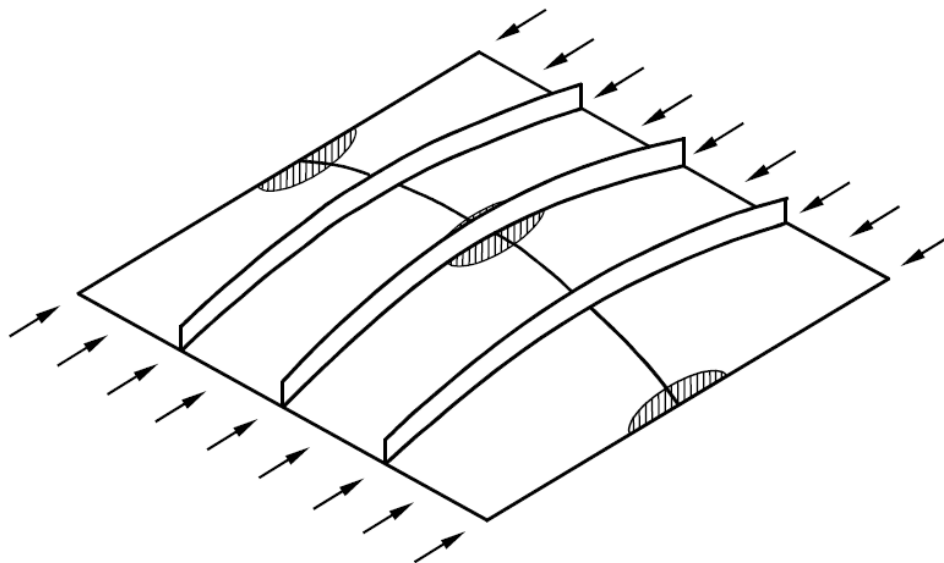


Σχήμα 2.6 Διάκριση των περιοχών λυγισμού στην πλάκα

Όταν το έλασμα υπό μονοαξονική συμπίεση ξεπεράσει κάποιο όριο, τότε θα επέλθει μόνιμη παραμόρφωση. Η συμπεριφορά του υλικού παύει πλέον να είναι ελαστική και για τη μαθηματική κατανόηση του φαινομένου, απαιτείται συνδυασμός αναλυτικών, αριθμητικών και πειραματικών μεθόδων. Τέτοιες μέθοδοι για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού πέραν της

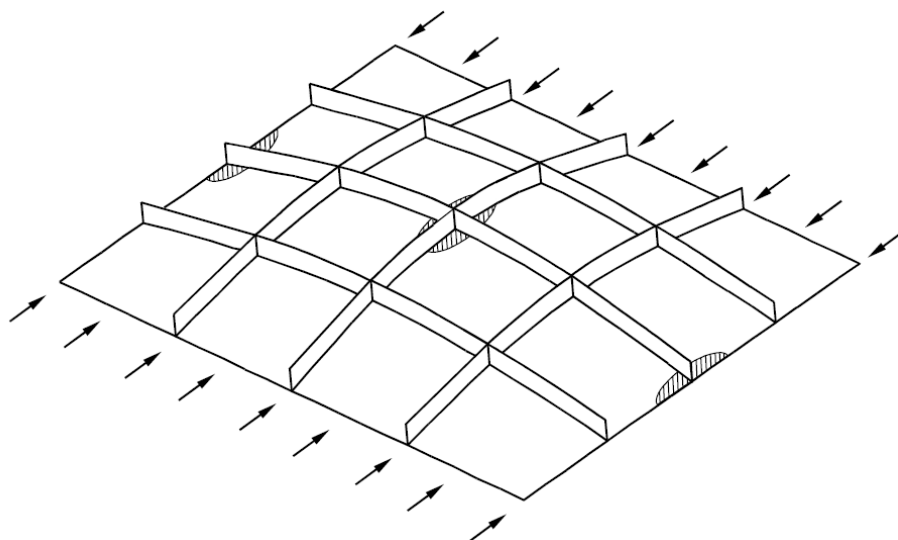
ελαστικής περιοχής, είναι το κριτήριο Von Mises και ο νόμος της πλαστικής ροής. Η σκλήρυνση του υλικού εκφράζεται με επιπλέον σχέσεις (π.χ. work hardening), εδώ όμως αυτή λαμβάνεται ως αμελητέα. Η αστοχία των ενισχυμένων ελασμάτων μπορεί να παρουσιαστεί με μία από τις ακόλουθες μορφές [5], [12]:

(1) Μορφή I-1: Καθολικός λυγισμός των μονοαξονικά ενισχυμένων ελασμάτων σαν ενιαίο σώμα (Σχήμα 2.7α) (οι γραμμοσκιασμένες περιοχές αναπαριστούν αυτές που επήλθε πλαστικότητα)



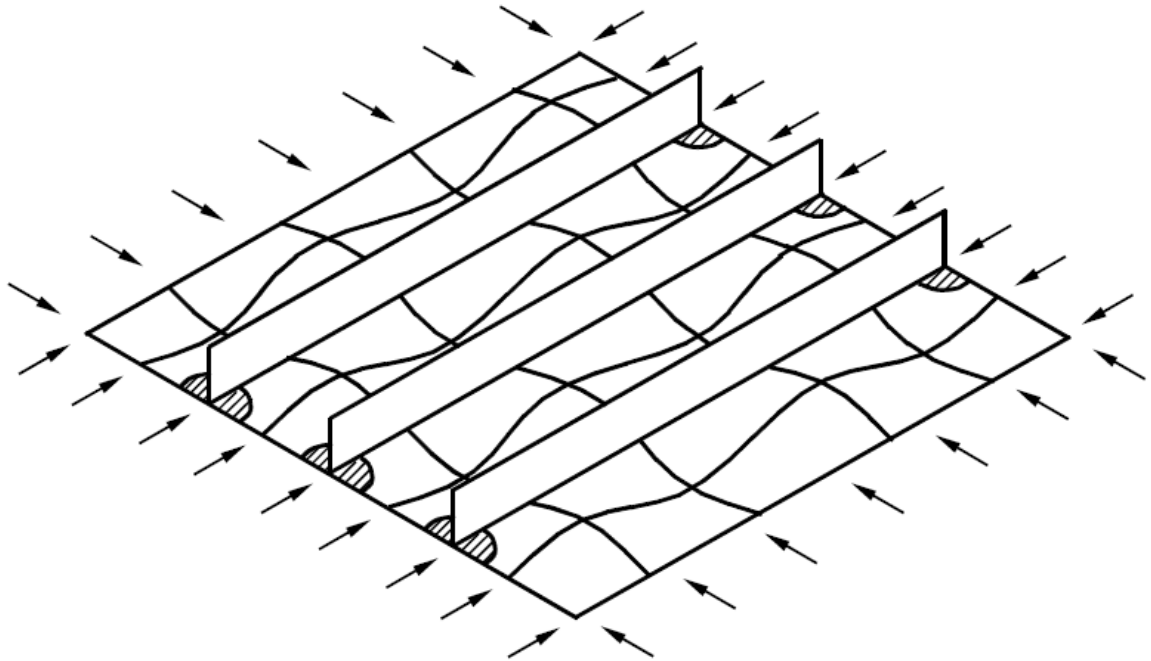
Σχήμα 2.7α Μορφή I-1

(2) Μορφή I-2: Καθολικός λυγισμός των διαξονικά ενισχυμένων ελασμάτων σαν ενιαίο σώμα (Σχήμα 2.7β) (οι πλαστικές περιοχές δημιουργούνται στις περιοχές με γραμμοσκίαση)



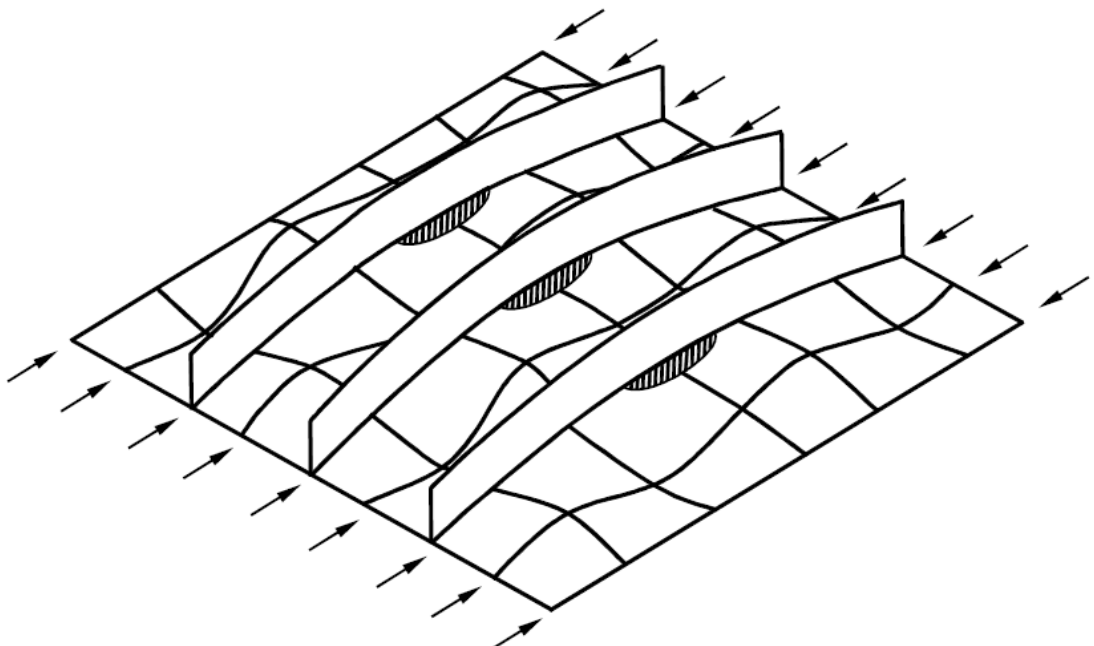
Σχήμα 2.7β Μορφή I-2

(3) Μορφή II: Κατάρρευση λόγω επικράτησης διαξονικής συμπίεσης (Σχήμα 2.7γ) (η πλαστικοποίηση αρχίζει στα σημεία εκατέρωθεν των ενισχυτικών)



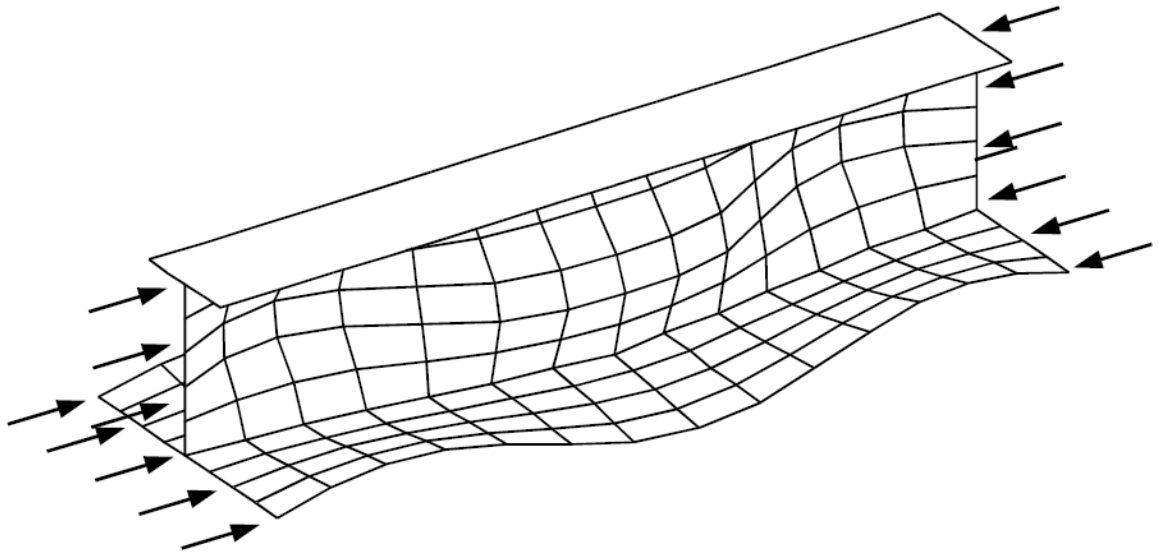
Σχήμα 2.7γ Μορφή II

(4) Μορφή III: Κατάρρευση τύπου κολώνας (beam – column) ενεργοποιούμενη από την πλάκα (Σχήμα 2.7δ)



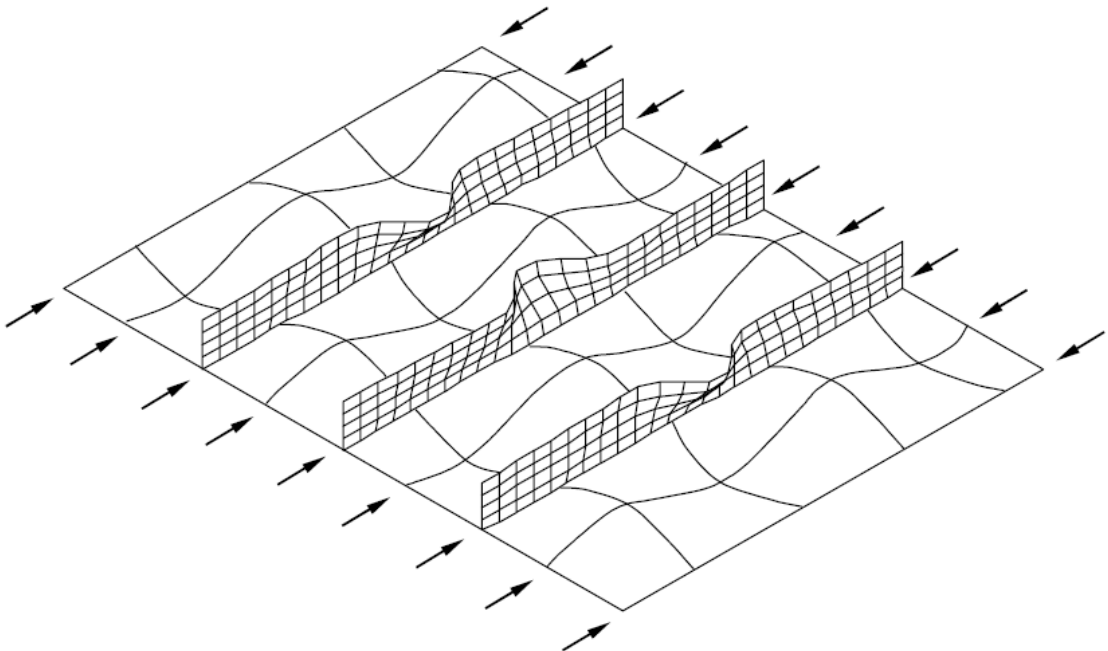
Σχήμα 2.7δ Μορφή III

2.7ε) (5) Μορφή IV: Τοπικός λυγισμός του ενισχυτικού (Σχήμα



Σχήμα 2.7ε Μορφή IV

(6) Μορφή V: Κατάρρευση με στρεπτολυγισμό του ενισχυτικού (Σχήμα 2.7στ)



Σχήμα 2.7στ Μορφή V

Η μορφή I αναπαριστά την περίπτωση αστοχίας, όταν τα ενισχυτικά είναι σχετικά αδύναμα. Σε αυτή την περίπτωση τα ενισχυτικά λυγίζουν

μαζί με την πλάκα σαν ενιαίο σώμα, ενώ αρχικά ο καθολικός λυγισμός συμπεριφέρεται ελαστικά. Το ενισχυμένο έλασμα σε κανονικές συνθήκες μπορεί να αντέξει και άλλο φορτίο, ακόμα και μετά τον καθολικό λυγισμό στην ελαστική περιοχή, ενώ η μέγιστη αντοχή προσεγγίζεται με την ανάπτυξη μιας μεγάλης πλαστικής περιοχής μέσα στην πλάκα και/ή κατά μήκος των άκρων του πλαισίου. Η μορφή I μπορεί να διαιρεθεί σε δύο τύπους, την I-1 που στην ουσία προκύπτει από αστοχία τύπου κολώνας (beam – column), ενώ η έτερη I-2 προσεγγίζει αστοχία ορθοτροπικής πλάκας.

Η μορφή II αναπαριστά το μοντέλο κατάρρευσης κατά το οποίο, το πλαίσιο καταρρέει με διαρροή κατά μήκος των ενώσεων πλάκας – ενισχυτικού στις άκρες του πλαισίου, χωρίς αστοχία του ενισχυτικού. Αυτός ο τύπος κατάρρευσης μπορεί να είναι σημαντικός σε ορισμένες περιπτώσεις, κατά τις οποίες είτε στο πλαίσιο επικρατούν διαξονικά θλιπτικά φορτία, είτε το έλασμα της πλάκας είναι συμπαγές.

Η μορφή III αντιπροσωπεύει ένα μοντέλο αστοχίας στο οποίο η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται μετά από την πλαστικοποίηση του συνδυασμού πλάκας – ενισχυτικού στο μέσο τμήμα. Η εν λόγω μορφή τυπικά συμβαίνει όταν οι διαστάσεις των ενισχυτικών είναι μέσου μεγέθους, δηλαδή ούτε αδύνατες ούτε συμπαγείς.

Οι μορφές IV και V τυπικά προκύπτουν από αστοχία προερχόμενη από το ενισχυτικό, όταν ο λόγος ύψους του ενισχυτικού προς λόγο πάχους του ενισχυτικού είναι μεγάλος και /ή όταν ο τύπος του σχήματος διατομής του ενισχυτικού είναι ακατάλληλος για να παραμείνει ευθύς, οπότε το ενισχυτικό λυγίζει ή στρέφεται πλευρικά. Η μορφή V προκύπτει όταν η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται ως επακόλουθο πλευρικού στρεπτολυγισμού του ενισχυτικού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιπτώσεις κατάρρευσης που προκύπτουν είτε από συνδυασμό των ανωτέρω μορφών είτε που να μην είναι προφανείς ώστε να ενταχθούν σε κάποια από τις προαναφερθείσες κατηγορίες.

Η κατανόηση των μηχανισμών κατάρρευσης στηρίχθηκε τα προηγούμενα χρόνια, και συνεχίζει να στηρίζεται από την πειραματική έρευνα. Ένα

σημαντικό εργαλείο σε αυτό τον τομέα, πέραν των εργαστηριακών δοκιμών, είναι η χρησιμοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που έχει αποδειχθεί ότι προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

3.1 Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση πολύπλοκων κατασκευών για δεκαετίες. Η εν λόγω μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ως μία ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh – Ritz και ενεργειακών μεθόδων (σταθμικών υπολοίπων) που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η οποία όμως πλεονεκτεί σαφώς ως προς τις αρχικές διατυπώσεις των μεθόδων αυτών, λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας με την οποία αντιμετωπίζει τις πολύπλοκες γεωμετρίες και του ευχερέστερου προγραμματισμού στον Η/Υ. Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του προβλήματος με ένα σύνολο απλών υποπεδίων, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Η ΜΠΣ χρησιμοποιείται επίσης ευρέως, για την ανάλυση των κατασκευών οι οποίες συμπεριφέρονται μη γραμμικά, π.χ. λόγω πλαστικής διαρροής ή μεγάλων μετατοπίσεων, όπως αναφέρεται παρακάτω στο κεφάλαιο 3.4.

Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τυπικά καταλήγουμε σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, που το πλήθος τους ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος και το οποίο μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια του Η/Υ. Η εξέλιξη των Η/Υ με τις ολοένα και μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων, αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτέλεσως των αριθμητικών πράξεων κατέστησε εφικτή την επίλυση, με την εν λόγω μέθοδο, σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού. Η μέθοδος, αν και επινοήθηκε και εφαρμόστηκε για την στατική ανάλυση φορέων, έχει καθολικότερη εφαρμογή σε μια ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων του μηχανικού, όπως για

παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στη μεταφορά θερμότητας, στην ακουστική, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην εμβιομηχανική.

3.2 Στάδια της προσομοίωσης

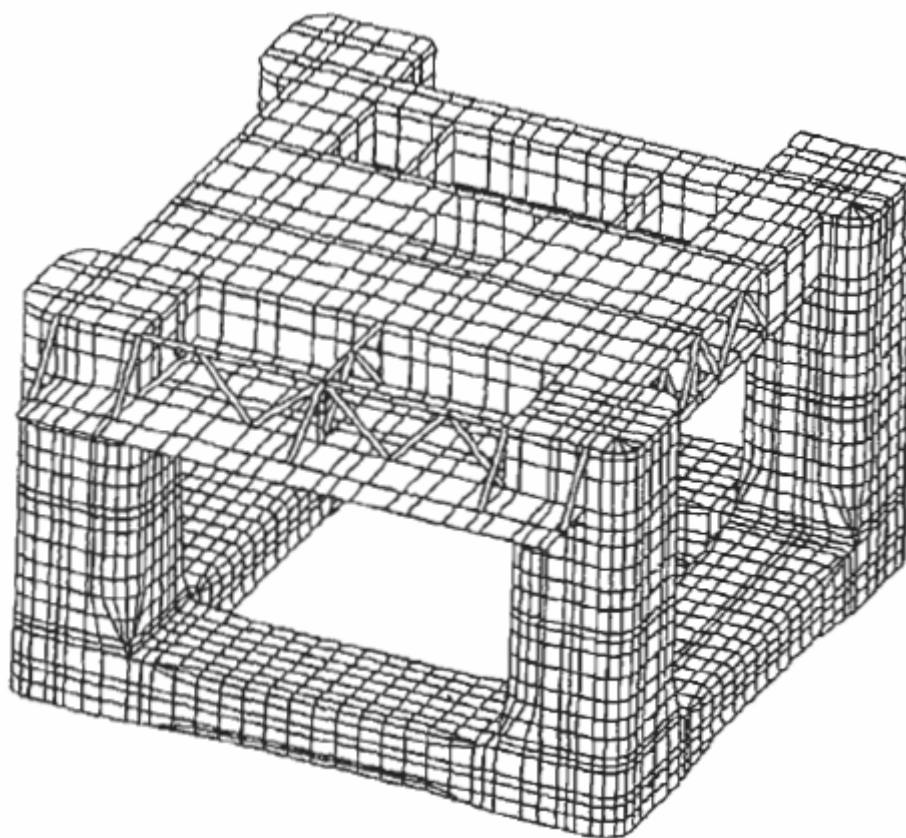
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στην ουσία αποτελεί μια προσεγγιστική μέθοδος επιλύσεως των διαφορικών εξισώσεων και ως εκ τούτου χρειάζεται κάποια κριτήρια ελέγχου της ποιότητας των αποτελεσμάτων, δεδομένου ότι η ακριβής αναλυτική λύση του προβλήματος δεν είναι γνωστή. Στην περίπτωση της αναλύσεως των κατασκευών ακολουθούνται τα εξής στάδια [14]:

(1) **Μετάβαση από το φυσικό πρόβλημα που είναι η κατασκευή στο μαθηματικό πρόβλημα**, δηλαδή τον φορέα. Κατά το στάδιο αυτό γίνεται η εξιδανίκευση της κατασκευής ως προς τη μορφή και τη δομητική λειτουργία των μελών της. Ταξινομούνται τα μέλη σε ράβδους δικτυώματος ή δοκού, σε διδιάστατα μέλη τοιχίων, δίσκων ή πλακών, σε κελύφη ή τρισδιάστατα μέλη. Καθορίζονται οι ιδιότητες των υλικών των μελών της κατασκευής καθώς και η συμπεριφορά τους κατά τη φόρτιση της κατασκευής (γραμμικώς ελαστικά, ελαστικά απολύτως πλαστικά, μη ελαστικά κλπ.). Προσδιορίζονται τα φορτία που φορτίζουν την κατασκευή και οι συνοριακές συνθήκες (εξιδανίκευση της θεμελίωσης, δεσμευμένες μετατοπίσεις, κλπ.). Το μαθηματικό προσομοίωμα διέπεται από τις κυρίαρχες διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας και τις συνοριακές που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των μελών του φορέα.

(2) **Μετάβαση από το μαθηματικό προσομοίωμα στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων**. Κατά το στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή των πεπερασμένων στοιχείων για την προσφορότερη προσομοίωση των μελών του φορέα. Μορφώνεται το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων για όλα τα μέλη του φορέα. Υπολογίζονται τα μητρώα στιβαρότητας και οι ισοδύναμες δράσεις των στοιχείων και μορφώνεται η τελική μητρική εξίσωση ισορροπίας του φορέα.

(3) **Μετάβαση από το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων στο υπολογιστικό προσομοίωμα.** Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την αριθμητική επεξεργασία του προσομοιώματος των πεπερασμένων στοιχείων από τον Η/Υ. Υπολογίζεται το καθολικό μητρώο στιβαρότητας και το καθολικό διάνυσμα των ισοδύναμων δράσεων. Ακολουθεί η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και ο υπολογισμός των τάσεων και εντατικών μεγεθών.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα δείγμα χρησιμοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων για την καθολική ανάλυση μιας θαλάσσιας κατασκευής.



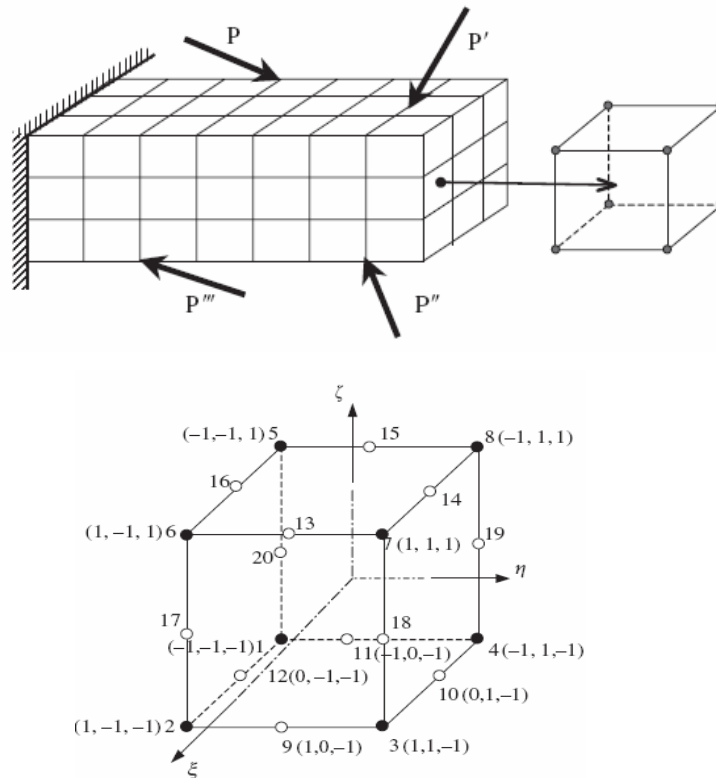
Σχήμα 3.1 Παράδειγμα διακριτοποίησης μιας πλατφόρμας με πεπερασμένα στοιχεία

Σε κάθε στάδιο όμως, της μεθόδου υπάρχει ο κίνδυνος παρείσφρησης σφαλμάτων, τα οποία ανάλογα με τη σοβαρότητά τους μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την αξιοπιστία της ανάλυσης. Τα σφάλματα αυτά διακρίνονται σε: (α) **σφάλματα προσομοίωσης**, τα οποία επηρεάζονται από το βαθμό της πιστότητας του φορέα προς την κατασκευή, (β) **σφάλματα διακριτοποίησης**, που εξαρτώνται

από τον τύπο και την πυκνότητα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων, (γ) **σφάλματα αριθμητικά**, τα οποία οφείλονται στην πεπερασμένη ακρίβεια με την οποία εκτελούνται οι πράξεις από τον Η/Υ και τα οποία είναι δυνατόν να αλλοιώσουν σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα. Στην παρούσα εργασία για τη σχεδίαση των κατασκευών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο PATRAN (στάδιο 1), ενώ για την ανάλυση του προσομοιώματος (στάδιο 2 και 3), καθώς και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων (post – processing), το λογισμικό πακέτο ABAQUS. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την καλύτερη προσομοίωση των ρωγμών χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία συνεχούς μέσου (continuum solid elements) C3D20R (hex) για τα οποία ακολουθεί μία σύντομη παρουσίαση του μαθηματικού υπόβαθρου αυτών.

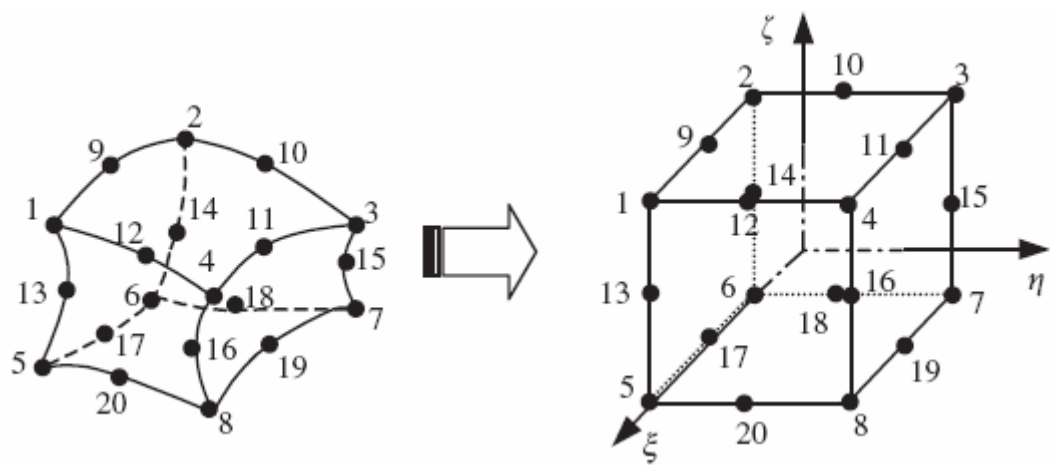
3.3 Παρουσίαση των στοιχείων συνεχούς μέσου

Ας θεωρήσουμε μία τρισδιάστατη κατασκευή, η οποία διαιρείται με κατάλληλο τρόπο σε αριθμό εξαεδρικών στοιχείων με οκτώ (8) κόμβους άκρων και δώδεκα (12) ενδιάμεσους όπως στο Σχήμα 3.2



Σχήμα 3.2 Διακριτοποίηση κατασκευής με στοιχεία continuum elements 20 κόμβων δευτέρου βαθμού.

Σε κάθε κόμβο του στοιχείου υπάρχουν τρεις (3) βαθμοί ελευθερίας, με σύνολο βαθμών ανά στοιχείο, εξήντα (60) DOFs (Degrees Of Freedom). Είναι εξαιρετικά χρήσιμο να ορίσουμε ένα σύστημα φυσικών συντεταγμένων (ξ, η, ζ) με την αρχή των αξόνων στο κέντρο του κύβου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, καθώς μας επιτρέπει την ευκολότερη σχεδίαση των συναρτήσεων σχήματος και την εκτίμηση της ολοκλήρωσης πινάκων. Οι συναρτήσεις σχήματος θα πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιούνται και για την παρεμβολή των γεωμετρικών συντεταγμένων από τις αντίστοιχες φυσικές (θεωρία ισοπαραμετρικών στοιχείων).



Σχήμα 3.3 Μεταφορά από το γεωμετρικό στο φυσικό σύστημα συντεταγμένων

Οι συναρτήσεις σχήματος επιγραμμικά για τα εν λόγω πεπερασμένα στοιχεία (αναφέρονται συχνά και τύπου Lagrange) είναι ως ακολούθως:

$$N_j = \frac{1}{8}(1 + \xi_j \xi)(1 + n_j n)(1 + \zeta_j \zeta)(\xi_j \xi + n_j n + \zeta_j \zeta - 2) \quad (3.1)$$

για κόμβους άκρων $j = 1, \dots, 8$

$$N_j = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + n_j n)(1 + \zeta_j \zeta) \quad (3.2)$$

για κόμβους ενδιάμεσους $j = 10, 12, 14, 16$

$$N_j = \frac{1}{4}(1 - n^2)(1 + \xi_j \xi)(1 + \zeta_j \zeta) \quad (3.3)$$

για κόμβους ενδιαμέσους $j = 9, 11, 13, 15$

$$N_j = \frac{1}{4}(1 - \zeta^2)(1 + n_j n)(1 + \xi_j \xi) \quad (3.4)$$

για κόμβους ενδιαμέσους $j = 17, 18, 19, 20$

όπου (ξ_j, n_j, ζ_j) είναι οι φυσικές συντεταγμένες του κόμβου j του σχήματος 3.2.

Σε ένα εξαεδρικό πεπερασμένο στοιχείο, το διάνυσμα των μετατοπίσεων U είναι μια συνάρτηση των συντεταγμένων x, y και z και παρεμβάλλεται με τη χρησιμοποίηση των συναρτήσεων σχήματος (ή παραμόρφωσης) ως ακολούθως:

$$U = N d_e \quad (3.5)$$

όπου N είναι το μητρώο των συναρτήσεων σχήματος και d_e είναι το διάνυσμα κομβικών μετατοπίσεων που δίνεται αναλυτικά

$$d_e = \left\{ \begin{array}{c} d_{e1} \\ d_{e2} \\ d_{e3} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_{e20} \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

όπου

$$d_{ej} = \begin{Bmatrix} u_j \\ v_j \\ w_j \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

είναι οι τρεις μετατοπίσεις στον κόμβο j .

Το μητρώο των συναρτήσεων σχήματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$\mathbf{N} = (\mathbf{N}_1 \mathbf{N}_2 \mathbf{N}_3 \dots \mathbf{N}_{20}) \quad (3.8)$$

όπου ο κάθε υποπίνακας \mathbf{N}_j δίνεται από το μητρώο (όπου $j=1,2,\dots,20$)

$$\mathbf{N}_j = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_j & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{N}_j & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{N}_j \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Το μητρώο παραμορφώσεως \mathbf{B} εκφράζει τη συμβατότητα των πεδίων παραμορφώσεων και μετατοπίσεων, κατασκευάζεται δε, σε αντιστοιχία με τις συναρτήσεις σχήματος ως ακολούθως:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_3 \dots \mathbf{B}_{20}] \quad (3.10)$$

με την ακόλουθη σύνθεση των υποπινάκων

$$\mathbf{B}_i = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial \xi} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial n} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial \zeta} \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial \zeta} & \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial n} \\ \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial \zeta} & 0 & \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial n} & \frac{\partial \mathbf{N}_j}{\partial \xi} & 0 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία των ισοπαραμετρικών για να πραγματοποιήσουμε την παραγωγή των φυσικών συντεταγμένων των συναρτήσεων σχήματος στις γεωμετρικές συντεταγμένες του μητρώου παραμόρφωσης χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο κανόνα των μερικών παραγώγων (chain rule):

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_j}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_j}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_j}{\partial x} \\ \frac{\partial N_j}{\partial y} \\ \frac{\partial N_j}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

όπου \mathbf{J} το ιακωβιανό μητρώο που ορίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Κατά αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε το μητρώο παραμόρφωσης αντικαθιστώντας τις παραγώγους των συναρτήσεων σχήματος, ως προς τις γεωμετρικές συντεταγμένες. Με τον υπολογισμό του μητρώου παραμόρφωσης μπορούμε να υπολογίσουμε το μητρώο ακαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου αντικαθιστώντας το μητρώο \mathbf{B} στην ακόλουθη εξίσωση

$$\mathbf{K}_e = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} \det[\mathbf{J}] d\xi d\eta d\zeta \quad (3.14)$$

όπου \mathbf{E} είναι το μητρώο ελαστικότητας που συνδέει την παραμόρφωση του υλικού με τις ασκούμενες τάσεις δηλαδή

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (3.15)$$

Στην περίπτωση ισότροπων υλικών, οι ιδιότητες αυτών εκφράζονται με τον συνδυασμό του μέτρου ελαστικότητας E και του συντελεστή Poisson. Με τον υπολογισμό του καθολικού μητρώου ακαμψίας μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την επίπτωση που έχουν στις μετατοπίσεις της κατασκευής, το σύνολο των εφαρμοζόμενων δυνάμεων σε αυτήν, υπό συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς το μητρώο ακαμψίας είναι μεταβλητό ως προς τις φυσικές συντεταγμένες ξ , η και ζ , ο αναλυτικός υπολογισμός του ολοκληρώματος μπορεί να είναι πολύ δύσκολος. Για το λόγο αυτό, τα ολοκληρώματα υπολογίζονται με αριθμητικές μεθόδους, όπως για παράδειγμα η ολοκλήρωση κατά Gauss. Κάθε ένα από αυτά τα υπομητρώα των πεπερασμένων στοιχείων, συγκροτούν το συνολικό μητρώο της κατασκευής, από όπου προκύπτουν οι μετατοπίσεις σε κάθε κόμβο, αναλόγως των συνοριακών συνθηκών και μετρούνται τα διάφορα εντατικά μεγέθη.

Συγκεκριμένα όσον αφορά τα πεπερασμένα στοιχεία που θα χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση των μοντέλων, το ABAQUS διαθέτει εξαεδρικά στοιχεία που χρησιμοποιούν πλήρη και μειωμένη ολοκλήρωση κατά Gauss. Πιο συγκεκριμένα, η πλήρης ολοκλήρωση των εν λόγω στοιχείων απαιτεί μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Για παράδειγμα, στα στοιχεία τριών (3) διαστάσεων χρησιμοποιούνται είκοσι επτά (27) σημεία ολοκλήρωσης για την πλήρη σε αντίθεση με τη μειωμένη ολοκλήρωση που απαιτούνται οκτώ (8) σημεία. Επιπρόσθετα, τα στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, πλην όμως υποφέρουν από το φαινόμενο volumetric locking (συγκράτηση παραμόρφωσης στοιχείου), όταν το υλικό συμπεριφέρεται ως σχεδόν, ασυμπίεστο. Η πλαστική παραμόρφωση σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises είναι πλήρως ασυμπίεστη. Συναφώς, η παραμόρφωση χαρακτηρίζεται ως ασυμπίεστη, όταν κυριαρχεί η πλαστικότητα. Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον εστιάζεται από κοινού, στην πλαστική παραμόρφωση στην εγγύτητα των ρωγμών, καθώς και στον πλαστικό λυγισμό του ενισχυμένου ελάσματος σε υψηλότερα φορτία, εκμεταλλευόμαστε τις ιδιότητες

στοιχείων είκοσι (20) κόμβων με μειωμένη ολοκλήρωση (C3D20R), που δεν παρουσιάζουν συμπεριφορά του volumetric locking.

3.4 Μη γραμμική ανάλυση

Ένα πρόβλημα καλείται μη γραμμικό, όταν το μητρώο ακαμψίας που υπολογίζεται σύμφωνα με την προηγούμενη θεματική ενότητα, μεταβάλλεται με την παραμόρφωση της κατασκευής. Η εξίσωση που εκφράζει τη μη γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου φορτίου και των μετατοπίσεων είναι η ακόλουθη:

$$f = k(U)U \quad (3.16)$$

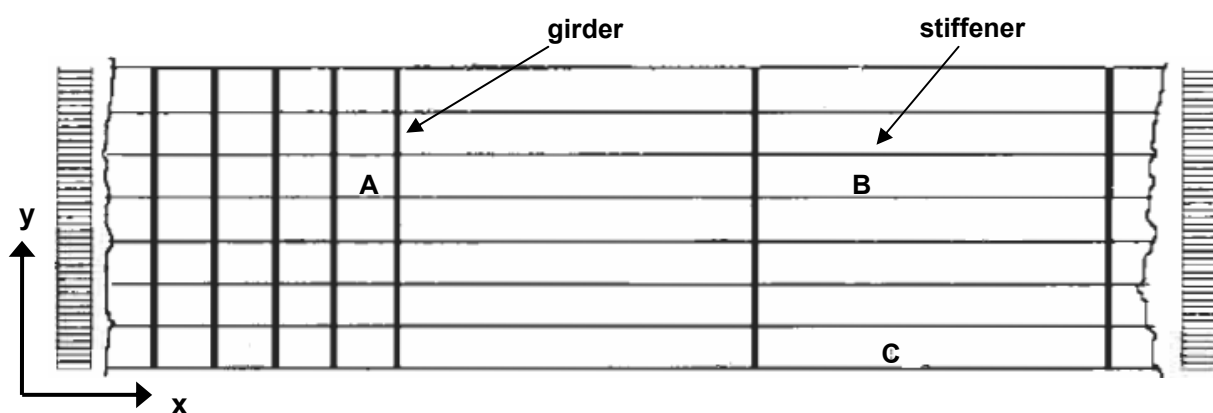
όπου το μητρώο ακαμψίας είναι πλέον μια συνάρτηση εξαρτώμενη από τις μετατοπίσεις. Επιγραμματικά, η μη γραμμικότητα μπορεί να προέρχεται: (α) από το υλικό (β) από τις συνοριακές συνθήκες (γ) από τη γεωμετρία της κατασκευής. Τα φαινόμενα που θα εξελιχθούν κατά τη διάρκεια της συμπίεσης των ρηγματοποιημένων ελασμάτων μπορούμε με ασφάλεια, να ισχυριστούμε ότι συνδέονται και με τις τρεις (3) μη γραμμικές ιδιότητες της κατασκευής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση μη γραμμικών μοντέλων χρησιμοποιεί μεθόδους σταδιακής επαύξησης του φορτίου, προκειμένου με αυτό τον τρόπο να καταστεί δυνατή η «οδός ισορροπίας» (equilibrium path) της κατασκευής και να ξεπεραστεί με αυτή την στατική μέθοδο, το πρόβλημα της μη γραμμικής διαδικασίας. Υφίστανται διάφορες αριθμητικές μέθοδοι για την εν λόγω επίλυση, με κυριότερες τη μέθοδο Newton – Raphson (μέθοδος της εφαπτομένης) ή του Riks (μέθοδος του τόξου). Η διαδικασία έγκειται στην εξεύρεση μιας θέσεως ισορροπίας της κατασκευής, μετά την επιβολή ενός κλάσματος του συνολικού υποβαλλόμενου φορτίου σε αυτήν. Στη συνέχεια εκτελείται επαύξηση του φορτίου (πάντα με κλάσμα του συνολικού) και μετατόπιση της κατασκευής σε νέα θέση ισορροπίας. Ο δρόμος προς το συνολικό φορτίο, δηλαδή απαριθμείται από μια σειρά καταστάσεων ισορροπίας της κατασκευής. Η τελική θέση και μορφή της

κατασκευής, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό, όπως έχει προαναφερθεί από τα συνοριακές συνθήκες.

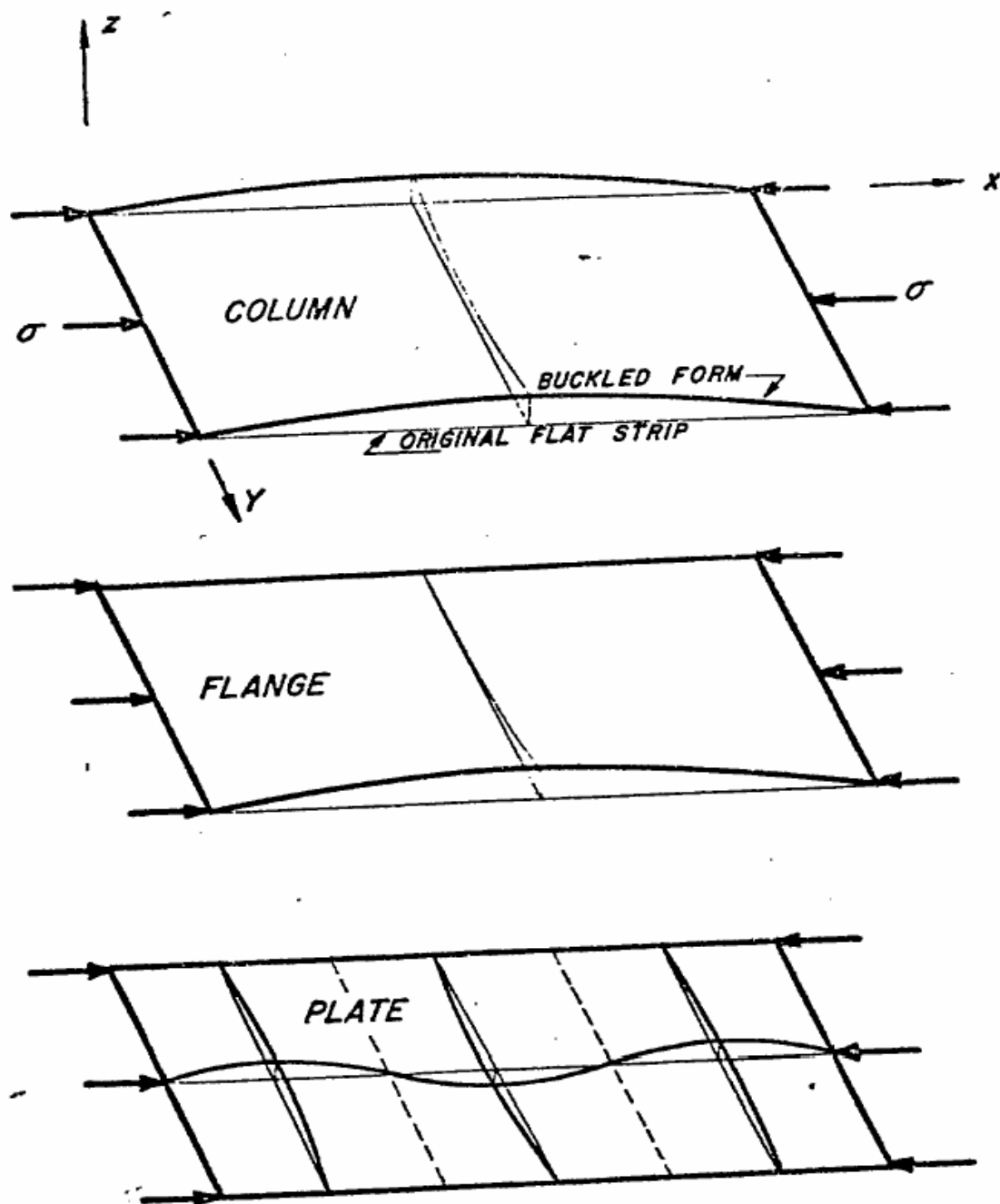
3.5 Συνοριακές συνθήκες

Ένα από τα πιο σημαντικά βήματα κατά τη μοντελοποίηση κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η αναγνώριση των ορθών συνοριακών συνθηκών που διέπουν τα διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία που πρόκειται να εξεταστούν. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως ότι οι πραγματικές συνοριακές συνθήκες θα διαφέρουν από τις αντίστοιχες εξιδανικευμένες. Ειδικότερα όσον αφορά τα ελάσματα, η κύρια επιρροή προέρχεται από τις συνθήκες στις αόριστες πλευρές. Με αναφορά στο Σχήμα 3.4, για το έλασμα A με λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=1$, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι λόγω της εγγύτητας των παράπλευρων κατασκευαστικών στοιχείων, περιορίζεται σημαντικά η κάθετη παραμόρφωση. Το ίδιο δεν μπορεί να συμβαίνει για το έλασμα B με $a/b \gg 1$, καθώς εύκολα μπορεί να προκληθεί η κάθετη παραμόρφωση στη μέση επιφάνεια αυτού, με τις άκρες της πλάκας όμως, να περιορίζονται να μείνουν ευθυγραμμισμένες. Τέλος στο έλασμα C, οι συνοριακές συνθήκες αυτού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακαμψία των γειτονικών στοιχείων στην προέκταση της κατασκευής. Συμπερασματικά, η διαφοροποίηση των συνοριακών συνθηκών στα ελάσματα A και B, προκαλείται από το λόγο μήκους προς πλάτους των πλακών (aspect ratio), ενώ στα ελάσματα B και C από την ακαμψία των γειτονικών κατασκευαστικών στοιχείων [3].



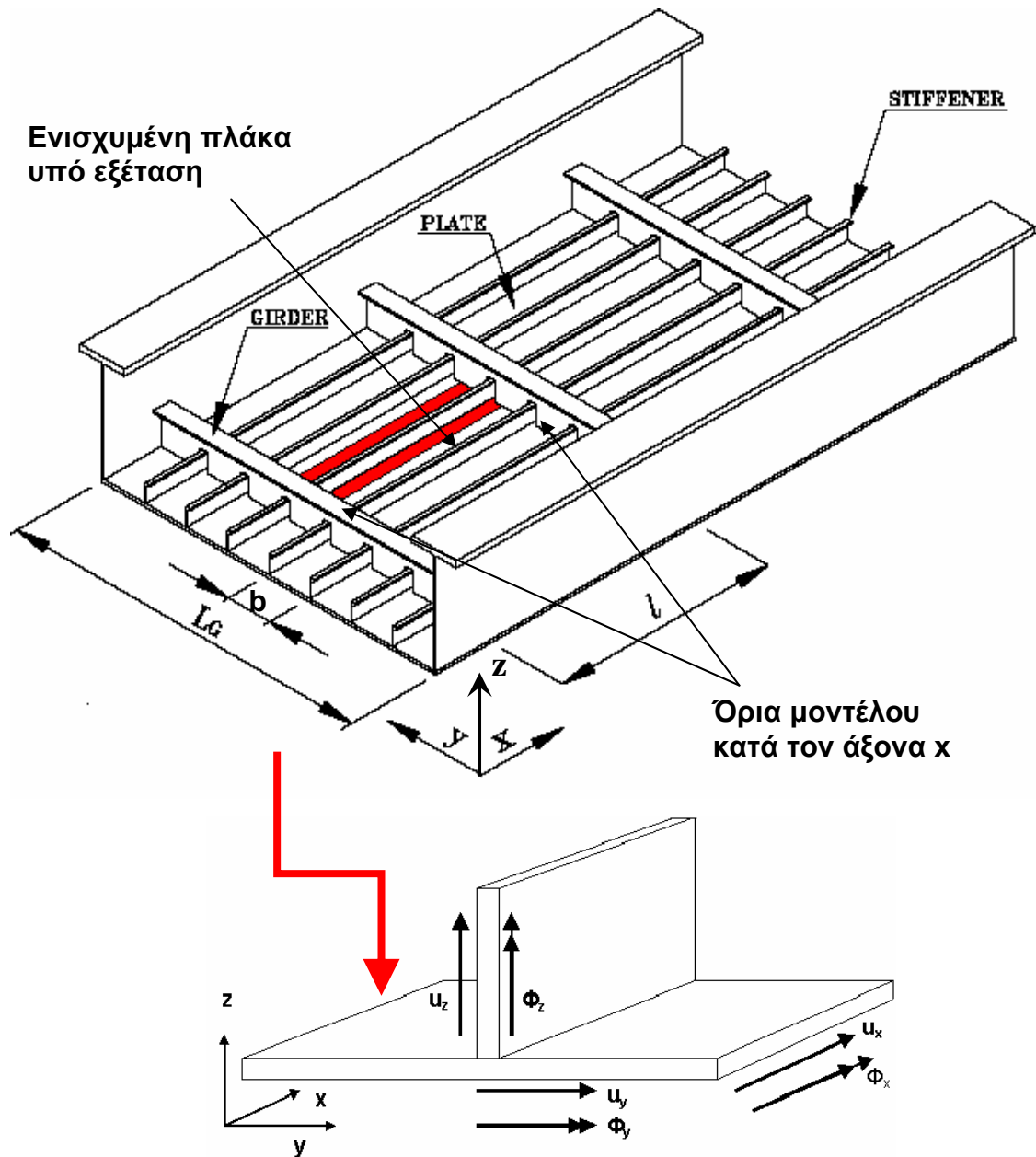
Σχήμα 3.4 Διαφοροποίηση συνοριακών συνθηκών σε ελάσματα κατασκευαστικού στοιχείου (bays) θαλάσσιας κατασκευής υπό διαμήκη συμπίεση.

Στο σχήμα 3.5 που ακολουθεί φαίνεται καθαρά η επιρροή που έχουν οι συνοριακές συνθήκες των αφόρτιστων πλευρών του ελάσματος στη μορφή παραμόρφωσης του ελάσματος.



Σχήμα 3.5 Σταδιακή διαφοροποίηση της παραμόρφωσης σε πλάκα υπό ομοαξονική συμπίεση καθώς προστίθενται συνοριακές συνθήκες απλής στήριξης (*simply supported*) στις αφόρτιστες πλευρές.

Από τα ανωτέρω συμπεραίνουμε ότι για τη μοντελοποίηση ενός κατασκευαστικού στοιχείου, στη συγκεκριμένη περίπτωση ο συνδυασμός ελάσματος – ενισχυτικού, σημαντικό ρόλο παίζει ο βαθμός σταθερότητας των συνδέσεων του εν λόγω στοιχείου με τα γειτονικά μέρη της κατασκευής. Παρατηρώντας, λοιπόν το Σχήμα 3.6 και όσον αφορά ένα ενισχυμένο έλασμα από το σύνολο των αντίστοιχων κατασκευαστικών στοιχείων που συγκροτούν το πλαίσιο του εν λόγω σχήματος, μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποιες υποθέσεις σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες, που πρέπει να προδώσουμε στο μαθηματικό μοντέλο για την, όσο το δυνατόν, ορθή προσέγγιση της μέγιστης αντοχής.



Σχήμα 3.6 Το ενισχυμένο έλασμα ως μέρος μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας.

Το υπό εξέταση ενισχυμένο έλασμα βρίσκεται μεταξύ δύο εγκάρσιων κυρίων δοκών, ενώ η πλάκα αποτελείται από δύο (2) τμήματα ίδιου πλάτους $b/2$ εκατέρωθεν του ενισχυτικού (απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα στο ανωτέρω σχήμα). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το διάμηκες ενισχυτικό του ελάσματος διέρχεται δια μέσου των οπών που υφίστανται στους εν λόγω εγκάρσιους δοκούς, που, όπως μπορεί να φανεί και από το σχήμα, είναι πιο στιβαροί λόγω διαστάσεων (το υλικό είναι το ίδιο και για τα δύο στοιχεία). Αυτή η διέλευση επιτρέπει στο ενισχυτικό μια περιστροφή σε άξονα κάθετο στο έλασμα (άξονα z για το ανωτέρω σχήμα), ενώ περιορίζεται η μετατόπιση του συγκεκριμένου τμήματος του ενισχυτικού σε διεύθυνση παράλληλη με την εγκάρσια δοκό (άξονας y). Η συγκόλληση του ελάσματος με το έλασμα της εγκάρσιας δοκού (ενιαίο σώμα), περιορίζει την κάθετη μετατόπιση του ελάσματος (πλάκας), ενώ το ίδιο συμβαίνει με το τμήμα της πλάκας που βρίσκεται ακριβώς κάτωθεν του ενισχυτικού (μη συγκολληθέν με την εγκάρσια δοκό), καθώς περιορίζεται η ανύψωση αυτού λόγω της ύπαρξης της εν λόγω δοκού. Επιπρόσθετα μπορεί να θεωρηθεί ότι το έλασμα (πλάκα) δεχόμενο τη μετατόπιση λόγω της αξονικής συμπίεσης κατά τον άξονα των x , αντιλαμβάνεται στη διατομή της φορτισμένης πλευράς του, μια μικρή περιστροφή περί τον άξονα των y (παράλληλα με τη δοκό). Αυτό μπορεί να συμβεί, καθώς οι άνω ίνες της διατομής της πλάκας που είναι συγκολλημένες με την πιο στιβαρή εγκάρσια δοκό, αντιλαμβάνονται με διαφορετικό μέτρο ακαμψίας, τη διέλευση της τάσεως απ' ότι οι κάτω ελεύθερες ίνες.

Οι ανωτέρω παρατηρήσεις – υποθέσεις όσον αφορά τη συμπεριφορά του επιλεγμένου κατασκευαστικού στοιχείου, θα πρέπει να ενσωματωθούν ως συνοριακές συνθήκες, στο μαθηματικό μοντέλο για την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι εν λόγω συνοριακές συνθήκες, για τον επιλεγμένο τύπο πεπερασμένων στοιχείων C3D20R, καθώς και η παρουσίαση της μοντελοποίησης του ενισχυμένου ελάσματος, παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Γενικά

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των ενισχυμένων ελασμάτων υπό μονοαξονική συμπίεση, ιδιαίτερα όσον αφορά τη γεωμετρία αυτών, τις εισαχθείσες αρχικές ατέλειες, τις συνοριακές συνθήκες, την ανάπτυξη του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων, την αλληλεπίδραση των επιφανειών της ρωγμής και τέλος τη διαδικασία υπολογισμών για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην προηγούμενη θεματική ενότητα, η ανάλυση των ενισχυμένων ελασμάτων έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Όπου απαιτείται, θα παρουσιάζονται επιγραμματικά, συγκεκριμένες δυνατότητες του εν λόγω λογισμικού, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση.

4.2 Γεωμετρικές διαστάσεις

Τα ενισχυμένα ελάσματα που εξετάστηκαν είχαν λόγους μήκους προς πλάτος $a/b=1, 1.5$ και 3 (βλέπε πίνακα 4.1) Κατά τη μεταβολή των εν λόγω διαστάσεων, διατηρήθηκαν σταθεροί οι υπόλοιποι αδιάστατοι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία των ενισχυμένων ελασμάτων και συγκεκριμένα η λυγηρότητα πλάκας και ενισχυτικού. Όσον αφορά το λόγο επιφανειών των διατομών ενισχυτικού – πλάκας κρατήθηκε σταθερός με την τιμή $A_w/A_p=0.25$, προκειμένου κατά τη συμπίεση να είναι κυρίαρχη η συμπεριφορά της πλάκας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο (1.4), το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στη αριθμητική ανάλυση είναι ο ναυπηγικός χάλυβας με τιμές μέτρου ελαστικότητας $E=207000$ MPa, λόγο Poisson $\nu=0.3$ και τάση διαρροής

$\sigma_Y=245$ MPa. Με βάση λοιπόν τις ανωτέρω τιμές προκύπτουν οι ακόλουθοι λόγοι λυγηρότητας πλάκας και ενισχυτικού:

$$\beta_P = \left(\frac{b}{t_P} \right) \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} = 2.064 \quad (\text{για την πλάκα}) \quad (4.1)$$

$$\beta_w = \left(\frac{b}{t_w} \right) \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} = 0.344 \quad (\text{για το ενισχυτικό}) \quad (4.2)$$

Πίνακας 4.1 Γεωμετρικές διαστάσεις εξεταζόμενων μοντέλων

a/b	a (σε mm)	b (σε mm)	t _P (σε mm)	t _w (σε mm)	h _w (σε mm)
1	600	600	10	12.247	122.47
1.5	600	400	6.67	8.165	81.65
3	600	200	3.33	4.082	40.825

4.3 Αρχικές ατέλειες

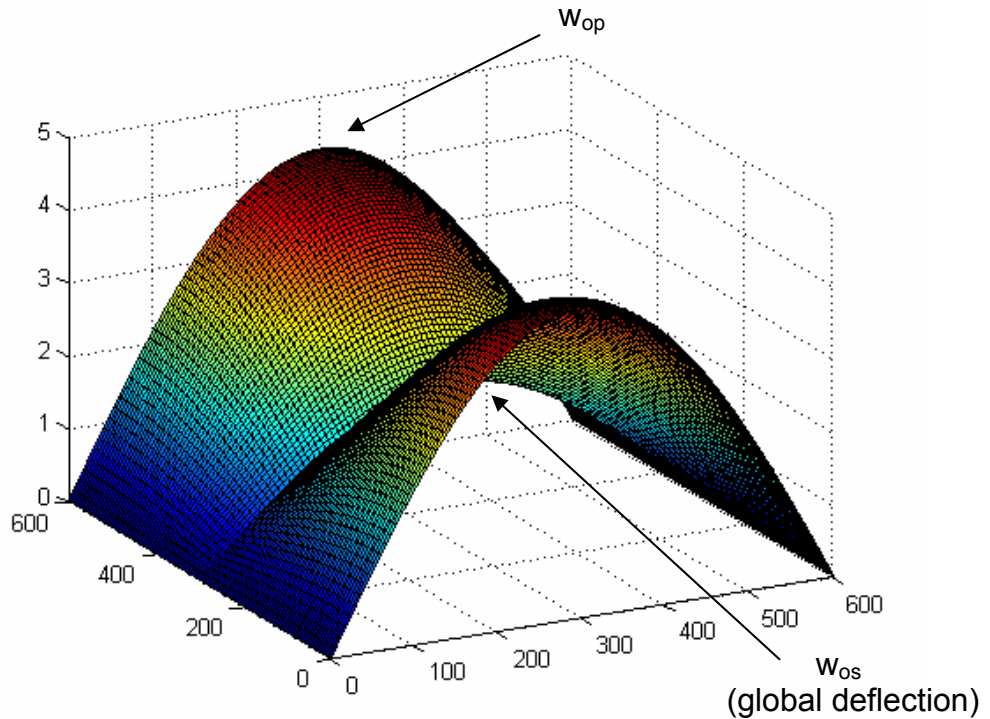
Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 1.4.2, οι αρχικές ατέλειες είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση κατασκευών, καθόσον επηρεάζει σημαντικά τη μέγιστη αντοχή αυτών. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που αναφέρονται στην εν λόγω παράγραφο και με βάση τον πίνακα 1.1 (αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας Smith), προκύπτουν οι ακόλουθες μέγιστες τιμές παραμόρφωσης ανά λόγο μήκους προς πλάτος:

Πίνακας 4.2 Μέγιστες τιμές αρχικών ατελειών ανά λόγο μήκους – πλάτους

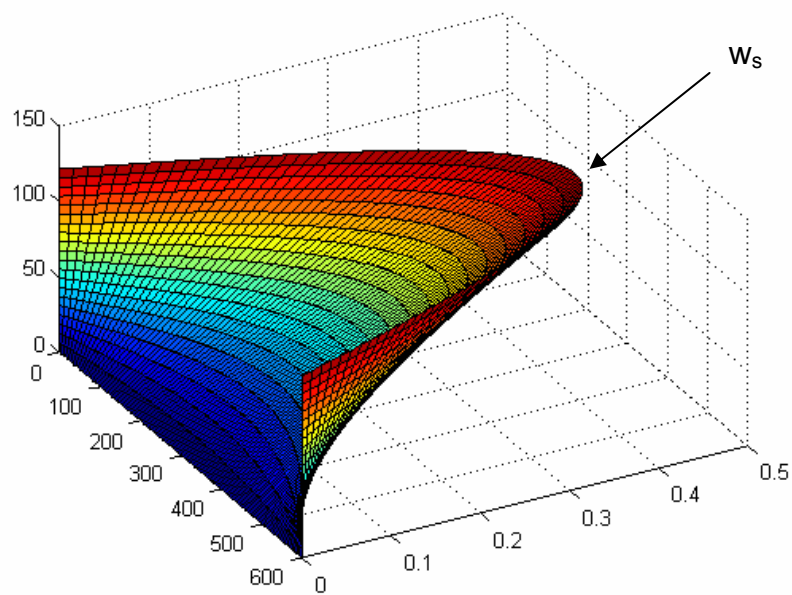
a/b	w _{op} (σε mm)	w _{os} (σε mm)	w _s (σε mm)
1	4.26	2.13	0.45
1.5	2.84	1.42	0.45
3	1.42	0.71	0.45

όπου w_{op} είναι η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης του ενισχυμένου ελάσματος, ενώ w_{os} είναι η μέγιστη απόκλιση της κατασκευής στο επίπεδο του ενισχυτικού (global deflection). Όσον αφορά το w_s είναι η μέγιστη τιμή απόκλισης του ενισχυτικού.

Τα ανωτέρω μπορεί να συνοψιστούν στα Σχήμα 4.1 και 4.2



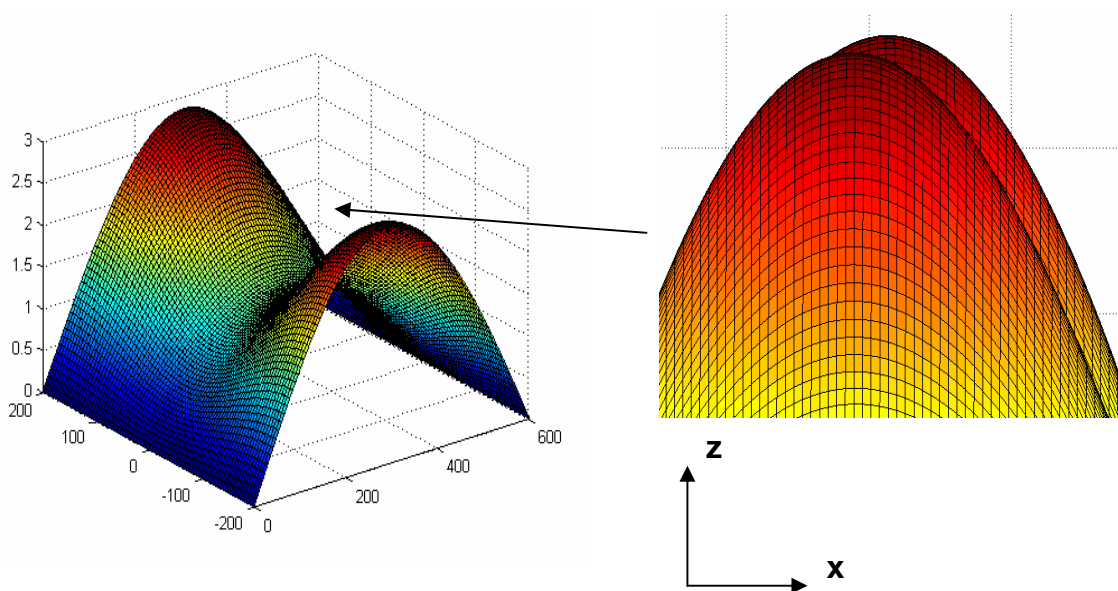
Σχήμα 4.1 Μορφή αρχικών ατελειών στην πλάκα ($a/b=1$)



Σχήμα 4.2 Μορφή αρχικών ατελειών στο ενισχυτικό ($a/b=1$)

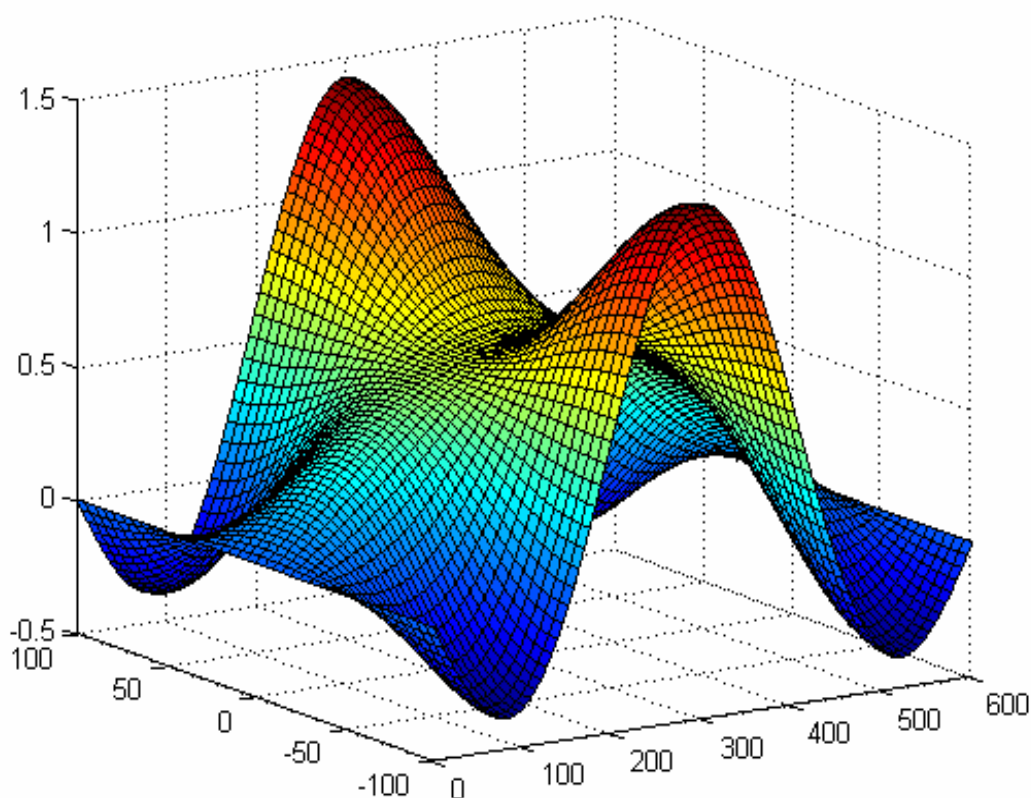
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, στην πλάκα χρησιμοποιήθηκε η συμμετρική μορφή των αρχικών ατελειών σύμφωνα με τις παραδοχές που επεξηγήθηκαν στην παράγραφο 1.4.2, ενώ όσον αφορά το ενισχυτικό χρησιμοποιήθηκε μια κοινή μέγιστη τιμή απόκλισης (κατά τον άξονα των y). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή w_{os} (global deflection) επηρεάζει σημαντικά τη μέγιστη αντοχή της κατασκευής, όπως θα αναλυθεί διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια.

Συναφώς με τα ανωτέρω και όσον αφορά το λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=1.5$, ο οποίος μόλις ξεπερνά την οριακή περιοχή για την ανάπτυξη δύο (2) κυμάτων σύμφωνα με το Σχήμα 2.5, όταν εφαρμόζουμε συμμετρικό τύπο απόκλισης στα εν λόγω μοντέλα, δεν αναπτύσσονται τα αναμενόμενα κύματα και η λύση της ανάλυσης οδηγείται σε μορφή παραμόρφωσης ανάλογη με την αντίστοιχη για aspect ratio $a/b=1$. Για το λόγο αυτό εισήχθη μια μικρή απόκλιση στη θέση της μέγιστης τιμής (αρχικά βρίσκεται στον άξονα $x=a/2$) σε σημεία συμμετρικά εκατέρωθεν του άξονα $x=a/2$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Διεξοδικά θα αναλυθεί η εν λόγω παρατήρηση σε επόμενο κεφάλαιο.

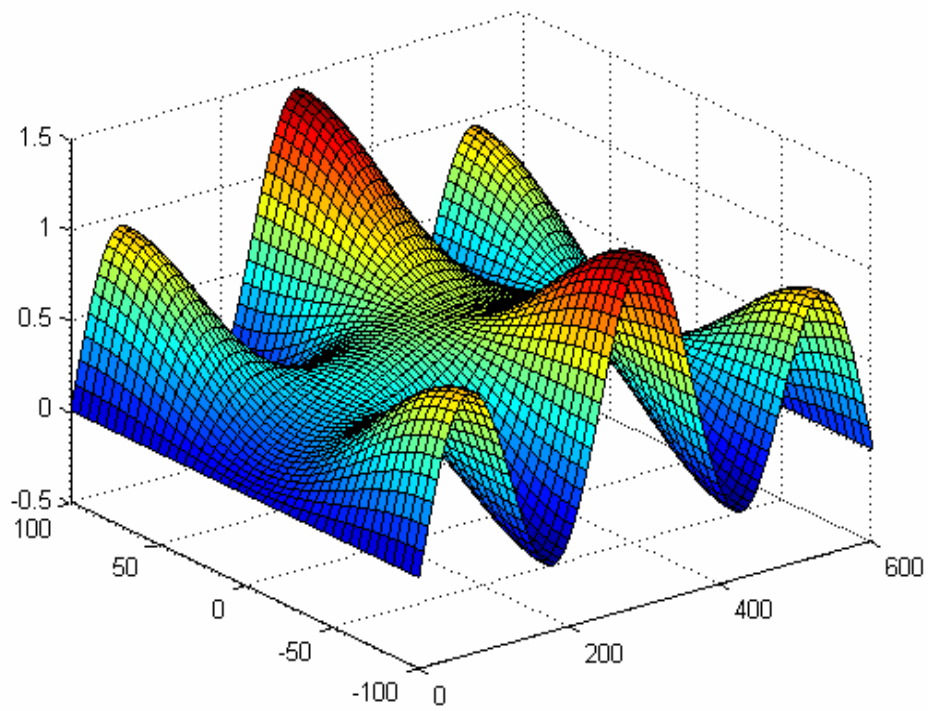


Σχήμα 4.3 *Λεπτομέρεια αρχικής ατέλειας για $a/b=1.5$*

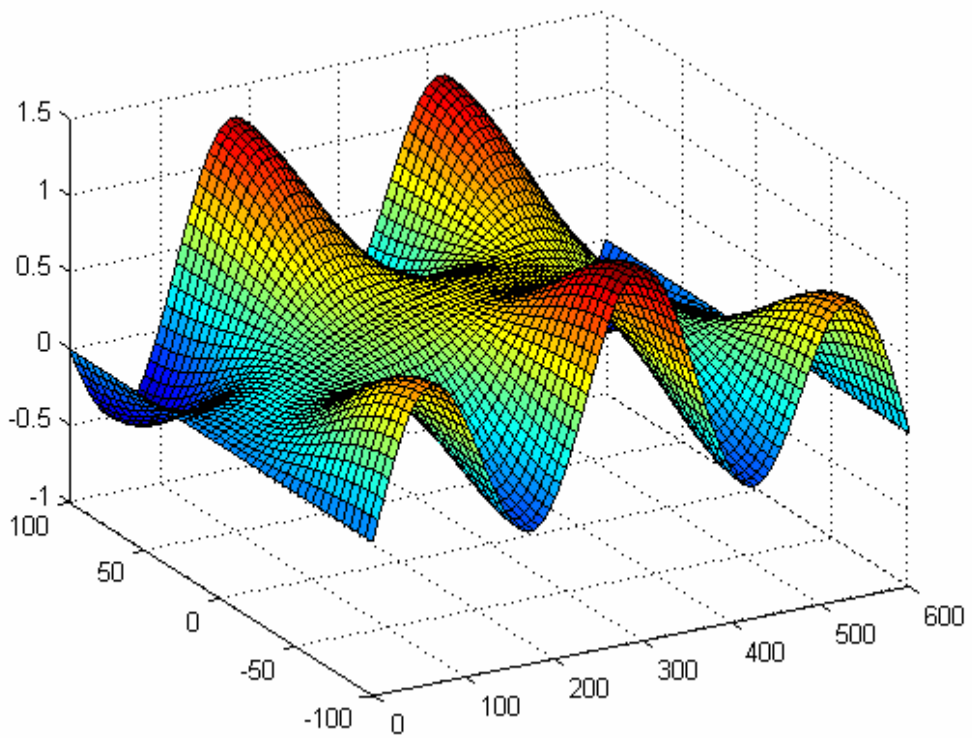
Όσον αφορά τη μορφή των αρχικών ατελειών για το aspect ratio $a/b=3$, η μορφή παραμόρφωσης που εισήχθη είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για $a/b=1$ με τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές του πίνακα 4.2. Λόγω όμως του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος λόγος μήκους προς πλάτος από πλευράς ανάπτυξης κυμάτων κατά το λυγισμό, εισήχθησαν και αρχικές παραμορφώσεις με διάφορους αριθμούς κυμάτων ($n=3,5$) κρατώντας πάντα σταθερή τη μέγιστη τιμή, όπως επίσης, ελέγχθηκε και η συμπεριφορά του ελάσματος σε αντισυμμετρική μορφή παραμόρφωσης (με κύματα). Όλα τα ανωτέρω συνοψίζονται στα Σχήματα 4.4, 4.5 και 4.6 όπου παρουσιάζονται οι μορφές των αρχικών γεωμετρικών παραμορφώσεων που εισήχθησαν σε μοντέλα με $a/b=3$.



Σχήμα 4.4 Συμμετρική μορφή αρχικής παραμόρφωσης με τρία (3) κύματα για aspect ratio $a/b=3$.



Σχήμα 4.5 Συμμετρική μορφή αρχικής παραμόρφωσης με πέντε (5) κύματα για aspect ratio $a/b=3$.



Σχήμα 4.6 Αντίστοιχη αντισυμμετρική μορφή παραμόρφωσης με πέντε (5) κύματα.

Για την εισαγωγή των ανωτέρω αρχικών ατελειών στα μοντέλα, αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες του λογισμικού πακέτου MATLAB με την τροποποίηση των αρχικών συντεταγμένων των κόμβων που προέκυψαν κατά τη σχεδίαση και σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$(1) \quad \underline{a/b=1}$$

$$w_{OP}(x, y) = (w_{OP} - w_{OS}) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{2b}\right)^2 + w_{OS} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (4.3)$$

όπου το πεδίο τιμών των x, y είναι

$$0 \leq x \leq a$$

$$-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$$

ενώ τα w_{OP} , w_{OS} λαμβάνουν τις αντίστοιχες τιμές του πίνακα 4.2. Όπως εύκολα διαπιστώνουμε από τον εν λόγω πίνακα, σαν τιμή του w_{OS} (global deflection) έχει επιλεγεί το μισό της μέγιστης απόκλισης. Η ανωτέρω εξίσωση μας επιτρέπει να δώσουμε στο ενισχυμένο έλασμα διαφορετικές τιμές στα w_{OP} , w_{OS} , επιτρέποντας τον έλεγχο επιρροής της συνολικής παραμόρφωσης της κατασκευής στη μέγιστη αντοχής αυτής.

$$(2) \quad \underline{a/b=1.5}$$

$$w_{OP}(x, y) = ((w_{OP} - 0.02) - w_{OS}) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right)^2 + w_{OS} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) -$$

$$0.05 \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (4.4)$$

με πεδίο τιμών των x και y , ως προηγουμένως. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι νέοι όροι που παρουσιάζονται στην ανωτέρω εξίσωση, χρησιμοποιούνται αφενός για τη μεταφορά του μέγιστου εκατέρωθεν του σημείου $x=a/2$, πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο μεταφέρεται στους αμέσως διπλανούς κόμβους (Σχήμα 4.3), αφετέρου να μην υπερβαίνει την καθορισθείσα μέγιστη τιμή παραμόρφωσης (μέγιστη τιμή σύμφωνα με την ανωτέρω εξίσωση $w_{OP}=2.839\text{mm}$)

(3) a/b=3

$$w_{OP}(x, y) = (w_{OP} - w_{OS}) \sin\left(\frac{n_p \pi x}{a} + \frac{\pi}{2}(1 - n_p)\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right)^2 + w_{OS} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (4.5)$$

όπου τα πεδία τιμών των x, y είναι αντίστοιχα με τις προηγούμενες περιπτώσεις, ενώ ο όρος n_p αποτελεί τον αριθμό των κυμάτων που θέλουμε να εισάγουμε στην κατασκευή με πεδίο τιμών $n_p=1,3,5,..$ (μονός αριθμός κυμάτων). Η εξίσωση αυτή παράγει τη συμμετρική μορφή παραμόρφωσης των σχημάτων 4.4 και 4.5. Όσον αφορά την αντισυμμετρική μορφή παραμόρφωσης και αυτή παράγεται από την εξίσωση 4.5, μοιράζοντας όμως το πεδίο ορισμού των y στο μισό (έως $y=b/2$) και εισάγοντας τις αρνητικές τιμές της εν λόγω εξίσωσης στο άλλο μισό του πεδίου τιμών.

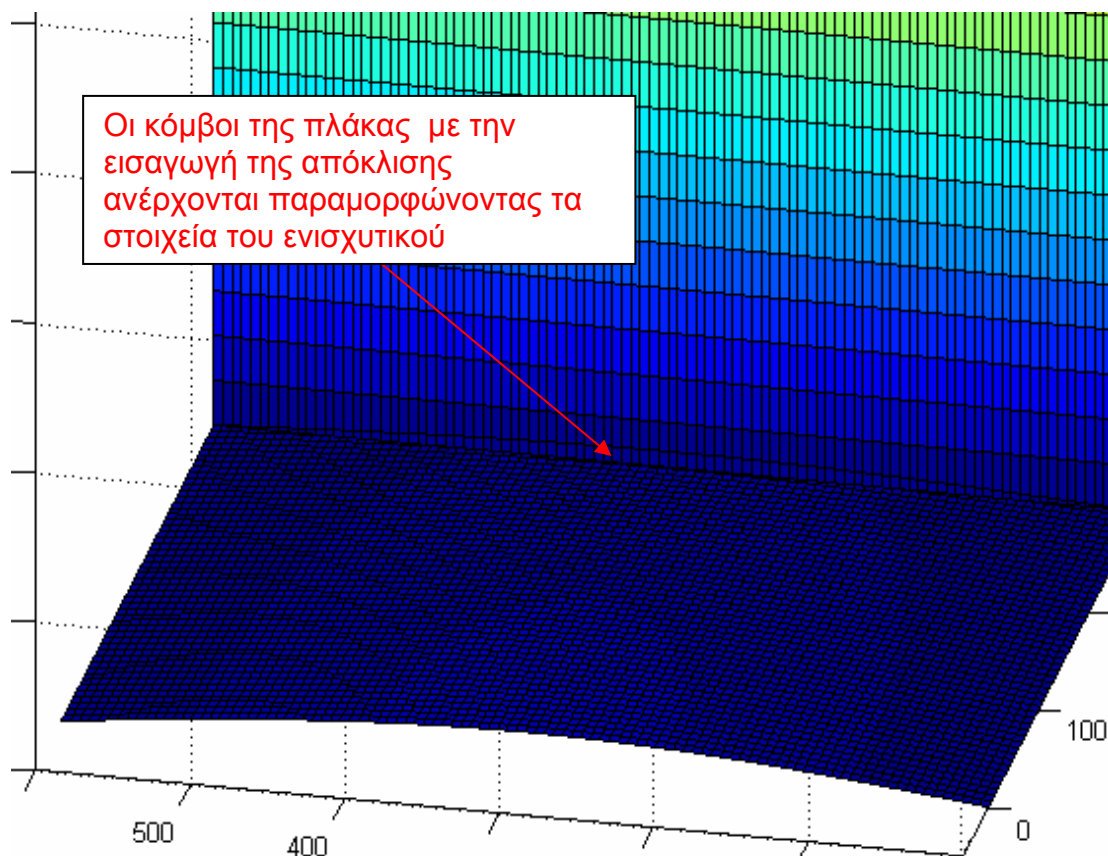
Πέραν των ανωτέρω, η εξίσωση παραμόρφωσης του ενισχυτικού είναι ως ακολούθως (κοινή για όλα τα μοντέλα):

$$w_S = 0.45 \left(\frac{z}{h_w}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (4.6)$$

με πεδίο ορισμού των x, z

$$0 \leq x \leq a \text{ και } 0 \leq z \leq h_w$$

Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συνολική παραμόρφωση που προστέθηκε στην κατασκευή (global deflection) συνεχίστηκε για δύο σειρές πεπερασμένων στοιχείων και στο ενισχυτικό και σταδιακά εξομαλύνθηκε μειώνοντας το μέτρο του ημιτονοειδούς κύματος, προκειμένου να αποφευχθεί η κακή γεωμετρία των στοιχείων του ενισχυτικού που βρίσκονται σε ένωση με την πλάκα, όπως κάλλιστα μπορεί να φανεί στο ακόλουθο Σχήμα 4.7



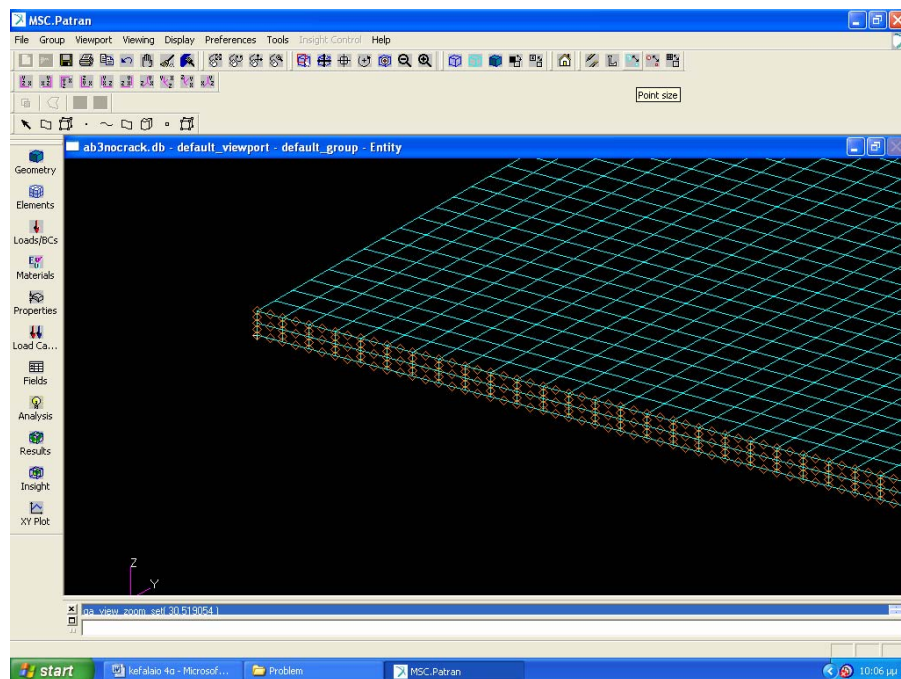
Σχήμα 4.7 Παραμόρφωση των πεπερασμένων στοιχείων του ενισχυτικού λόγω *global deflection*

4.4 Συνοριακές συνθήκες

Ένα από τα σημαντικότερα σημεία που καθορίζει την προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η εισαγωγή των κατάλληλων οριακών συνθηκών, προκειμένου το μαθηματικό μοντέλο να συμπεριφερθεί όσον το δυνατόν κοντά στις πραγματικές καταστάσεις. Στην παράγραφο 3.5 περιγράψαμε τη γενική μορφή των κινήσεων που αναμένουμε να εκτελέσει ο συνδυασμός έλασμα – ενισχυτικό ως μέρος μιας μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας. Έτσι λοιπόν καταλήγουμε στις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις που πρέπει να εισαχθούν στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων (αναφερόμενοι στο σχήμα 3.6):

(1) **Αφόρτιστες πλευρές της πλάκας $y=0$ και $y=b$**

Στις πλευρές αυτές εφαρμόστηκαν συνθήκες περιορισμού των μετατοπίσεων προκειμένου οι πλευρές να κινούνται ως ένα επίπεδο (οι κόμβοι των αντίστοιχων πλευρών να έχουν το ίδιο u_y). Με αυτό τον τρόπο περιορίζουμε τις περιστροφές Φ_x και Φ_z στις δύο αφόρτιστες πλευρές όπως απαιτεί η θεώρηση ότι το υπό ανάλυση ενισχυμένο έλασμα βρίσκεται ανάμεσα σε παρακείμενα ενισχυμένα ελάσματα της ευρύτερης κατασκευής. Για την εν λόγω προσομοίωση χρησιμοποιούμε την εντολή *EQUATION, συνδέοντας τις μετατοπίσεις των κόμβων των σχετικών πλευρών με τη μετατόπιση ενός μόνο κόμβου. Στο Σχήμα 4.8 φαίνονται (με κόκκινο) οι κόμβοι της αφόρτιστης πλευράς $y=0$ που θα συνδεθούν με την επιβολή κοινής μετατόπισης.

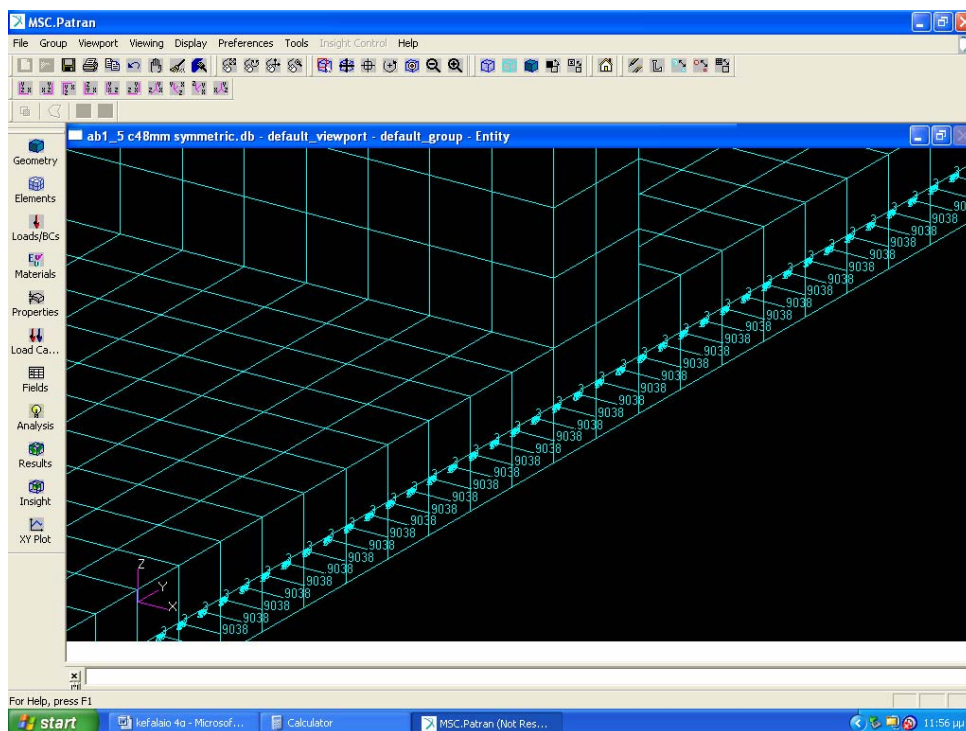


Σχήμα 4.8 *Κόμβοι στοιχείων της πλευράς $y=0$ με κοινή μετατόπιση u_y*

(2) **Φορτισμένες πλευρές της πλάκας $x=0$ και $x=a$**

Το φορτίο στην πλάκα εφαρμόζεται με τη μορφή μετατοπίσεως u_x και συγκεκριμένα με τιμή ομοιόμορφης συμπίεσης $u_x=0.90378$ mm. Η εν λόγω τιμή επιβάλλει μέγιστη παραμόρφωση στην κατασκευή $E11_{\max}=2.545 \cdot E11(0)$, όπου

E11(0) είναι η ανηγμένη παραμόρφωση στην τάση διαρροής του υλικού. Όπως αναφέρθηκε σχετικά στην παράγραφο 3.5, μπορούμε να θεωρήσουμε με σχετική ασφάλεια ότι η φορτισμένη πλευρά της πλάκας υπόκειται σε μια μικρής εντάσεως περιστροφή περί άξονα παράλληλο με τον άξονα των y , λόγω της διαφορετικής εντάσεως κατά τη διάχυση του φορτίου στη διατομή της εν λόγω πλευράς. Συναφώς και προκειμένου να επιτρέψουμε επίσης, το φαινόμενο Poisson κατά τη διεύθυνση του πάχους της πλάκας, επιβάλλεται η συνθήκη $u_z=0$ σε μία σειρά κόμβων ίδιας συντεταγμένης z και συγκεκριμένα στους κόμβους που βρίσκονται στη μέση διατομή της πλάκας (συνθήκη απλής στήριξης – simply supported). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συγκεκριμένη συνθήκη εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ακαμψία των εγκάρσιων κυρίων δοκών ή εγκάρσιων ενισχυτικών που συνορεύουν με το υπό εξέταση ενισχυμένο έλασμα, όπως επίσης και από τις διαστάσεις αυτού. Η πραγματική συνοριακή συνθήκη στις εν λόγω πλευρές κινείται μεταξύ της απλής στήριξης και της πάκτωσης. Τα ανωτέρω συνοψίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 *Επιβολή φορτίου στην πλευρά $x=a$*

Επιπρόσθετα θεωρούμε ότι οι κόμβοι με την ίδια συντεταγμένη y της φορτισμένης πλευράς θα πρέπει να έχουν κοινή περιστροφή, δηλαδή η περιστροφή στις φορτισμένες πλευρές μεταβάλλεται μόνο στην διεύθυνση Oy και

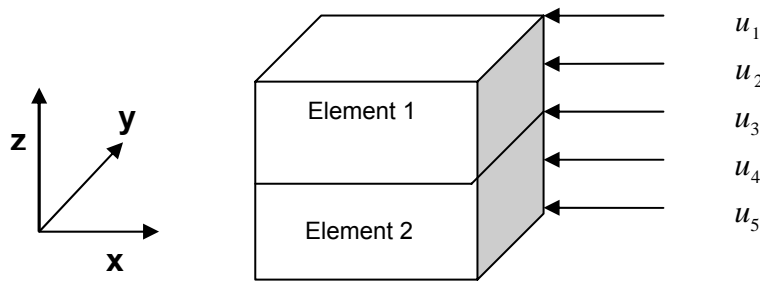
όχι κατά το πάχος της πλάκας. Για την επιβολή της περιστροφής στην πλευρά χρησιμοποιήθηκε εκ νέου η εντολή *EQUATION με τις ακόλουθες εξισώσεις:

(1) Για στους κόμβους πλευρών των πεπερασμένων στοιχείων C3D20R στους πλάκας (δύο(2) κατά το πάχος) σύμφωνα και με το ακόλουθο σχήμα 4.10:

$$u_2 = \frac{1}{2}(u_1 + u_3) \quad (4.7)$$

$$u_5 = 2u_3 - u_1 \quad (4.8)$$

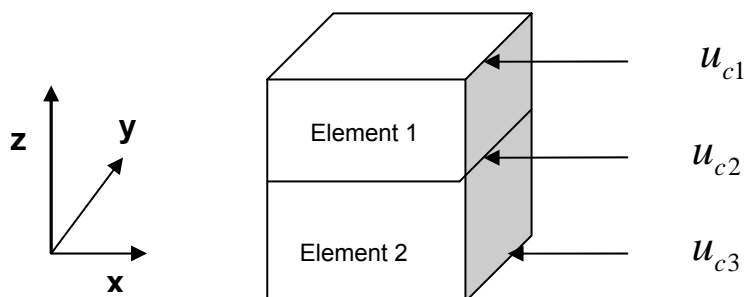
$$u_4 = \frac{3}{2}u_3 - \frac{1}{2}u_1 \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.10 Φόρτιση στοιχείων κατά το πάχος της πλάκας στους κόμβους πλευράς

(2) Για τους κεντρικούς κόμβους των εν λόγω στοιχείων σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα 4.11:

$$u_{c3} = 2u_{c2} - u_{c1} \quad (4.10)$$

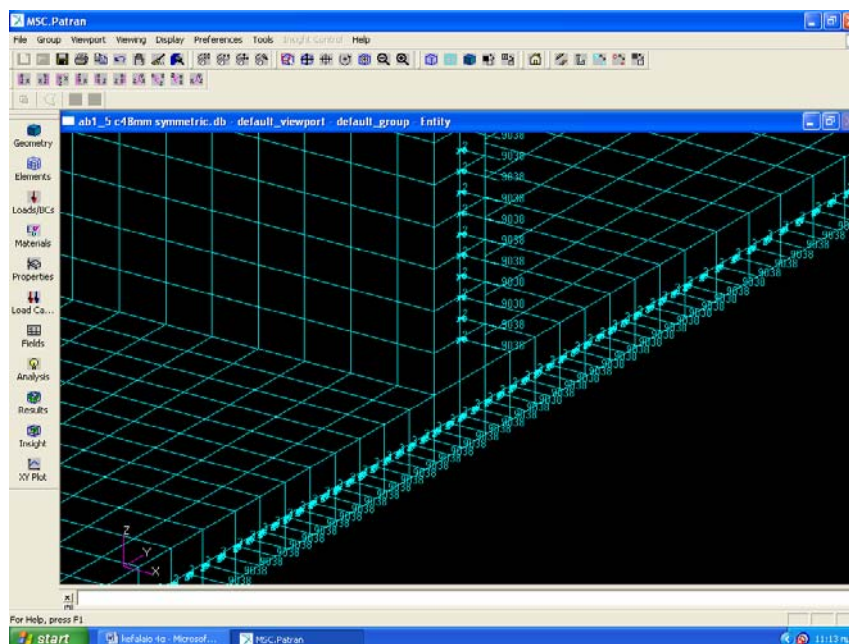


Σχήμα 4.11 Φόρτιση στοιχείων κατά το πάχος της πλάκας στους κεντρικούς κόμβους της πλευράς

(3) Φορτισμένες πλευρές του ενισχυτικού

Το ενισχυτικό θεωρούμε ότι αντιλαμβάνεται στη διατομή του την ίδια μετατόπιση με την πλάκα. Η εφαρμογή της μετατόπισης γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο, όπως αναπτύχθηκε προηγουμένως για την πλάκα, αν στρέψουμε τα πεπερασμένα στοιχεία των σχημάτων 4.10 και 4.11 κατά 90° μοίρες περί τον άξονα x . Όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.5, η συνοριακή διατομή του ενισχυτικού περιορίζεται κατά την κίνηση κατά τον άξονα y , λόγω του γεγονότος ότι διέρχεται μέσα από το εγκάρσιο κατασκευαστικό στοιχείο (Σχήμα 3.6). Επιπρόσθετα, θεωρούμε ότι υφίσταται δυνατότητα μικρής περιστροφής της διατομής περί του άξονα y . Η εν λόγω παρατήρηση μας οδηγεί σε συνθήκες απλής στήριξης των κεντρικών κόμβων της διατομής ($y=b/2$) με τους υπόλοιπους κόμβους να διέπονται από αντίστοιχες εξισώσεις, όπως της πλάκας.

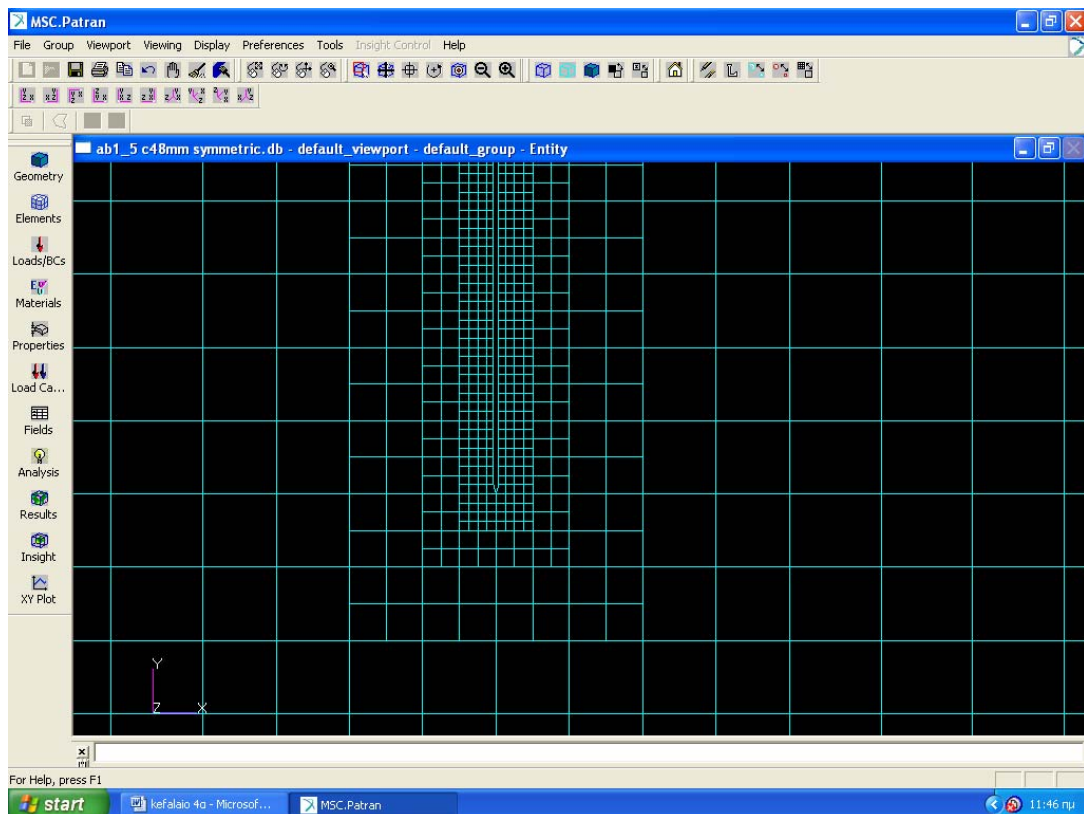
Στη συγκεκριμένη περίπτωση δημιουργείται ένα πρόβλημα στα στοιχεία του ενισχυτικού που βρίσκονται σε απευθείας σύνδεση με τα στοιχεία της πλάκας. Οι κάτω κόμβοι αυτών, διέπονται από εξισώσεις περιστροφής περί τον άξονα y , ενώ οι άνω κόμβοι από αντίστοιχες εξισώσεις περί τον άξονα z . Προκειμένου να υπερβούμε αυτή την ασυμβατότητα, αφέθηκε «ελεύθερη» τη περιστροφή και μετατόπιση στους κεντρικούς κόμβους των εν λόγω στοιχείων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12 Μετατόπιση u_x στα στοιχεία πλάκας – ενισχυτικού ($x=a$)

4.5 Ανάπτυξη του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάπτυξη του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της ρηγματοποιημένης κατασκευής ξεκινά από τη λεπτομέρεια της ρωγμής, όπου τα στοιχεία είναι σχετικά μικρών διαστάσεων (της τάξεως των 0.5 mm) με σκοπό να μη χάσουμε πληροφορία από τα πεδία των τάσεων. Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη των στοιχείων που συνθέτουν τη ρωγμή συνεχίστηκε σε απόσταση περίπου 2mm, όπου και αναμένουμε αυξημένη συγκέντρωση τάσεων. Στη συνέχεια για να συνεχίσουμε τη διακριτοποίηση του μοντέλου με στοιχεία μεγαλύτερων διαστάσεων, αξιοποιήσαμε τις δυνατότητες της εντολής *TIE που συνδέει τις μετατοπίσεις στους κόμβους μιας επιφάνειας (master) ενός στοιχείου με τις αντίστοιχες (σε επαφή) επιφάνειες μικρότερων στοιχείων(slave), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13



Σχήμα 4.13 Ανάπτυξη του πλέγματος στην περιοχή της ρωγμής

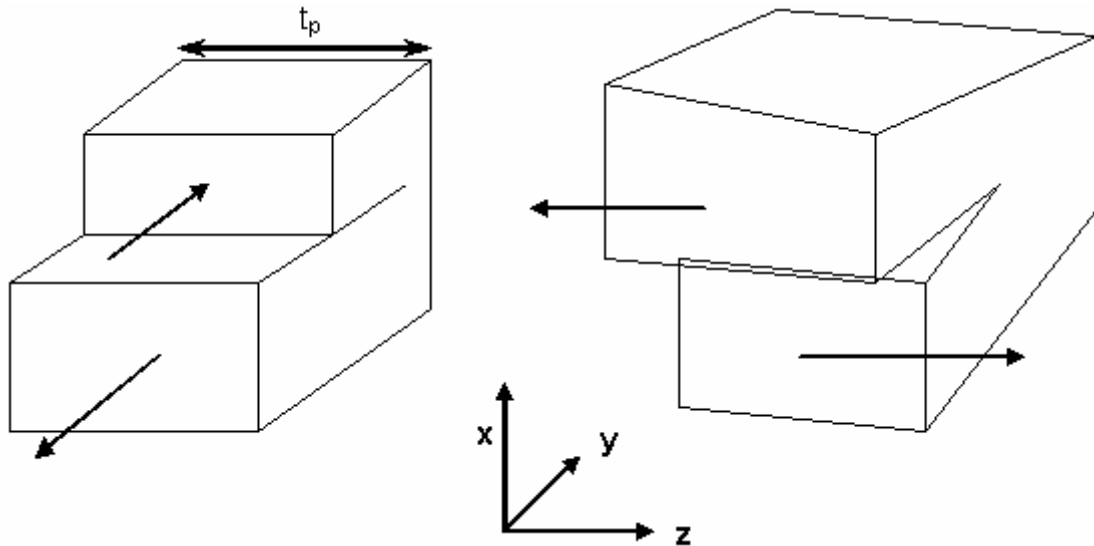
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις που απαιτήθηκε η μοντελοποίηση ρωγμών στην πλάκα οι οποίες διέρχονται κάτω από το ενισχυτικό, χωρίς να υφίσταται ρωγμή επ' αυτού (όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο),

χρησιμοποιήθηκαν συνθήκες περιορισμού των μετατοπίσεων μεταξύ των ελεύθερων κόμβων του ενισχυτικού και των αντίστοιχων της πλάκας στην περιοχή της ρωγμής με την εντολή *MPC (γραμμική και δευτέρου βαθμού). Αυτό ήταν απαραίτητο για να μοντελοποιηθεί σωστά η κίνηση κόμβων πλάκας – ενισχυτικού στην περιοχή της ρωγμής κατά τη συμπίεση. Οι διαστάσεις και ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ανά μοντέλο, θα αναφέρεται κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στα επόμενα κεφάλαια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι καταβλήθηκε προσπάθεια τα πεπερασμένα στοιχεία να έχουν λόγο διαστάσεων $a/b < 3$ με σκοπό την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

4.6 Προσομοίωση στην περιοχή της ρωγμής

Οι δύο πλευρές της ρωγμής κατά τη συμπίεση θα κινηθούν η μία προς την άλλη και κατά την επαφή θα υπάρξει αύξηση της πίεσης των δύο επιφανειών και αν υπερνικηθεί η στατική τριβή κατά σημεία, θα υπάρξει κύλιση της μίας επιφάνειας σε σχέση με την άλλη. Για την προσομοίωση των εν λόγω φαινομένων καθορίζουμε δύο (2) επιφάνειες με την εντολή *SURFACE, από τα στοιχεία που συγκροτούν τη ρωγμή, με τη μία να αποτελεί την κύρια (master) και την άλλη τη δευτερεύουσα (slave). Κατά αυτό τον τρόπο και με την εντολή *CONTACT PAIR, ορίζουμε την αλληλεπίδραση των δύο επιφανειών στη περιοχή της ρωγμής και συγκεκριμένα το συντελεστή στατικής τριβής, προκειμένου να αποτυπώσουμε καλύτερα τα πεδία των μεταβλητών στην εν λόγω περιοχή της ασυνέχειας. Συγκεκριμένα στα μοντέλα της παρούσας εργασίας ελήφθη ο συντελεστής τριβής ίσος με 0.2.

Στο σχήμα 4.14 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι δύο (2) πιθανές κινήσεις των δύο επιφανειών στην περιοχή του άκρου της ρωγμής κατά τη συμπίεση του ενισχυμένου ελάσματος. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μία σχετική κίνηση των δύο επιφανειών στο επίπεδο yz κατά τη διεύθυνση του άξονα y (διάτμηση επί του επιπέδου), ενώ στη δεύτερη η σχετική κίνηση επί του ίδιου επιπέδου, πραγματοποιείται κατά τη διεύθυνση του άξονα z (διάτμηση εκτός επιπέδου). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σχετική κίνηση των δύο επιφανειών μπορεί να είναι και συνδυασμός των δύο ανωτέρω περιπτώσεων.



Σχήμα 4.14 Σχετική κίνηση των δύο επιφανειών στο άκρο της ρωγμής (συμπίεση στην διεύθυνση $0x$)

4.7 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων – Διαδικασία υπολογισμών

Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μοντέλων, στα επόμενα κεφάλαια έχουν επιλεγθεί οι ακόλουθοι τρόποι:

(1) Η μορφή της παραμορφωμένης κατασκευής σε επιλεγμένα στάδια φόρτισης και συγκεκριμένα σε λόγους ανηγμένης παραμόρφωσης, οι οποίοι παρουσιάζουν ενδιαφέρον από πλευράς τιμών συγκεκριμένων μεταβλητών – διακριτών φαινομένων. Κατά την εν λόγω παρουσίαση και για προφανείς λόγους θα χρησιμοποιηθεί βαθμός μεγέθυνσης παραμόρφωσης.

(2) Μειωτικές καμπύλες φόρτισης (load end shortening) για την ανάδειξη της μέγιστης αντοχής στην πλάκα, στο ενισχυτικό και της συνολικής κατασκευής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εν λόγω καμπύλες προκύπτουν με την ακόλουθη διαδικασία:

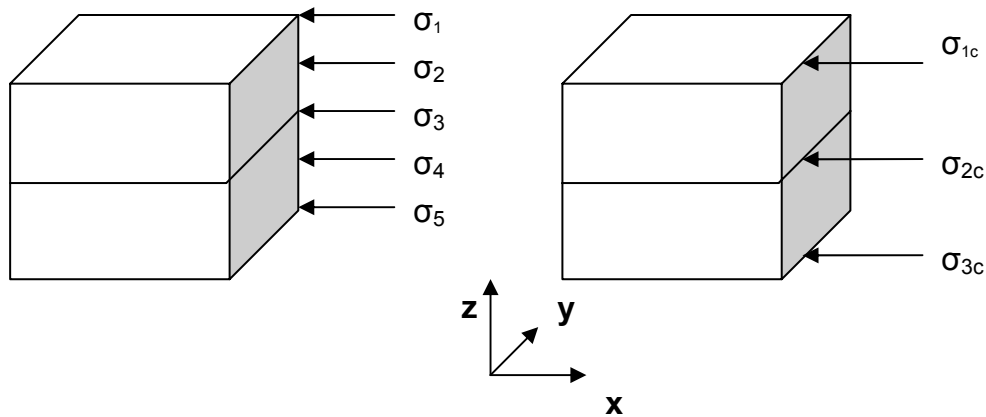
(α) Ολοκλήρωση σύμφωνα με τον 1^ο κανόνα του Simpson, των τάσεων μίας εκ των φορτισμένων πλευρών (μέση τάση στον κόμβο) κατά τη διεύθυνση του άξονα z , ως ακολούθως (βλέπε Σχήμα 4.15)

(i) Για τους κόμβους πλευράς των στοιχείων

$$\bar{N}_{xx} = \frac{N_{xx}}{t} = \left(\frac{1}{3}\right)\left(\frac{1}{4}\right)(\sigma_1 + 4\sigma_2 + 2\sigma_3 + 4\sigma_4 + \sigma_5) \quad (4.11)$$

(ii) Για τους κεντρικούς κόμβους των στοιχείων

$$\bar{N}_{xx} = \frac{N_{xx}}{t} = \left(\frac{1}{3}\right)\left(\frac{1}{2}\right)(\sigma_{1c} + 4\sigma_{2c} + \sigma_{3c}) \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.15 Μέσες τάσεις στους κόμβους των στοιχείων

(β) Ολοκλήρωση (με τον 1^ο κανόνα του Simpson) κατά τη διεύθυνση του άξονα y , της κατανομής των τάσεων που προκύπτουν από την ανωτέρω διαδικασία στη φορτισμένη πλευρά.

(γ) Τα ανωτέρω βήματα (α) και (β) είναι κοινά και για την πλάκα και για το ενισχυτικό (ίδιοι τύποι με στροφή των αξόνων κατά 90^ο δεξιόστροφα). Μετά την εύρεση των τάσεων της πλάκας και του ενισχυτικού (ανά στάδιο φόρτισης), η συνολική τάση του ενισχυμένου ελάσματος προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma_{ολ} = \frac{(\sigma_{panel} A_{panel} + \sigma_{web} A_{web})}{(A_{panel} + A_{web})} \quad (4.13)$$

(δ) Η ανηγμένη παραμόρφωση προκύπτει από την επιβαλλόμενη φόρτιση στο συγκεκριμένο στάδιο σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$\frac{E_{11}}{E_{11}(0)} = \frac{\frac{2u_x}{a}}{\frac{\sigma_Y}{E}} \quad (4.14)$$

όπου u_x η μετατόπιση κατά x στη φορτισμένη πλευρά ανά στάδιο φόρτισης.

(3) Η κατανομή του βέλους κάμψης στις αφόρτιστες πλευρές (κατά τον άξονα x) του ελάσματος, καθώς και του ενισχυτικού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εν λόγω κατανομή θα παρουσιαστεί σε διαδοχικά στάδια φόρτισης για την καλύτερη απεικόνιση των μεταβολών του εν λόγω μεγέθους με την αύξηση του επιπέδου συμπίεσης.

(4) Ορίζουμε ως σ_{xav1} και σ_{xav2} τις μέσες τάσεις κατά τον άξονα x , καθώς επίσης σ_{xmax1} και σ_{xmax2} τις μέγιστες τιμές της κατανομής N_{xx} στα δύο τμήματα της πλάκας εκατέρωθεν του ενισχυτικού και πιο συγκεκριμένα από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ και από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$ αντίστοιχα. Οι μέσες τάσεις προκύπτουν από την ολοκλήρωση της κατανομής N_{xx} των εξισώσεων 4.11 και 4.12 στα ανωτέρω τμήματα της πλάκας κατά τη διεύθυνση Oy . Τα ισοδύναμα πλάτη (effective breadth) στα εν λόγω τμήματα της πλάκας, καθώς και το συνολικό προκύπτουν από τους ακόλουθους τύπους, σύμφωνα με το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα της παρούσας εργασίας:

$$b_{e1} = \frac{\int_0^{\frac{b-t_w}{2}} \bar{N}_{xx} dy}{\sigma_{xmax1}} = \left(\frac{b-t_w}{2} \right) \frac{\sigma_{xav1}}{\sigma_{xmax1}}$$

$$b_{e2} = \frac{\int_{\frac{b+t_w}{2}}^b \bar{N}_{xx} dy}{\sigma_{xmax2}} = \left(\frac{b-t_w}{2} \right) \frac{\sigma_{xav2}}{\sigma_{xmax2}} \quad (4.15)$$

$$b_e = b_{e1} + b_{e2}$$

Το ισοδύναμο πλάτος είναι ένα μέτρο αναγνώρισης της ικανότητας της πλάκας να φέρει ένα καθορισμένο φορτίο [15]. Η έννοια του ισοδύναμου πλάτους πηγάζει

από το γεγονός ότι η μέγιστη μεμβρανική τάση στο έλασμα βρίσκεται στην περιοχή εγγύς του ενισχυτικού, ενώ αυξανομένης της απόστασης από το ενισχυτικό, οι εν λόγω τάσεις είναι σημαντικά μικρότερες. Κατά αυτό τον τρόπο, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το φορτίο φέρεται από ένα τμήμα του ελάσματος που βρίσκεται εγγύς των ενισχυτικών και στο οποίο επικρατούν ιδεατά ομοιόμορφες μεμβρανικές τάσεις, σε αντικατάσταση της επικρατούσας διακύμανσης. Η εν λόγω παράμετρος b_e θα χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των διαφόρων μοντέλων.

(5) Το μέτρο της πλάτυνσης του ενισχυμένου ελάσματος σε όλα τα στάδια της φόρτισης. Το μοντέλο σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στην αφόρτιστη πλευρά (παράγραφος 4.4), παρουσιάζει μία πλάτυνση κατά τον άξονα y , η οποία μπορεί να συγκριθεί ανά μοντέλο, ενώ θα αποτελέσει στοιχείο αξιολόγησης των δυνατοτήτων ανάλυσης ενός συμπλέγματος ενισχυμένων ελασμάτων από ένα συνδυασμό πλάκας – ενισχυτικού.

(6) Η κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης PEEQ στο έλασμα και στο ενισχυτικό. Το μέγεθος αυτό αποτελεί μια μονόμετρη θετική μεταβλητή που εκφράζει το μέγεθος της πλαστικοποίησης στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται το μέτρο του διανύσματος των επαυξήσεων των πλαστικών παραμορφώσεων στο ευρισκόμενο στάδιο φόρτισης, το οποίο και αθροίζεται στην τιμή του από προηγούμενα στάδια (βήματα) φόρτισης.

Όλα τα ανωτέρω θα αποτελέσουν τον οδηγό σύγκρισης των μοντέλων που θα παρουσιασθούν στα επόμενα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΠΛΑΤΟΣ $A/B=1$

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την ανάλυση των μοντέλων με λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=1$, χωρίς ρωγμή, με ρωγμή στην πλάκα, με ρωγμή πάχους 0.3mm στην πλάκα και στο ενισχυτικό, καθώς επίσης και με μεταβολή της θέσεως της ρωγμής της πλάκας. Τα εν λόγω μοντέλα σύμφωνα με τη σειρά παρουσίασης και τη παραμετρική τους διαφοροποίηση συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων $a/b=1$

A/A	c (mm)	b (mm)	c/b	c_w (mm)	c_w/h_w	s (mm)
1	0	600	0	0	0	0
2	72	600	0.12	0	0	300
3	144	600	0.24	0	0	300
4	72	600	0.12	14.7	0.12	300
5	144	600	0.24	14.7	0.12	300
6	72	600	0.12	0	0	264
7	144	600	0.24	0	0	228
8	72	600	0.12	14.7	0.12	264
9	144	600	0.24	14.7	0.12	228

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τον ανωτέρω πίνακα κατά το σχεδιασμό της ρωγμής, στο λόγο μήκους ρωγμής προς πλάτος πλάκας c/b δόθηκαν οι τιμές 0.12 και 0.24, με μεταβολή της θέσεως της ρωγμής (όπου s η απόσταση ως προς τον άξονα y, του κέντρου της ρωγμής από την αρχή των αξόνων), ενώ η ρωγμή

στο ενισχυτικό κρατήθηκε με σταθερό λόγο μήκους ρωγμής προς ύψους ενισχυτικού $c_w/h_w=0.12$ και πάντα στο κέντρο του ενισχυτικού ($x=a/2$).

5.2 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1$ χωρίς ρωγμές

Κατά την ανάλυση του ενισχυμένου ελάσματος με $a/b=1$ ελέγχθηκαν και οι ακόλουθοι προβληματισμοί οι οποίοι και θα παρουσιαστούν κατά σειρά:

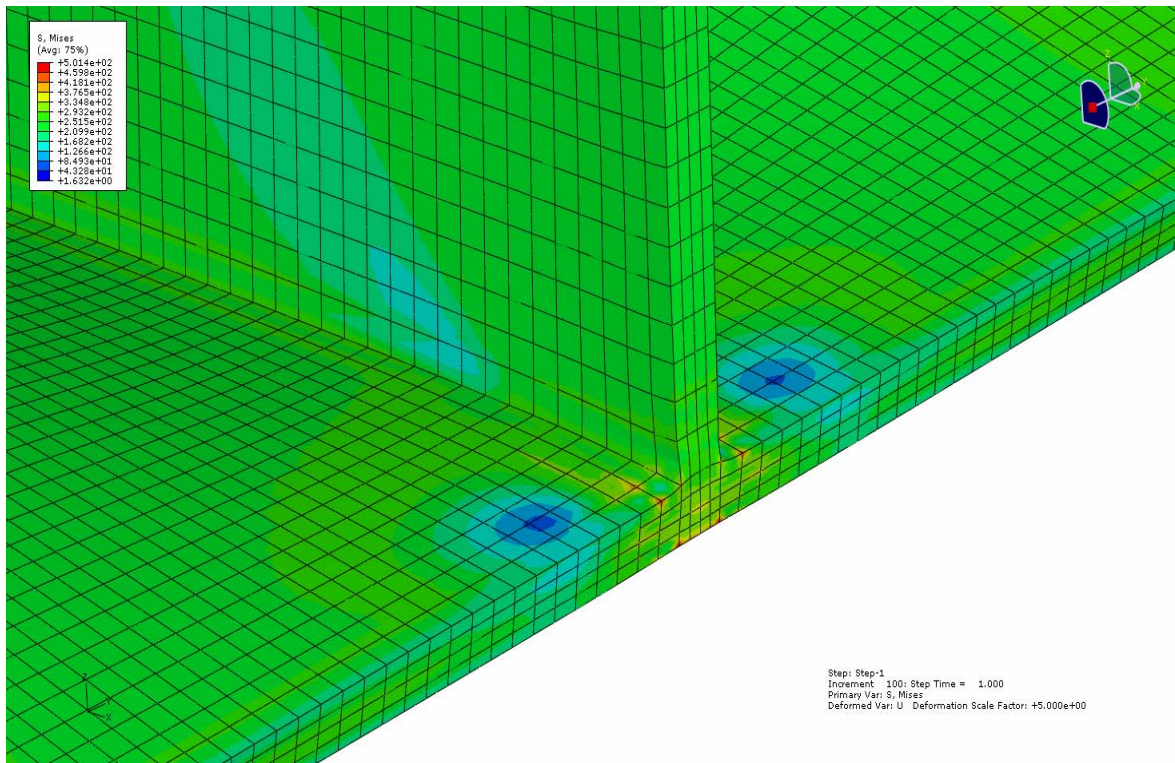
(1) Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η διακριτοποίηση κατά το πάχος του ενισχυμένου ελάσματος έγινε με δύο στοιχεία κατά αυτό. Πλην όμως, υπήρξε ο προβληματισμός, εάν χάνεται πληροφορία όσον αφορά τη μέγιστη αντοχή του ελάσματος και αν θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν παραπάνω στοιχεία κατά το πάχος.

(2) Ο βαθμός επιρροής της συνολικής παραμόρφωσης της κατασκευής (global deflection).

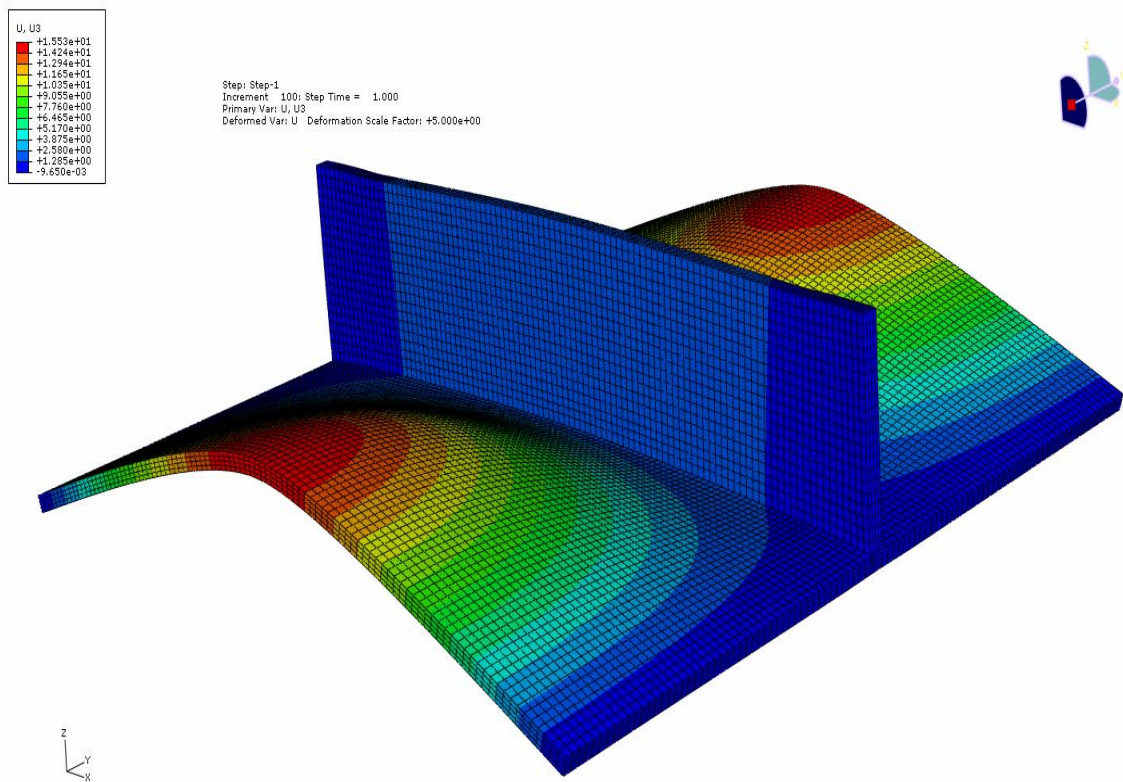
5.2.1 Μοντέλο $a/b=1$ με τέσσερα (4) στοιχεία κατά το πάχος

Η διαμέριση του ενισχυμένου ελάσματος με τέσσερα στοιχεία κατά το πάχος τόσο της πλάκας όσο και του ενισχυτικού έγινε με 48000 στοιχεία συνεχούς μέσου C3D20R. Οι διαστάσεις αυτών κυμάνθηκαν από $6\text{mm} \times 3.0615\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ (μήκος x πλάτος x ύψος) στην περιοχή κάτω από το ενισχυτικό, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα της κατασκευής τα στοιχεία είχαν διαστάσεις $6\text{mm} \times 6.12224\text{mm} \times 2.5\text{mm}$. Στο ακόλουθο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η διαμέριση του ενισχυμένου ελάσματος με τέσσερα στοιχεία κατά το πάχος (βαθμός μεγέθυνσης 5).

Στο Σχήμα 5.2 επιπλέον, απεικονίζεται η παραμορφωμένη κατασκευή στο τέλος της σταδιακής φόρτισης όσον αφορά τη μεταβλητή U3 (βαθμός μεγέθυνσης 5).

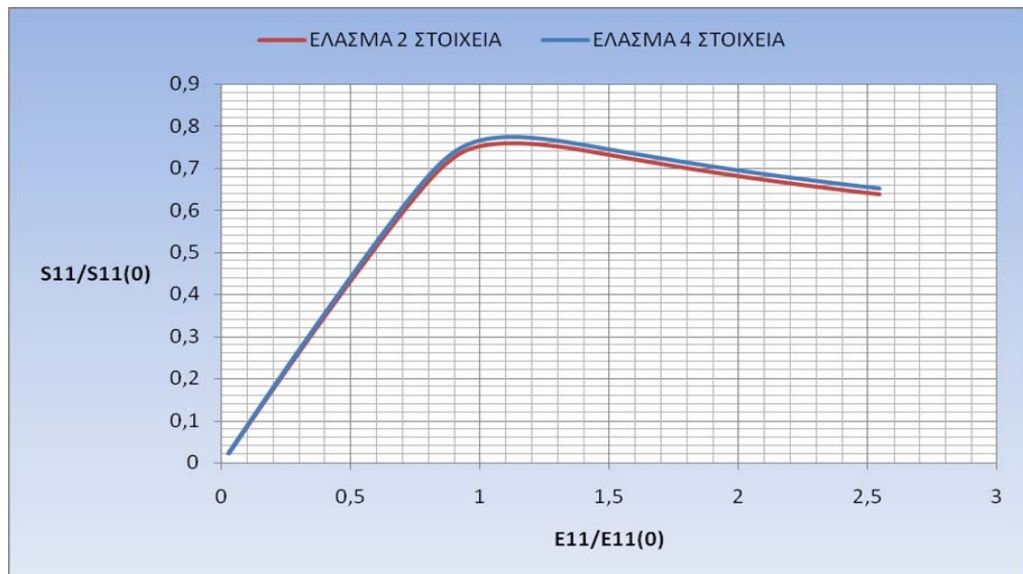


Σχήμα 5.1 Λεπτομέρεια μοντέλου $a/b=1$ με τέσσερα στοιχεία στο πλάτος

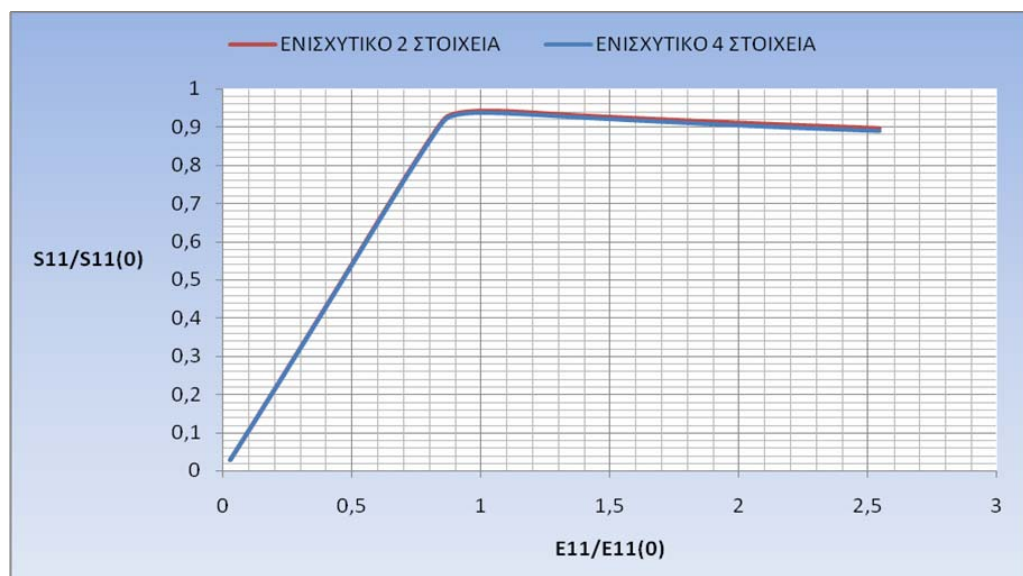


Σχήμα 5.2 Παραμορφωμένη κατασκευή στο τέλος της φόρτισης

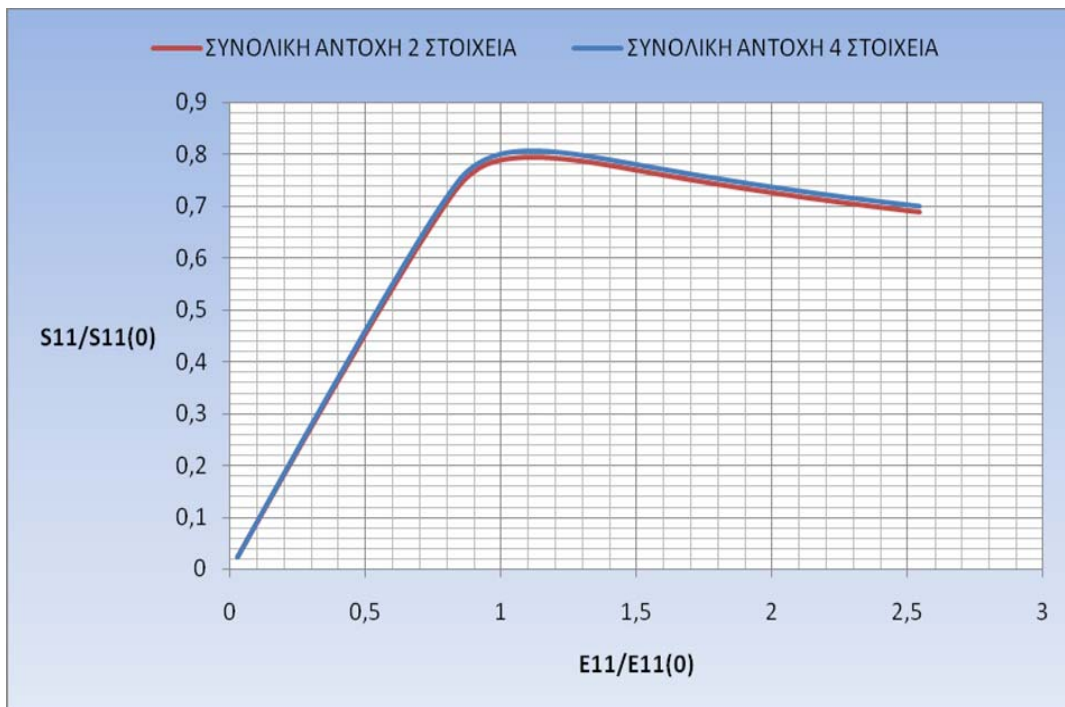
Η σύγκριση των μειωτικών καμπύλων φόρτισης του εν λόγω μοντέλου με το αντίστοιχο δύο (2) στοιχείων κατά το πάχος (θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου) μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν απαιτείται η χρησιμοποίηση τεσσάρων (4) στοιχείων, καθώς αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο χωρίς να επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το εν λόγω συμπέρασμα απεικονίζεται στα επόμενα Σχήματα 5.3, 5.4 και 5.5.



Σχήμα 5.3 Σύγκριση μέγιστης αντοχής στο έλασμα με διαφοροποίηση των στοιχείων κατά το πάχος.



Σχήμα 5.4 Σύγκριση μέγιστης αντοχής στο ενισχυτικό με διαφοροποίηση των στοιχείων κατά το πάχος.

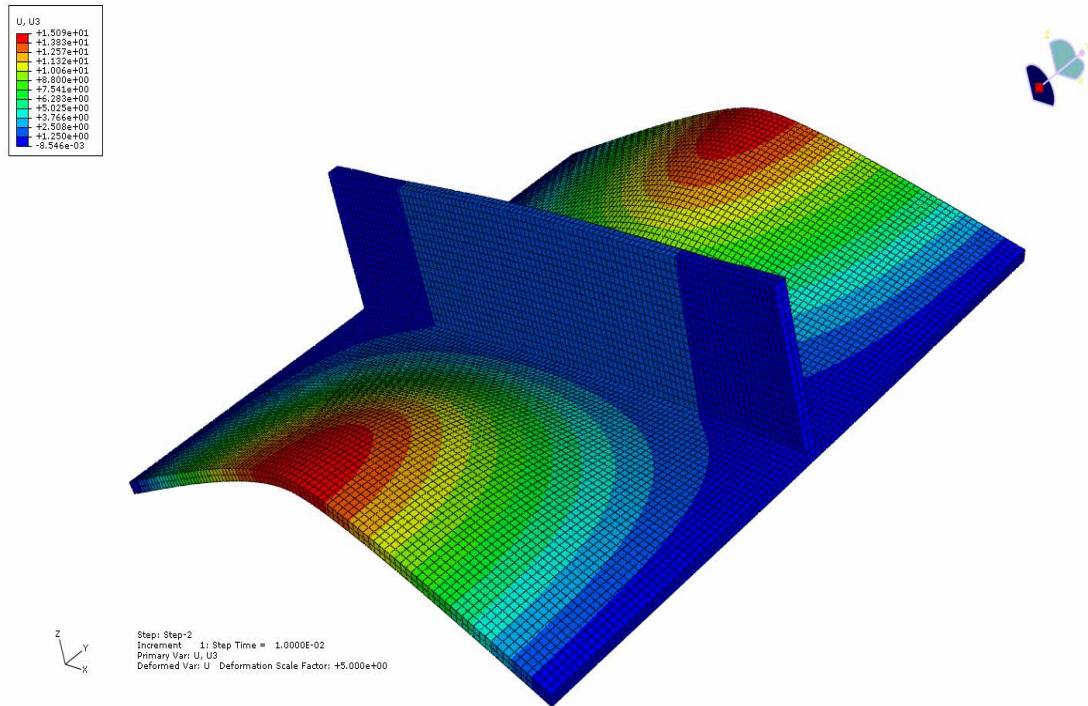


Σχήμα 5.5 Σύγκριση συνολικής μέγιστης αντοχής με διαφοροποίηση των στοιχείων κατά το πάχος.

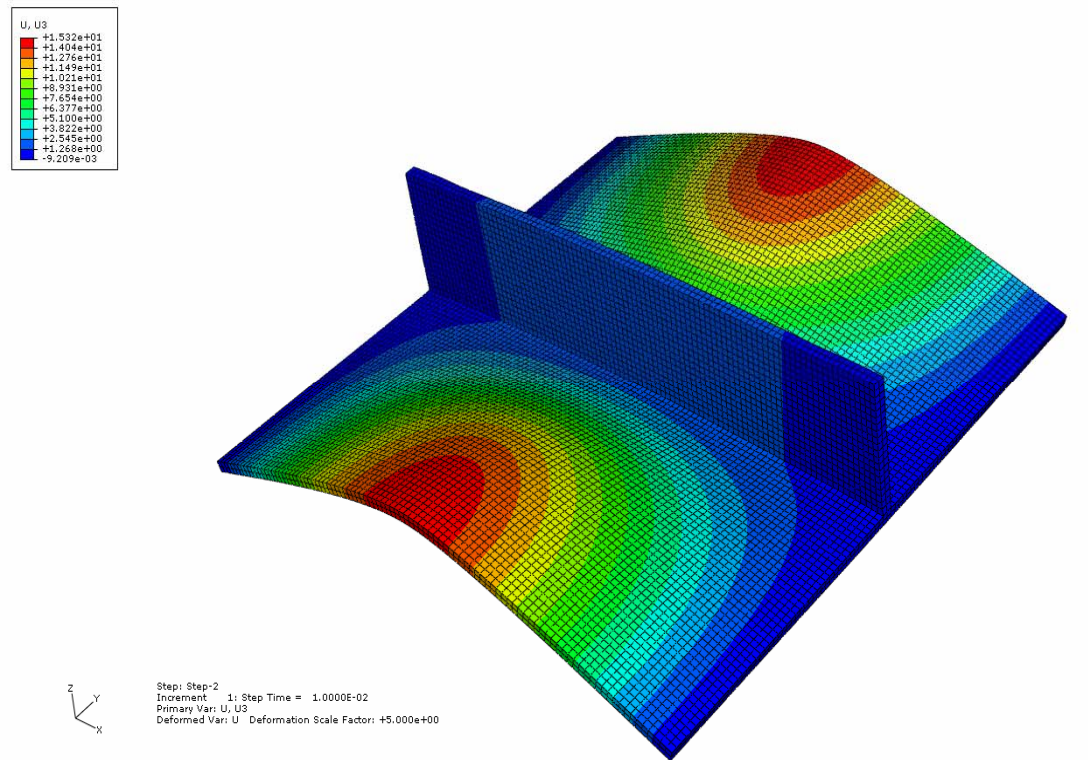
5.2.2 Έλεγχος επιρροής της συνολικής παραμόρφωσης της κατασκευής (global deflection)

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.3, ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη μέγιστη αντοχή της κατασκευής είναι οι αρχικές ατέλειες. Οι μέγιστες τιμές των εν λόγω παραμορφώσεων για τις διαστάσεις των ενισχυμένων ελασμάτων της παρούσας εργασίας, παρατίθενται στον πίνακα 4.2, όπως προκύπτουν από την στατιστική επεξεργασία καταγραφής των αρχικών ατελειών σε μεγάλο αριθμό πλοίων, που πραγματοποιήθηκε από το Smith. Πλην όμως, υπάρχει ο προβληματισμός για τη συνολική παραμόρφωση της κατασκευής και την επιρροή αυτής στη μέγιστη αντοχή. Για την αποσαφήνιση αυτού του προβλήματος και με την αξιοποίηση της εξίσωσης 4.3, αναλύθηκαν ενισχυμένα ελάσματα σε τρεις (3) περιπτώσεις global deflection. Συγκεκριμένα για $w_{op}=0$, $w_{op}=(1/4)w_{os}$ και $w_{op}=(1/2)w_{os}$.

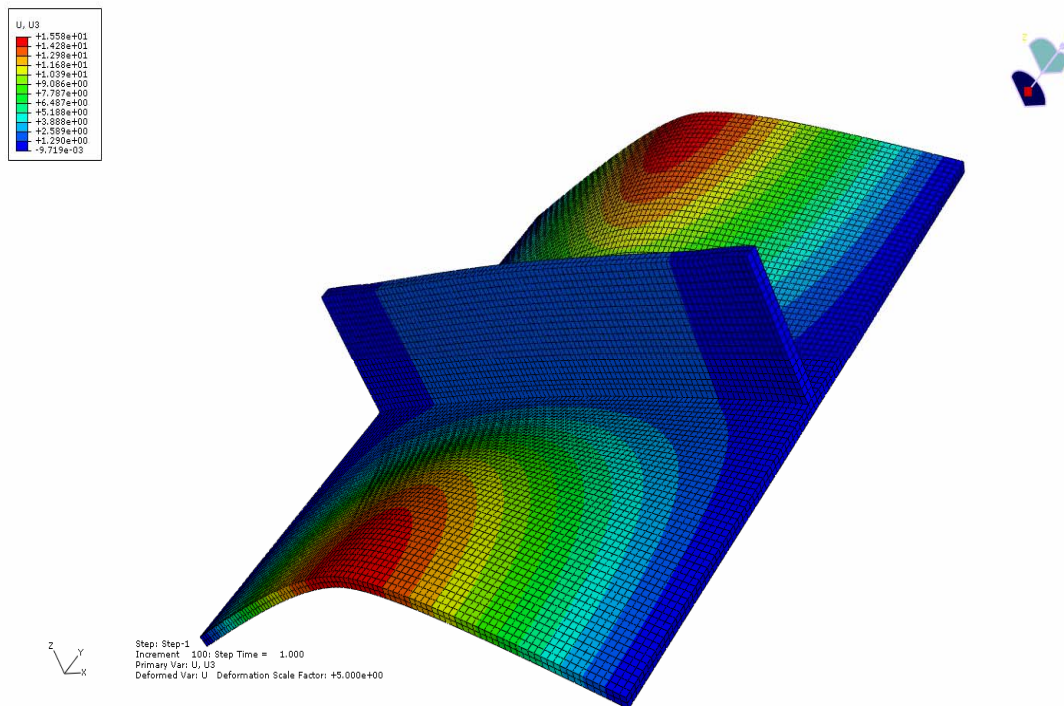
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται κατά σειρά η μορφή της παραμόρφωσης (μεταβλητή U3) στο τέλος της σταδιακής φόρτωσης για τις τρεις (3) ανωτέρω περιπτώσεις (βαθμός μεγέθυνσης 5).



Σχήμα 5.6 Μοντέλο $a/b=1$ με μηδενικό global deflection

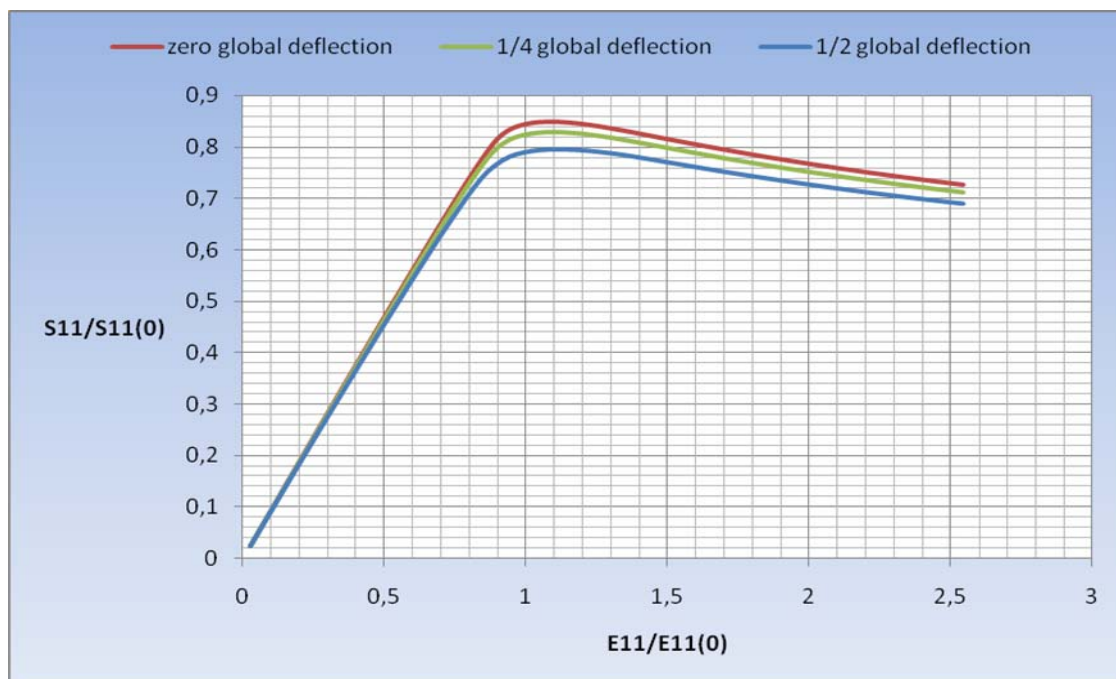


Σχήμα 5.7 Μοντέλο $a/b=1$ με $w_{op}=(1/4)w_{os}$

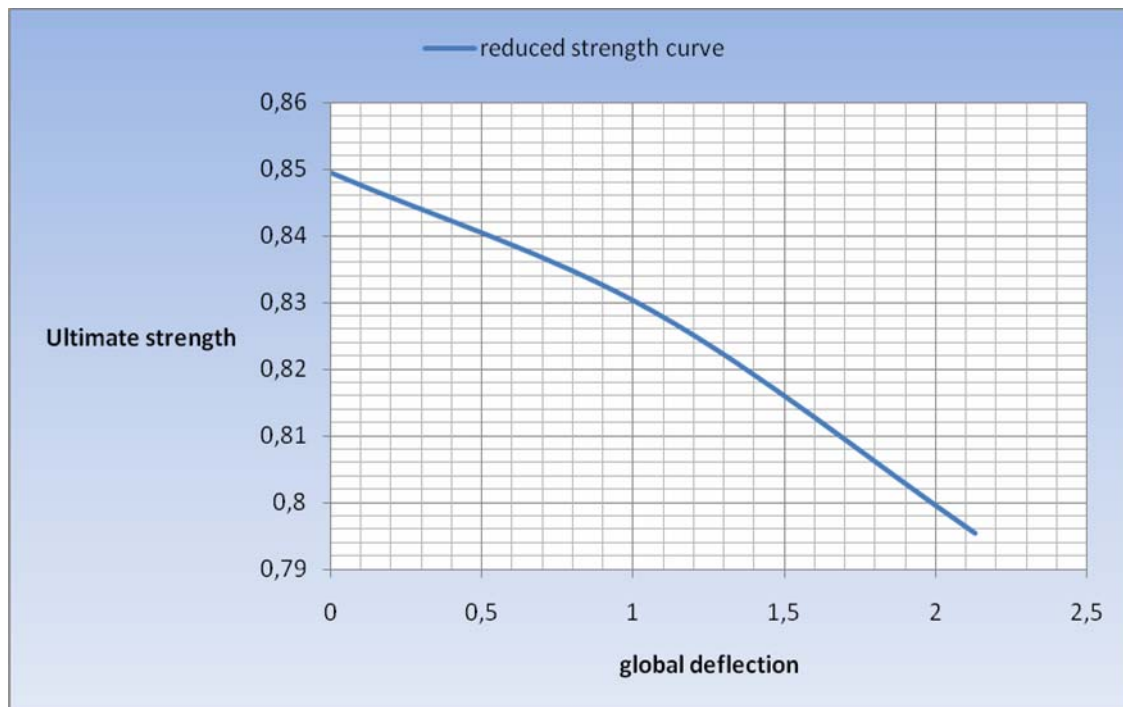


Σχήμα 5.8 Μοντέλο $a/b=1$ με $w_{op}=(1/2)w_{os}$

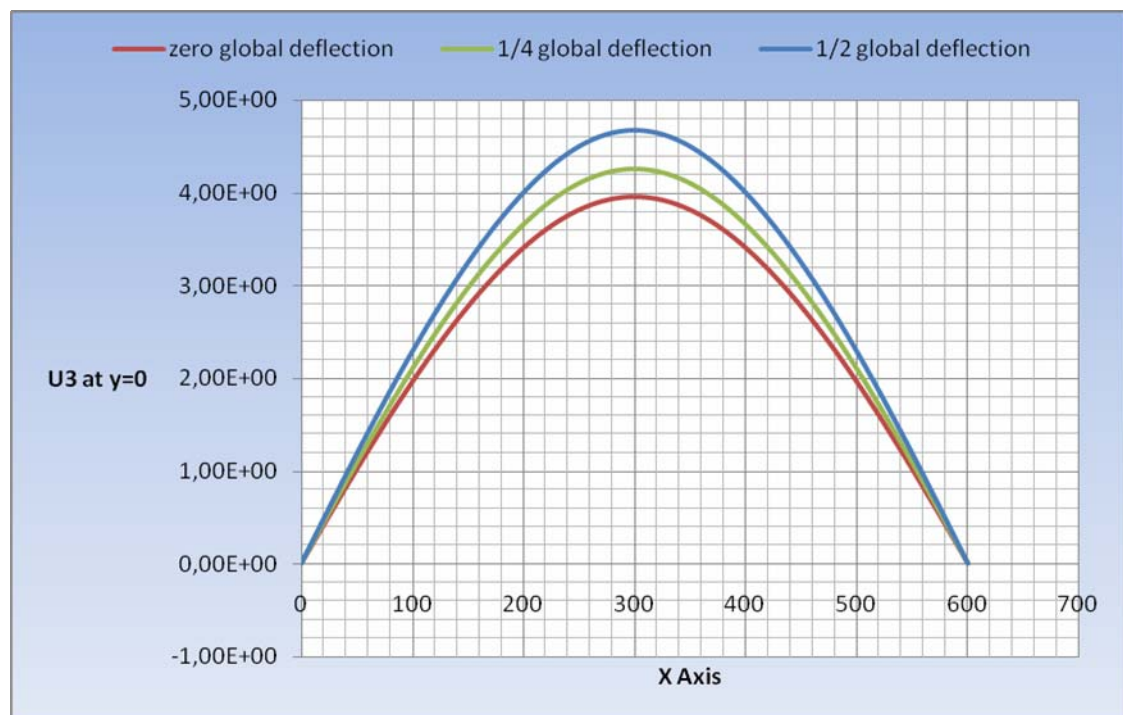
Η σύγκριση των μέγιστων τιμών της συνολικής αντοχής των ανωτέρω ενισχυμένων ελασμάτων μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το υπόλοιπο αντοχής μειώνεται σημαντικά, όσο αυξάνεται η συνολική παραμόρφωση όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 5.9 και 5.10



Σχήμα 5.9 Επίδραση global deflection στη συνολική αντοχή



Σχήμα 5.10 Μείωση της μέγιστης αντοχής με την αύξηση της συνολικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 5.11 Διαφοροποίηση βέλους κάμψης U_3 στη θέση $y=0$ με αλλαγή του global deflection σε χρόνο φόρτισης $E_{11}/E_{11}(0)=1.018$

Εφαρμόζοντας το νόμο των ελαχίστων τετραγώνων καταλήγουμε ότι η καμπύλη του σχήματος 5.10 προσεγγίζεται με τη διβάθμια εξίσωση

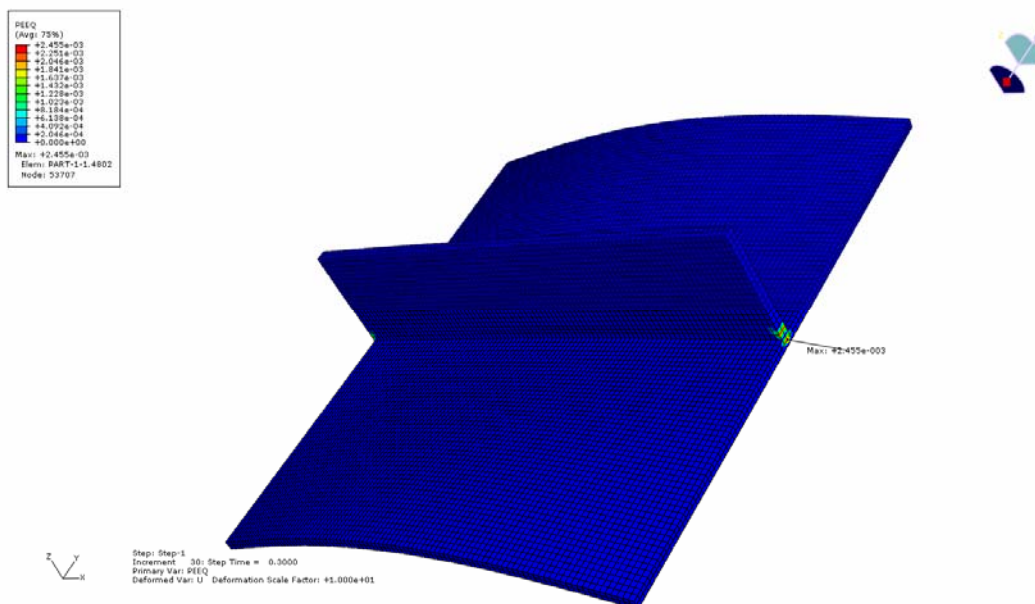
$$\sigma_{ultimate} \left(w_{os}, \sigma_{u_{w_{os}=0}} \right) = -0.0005 w_{os}^2 - 0.013 w_{os} + \sigma_{u_{w_{os}=0}} \quad (5.1)$$

όπου $\sigma_{w_{os}=0}$ είναι η μέγιστη αντοχή για global deflection $w_{os}=0$.

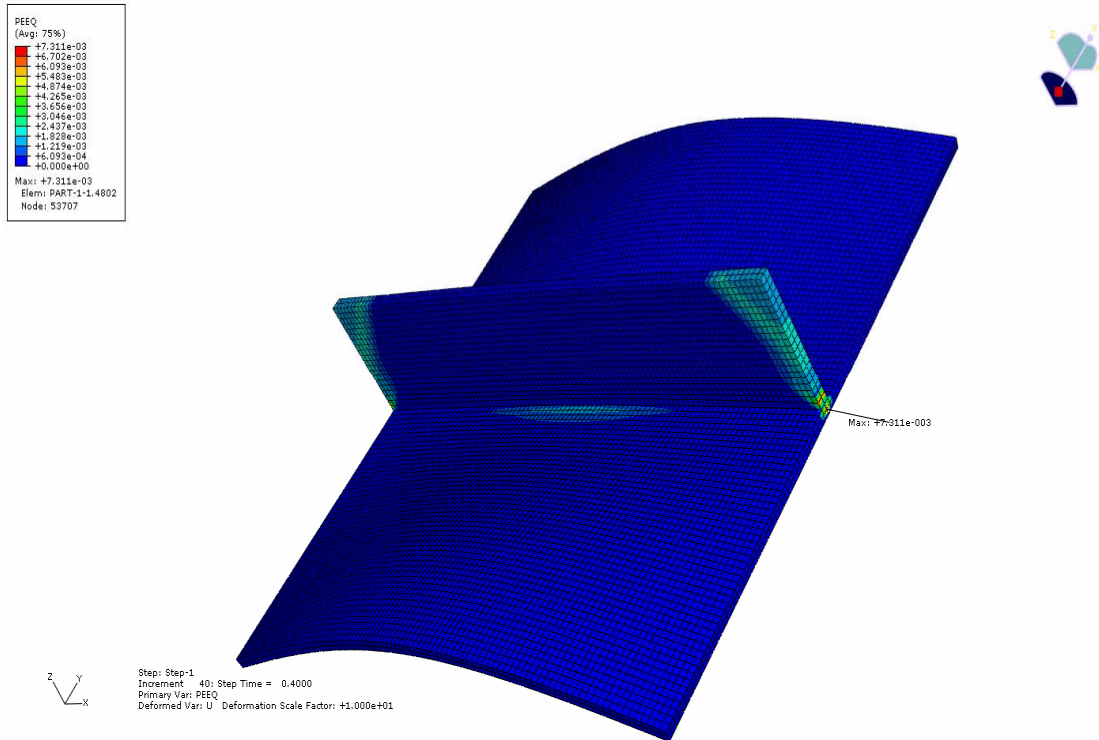
Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο prEN 1993-1-5:2004 (Plated structural elements) [21] όμως, προτείνεται κατά τη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, η χρησιμοποίηση μιας τιμής global deflection $w_{os}=\min(a/400,b/400)$ (π.χ. για $a/b=1$ προκύπτει $w_{os}=1.5\text{mm}$). Στην παρούσα εργασία και προκειμένου να υπάρξει συνέχεια με προϋπάρχουσες εργασίες ([16], [17]), θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές του πίνακα 4.2, που οδηγούν σαφώς σε μικρότερες τιμές υπολοίπων αντοχής των εξεταζόμενων κατασκευών.

5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων $a/b=1$ χωρίς ρωγμές

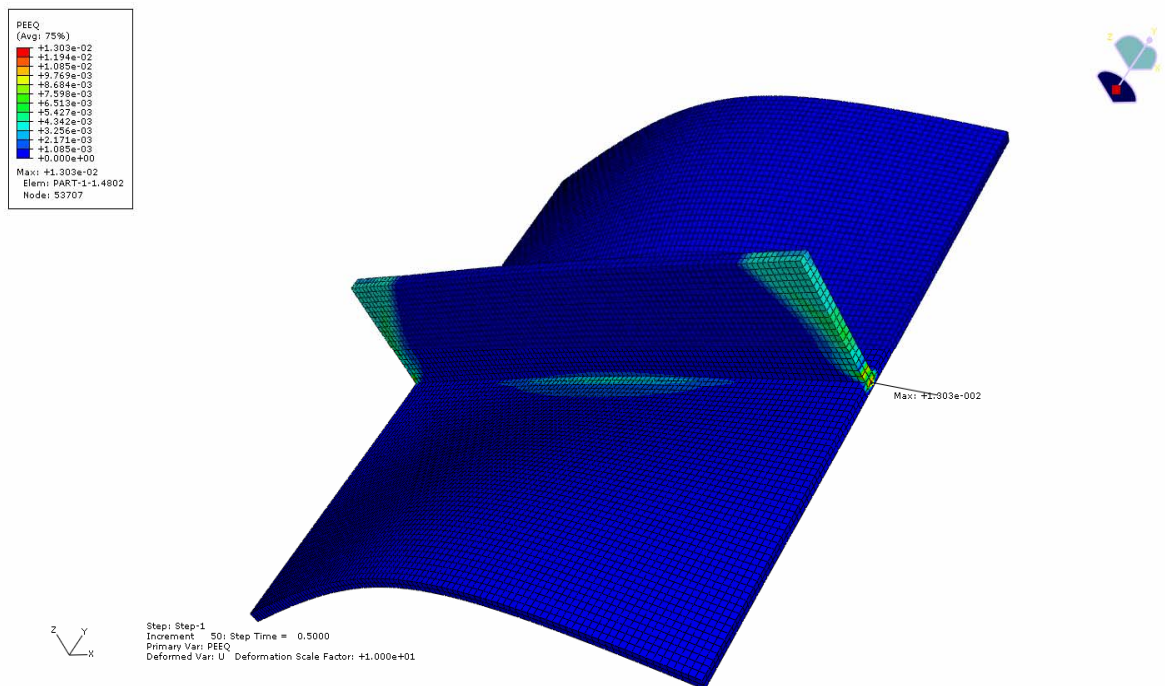
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 23128 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $6\text{mm} \times 6.1224\text{mm} \times 5\text{mm}$ στην πλάκα και $6\text{mm} \times 6.1235\text{mm} \times 6.1235\text{mm}$ στο ενισχυτικό. Η εξάπλωση της πλαστικής παραμόρφωσης σε τρία στάδια για $E11/E11(0)=0.7636, 1.018, 1.2726$ παρουσιάζεται στα ακόλουθα Σχήματα 5.12, 5.13 και 5.14 (βαθμός μεγέθυνσης 10).



Σχήμα 5.12 Πλαστική παραμόρφωση κατασκευής (μεταβλητή PEEQ) για $E11/E11(0)=0.7636$



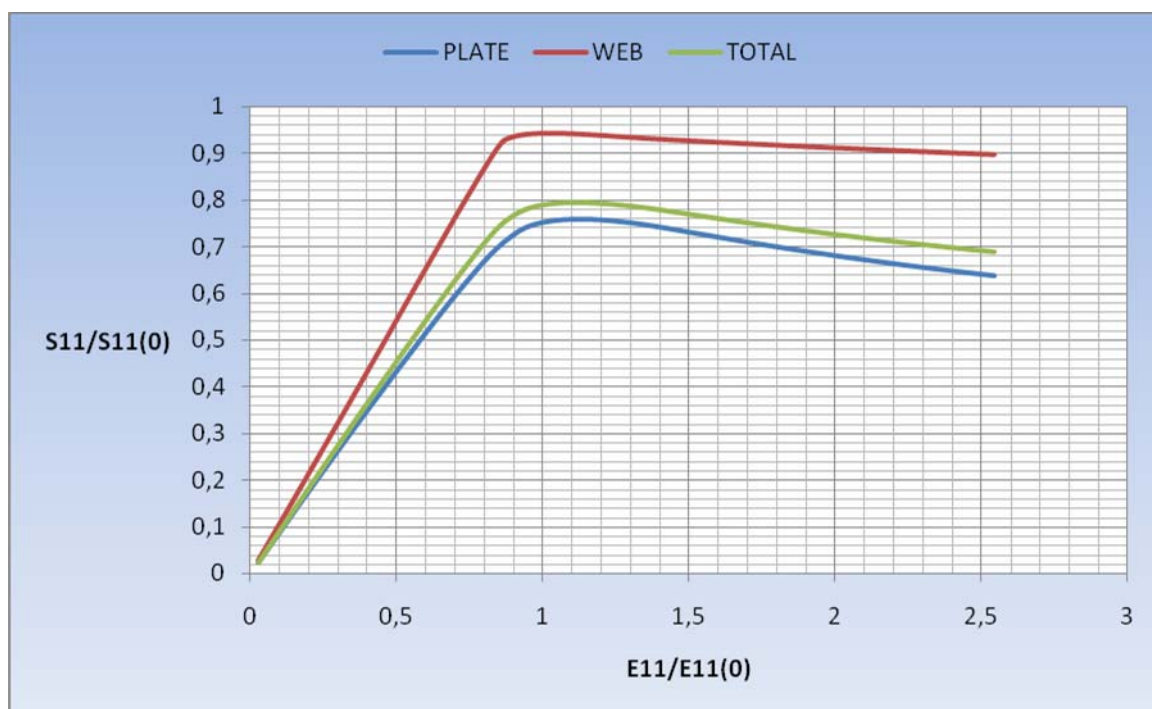
Σχήμα 5.13 Πλαστική παραμόρφωση κατασκευής (μεταβλητή PEEQ) για $E_{11}/E_{11(0)}=1.018$



Σχήμα 5.14 Πλαστική παραμόρφωση κατασκευής (μεταβλητή PEEQ) για $E_{11}/E_{11(0)}=1.2726$

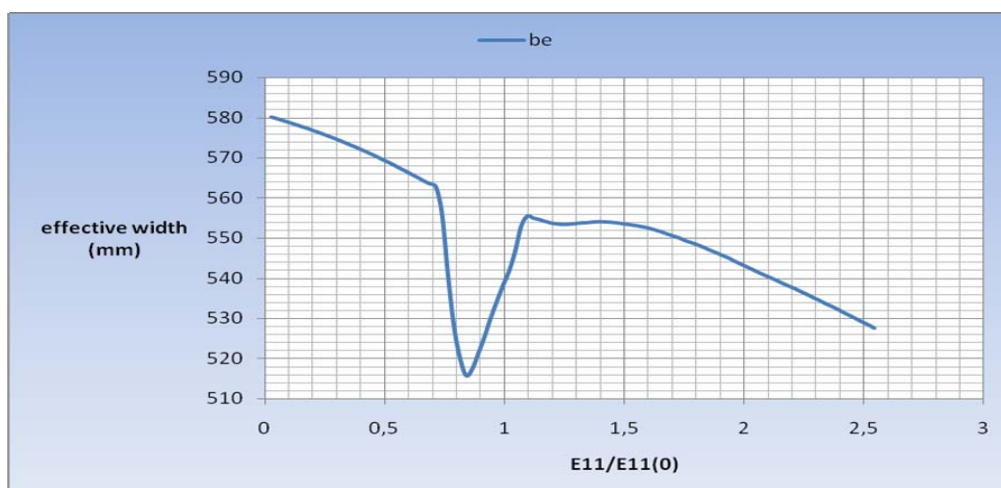
Όπως μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε, η πλαστικοποίηση ξεκινά στην περιοχή της ένωσης του ενισχυτικού με την πλάκα (Σχήμα 5.12), στη συνέχεια αναπτύσσεται στο ενισχυτικό με διαγώνια διεύθυνση ως προς τη διατομή αυτού, την ίδια στιγμή που ξεκινά η πλαστικοποίηση στην κεντρική περιοχή της πλάκας στην ένωση με το ενισχυτικό (Σχήμα 5.13) και τέλος έχουμε την επέκταση της πλαστικής περιοχής σύμφωνα με την αμέσως προηγούμενη ανάπτυξη (Σχήμα 5.14). Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί η αντίσταση στην παραμόρφωση που παρουσιάζει το ενισχυτικό, το οποίο εμφανίζει μεγάλη ακαμψία.

Όσον αφορά τις μειωτικές καμπύλες φόρτισης για την πλάκα, το ενισχυτικό και το συνδυασμό ελάσματος – ενισχυτικού, αυτές παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 5.15. Στο εν λόγω σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το ενισχυτικό φθάνει τη μέγιστη αντοχή του για $E_{11}/E_{11(0)}=1.018$ (Σχήμα 5.13), που αποτελεί και το σημείο έναρξης πλαστικοποίησης της περιοχής του κέντρου της πλάκας. Η πλάκα με τη σειρά της, φθάνει στη μέγιστη αντοχή της για $E_{11}/E_{11(0)}=1.1199$, ενώ όπως είναι φυσικό, το υπόλοιπο αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος καθορίζεται από την πλαστικοποίηση της πλάκας.

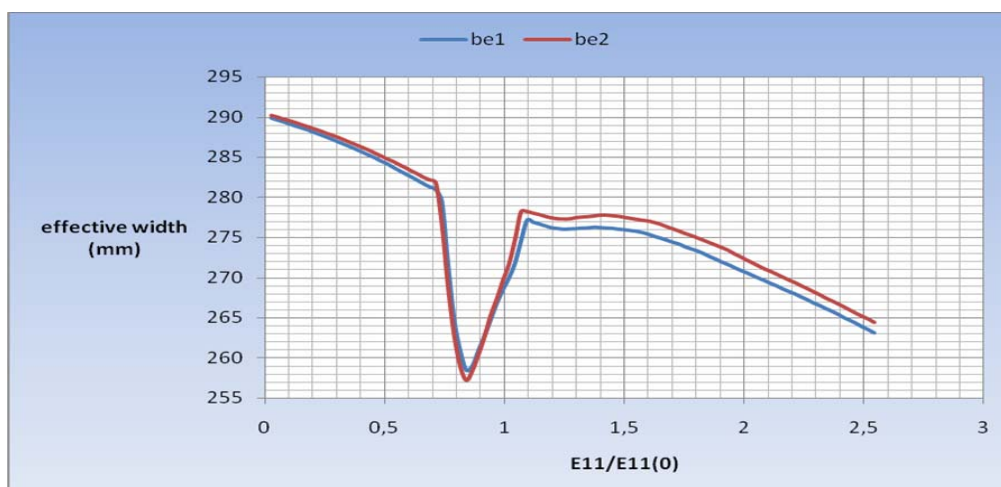


Σχήμα 5.15 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα $a/b=1$

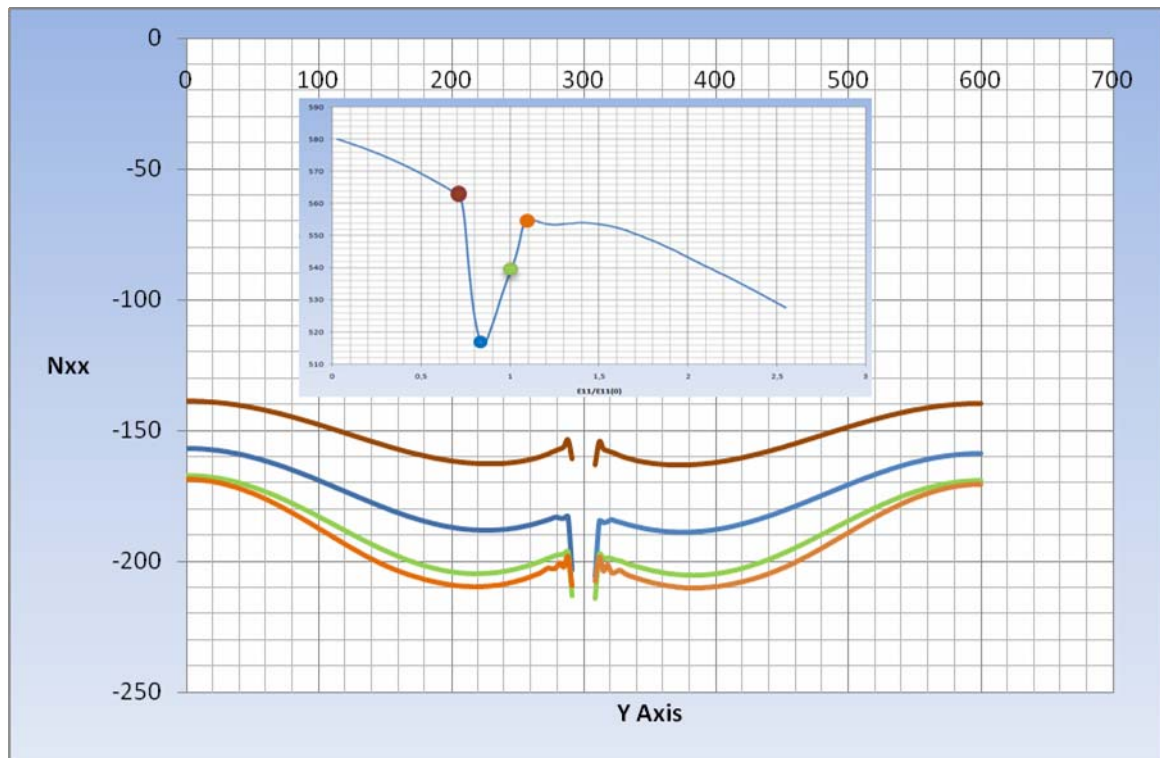
Η μεταβολή του συνολικού ισοδύναμου πλάτους της πλάκας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.16, ενώ στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζονται τα ισοδύναμα πλάτη της πλάκας εκατέρωθεν του ενισχυτικού. Αξίζει να παρατηρήσουμε τη δραστική πτώση του ισοδύναμου πλάτους που ξεκινά στην τιμή $E_{11}/E_{11(0)}=0.6872$ και που ερμηνεύεται από την ενεργή συμμετοχή του ενισχυτικού στην παραλαβή φορτίου και ακολούθως από την ολοένα και μεγαλύτερη παραλαβή φορτίου από τα τμήματα της πλάκας, ιδιαίτερα στην εγγύτητα του ενισχυτικού. Το φαινόμενο αυτό της ανακατανομής των μεμβρανικών τάσεων στο επίπεδο της πλάκας μπορούμε να το παρατηρήσουμε και στα Σχήματα 5.18 και 5.19, που απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσεως κατά μήκος της φορτισμένης πλευράς του ελάσματος, μη συμπεριλαμβανομένου του τμήματος κάτωθεν του ενισχυτικού (να προσεχθεί η χρωματική αντιστοιχία καμπυλών με τις τιμές στις καμπύλες των ισοδυνάμων πλατών).



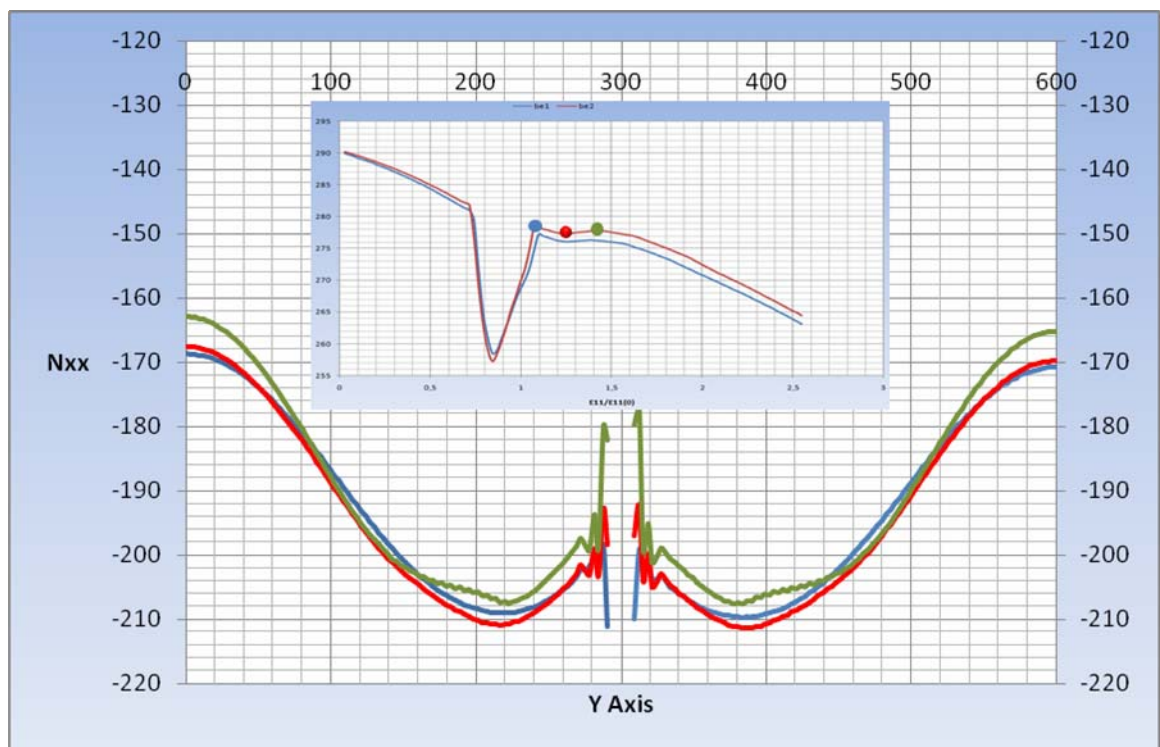
Σχήμα 5.16 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους b_e ανά στάδιο φόρτισης



Σχήμα 5.17 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης.



Σχήμα 5.18 Κατανομή τάσεως στη φορτισμένη πλευρά με αναφορά στο σχήμα 5.16

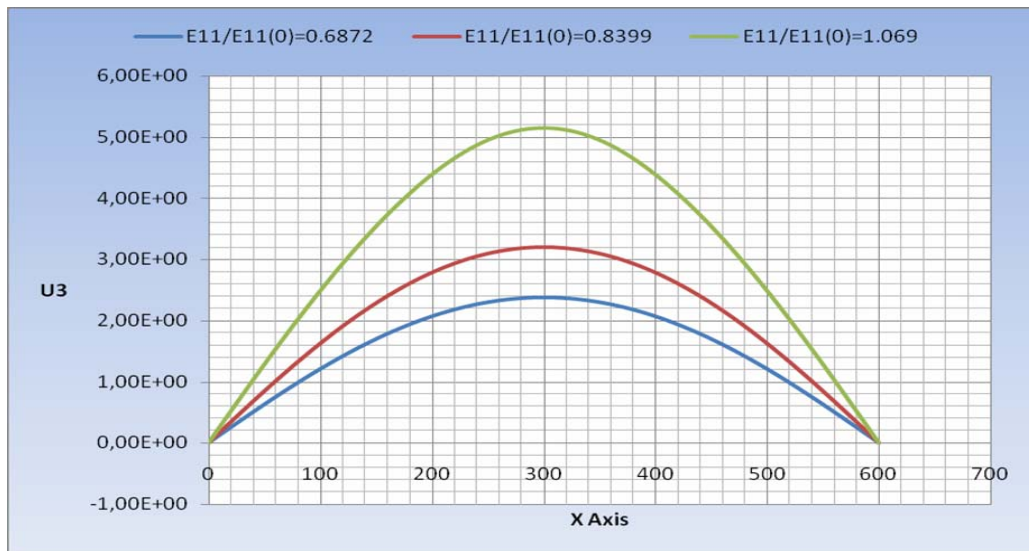


Σχήμα 5.19 Κατανομή τάσεως στη φορτισμένη πλευρά με αναφορά στο σχήμα 5.17

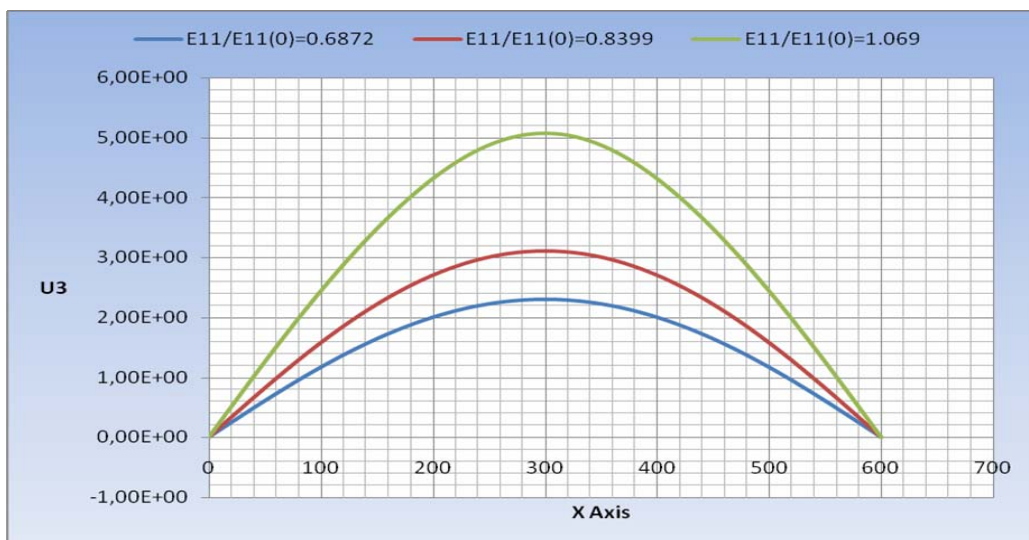
Η διαφοροποίηση που υπάρχει στο Σχήμα 5.17 όσον αφορά τη μεταβολή στα ισοδύναμα πλάτη εκατέρωθεν της πλάκας εκτιμάται ότι οφείλεται στην αρχική παραμόρφωση του ενισχυτικού που δόθηκε με τόξο κατά τη διεύθυνση του άξονα

y , επιβάλλοντας έτσι στο τμήμα της πλάκας από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$ να παραλάβει διαφορετικό φορτίο από το έτερο τμήμα. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι το ισοδύναμο πλάτος για τις συγκεκριμένες διαστάσεις του ενισχυμένου ελάσματος παραμένει σε υψηλές τιμές (ελάχιστη τιμή ίση με 0.855 του συνολικού πλάτους).

Συναφώς με τα ανωτέρω για την απεικόνιση του βέλους κάμψης U_3 στην αφόρτιστη πλευρά της πλάκας επιλέγουμε τα τρία σημεία μεταβολής κλίσεως της καμπύλης του σχήματος 5.16. Πιο συγκεκριμένα τα στάδια φόρτισης $E_{11}/E_{11(0)}=0.6872$, 0.8399 και 1.069 (INC=27, 33 και 42). Τα αποτελέσματα για τις αφόρτιστες πλευρές $y=0$ και $y=b$ παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.20 και 5.21.



Σχήμα 5.20 Κατανομή U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$



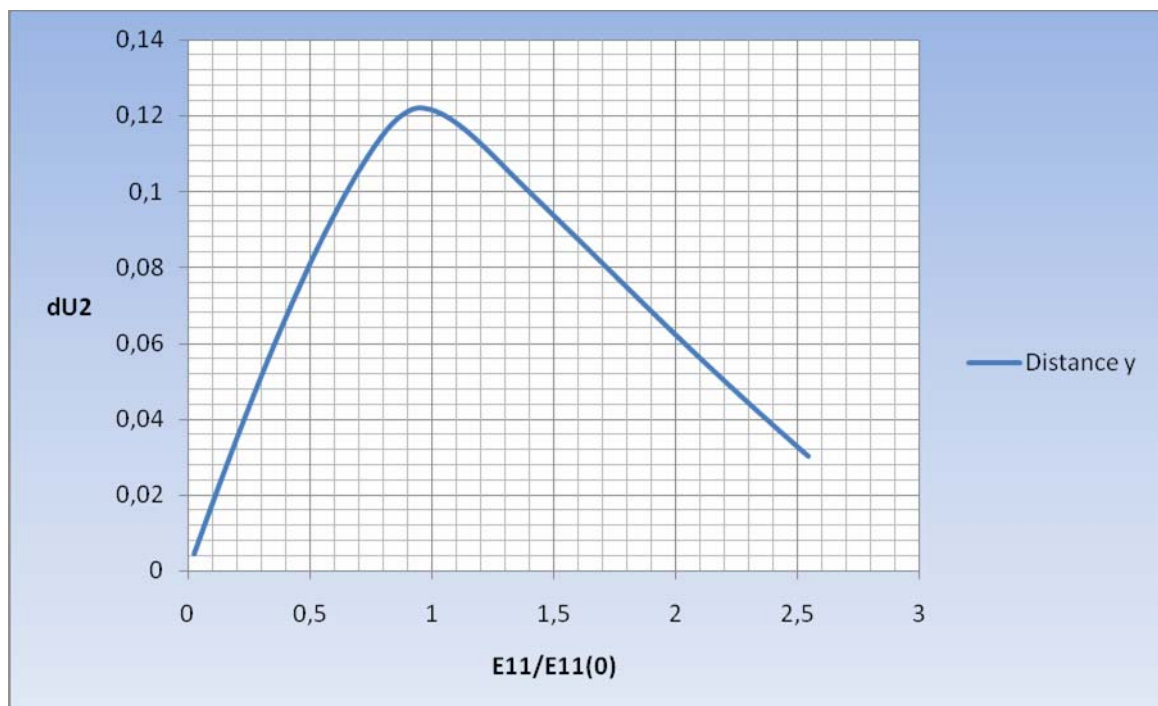
Σχήμα 5.21 Κατανομή U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$

Τέλος όσον αφορά το διάστημα πλάτυνσης του μοντέλου παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.22. Το εν λόγω διάστημα υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο

$$dU2=U_{y=b} - U_{y=0} \quad (5.2)$$

όπου η τιμή $U_{y=b}$ είναι θετική, ενώ η τιμή $U_{y=0}$ είναι αρνητική σύμφωνα με την αρχή των αξόνων.

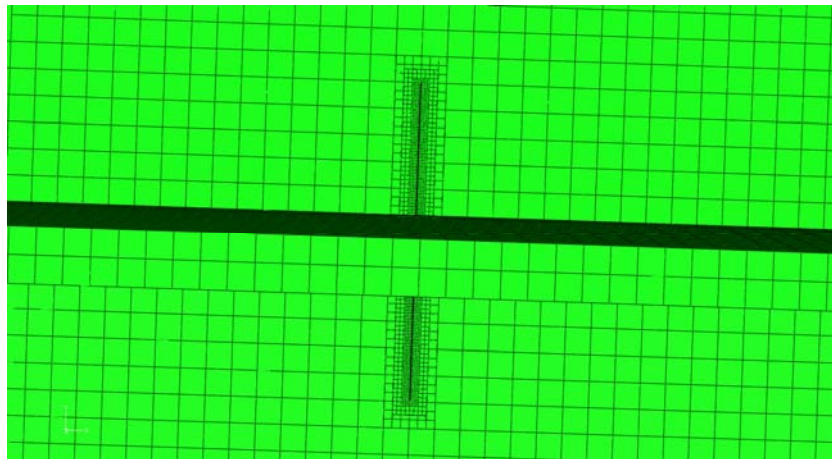
Από το ακόλουθο σχήμα παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή πλάτυνσης παρατηρείται σε στάδιο φόρτισης $E11/E11(0)=0.9163$, το οποίο στο σχήμα 5.15 αποτελεί το σημείο της δραστηκής αλλαγής κλίσης στη μειωτική καμπύλη φόρτισης της πλάκας. Ως εκ τούτου συμπεραίνουμε ότι η ενέργεια της συμπίεσης αρχικά αποδίδεται στην πλάκα με τη μορφή πλάτυνσης, ενώ μετά το προαναφερόμενο στάδιο φόρτισης η ενέργεια καταναλώνεται στην αύξηση της κάθετης παραμόρφωσης της πλάκας.



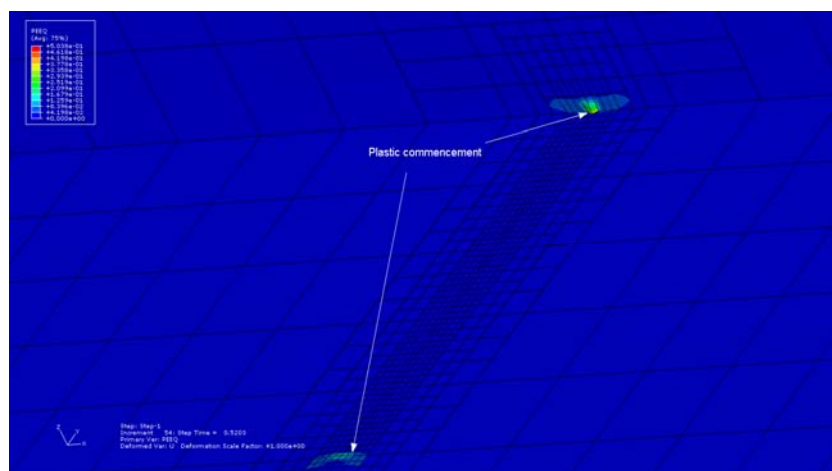
Σχήμα 5.22 Συνολική πλάτυνση ανά στάδιο φόρτισης

5.4 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=72\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος πραγματοποιήθηκε με 36488 στοιχεία, διαστάσεων από $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ στην περιοχή της ρωγμής έως $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 5\text{mm}$ στην πλάκα και $6\text{mm} \times 6.1235\text{mm} \times 6.1235\text{mm}$ στο ενισχυτικό. Στο Σχήμα 5.23 απεικονίζεται η λεπτομέρεια της ρωγμής στην πλάκα. Στο Σχήμα 5.24 παρατηρούμε την ανάπτυξη των πλαστικών περιοχών που εντοπίζονται στα άκρα της ρωγμής (περιοχή υψηλής συγκέντρωσης τάσεως) και στα σημεία ένωσης με το ενισχυτικό σε στάδιο φόρτισης $E11/E11(0)=1.2989$ (Σημείο μέγιστης αντοχής) .

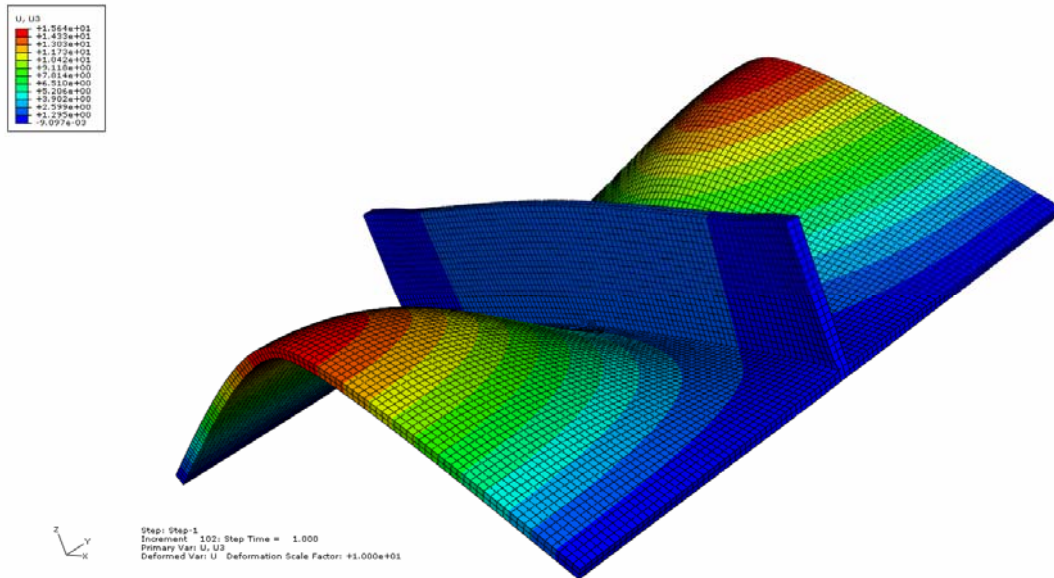


Σχήμα 5.23 Λεπτομέρεια ρωγμής $c=72\text{mm}$ στην πλάκα συμμετρική ως προς το ενισχυτικό.



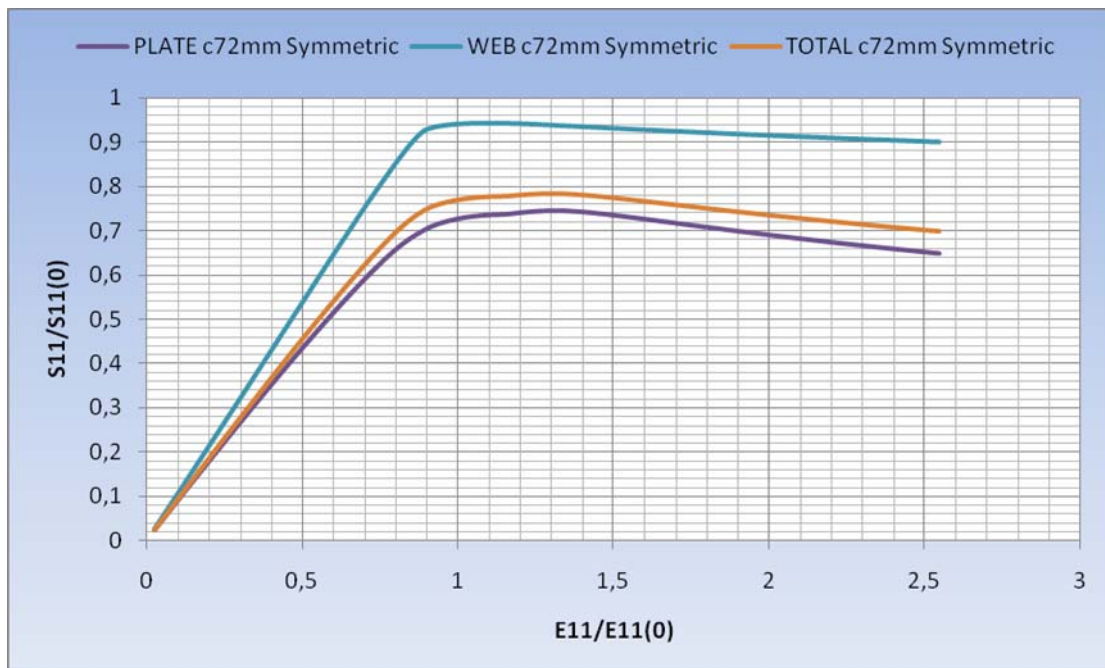
Σχήμα 5.24 Πλαστικοποίηση για $E11/E11(0)=1.2989$

Στο ακόλουθο Σχήμα 5.25 φαίνεται η παραμόρφωση του ενισχυμένου ελάσματος στο τέλος της φόρτισης (μεταβλητή U3 – βαθμός μεγέθυνσης 10).



Σχήμα 5.25 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος με ρωγή $c=72\text{mm}$ στο τέλος της φόρτισης.

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το εν λόγω ενισχυμένο έλασμα παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 5.26.



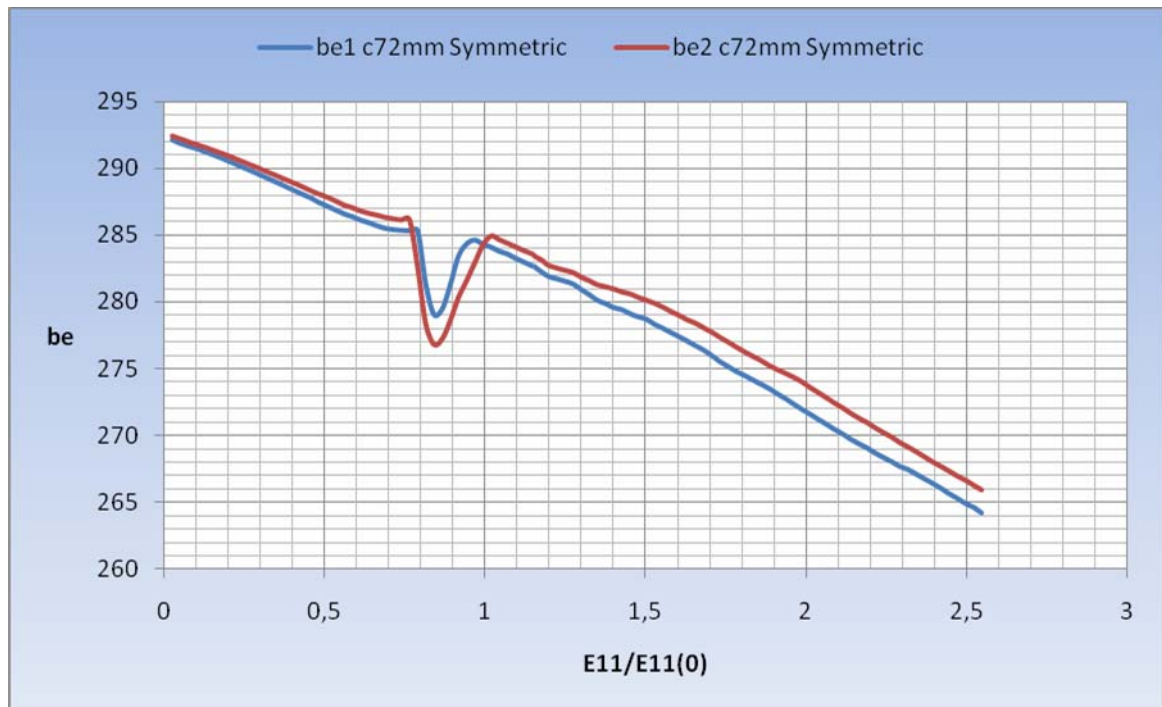
Σχήμα 5.26 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγή $c=72\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τη γραφική παράσταση του προηγούμενου σχήματος, στο στάδιο φόρτισης $E11/E11(0)=1.1454$ η πλάκα παρουσιάζει μία αλλαγή στην κλίση και εμφανίζει μία ανύψωση της αντοχής. Το εν λόγω «μονοπάτι ισορροπίας» (equilibrium path) της αριθμητικής επίλυσης θα αναλυθεί στη συνέχεια σε συνδυασμό και με τα υπόλοιπα αποτελέσματα.

Η διακύμανση του ισοδύναμου πλάτους παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.27 και 5.28. Θα πρέπει να σημειωθεί η μείωση στη δραστική πτώση της εν λόγω τιμής σε σχέση με το μοντέλο χωρίς ρωγμή, η οποία μπορεί να επεξηγηθεί ως αλλοίωση στο πεδίο των μεμβρανικών τάσεων λόγω της ασυνέχειας της ρωγμής, περιορίζοντας την ένταση της κατανομής στη φορτιμένη πλευρά. Αξιοσημείωτη είναι η μορφή των ισοδύναμων πλατών στα τμήματα πλακών εκατέρωθεν του ενισχυτικού, που παρατηρούμε στο Σχήμα 5.28. Με την εισαγωγή της ρωγμής στο μοντέλο, το τμήμα από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ (b_{e1}) παραλαμβάνει ελαφρά μεγαλύτερο φορτίο στη προ – λυγισμική ζώνη, με το υπόλοιπο τμήμα να παραλαμβάνει μεγαλύτερο φορτίο στη λυγισμική, ανακτώντας φορτίο στην αντίστοιχη μετα – λυγισμική περιοχή.

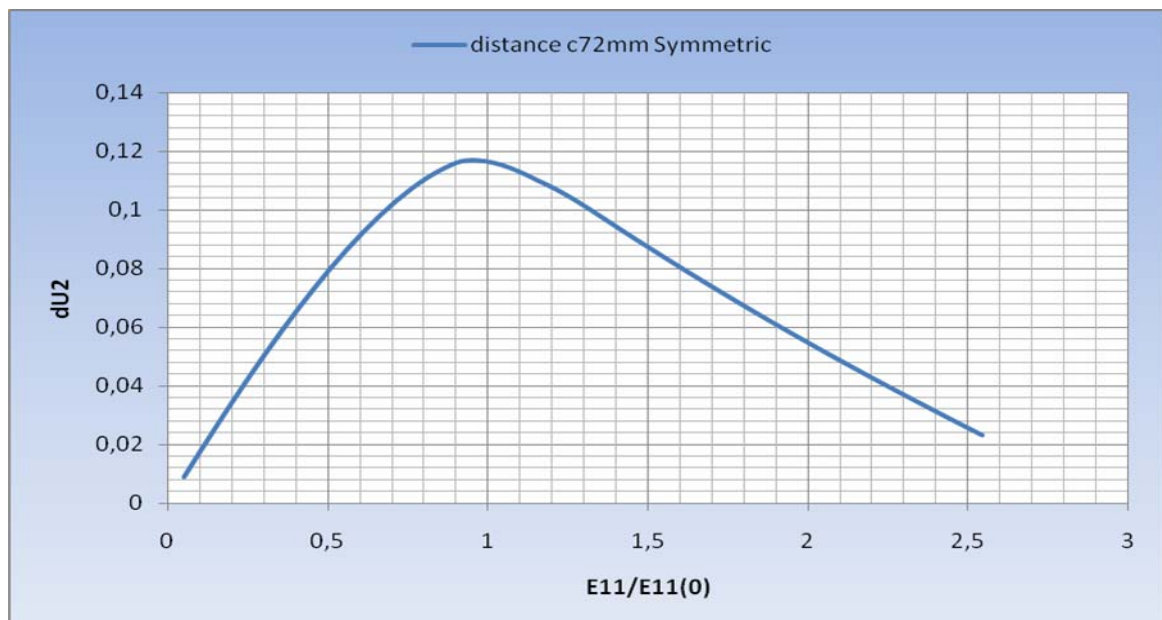


Σχήμα 5.27 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=72mm$



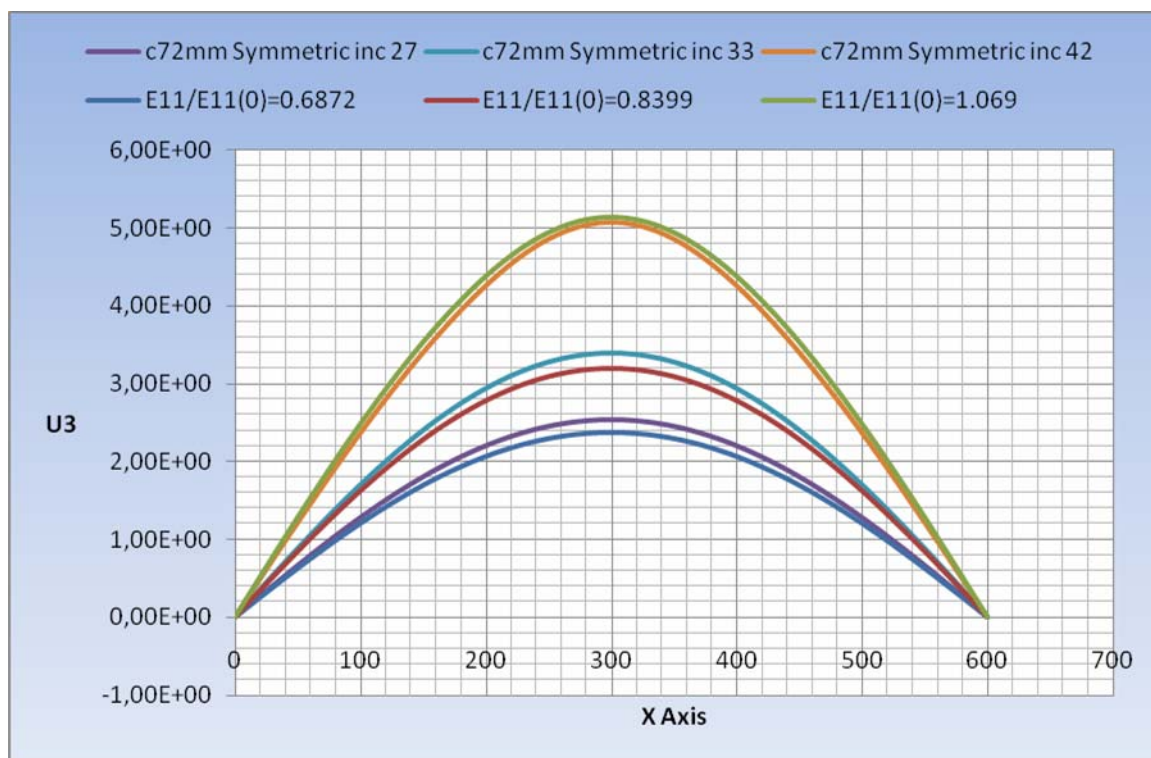
Σχήμα 5.28 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$.

Όσον αφορά το διάστημα πλάτυνσης κατά την ανάλυση του μοντέλου, αυτό απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.29



Σχήμα 5.29 Μεταβολή της πλάτυνσης της πλάκας με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$

Οι μεταβολές στο βέλος κάμψης U_3 για το συγκεκριμένο έλασμα θα συγκριθούν με το αντίστοιχο έλασμα χωρίς ρωγή για τα ίδια στάδια φόρτισης. Τα ανωτέρω συνοψίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 5.30



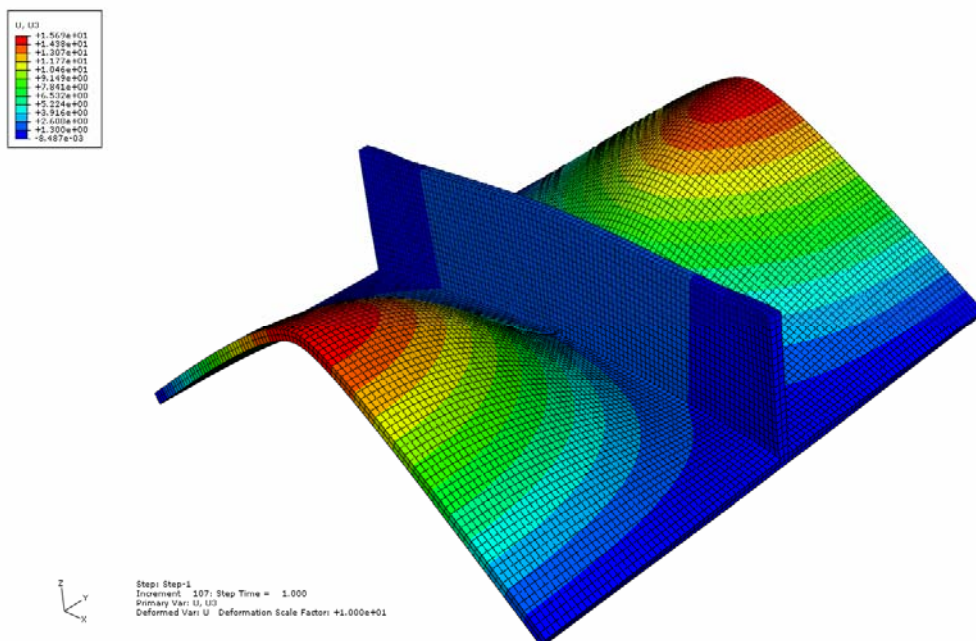
Σχήμα 5.30 Σύγκριση βέλων κάμψης U_3 ελάσματος χωρίς ρωγή με το αντίστοιχο με ρωγή $c=72mm$ για την πλευρά $y=0$.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ αρχικά παρατηρείται μια ελαφρά υπεροχή της μεταβλητής U_3 του ρηγματοποιημένου ελάσματος σε σχέση με το αντίστοιχο χωρίς ρωγή, όσο οι επιφάνειες της ρωγμής πλησιάζουν, αρχίζει το πρώτο έλασμα να παρουσιάζει λιγότερο βέλος κάμψης από το δεύτερο. Αυτό σημαίνει ότι αρχικά οι μεμβρανικές τάσεις λόγω της ασυνέχειας της ρωγμής δεν μπορούν να αναπτύξουν το έργο περιορισμού της κάθετης μετατόπισης του ελάσματος, κάτι όμως που εξελίσσεται σταδιακά με την προσέγγιση των επιφανειών της ρωγμής.

Συναφώς με τα ανωτέρω και για τη διευκόλυνση της κατανόησης των φαινομένων που εξελίσσονται λόγω της ύπαρξης της ρωγμής, η σύγκριση των διαφόρων μεταβλητών που παρουσιάζονται ανά μοντέλο θα πραγματοποιηθεί στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου.

5.5 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=144\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό

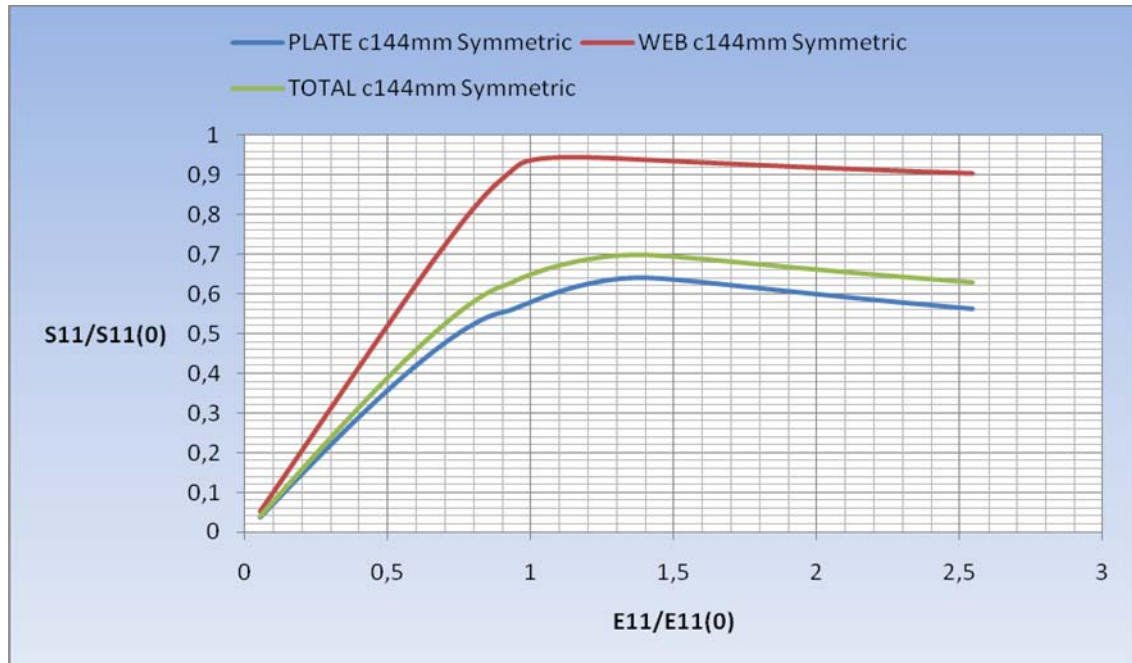
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος πραγματοποιήθηκε με 47720 στοιχεία διαστάσεων από $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ στην περιοχή της ρωγμής έως $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 5\text{mm}$ στην πλάκα και $6\text{mm} \times 6.1235\text{mm} \times 6.1235\text{mm}$ στο ενισχυτικό. Στο Σχήμα 5.31 απεικονίζεται η μορφή της παραμόρφωσης του ενισχυμένου ελάσματος στο τέλος της φόρτισης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο τέλος της φόρτισης, η ρωγμή έχει κλείσει εντελώς πλην της περιοχής ακριβώς κάτω από το ενισχυτικό που περιορίζεται η προσέγγιση των δύο επιφανειών λόγω της παρουσίας αυτού (τα ίδια ισχύουν και για την προηγούμενη περίπτωση).



Σχήμα 5.31 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος με ρωγμή $c=144\text{mm}$ στο τέλος της φόρτισης.

Η πλαστικοποίηση ξεκινά, όπως αναμενόταν, από τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα της ρωγμής και εξελίσσεται κατά τον ίδιο τρόπο, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση της ρωγμής μικρότερης διάστασης.

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για την εν λόγω περίπτωση παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 5.32.



Σχήμα 5.32 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό.

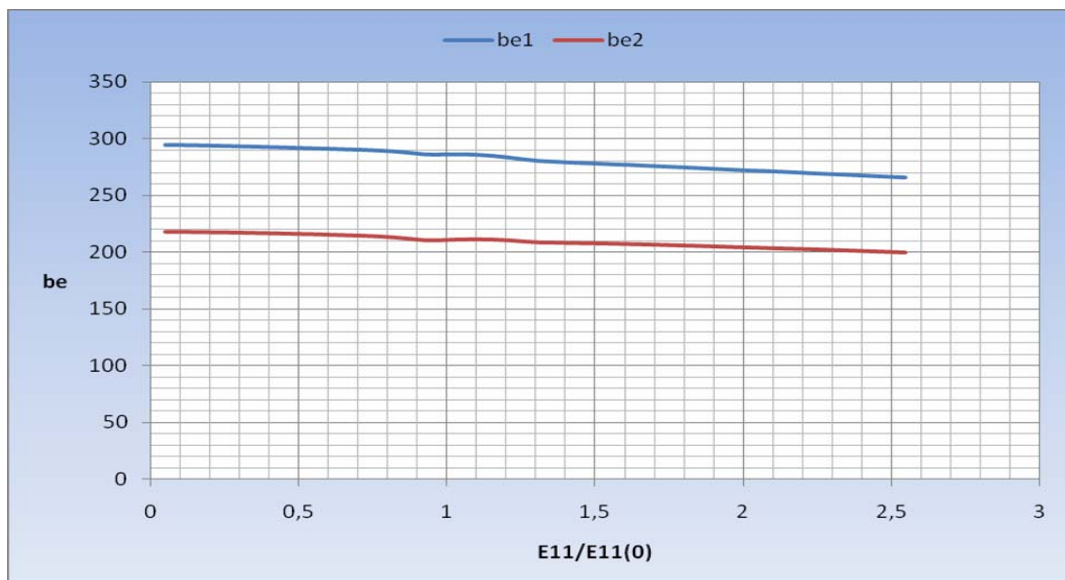
Στις ανωτέρω καμπύλες παρατηρούμε τη δραστική πτώση της μέγιστης αντοχής στην πλάκα και κατ' επέκταση στη συνολική, τη στιγμή που το ενισχυτικό παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά σε σχέση με την προηγούμενη εξετασθείσα περίπτωση. Αξιοσημείωτη είναι και πάλι η αλλαγή στην κλίση της καμπύλης στην πλάκα, με ανάκτηση μέρους της ακαμψίας αυτής, που όμως αυτή τη φορά γίνεται σε πρώιμο στάδιο φόρτισης $E11/E11(0)=0.9163$.

Η μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους στην πλάκα απεικονίζεται στα Σχήματα 5.33 και 5.34. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε οι τιμές του εν λόγω μεγέθους κινούνται σε σημαντικά μικρότερα επίπεδα, ενώ παρουσιάζεται εξαιρετικά μειωμένη η δραστική πτώση της καμπύλης, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες καμπύλες των προηγούμενων περιπτώσεων. Αυτό σημαίνει ότι το ισοδύναμο πλάτος συνεχώς συρρικνώνεται με την αύξηση του φορτίου που συνεπάγεται ότι και το έργο αντίστασης των μεμβρανικών τάσεων αυξάνεται περιορίζοντας την κάθετη μετατόπιση. Αξιοσημείωτη είναι δε, η συμπεριφορά των δύο μερών της πλάκας, κατά την οποία τον κύριο όγκο του φορτίου παραλαμβάνει το τμήμα της πλάκας από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$, ενώ το υπόλοιπο τμήμα κινείται σε σημαντικά μικρότερα επίπεδα από άποψη φόρτισης. Από το γεγονός αυτό, μπορούμε να

συμπεράνουμε ότι με την αύξηση των διαστάσεων της ρωγμής, αυξάνεται η επιρροή που έχουν τυχόν ατέλειες στην ικανότητα του ελάσματος να παραλαμβάνει το επιβαλλόμενο φορτίο (στη συγκεκριμένη περίπτωση, η αρχική ατέλεια που υφίσταται στο ενισχυτικό).

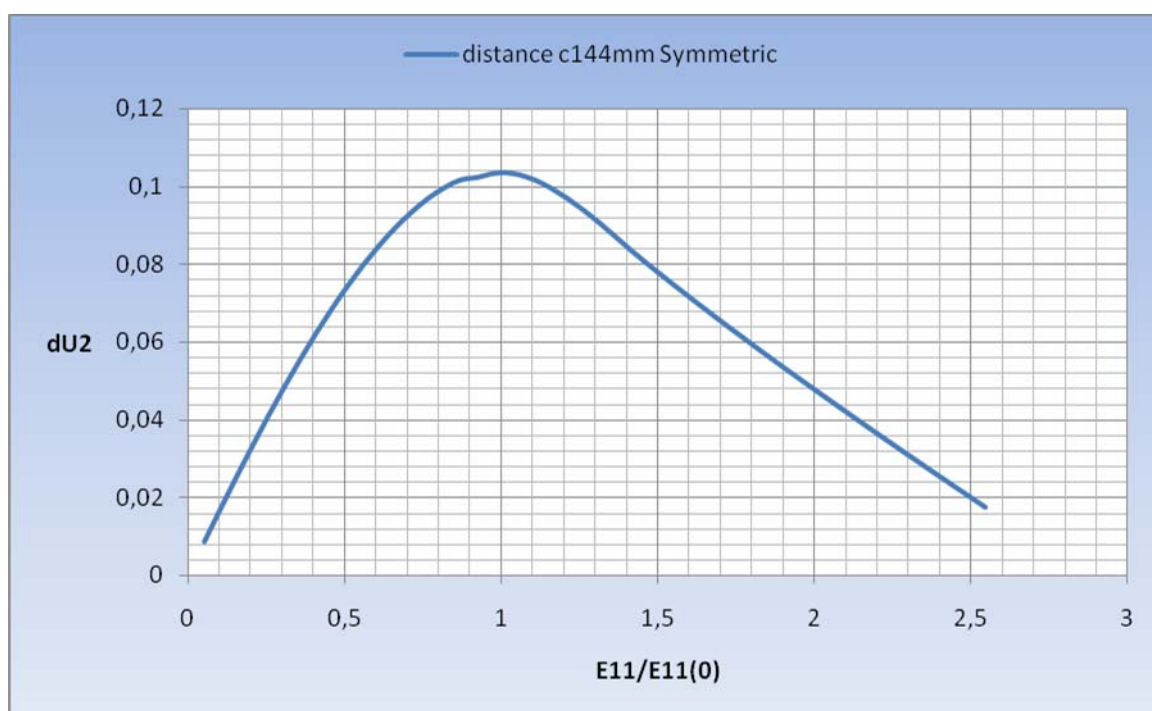


Σχήμα 5.33 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=144mm$



Σχήμα 5.34 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=144mm$

Το διάστημα πλάτυνσης του μοντέλου ανά στάδιο φόρτισης απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.35. Αρχικά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η κλίση της καμπύλης του διαστήματος πλάτυνσης του μοντέλου, παρουσιάζει μία αυξητική αλλαγή για το στάδιο φόρτισης $E11/E11(0)=0.9163$, ακριβώς όπως και η μειωτική καμπύλη φορτίου της πλάκας, ενώ γενικά κινείται σε μικρότερες τιμές από την προηγούμενη περίπτωση ρωγμής. Εκτιμάται ότι το εν λόγω φαινόμενο συνδέεται με την ανάπτυξη τάσεων αντίστασης στην κίνηση της πλάκας ως προς τον άξονα y , που ενεργοποιούνται με την προσέγγιση των δύο επιφανειών της πλάκας, πιθανόν από διάχυση των περιοχών υψηλής συγκέντρωσης στα άκρα της ρωγμής.

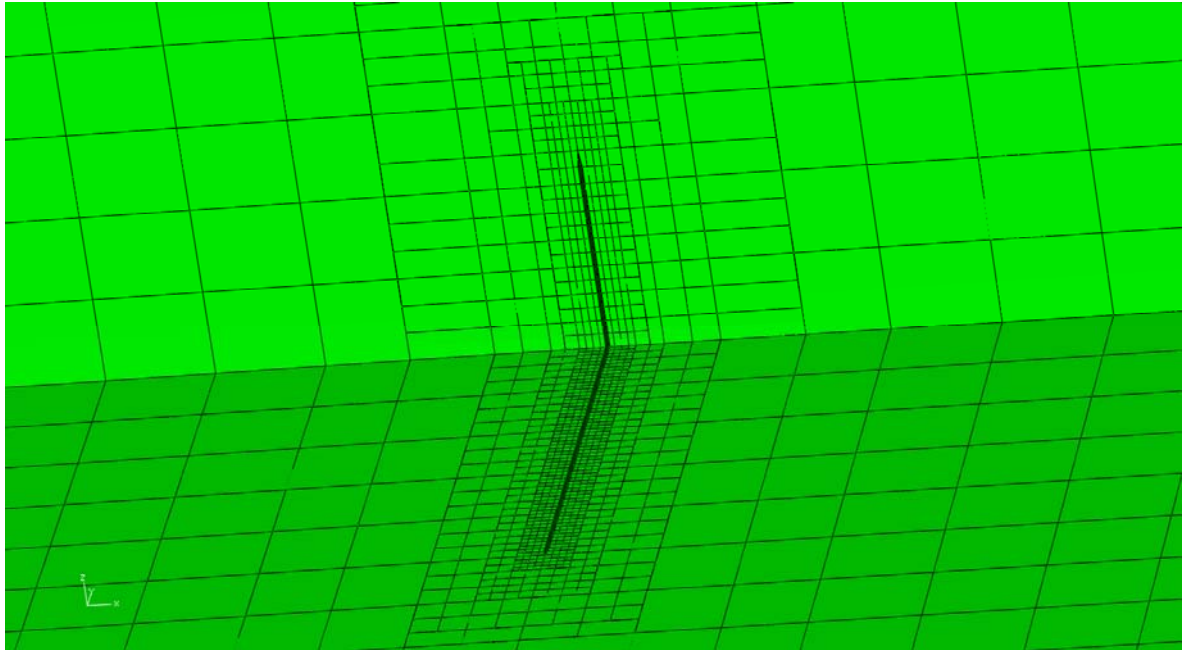


Σχήμα 5.35 Μεταβολή της πλάτυνσης της πλάκας με συμμετρική ρωγμή $c=144mm$

5.6 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=72mm$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό και ρωγμή $c_w=14.7mm$ στο ενισχυτικό.

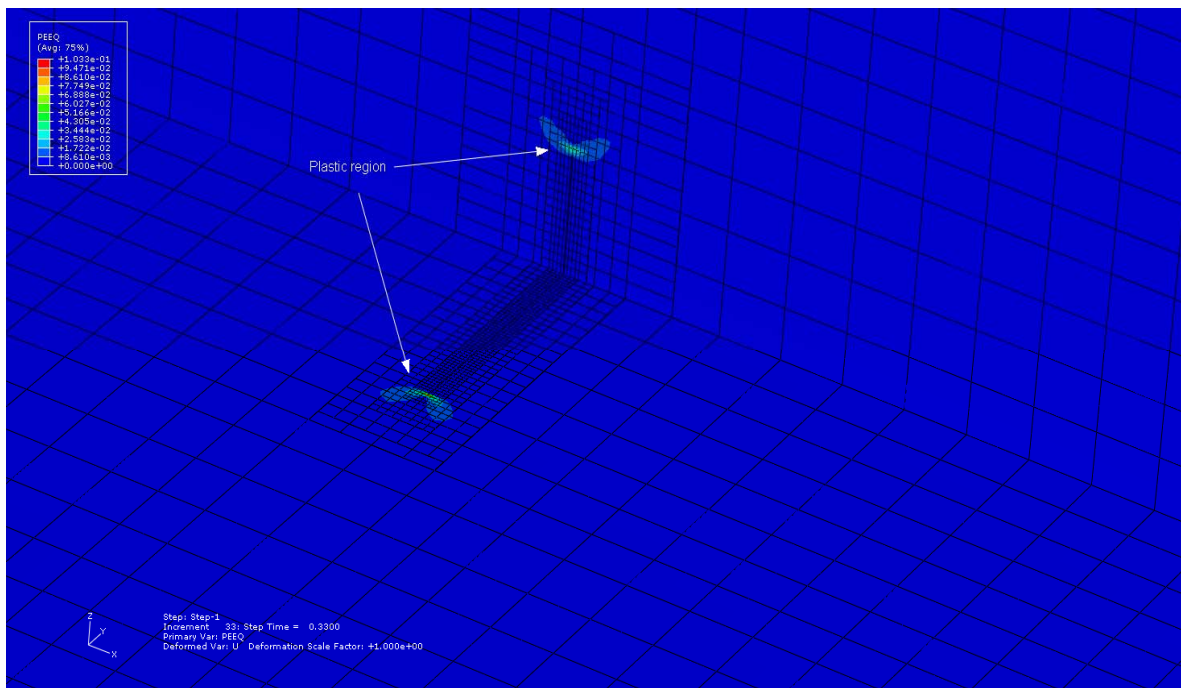
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος πραγματοποιήθηκε με 38856 στοιχεία διαστάσεων από $0.35mm \times 0.49mm \times 1.25mm$ στην περιοχή της ρωγμής έως $7.8286mm \times 7.9355mm \times 5mm$ στην πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $0.5mm \times 0.49mm \times 1.0206mm$ για τη ρωγμή και

7.8286mm*6.1235mm*6.1235mm στο κυρίως τμήμα αυτού. Στο ακόλουθο σχήμα 5.36 απεικονίζεται η προσομοίωση της διαμπερούς ρωγμής στο ενισχυτικό.



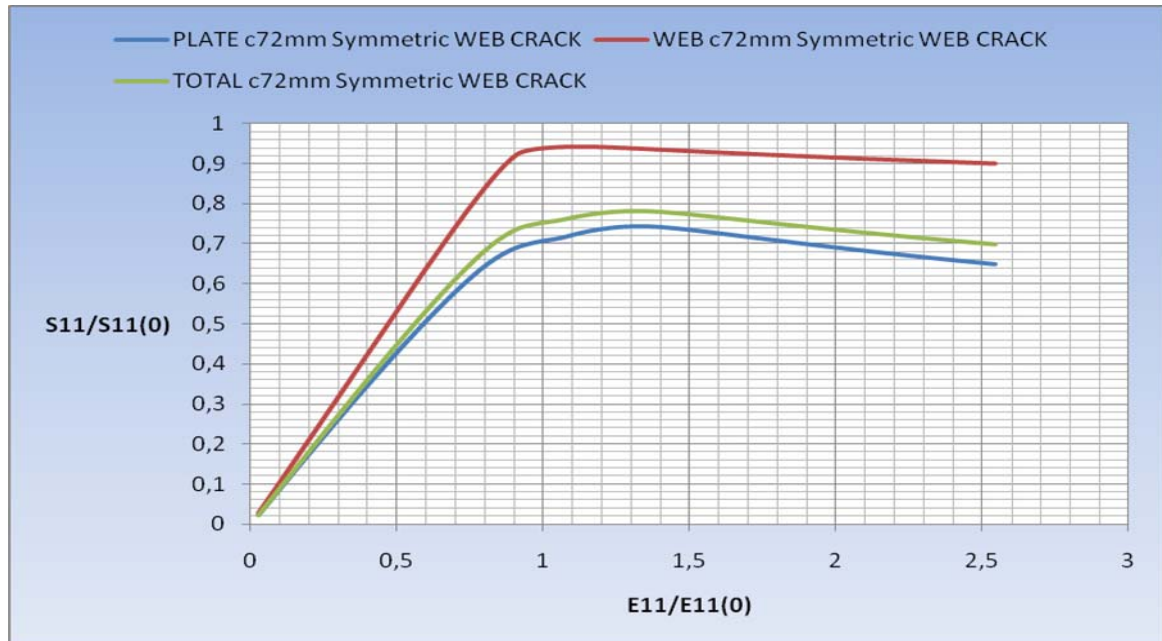
Σχήμα 5.36 Προσομοίωση ρωγμής στο ενισχυτικό

Η έναρξη της ανάπτυξης των πλαστικών περιοχών απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.37 που συμπίπτει, όπως ήταν φυσικό, με τα άκρα των ρωγμών.

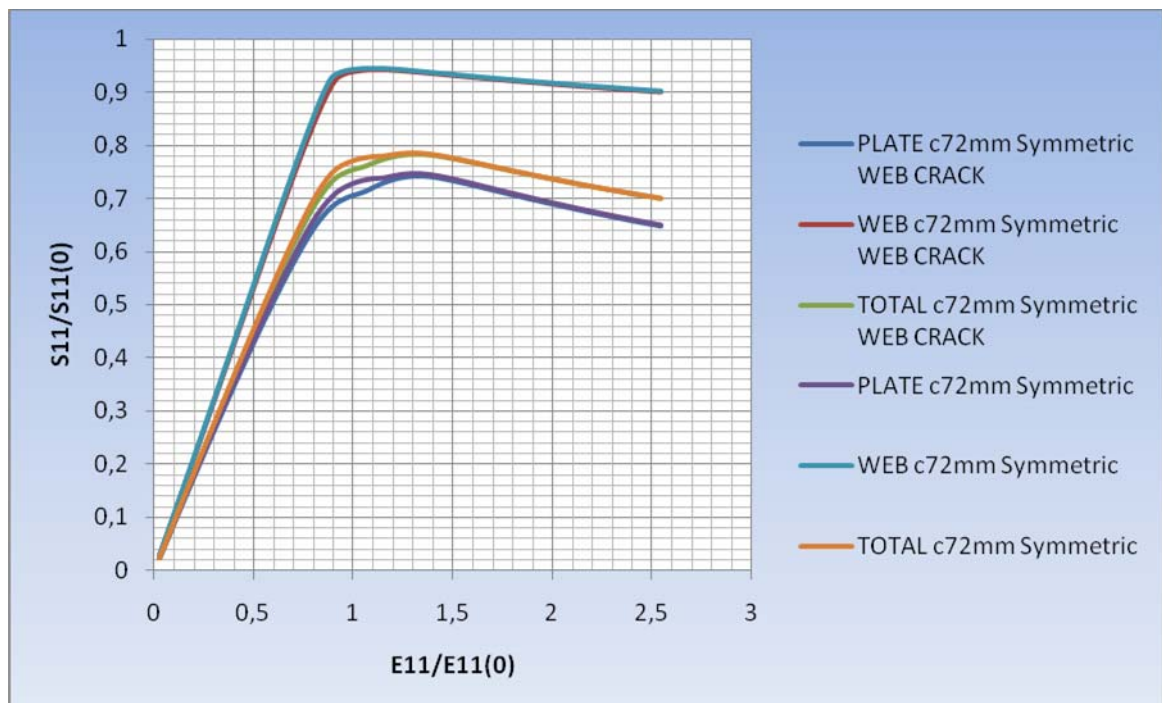


Σχήμα 5.37 Πλαστικοποίηση για $E11/E11(0)=0.8399$

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το εξεταζόμενο έλασμα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.38, ενώ στο Σχήμα 5.39 απεικονίζεται η σύγκριση των εν λόγω καμπυλών με την περίπτωση της ρηγματοποιημένης πλάκας χωρίς τη ρωγμή στο ενισχυτικό.



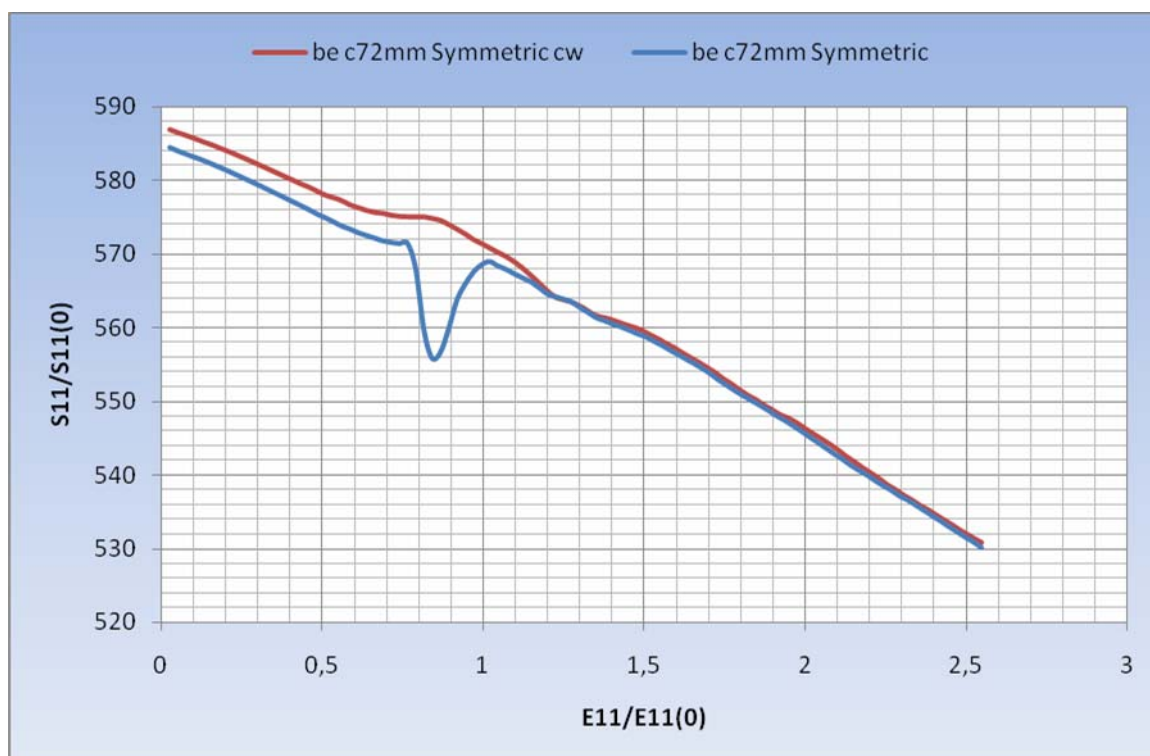
Σχήμα 5.38 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμές $c=72\text{mm}$ συμμετρική και $c_w=14.7\text{mm}$



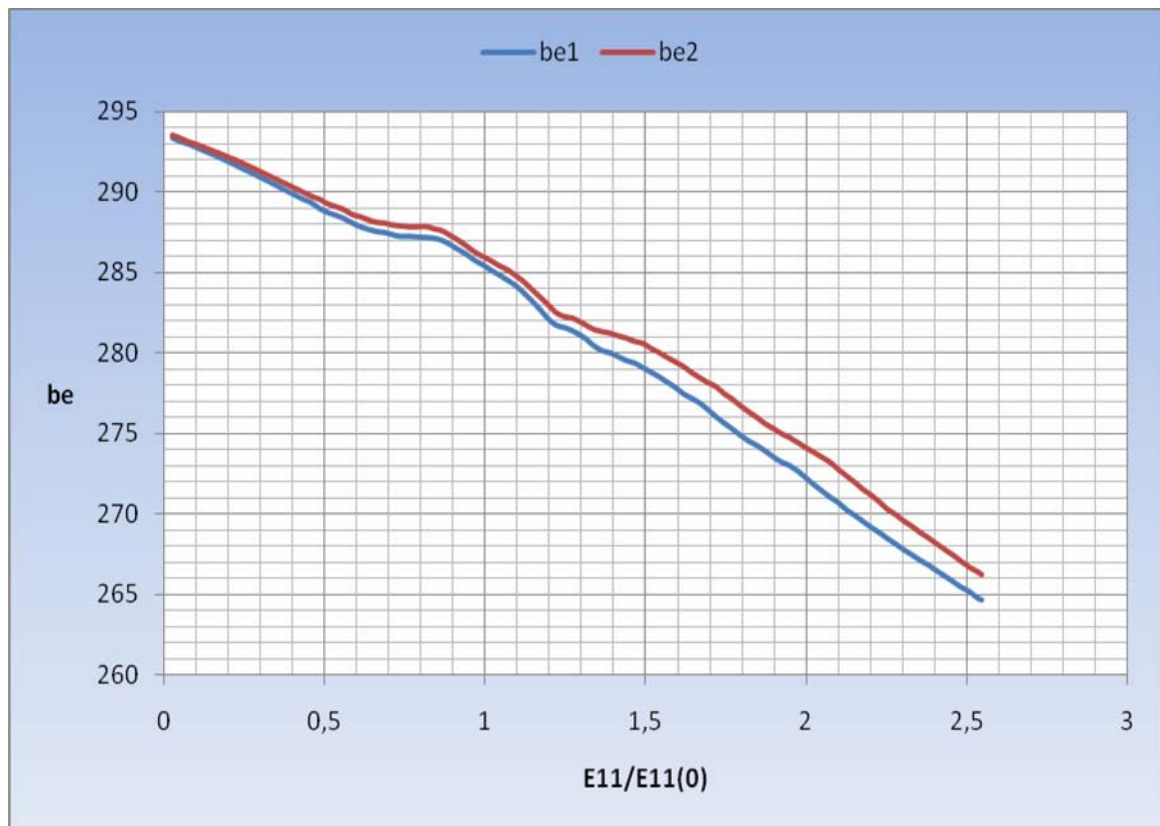
Σχήμα 5.39 Σύγκριση των περιπτώσεων ρηγματοποιημένης πλάκας $c=72\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό.

Από το σχήμα 5.39 παρατηρούμε ότι η μέγιστη αντοχή της κατασκευής παραμένει η ίδια με την ύπαρξη της ρωγμής στο ενισχυτικό, που εκτιμάται ότι οφείλεται στο γεγονός ότι με το κλείσιμο της ρωγμής στο ενισχυτικό, η πλάκα ανακτά την ακαμψία της. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται και από την αλλαγή κλίσης στη μειωτική καμπύλη της πλάκας (με ύπαρξη ρωγμής στο ενισχυτικό) που συμβαίνει στο στάδιο φόρτισης $E11/E11(0)=1.04358$, σημείο που αρχίζει η επαφή των δύο επιφανειών της ευρύτερης ρωγμής (πλάκα – ενισχυτικό). Όσον αφορά την καμπύλη φόρτισης του ενισχυτικού με ρωγμή, εκτός από τη διαφοροποίηση στην κλίση αυτής σε σχέση με την έτερη, που οφείλεται αποκλειστικά στις αρχικές συνθήκες αυτού (ύπαρξη ρωγμής), δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή από πλευράς του υπολοίπου αντοχής.

Η μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους στην πλάκα απεικονίζεται στα Σχήματα 5.39 (με κόκκινο χρώμα) και 5.40. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα εν λόγω σχήματα, το ισοδύναμο πλάτος δεν παρουσιάζει πλέον το κοίλο στην καμπύλη του σχήματος 5.27, που σημαίνει ότι υπάρχει μια συμμετρία στην μείωση της δράσης των μεμβρανικών τάσεων αυξανόμενης της φόρτισης, ενώ με την επαφή της ρωγμής τα ισοδύναμα πλάτη έχουν αντίστοιχες πτωτικές τιμές.



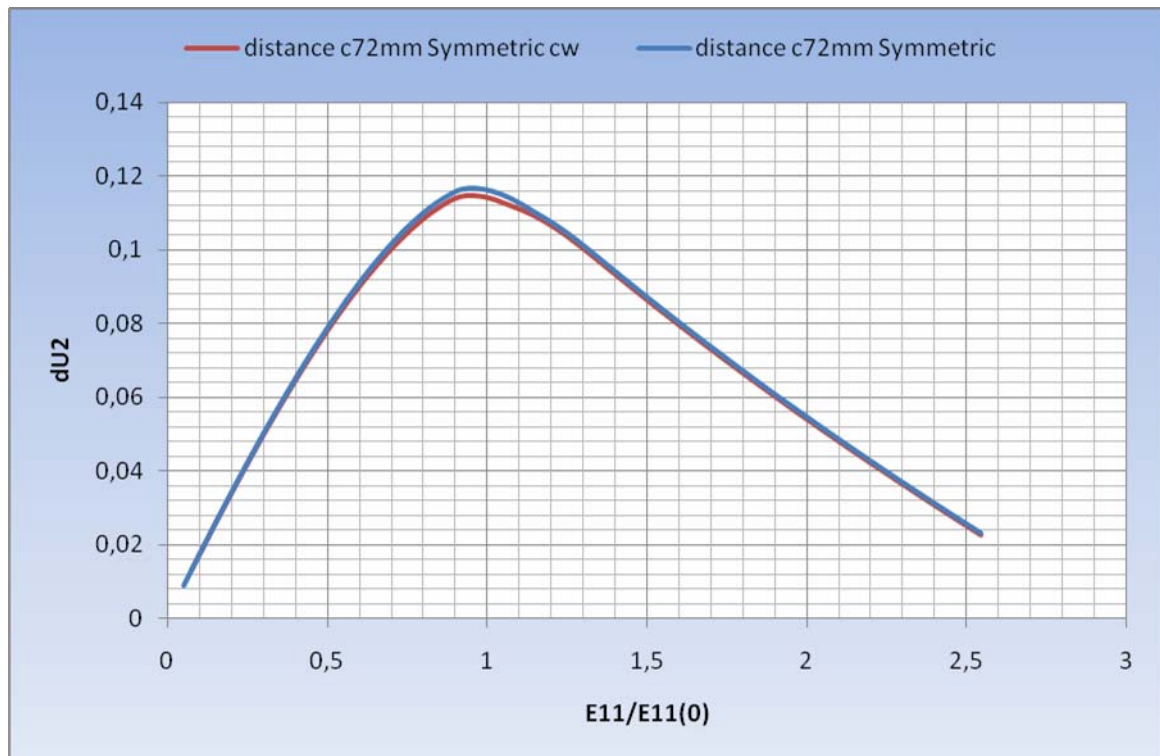
Σχήμα 5.39 Σύγκριση των συνολικών ισοδύναμων πλατών για τα μοντέλα με συμμετρική ρωγμή $c=72mm$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού



Σχήμα 5.40 Μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης για μοντέλο με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$ και $c_w=14.7\text{mm}$

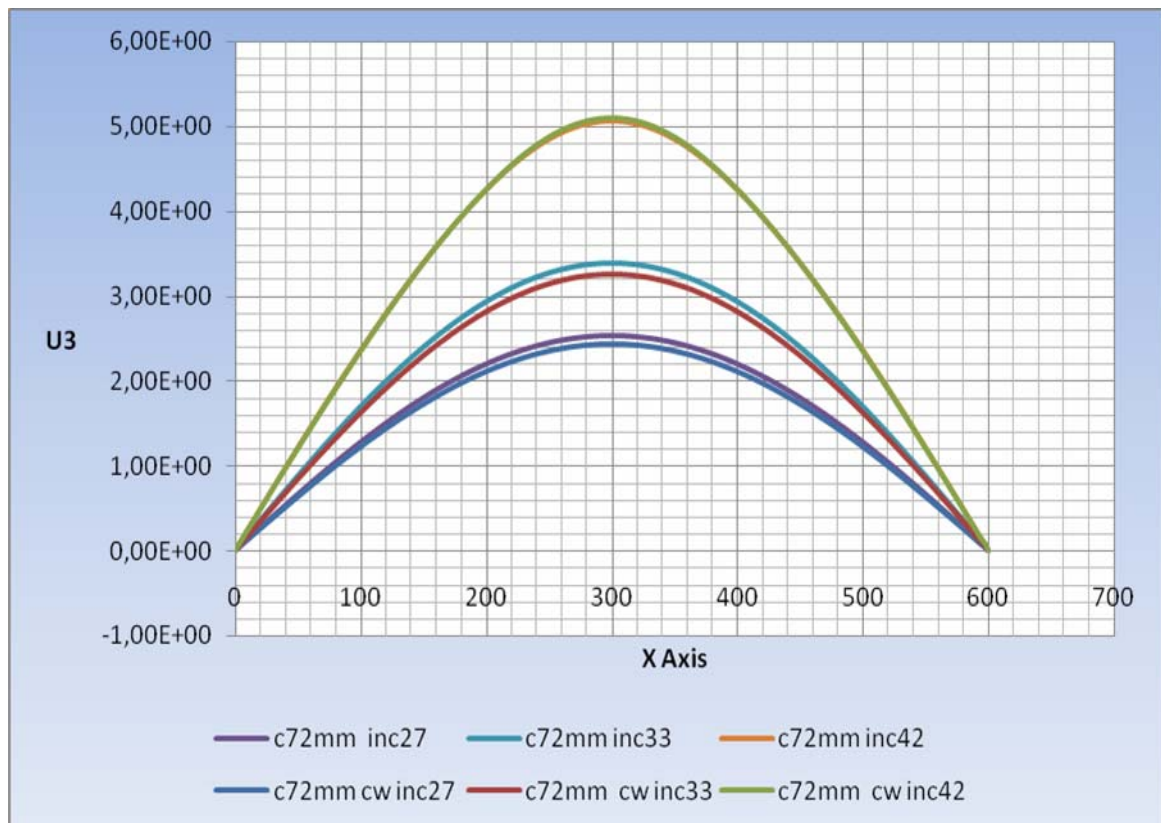
Επιπρόσθετα τα ισοδύναμα πλάτη εκατέρωθεν του ενισχυτικού παρουσιάζουν εξαιρετική ομοιότητα με το τμήμα από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ να παραλαμβάνει μεγαλύτερο φορτίο με την αύξηση της συμπίεσης, που εκτιμάται ότι οφείλεται στην αρχική ατέλεια του ενισχυτικού η οποία και οδηγεί σε «κλείσιμο» την πίσω ακμή της ρωγμής του ενισχυτικού με συντεταγμένες $(a/2, b/2-t_w)$.

Όσον αφορά το διάστημα πλάτυνσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.41 (με κόκκινο χρώμα). Από τη σύγκριση με το αντίστοιχο για το ρηγματοποιημένο έλασμα χωρίς τη ρωγμή ενισχυτικού, παρατηρούμε ότι η διαφοροποίηση είναι ελάχιστη.

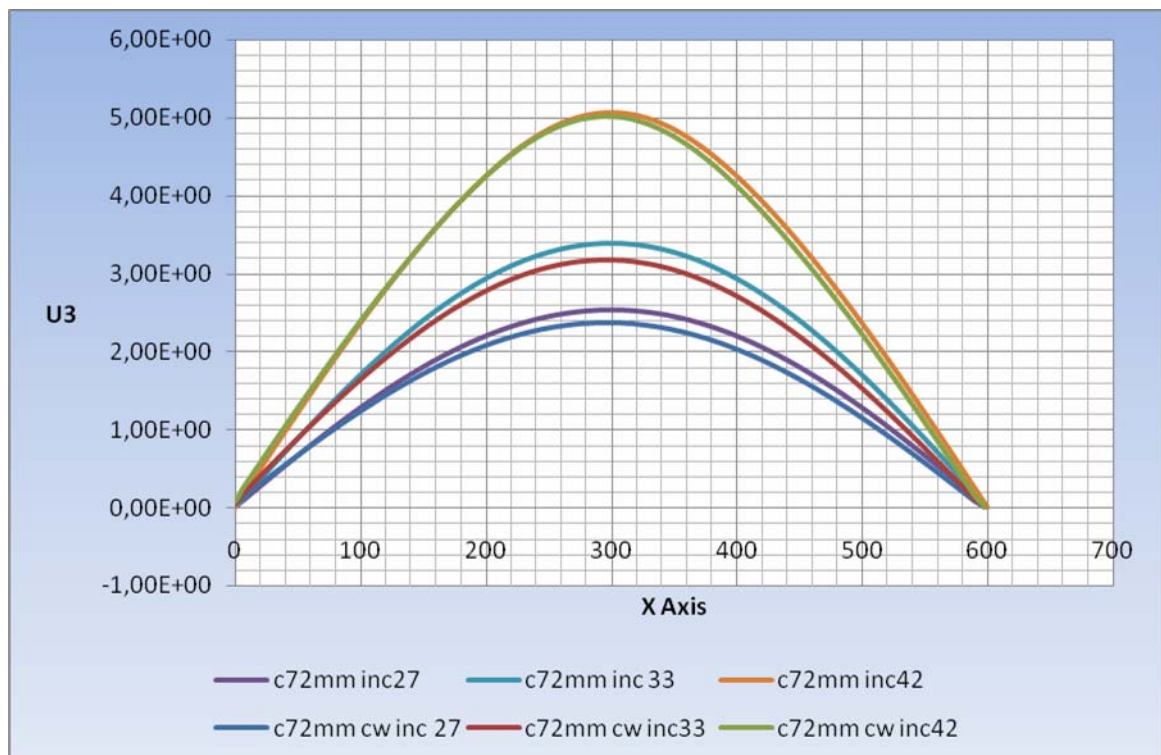


Σχήμα 5.41 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική ρωγμή $c=72mm$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού

Όσον αφορά τη μεταβολή του βέλους κάμψης U_3 ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις και εξετάζοντας τα ίδια στάδια φόρτισης, προκύπτουν τα ακόλουθα Σχήματα 5.42 (για $y=0$) και 5.43 (για $y=b$). Σε αυτά παρατηρούμε ότι αρχικά το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στο ενισχυτικό υπολείπεται μερικώς σε βέλος κάμψης από το αντίστοιχο χωρίς ρωγμή, η οποία όμως διαφοροποίηση, εξαλείφεται με την αύξηση της συμπίεσης. Επιπρόσθετα αξίζει να παρατηρήσουμε μία ανομοιομορφία που παρατηρείται στην κατανομή του βέλους κάμψης για την αφόρτιστη πλευρά $y=b$ και συγκεκριμένα μια μετακίνηση του μεγίστου προς τα δεξιά, η οποία και αυτή όμως εξομαλύνεται με την αύξηση του φορτίου. Η εν λόγω ασυμμετρία εκτιμάται ότι οφείλεται στο συνδυασμό αρχικής ατέλειας του ενισχυτικού και της περιστροφής (rotation) των φορτισμένων πλευρών κατά τη συμπίεση, που οδηγούν σε αρχικά ασύμμετρη προσέγγιση των επιφανειών της ευρύτερης ρωγμής (πλάκας – ενισχυτικού).



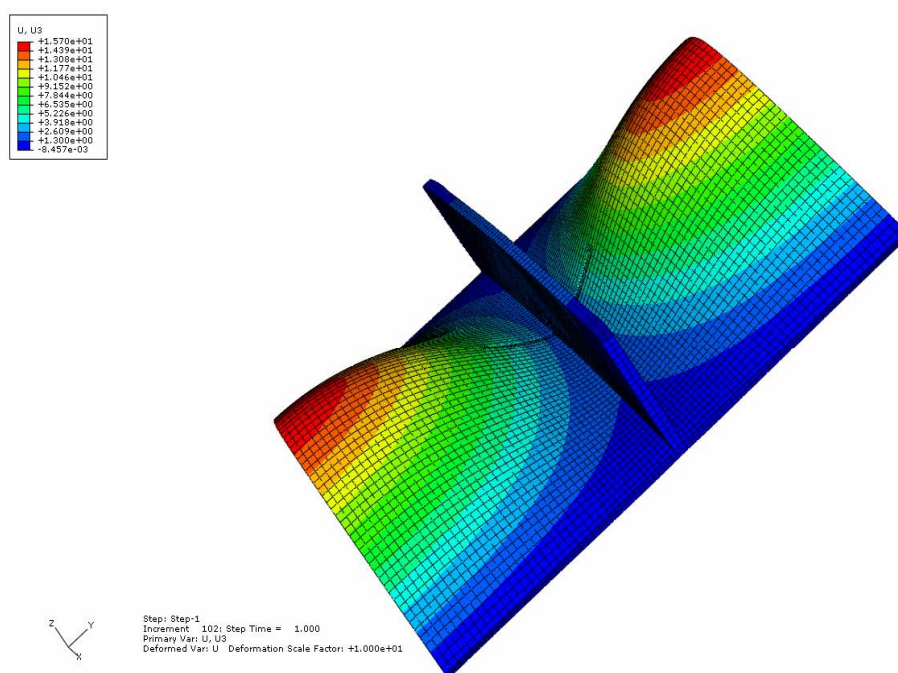
Σχήμα 5.42 Διακύμανση βέλων κάμψης U_3 στα ίδια επίπεδα συμπίεσης σε έλασμα $c=72mm$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού για $y=0$



Σχήμα 5.43 Διακύμανση βέλων κάμψης U_3 στα ίδια επίπεδα συμπίεσης σε έλασμα $c=72mm$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού για $y=b$

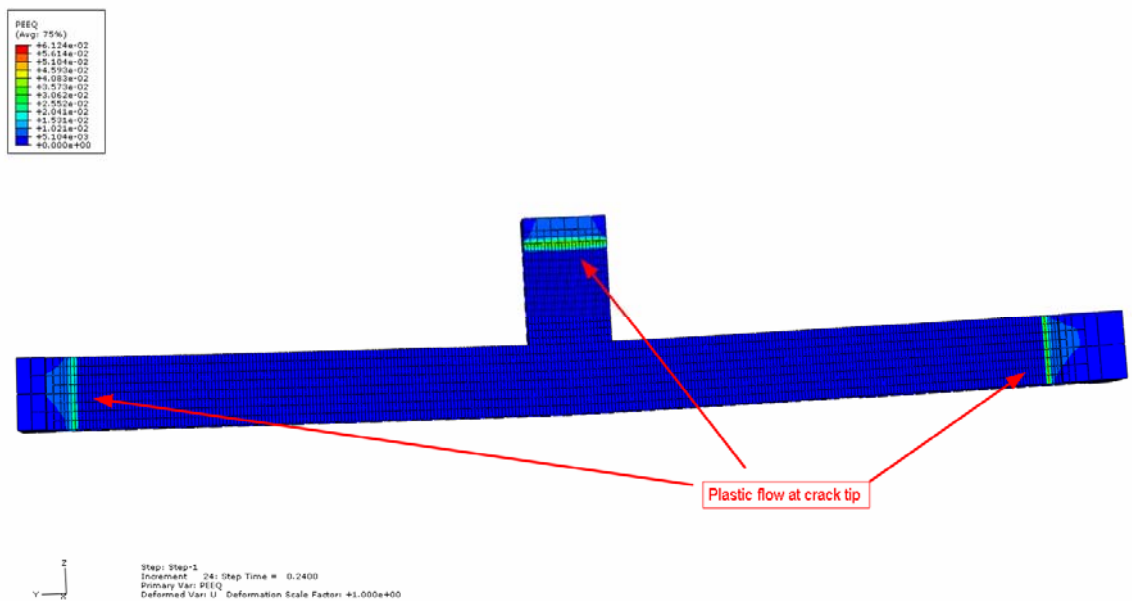
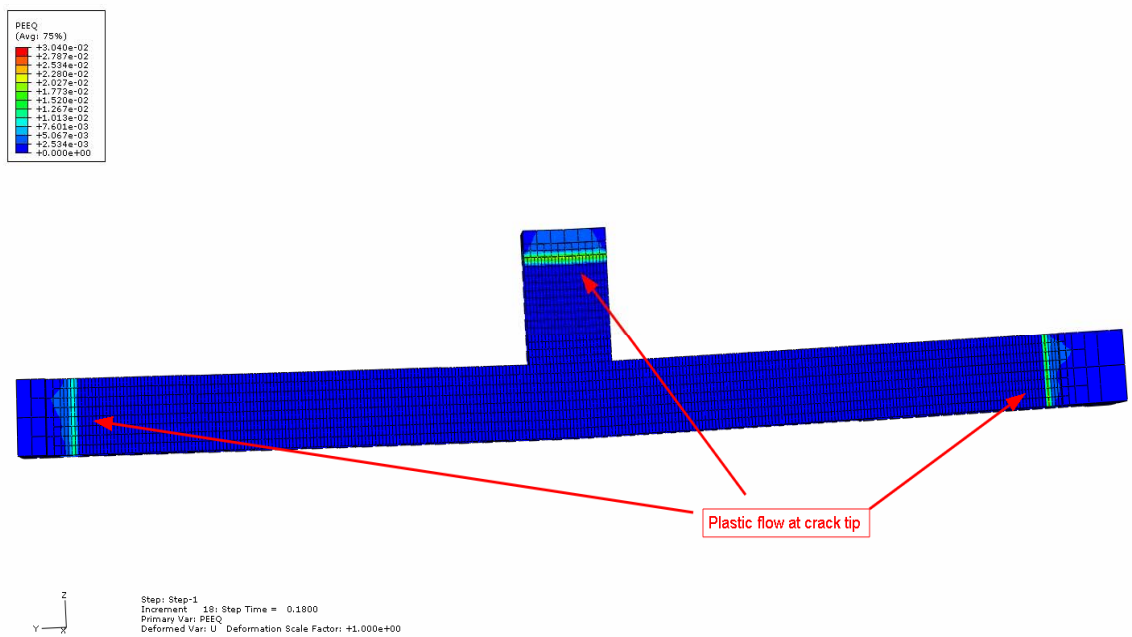
5.7 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=144\text{mm}$ συμμετρική ως προς το ενισχυτικό και ρωγμή $c_w=14.7\text{mm}$ στο ενισχυτικό.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος πραγματοποιήθηκε με 42728 στοιχεία διαστάσεων από $0.35\text{mm}\times 0.49\text{mm}\times 1.25\text{mm}$ στην περιοχή της ρωγμής έως $8\text{mm}\times 8.0769\text{mm}\times 5\text{mm}$ στην πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $0.5\text{mm}\times 0.49\text{mm}\times 1.0206\text{mm}$ για τη ρωγμή και $8\times 6.1235\text{mm}\times 6.1235\text{mm}$ στο κυρίως τμήμα αυτού. Η μορφή της παραμορφωμένης κατασκευής στο τέλος της φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.44.



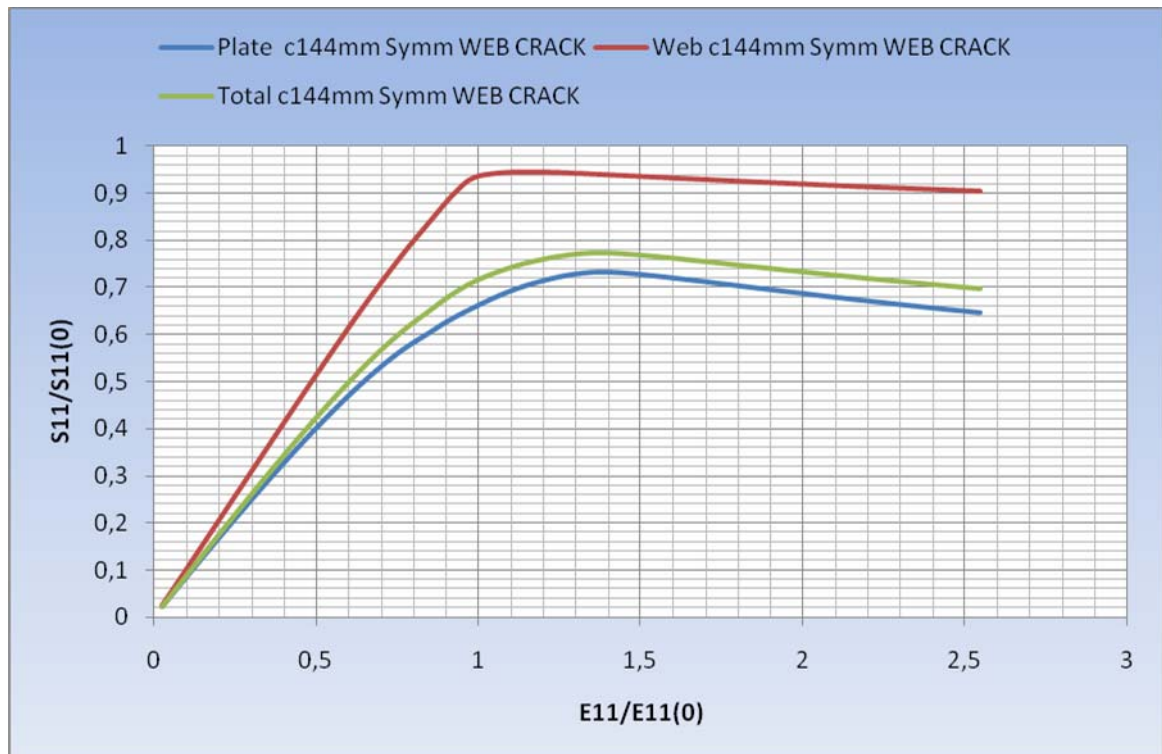
Σχήμα 5.44 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος με ρωγμή $c=144\text{mm}$ με επιπλέον ρωγμή $c_w=14.7\text{mm}$ στο ενισχυτικό.

Η πλαστική ροή ακολουθεί την ίδια πορεία με την προηγούμενη περίπτωση της κατασκευής με ρωγμή στο ενισχυτικό. Στο Σχήμα 5.45 απεικονίζεται το τμήμα των πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιάζουν τη μία επιφάνεια της ρωγμής για $x>a/2$, όπου μπορούμε να διακρίνουμε την πλαστική ροή στα άκρα των ρωγμών στην πλάκα και στο ενισχυτικό, καθώς επεκτείνεται προς τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων.

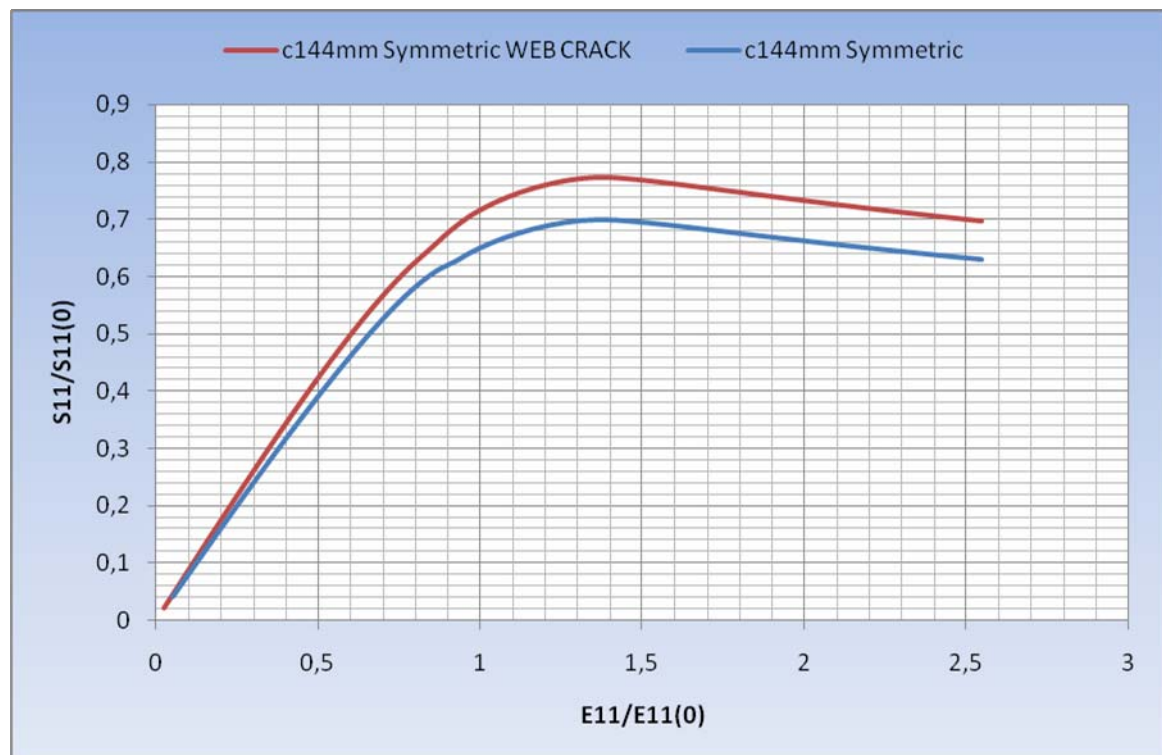


Σχήμα 5.45 Ανάπτυξη της πλαστικής ροής στα άκρα των ρωγμών με την αύξηση του φορτίου συμπίεσης

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για την εν λόγω περίπτωση παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 5.46, ενώ στο Σχήμα 5.47 παρατηρούμε τη διαφορά στο υπόλοιπο αντοχής της κατασκευής μεταξύ των περιπτώσεων ρωγμής στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εν λόγω διαφορά αγγίζει περίπου το 7% της συνολικής.

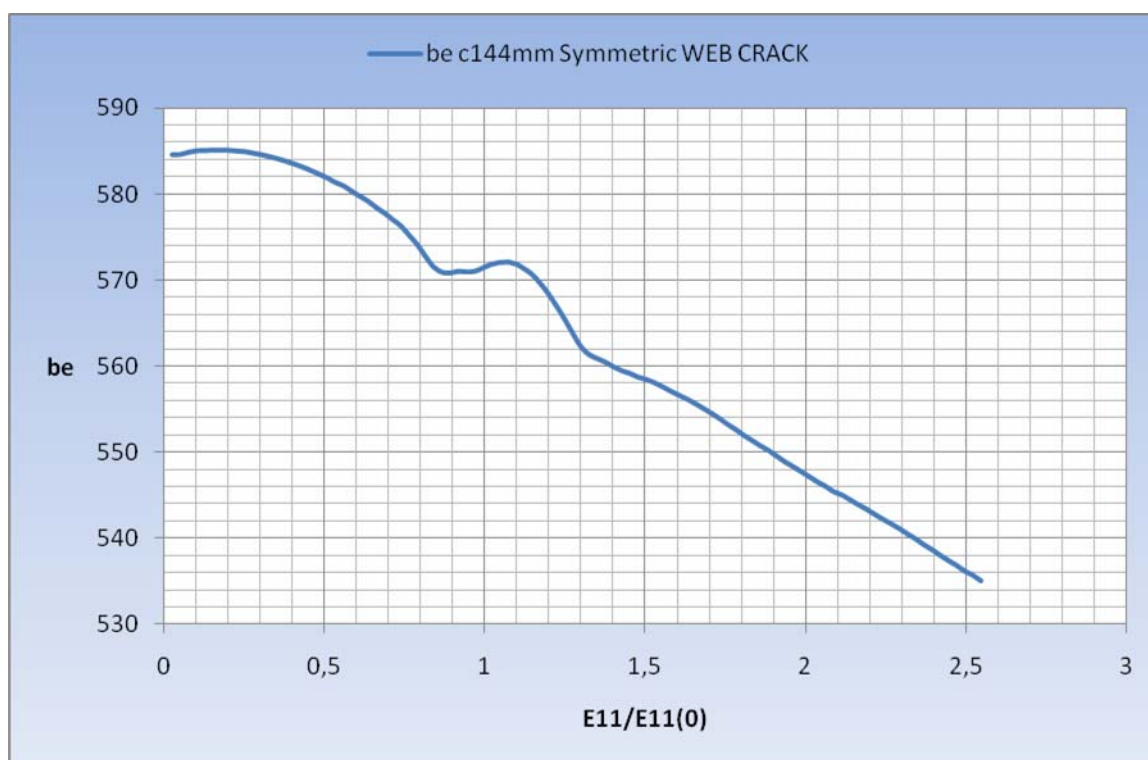


Σχήμα 5.46 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμές $c=144\text{mm}$ συμμετρική και $c_w=14.7\text{mm}$



Σχήμα 5.47 Σύγκριση της συνολικής αντοχής ρηγματωποιημένης πλάκας $c=144\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό.

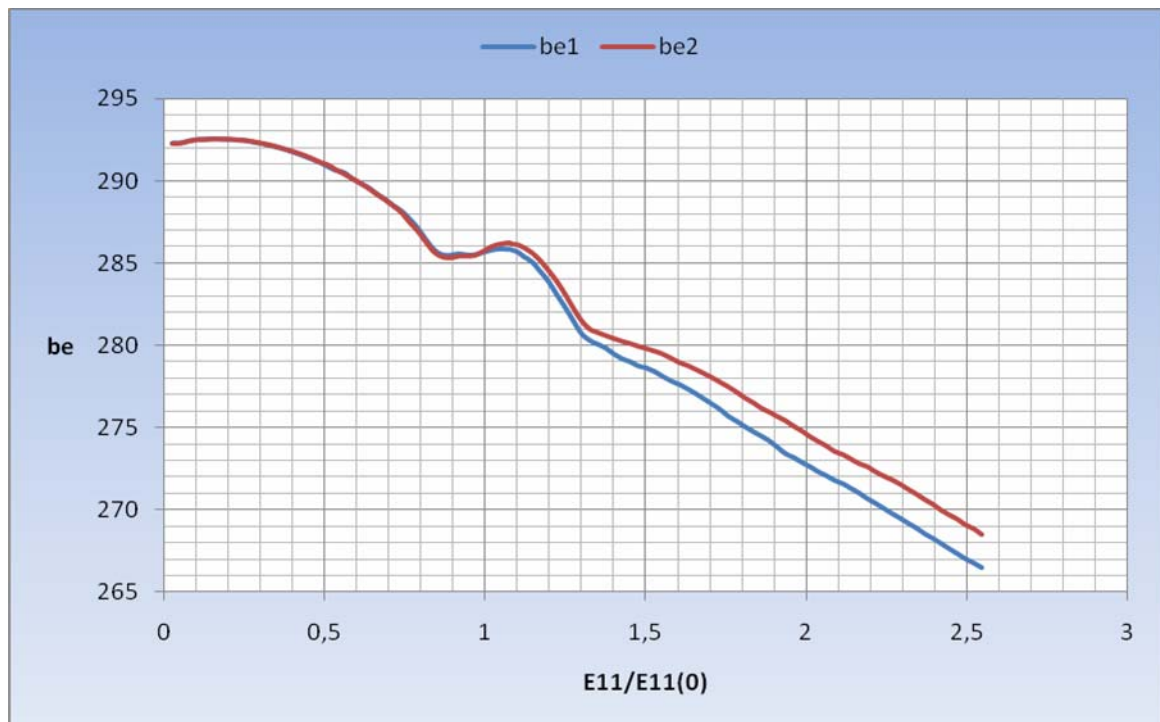
Η μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους στην πλάκα απεικονίζεται στα Σχήματα 5.48 και 5.49, ενώ στο Σχήμα 5.50 παρατηρούμε τη διαφοροποίηση στην παραλαβή φορτίου μεταξύ των περιπτώσεων ρωγμής μήκους $c=144\text{mm}$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε, η κατασκευή με τη διαμπερή ρωγμή στο ενισχυτικό κινείται σε σημαντικά υψηλότερες τιμές ισοδύναμου πλάτους από την αντίστοιχη άνευ ρωγμής. (Σχήμα 5.50). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσωρινή σταθεροποίηση που παρατηρείται στο συνολικό ισοδύναμο πλάτος οφείλεται στην έναρξη της επαφής των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής για στάδιο φόρτισης $E_{11}/E_{11(0)}=0.8399$, ενώ η καθολική μείωση του εν λόγω μεγέθους, συμπίπτει με το σημείο μέγιστης αντοχής για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)}=1.349$.



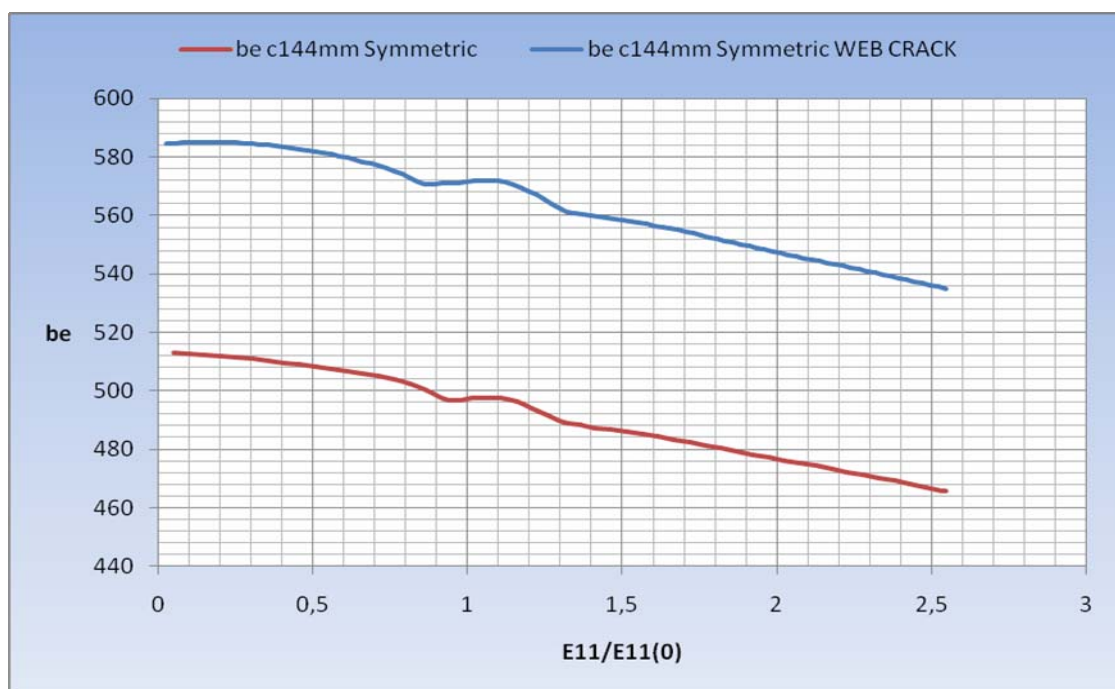
Σχήμα 5.48 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμές $c=144\text{mm}$ και $c_w=14.7\text{mm}$

Όσον αφορά τα ισοδύναμα πλάτη εκατέρωθεν του ενισχυτικού, παρατηρούμε ότι αρχικά παραλαμβάνουν το ίδιο φορτίο μέχρι του σημείου φόρτισης $E_{11}/E_{11(0)}=0.9672$ που αντιστοιχεί στο «κλείσιμο» της ρωγμής στην περιοχή της ενώσεως του ενισχυτικού με την πλάκα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.51. Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι το τμήμα της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$

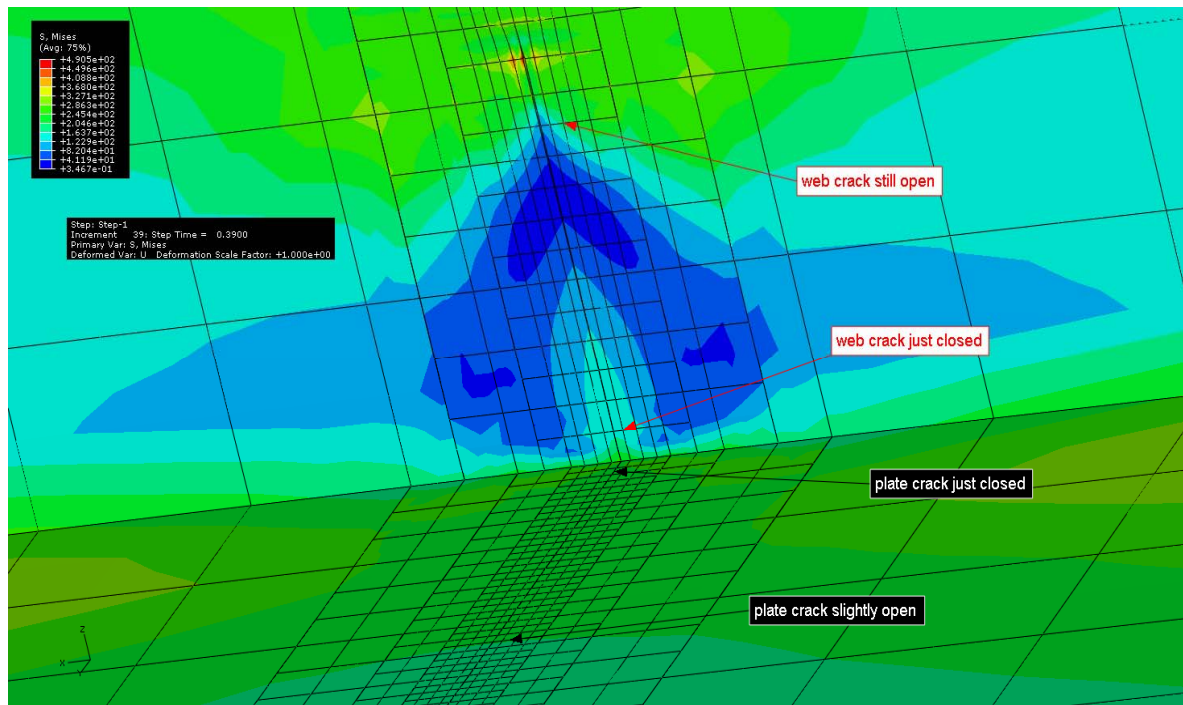
παραλαμβάνει τον κύριο όγκο του φορτίου για λόγους, που ήδη έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες περιπτώσεις (μορφή αρχικών ατελειών).



Σχήμα 5.49 Μεταβολή ισοδύναμου πλάτους εκατέρωθεν της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης για μοντέλο με ρωγμή $c=144\text{mm}$ και $c_w=14.7\text{mm}$

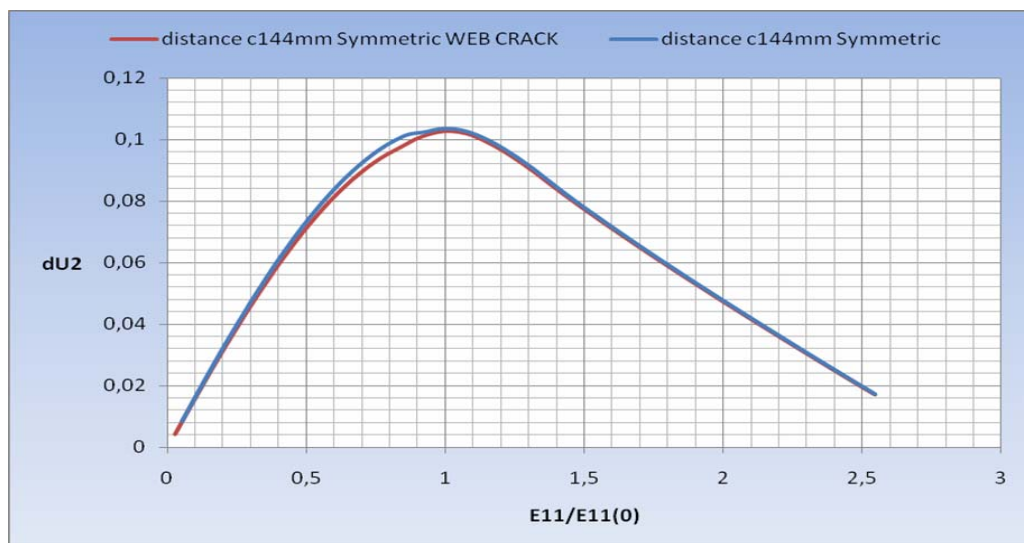


Σχήμα 5.50 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική ρωγμή $c=144\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού



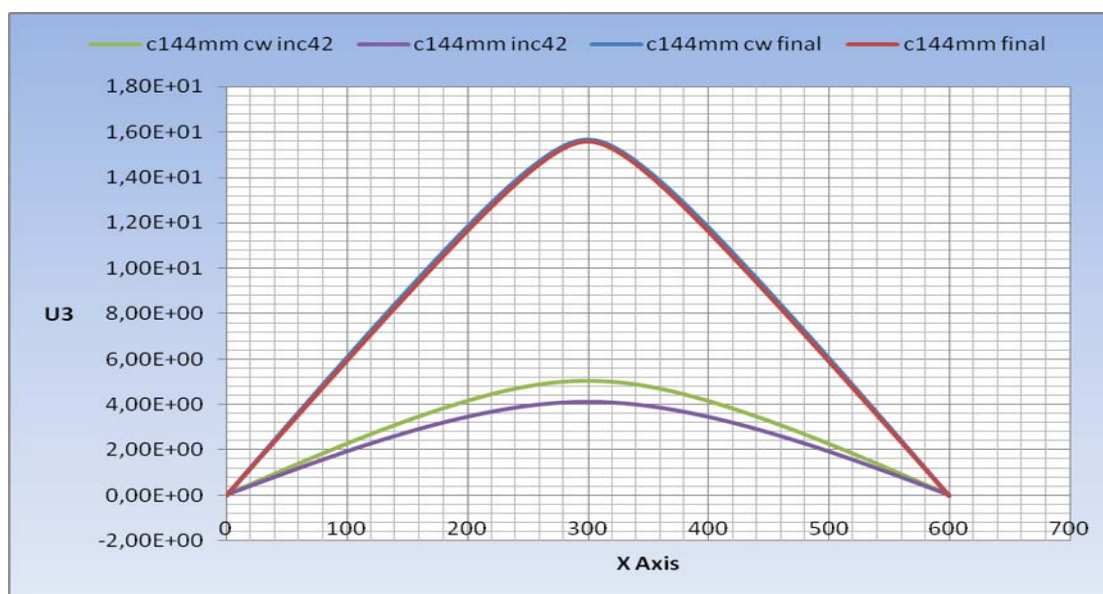
Σχήμα 5.51 Έναρξη επαφής σημείων της ρωγμής της κατασκευής με ρωγμές σε πλάκα $c=144\text{mm}$ συμμετρική και στο ενισχυτικό $c_w=14.7\text{m}$

Όσον αφορά το διάστημα πλάτυνσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.52 (με κόκκινο χρώμα). Από τη σύγκριση με το αντίστοιχο για το ρηγματοποιημένο έλασμα χωρίς τη ρωγμή ενισχυτικού, παρατηρούμε ότι η διαφοροποίηση είναι σχετικά μικρή .

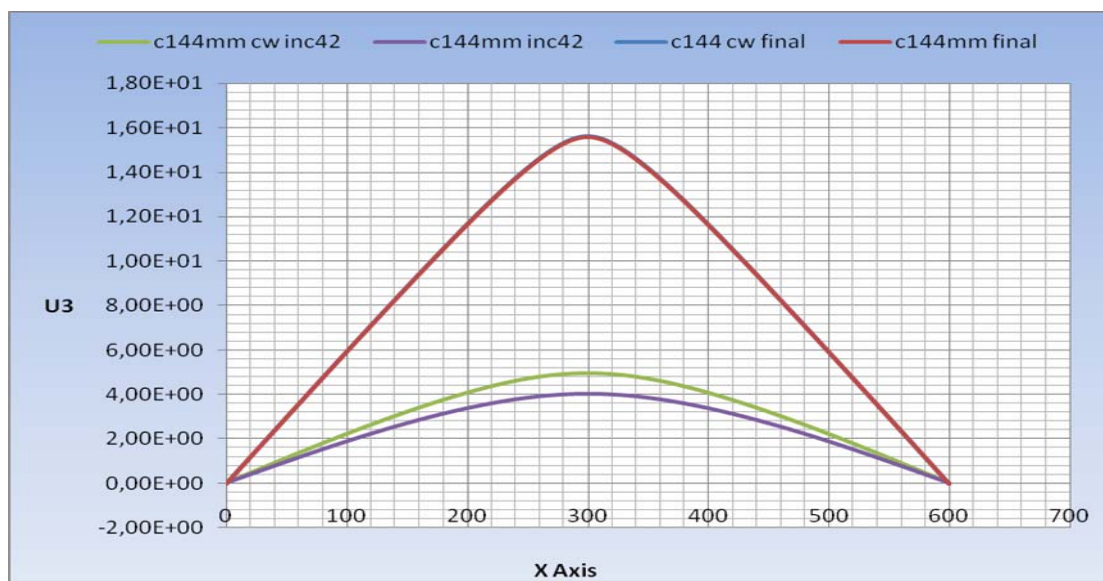


Σχήμα 5.52 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική ρωγμή $c=72\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού

Η διαφοροποίηση του βέλους κάμψης U_3 των αφόρτιστων πλευρών παρουσιάζεται στα ακόλουθα Σχήματα 5.53 ($y=0$) και 5.54 ($y=b$) σε δύο στάδια φόρτισης, καταρχήν για $E_{11}/E_{11(0)}=1.069$ και κατόπιν στο τελικό φορτίο συμπίεσης. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο πρώτο στάδιο, υπάρχει διαφορά στα βέλη U_3 των δύο περιπτώσεων, με την κατασκευή χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό, να υπολείπεται σε μέγεθος, κάτι το οποίο όμως αναμέναμε από την παρατήρηση των σχημάτων 5.33 και 5.48 των ισοδύναμων πλατών. Στο τελικό στάδιο συμπίεσης οι δύο περιπτώσεις αγγίζουν πανομοιότυπες τιμές U_3 .



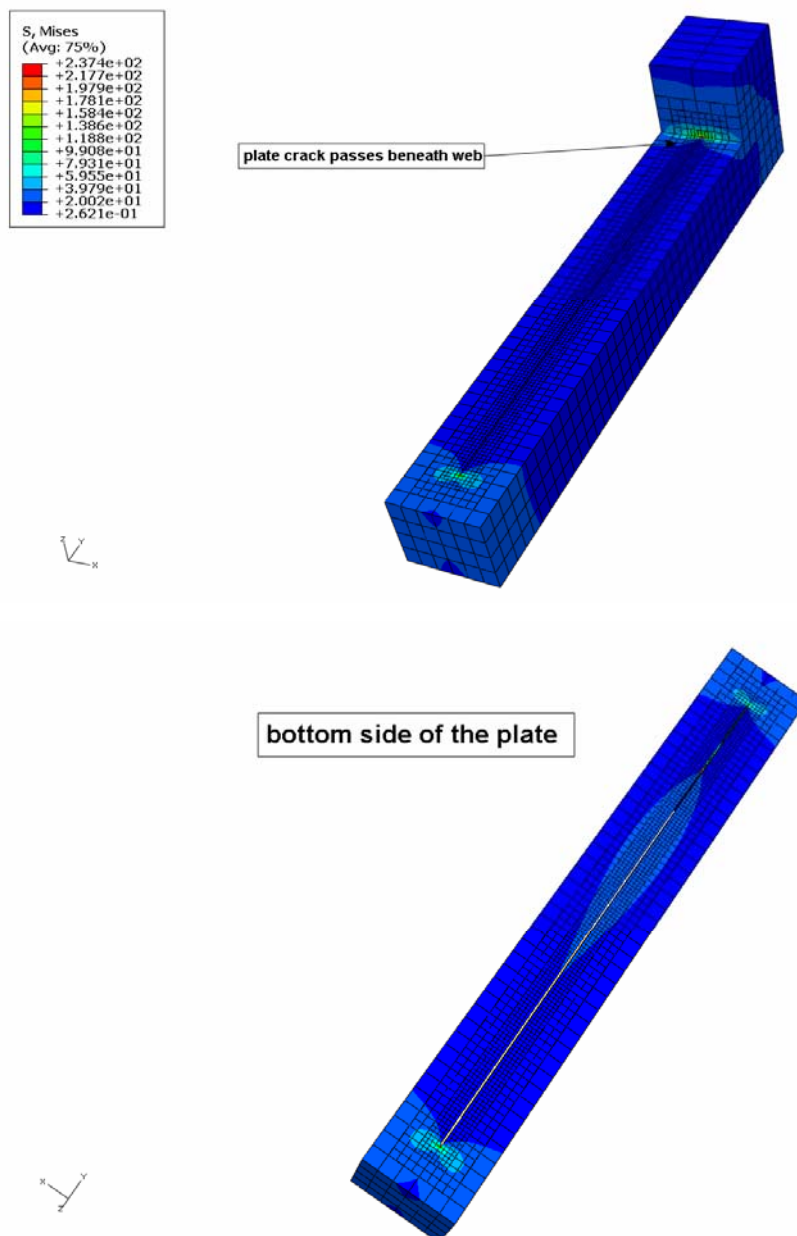
Σχήμα 5.53 Διακύμανση βέλων κάμψης U_3 στα ίδια επίπεδα συμπίεσης σε έλασμα $c=144\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού για $y=0$



Σχήμα 5.54 Διακύμανση βέλων κάμψης U_3 στα ίδια επίπεδα συμπίεσης σε έλασμα $c=144\text{mm}$ με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού για $y=b$

5.8 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=72\text{mm}$ ασύμμετρη ως προς το ενισχυτικό από $y=228\text{mm}$ έως $y=300\text{mm}$.

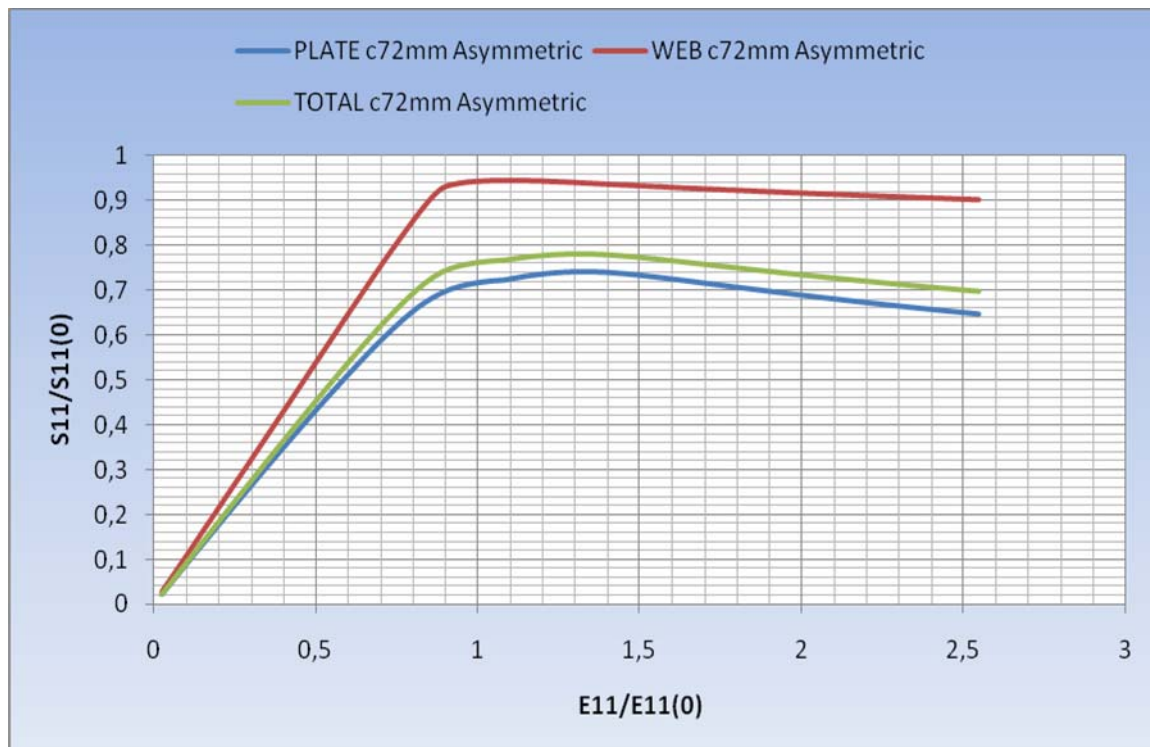
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος πραγματοποιήθηκε με 47796 στοιχεία διαστάσεων από $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ στην περιοχή της ρωγμής έως $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 5\text{mm}$ στην πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $6\text{mm} \times 6.1235\text{mm} \times 6.1235\text{mm}$. Στο Σχήμα 5.55 που ακολουθεί απεικονίζεται η λεπτομέρεια της εν λόγω ρωγμής στην πλάκα, η οποία περνάει κάτω από το ενισχυτικό, το οποίο θεωρούμε ανέπαφο.



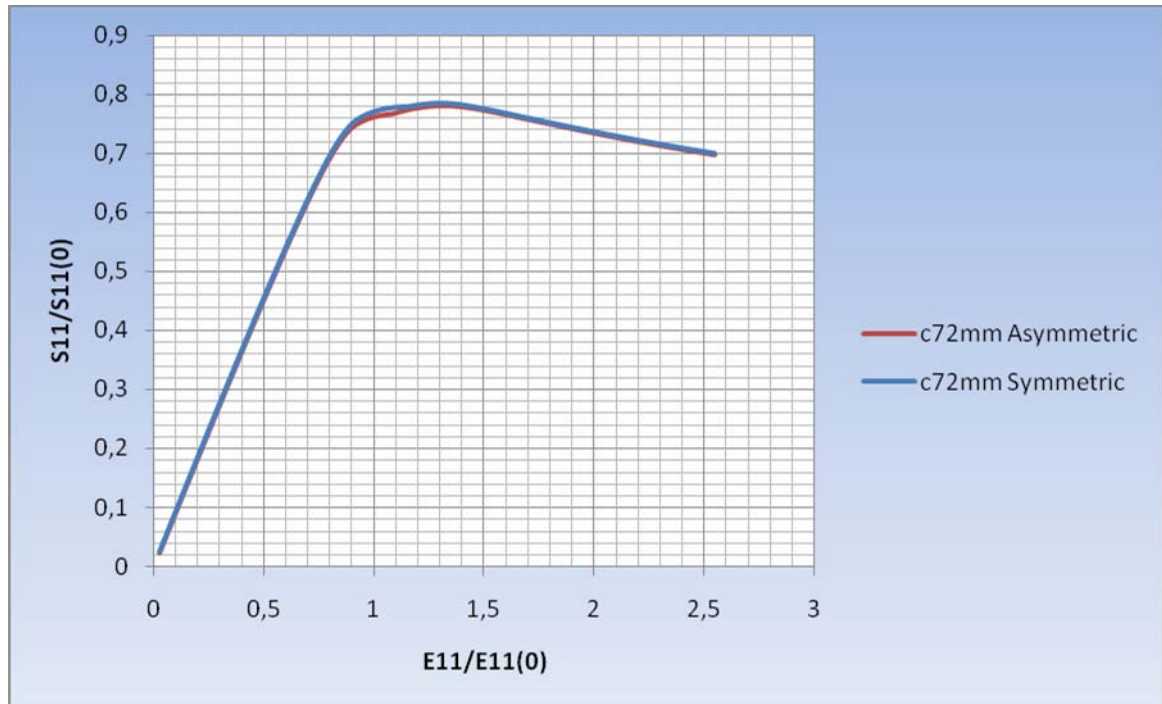
Σχήμα 5.55 Απεικόνιση ρωγμής $c=72\text{mm}$ στο ένα τμήμα της πλάκας

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το ανωτέρω σχήμα που απεικονίζει το κριτήριο Von Mises, οι περιοχές με υψηλή συγκέντρωση τάσεων είναι τα άκρα της ρωγμής και τα σημεία ενώσεως της πλάκας με το ανέπαφο ενισχυτικό στην περιοχή της ρωγμής. Συναφώς, αναμένουμε την πλαστική ροή να ξεκινήσει από τις εν λόγω περιοχές.

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.56. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, η κλίση της καμπύλης της πλάκας αλλάζει για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)} = 1.069$, ανακτώντας κάποιο περιθώριο αντοχής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το εν λόγω στάδιο συμπίεσης συμπίπτει με την έναρξη επαφής των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής. Στο Σχήμα 5.57 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων συμμετρικής και ασύμμετρης ρωγμής. Παρατηρούμε ότι η θέση της ρωγμής ίδιου μήκους δε διαφοροποιεί τη μέγιστη αντοχή της κατασκευής, σε σύγκριση με την περίπτωση της ρωγμής ίδιου μήκους που υφίσταται και στα δύο(2) τμήματα της πλάκας εκατέρωθεν του ενισχυτικού.



Σχήμα 5.56 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72mm$ στη μία πλευρά της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2$



Σχήμα 5.57 Σύγκριση συνολικής αντοχής μεταξύ των κατασκευών με ρωγμή μήκους $c=72\text{mm}$ στη μία πλευρά/ δύο πλευρές της πλάκας

Η μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους στην πλάκα, απεικονίζεται στα Σχήματα 5.58 και 5.59. Το κάτω κοίλο στην καμπύλη του σχήματος 5.58, αν εξεταστεί σε συνδυασμό με την καμπύλη της πλάκας στο σχήμα 5.56, μας υποδεικνύει το οριακό σημείο μετάβασης από την ελαστική περιοχή στον ελαστο – πλαστικό λυγισμό για στάδιο φόρτισης $E11/E11(0)=0.8399$. Το τελευταίο άνω κοίλο για $E11/E11(0)=1.069$ συμπίπτει με το σημείο ανάκτησης αντοχής στη μειωτική καμπύλη φόρτισης της πλάκας.

Αξιοσημείωτη είναι η διαφοροποίηση που παρουσιάζεται ανάμεσα στα ισοδύναμα πλάτη των τμημάτων της πλάκας εκατέρωθεν του ενισχυτικού. Το τμήμα που δε φέρει τη ρωγμή (η κόκκινη καμπύλη στο σχήμα 5.59), επιβαρύνεται σε φορτίο στην ελαστική περιοχή, ενώ το τμήμα με τη ρωγμή αρχίζει να παραλαμβάνει φορτίο στην ελαστο – πλαστική ζώνη. Μετά τα κάτω κοίλα των δύο καμπυλών του σχήματος 5.59, το πρώτο σημείο τομής αυτών, βρίσκεται στο στάδιο φόρτισης πριν την έναρξη επαφής των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής, ενώ το δεύτερο αποτελεί το προηγούμενο στάδιο πριν την επίτευξη της μέγιστης αντοχής, σύμφωνα με την καμπύλη του σχήματος 5.56, που συμβαίνει για $E11/E11(0)=1.2853$.



Σχήμα 5.58 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72mm$ στο ένα τμήμα της πλάκας



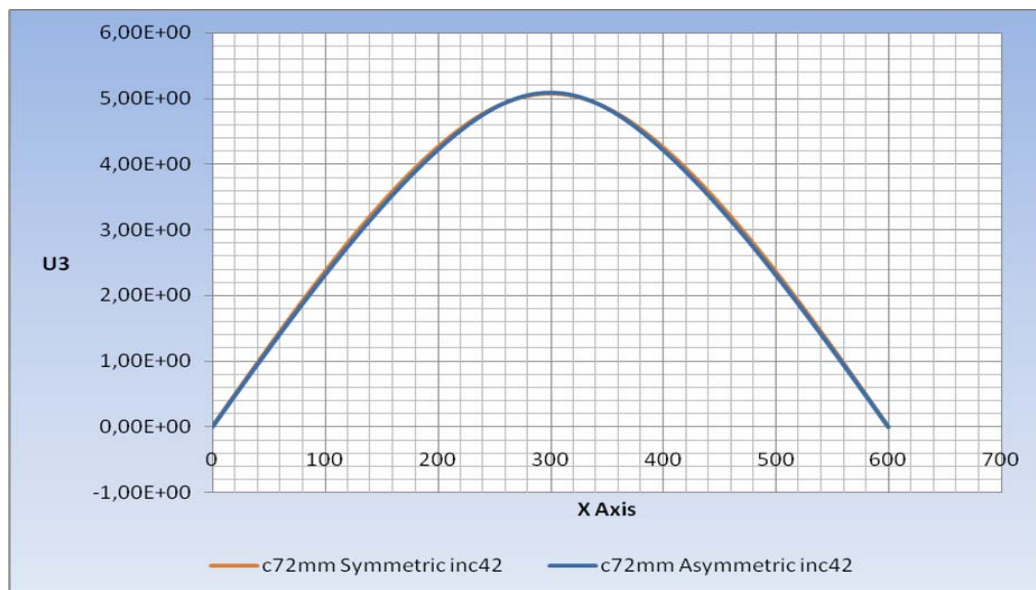
Σχήμα 5.59 Διακύμανση των ισοδύναμων πλατών για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72mm$ στο ένα τμήμα της πλάκας

Το διάστημα πλάτυνσης του μοντέλου παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.60 (με κόκκινο χρώμα), ενώ στο ίδιο σχήμα προβάλλεται και το αντίστοιχο διάστημα για ρωγμή συμμετρική και στα δύο τμήματα της πλάκας.

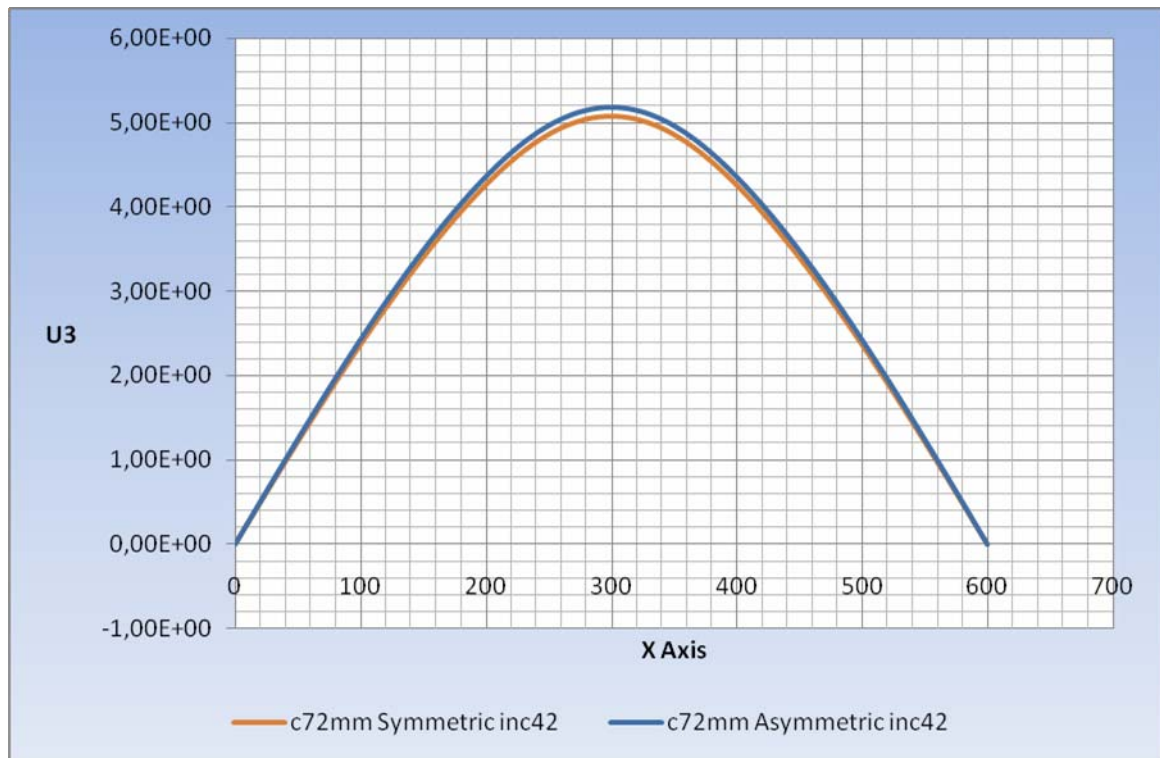


Σχήμα 5.60 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=72mm$ στην πλάκα.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της εξεταζόμενης κατασκευής στα Σχήματα 5.61 και 5.62 απεικονίζονται τα βέλη κάμψης $U3$ των αφόρτιστων πλευρών για τις περιπτώσεις συμμετρικής/ ασύμμετρης ρωγμής στην πλάκα σε στάδια φόρτισης $E11/E11(0)=1.069$.



Σχήμα 5.61 Σύγκριση βελών κάμψης $U3$ στην πλευρά $y=0$ για συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=72mm$ στην πλάκα.

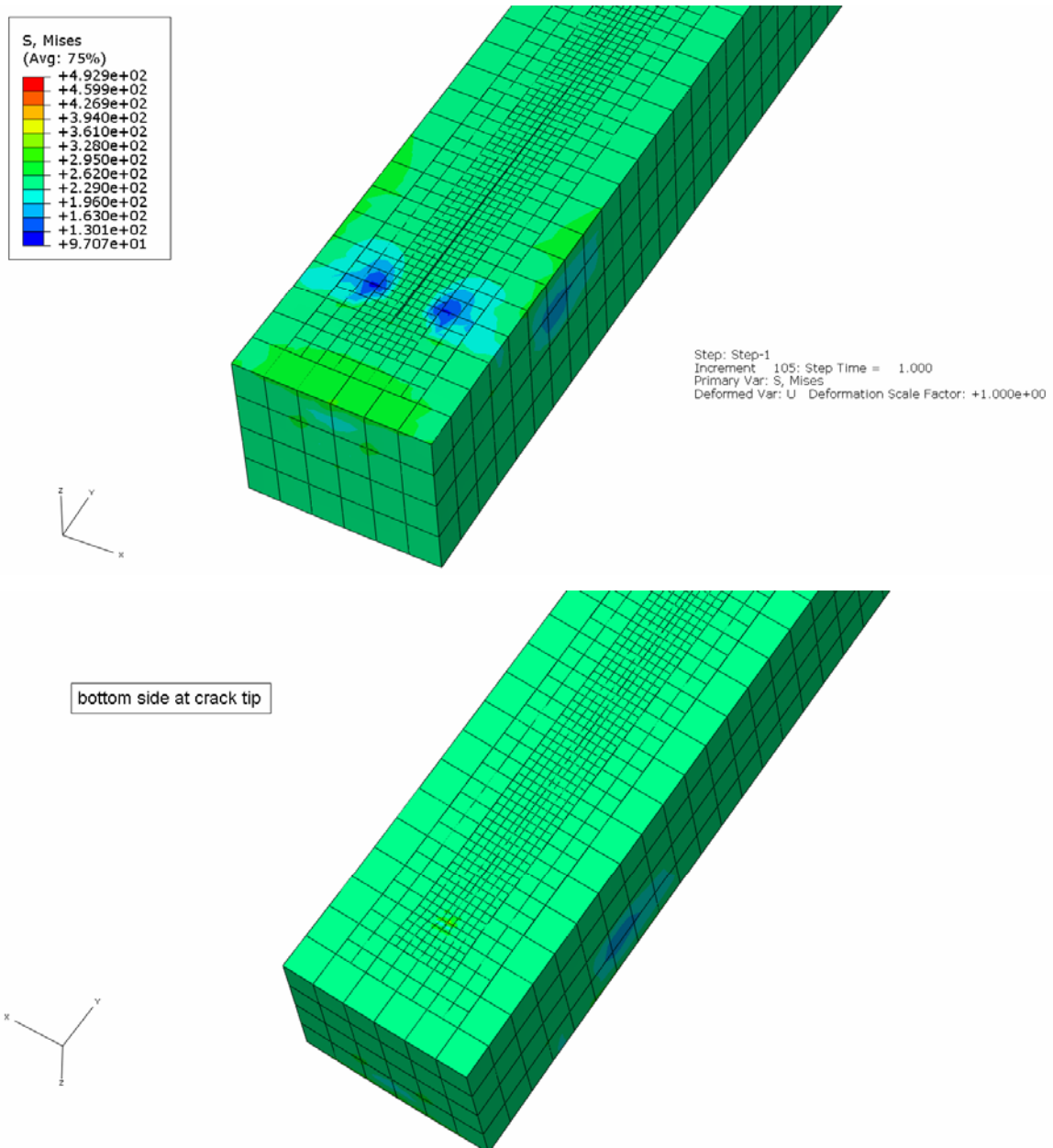


Σχήμα 5.62 Σύγκριση βελών κάμψης U_3 στην πλευρά $y=b$ με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=72mm$ στην πλάκα.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση στα βέλη κάμψης για το συγκεκριμένο φορτίο, με τη μόνη διαφορά να εντοπίζεται στην πλευρά $y=b$ που διατηρεί ελαφρά μικρότερες τιμές U_3 .

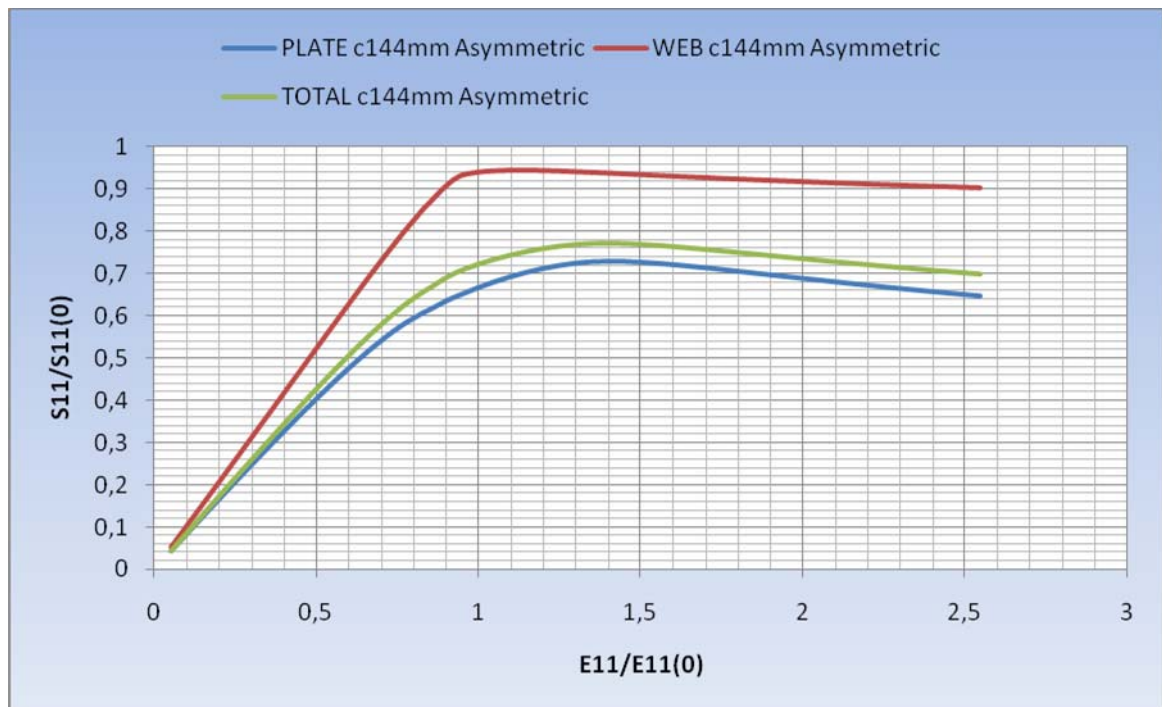
5.8 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=144mm$ ασύμμετρη ως προς το ενισχυτικό από $y=228mm$ έως $y=300mm$.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος πραγματοποιήθηκε με 41409 στοιχεία διαστάσεων από $0.35mm \times 0.49mm \times 1.25mm$ στην περιοχή της ρωγμής έως $6mm \times 6mm \times 5mm$ στην πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $6mm \times 6.1235mm \times 6.1235mm$. Στο Σχήμα 5.63 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατάσταση της ρωγμής στο κάτω άκρο αυτής, στο τέλος της φόρτισης (μεταβλητή Von Mises). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η άνω πλευρά της ρωγμής μένει λίγο ανοικτή, τη στιγμή που η αντίστοιχη κάτω πλευρά αυτής, έχει εντελώς κλείσει.

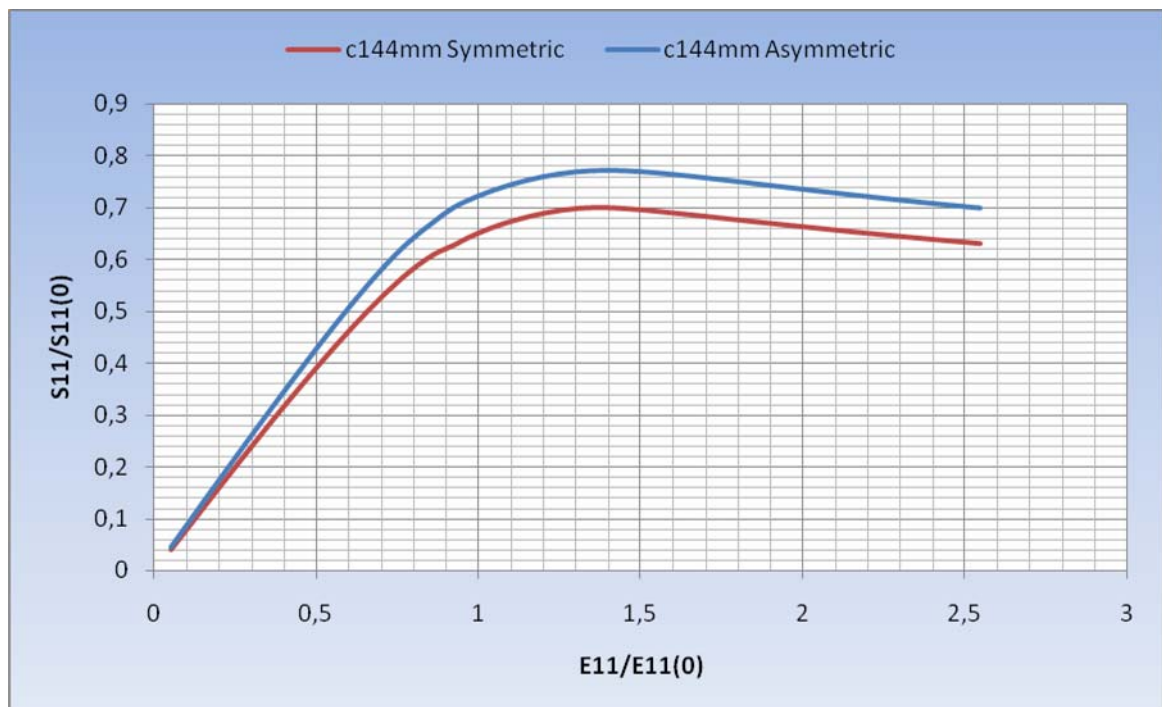


Σχήμα 5.63 Κατάσταση ρωγμής σε θέση $(a/2, b/2-t_w)$ στο τέλος της φόρτισης

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.64. Από την εξέταση των εν λόγω καμπυλών παρατηρούμε ότι η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11}(0)=1.3999$. Στο σχήμα 5.65 απεικονίζεται η σύγκριση των εν λόγω καμπυλών για τις συνολικές κατασκευές με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγή μήκους $c=144\text{mm}$ στην πλάκα. Όπως παρατηρούμε, υπάρχει πλέον, μεγάλη διαφοροποίηση στις μέγιστες τιμές αυτών και συγκεκριμένα η περίπτωση της ρωγμής στο ένα μόνο τμήμα της πλάκας παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από την άλλη, περίπου κατά 7% της συνολικής.



Σχήμα 5.64 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα με ρωγή $c=144\text{mm}$ στη μία πλευρά της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2$



Σχήμα 5.65 Σύγκριση συνολικής αντοχής μεταξύ των κατασκευών με ρωγή μήκους $c=144\text{mm}$ στη μία πλευρά/ δύο πλευρές της πλάκας

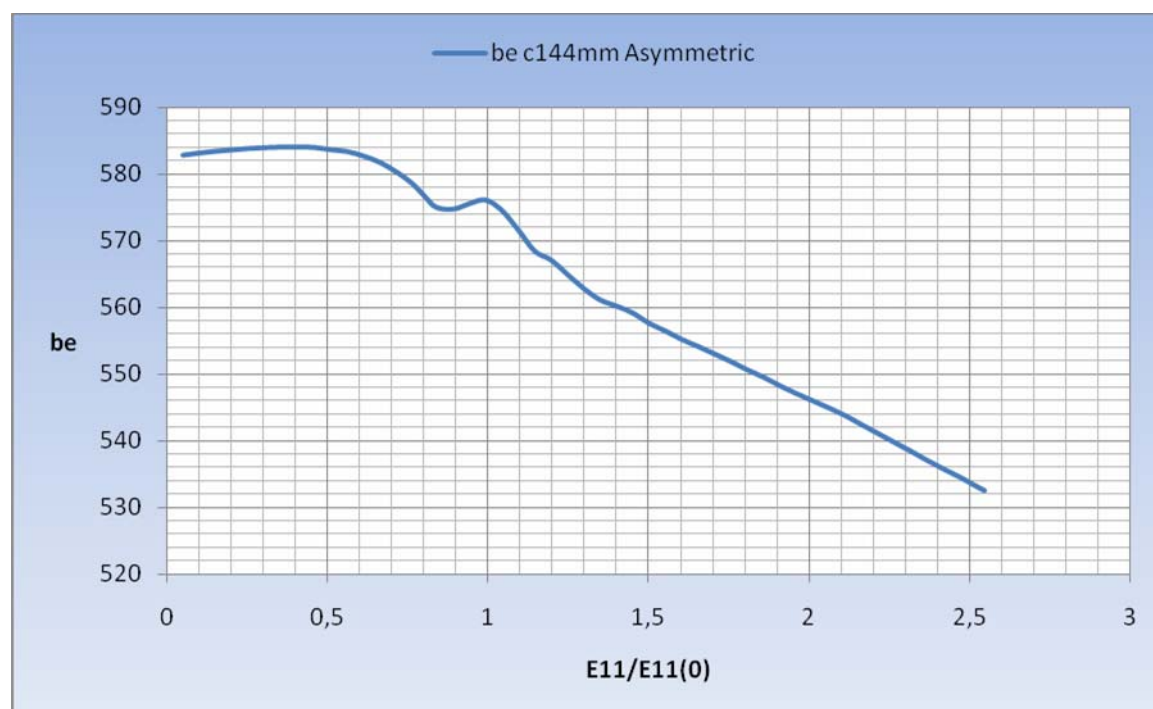
Η μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους στην πλάκα απεικονίζεται στα Σχήματα 5.66 και 5.67. Ιδιαίτερα αξιοσημείωτη είναι η διαφοροποίηση των ισοδύναμων πλατών στα δύο (2) τμήματα της πλάκας. Τον κύριο όγκο του φορτίου

παραλαμβάνει το τμήμα άνευ ρωγμής, ενώ τα κοίλα που παρουσιάζει η καμπύλη του τμήματος μετά ρωγμής (κυανού χρώμα) αντιστοιχούν στα εξής στάδια φόρτισης (σχήμα (5.67)):

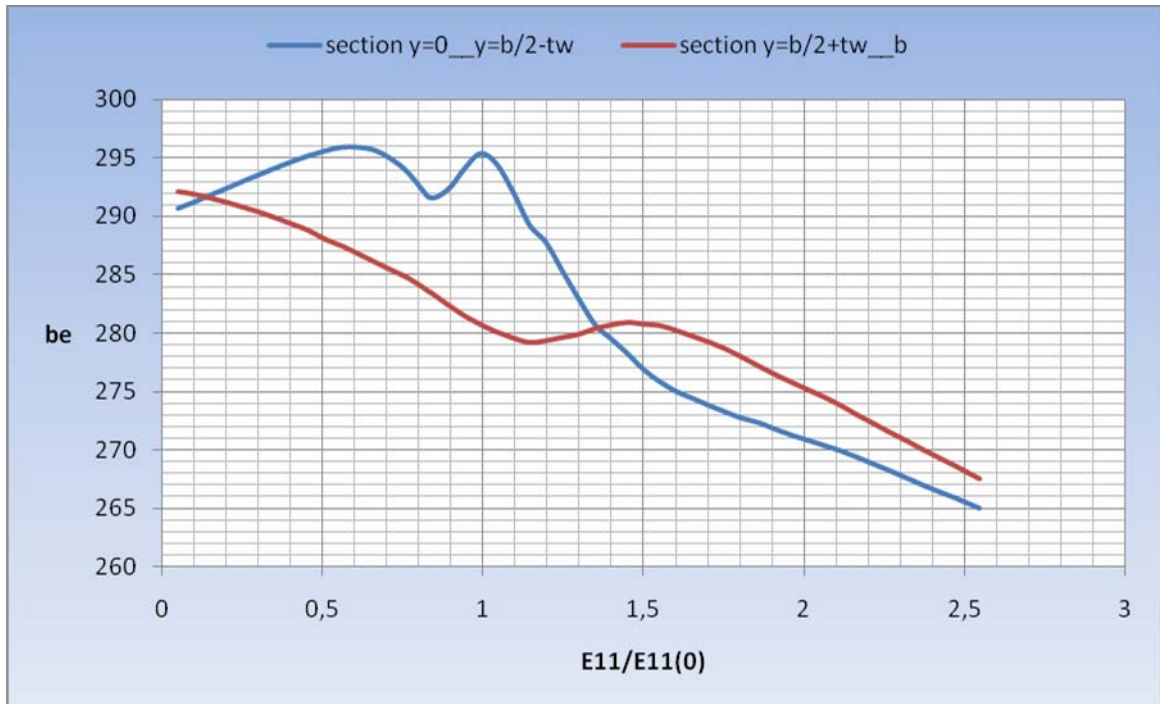
(1) Κάτω κοίλο ($E_{11}/E_{11(0)}=0.8297$): Σημείο μετάβασης από την ελαστική περιοχή στην ελαστο – πλαστική (αλλαγή κλίσης στην καμπύλη). Θα πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι η έναρξη της επαφής των επιφανειών της ρωγμής έχει ξεκινήσει στο αμέσως προηγούμενο στάδιο φόρτισης.

(2) Δεύτερο άνω κοίλο ($E_{11}/E_{11(0)}=1$): Το σημείο αντιστοιχεί σε λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης ίσο με τη μονάδα.

Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί και το σημείο τομής των δύο καμπυλών στο εν λόγω σχήμα, το οποίο βρίσκεται στο προηγούμενο στάδιο φόρτισης από την επίτευξη της μέγιστης αντοχής της κατασκευής. Μετά το σημείο αυτό η ρηγματωποιημένη πλευρά της πλάκας ανακτά φορτίο μέχρι την ολική κατάρρευση.

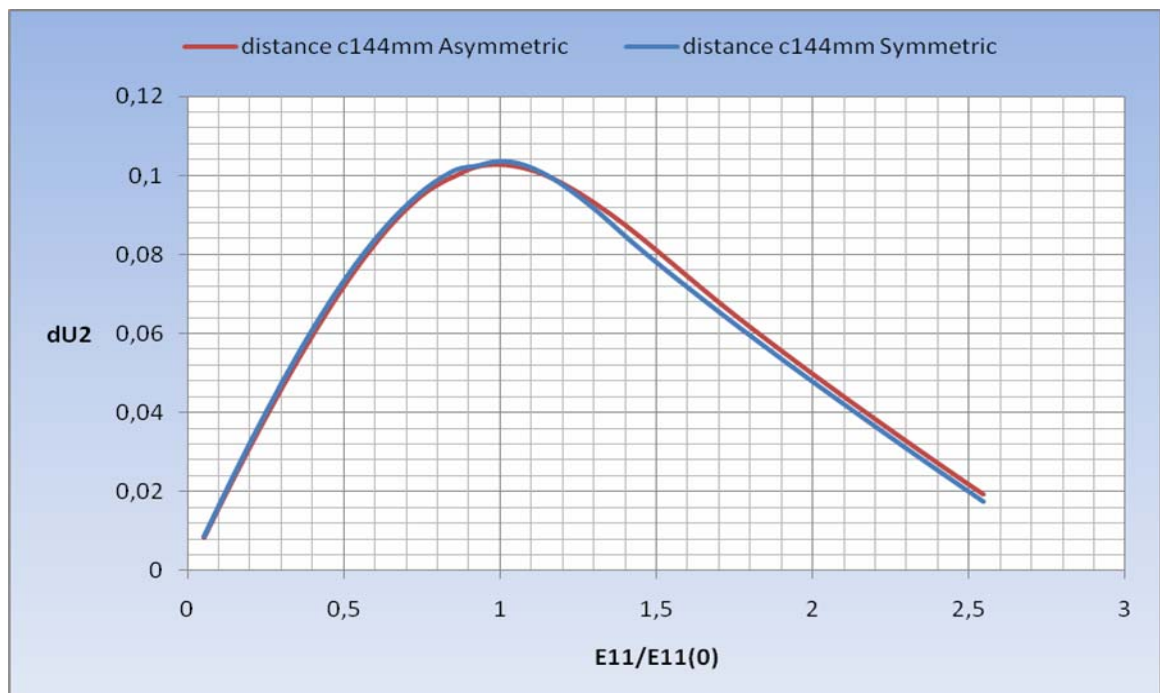


Σχήμα 5.66 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144mm$ στο ένα τμήμα της πλάκας



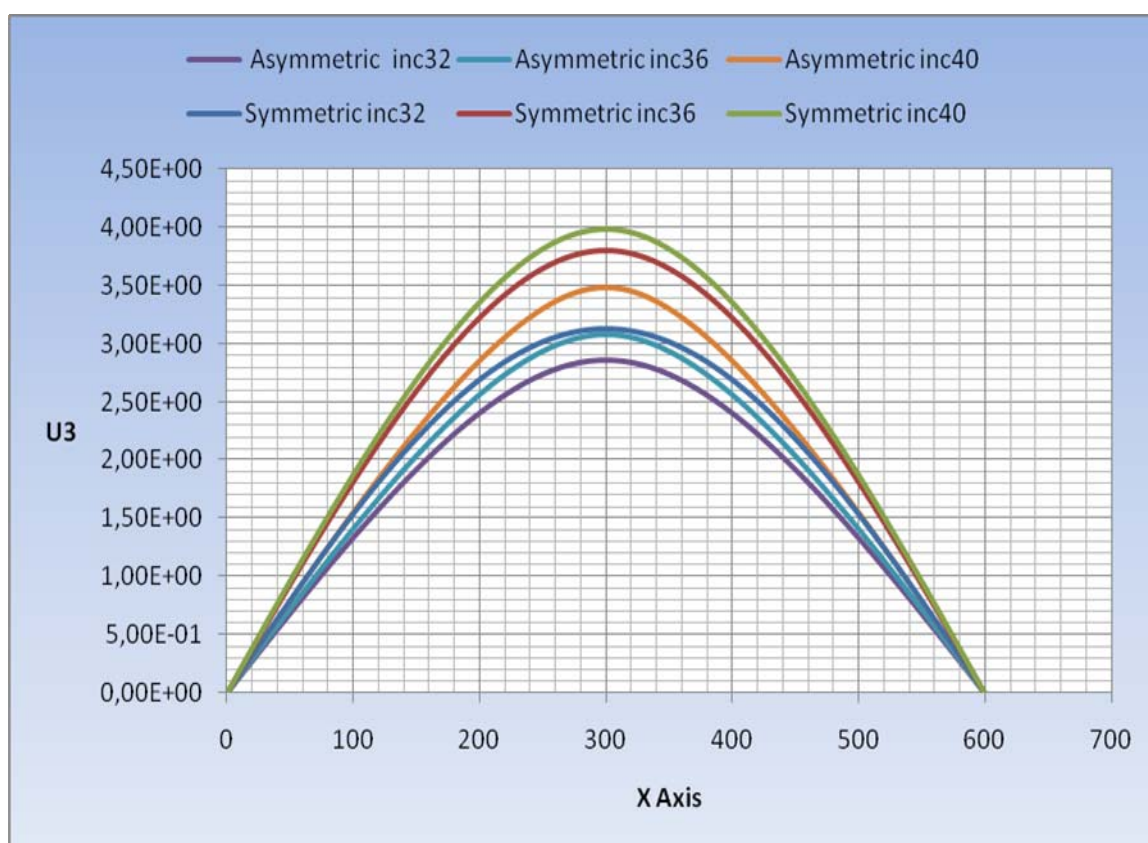
Σχήμα 5.67 Διακύμανση των ισοδύναμων πλατών για ενισχυμένο έλασμα με ρωγή $c=144mm$ στο ένα τμήμα της πλάκας

Το διάστημα πλάτυνσης του μοντέλου παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 5.68 (με κόκκινο χρώμα), ενώ στο ίδιο σχήμα προβάλλεται και το αντίστοιχο διάστημα για ρωγή συμμετρική και στα δύο τμήματα της πλάκας.

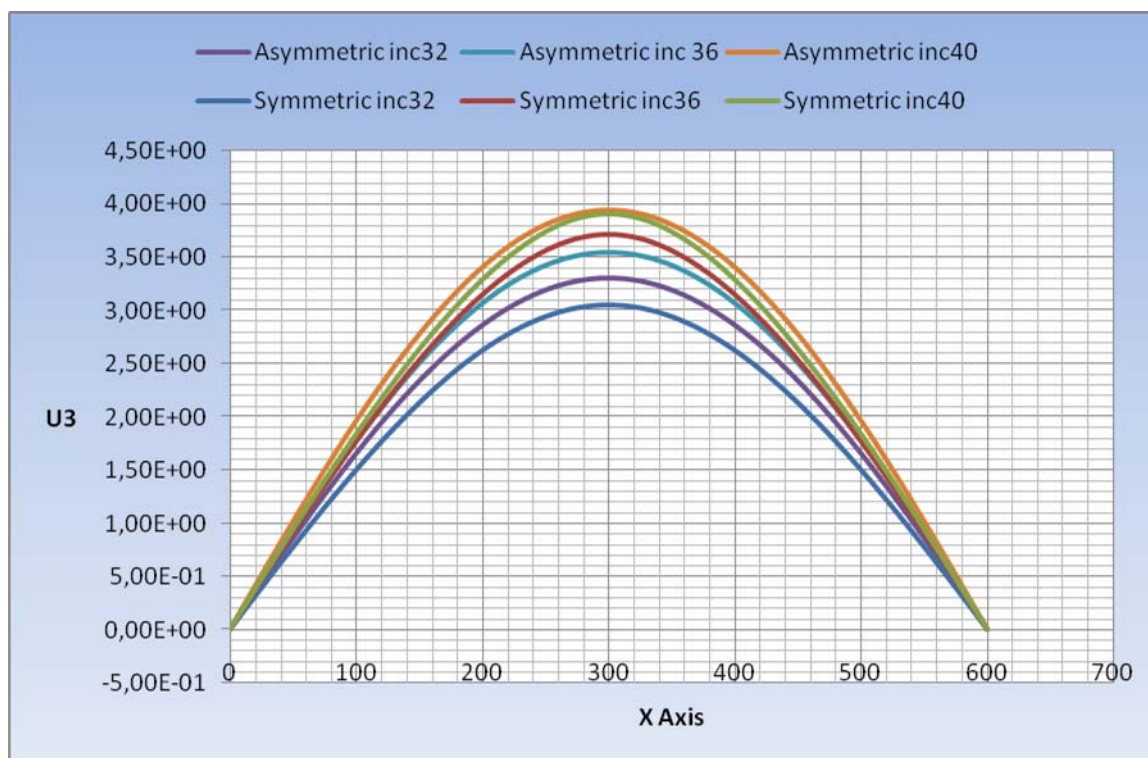


Σχήμα 5.68 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγή $c=144mm$ στην πλάκα.

Όσον αφορά τη μεταβολή του βέλους κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές, στα Σχήματα 5.69 και 5.70 απεικονίζεται η εν λόγω μεταβολή σε σύγκριση με την αντίστοιχη για συμμετρική ρωγμή ίδιου μήκους στα ίδια στάδια φόρτισης ($E_{11}/E_{11(0)}=0.8145, 0.8501$ και 0.9061). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η περίπτωση της ασύμμετρης ρωγμής μεταβάλλει σημαντικά την αυξητική τάση της εν λόγω μεταβλητής, και συγκεκριμένα στο τμήμα όπου υπάρχει η ρωγμή, περιορίζεται σημαντικά η κάθετη παραμόρφωση σε σχέση με την αντίστοιχη συμμετρική, ενώ όσον αφορά το τμήμα που δεν υφίσταται η ρωγμή, παρόλο που στα δύο (2) πρώτα στάδια παρουσιάζει μικρότερο U_3 , στη συνέχεια παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες από την έτερη συγκρινόμενη περίπτωση. Επίσης παρατηρούμε ότι όσον αφορά την αφόρτιστη πλευρά $y=b$, το βέλος κάμψης της ασύμμετρης περίπτωσης παρουσιάζει μία μικρή πλάτυνση προς τα άκρα σε σχέση με την άλλη περίπτωση ρωγμής.



Σχήμα 5.69 Σύγκριση U_3 σε τρία (3) στάδια φόρτισης μεταξύ της Ασύμμετρης/ Συμμετρικής ρωγμής στην πλάκα $c=144mm$ για $y=0$.

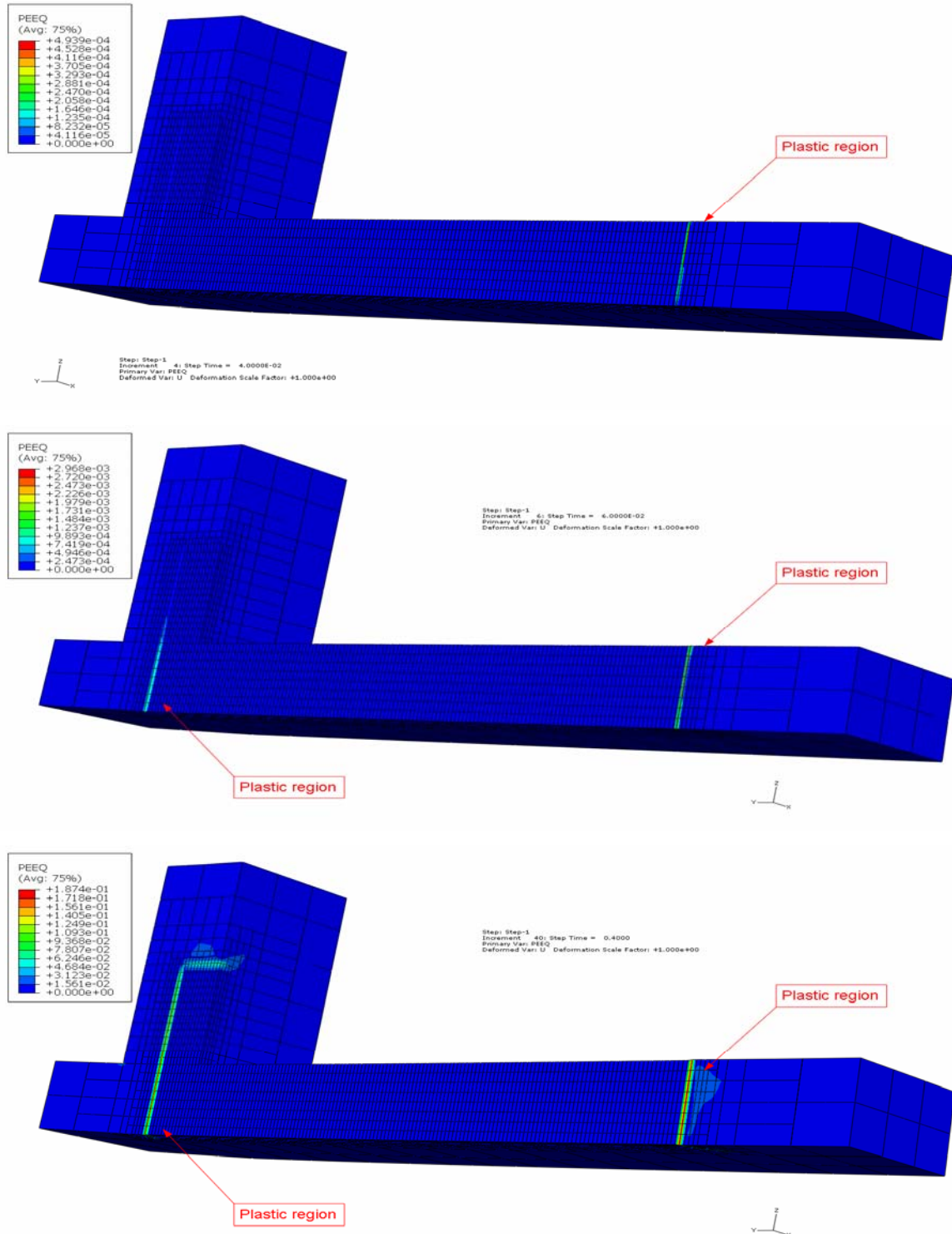


Σχήμα 5.70 Σύγκριση U3 σε τρία (3) στάδια φόρτισης μεταξύ της Ασύμμετρης/ Συμμετρικής ρωγμής στην πλάκα $c=144mm$ για $y=b$.

5.9 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=72mm$ ασύμμετρη ως προς το ενισχυτικό από $y=228mm$ έως $y=300mm$ και επιπλέον ρωγμή ενισχυτικού

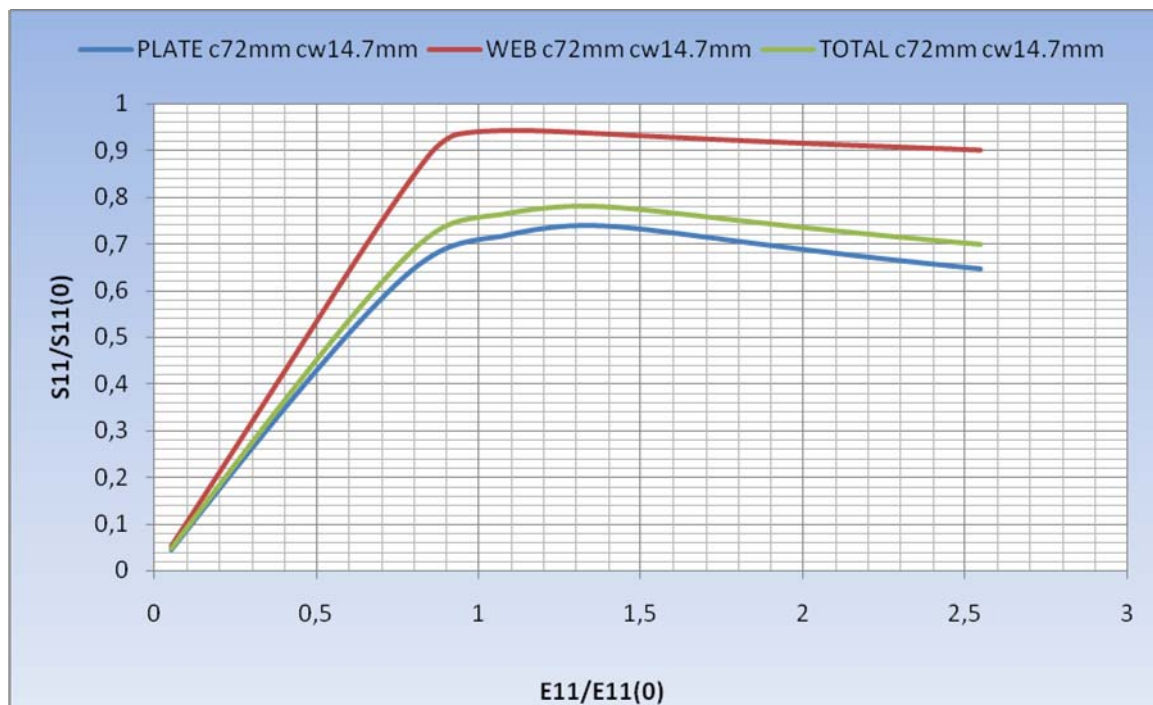
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος πραγματοποιήθηκε με 38798 στοιχεία διαστάσεων από $0.35mm \times 0.49mm \times 1.25mm$ στην περιοχή της ρωγμής έως $6mm \times 6mm \times 5mm$ στην πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $0.5mm \times 0.49mm \times 1.0206mm$ όσον αφορά τη ρωγμή και $6mm \times 6.1235mm \times 6.1235mm$ στο κυρίως τμήμα αυτού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσον αφορά τη ρωγμή στο ενισχυτικό, αυτή δεν είναι διαμπερής, αλλά έχει φθάσει μέχρι το μέσο του ενισχυτικού. Στο σχήμα 5.71 που ακολουθεί, απεικονίζεται αφενός η μορφολογία της ευρύτερης ρωγμής (πλάκας – ενισχυτικού), αφετέρου η

πλαστική ροή στην πλάκα και στο ενισχυτικό στην περιοχή της ρωγμής. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η επέκταση της πλαστικοποίησης ξεκινά από το άκρο της ρωγμής στην πλάκα μακριά από το ενισχυτικό, εξελίσσεται στη συνέχεια στο άλλο άκρο αυτής στην πλάκα και τέλος ανέρχεται κατά μήκος της ρωγμής στο ενισχυτικό.



Σχήμα 5.71 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια ρωγμής $c=72\text{mm}$ $c_w=14.7\text{mm}$

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για την εν λόγω περίπτωση απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 5.72. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η μορφή των καμπυλών είναι αντίστοιχη με την περίπτωση χωρίς τη ρωγμή στο ενισχυτικό, όπως επίσης και τα επίπεδα μέγιστης αντοχής της κατασκευής.

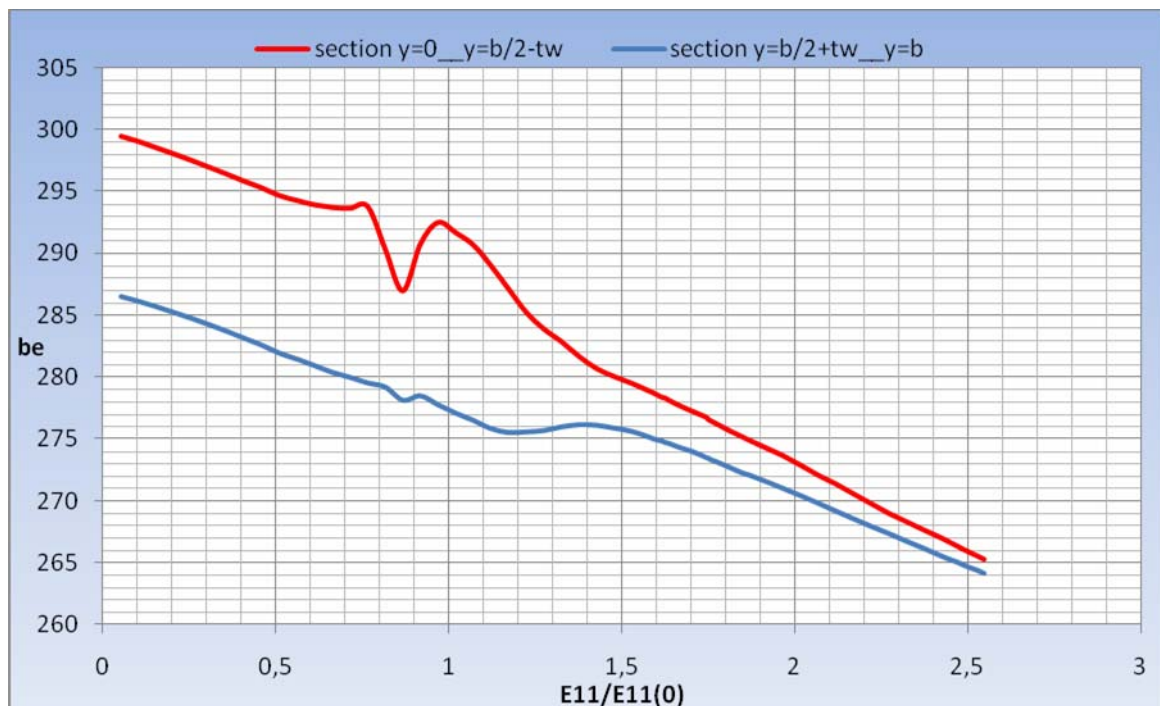


Σχήμα 5.72 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72mm$ στην πλευρά από $y=0$ έως $y=b/2$ και $cw=14.7mm$

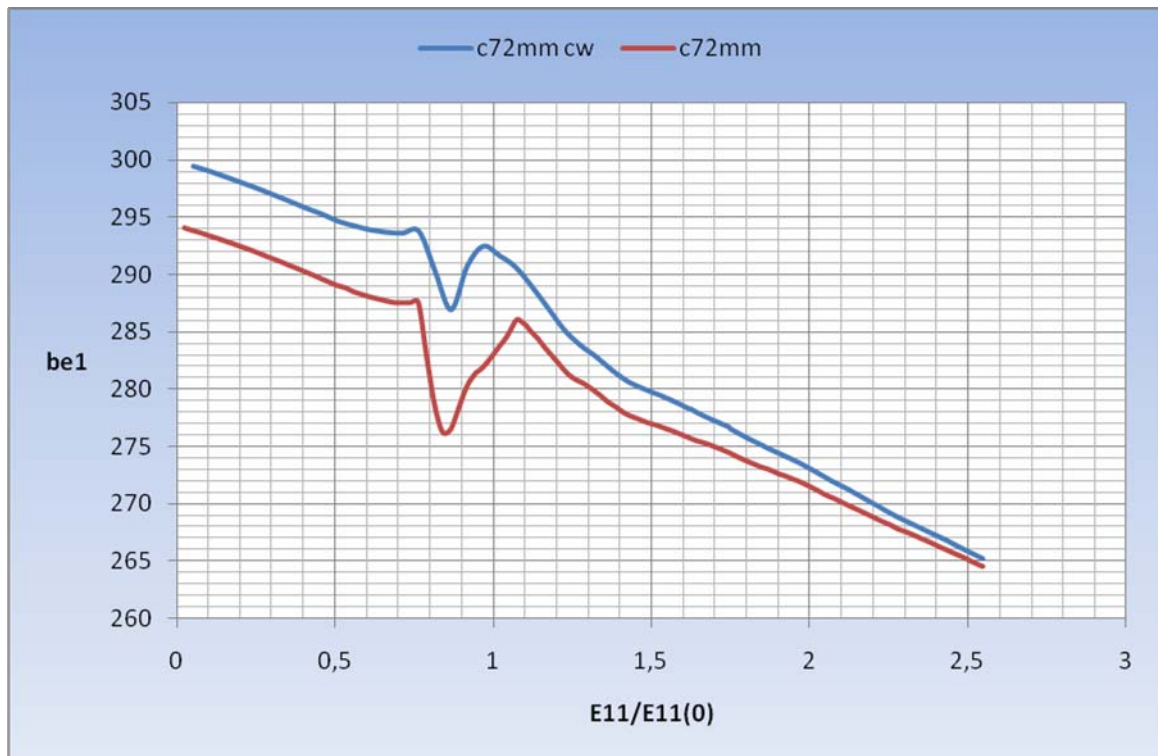
Η μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους στην εν λόγω πλάκα απεικονίζεται στα Σχήματα 5.73 και 5.74, ενώ στα Σχήματα 5.75 και 5.76 απεικονίζονται οι διαφοροποιήσεις στην παραλαβή φορτίου που εισάγει η ρωγμή του ενισχυτικού στην κατασκευή. Συγκεκριμένα παρατηρούμε τη δραστική αποφόρτιση του τμήματος στο οποίο υφίσταται η ρωγμή και την παραλαβή του φορτίου από το έτερο τμήμα της πλάκας (σχήμα 5.74). Αξίζει επίσης να παρατηρήσουμε τη μεταβολή που επιφέρει στη φόρτιση της πλάκας η ρωγμή, συγκρίνοντας τις καμπύλες μεταβολής των ισοδύναμων πλατών για το τμήμα που φέρει τη ρωγμή στην πλάκα (σχήμα 5.75) και για το έτερο τμήμα (σχήμα 5.76). Θα πρέπει να αναφερθεί εκ νέου, ότι η συνολική αντοχή της κατασκευής παραμένει σε αντίστοιχες τιμές, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τα εν λόγω σχήματα.



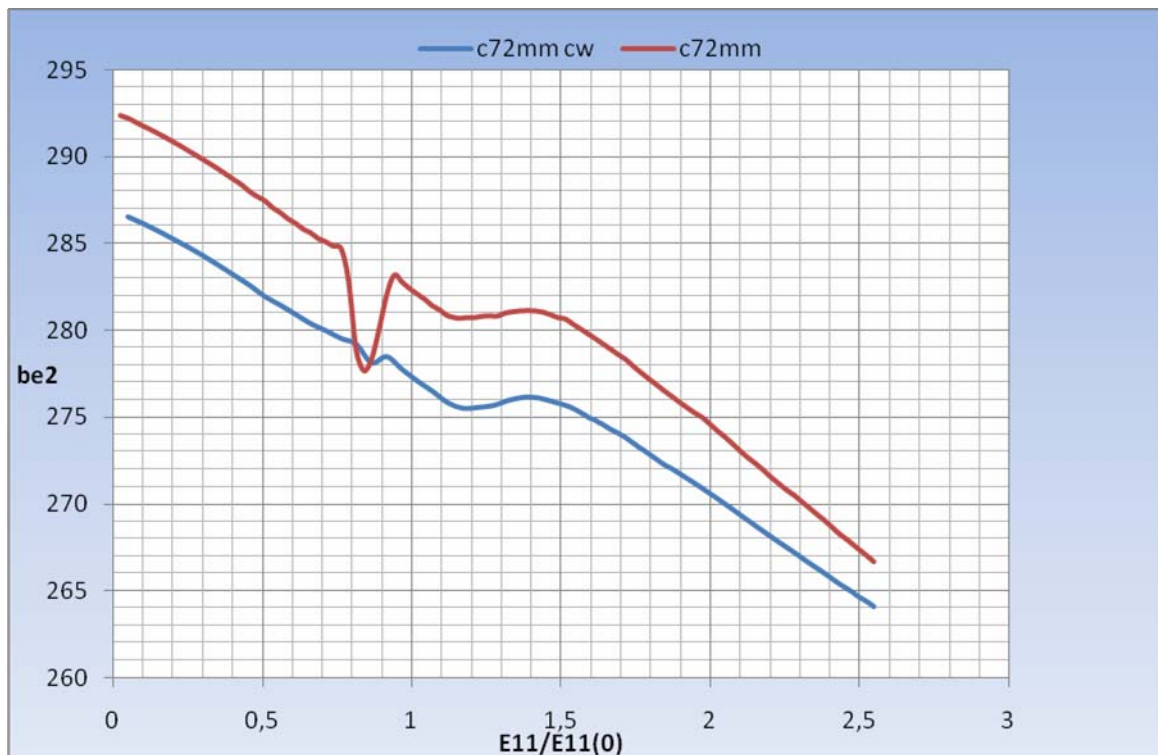
Σχήμα 5.73 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72mm$ στην πλάκα και επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό $cw=14.7mm$



Σχήμα 5.74 Διακύμανση των ισοδύναμων πλατών για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=72mm$ στην πλάκα και επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό $cw=14.7mm$



Σχήμα 5.75 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών στο τμήμα της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ για τις περιπτώσεις με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό



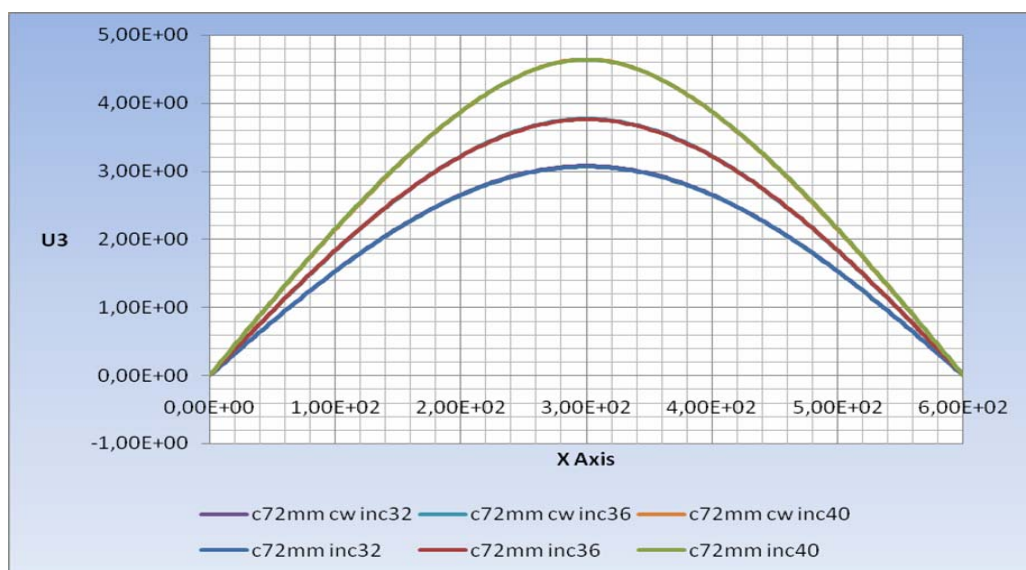
Σχήμα 5.76 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών στο τμήμα της πλάκας από $y= b/2+t_w$ έως $y=b$ για τις περιπτώσεις με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό

Όσον αφορά το διάστημα πλάτυνσης δεν παρουσιάζει καμία διαφορά σε σχέση με το αντίστοιχο για την περίπτωση χωρίς ρωγμή ενισχυτικού (Σχήμα 5.77).

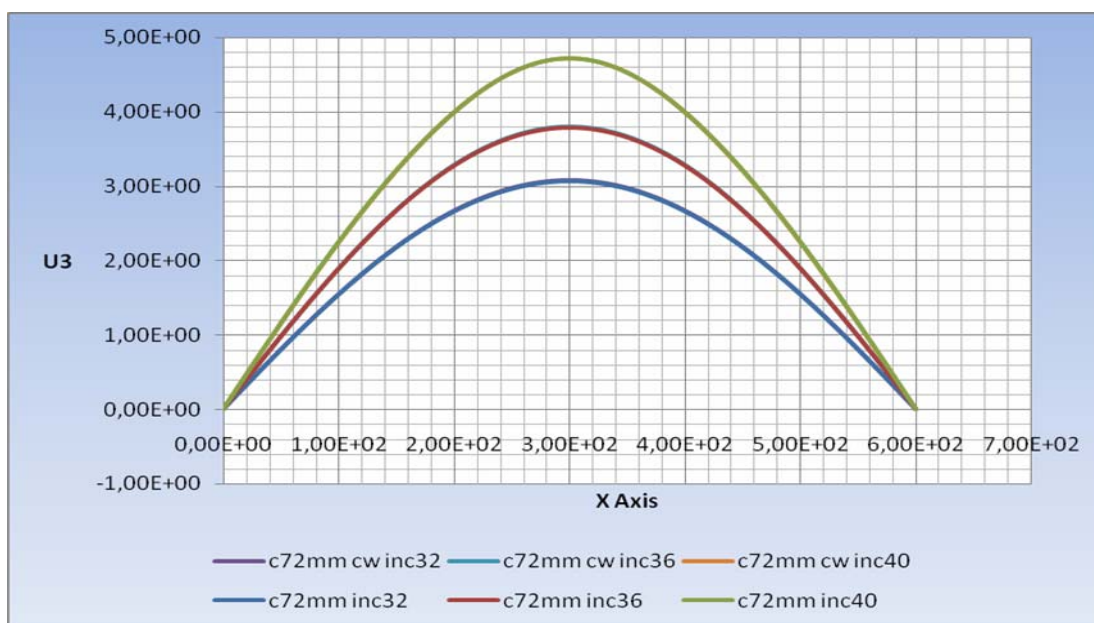


Σχήμα 5.77 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης για τα μοντέλα με χωρίς/ με ρωγμή ενισχυτικού

Όσον αφορά τα βέλη κάμψης U3 στις αφόρτιστες της προκειμένης περίπτωσης, δεν παρουσιάζουν καμία διαφοροποίηση από την αντίστοιχη περίπτωση χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό, όπως παρατηρούμε στα ακόλουθα Σχήματα 5.78 (για $y=0$) και 5.79 (για $y=b$).



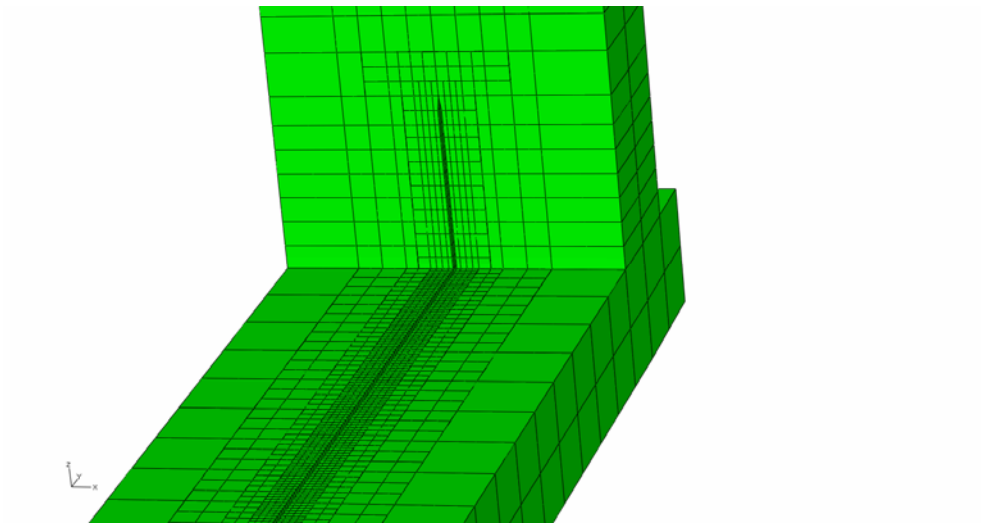
Σχήμα 5.78 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=0$ με/ άνευ ρωγμή ενισχυτικού



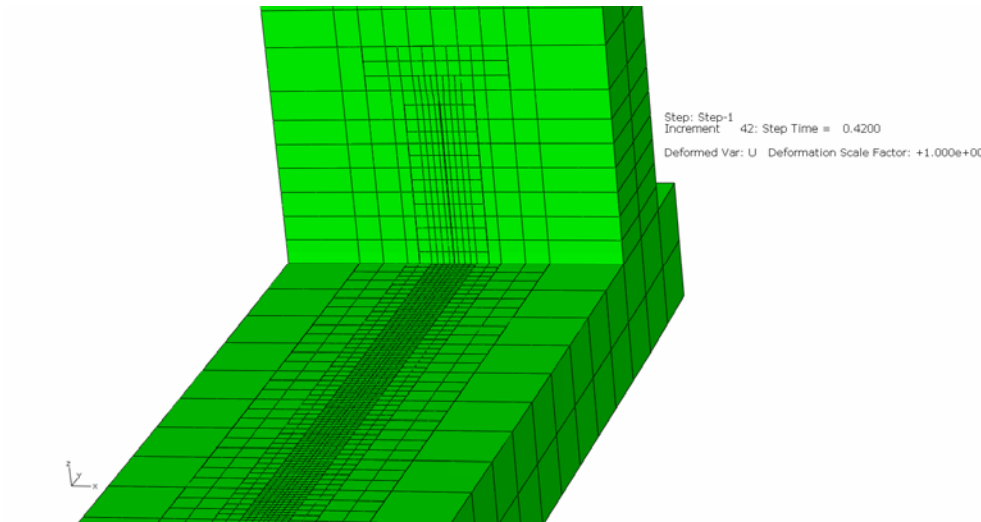
Σχήμα 5.79 Διακύμανση U3 στην πλευρά $y=b$ με/ άνευ ρωγμή ενισχυτικού

5.10 Ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή στην πλάκα $c=144\text{mm}$ ασύμμετρη ως προς το ενισχυτικό από $y=228\text{mm}$ έως $y=300\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή ενισχυτικού

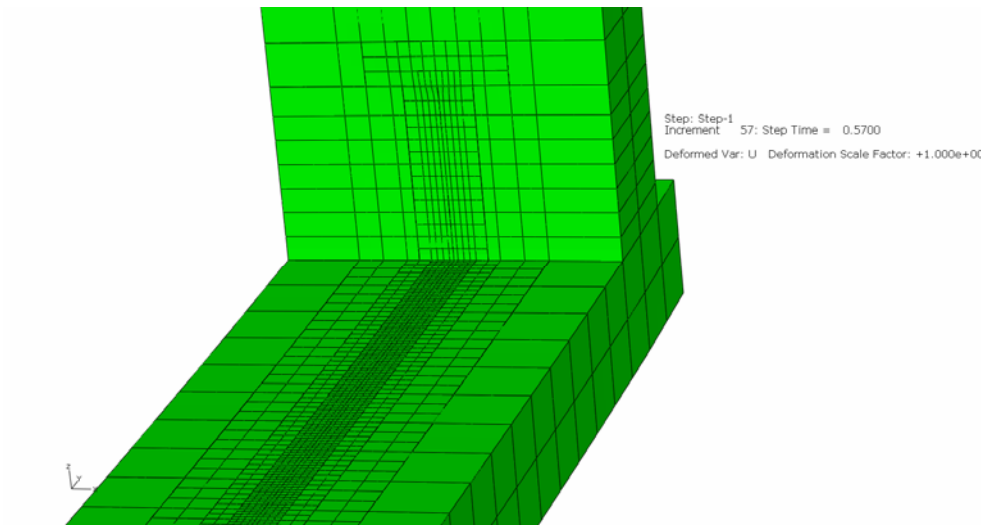
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος πραγματοποιήθηκε με 41934 στοιχεία διαστάσεων από $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ στην περιοχή της ρωγμής έως $8.06\text{mm} \times 8.11\text{mm} \times 5\text{mm}$ στην πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $0.5\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 1.0206\text{mm}$ όσον αφορά τη ρωγμή και $8.06\text{mm} \times 6.1235\text{mm} \times 6.1235\text{mm}$ στο κυρίως τμήμα αυτού. Η μορφολογία της ρωγμής είναι αντίστοιχη με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή διαμπερής στην πλάκα, μη διαμπερής στο ενισχυτικό. Στο Σχήμα 5.80 που ακολουθεί απεικονίζεται η κατάσταση της ρωγμής σε τρία διαφορετικά στάδια φόρτισης (α) Στην έναρξη της συμπίεσης, (β) Στην επαφή των επιφανειών της πλάκας και (γ) Στο «κλείσιμο» της ρωγμής και στην περιοχή του ενισχυτικού.



(α)



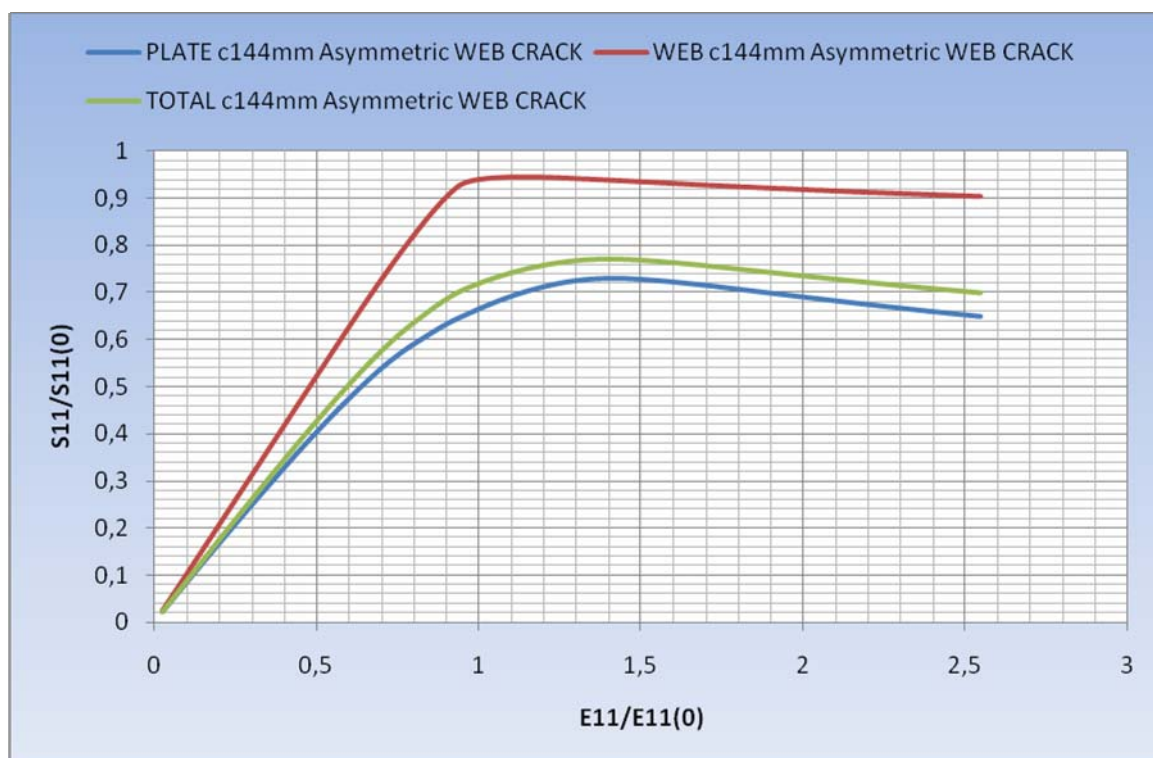
(β)



(γ)

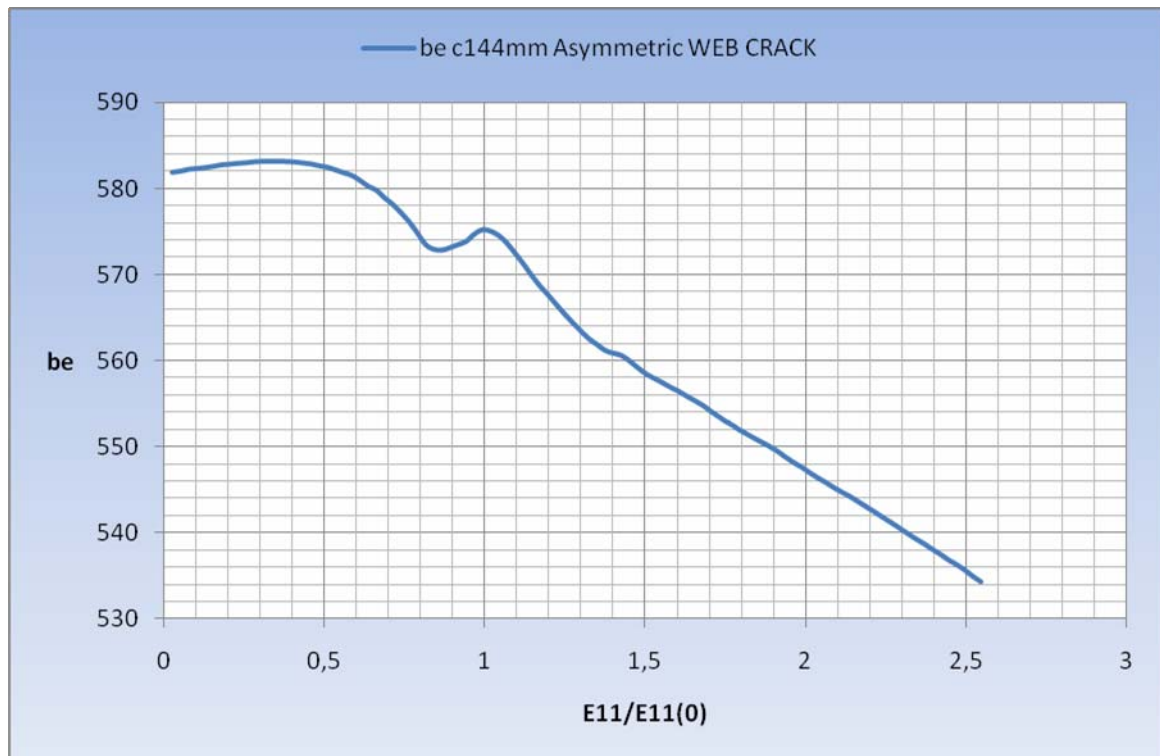
Σχήμα 5.80 Απεικόνιση της κίνησης των δύο επιφανειών της ρωγμής

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για την εν λόγω περίπτωση παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 5.81

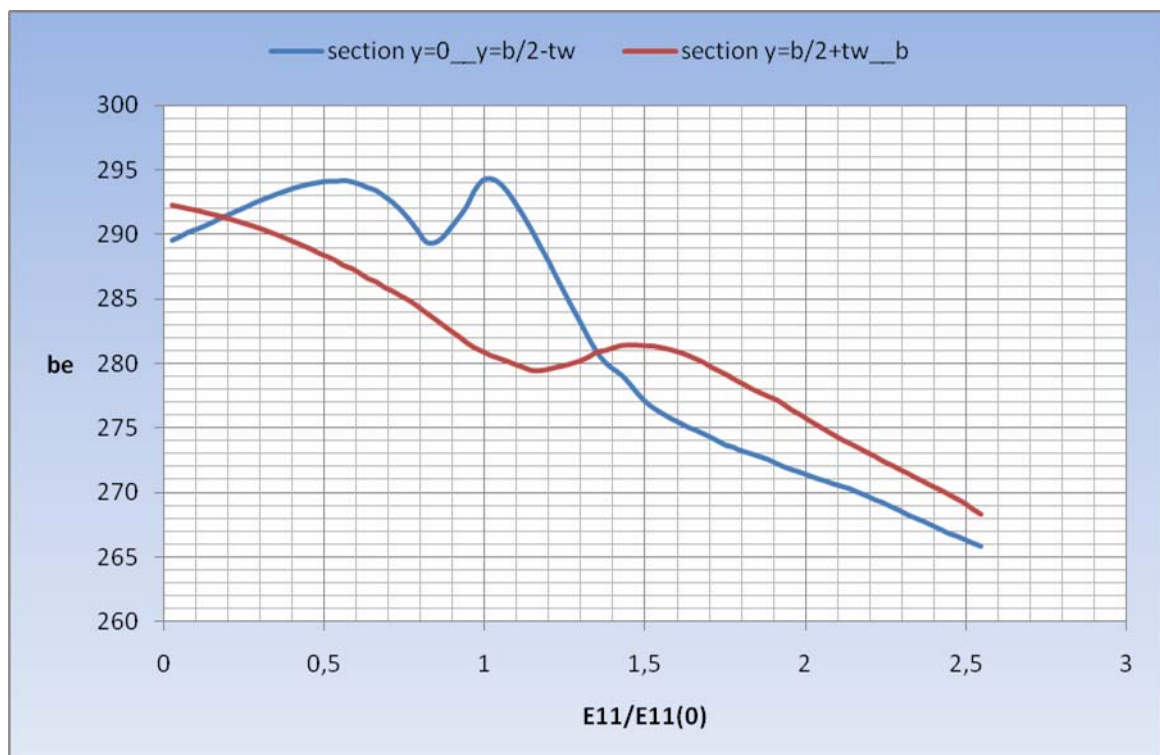


Σχήμα 5.81 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144\text{mm}$ στην πλευρά από $y=0$ έως $y=b/2$ και $c_w=14.7\text{mm}$

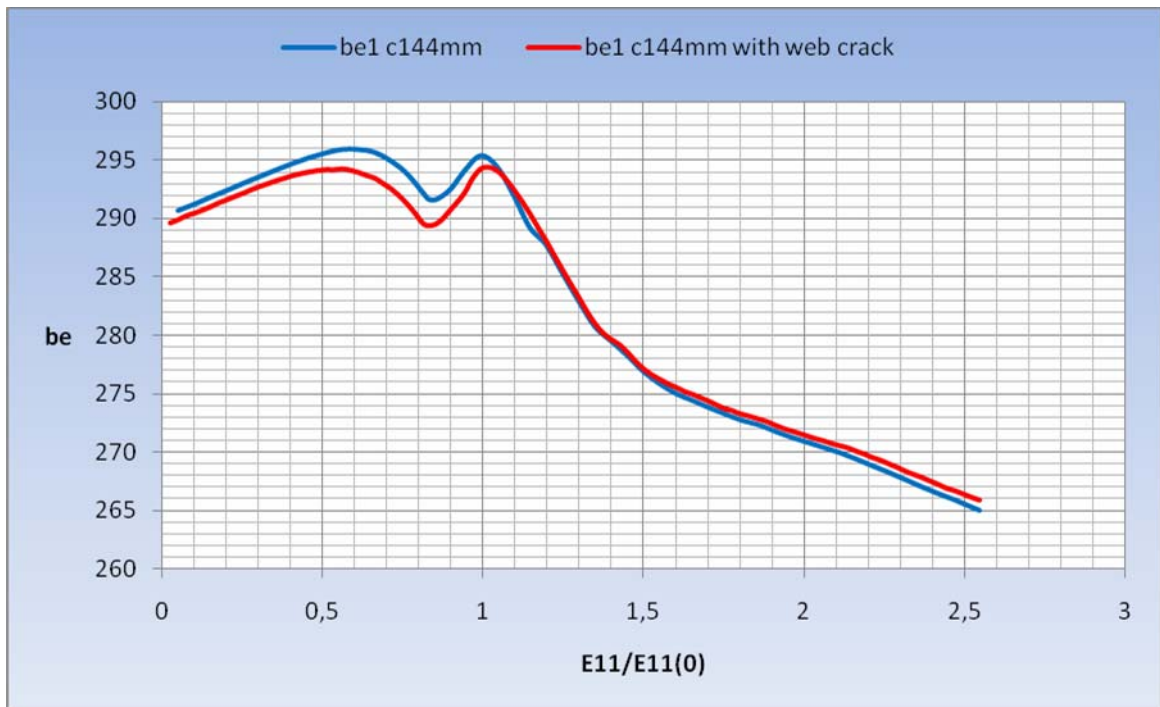
Η μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους στην εν λόγω πλάκα απεικονίζεται στα Σχήματα 5.82 και 5.83, ενώ στα Σχήματα 5.84 (τμήμα από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$) και 5.85 (τμήμα από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$) απεικονίζονται οι διαφοροποιήσεις στην παραλαβή φορτίου που εισάγει η ρωγμή του ενισχυτικού στην κατασκευή. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η εισαγωγή της ρωγμής στο ενισχυτικό δεν αλλάζει σημαντικά τις εν λόγω καμπύλες, κάτι το οποίο αναμενόταν και από τον έλεγχο των μειωτικών καμπυλών φόρτισης. Αξιοσημείωτη είναι η σύγκριση των σχημάτων 5.84 και 5.85, με τα αντίστοιχα 5.75 και 5.76, που αφορούν την πλάκα με ρωγμή μήκους $c=72\text{mm}$. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της ρωγμής μήκους $c=72\text{mm}$, οι εν λόγω καμπύλες διαταράσσονται σε ένα βαθμό με την είσοδο της ρωγμής στο ενισχυτικό, κάτι το οποίο δε συμβαίνει ουσιαστικά στην παρούσα περίπτωση, πιθανόν λόγω του διπλάσιου μήκους της ρωγμής στην πλάκα.



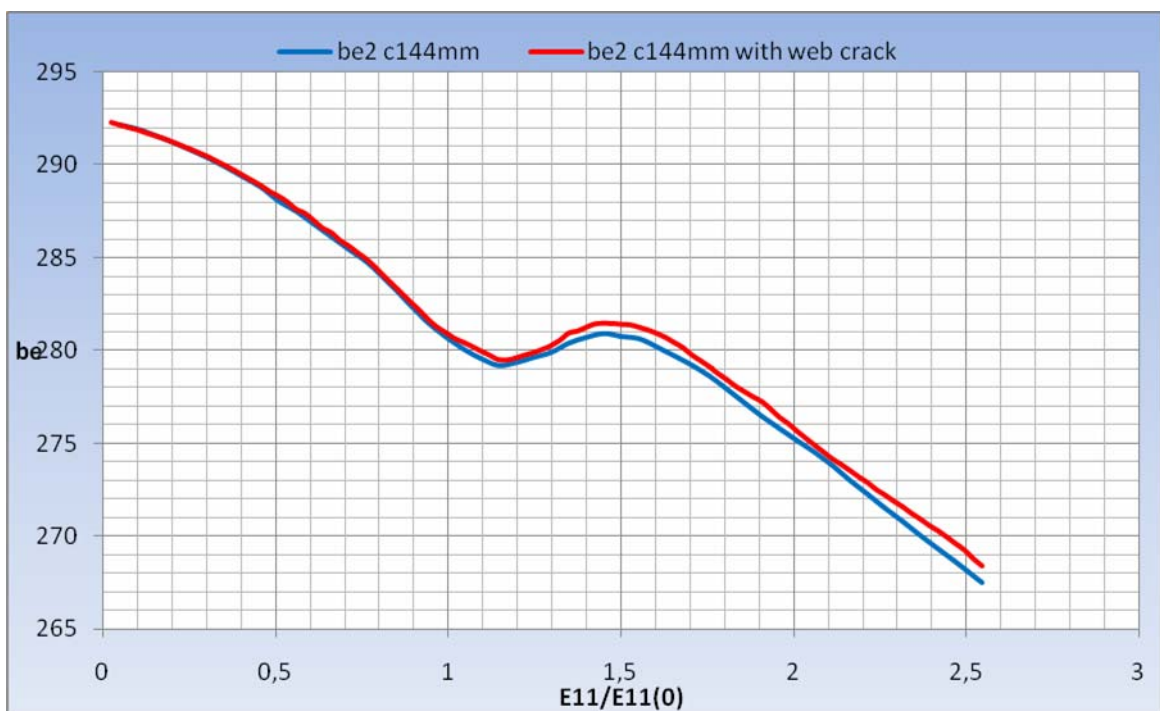
Σχήμα 5.82 Διακύμανση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144mm$ στην πλάκα και επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό $cw=14.7mm$



Σχήμα 5.83 Διακύμανση των ισοδύναμων πλατών για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=144mm$ στην πλάκα και επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό $cw=14.7mm$



Σχήμα 5.84 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών στο τμήμα της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ για τις περιπτώσεις με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό

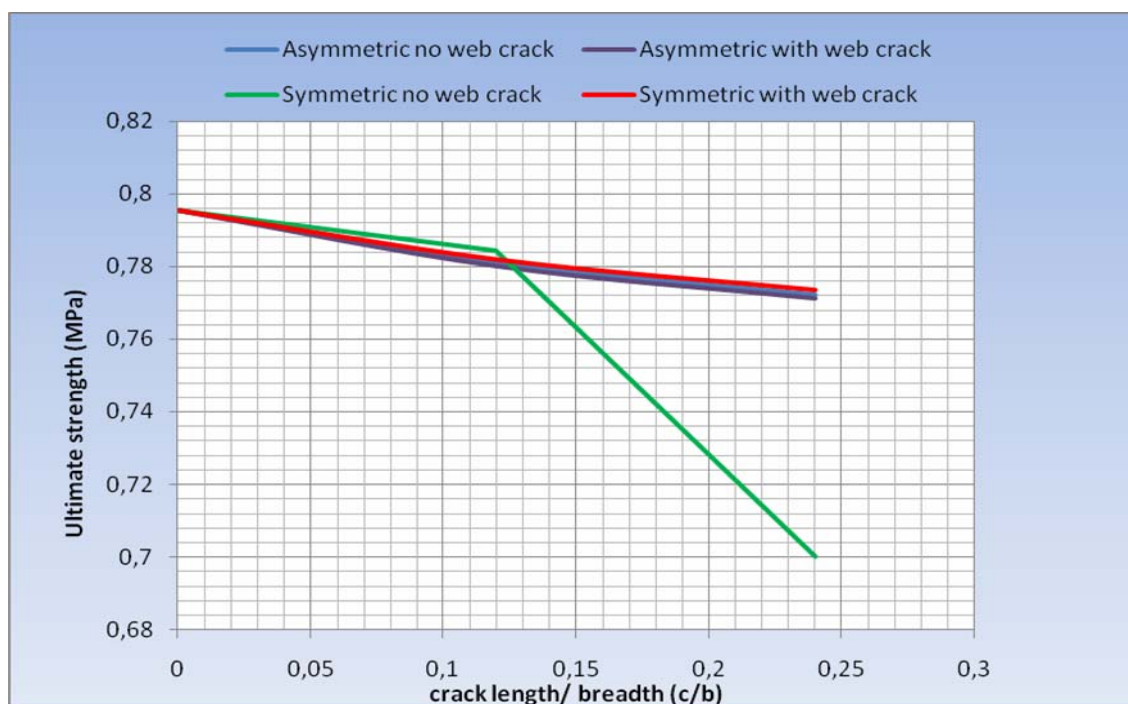


Σχήμα 5.85 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών στο τμήμα της πλάκας από $y= b/2+t_w$ έως $y=b$ για τις περιπτώσεις με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό

Το διάστημα πλάτυνσης καθώς και τα βέλη κάμψης U3 δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις και ως εκ τούτου παραλείπονται.

5.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Αξιολόγηση – Συμπεράσματα

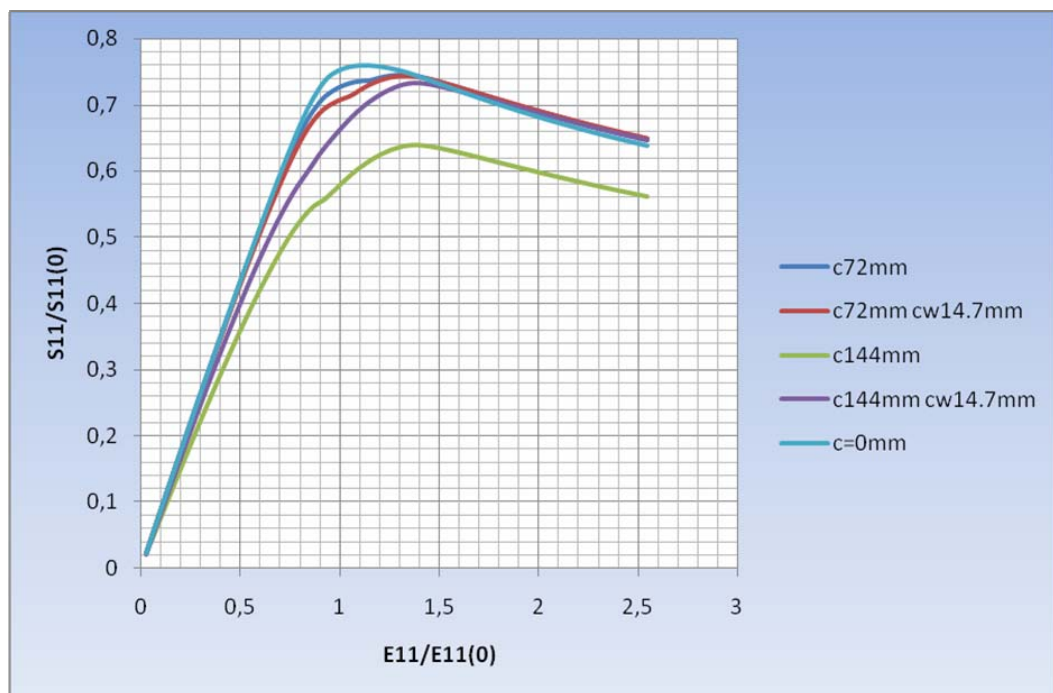
Με την ολοκλήρωση της παρουσίασης των ανωτέρω μοντέλων που αναλύθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στην παρούσα παραγράφου θα αναλυθεί συγκεντρωτικά η συμπεριφορά των ενισχυμένων ελασμάτων για τον εξεταζόμενο λόγο μήκους προς πλάτος. Κατά αυτόν τον τρόπο, στο Σχήμα 5.86 απεικονίζεται η επίπτωση που έχει το μήκος και η θέση της ρωγμής στην πλάκα και η γενικότερη επιρροή της ρωγμής του ενισχυτικού στην κατασκευή. Παρατηρούμε ότι η δυσμενέστερη περίπτωση από πλευράς αντοχής είναι η συμμετρική ρωγμή στην πλάκα μήκους $c=144\text{mm}$ χωρίς επέκταση της ρωγμής στο ενισχυτικό. Αξιοσημείωτη είναι και η σταθερότητα στο φορτίο συμπίεσης που παρουσιάζει το ενισχυμένο έλασμα με συμμετρική ρωγμή $c=144\text{mm}$ και $c_w=14.7\text{mm}$, που υποδεικνύει ότι με το «κλείσιμο» της ρωγμής το ενισχυμένο έλασμα συμπεριφέρεται ως κλειστό για το υπόλοιπο της φόρτισης.



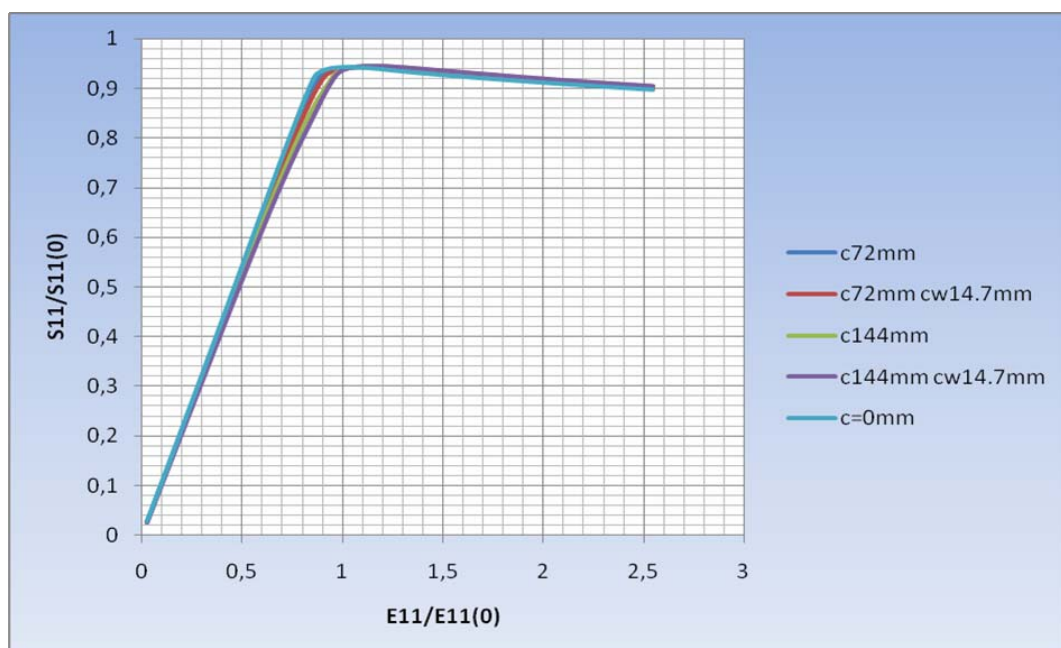
Σχήμα 5.86 Διάγραμμα μέγιστης αντοχής προς το μήκος της ρωγμής για το λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=1$.

Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης ξεχωριστά για την πλάκα, ενισχυτικό υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- (1) Για ίδιο τύπο ρωγμής στην πλάκα ανάλογα με τη θέση αυτής
 (α) Συμμετρική ρωγμή

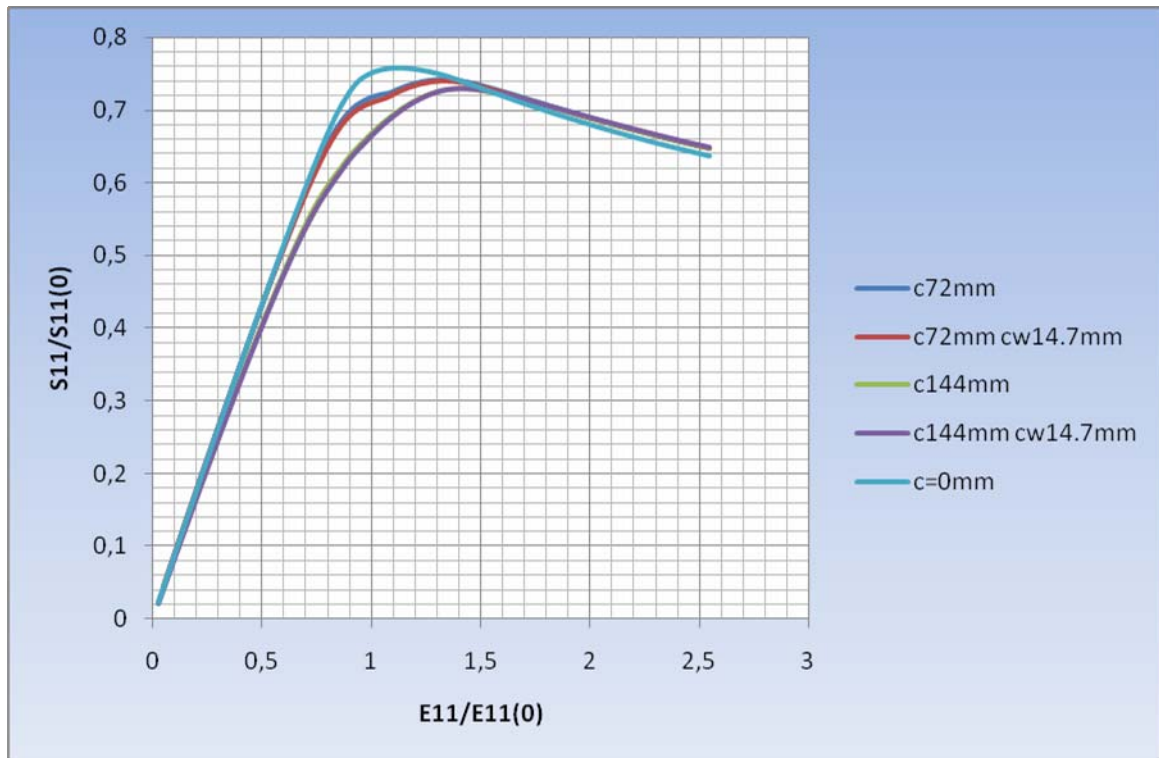


Σχήμα 5.87 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης της πλάκας για συμμετρική ρωγμή

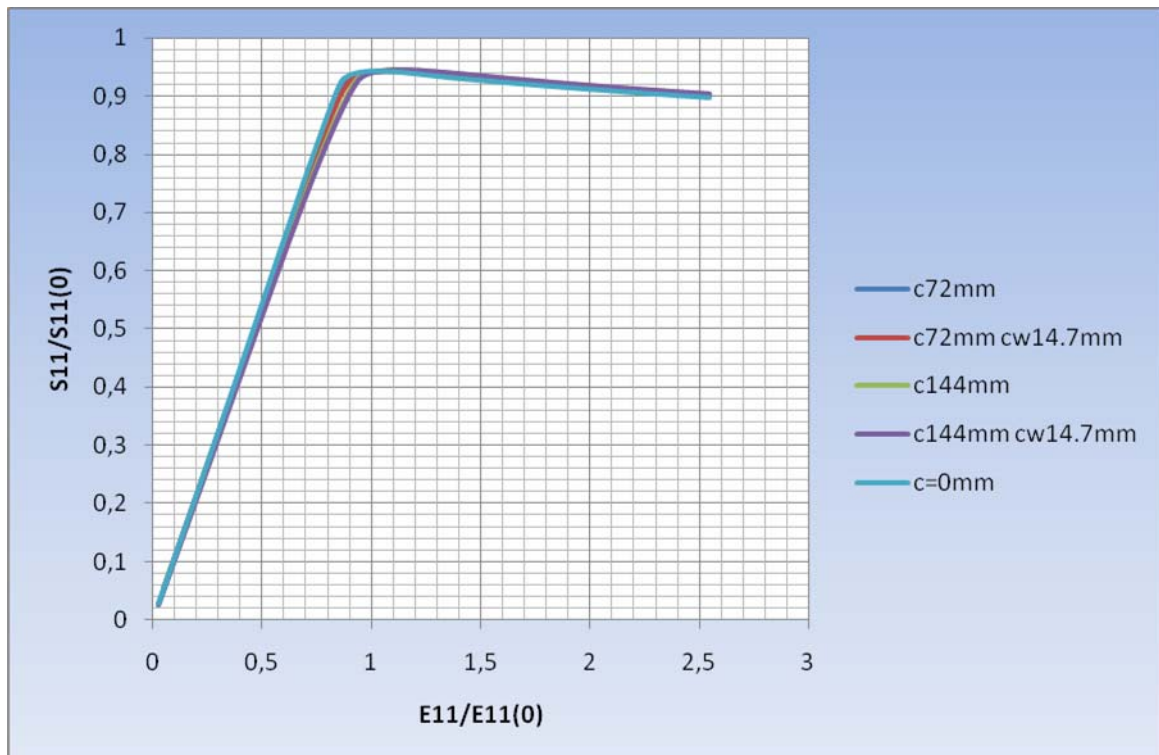


Σχήμα 5.88 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυτικού για συμμετρική ρωγμή

(β) Ασύμμετρη ρωγμή



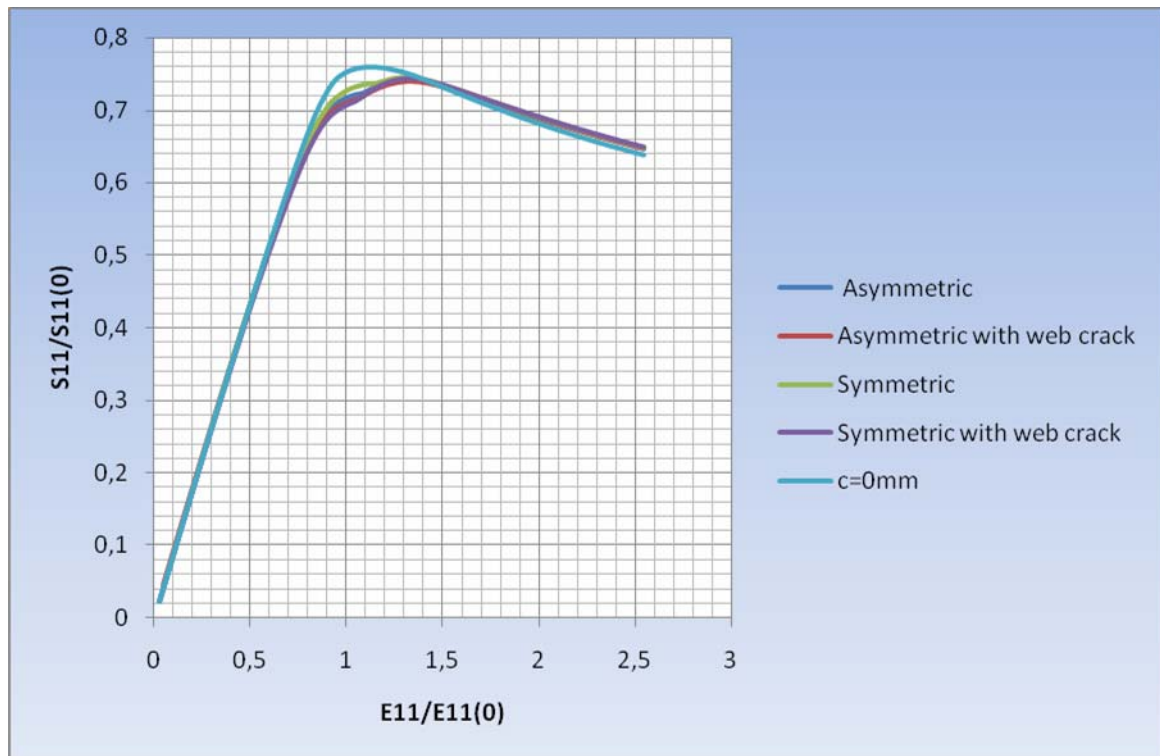
Σχήμα 5.89 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης της πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή



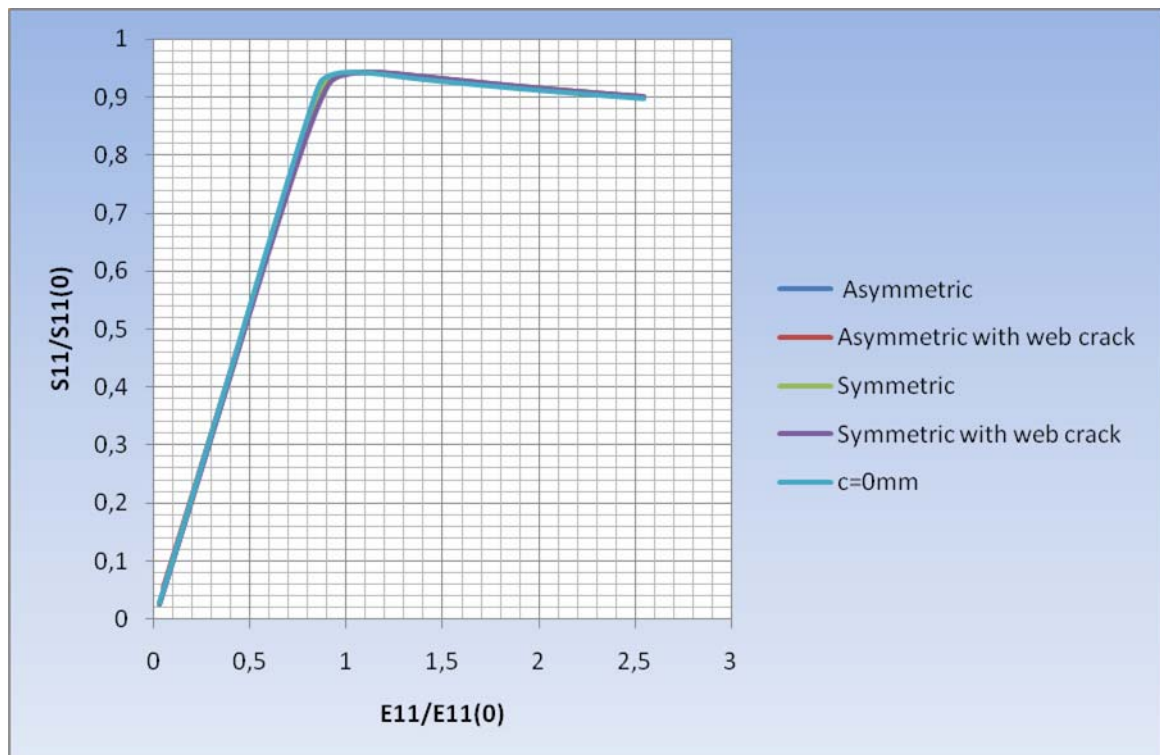
Σχήμα 5.90 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυτικού για ασύμμετρη ρωγμή

(2) Με το ίδιο μήκος ρωγμής

(α) Για ρωγή στην πλάκα μήκους $c=72\text{mm}$

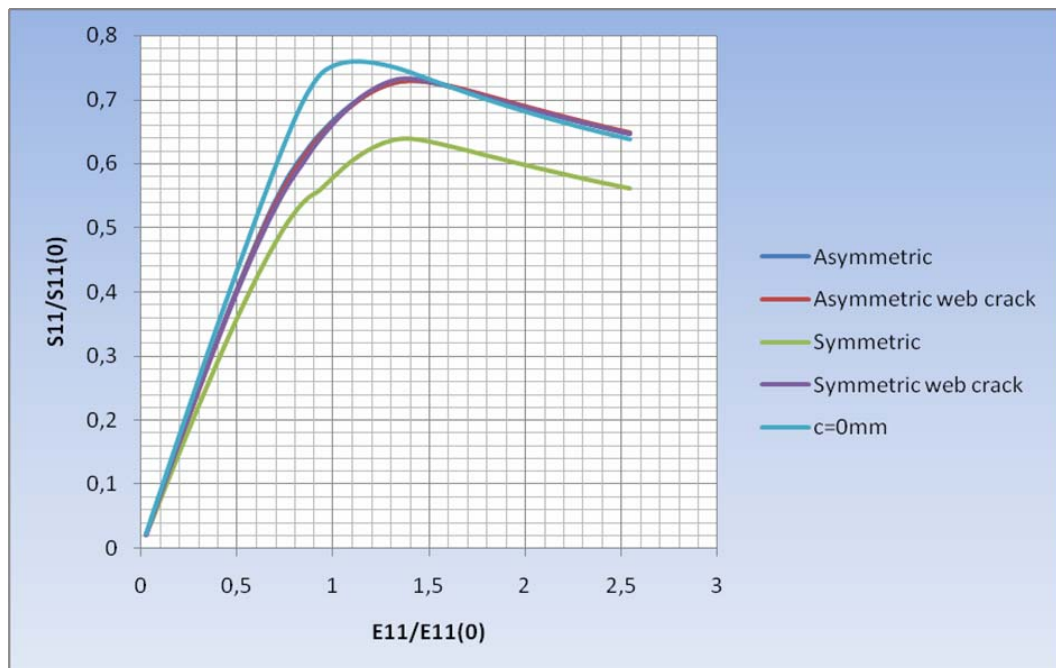


Σχήμα 5.91 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης της πλάκας για ρωγή $c=72\text{mm}$

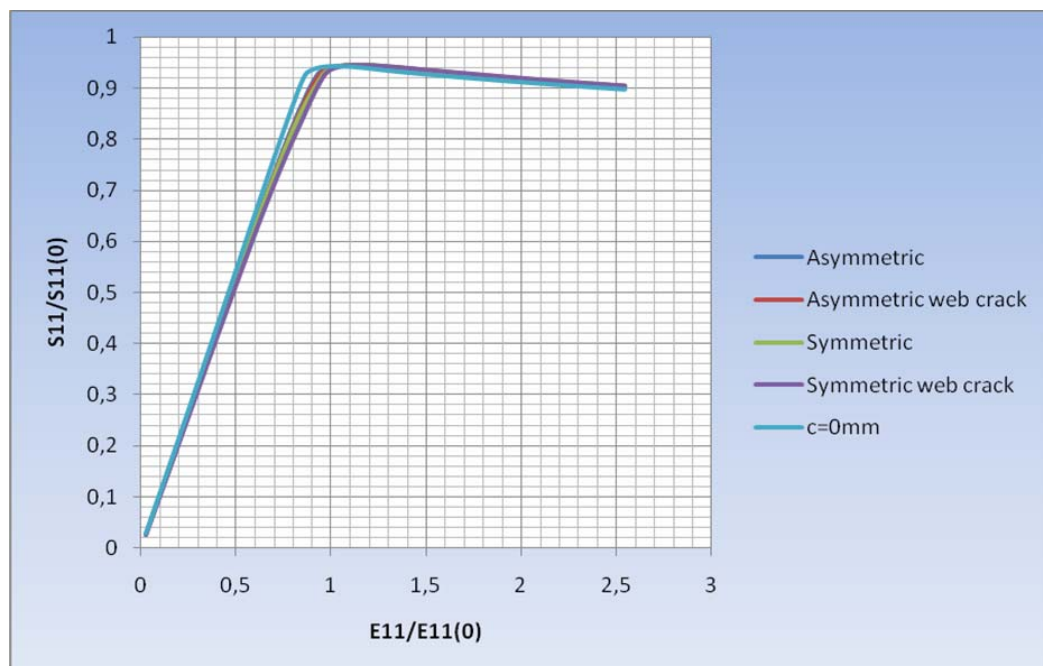


Σχήμα 5.92 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυτικού για ρωγή $c=72\text{mm}$

(β) Για ρωγή στην πλάκα μήκους $c=144\text{mm}$



Σχήμα 5.93 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης της πλάκας για ρωγή $c=144\text{mm}$



Σχήμα 5.94 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυτικού για ρωγή $c=144\text{mm}$

Από τη μελέτη των παραπάνω καμπυλών καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

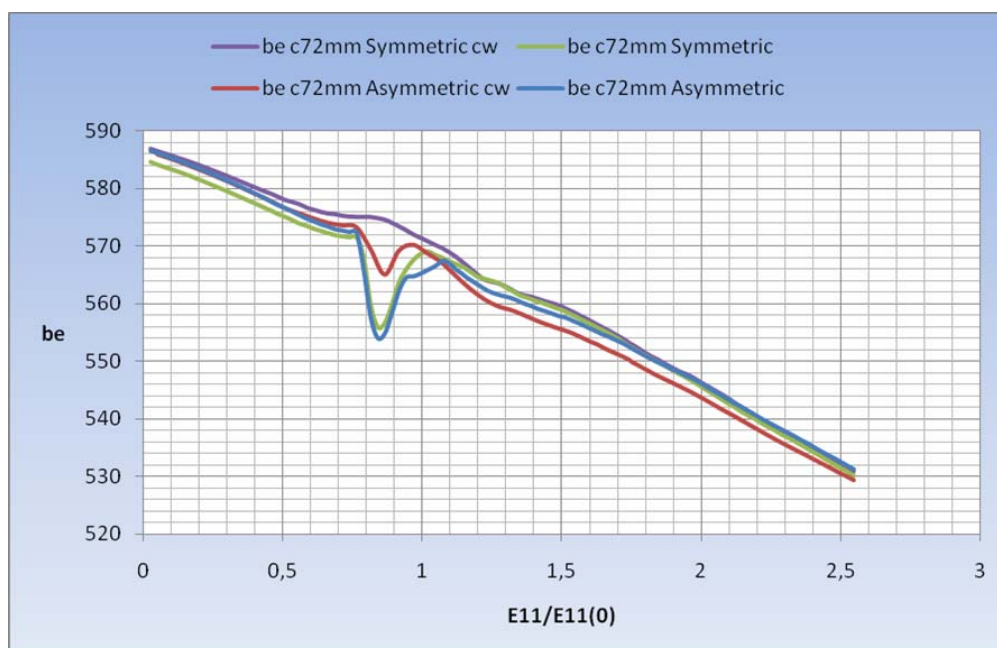
(1) Η μέγιστη αντοχή στην πλάκα για το συγκεκριμένο aspect ratio δείχνει μεγαλύτερη ευαισθησία στη συμμετρική ρωγή και σε λόγο μήκους ρωγμής

προς πλάτος πλάκας $c/b > 0.12$, όπως φανερώνει η διασπορά των καμπυλών για τους δύο αυτούς σταθερούς παράγοντες.

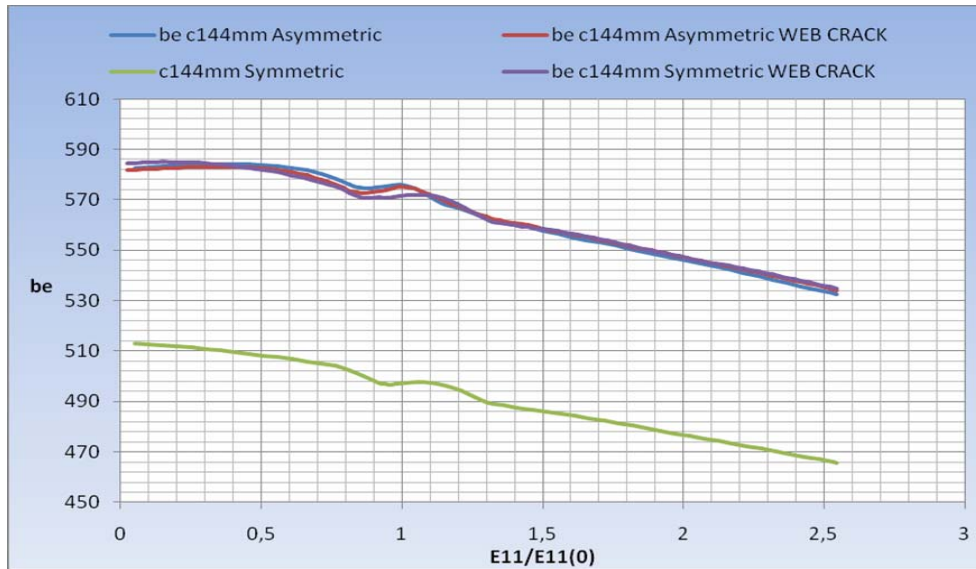
(2) Το ίδιο παρατηρείται σε αρκετά μικρότερο βαθμό και στο ενισχυτικό. Θα πρέπει επίσης, να επισημανθεί η σταθερότητα που παρουσιάζει η αντοχή του ενισχυτικού είτε υφίσταται ρωγμή επί αυτού είτε όχι.

(3) Γενικά οι καμπύλες στην πλάκα, πλην της περιπτώσεως συμμετρικής ρωγμής $c=144\text{mm}$ άνευ ρωγμής ενισχυτικού, ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι ισορροπίας “equilibrium path”, όταν μπουν στη διαδικασία κατάρρευσης.

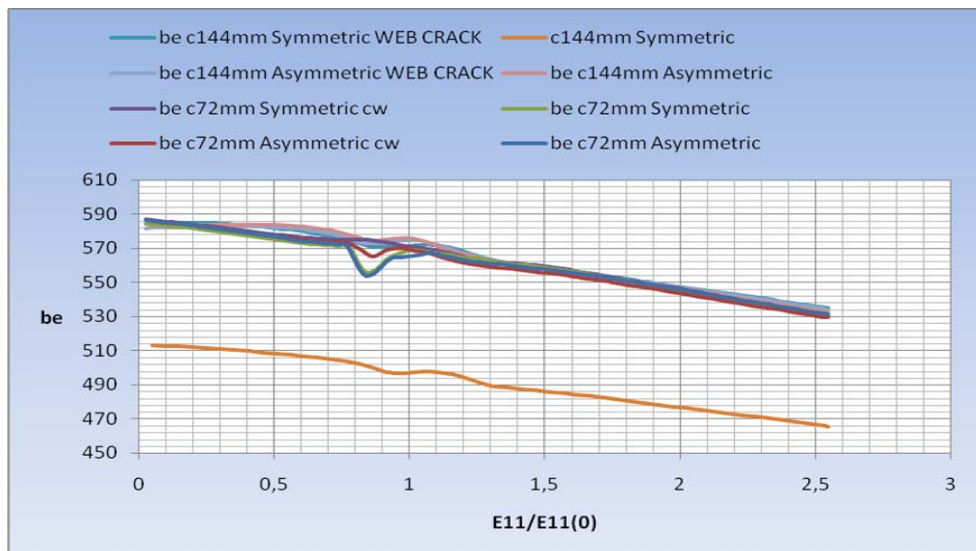
Η σύγκριση των ισοδύναμων πλατών (effective breadth) μας οδηγεί στα Σχήματα 5.95 (για ρωγμή μήκους $c=72\text{mm}$), 5.96 (για ρωγμή μήκους $c=144\text{mm}$) και 5.97 (για το σύνολο των μοντέλων). Όπως αναμενόταν και από τη σύγκριση των μειωτικών καμπυλών, η κατανομή των μεμβρανικών τάσεων για το εν λόγω κλάσμα μήκους προς πλάτος $a/b=1$ δε διαφοροποιείται σημαντικά, εκτός της περιπτώσεως συμμετρικής ρωγμής $c=144\text{mm}$ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό, όπως μπορεί να φανεί και από το Σχήμα 5.98 που παρουσιάζει την κατανομή τάσεως N_{xx} στις φορτισμένες πλευρές της πλάκας (μη συμπεριλαμβανομένου του τμήματος κάτωθεν του ενισχυτικού) για αντίστοιχα στάδια φόρτισης.



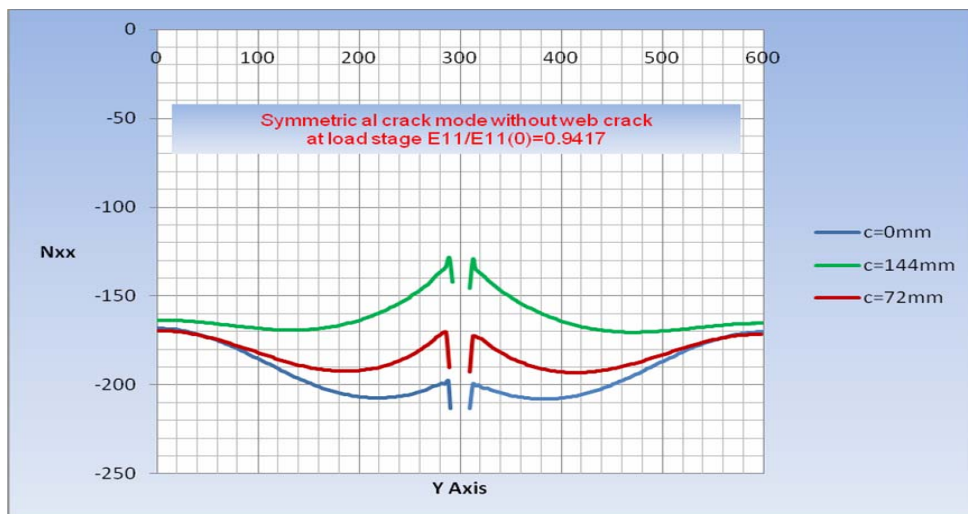
Σχήμα 5.95 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών για ρωγμή μήκους $c=72\text{mm}$



Σχήμα 5.96 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών για ρωγή μήκους $c=144\text{mm}$

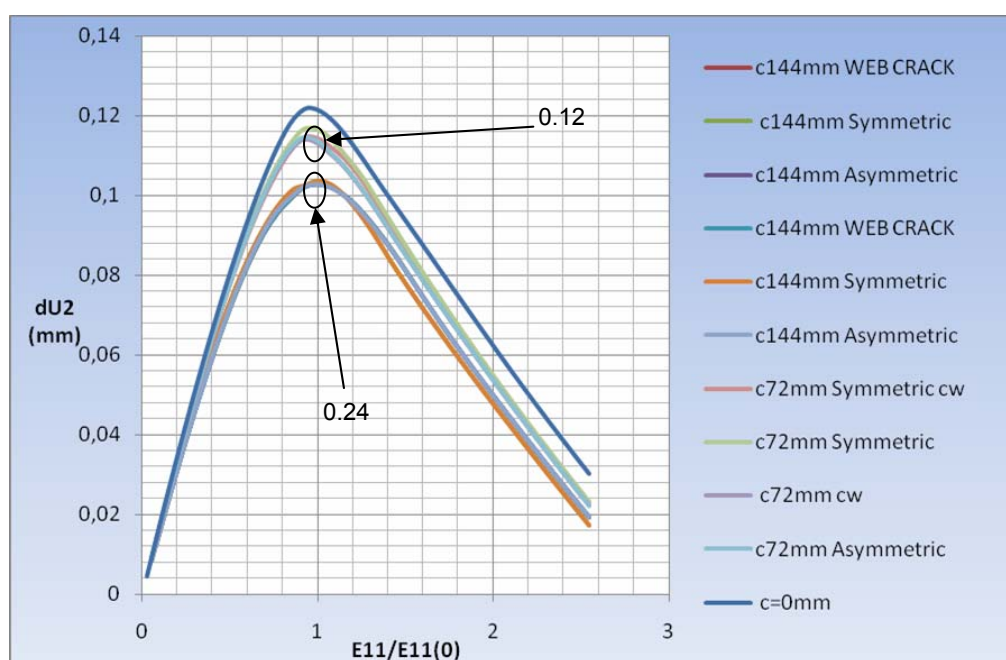


Σχήμα 5.97 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών για όλα τα μοντέλα με $a/b=1$



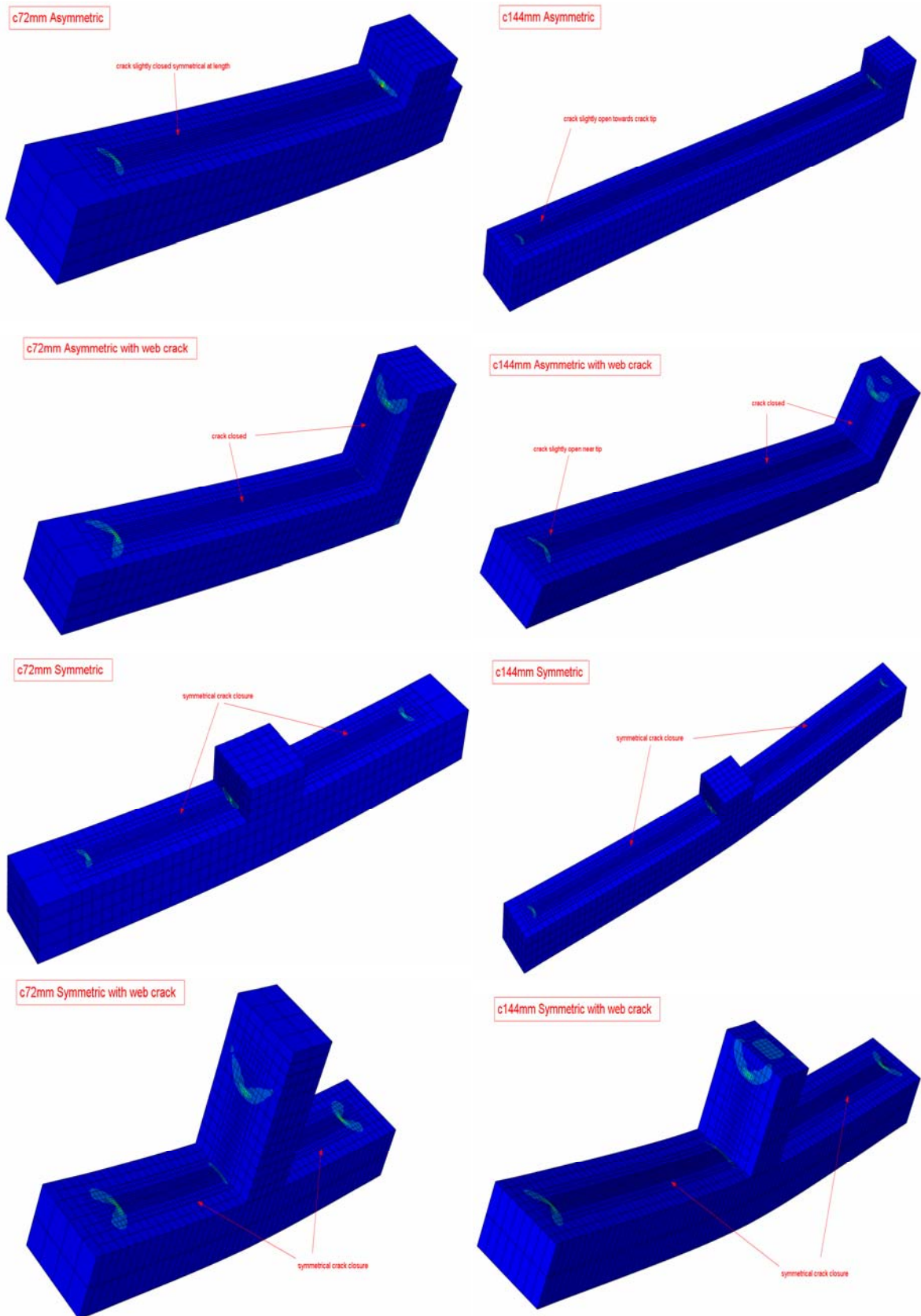
Σχήμα 5.98 Σύγκριση κατανομής τάσεως N_{xx} στη φορτισμένη πλευρά

Από τη σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης των μοντέλων κατά τη διαδικασία της συμπίεσης σύμφωνα με το Σχήμα 5.99, προκύπτει ότι για λόγο ρωγμής προς πλάτος $c/b=0.12$, το εν λόγω μέγεθος, αφενός έχει συγκρίσιμες τιμές με το μοντέλο χωρίς ρωγμή, αφετέρου εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους στα ίδια στάδια φόρτισης. Όσον αφορά τα μοντέλα με $c/b=0.24$ παρατηρούμε ότι έχουν μικρότερες τιμές πλάτυνσης με μετατόπιση του μεγίστου σε μεγαλύτερο στάδιο φόρτισης (περίπου για $E_{11}=E_{11}(0)$). Συναφώς εκτιμάται ότι για λόγο $c/b>0.12$ περιορίζεται το φαινόμενο πλάτυνσης του μοντέλου, καθώς η ενέργεια της συμπίεσης «καταναλώνεται» στην επαφή των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επαναληφθεί ότι οι κόμβοι στις δύο (2) αφόρτιστες πλευρές (όπου μετρήθηκε το συγκεκριμένο μέγεθος) έχουν περιοριστεί σε u_y =σταθερό.



Σχήμα 5.99 Σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης κατά την ανάλυση

Τέλος, στο Σχήμα 5.100 απεικονίζεται η τελική μορφή στην περιοχή της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης για όλα τα ρηγματωποιημένα μοντέλα με λόγο $a/b=1$.



Σχήμα 5.99 Κατάσταση της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης όλων των μοντέλων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΠΛΑΤΟΣ $A/B=1.5$

6.1 Γενικά

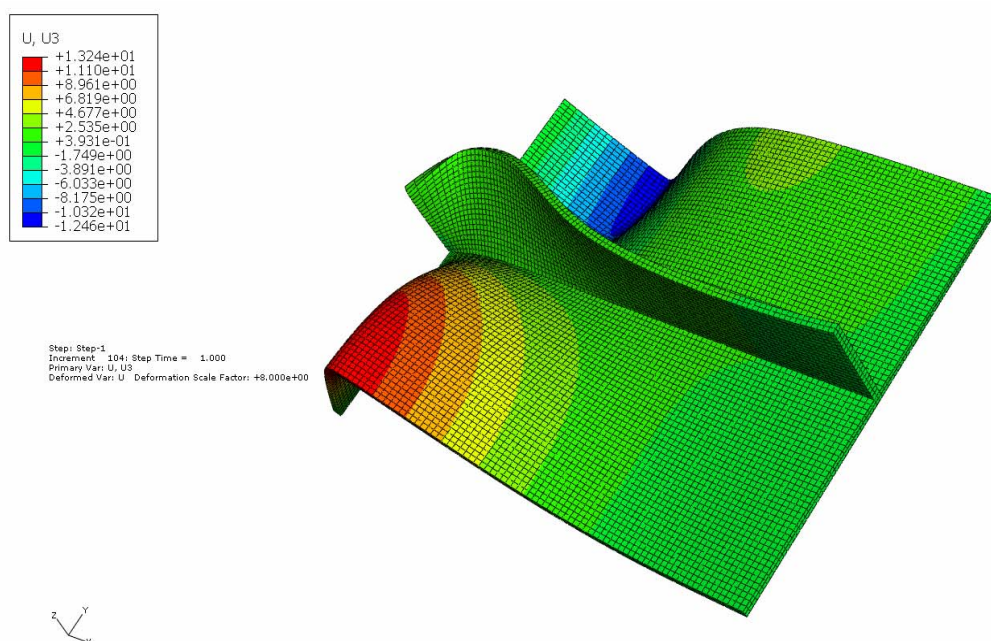
Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την ανάλυση των μοντέλων με λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=1.5$, χωρίς ρωγμή, με ρωγμή στην πλάκα πάχους 0.3mm, με ρωγμή στην πλάκα και στο ενισχυτικό, καθώς επίσης και με μεταβολή της θέσεως της ρωγμής της πλάκας κατά αντιστοιχία με το προηγούμενο κεφάλαιο για $a/b=1$. Τα εν λόγω μοντέλα σύμφωνα με τη σειρά παρουσίασης και η παραμετρική τους διαφοροποίηση συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα 6.1. Κατά την ανάλυση του συνόλου των μοντέλων με $a/b=1.5$, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 4.3 (Σχήμα 4.3) εισήχθη αρχική ημιτονοειδής παραμόρφωση με τη μέγιστη τιμή $w_{op}=2.84\text{mm}$ να βρίσκεται εκατέρωθεν του σημείου $x=a/2$ στα δύο (2) τμήματα της πλάκας.

Πίνακας 6.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων $a/b=1.5$

A/A	c (mm)	b (mm)	c/b	c_w (mm)	h_w (mm)	c_w/h_w	s (mm)
1	0	400	0	0	81.65	0	0
2	48	400	0.12	0	81.65	0	200
3	96	400	0.24	0	81.65	0	200
4	48	400	0.12		81.65	0.12	200
5	96	400	0.24	9.798	81.65	0.12	200
6	48	400	0.12	0	81.65	0	176
7	96	400	0.24	0	81.65	0	152
8	48	400	0.12	9.798	81.65	0.12	176
9	96	400	0.24	9.798	81.65	0.12	152

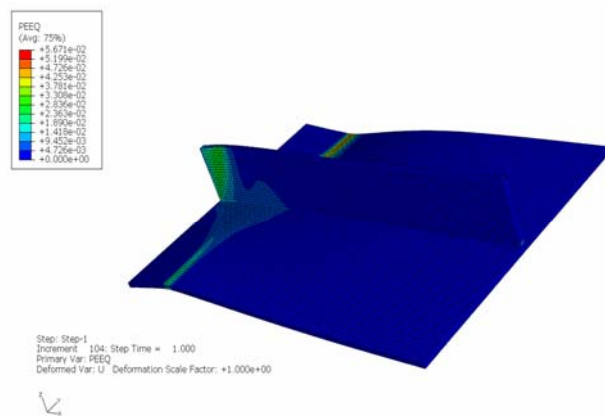
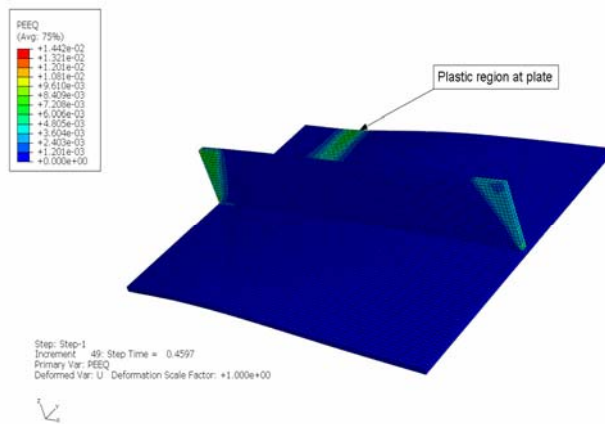
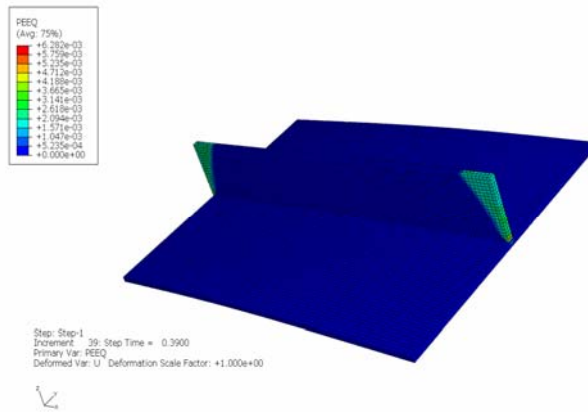
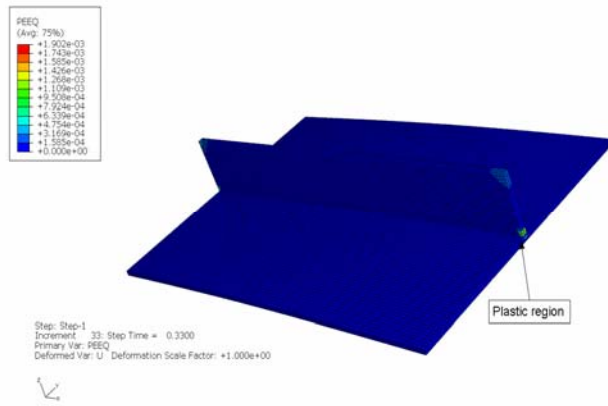
6.2 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ χωρίς ρωγμές

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 20400 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $6\text{mm} \times 4.8979\text{mm} \times 3.335\text{mm}$ στην πλάκα και $6\text{mm} \times 4.0825\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$ στο ενισχυτικό. Στο Σχήμα 6.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η παραμόρφωση του ενισχυμένου ελάσματος στο τέλος της φόρτωσης (μεταβλητή U_3 – βαθμός μεγέθυνσης 8). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, το έλασμα παραμορφώθηκε με σχηματισμό δύο (2) ημι κυμάτων.



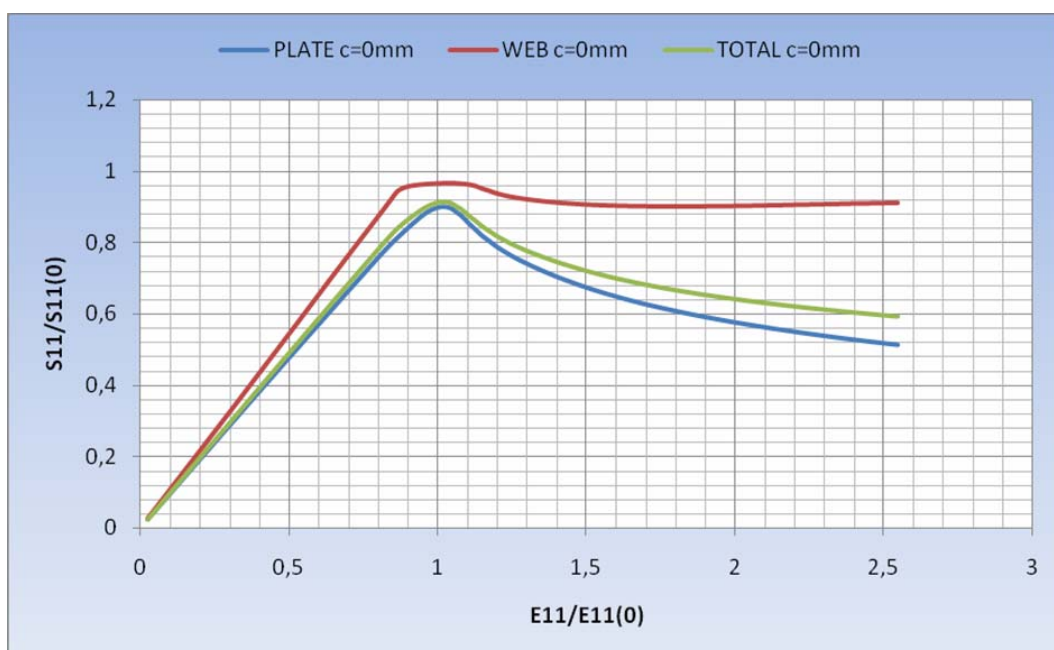
Σχήμα 6.1 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1.5$ άνευ ρωγμής

Όσον αφορά την πλαστική ροή στο συγκεκριμένο μοντέλο, ξεκινά αρχικά από τα σημεία ένωσης του ενισχυτικού με την πλάκα στη φορτισμένη πλευρά και στη συνέχεια επεκτείνεται καθ' ύψος του ενισχυτικού με διαγώνια διεύθυνση ως προς τη διατομή. Ακολουθώντας, ενεργοποιείται η πλαστική ροή στο τμήμα της πλάκας από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$, λόγω της βύθισης του εν λόγω τμήματος που συνοδεύεται από την τοπική κάμψη του ενισχυτικού στην περιοχή από $x=0$ έως $x=a/2$. Όλα τα ανωτέρω, καθώς και η τελική μορφή της πλαστικοποίησης στο περιγραφόμενο μοντέλο συνοψίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.2



Σχήμα 6.2 Πλαστική ροή στην εξέλιξη της συμπίεσης

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ χωρίς ρωγή παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.3. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε οι εν λόγω καμπύλες παρουσιάζουν μια εντελώς διαφορετική μορφή από την προηγούμενη περίπτωση (για $a/b=1$) τόσο στην πλάκα, όσο και στο ενισχυτικό. Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη αντοχή της κατασκευής επιτυγχάνεται για το στάδιο φόρτισης $E_{11}/E_{11(0)}=1.018$. Συναφώς, η έντονη πτώση στην καμπύλη του ενισχυτικού για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)}=1.069$ συμπίπτει με το σχηματισμό των δύο (2) ημικυμάτων στην πλάκα.



Σχήμα 6.3 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$

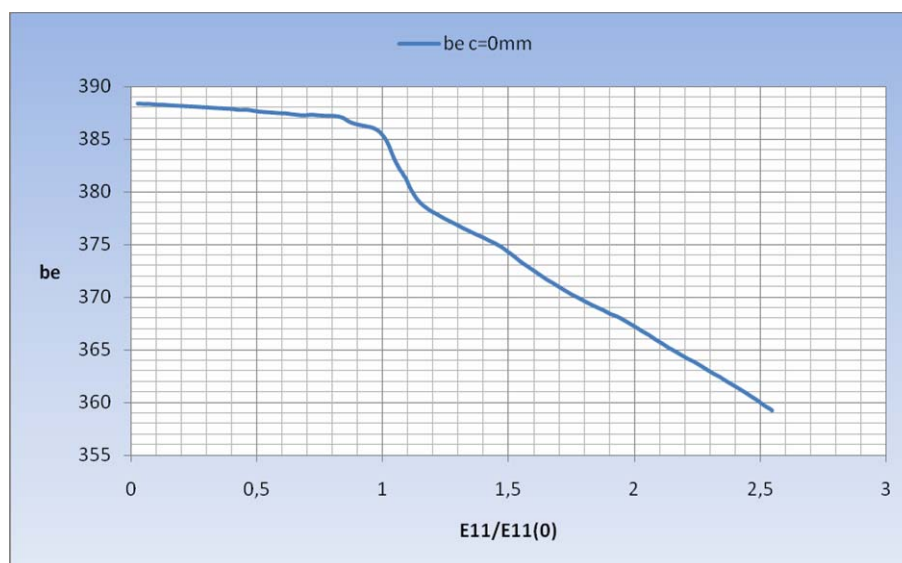
Στα Σχήματα 6.4 και 6.5 που ακολουθούν, απεικονίζεται η μεταβολή του ισοδύναμου πλάτους συνολικά και ανά τμήμα. Από τα εν λόγω σχήματα, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(1) Σε στάδιο φόρτισης $E_{11}/E_{11(0)}=0.992$ (ένα στάδιο πριν τη μέγιστη αντοχή) αλλάζει κλίση, η εν λόγω καμπύλη του συνολικού πλάτους οδηγώντας σε αρκετά μικρότερες τιμές

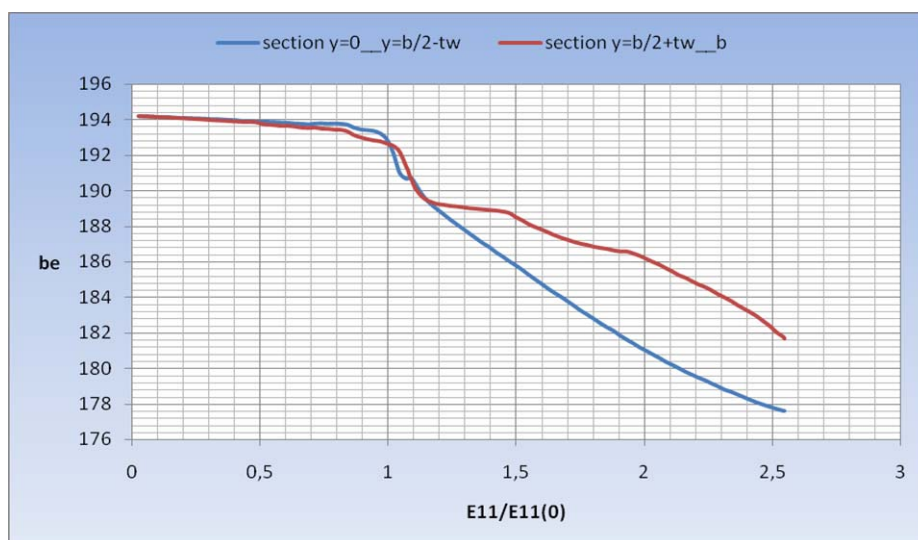
(2) Στο στάδιο φόρτισης $E_{11}/E_{11(0)}=1.069$ αρχίζουν να σχηματίζονται τα δύο (2) ημι κύματα στην πλάκα. Η ενεργοποίηση των κυμάτων οδηγεί προοδευτικά σε αλλαγή της κλίσης κατάρρευσης της πλάκας. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τα δύο

(2) ημικύματα ουσιαστικά ενεργοποιούν ένα τελευταίο μηχανισμό αντίστασης της κατασκευής απέναντι στην ολική κατάρρευση

(3) Από την εξέταση του σχήματος 6.5 παρατηρούμε ότι αρχικά η κατανομή του φορτίου είναι κοινή και για τα δύο (2) τμήματα της πλάκας, στη συνέχεια πλησιάζοντας τη μέγιστη αντοχή, το φορτίο αυξάνεται στο τμήμα από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$, ενώ μετά από αυτό το σημείο παραλαμβάνει φορτίο το έτερο τμήμα μέχρι την ολική κατάρρευση. Αξιοσημείωτο είναι ότι το σημείο τομής των δύο καμπυλών μετά το σημείο μέγιστης αντοχής συμπίπτει με το σχηματισμό των κυμάτων.

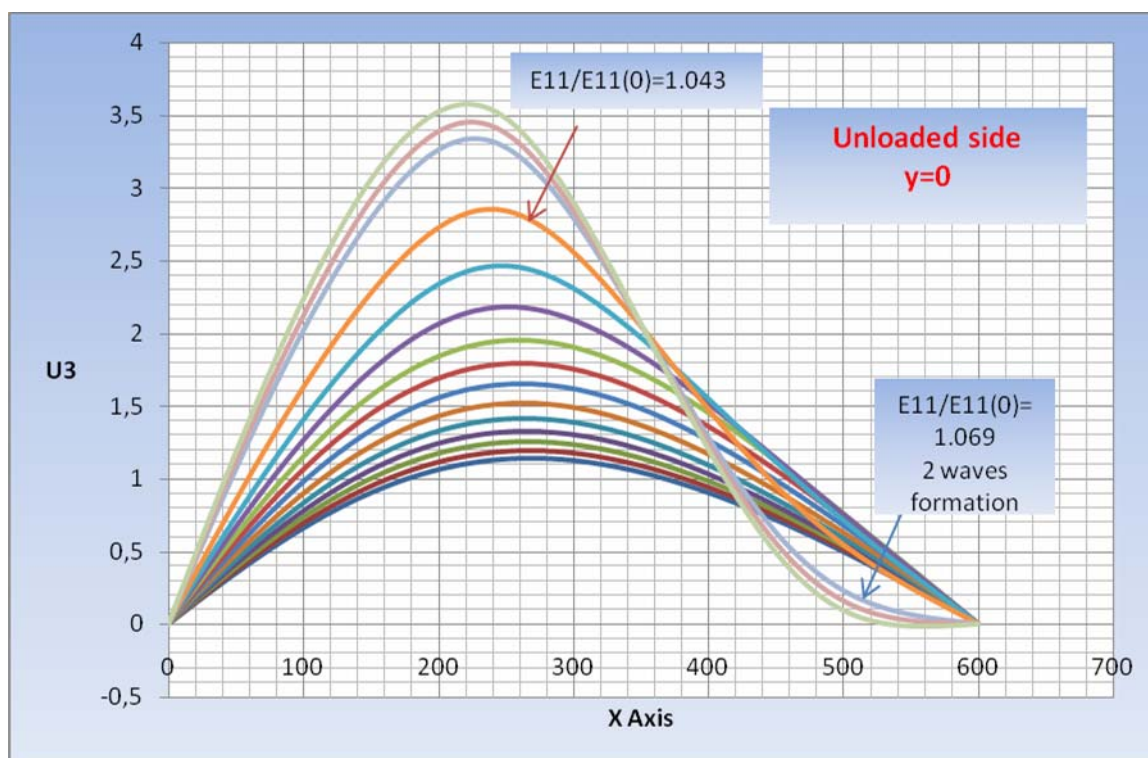


Σχήμα 6.4 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$

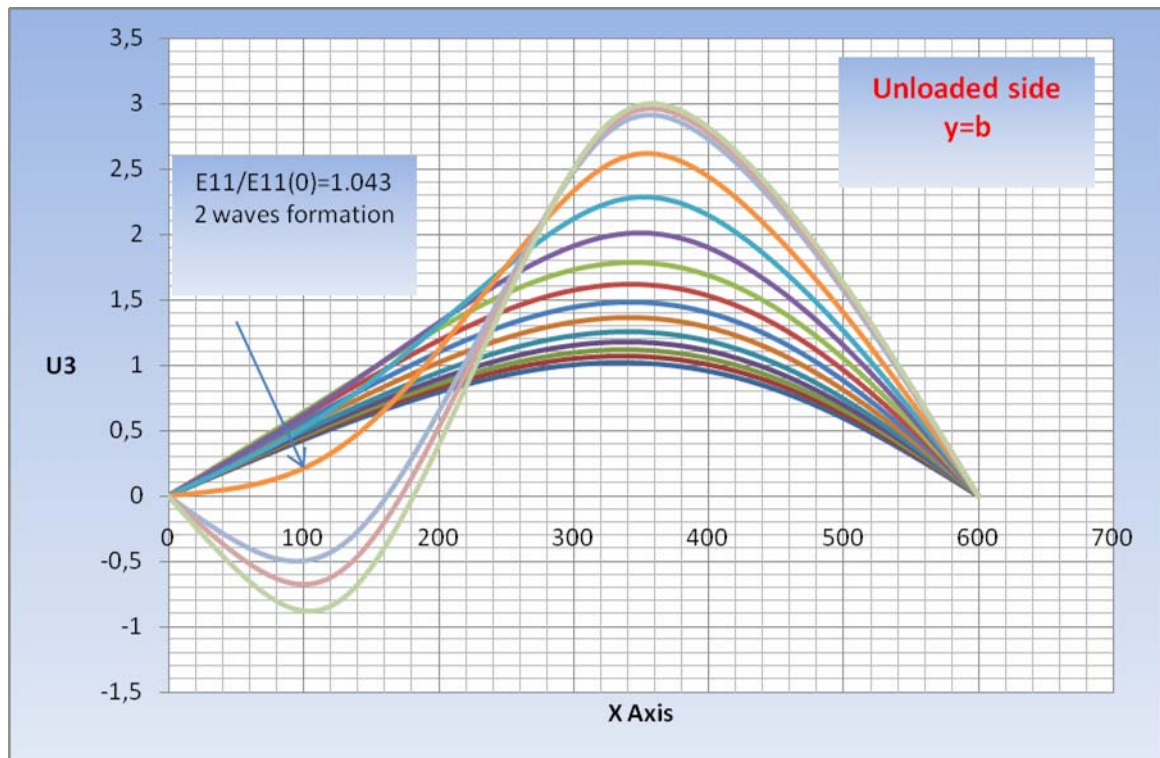


Σχήμα 6.5 Μεταβολή ισοδυνάμων πλατών στα δύο τμήματα της πλάκας

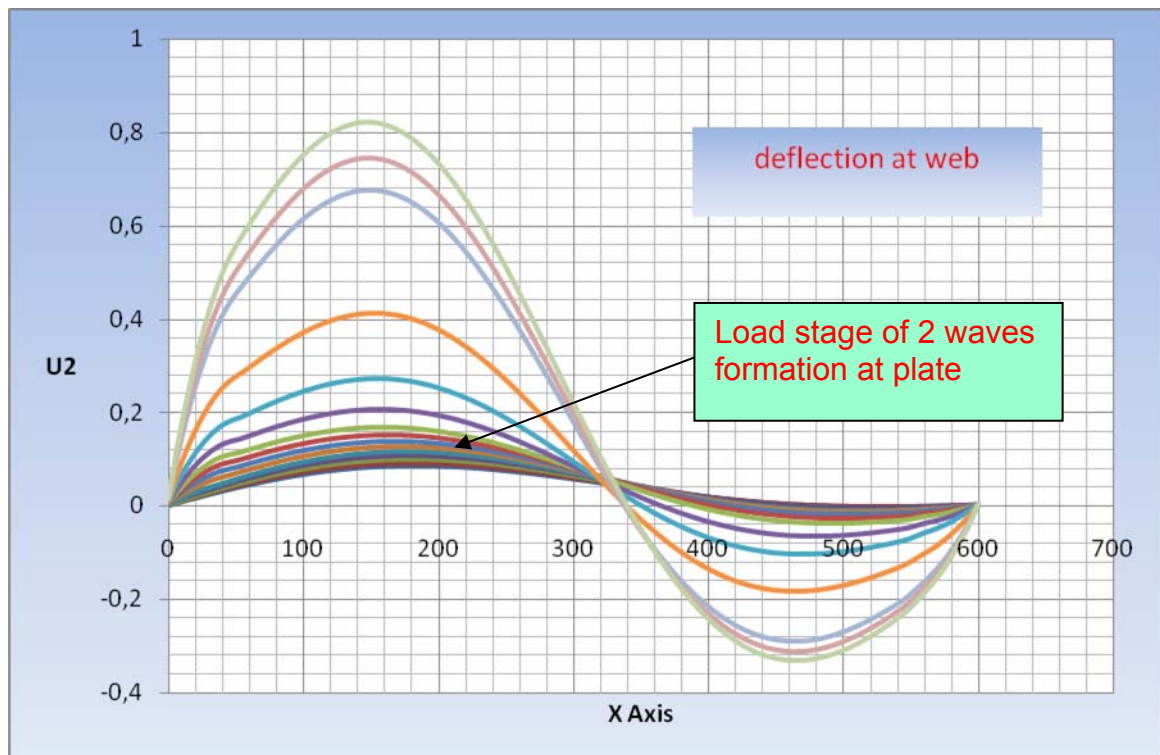
Όσον αφορά τα βέλη κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές της πλάκας και U_2 στο ενισχυτικό, αυτά παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.6 ($y=0$), 6.7($y=b$) και 6.8 (κατά μήκος του ενισχυτικού). Οι απεικονίσεις αφορούν συνεχόμενα στάδια φόρτισης μέχρι λίγο μετά τη δημιουργία των κυμάτων και συγκεκριμένα για λόγους ανηγμένης παραμόρφωσης από $E_{11}/E_{11(0)}=0.7636$ έως 1.081. Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 6.7, η ενεργοποίηση των κυμάτων πραγματοποιείται πρώτα στο τμήμα της πλάκας από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$ και στη συνέχεια ακολουθεί το έτερο τμήμα, το οποίο ουσιαστικά «τραβιέται» από το ενισχυτικό (Σχήμα 6.8). Σε παραλληλισμό των συγκεκριμένων σχημάτων με το προηγούμενο σχήμα 6.5 των ισοδυνάμων πλατών, παρατηρούμε τη βύθιση του τμήματος από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$, που οδηγεί στη συνέχεια, στην περαιτέρω ανακατανομή των τάσεων στο ενισχυμένο έλασμα με τη συνεπακόλουθη κάθετη μετατόπιση του έτερου τμήματος προς την αντίθετη, όμως, κατεύθυνση. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί η σταδιακή μετακίνηση των μεγίστων της κάθετης παραμόρφωσης στην πλάκα προς την κατεύθυνση των φορτισμένων πλευρών, η οποία και επάγει την έντονη μετάβαση του αντίστοιχου μεγίστου στο ενισχυτικό (u_y) προς τον άξονα $x=0$. Ειδικότερα, υφίσταται μια δεξιόστροφη κίνηση των μεγίστων U_3 στην κατασκευή, που καθοδηγείται από τη θέση των αρχικών ατελειών στην πλάκα.



Σχήμα 6.6 Μεταβολή του βέλους κάμψης U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ διαδοχικά στάδια φόρτισης.

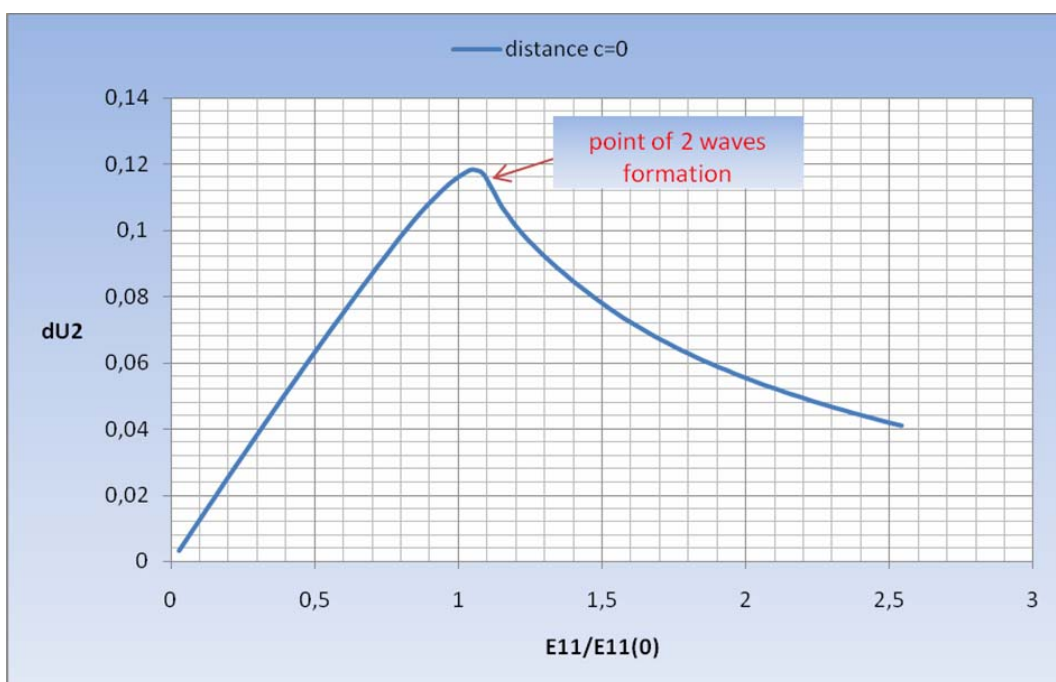


Σχήμα 6.7 Μεταβολή του βέλους κάμψης U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης.



Σχήμα 6.8 Μεταβολή του βέλους κάμψης U_2 στο ενισχυτικό σε διαδοχική φόρτιση

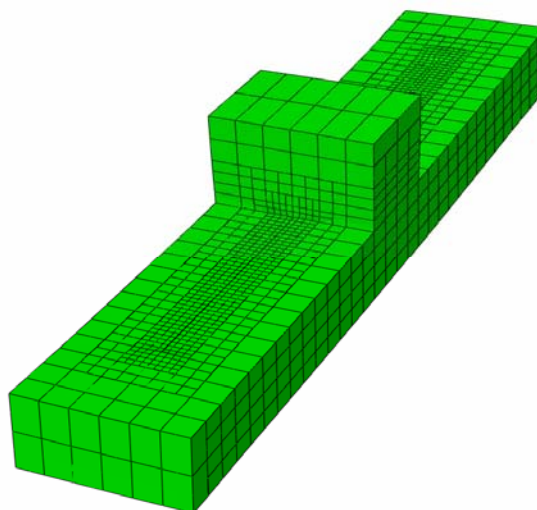
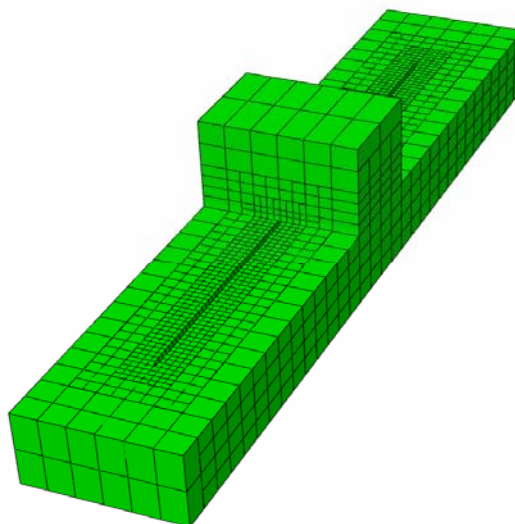
Το διάστημα της πλάτυνσης του συγκεκριμένου μοντέλου απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 6.9. Στο εν λόγω διάγραμμα, παρατηρούμε την αλλαγή στην κλίση της πλάτυνσης του μοντέλου που επιφέρει η δημιουργία των κυμάτων, όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς επίσης και ότι η ανώτατη τιμή του εν λόγω μεγέθους βρίσκεται στο ίδιο στάδιο φόρτισης με τη μέγιστη αντοχή του ενισχυμένου ελάσματος.



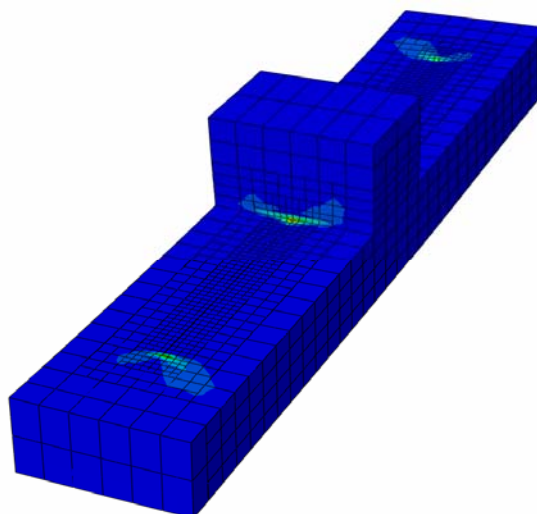
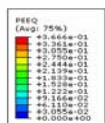
Σχήμα 6.9 Διακύμανση της πλάτυνσης του ενισχυμένου ελάσματος ανά φορτίο

6.3 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 44960 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις στη ρωγμή $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8338\text{mm}$ και $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 3.335\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό $4\text{mm} \times 4.0825\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Στο Σχήμα 6.10 απεικονίζεται η λεπτομέρεια της ρωγμής στην αρχή της φόρτισης (6.10α) και η αντίστοιχη κατάσταση στο τέλος της φόρτισης (6.10β), όπου παρατηρούμε το «κλείσιμο» αυτής στην εγγύτητα του ενισχυτικού, καθώς και το «άνοιγμα» όσο πλησιάζουμε στα άκρα. Επιπρόσθετα στο Σχήμα 6.11, παρατηρούμε την τελική κατάσταση της πλαστικοποίησης (μεταβλητή PEEQ) στη λεπτομέρεια της ρωγμής με διαφοροποίηση του εν λόγω μεγέθους στον άξονα συμμετρίας $x=a/2$.

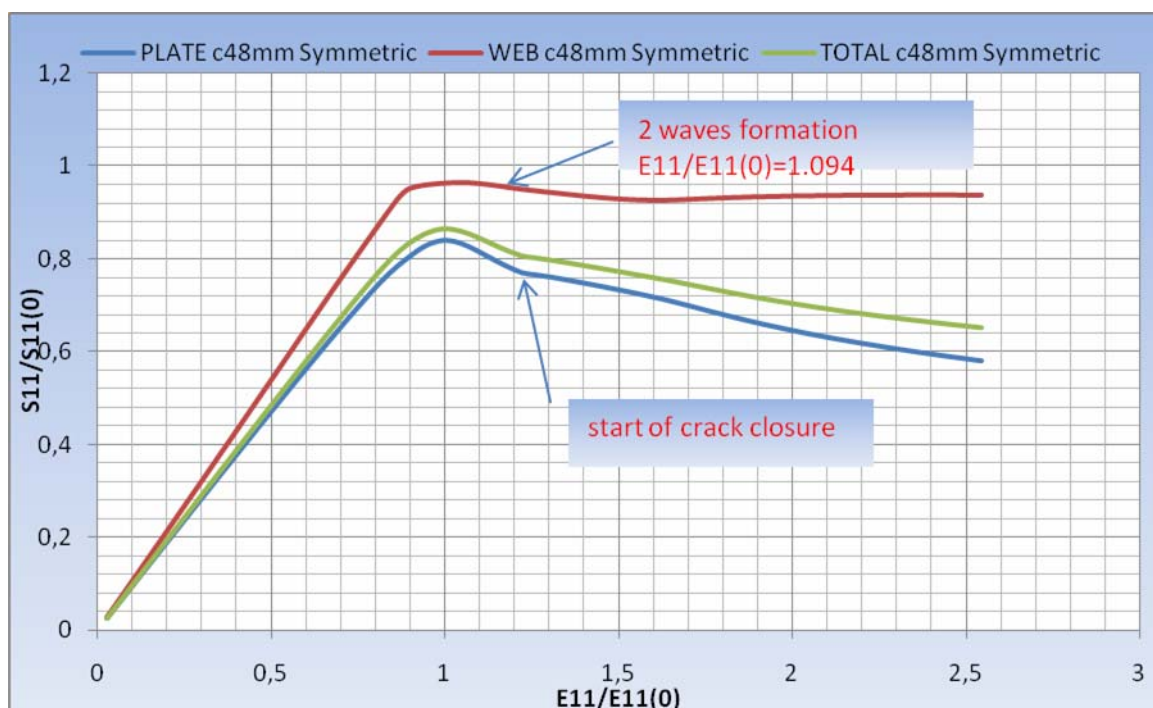


Σχήμα 6.10 Λεπτομέρεια ρωγμής $c=48\text{mm}$ (α) Στην αρχή της φόρτισης (β) Τελική κατάσταση



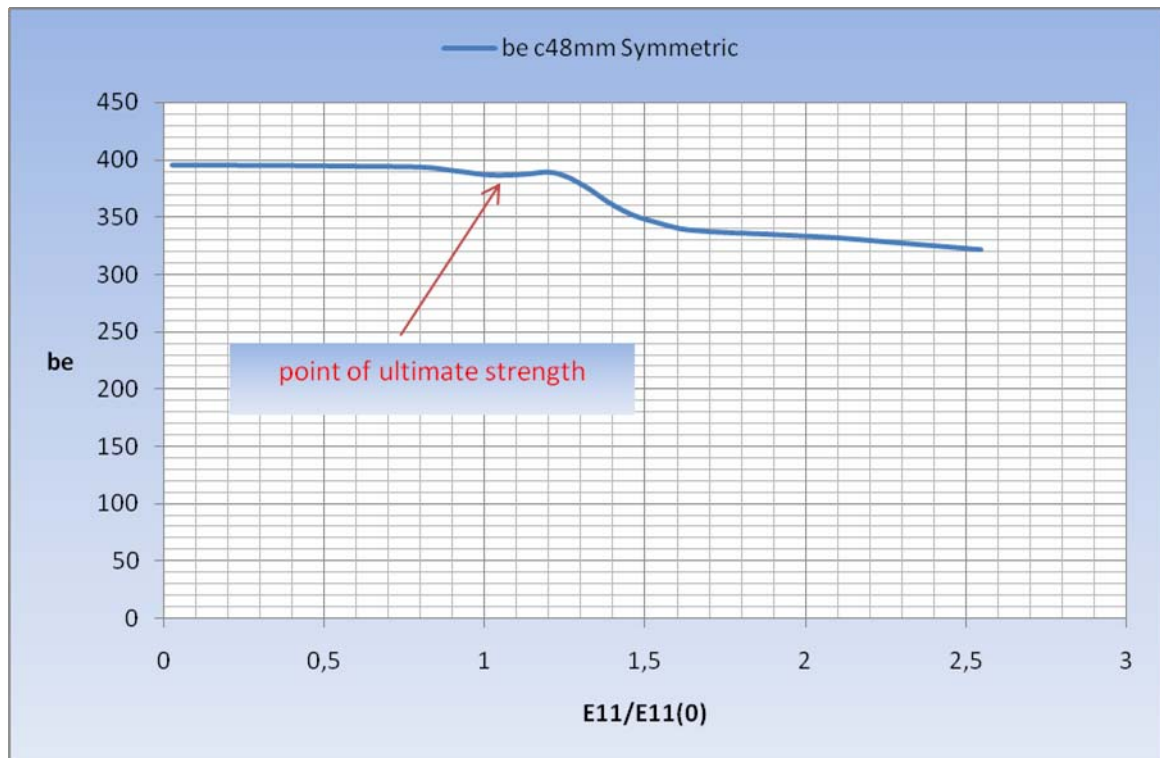
Σχήμα 6.11 Τελική κατάσταση πλαστικοποίησης(μέγεθος PEEQ) στη ρωγμή

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.12. Στις εν λόγω καμπύλες παρατηρούμε ότι η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)}=0.9935$, ενώ στο στάδιο $E_{11}/E_{11(0)}=1.2217$ είναι εμφανής μια αλλαγή κλίσης στην εν λόγω καμπύλη, καθώς στο συγκεκριμένο στάδιο πραγματοποιείται η έναρξη επαφής των επιφανειών της ρωγμής. Όσον αφορά την αντίστοιχη καμπύλη του ενισχυτικού, η μείωση στην αλλαγή κλίσης συμβαίνει με το σχηματισμό των δύο (2) ημικυμάτων στην πλάκα.

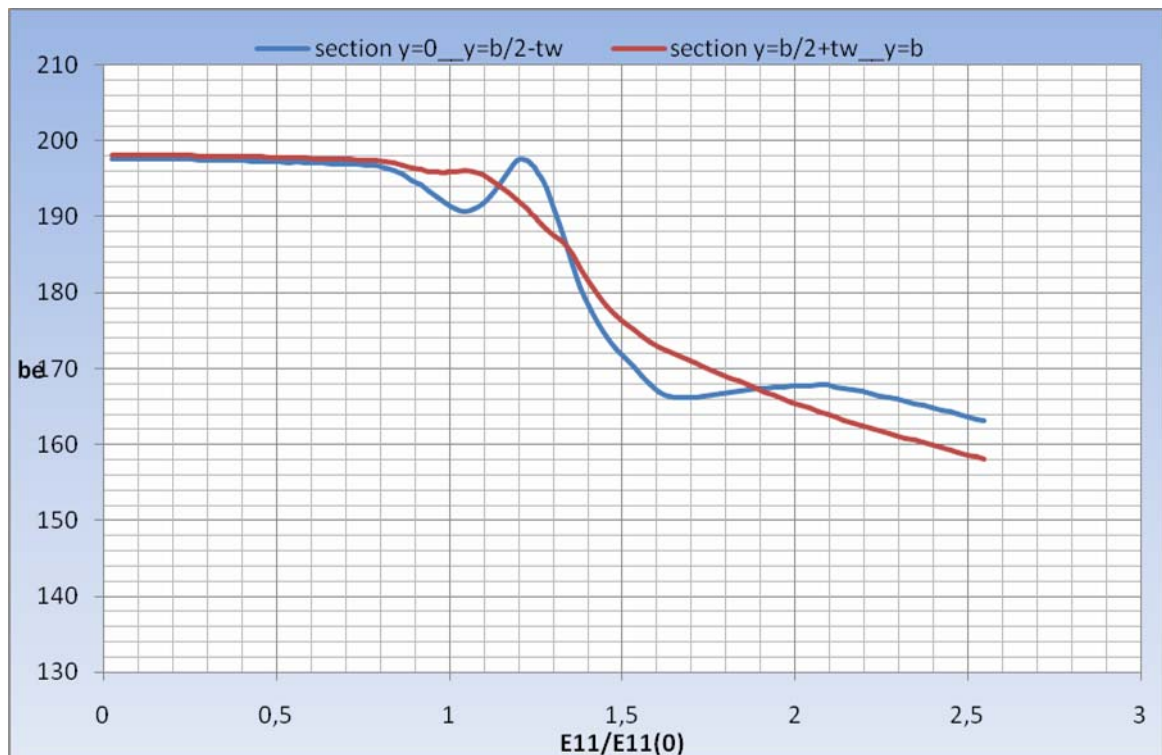


Σχήμα 6.12 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή συμμετρική $c=48mm$ στην πλάκα

Όσον αφορά τις διακυμάνσεις των ισοδύναμων πλατών της πλάκας, αυτές παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.13 και 6.14. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, αρχικά υπάρχει ταύτιση στην κατανομή του φορτίου στα δύο (2) τμήματα της πλάκας, στη συνέχεια με την ολοκλήρωση του ελαστικού λυγισμού και τη μετάβαση στον ελαστοπλαστικό, έχουμε μια διαφοροποίηση με την πλευρά από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ να φορτίζεται περισσότερο, ενώ με τη δημιουργία των ημικυμάτων αλλάζει εκ νέου, η εν λόγω κατανομή (σχήμα 6.14).



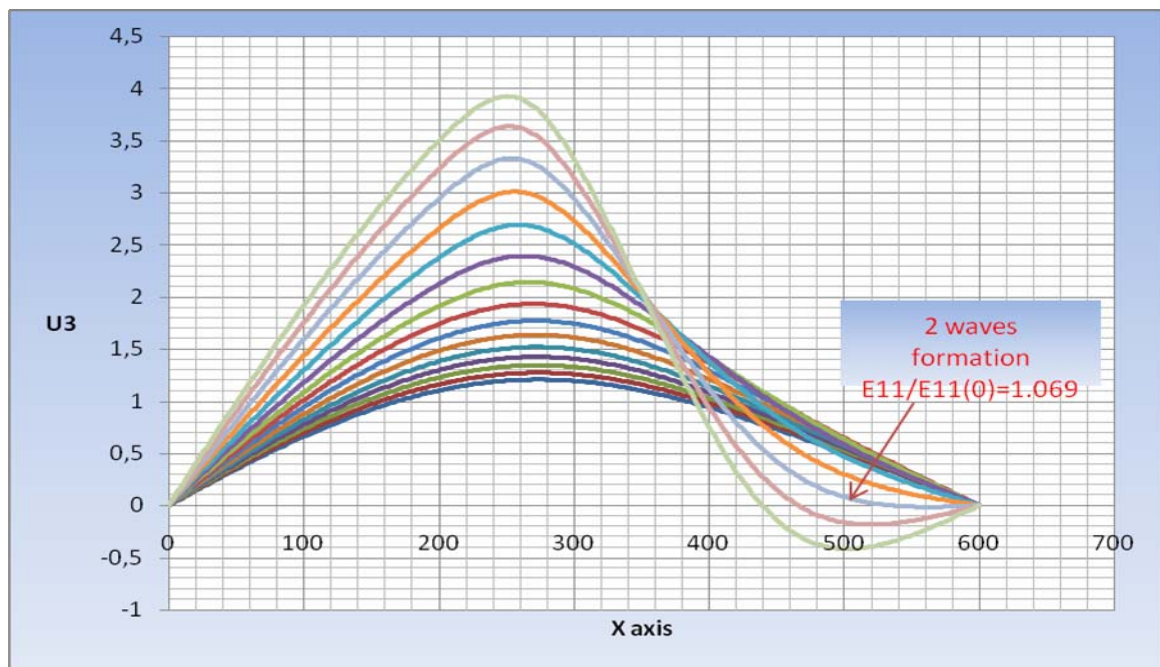
Σχήμα 6.13 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=48mm$ συμμετρική



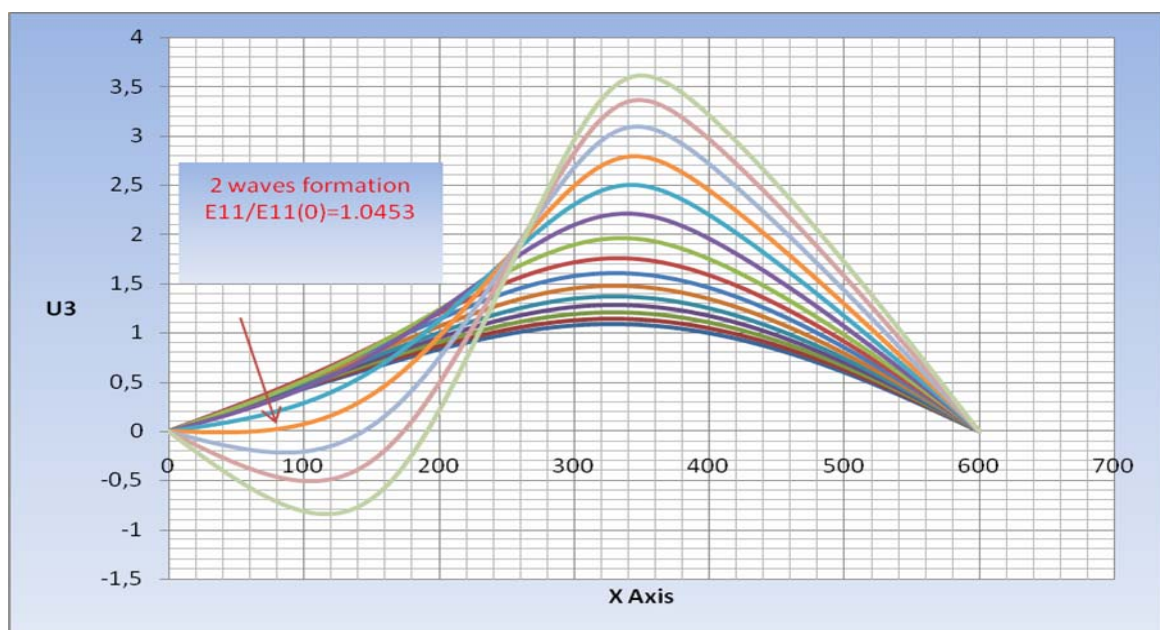
Σχήμα 6.14 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας

Η διακύμανση των βελών κάμψεως στις αφόρτιστες πλευρές για την εξεταζόμενη περίπτωση απεικονίζεται στα Σχήματα 6.15 ($y=0$) και 6.16 ($y=b$) σε

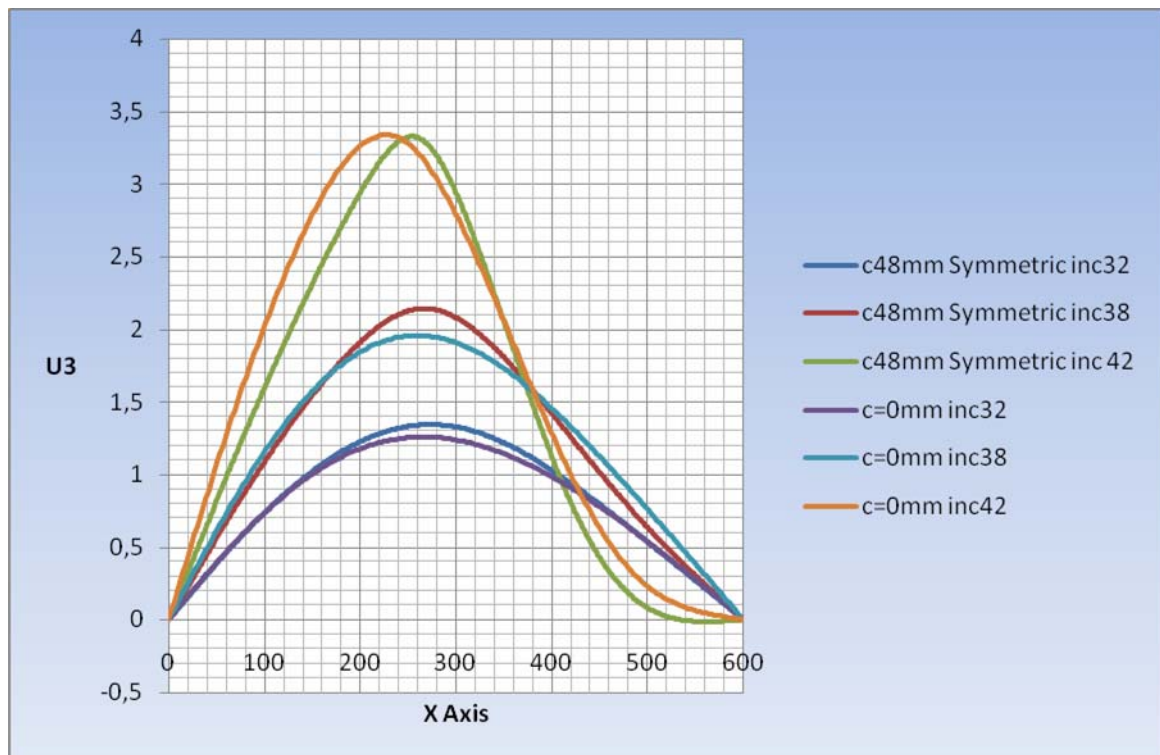
διαδοχικά στάδια φόρτισης ($E_{11}/E_{11(0)}=0.8145, 0.9672$ και 1.069) στη ζώνη δημιουργίας των ημικυμάτων. Επιπρόσθετα στα Σχήματα 6.17 και 6.18 παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις, στα ίδια επίπεδα συμπίεσης, των βελών κάμψης U_3 για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, αρχικά η πλάκα με ρωγμή παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές του εν λόγω μεγέθους, ενώ στο οριακό σημείο δημιουργίας κυμάτων βλέπουμε ότι η ρωγμή «συγκρατεί» τη θέση του μεγίστου της μεταβλητής U_3 πιο κοντά στον άξονα συμμετρίας $x=a/2$.



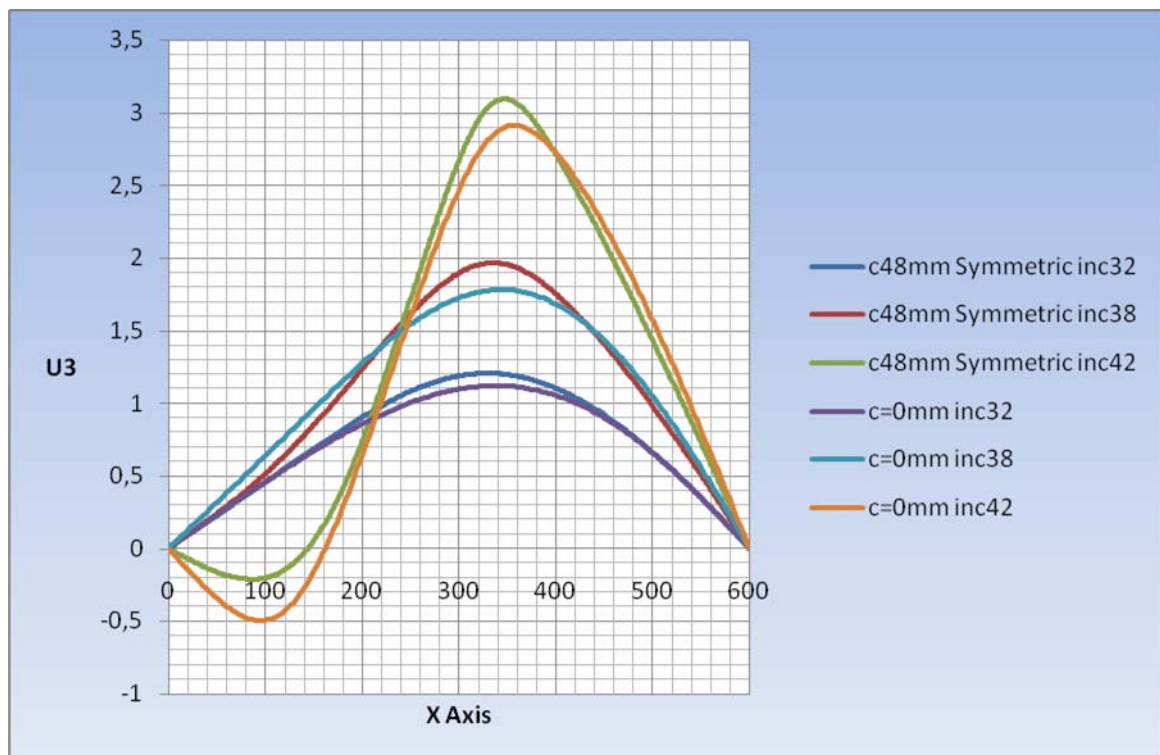
Σχήμα 6.15 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$



Σχήμα 6.16 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$

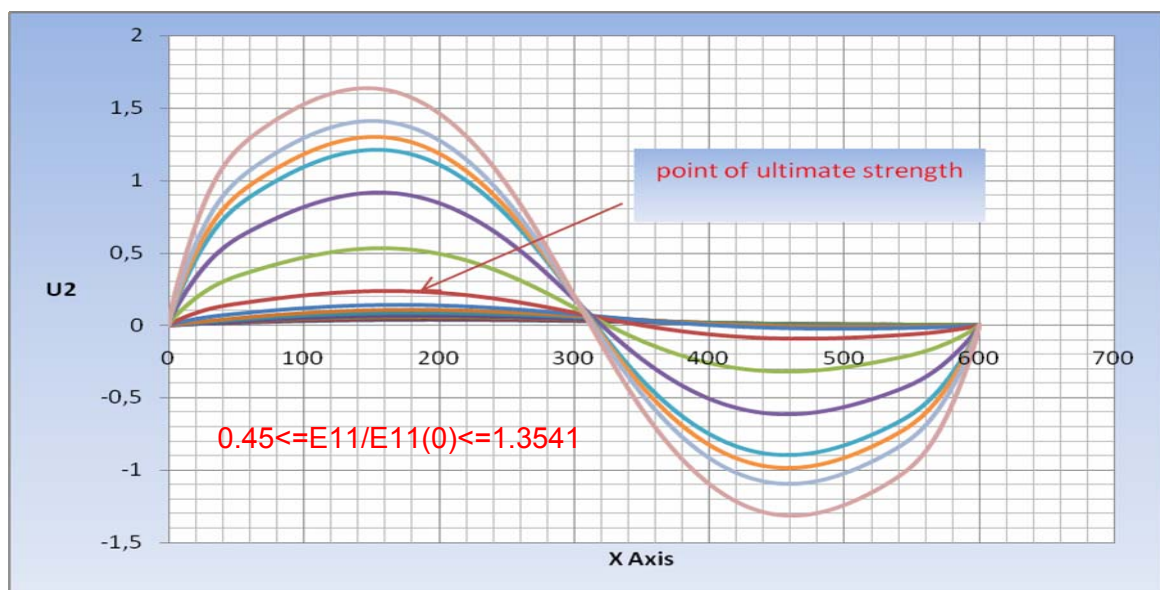


Σχήμα 6.17 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή

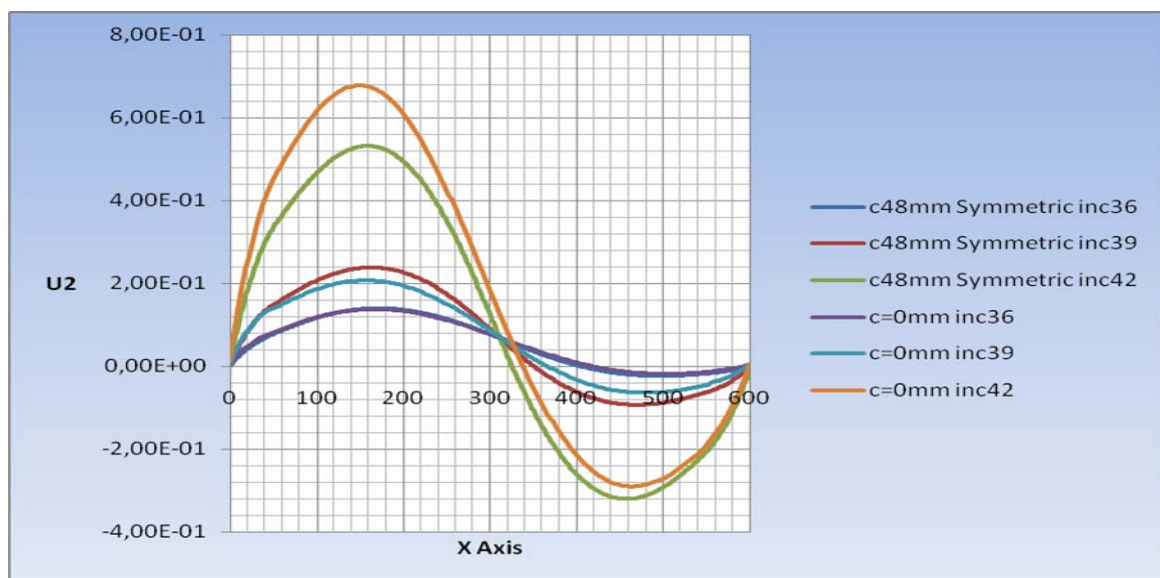


Σχήμα 6.18 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή

Στο Σχήμα 6.19 απεικονίζεται η διακύμανση του βέλους κάμψης U_2 του ενισχυτικού σε διαδοχική φόρτιση, όπου παρατηρούμε ότι ο σχηματισμός ημικύματος στο ενισχυτικό συμπίπτει με το σημείο μέγιστης αντοχής της κατασκευής για $E_{11}/E_{11(0)}=0.9935$, το οποίο προηγείται της δημιουργίας ημικυμάτων στην πλάκα. Επιπρόσθετα στο Σχήμα 6.20, παρουσιάζεται η σύγκριση του βέλους κάμψης U_2 στο ενισχυτικό (για τα ίδια φορτία συμπίεσης στη ζώνη δημιουργίας ημικυμάτων στην πλάκα) για τις περιπτώσεις με/ χωρίς ρωγμή στην πλάκα. Όπως παρατηρούμε, αρχικά το βέλος κάμψης στο ενισχυμένο έλασμα χωρίς ρωγμή παρουσιάζει μικρότερες τιμές, φαινόμενο όμως που μεταστρέφεται με τη δημιουργία των ημικυμάτων στην πλάκα.

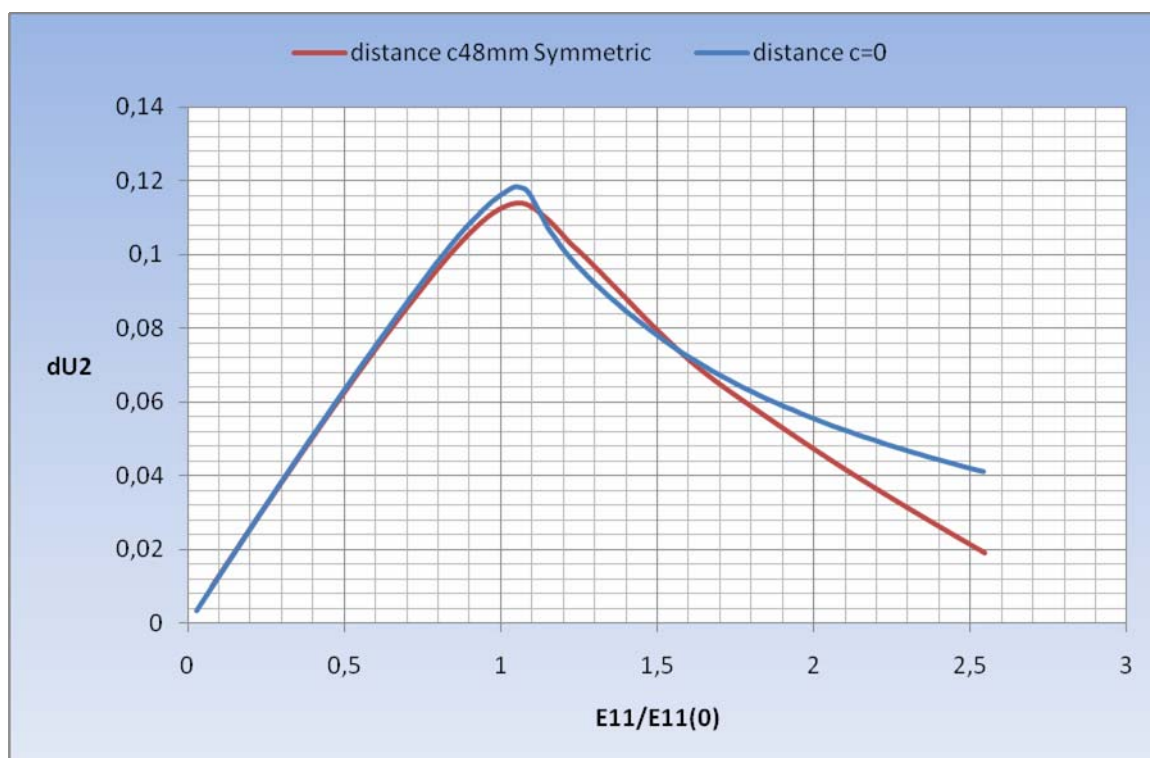


Σχήμα 6.19 Διακύμανση U_2 στο ενισχυτικό σε διαδοχικά φορτία



Σχήμα 6.20 Σύγκριση U_2 στο ενισχυτικό για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή

Το διάστημα πλάτυνσης του μοντέλου απεικονίζεται στο Σχήμα 6.21 σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς ρωγμή. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η εισαγωγή της ρωγμής στο μοντέλο αφενός μειώνει την ολική πλάτυνση του μοντέλου, αφετέρου μετά τη δημιουργία των δύο (2) ημικυμάτων (στο μέγιστο της καμπύλης με κόκκινο χρώμα στο εν λόγω σχήμα), σταθεροποιεί τη μείωση της πλάτυνσης σε αναλογική μορφή.

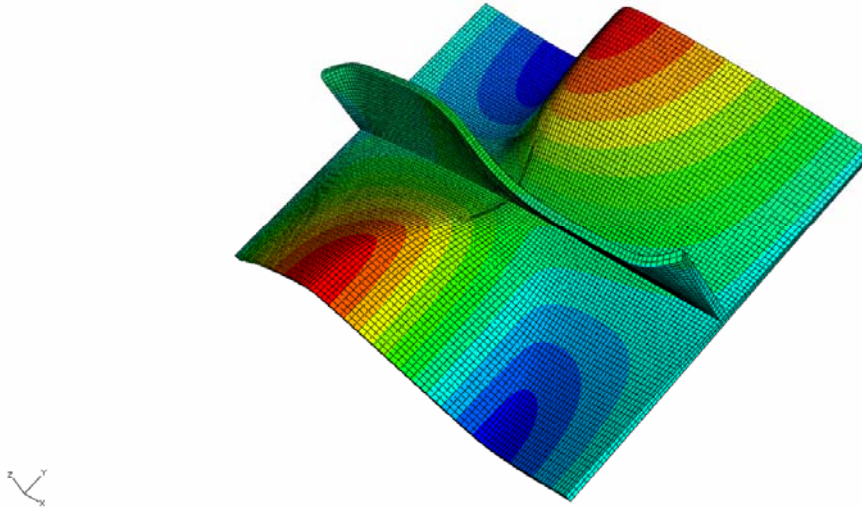


Σχήμα 6.21 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης για μοντέλο με/ χωρίς ρωγμή

6.4 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με συμμετρική ρωγμή $c=96\text{mm}$

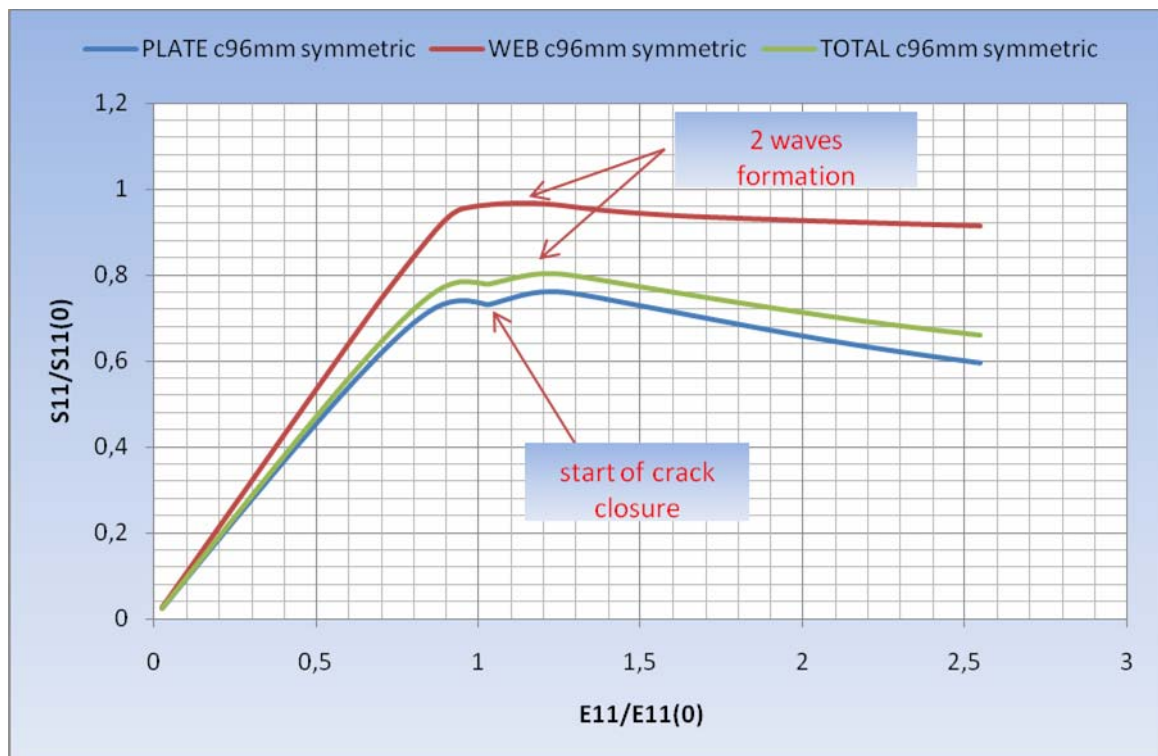
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 33692 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις στη ρωγμή $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8338\text{mm}$ και $5.036\text{mm} \times 5\text{mm} \times 3.335\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό $5.036\text{mm} \times 4.0825\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Η παραμόρφωση του ενισχυμένου ελάσματος στο τέλος της συμπίεσης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.22, ως προς τη μεταβλητή $U3$. Αξιοσημείωτη είναι η «συγκράτηση» των μεγίστων των βελών κάμψεως προς τον άξονα συμμετρίας $x=a/2$ (όπου βρίσκεται και η ρωγμή)

σε αντίθεση με την περίπτωση χωρίς ρωγμή (και σε συνάφεια με την προηγούμενως εξετασθείσα περίπτωση ρηγματωποιημένης πλάκας).



Σχήμα 6.22 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1$ με ρωγμή $c=96mm$

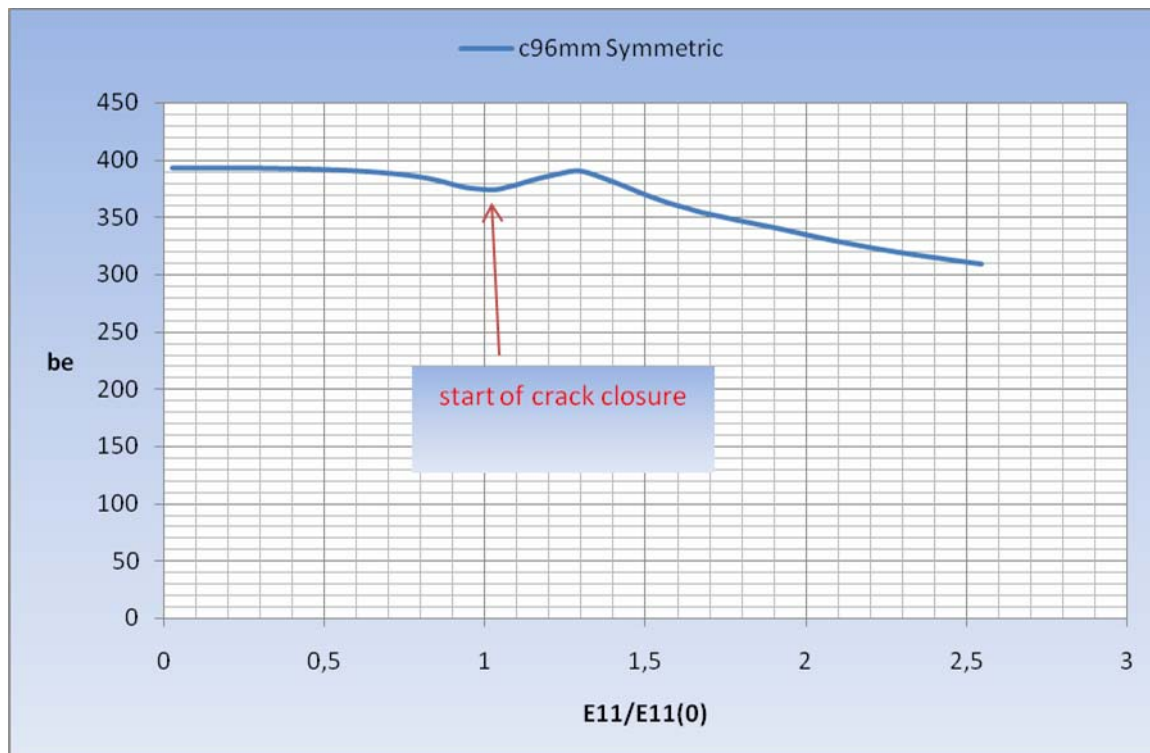
Οι μειωτικές καμπύλες της εν λόγω περίπτωσης παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.23.



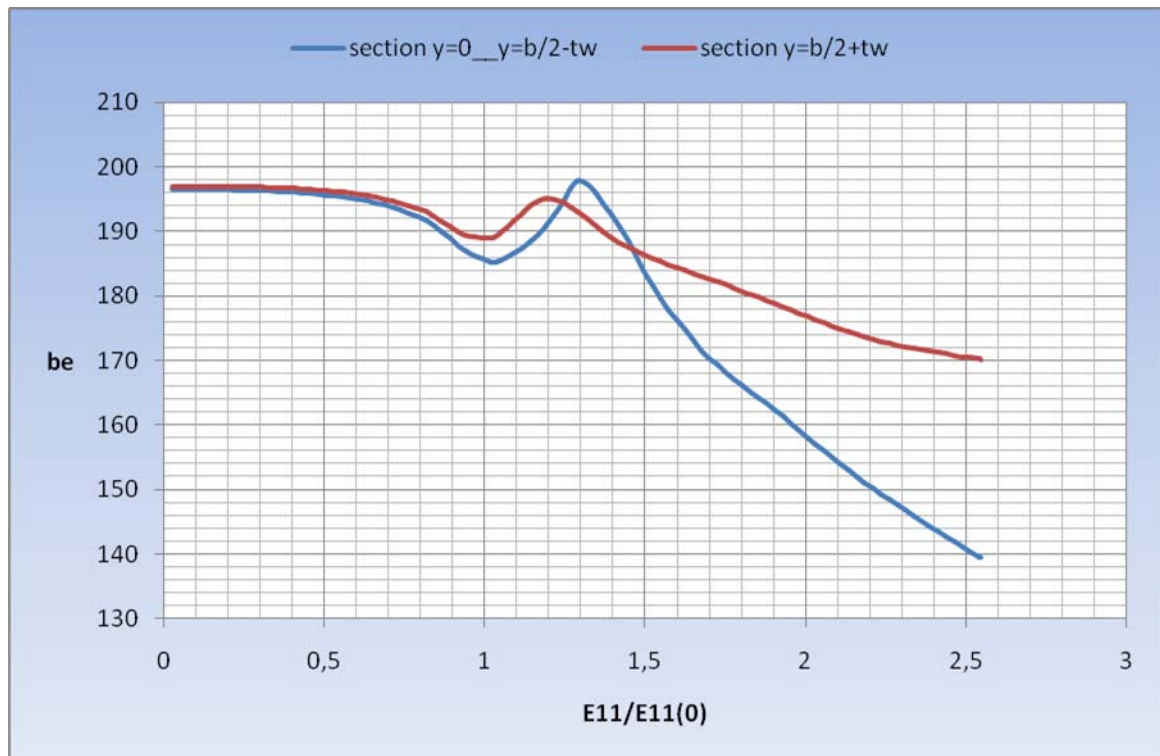
Σχήμα 6.23 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή συμμετρική $c=96mm$ στην πλάκα

Στις εν λόγω καμπύλες παρατηρούμε ότι το σημείο της μέγιστης αντοχής συμπίπτει με το στάδιο δημιουργίας δύο (2) ημικυμάτων στην πλάκα, όπως επίσης ότι η κατασκευή με την έναρξη της προσέγγισης των επιφανειών της ρωγμής ανακτά μέρος της ακαμψίας της. Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί η αλλαγή κλίσης (μείωση) στην καμπύλη του ενισχυτικού, μετά τη δημιουργία των ημικυμάτων στην πλάκα.

Η διακύμανση των ισοδύναμων πλατών στην πλάκα απεικονίζεται στα Σχήματα 6.24 και 6.25. Το σημείο του κάτω κοίλου στην καμπύλη του συνολικού ισοδύναμου πλάτους αντιστοιχεί στην έναρξη επαφής των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής, ενώ το άνω κοίλο βρίσκεται στο αμέσως επόμενο στάδιο από τη μέγιστη αντοχή. Αξιοσημείωτη είναι και η γραφική παράσταση του εν λόγω μεγέθους για τα δύο (2) τμήματα της πλάκας, όπου παρατηρούμε τη καθολική φόρτιση του τμήματος της πλάκας από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)}=1.4457$, που εκτιμάται ότι οφείλεται στη μορφή λυγισμού του ενισχυτικού, η οποία και ωθεί το φορτίο να παραληφθεί από το συγκεκριμένο τμήμα.

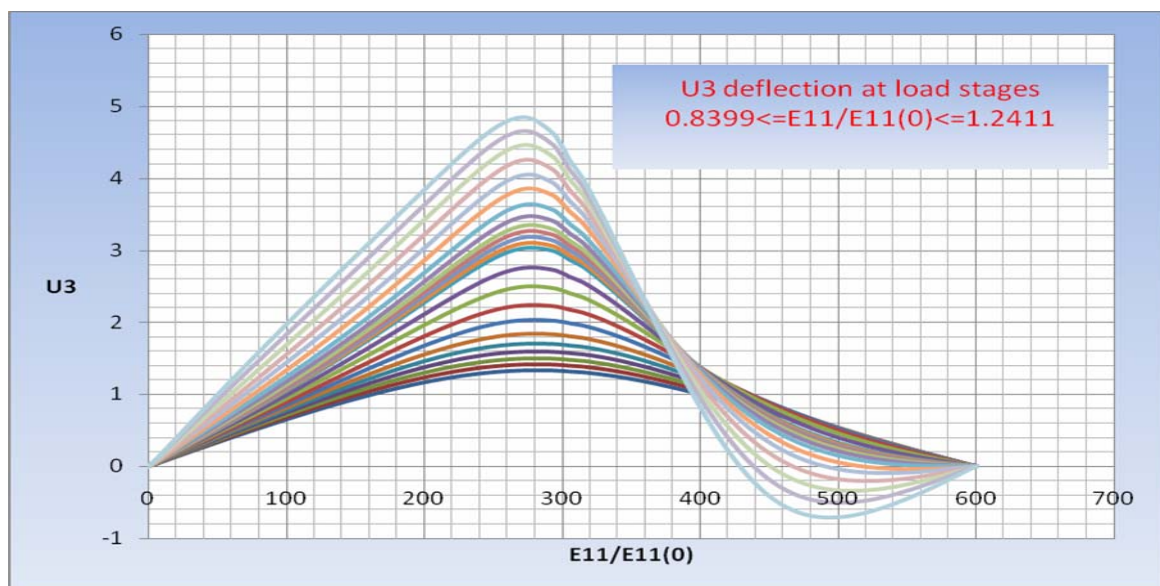


Σχήμα 6.24 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=96mm$ συμμετρική

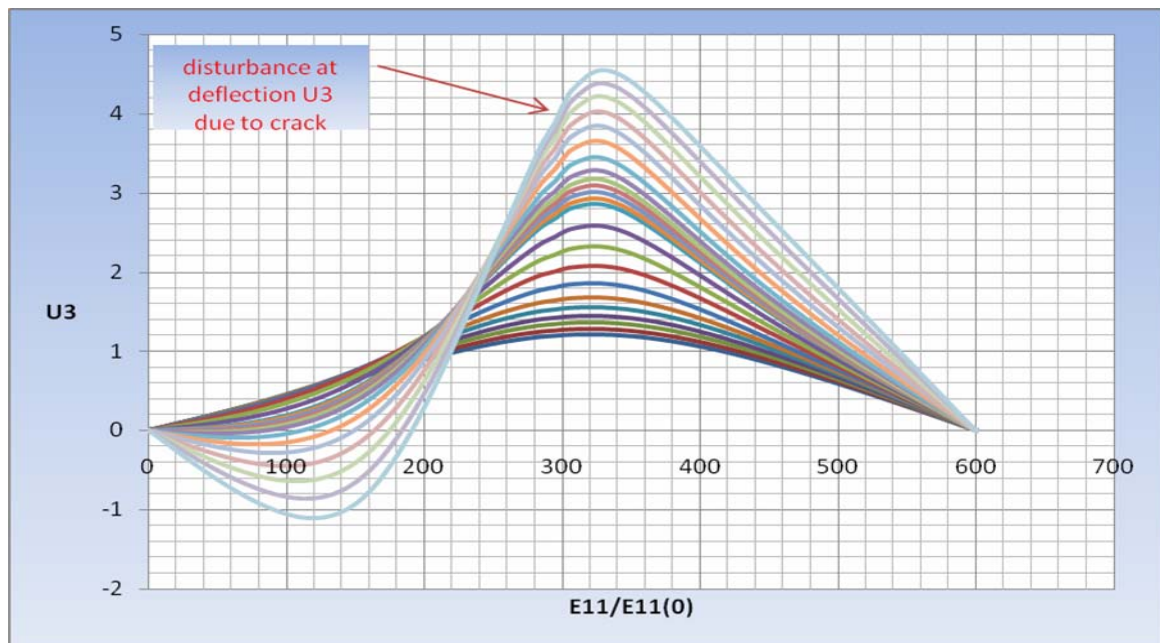


Σχήμα 6.25 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας

Στη συνέχεια παρατίθενται οι διακυμάνσεις των βελών κάμψης U_3 για τις αφόρτιστες πλευρές $y=0$ (Σχήμα 6.26) και $y=b$ (Σχήμα 6.27) για περιοχή φόρτισης μεταξύ του σημείου εξόδου από τον ελαστικό λυγισμό $E_{11}/E_{11(0)}=0.8399$ και του σημείου μέγιστης αντοχής $E_{11}/E_{11(0)}=1.2421$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και στις δύο (2) καμπύλες παρατηρούμε μία διαταραχή των μορφών αυτών στην εγγύτητα της ρωγμής.

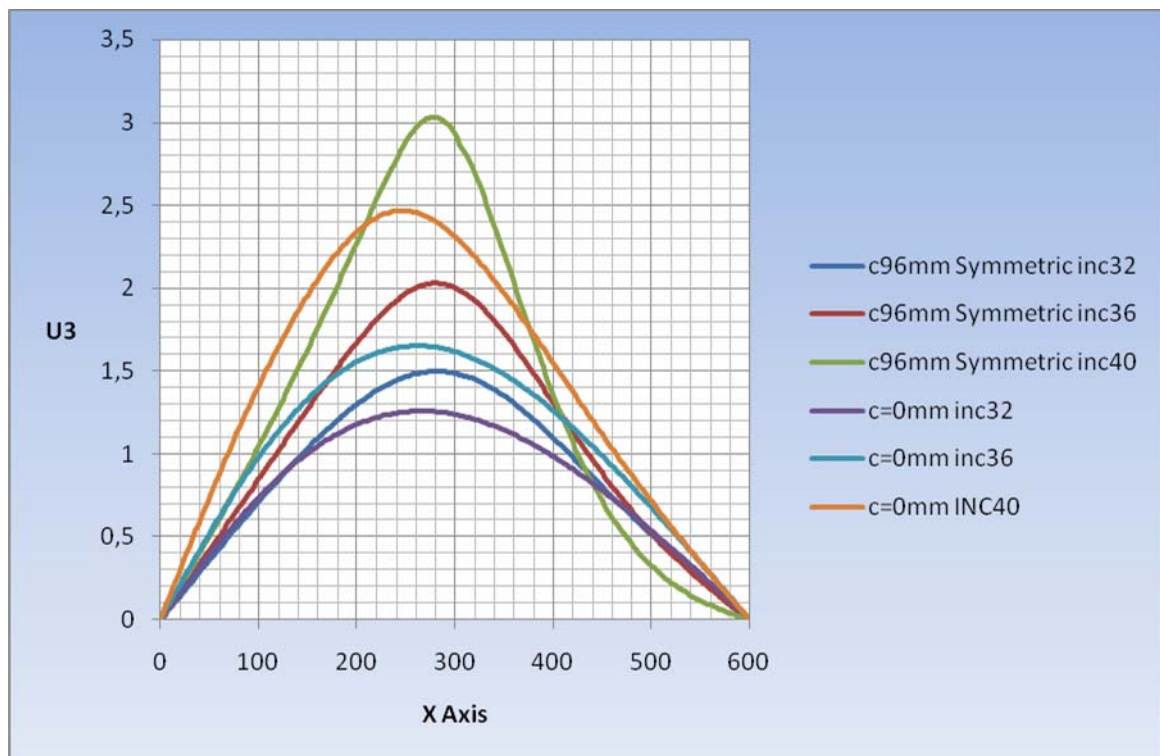


Σχήμα 6.26 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$

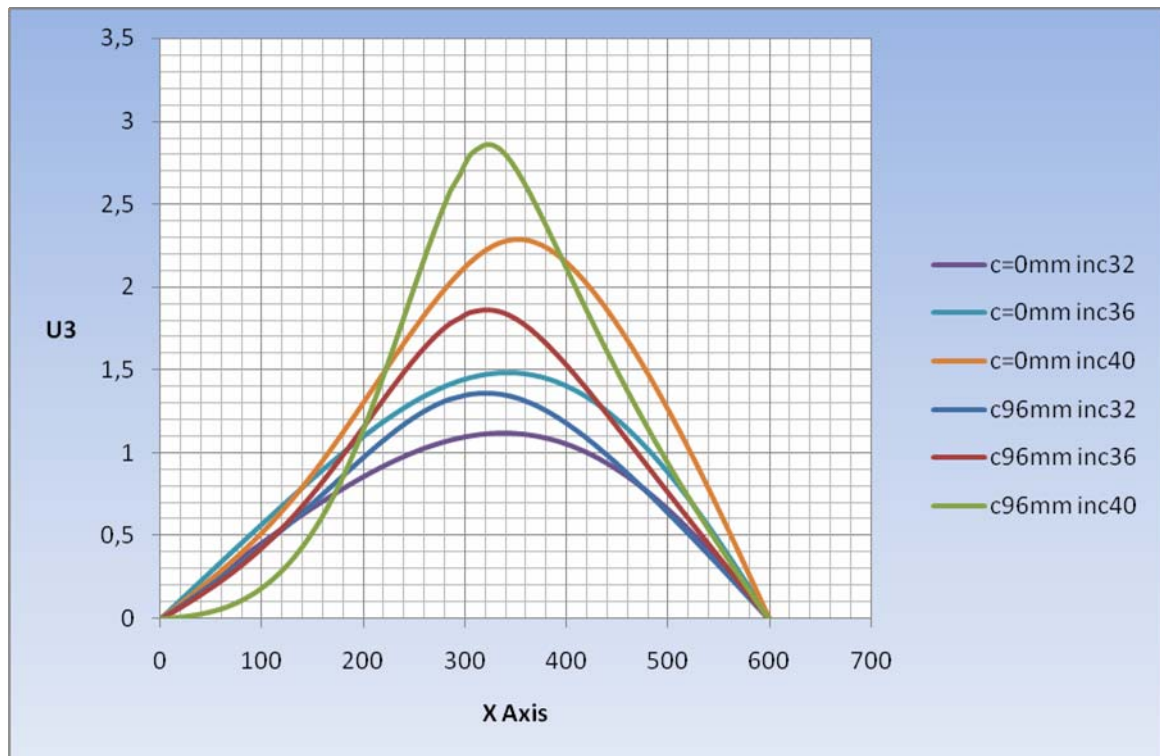


Σχήμα 6.27 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$

Από τη σύγκριση των βελών κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές για τις δύο (2) περιπτώσεις με ρωγμή $c=96\text{mm}$ / χωρίς ρωγμή καταλήγουμε στα ακόλουθα Σχήματα 6.28 ($y=0$) και 6.29 ($y=b$).



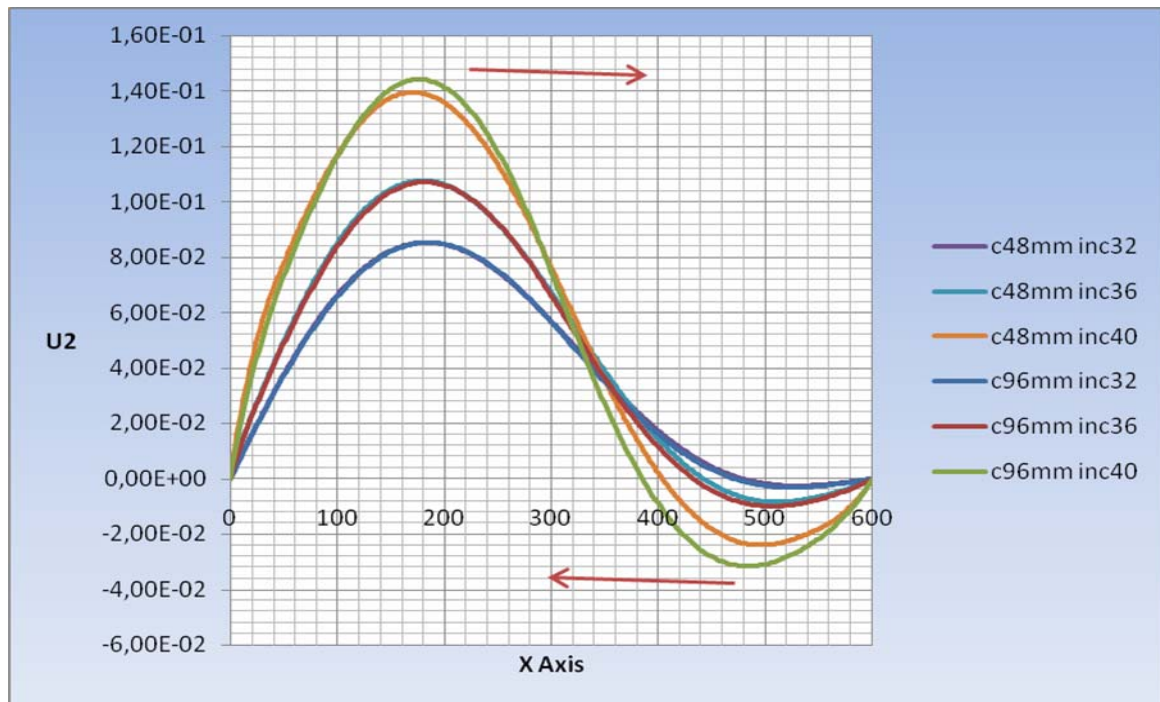
Σχήμα 6.28 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή



Σχήμα 6.29 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με/ χωρίς ρωγμή

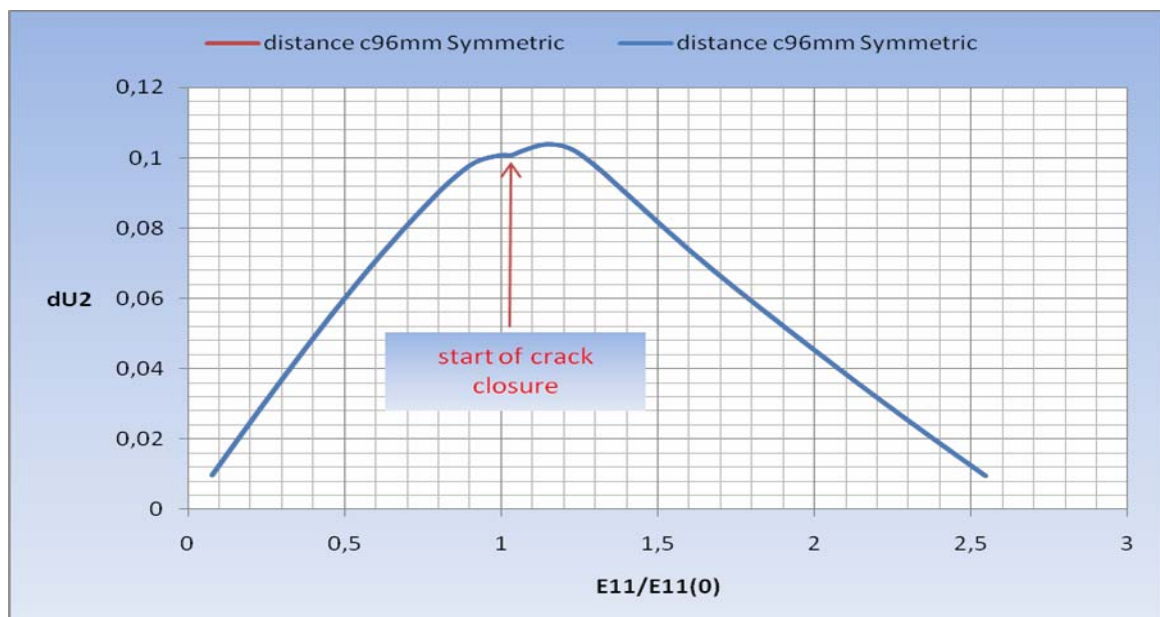
Όπως παρατηρούμε η ρωγμή αυτού του μήκους οδηγεί αφενός την πλάκα σε μεγαλύτερες τιμές U_3 σε σχέση με την περίπτωση χωρίς ρωγμή, αφετέρου σε πρώιμη δημιουργία των δύο (2) κυμάτων, κάτι το οποίο δε συνέβη για την περίπτωση ρωγμής $c=48\text{mm}$. Άρα, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με λόγο ρωγμής προς πλάτος $c/b>0.12$ επιταχύνει τη δημιουργία των ημικυμάτων.

Σε σύγκριση των βελών κάμψης U_2 των ενισχυτικών για τις δύο (2) περιπτώσεις ρωγμών, παρατηρούμε ότι για $c/b=0.24$, έχουμε μεγαλύτερες τιμές του εν λόγω μεγέθους καθώς και σταδιακή μετατόπιση του μεγίστου προς τον άξονα συμμετρίας της κατασκευής $x=a/2$ (Σχήμα 6.30 – κόκκινα βέλη)



Σχήμα 6.30 Σύγκριση U_2 στο ενισχυτικό για ενισχυμένο έλασμα με ρωγή $c/b=0.12$ και $c/b=0.24$

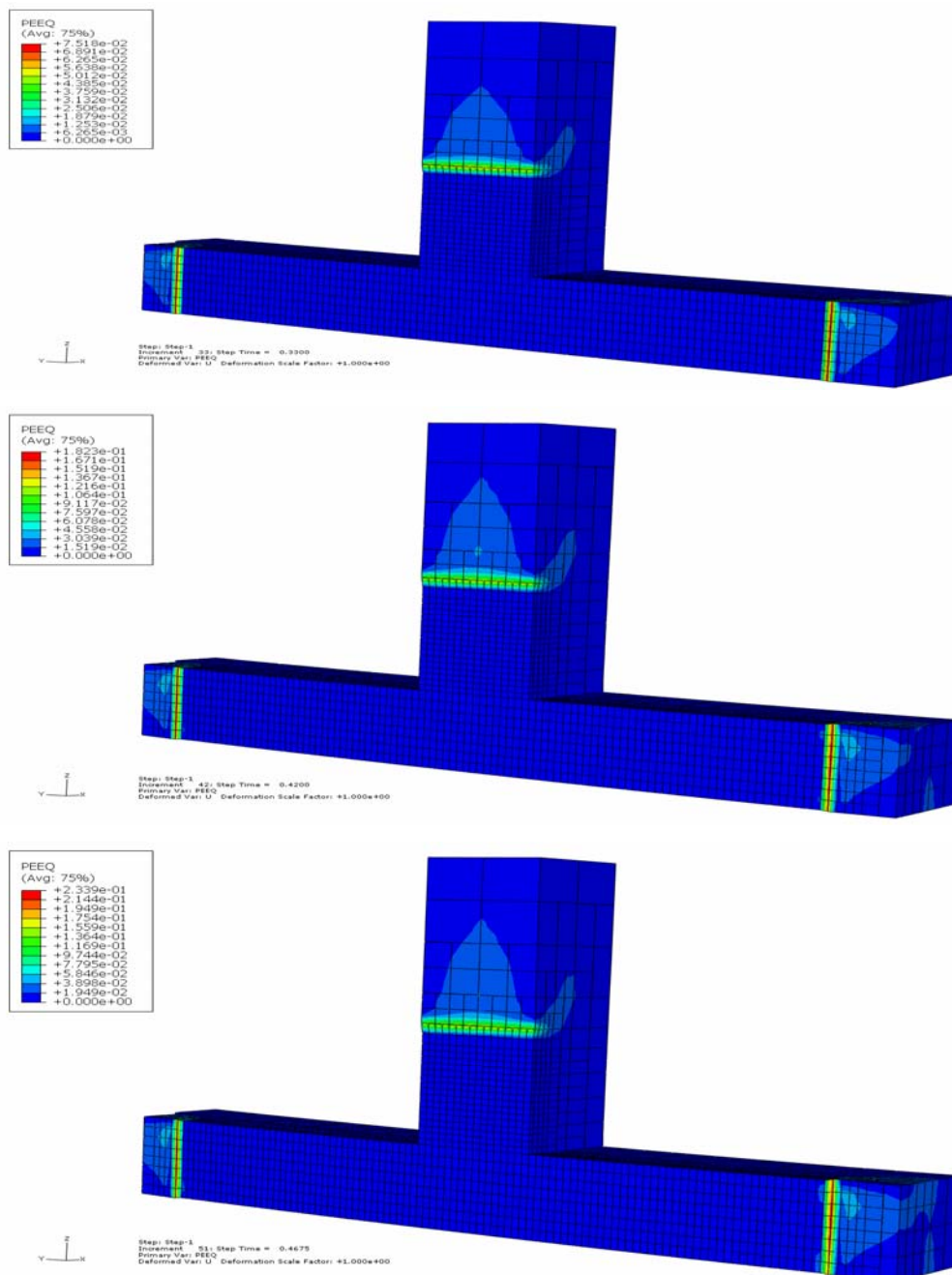
Όσον αφορά το διάστημα πλάτυσης για το συγκεκριμένο μοντέλο, αυτό απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 6.31. Όπως παρατηρούμε η αλλαγή κλίσης στην εν λόγω καμπύλη αντιστοιχεί στο σημείο επαφής των επιφανειών της ρωγμής, ενώ το άνω κοίλο βρίσκεται ένα στάδιο φόρτισης πριν από το φορτίο μέγιστης αντοχής.



Σχήμα 6.31 Διακύμανση διαστήματος πλάτυσης μοντέλου με ρωγή $c=96mm$

6.5 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$ και ρωγμή $c=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό.

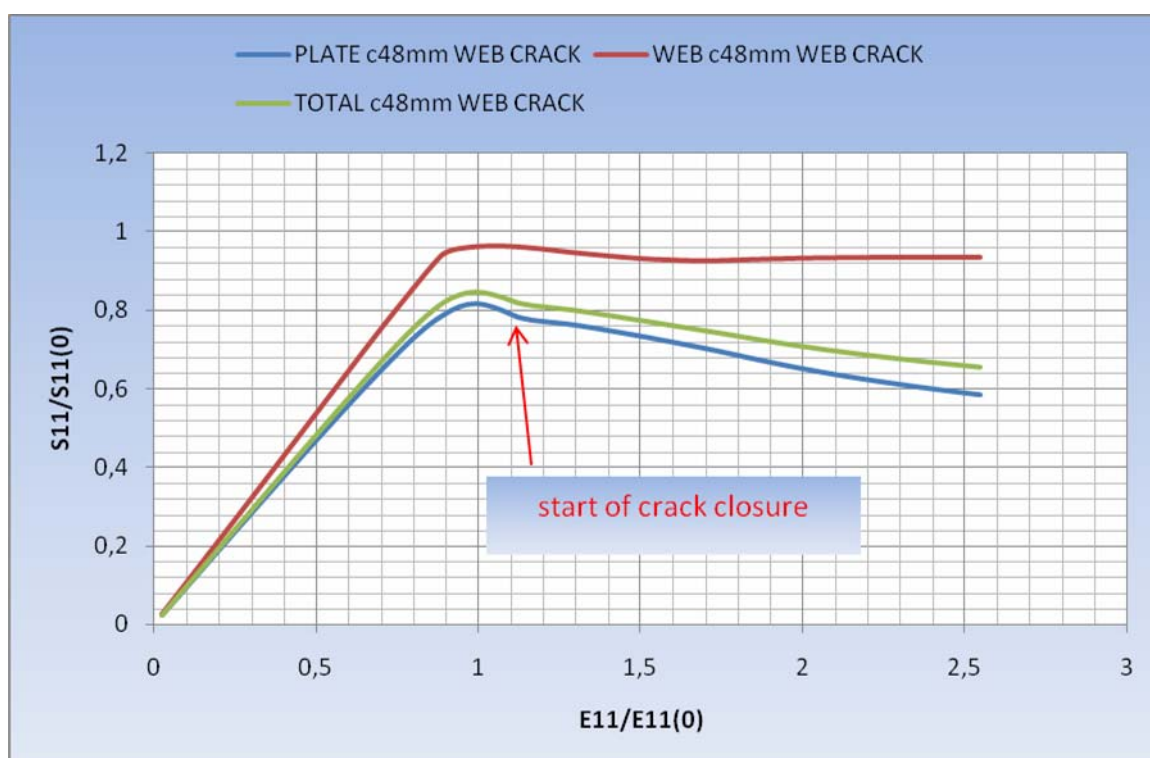
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 36332 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις στη ρωγμή $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8338\text{mm}$ και $5\text{mm} \times 5.125\text{mm} \times 3.335\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.5103\text{mm}$ στη ρωγμή και $5\text{mm} \times 4.0825\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$ στο υπόλοιπο ενισχυτικό.



Σχήμα 6.32 Πλαστική ροή σε τομή της ρωγμής πλάκας – ενισχυτικού

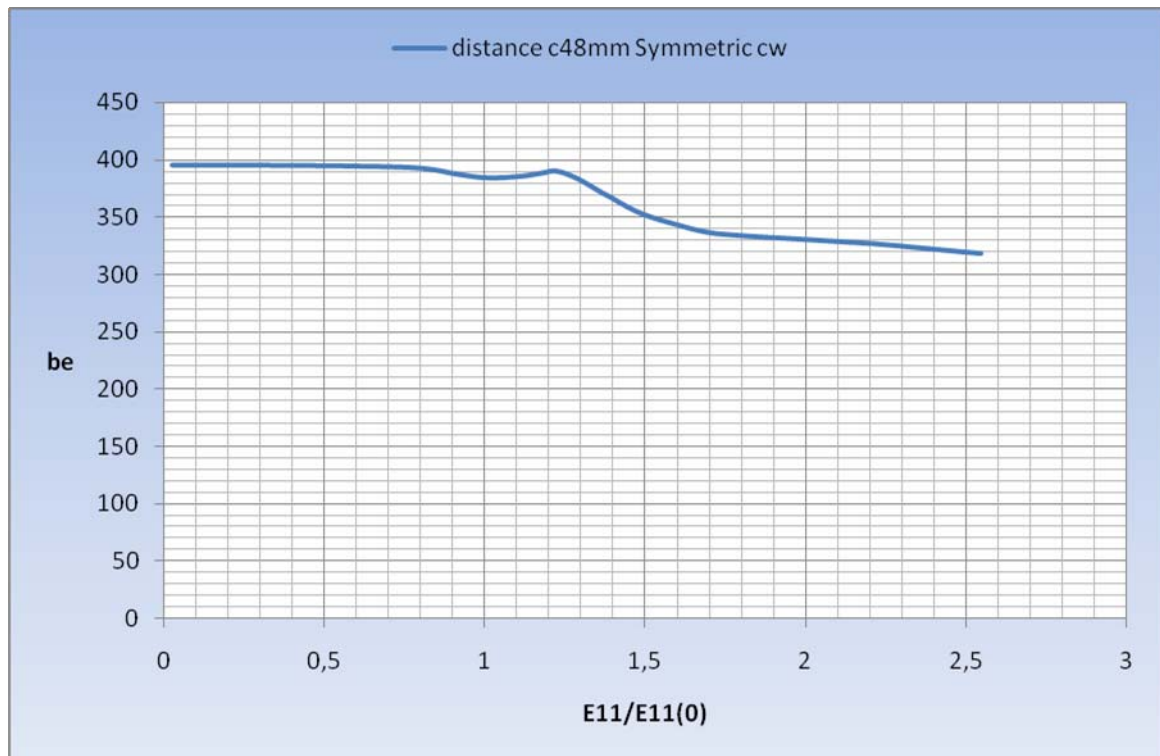
Στο σχήμα 6.32 παρατηρούμε την επέκταση της πλαστικής ροής με την αύξηση της φόρτισης στη δεξιά τομή της ρωγμής. Αξίζει να σημειωθεί η έντονη επέκταση αυτής κατά το πάχος της πλάκας, κάτι το οποίο δεν είχε διαπιστωθεί σε τέτοια έκταση για τα ελάσματα με aspect ratio $a/b=1$.

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για την εν λόγω περίπτωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.33. Η καμπύλη της πλάκας παρουσιάζει μέγιστο για φορτίο $E11/E11(0)=0.9926$, ενώ μετά το σημείο αυτό αυξάνεται η πτωτική κλίση αυτής με μια ενδιάμεση τροποποίηση λόγω της επαφής των επιφανειών της ρωγμής.

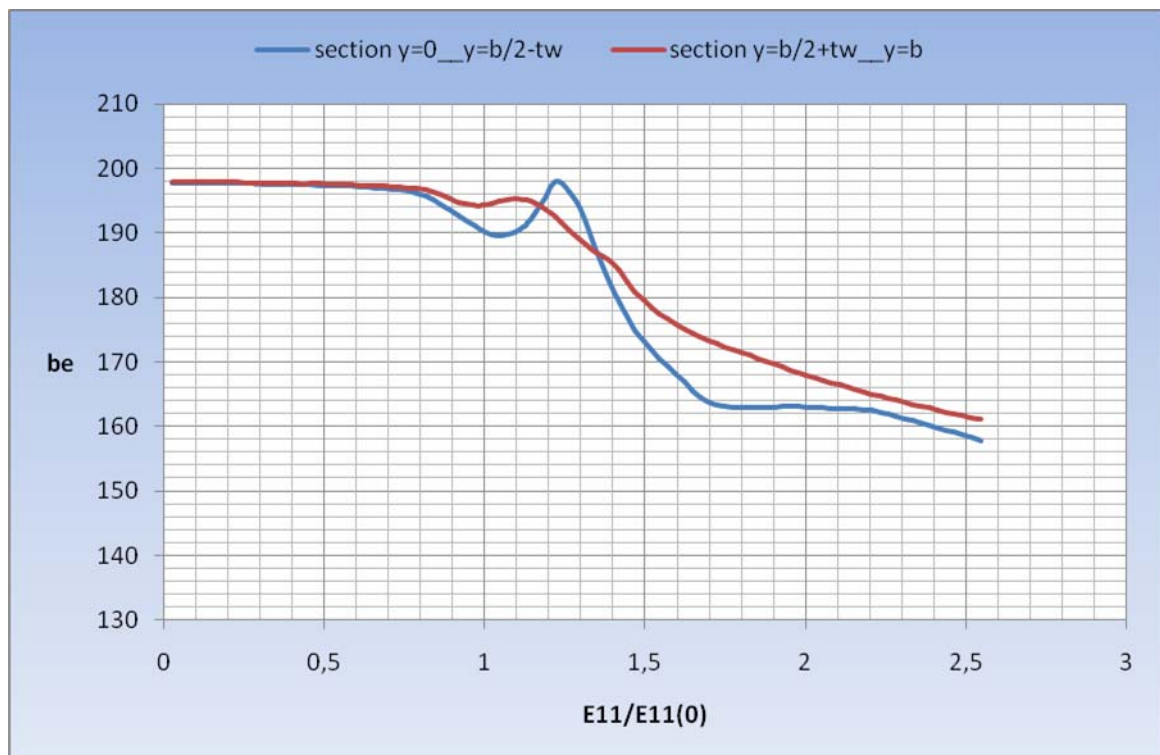


Σχήμα 6.33 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή συμμετρική $c=48mm$ στην πλάκα και $c_w=9.798mm$ στο ενισχυτικό

Η διακύμανση των ισοδυνάμων πλατών παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.34 και 6.35. Παρατηρούμε εκ νέου την εναλλαγή στη φόρτιση των δύο (2) τμημάτων της πλάκας, ενώ η σύγκριση του συνολικού ισοδύναμου πλάτους με τις υπόλοιπες περιπτώσεις θα παρατεθούν στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου.



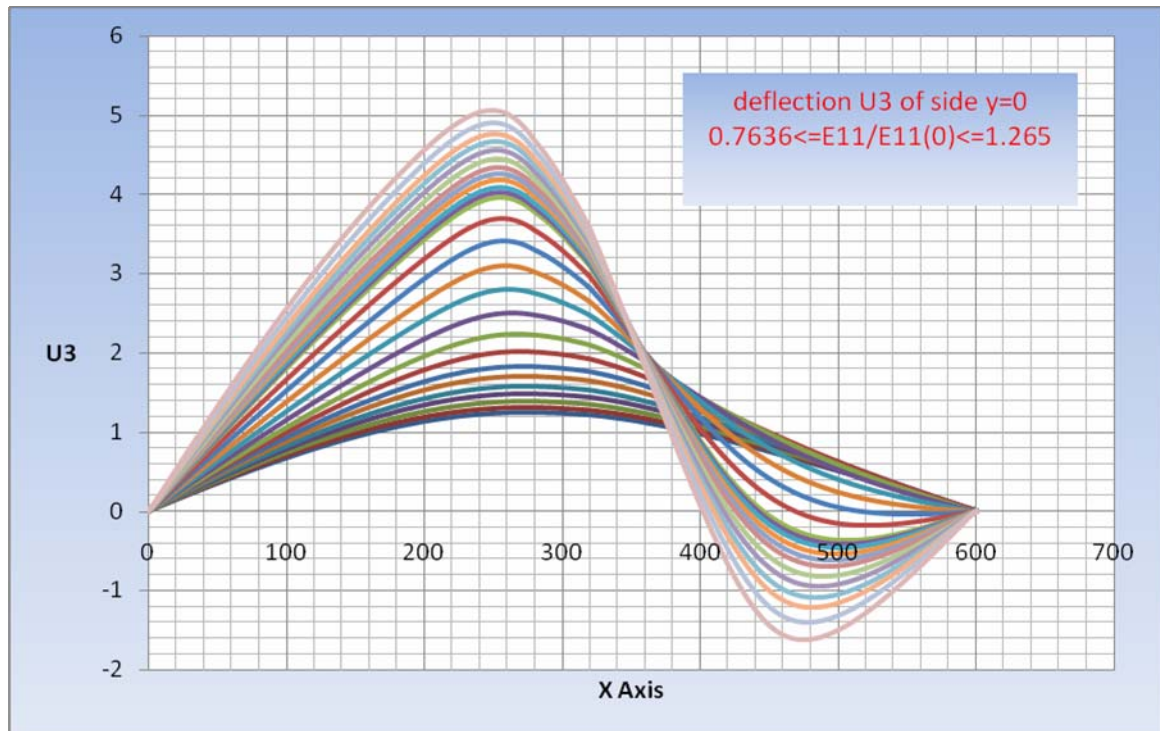
Σχήμα 6.34 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=48\text{mm}$ συμμετρική και ρωγμή $c_w=9.798$ στο ενισχυτικό



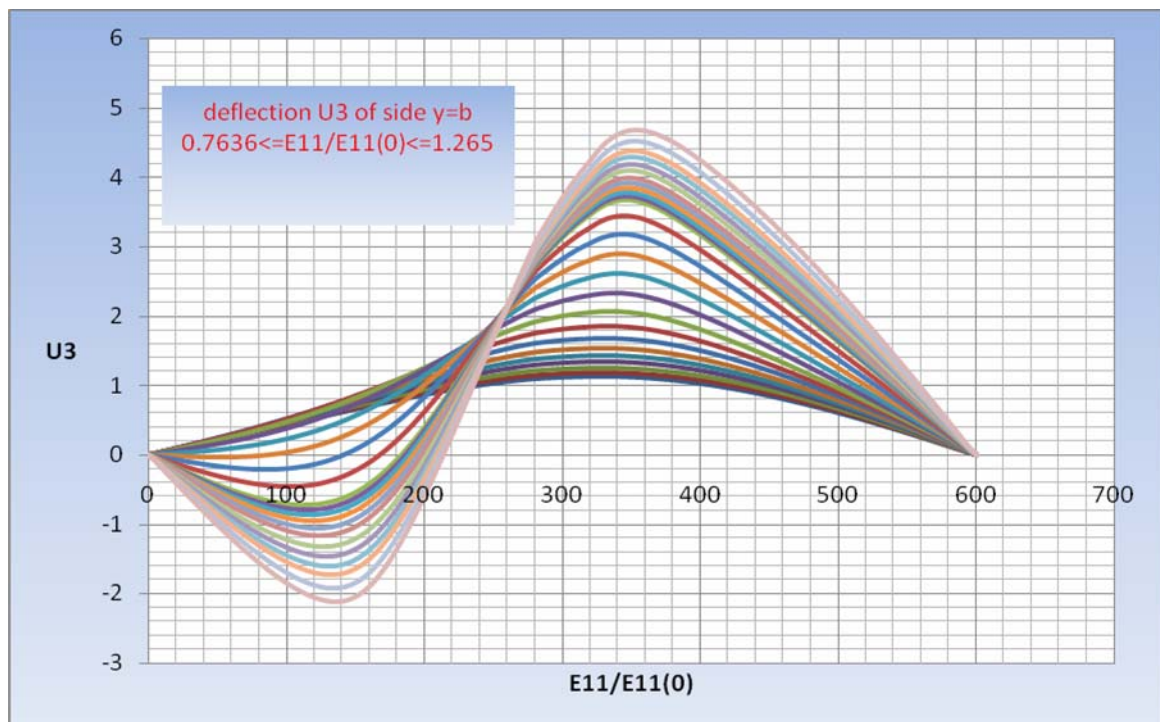
Σχήμα 6.35 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας

Όσον αφορά τη διακύμανση των βελών κάμψεως U_3 στις αφόρτιστες πλευρές, παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.36 ($\gamma=0$) και 6.37 ($\gamma=b$) για διαδοχικά

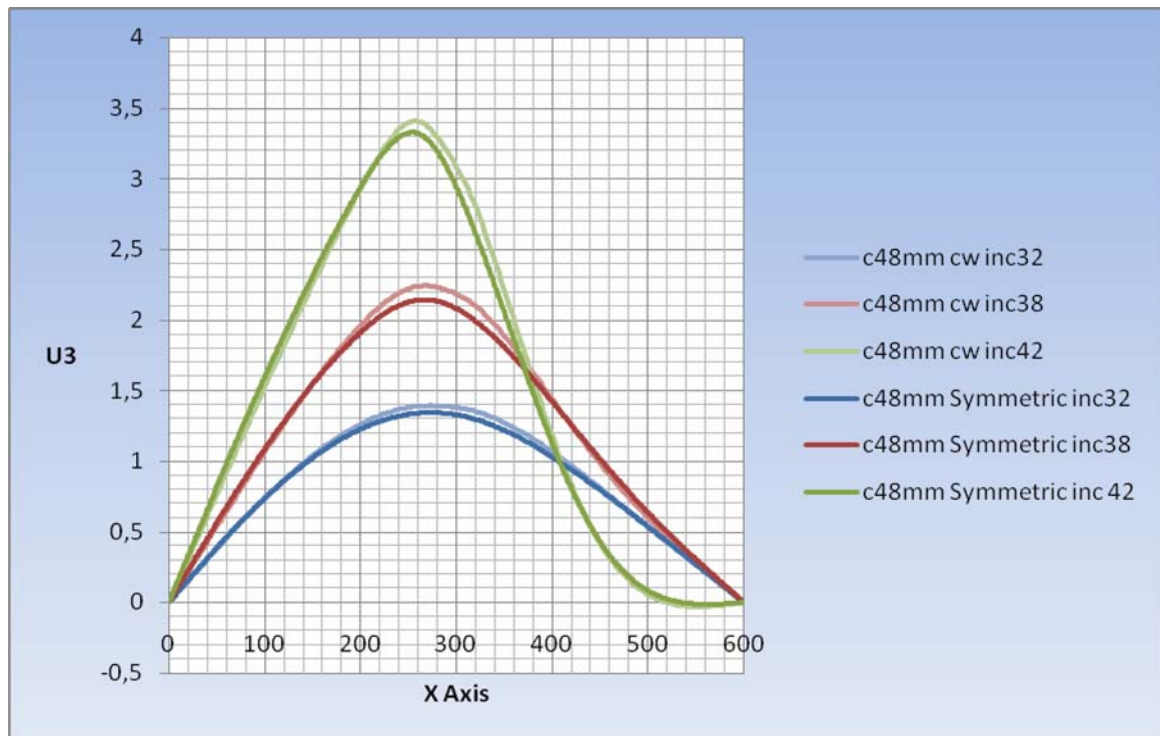
στάδια φόρτισης στη ζώνη ενδιαφέροντος (πέριξ του σημείου μέγιστης αντοχής). Επιπρόσθετα στα Σχήματα 6.38 και 6.39 απεικονίζονται οι συγκρίσεις μεταξύ των βελών κάμψης (στα ίδια επίπεδα φόρτισης) για τις περιπτώσεις συμμετρικής ρωγμής $c=48\text{mm}$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγή στο ενισχυτικό. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε οι διαφορές δεν είναι σημαντικές.



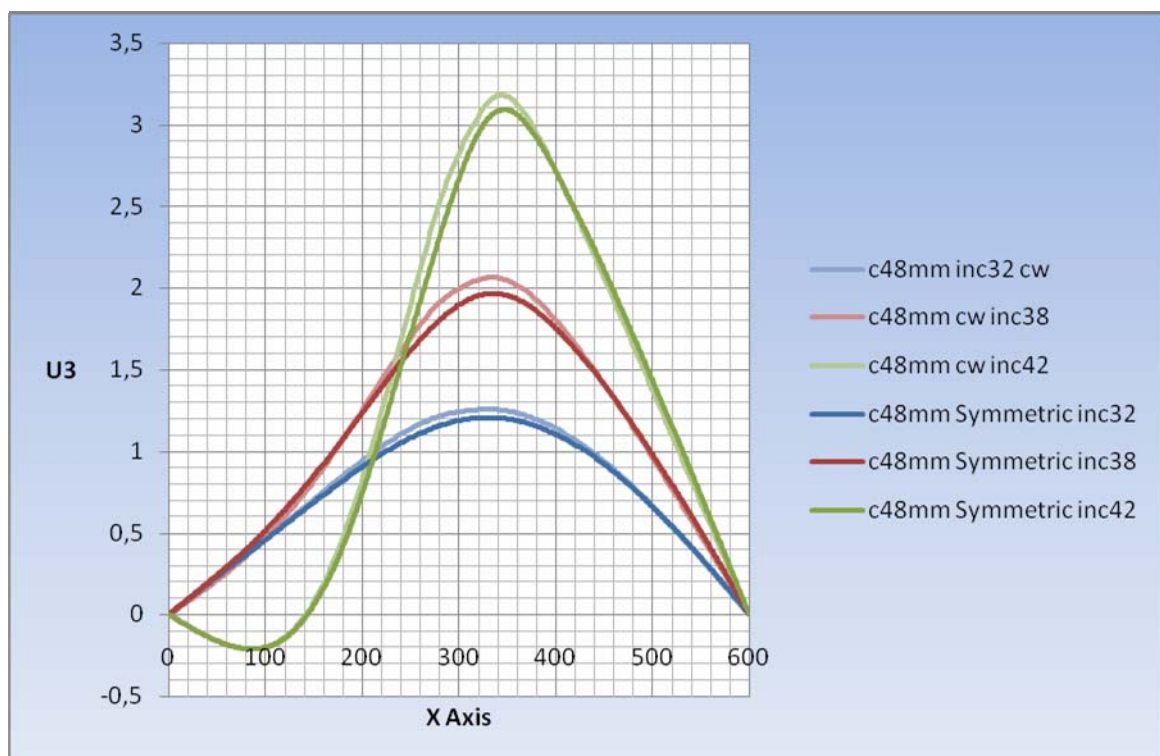
Σχήμα 6.36 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $\gamma=0$



Σχήμα 6.37 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $\gamma=b$

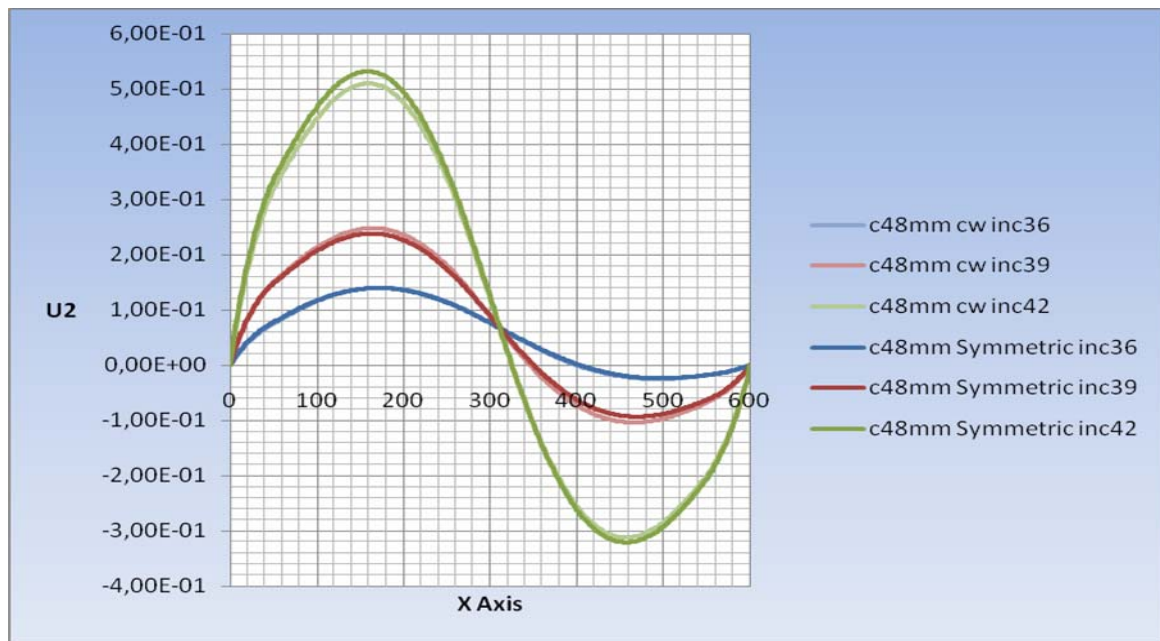


Σχήμα 6.38 Σύγκριση $U3$ στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=48mm$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού

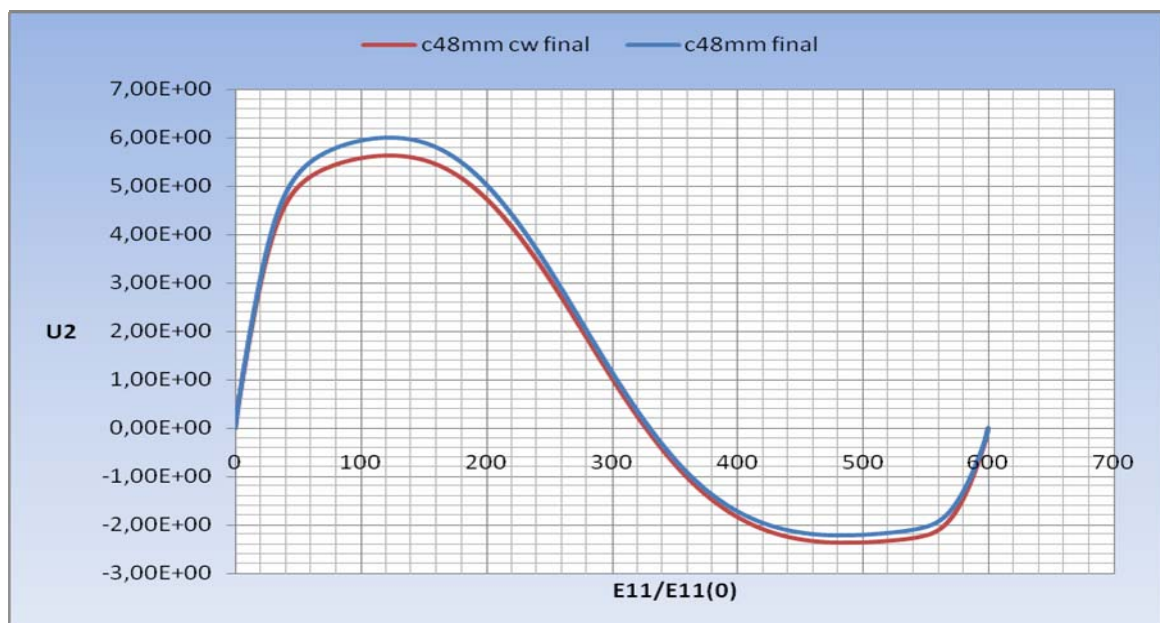


Σχήμα 6.39 Σύγκριση $U3$ στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=48mm$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού

Σε σύγκριση των βελών κάμψης U_2 του ενισχυτικού για την περίπτωση πλάκας με ρωγμή $c=48\text{mm}$ με την αντίστοιχη που δε φέρει ρωγμή στο ενισχυτικό, προκύπτουν τα ακόλουθα Σχήματα 6.40 (στάδιο φόρτισης λίγο πριν την επαφή των επιφανειών της ρωγμής και στο οριακό σημείο της δημιουργίας ημικυμάτων) και 6.41 (τελική μορφή). Όπως παρατηρούμε δεν υφίσταται σημαντική διαφοροποίηση τόσο στις μέγιστες τιμές, όσο και στη μορφή.

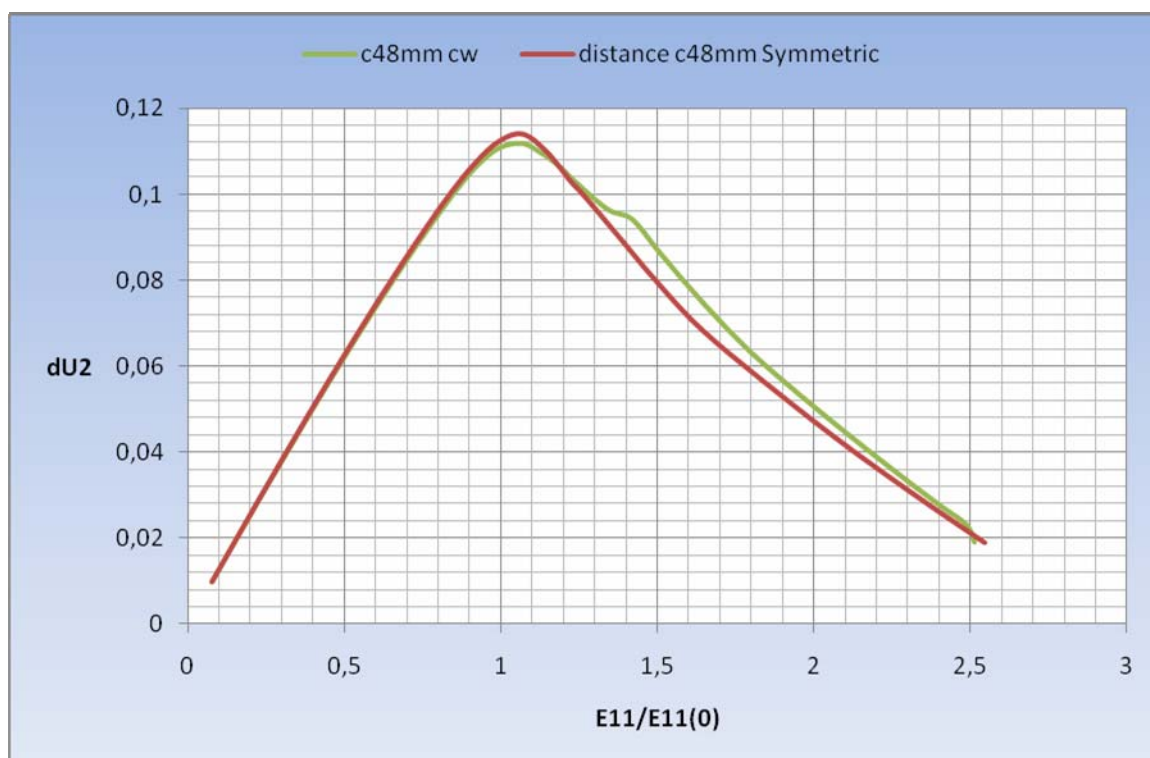


Σχήμα 6.40 Σύγκριση U_2 στο ενισχυτικό για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή πλάκας $c=48\text{mm}$ και με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό (επιλεγμένα στάδια φόρτισης)



Σχήμα 6.41 Τελική μορφή διακύμανσης U_2 (ως σχήμα 6.40)

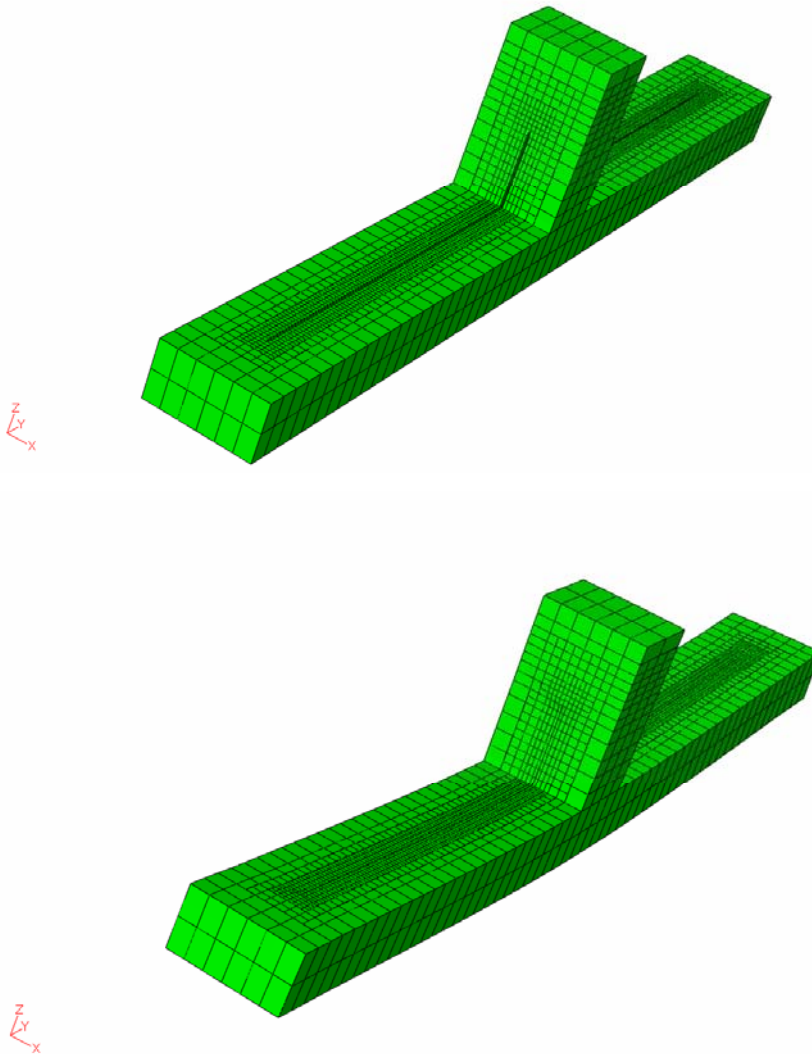
Τέλος όσον αφορά το διάστημα πλάτυνσης του εν λόγω μοντέλου, απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 6.42 σε σύγκριση με το αντίστοιχο για συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού. Όπως παρατηρούμε το μέγιστο εμφανίζεται ξανά στο σημείο έναρξης επαφής των επιφανειών της ρωγμής, ενώ η καμπύλη για την εξεταζόμενη περίπτωση διαφοροποιείται σημαντικά μετά το σημείο μέγιστου. Εκτιμάται ότι το σημείο $E11/E11(0)=1.19$ που αρχίζει η διαφοροποίηση των δύο καμπύλων, συμπίπτει με το σημείο επαφής της ρωγμής στην περιοχή του ενισχυτικού.



Σχήμα 6.42 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με ρωγμή $c=48\text{mm}$ και με/ άνευ ρωγμή στο ενισχυτικό

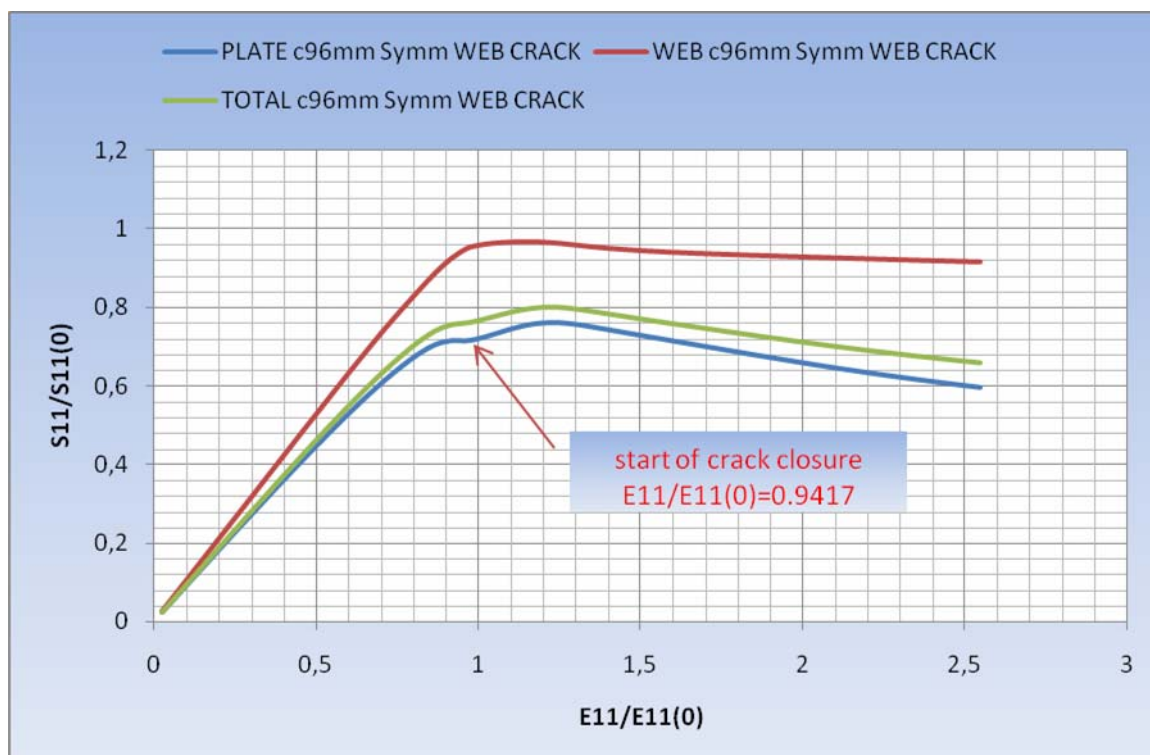
6.6 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με συμμετρική ρωγμή $c=96\text{mm}$ και ρωγμή $c_w=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 35832 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις στη ρωγμή $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8338\text{mm}$ και $5.054\text{mm} \times 5\text{mm} \times 3.335\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 1.025\text{mm}$ στη ρωγμή και $5\text{mm} \times 4.0825\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$ στο υπόλοιπο ενισχυτικό. Στο Σχήμα 6.43 απεικονίζεται η λεπτομέρεια της ρωγμής στην αρχή και στο τέλος της φόρτισης, όπου παρατηρούμε την πλήρη επαφή των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής.



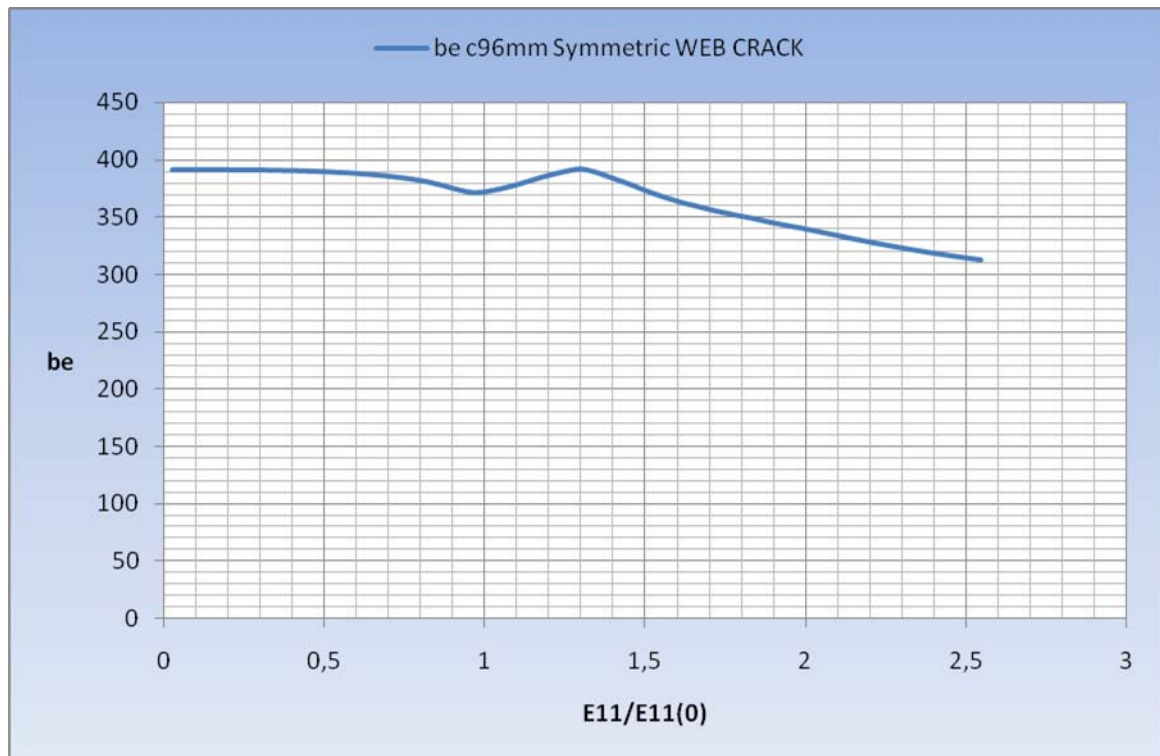
Σχήμα 6.43 Λεπτομέρεια ρωγμής $c=96\text{mm}$ / $c_w=9.798\text{mm}$ στην αρχή και στο τέλος της φόρτισης

Οι μειωτικές καμπύλες του εν λόγω ενισχυμένου ελάσματος απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.44. Όπως παρατηρούμε, με την επαφή των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής, η πλάκα ανακτά μέρος της ακαμψίας της.

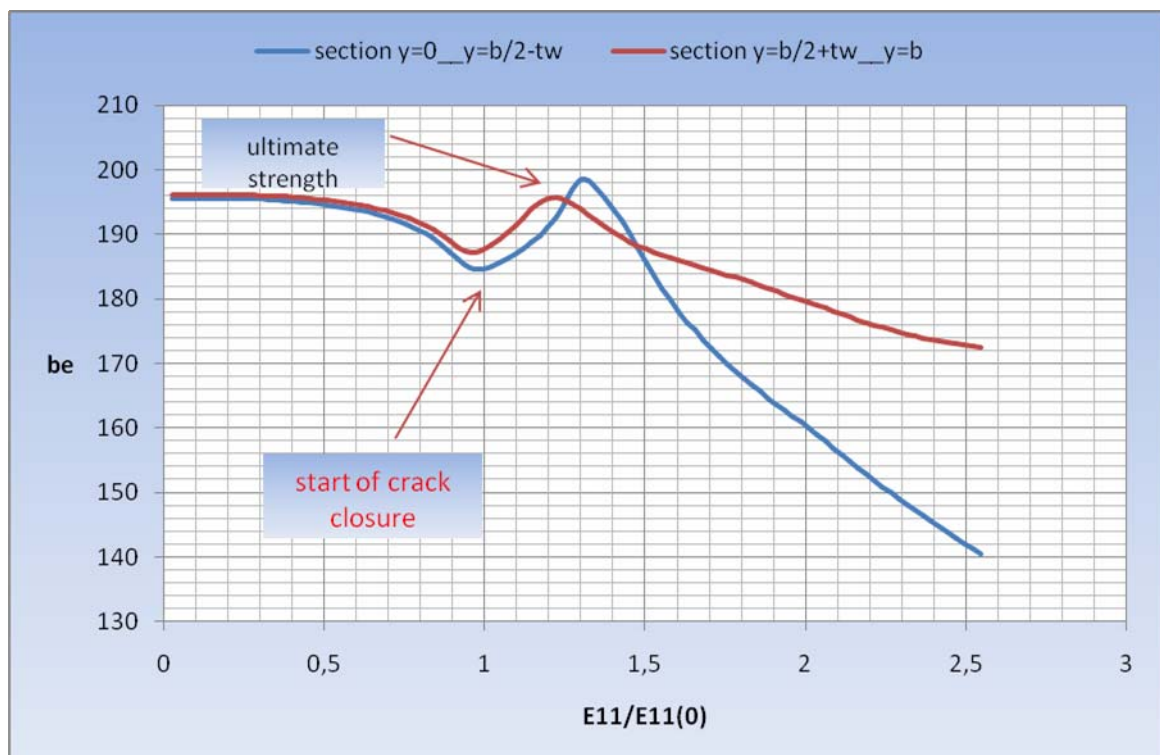


Σχήμα 6.44 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή συμμετρική $c=96mm$ στην πλάκα και $c_w=9.798mm$ στο ενισχυτικό

Η διακύμανση των ισοδυνάμων πλατών παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.45 και 6.46. Αξίζει να σημειωθεί, εκ νέου, η διαφοροποίηση στην κατανομή του φορτίου στα δύο τμήματα της πλάκας και συγκεκριμένα η αρχική παραλαβή μεγαλύτερου ποσοστού φόρτισης από το τμήμα $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ μέχρι την έναρξη επαφής της ρωγμής, η εναλλαγή στο φορτίο μετά το σημείο μεγίστης αντοχής και τέλος η καθολική φόρτιση του εν λόγω τμήματος μέχρι την κατάρρευση. Εκτιμάται ότι η συγκεκριμένη ακολουθία εκπορεύεται από τη μορφολογία των αρχικών γεωμετρικών παραμορφώσεων τόσο στην πλάκα, όσο και στο ενισχυτικό, που δημιουργούν μια δεξιόστροφη κίνηση των μετατοπίσεων U_3 στο επίπεδο xy .

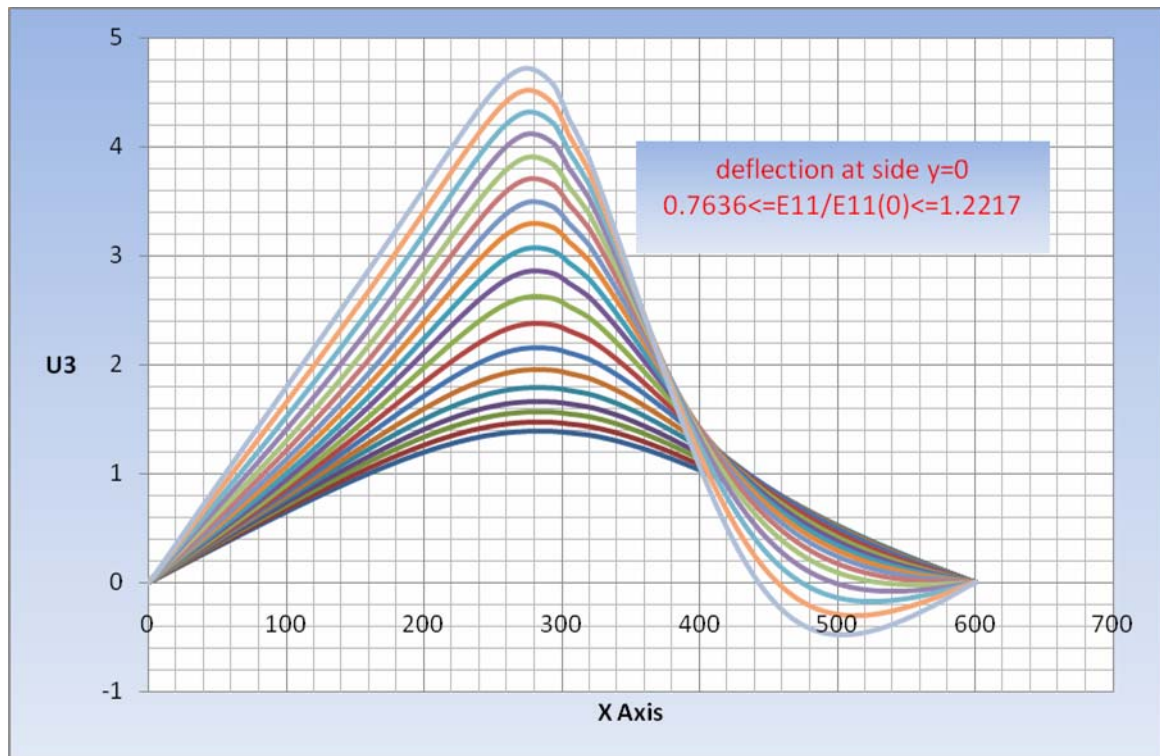


Σχήμα 6.45 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=96mm$ συμμετρική και ρωγμή $c_w=9.798$ στο ενισχυτικό

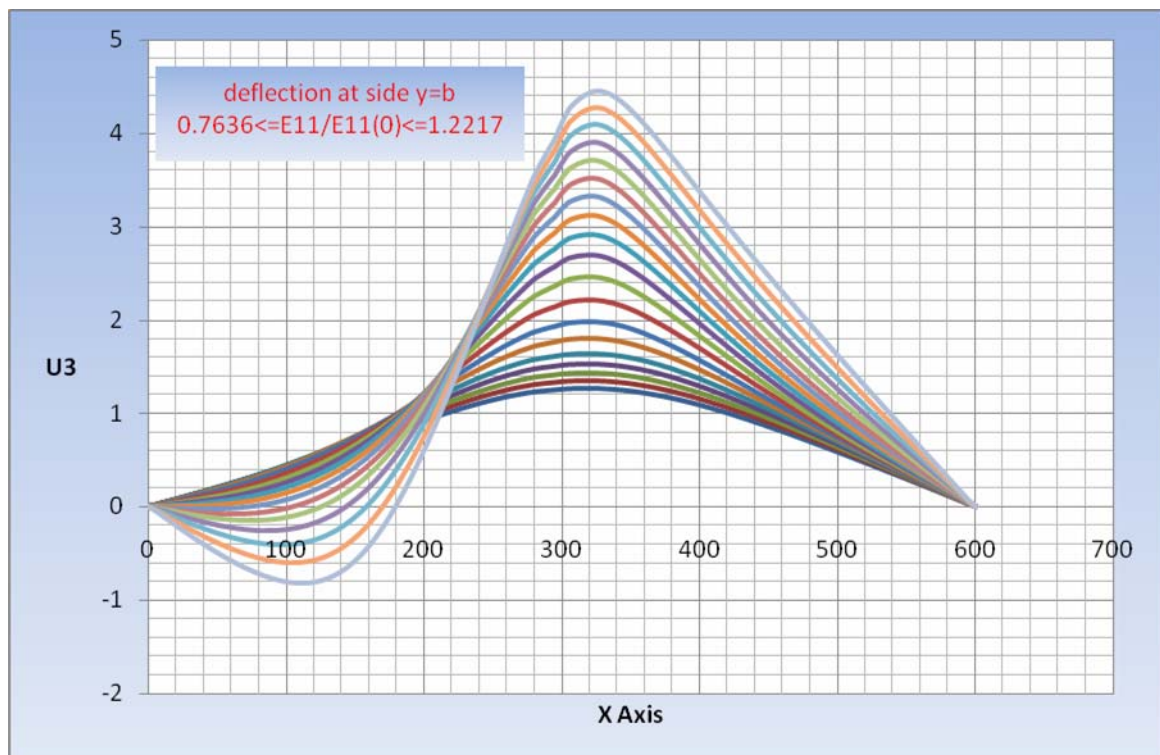


Σχήμα 6.46 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας

Η διακύμανση των βελών κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.47 ($y=0$) και 6.48 ($y=b$) για διαδοχικά στάδια φόρτισης μέχρι το σημείο μέγιστης αντοχής.

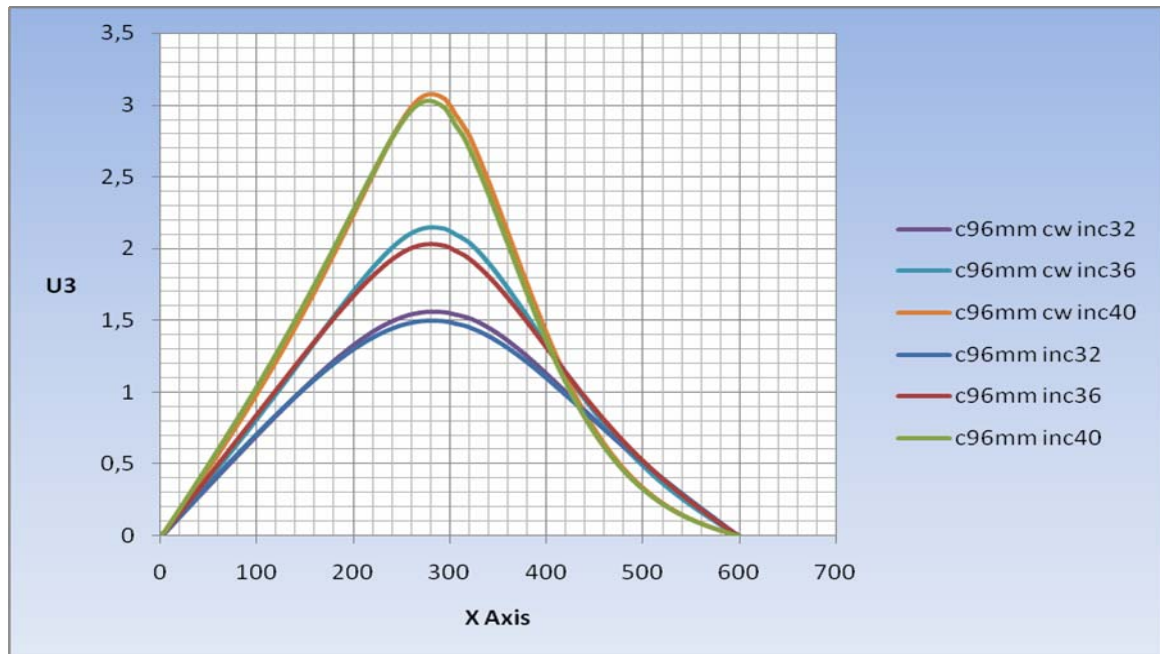


Σχήμα 6.47 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$

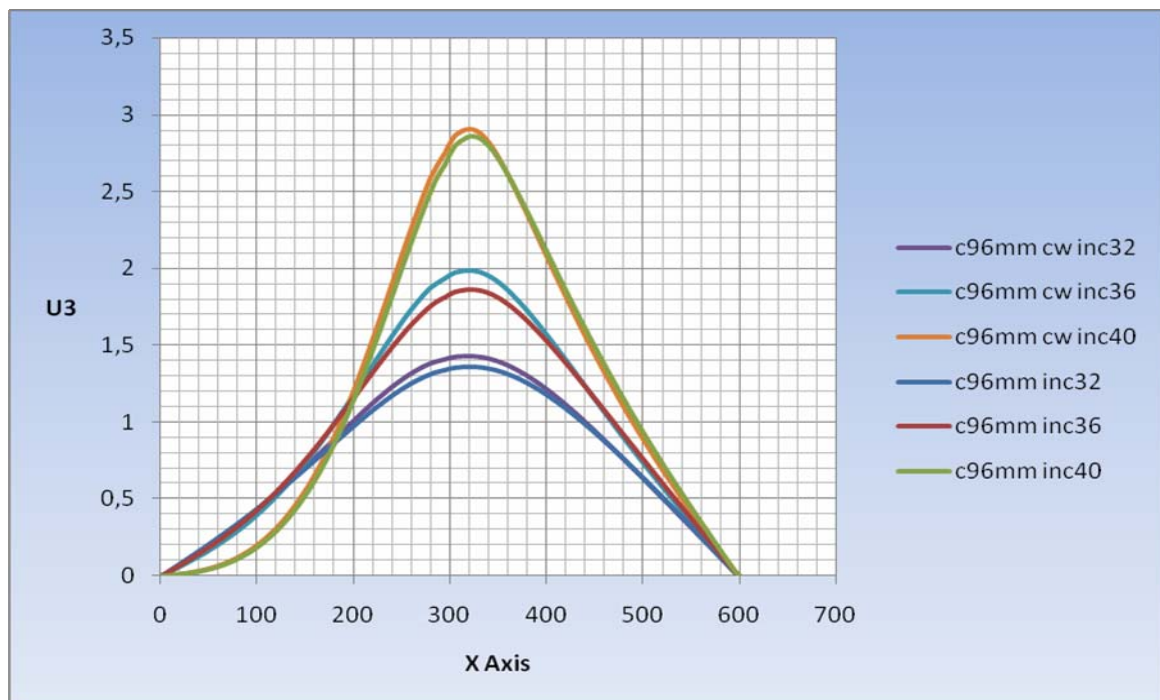


Σχήμα 6.48 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$

Στα ακόλουθα Σχήματα 6.49 και 6.50 πραγματοποιείται σύγκριση των βελών κάμψης στις αφόρτιστες πλευρές για τις περιπτώσεις ρωγμής στην πλάκα $c=96\text{mm}$ και με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό. Όπως παρατηρούμε, οι διαφορές είναι μικρές με την περίπτωση ρωγμής στο ενισχυτικό να παρουσιάζει ελαφρά μεγαλύτερες τιμές κάθετης μετατόπισης U_3 .

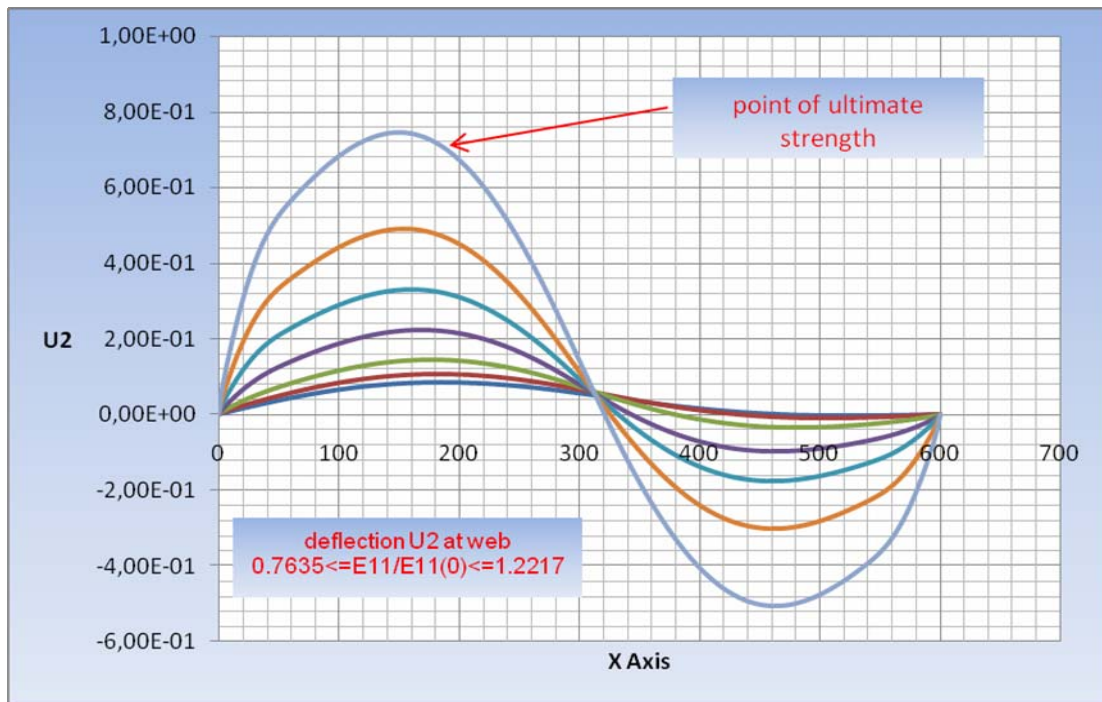


Σχήμα 6.49 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=96\text{mm}$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού



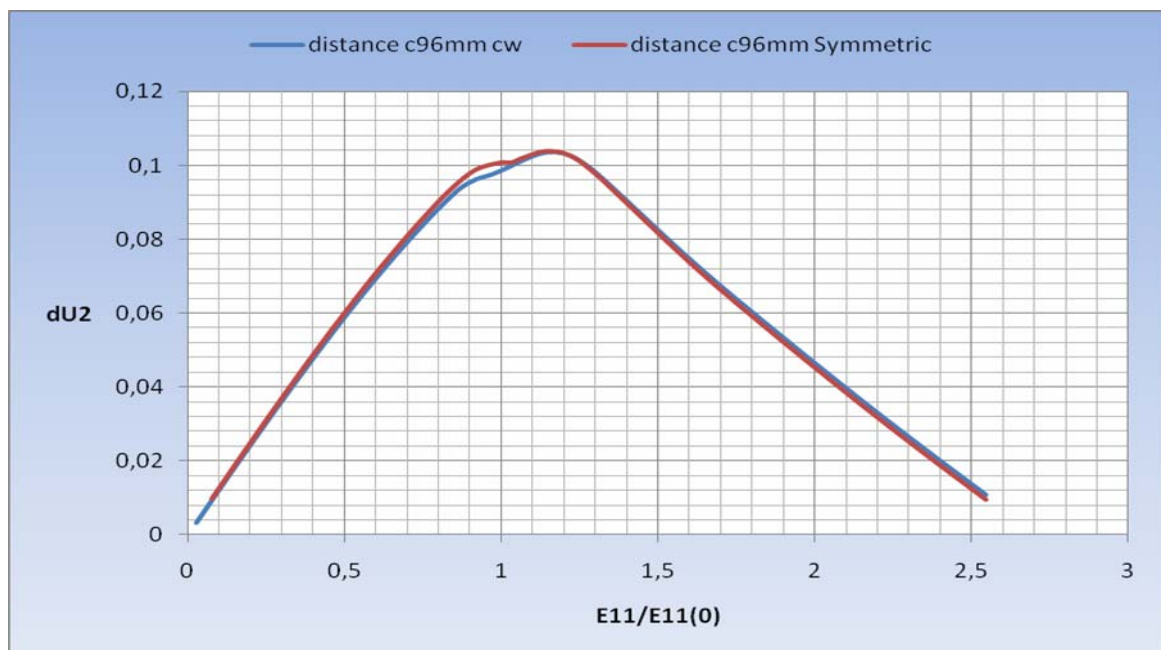
Σχήμα 6.50 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ για ενισχυμένο έλασμα με ρωγμή $c=96\text{mm}$ στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή ενισχυτικού

Η μεταβολή του βέλους κάμψης στο ενισχυτικό U2 απεικονίζεται στο Σχήμα 6.51 για διαδοχικά στάδια φόρτισης μέχρι του σημείου μέγιστης αντοχής.



Σχήμα 6.51 Διακύμανση βέλους κάμψης U2 στο ενισχυτικό

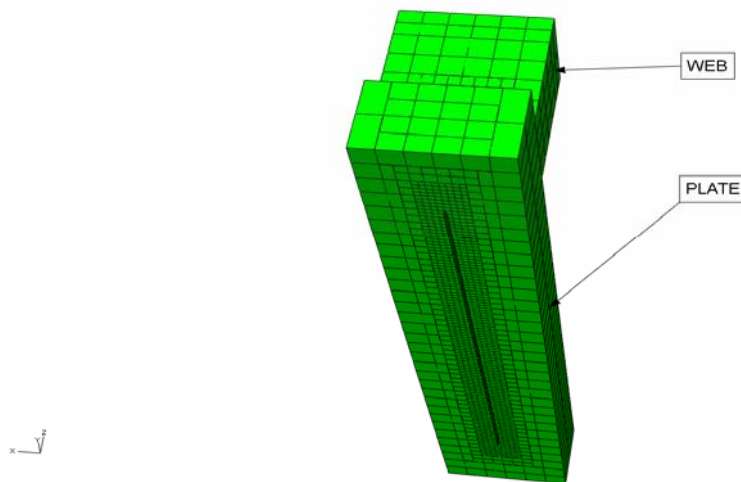
Το διάστημα πλάτυνσης για το εν λόγω μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 6.52. Η διαφοροποίηση που παρατηρείται οφείλεται στο διαφορετικό στάδιο επαφής των επιφανειών της ρωγμής.



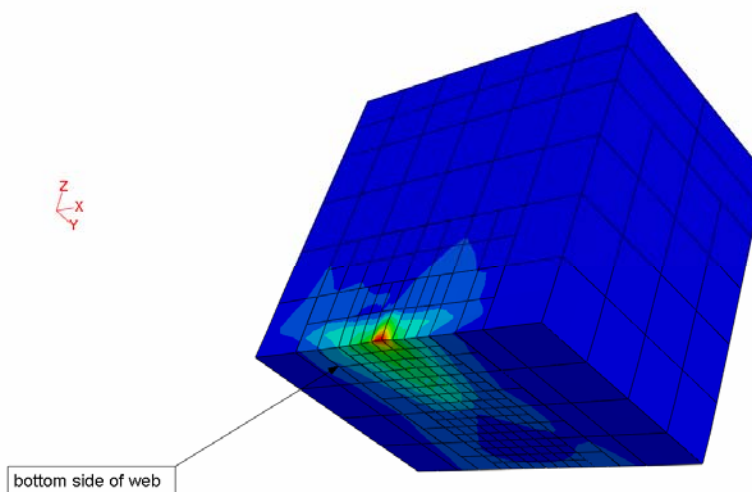
Σχήμα 6.52 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με ρωγμή c=96mm και με/ άνευ ρωγμή στο ενισχυτικό

6.7 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ από $y=152\text{mm}$ και $y=200\text{mm}$

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 29472 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις στη ρωγμή $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8338\text{mm}$ και $5.036\text{mm} \times 5\text{mm} \times 3.335\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ στο κυρίως ενισχυτικό οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $5.036\text{mm} \times 4.0825\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Στο σχήμα 6.53 που ακολουθεί φαίνεται η λεπτομέρεια της θέσεως της ρωγμής ως προς το ενισχυτικό, ενώ στο Σχήμα 6.54 απεικονίζεται η πλαστικοποίηση στην περιοχή του ενισχυτικού που βρίσκεται άνωθεν της ρωγμής.

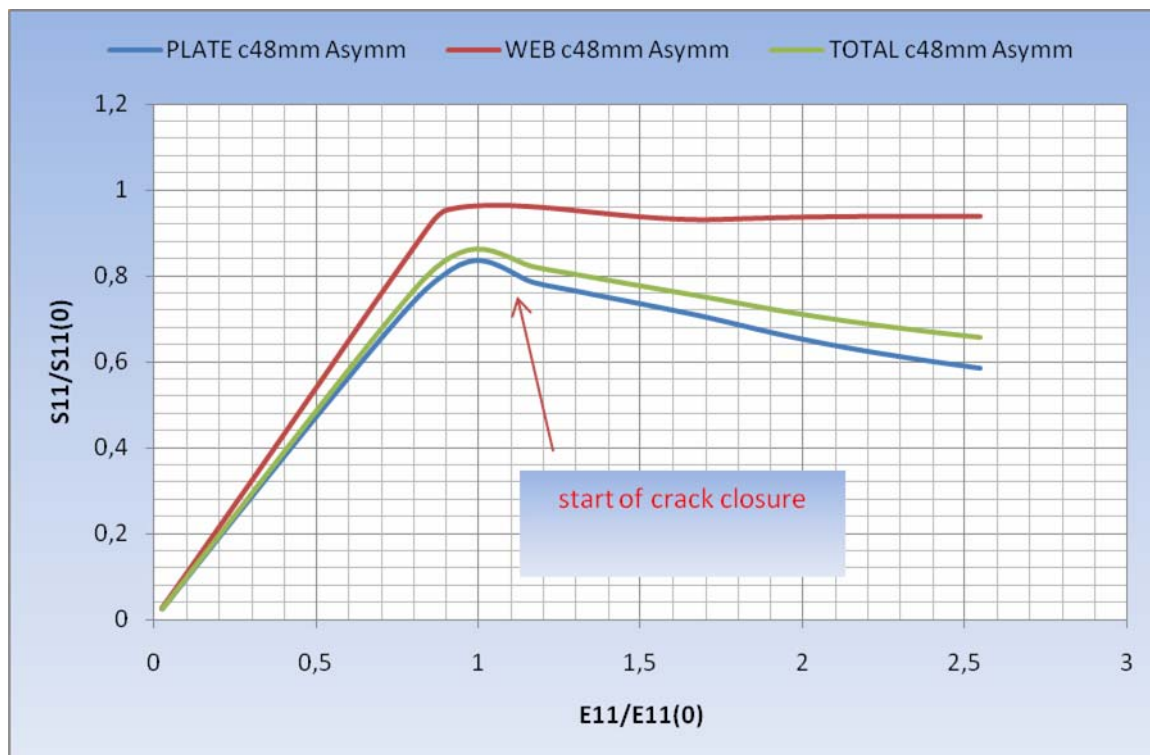


Σχήμα 6.53 Λεπτομέρεια ασύμμετρης ρωγμής $c=48\text{mm}$



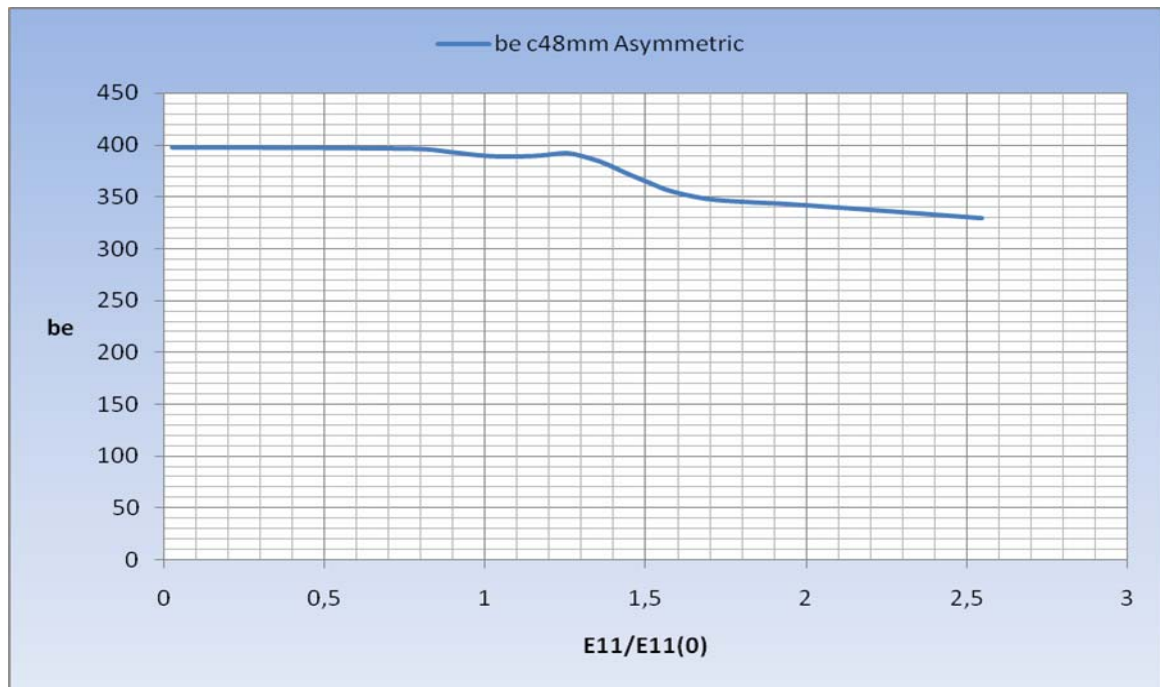
Σχήμα 6.54 Πλαστική ροή στην περιοχή του ενισχυτικού άνωθεν της ασύμμετρης Ρωγμής

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης της εξεταζόμενης περίπτωσης απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.55. Όπως παρατηρούμε η έναρξη της επαφής των επιφανειών της ρωγμής εξελίσσεται σε στάδιο φόρτισης μετά το σημείο μέγιστης αντοχής, αλλάζοντας την κλίση κατάρρευσης της κατασκευής.

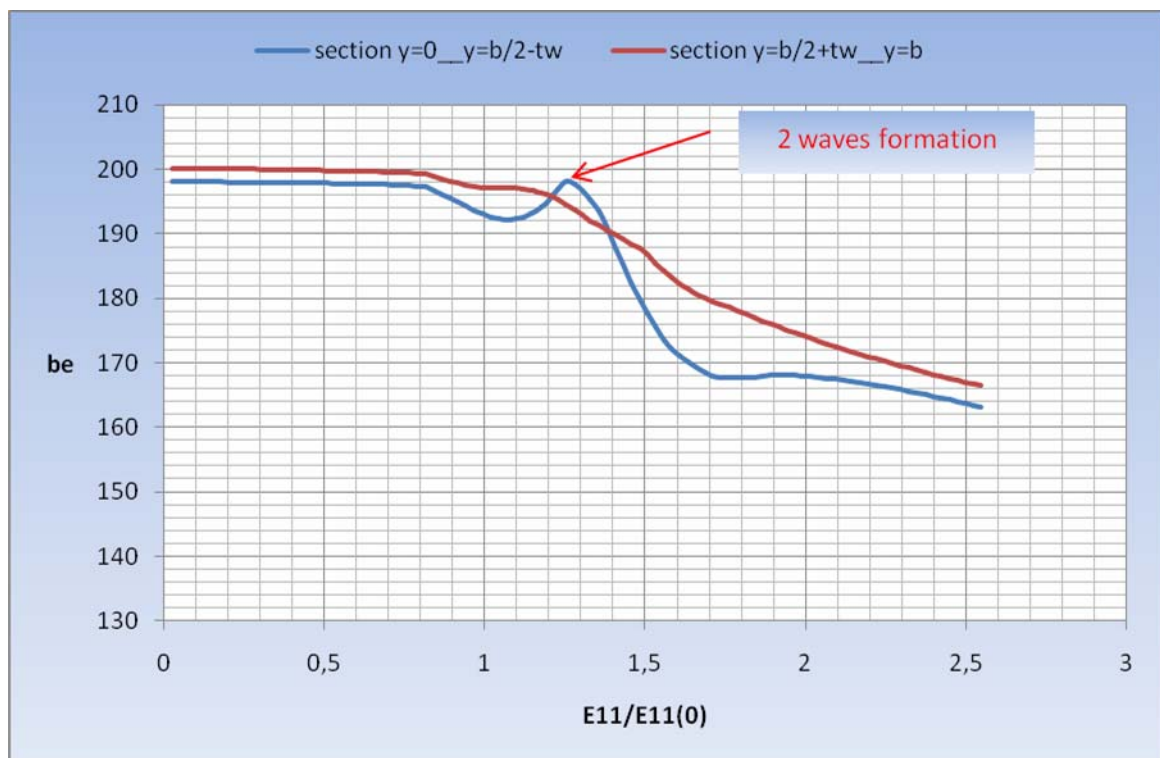


Σχήμα 6.55 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή ασύμμετρη $c=48mm$

Η διακύμανση των ισοδύναμων πλατών παρουσιάζεται στα σχήματα 6.56 και 6.57. Το πρώτο σημείο τομής των εν λόγω καμπυλών για τα δύο (2) τμήματα της πλάκας συμπίπτει με το σημείο επαφής των επιφανειών της ρωγμής, που όπως παρατηρούμε αλλάζει την κατανομή φόρτισης στην κατασκευή. Αξιοσημείωτο είναι ότι η μεγαλύτερη φόρτιση λαμβάνεται και πάλι από το τμήμα $y=0$ έως $y=b/2-t_w$, παρά το γεγονός ότι σε αυτό βρίσκεται η ρωγμή. Κατόπιν αυτού, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η μορφολογία των αρχικών μετατοπίσεων (σχετική θέση – μέγεθος) καθορίζει την κατανομή φόρτισης στο έλασμα. Επιπρόσθετα, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 6.57 το τμήμα που φέρει τη ρωγμή παραλαμβάνει εκ νέου, μεγαλύτερο έργο μετά το σχηματισμό των ημικυμάτων μέχρι την κατάρρευση της κατασκευής.

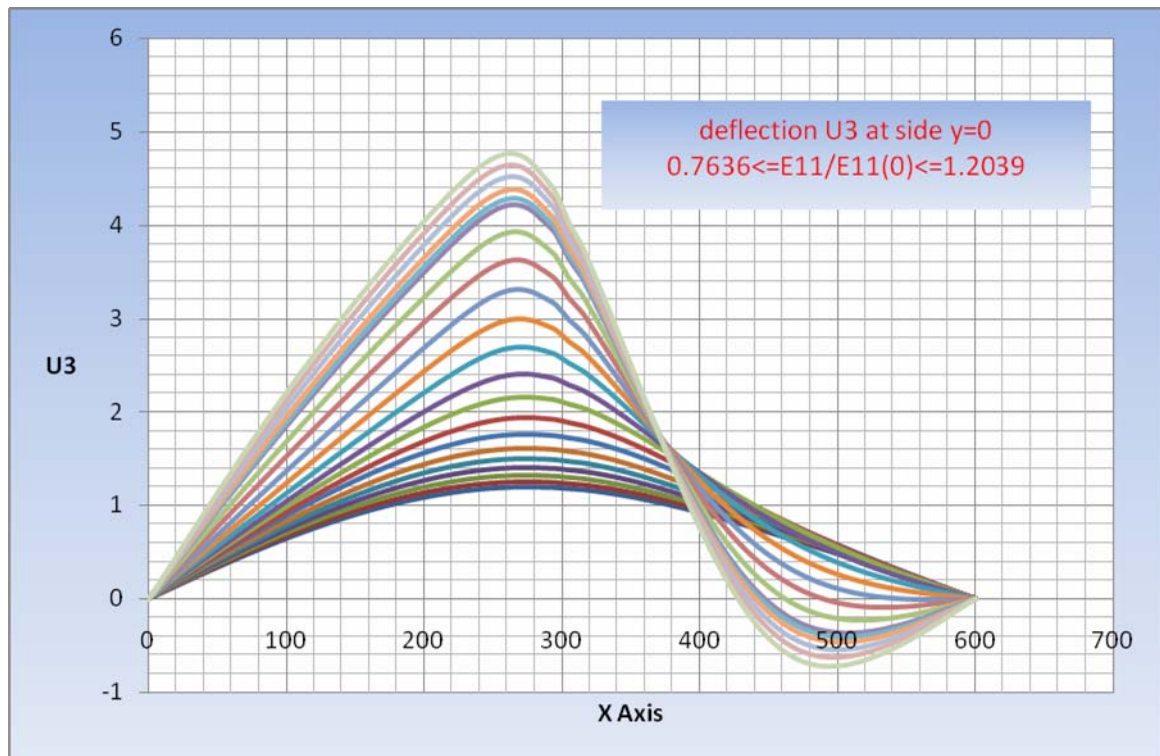


Σχήμα 6.56 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=48mm$ ασύμμετρη

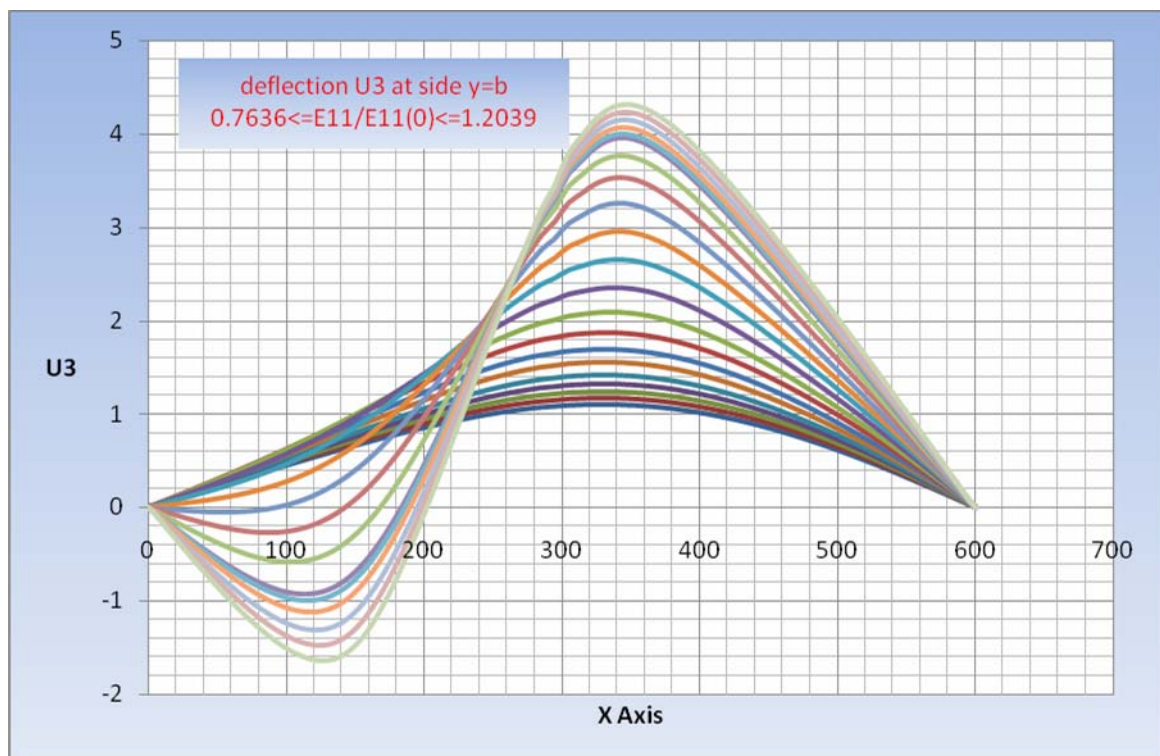


Σχήμα 6.57 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας

Όσον αφορά τα βέλη κάμψης στις αφόρτιστες πλευρές για την εξεταζόμενη περίπτωση, αυτά παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 6.58 ($y=0$) και 6.59 ($y=b$).



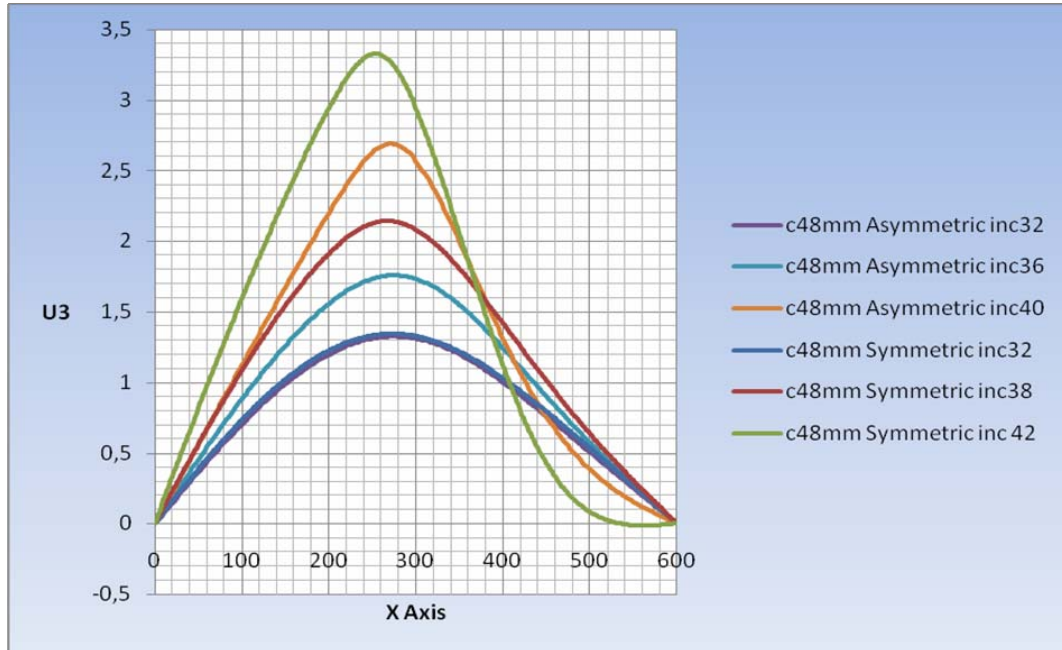
Σχήμα 6.58 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά y=0



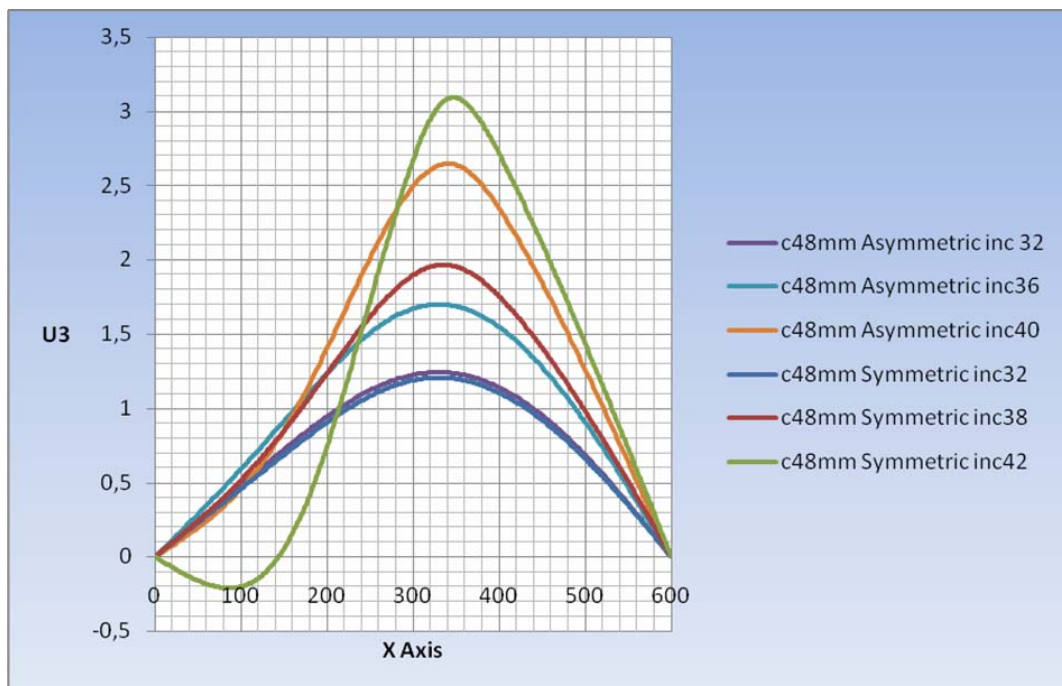
Σχήμα 6.59 Διακύμανση U3 στην αφόρτιστη πλευρά y=b

Από τη σύγκριση των περιπτώσεων συμμετρικής/ ασύμμετρης ρωγμής μήκους $c=48\text{mm}$ στην πλάκα σε αντίστοιχα επίπεδα φόρτισης προκύπτουν τα

Σχήματα 6.60 ($y=0$) και 6.61 ($y=b$). Όπως παρατηρούμε, η ύπαρξη ρωγμής στο ένα τμήμα της πλάκας αναστέλλει αφενός τη δημιουργία ημικυμάτων χρονικά, αφετέρου μειώνει σημαντικά τις μέγιστες τιμές παραμόρφωσης U_3 στο ενισχυμένο έλασμα ως σύνολο.

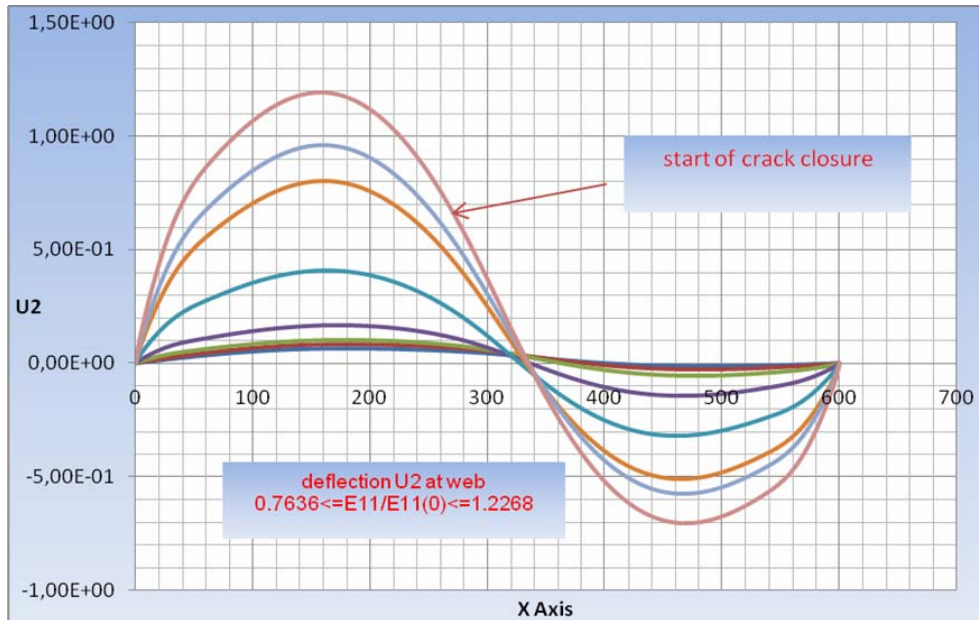


Σχήμα 6.60 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ για ενισχυμένο έλασμα με ασύμμετρη/ συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$



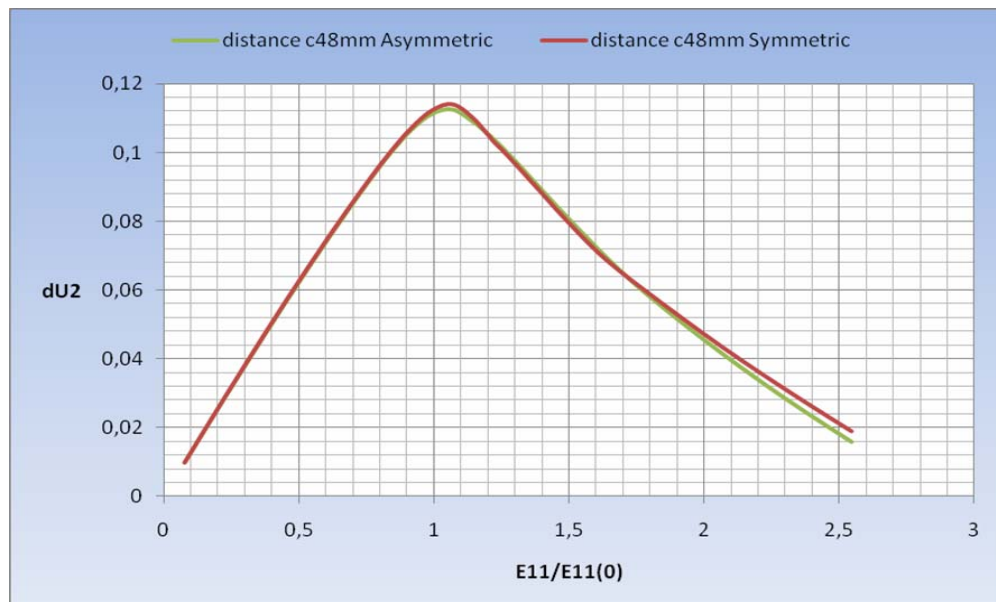
Σχήμα 6.61 Σύγκριση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ για ενισχυμένο έλασμα με ασύμμετρη/ συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$

Στο ακόλουθο Σχήμα 6.62 απεικονίζεται η διακύμανση του βέλους κάμψης U2 στο ενισχυτικό, για διαδοχικά στάδια φόρτισης (ανά τρία (3) στάδια συμπίεσης). Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση του εν λόγω μεγέθους με την επαφή των επιφανειών της ρωγμής.



Σχήμα 6.62 Διακύμανση βέλους κάμψης U2 στο ενισχυτικό

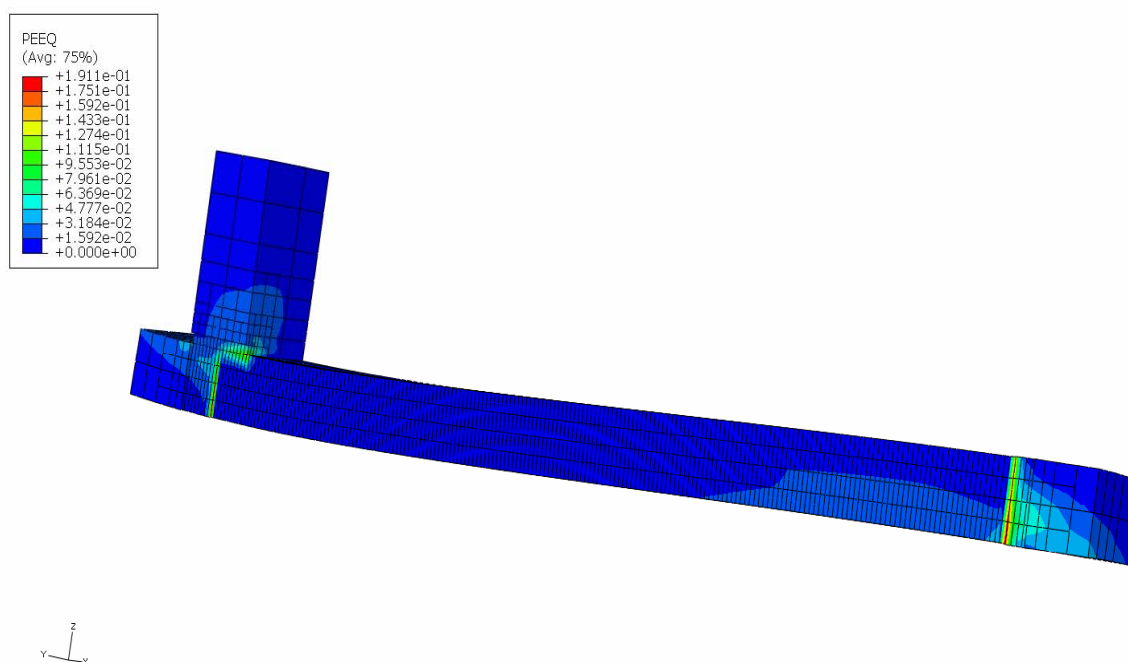
Το διάστημα πλάτυνσης του εν λόγω μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.63 σε σύγκριση με την περίπτωση της συμμετρικής ρωγμής ίδιου μήκους.



Σχήμα 6.63 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή c=48mm

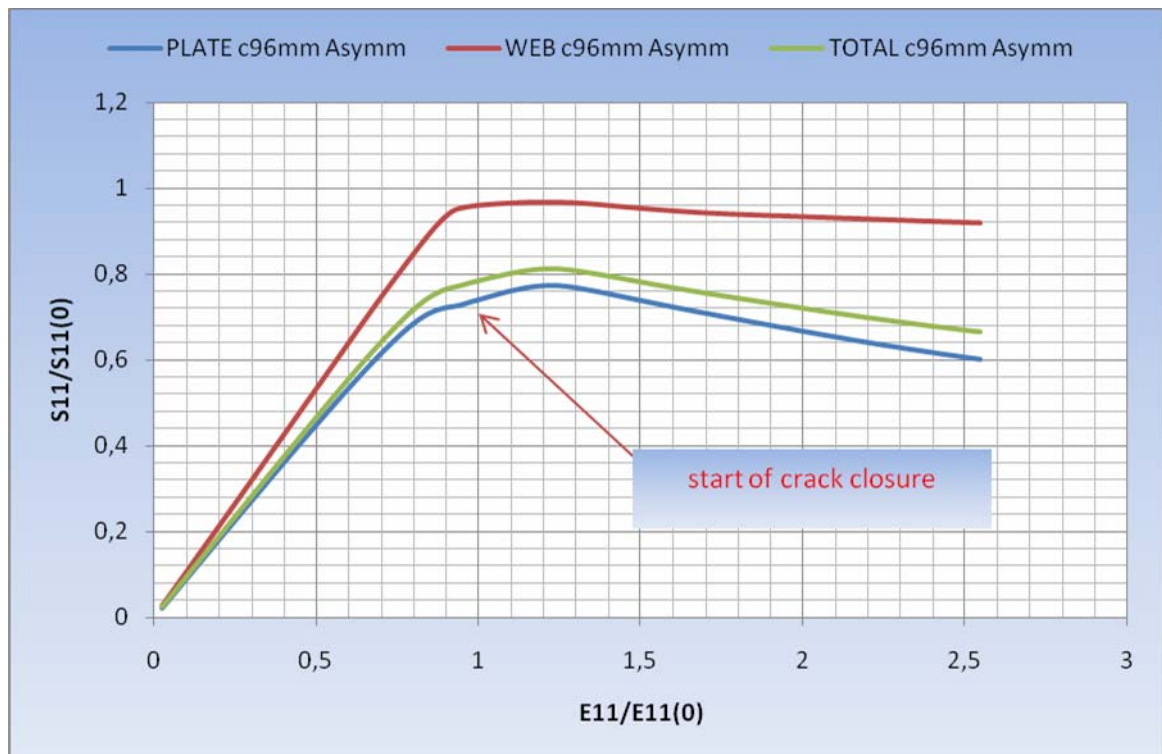
6.8 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$ από $y=152\text{mm}$ και $y=200\text{mm}$

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 33856 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις στη ρωγμή $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8338\text{mm}$ και $5.036\text{mm} \times 5\text{mm} \times 3.335\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ στο κυρίως ενισχυτικό οι διαστάσεις των στοιχείων ήταν $5.036\text{mm} \times 4.0825\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Στο Σχήμα 6.64 απεικονίζεται η κατάσταση πλαστικοποίησης στην περιοχή της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης.



Σχήμα 6.64 Πλαστική ροή στην περιοχή της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης

Οι μειωτικές καμπύλες της εξεταζόμενης περίπτωσης παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.65. Η επιπλέον ακαμψία που αποκτά η πλάκα για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)}=0.9239$, οφείλεται στην έναρξη επαφής των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής.

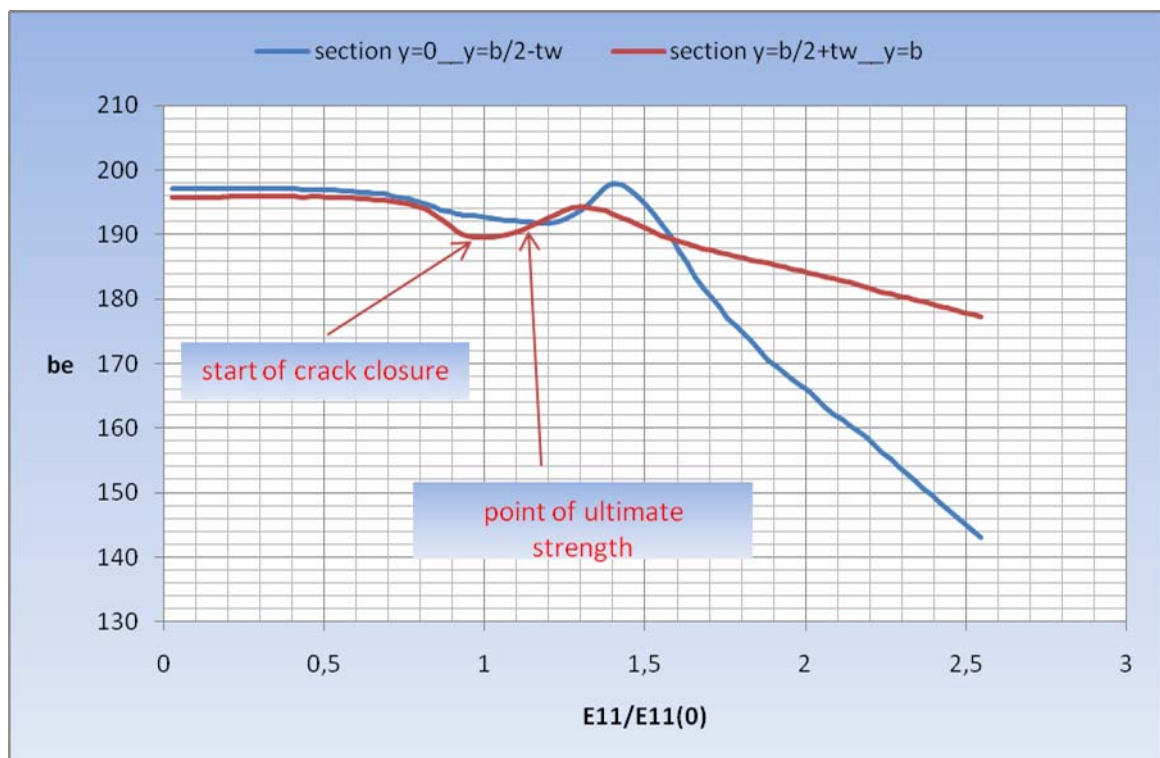


Σχήμα 6.65 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή ασύμμετρη $c=96mm$

Η διακύμανση των ισοδύναμων πλατών παρουσιάζεται στα σχήματα 6.66 και 6.67. Η παρούσα περίπτωση παρουσιάζει διαφοροποίηση στην κατανομή του φορτίου σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση ρωγμής μήκους $c=48mm$. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι λόγω του μεγάλου μήκους της ρωγμής, οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες δεν ωθούν το τμήμα $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ να παραλάβει το μεγαλύτερο μέρος της συμπίεσης όπως συνέβαινε στην προηγούμενη περίπτωση. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 6.67 αρχικά φορτίζεται το τμήμα $y=b/2+t_w$ έως $y=b$ μέχρι του σημείου μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος (πρώτο σημείο τομής των δύο (2) καμπυλών). Στο τελικό στάδιο συμπίεσης όμως, παραλαμβάνει το μεγάλο μέρος της φόρτισης το τμήμα που φέρει τη ρωγμή μέχρι τη τελική κατάρρευση.



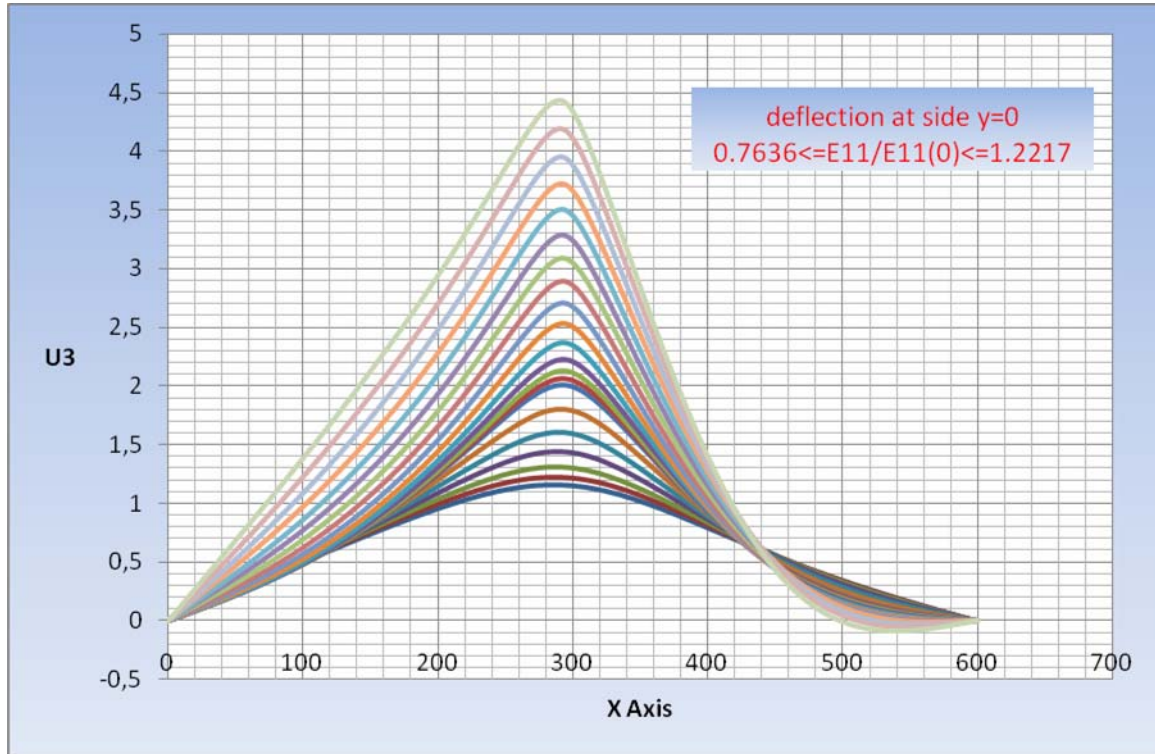
Σχήμα 6.66 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με $c=96\text{mm}$ ασύμμετρη



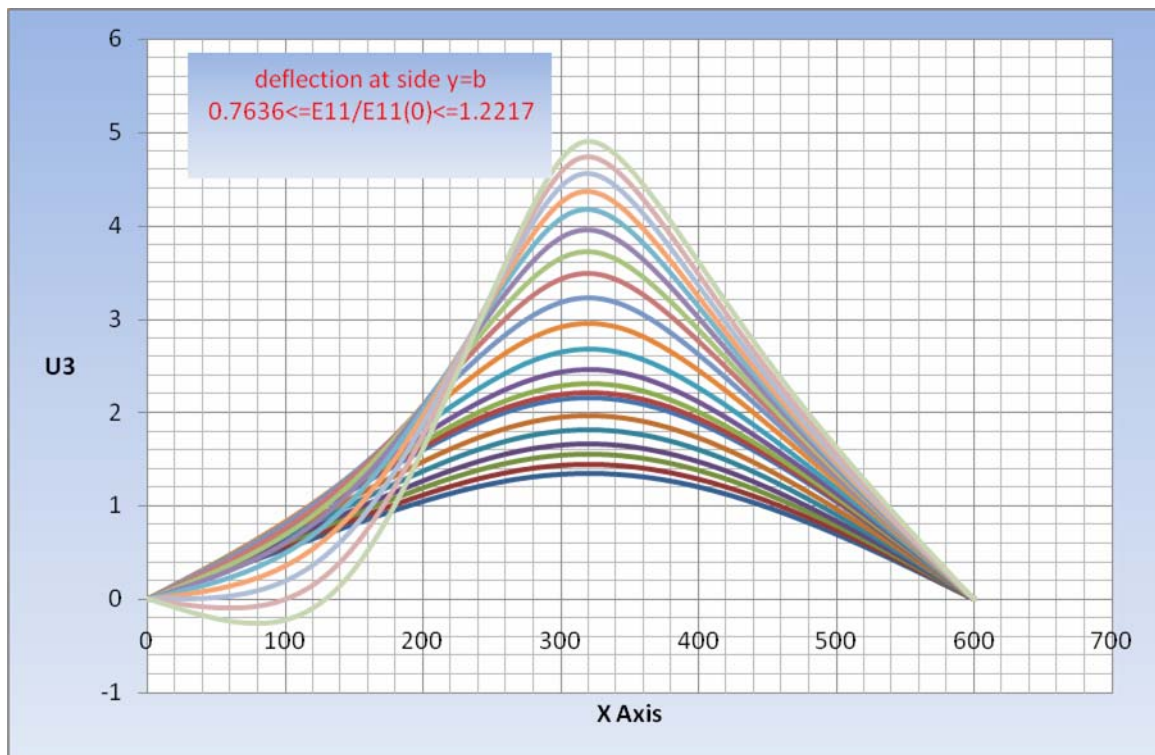
Σχήμα 6.67 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας

Στα ακόλουθα Σχήματα 6.68 και 6.69 απεικονίζονται τα βέλη κάμψως U3 των αφόρτιστων πλευρών $y=0$ και $y=b$ αντίστοιχα σε διαδοχικά στάδια συμπίεσης μέχρι το σημείο μέγιστης αντοχής. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε το τμήμα

που φέρει τη ρωγμή συγκεντρώνει τα μέγιστα στην περιοχή του άξονα συμμετρίας της κατασκευής $x=a/2$. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι το μεγάλο μήκος της ασύμμετρης ρωγμής καθυστερεί τη διαδικασία δημιουργίας των ημικυμάτων στην πλάκα.

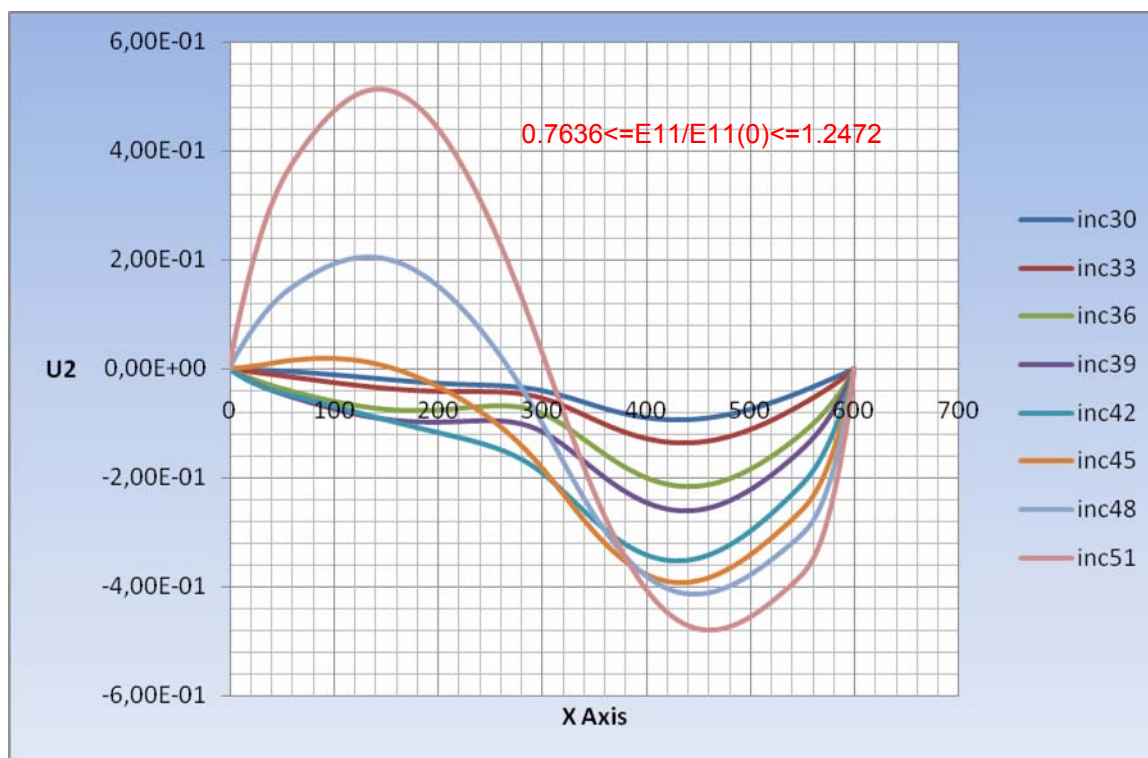


Σχήμα 6.68 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$



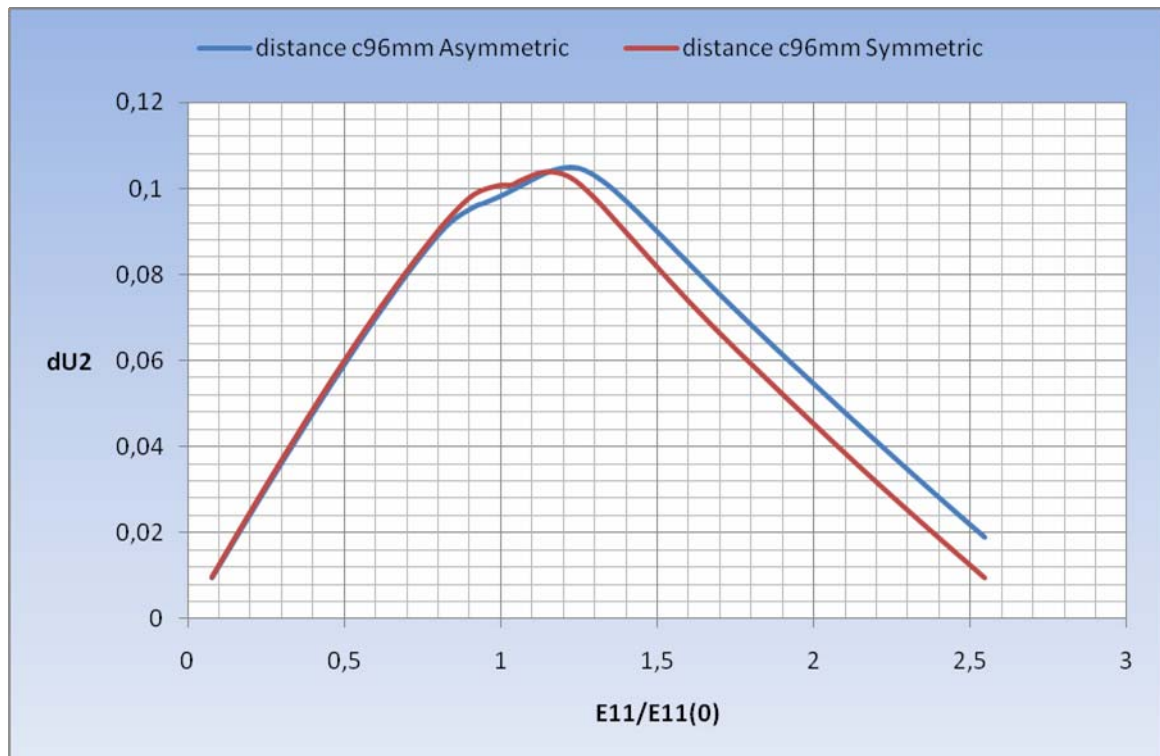
Σχήμα 6.69 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$

Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει στη συγκεκριμένη περίπτωση η διακύμανση του βέλους κάμψης U_2 του ενισχυτικού σε αυξανόμενα επίπεδα συμπίεσης. Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 6.70, ενώ αρχικά το ενισχυτικό παρουσιάζει μετατόπιση προς την πλευρά της ρωγμής (αντίθετα από τη διεύθυνση της αρχικής παραμόρφωσης αυτού), στη συνέχεια για φορτίο $E_{11}/E_{11(0)}=1.094$ (inc45 σχήματος) παρατηρείται αναστροφή προς την αντίθετη διεύθυνση. Το εν λόγω στάδιο φόρτισης συμπίπτει με την έναρξη δημιουργίας κοίλου κύματος στο τμήμα από $y=0$ έως $y=b/2-t_w$. Με άλλα λόγια, η ρωγμή για το δεδομένο μήκος, ωθεί αρχικά το ενισχυτικό προς την πλευρά της, σε αντίθεση με το τι συμβαίνει στις προηγούμενες περιπτώσεις (με την ύπαρξη ρωγμής). Στη συνέχεια όμως της συμπίεσης, η παραμόρφωση του ενισχυτικού οδεύει προς τη μορφή των δύο (2) ημικυμάτων που παρατηρήσαμε σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 6.70 Διακύμανση βέλους κάμψης U_2 στο ενισχυτικό

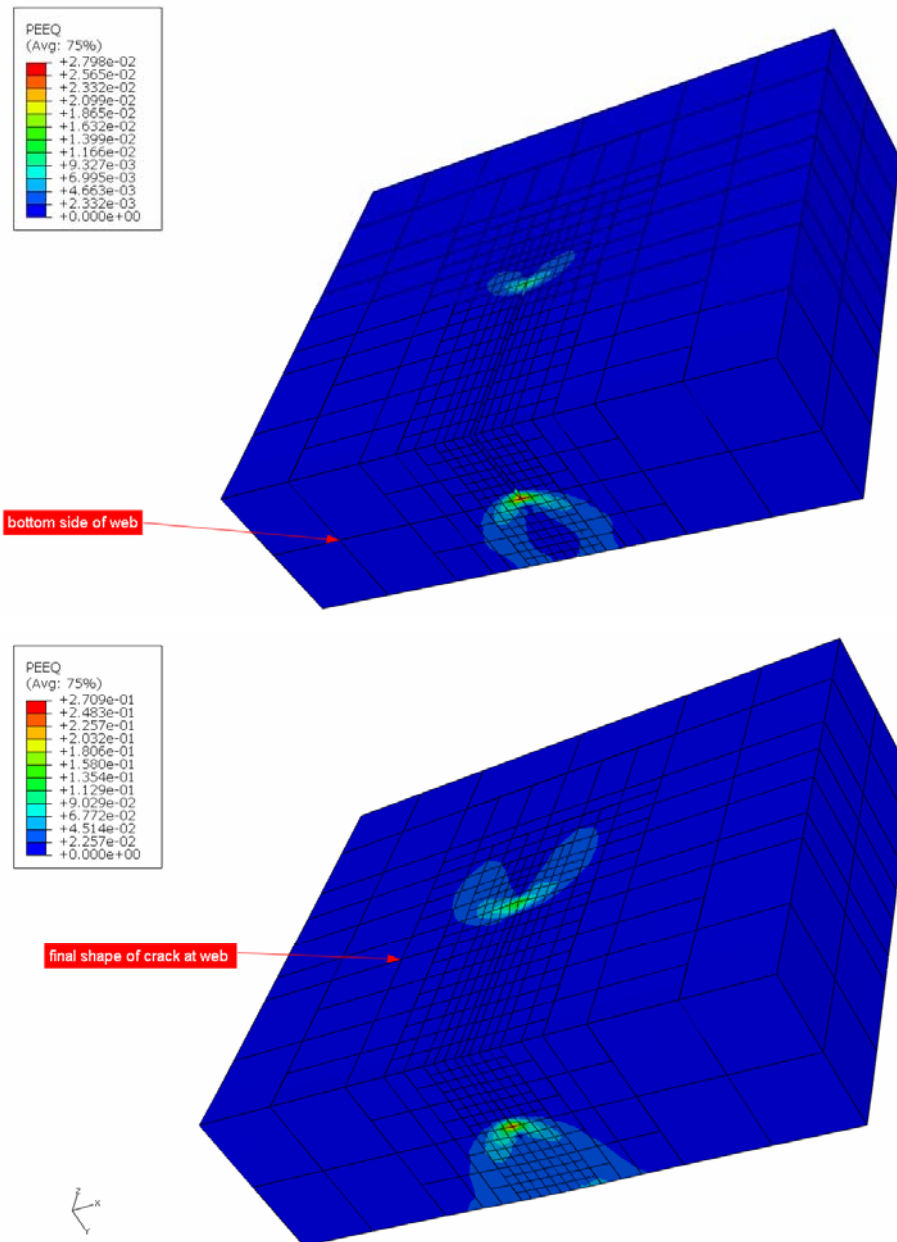
Όσον αφορά το διάστημα πλάτυνσης του εν λόγω μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.71 σε σύγκριση με το αντίστοιχο συμμετρικής ρωγμής ίδιου μήκους $c=96\text{mm}$. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και σε αντιστοιχία με το σχήμα 6.63 (Σύγκριση μοντέλων με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$), με την αύξηση του μήκους της ρωγμής αμβλύνονται οι διαφορές του εν λόγω μεγέθους.



Σχήμα 6.71 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με συμμετρική/ ασύμμετρη ρωγμή $c=96mm$

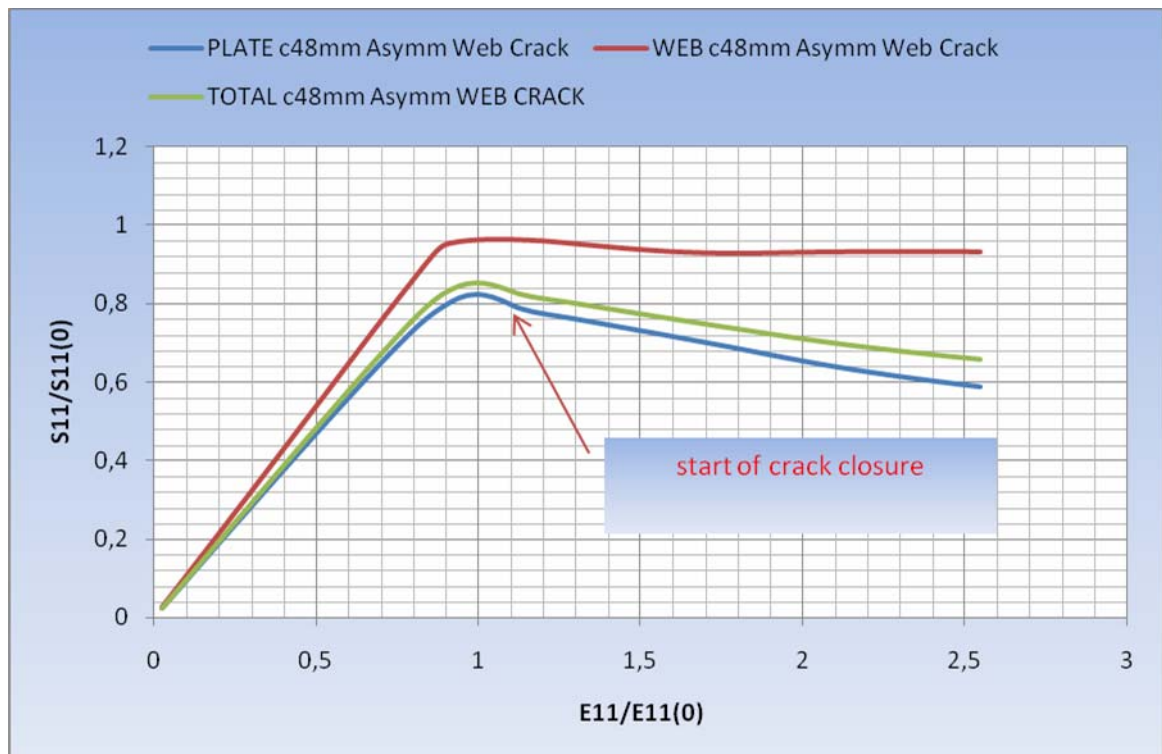
6.9 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=48mm$ από $y=152mm$ και $y=200mm$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=9.798mm$ στο ενισχυτικό

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 32168 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις στη ρωγμή $0.35mm*0.49mm*0.8338mm$ και $4.9634mm*5mm*3.335mm$ στην κυρίως πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό $0.35mm*0.49mm*1.0207mm$ στη ρωγμή και $4.9634mm*4.0825mm*4.0825mm$ στο υπόλοιπο ενισχυτικό. Στο σχήμα 6.72 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πλαστική ροή σε αρχικό στάδιο συμπίεσης καθώς και στο τέλος της φόρτισης στην περιοχή του ενισχυτικού άνωθεν της ασύμμετρης ρωγμής.



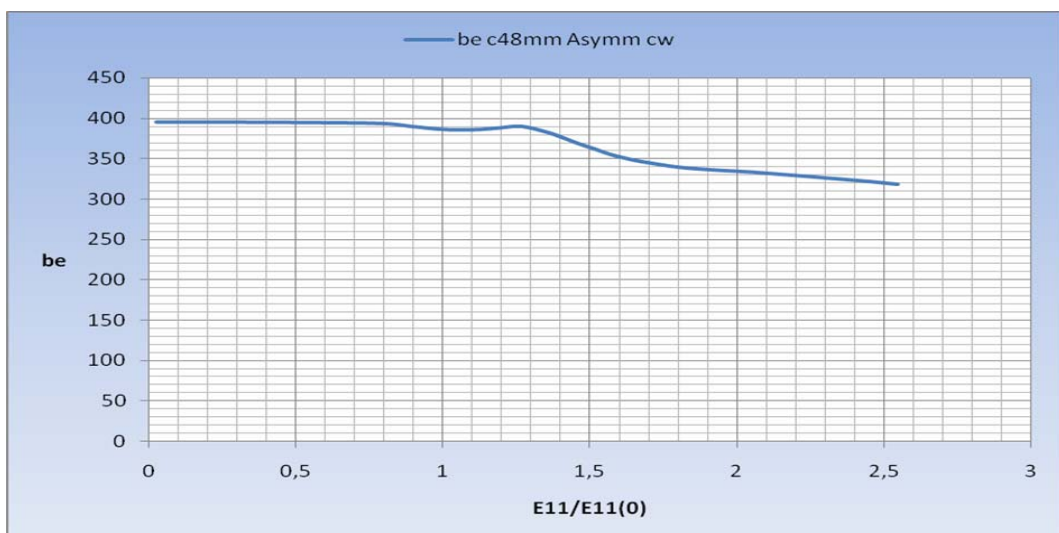
Σχήμα 6.72 Πλαστική ροή/ Κατάσταση ρωγμής στην περιοχή του ενισχυτικού

Οι μειωτικές καμπύλες του εν λόγω ενισχυμένου ελάσματος απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.73. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε το ενισχυμένο έλασμα φθάνει στα όρια της αντοχής του, πριν την έναρξη της επαφής των επιφανειών της ρωγμής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την έναρξη επαφής των επιφανειών της ρωγμής έχουμε μικρή ανάκτηση της ακαμψίας της κατασκευής κατά τη διαδικασία κατάρρευσης.

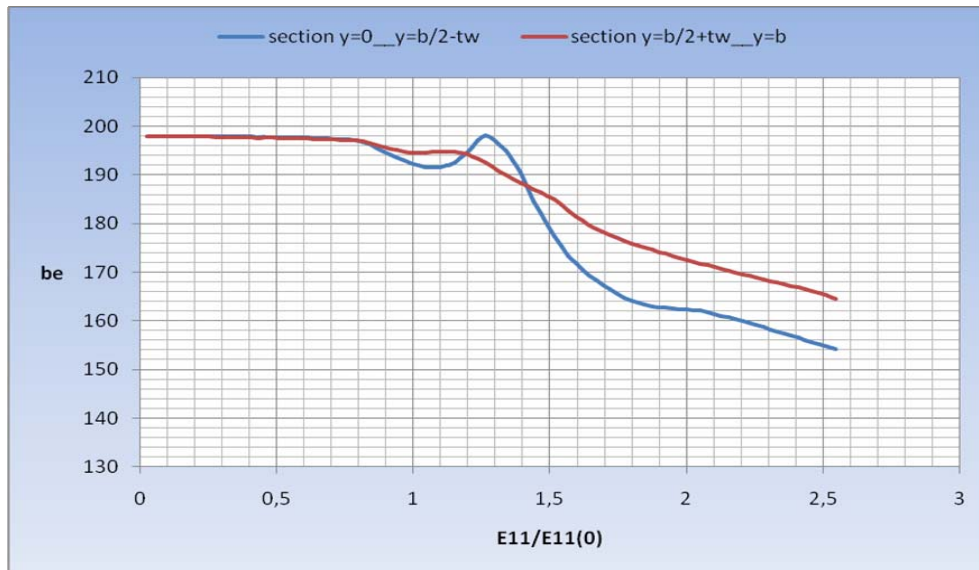


Σχήμα 6.73 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγή ασύμμετρη $c=48mm$ στην πλάκα και $c_w=9.798mm$ στο ενισχυτικό

Η διακύμανση των ισοδύναμων πλατών της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης απεικονίζεται στα ακόλουθα Σχήματα 6.74 και 6.75. Θα πρέπει να σημειωθεί η ταύτιση του φορτίου στα δύο (2) τμήματα της πλάκας στην ελαστική περιοχή, σε σύγκριση με την κατάσταση που ανιχνεύθηκε στην αντίστοιχη περίπτωση άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό (σχήμα 6.57)

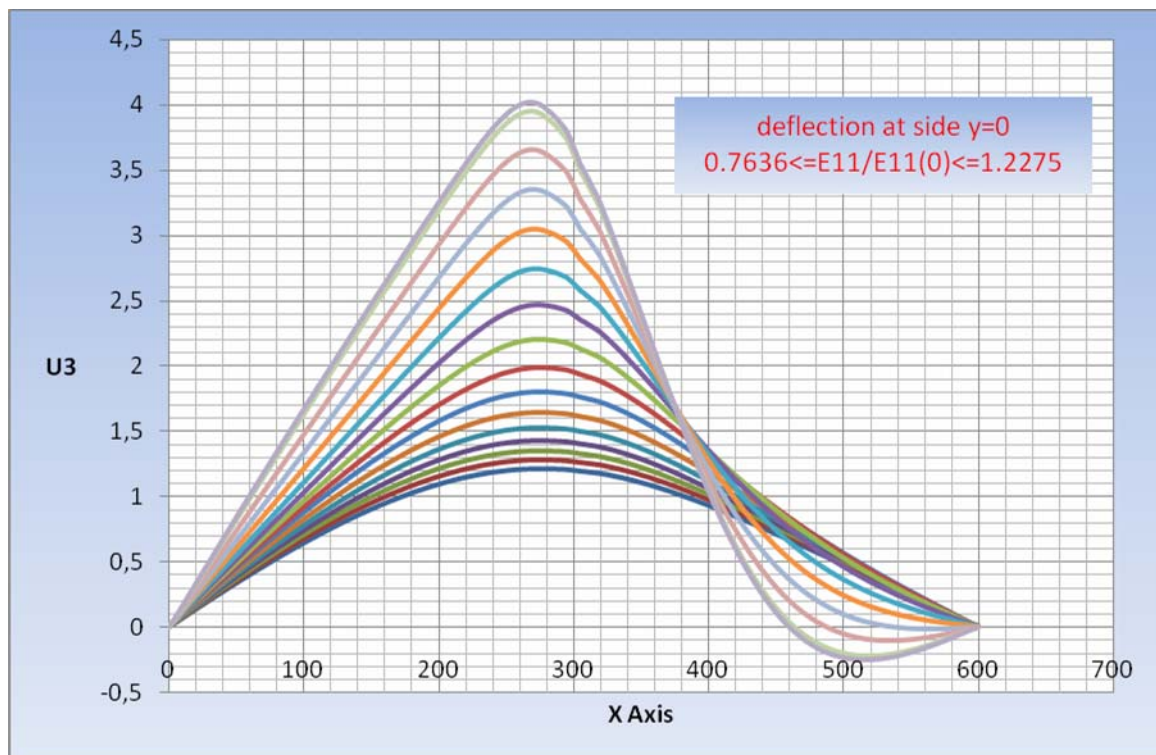


Σχήμα 6.74 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με ασύμμετρη $c=48mm$ στην πλάκα και επέκταση ρωγμής στο ενισχυτικό $c_w=9.798mm$

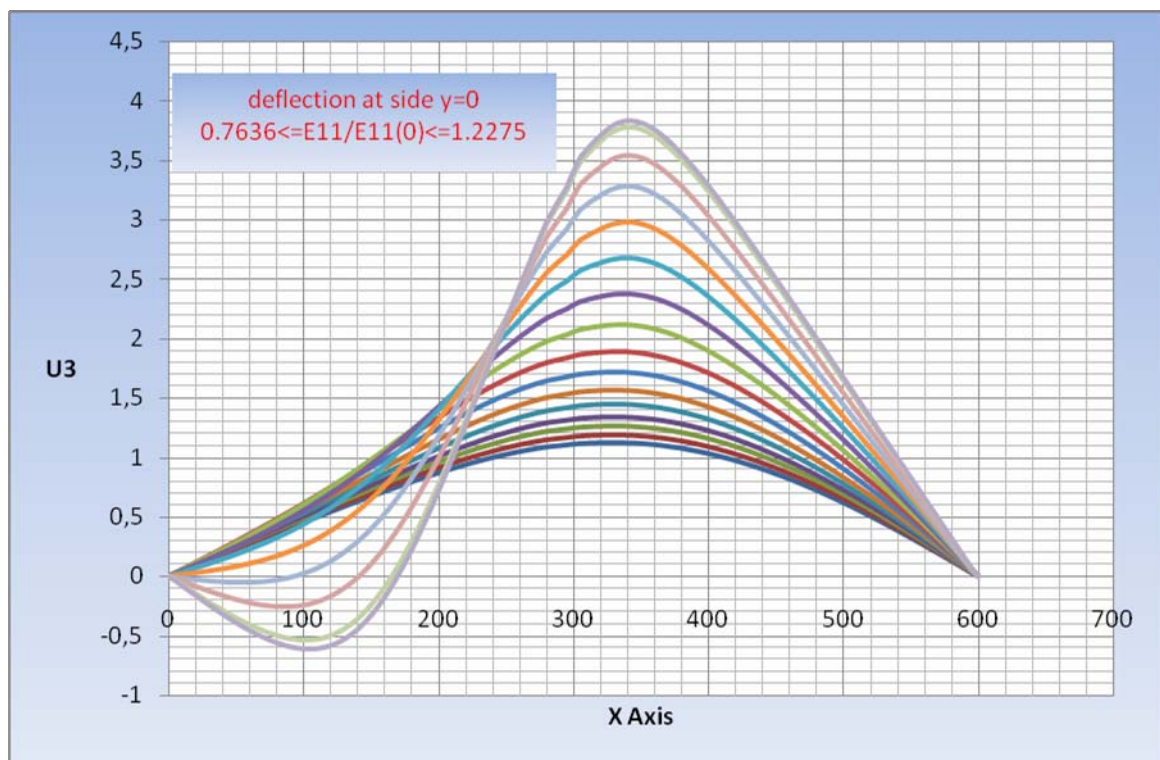


Σχήμα 6.75 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας

Όσον αφορά τα βέλη κάμψης στις αφόρτιστες πλευρές για την εξεταζόμενη περίπτωση, αυτά παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 6.76 ($y=0$) και 6.77 ($y=b$) σε διαδοχικά στάδια φόρτισης μέχρι και λίγο μετά την έναρξη επαφής των δύο (2) επιφανειών της ρωγμής.

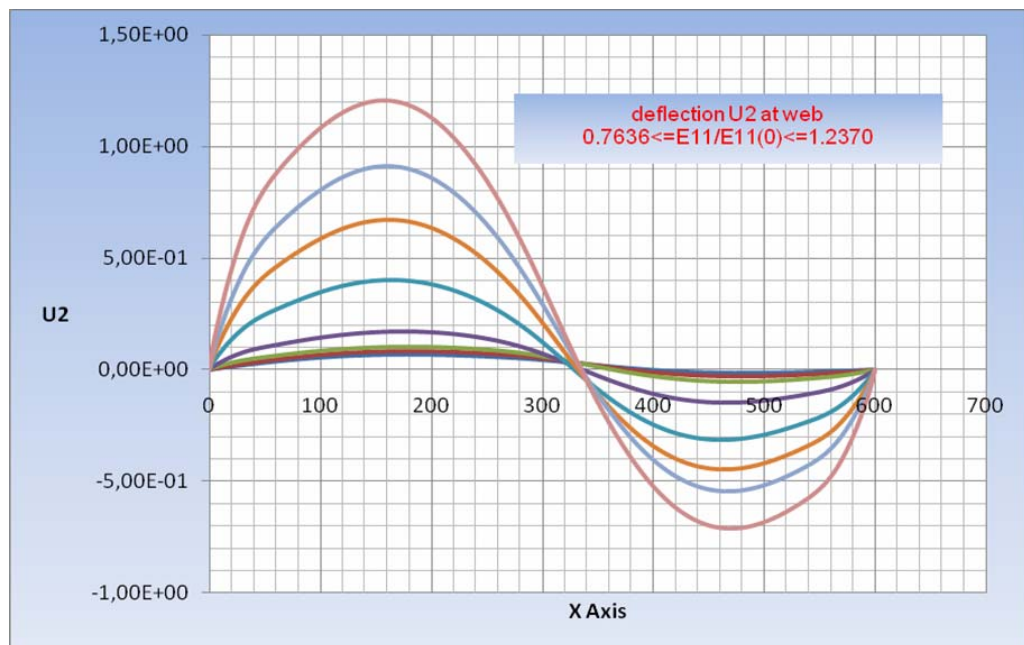


Σχήμα 6.76 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$



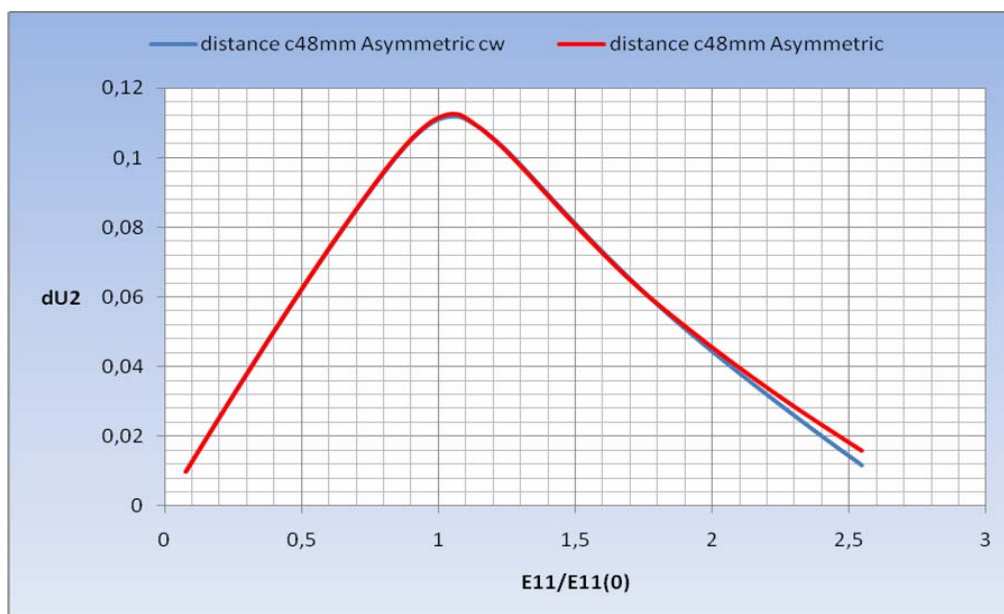
Σχήμα 6.77 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$

Η γραφική παράσταση του βέλους κάμψης U_2 στο ενισχυτικό με ρωγμή απεικονίζεται στο Σχήμα 6.78 για αυξητικά στάδια συμπίεσης. Οι εν λόγω καμπύλες δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά με τις αντίστοιχες καμπύλες για την περίπτωση άνευ ρωγμής.



Σχήμα 6.78 Διακύμανση βέλους κάμψης U_2 στο ενισχυτικό

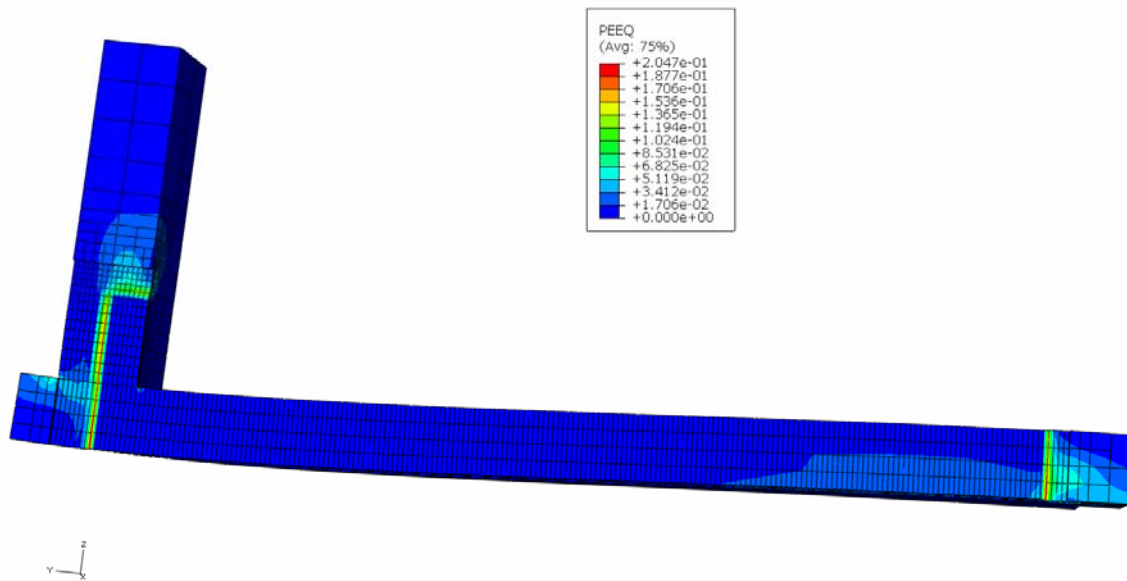
Το διάστημα πλάτυνσης του εν λόγω μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.79 σε σύγκριση με την περίπτωση ρωγμής ίδιου μήκους στην πλάκα άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό.



Σχήμα 6.79 Σύγκριση διαστημάτων πλάτυνσης μοντέλων με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ στην πλάκα με/ άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό

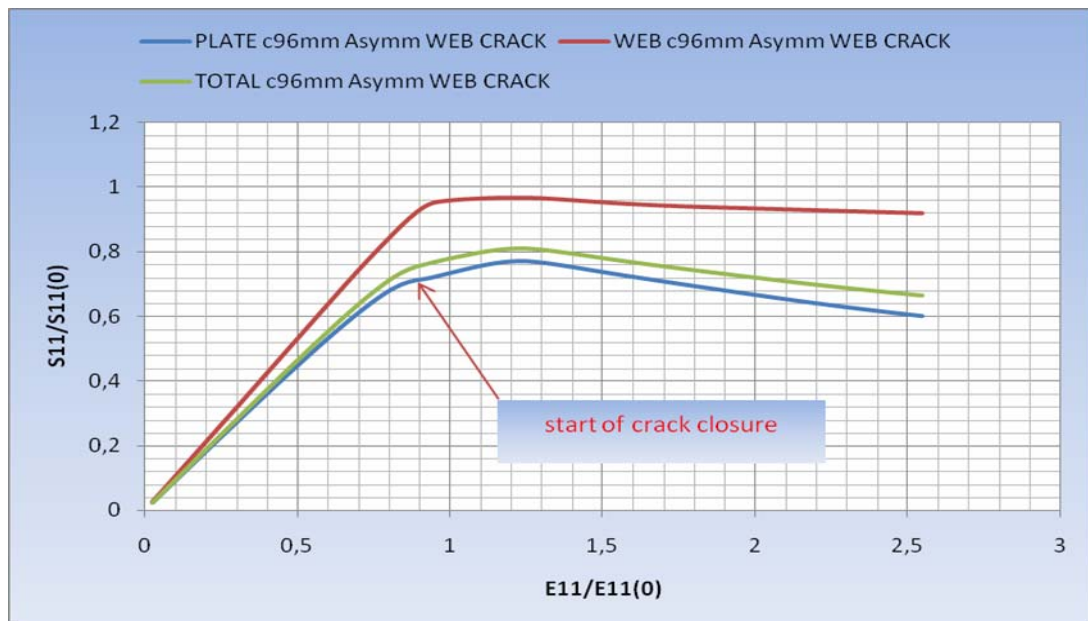
6.10 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$ από $y=152\text{mm}$ και $y=200\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=9.798\text{mm}$ στο ενισχυτικό

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 36616 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις στη ρωγμή $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8338\text{mm}$ και $4.9634\text{mm} \times 4.8421\text{mm} \times 3.335\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ στο ενισχυτικό $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 1.0207\text{mm}$ στη ρωγμή και $4.9634\text{mm} \times 4.0825\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$ στο υπόλοιπο ενισχυτικό. Στο Σχήμα 6.80 απεικονίζεται η τελική κατάσταση της πλαστικής ροής στη λεπτομέρεια της ευρύτερης ρωγμής πλάκας – ενισχυτικού. Όπως αναμέναμε, η ένταση της πλαστικοποίησης συγκεντρώνεται στις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, που, στην προκειμένη περίπτωση, αποτελούν τα άκρα της ρωγμής.



Σχήμα 6.80 Πλαστικοποίηση (μεταβλητή PEEQ) στην περιοχή της ρωγμής

Οι μειωτικές καμπύλες του εν λόγω ενισχυμένου ελάσματος απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 6.81. Στις εν λόγω καμπύλες είναι διακριτή η επαφή των επιφανειών της ρωγμής πριν την επίτευξη της μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος.



Σχήμα 6.81 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για ενισχυμένο έλασμα $a/b=1.5$ με ρωγμή ασύμμετρη $c=96mm$ στην πλάκα και $c_w=9.798mm$ στο ενισχυτικό

Η διακύμανση των ισοδύναμων πλατών της πλάκας ανά στάδιο φόρτισης απεικονίζεται στα ακόλουθα Σχήματα 6.82 και 6.83. Στις εν λόγω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε την πρόωρη έναρξη επαφής της ρωγμής και την εναλλαγή στο φορτίο των δύο (2) τμημάτων της πλάκας μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής ($E_{11}/E_{11(0)}=1.22$, πρώτο σημείο τομής των καμπύλων του σχήματος 6.83).

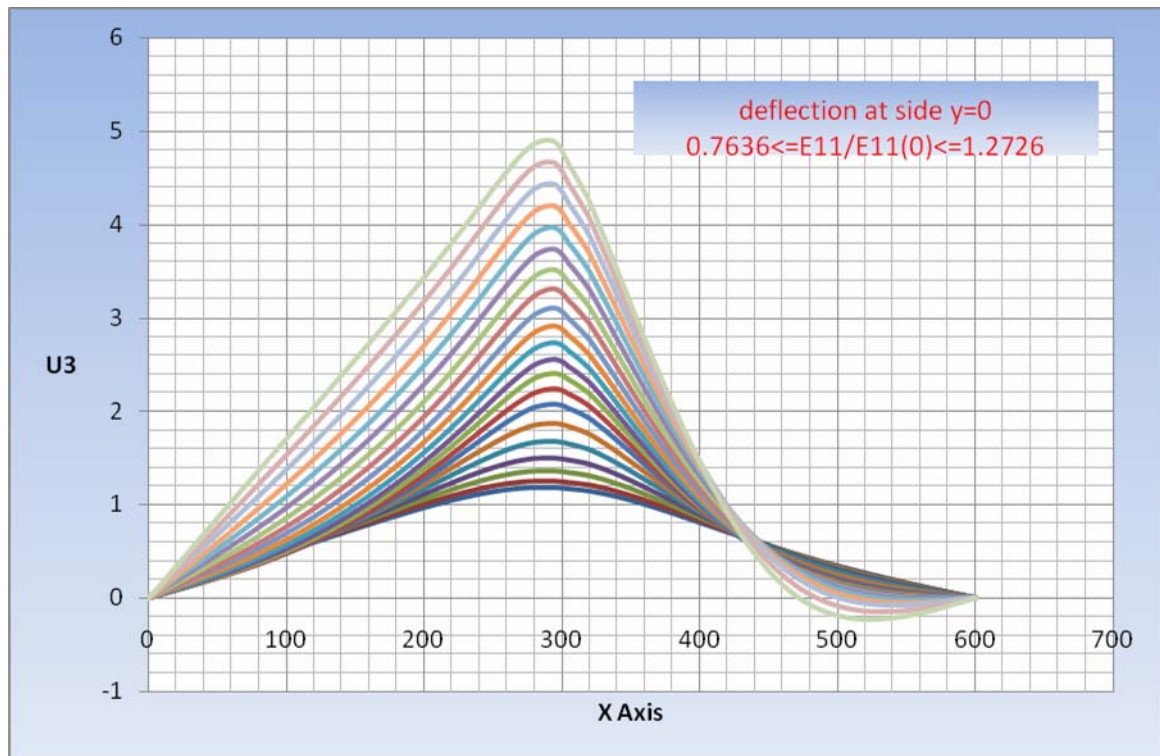


Σχήμα 6.82 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους $a/b=1.5$ με ασύμμετρη $c=96mm$ στην πλάκα και επέκταση ρωγμής στο ενισχυτικό $c_w=9.798mm$

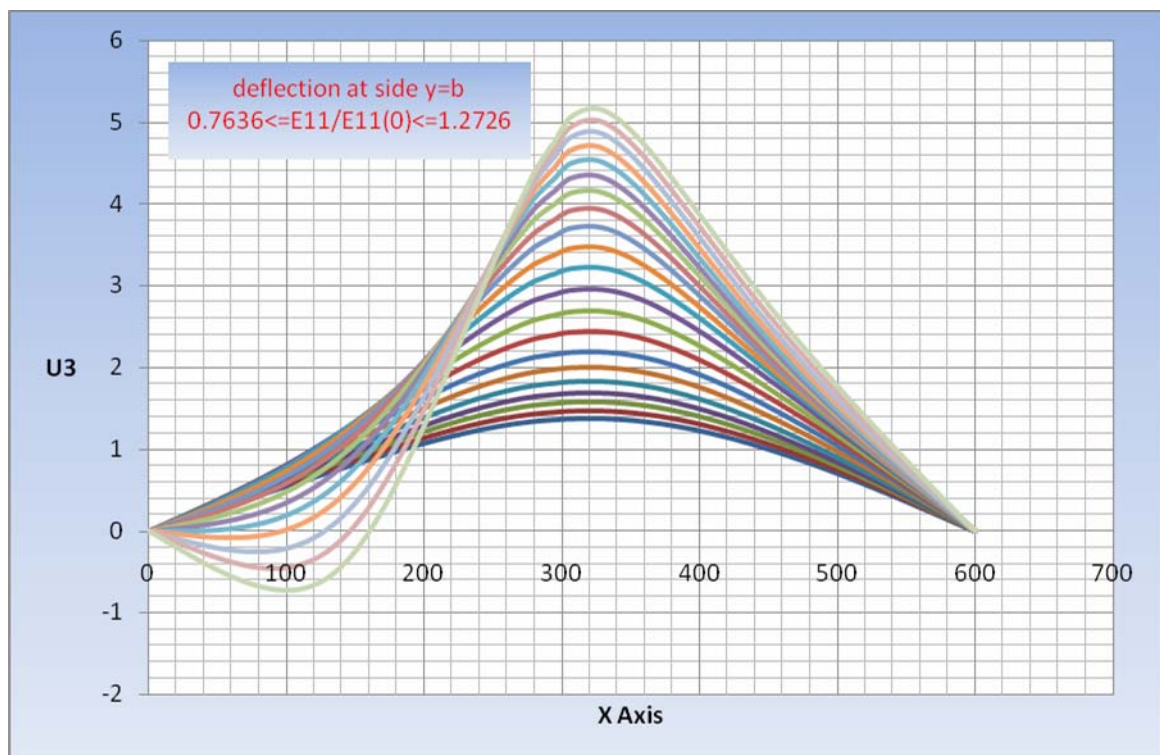


Σχήμα 6.83 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στα δύο τμήματα της πλάκας

Όσον αφορά τα βέλη κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές για την εξεταζόμενη περίπτωση, αυτά παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 6.84 ($y=0$) και 6.85 ($y=b$) σε διαδοχικά στάδια φόρτισης.

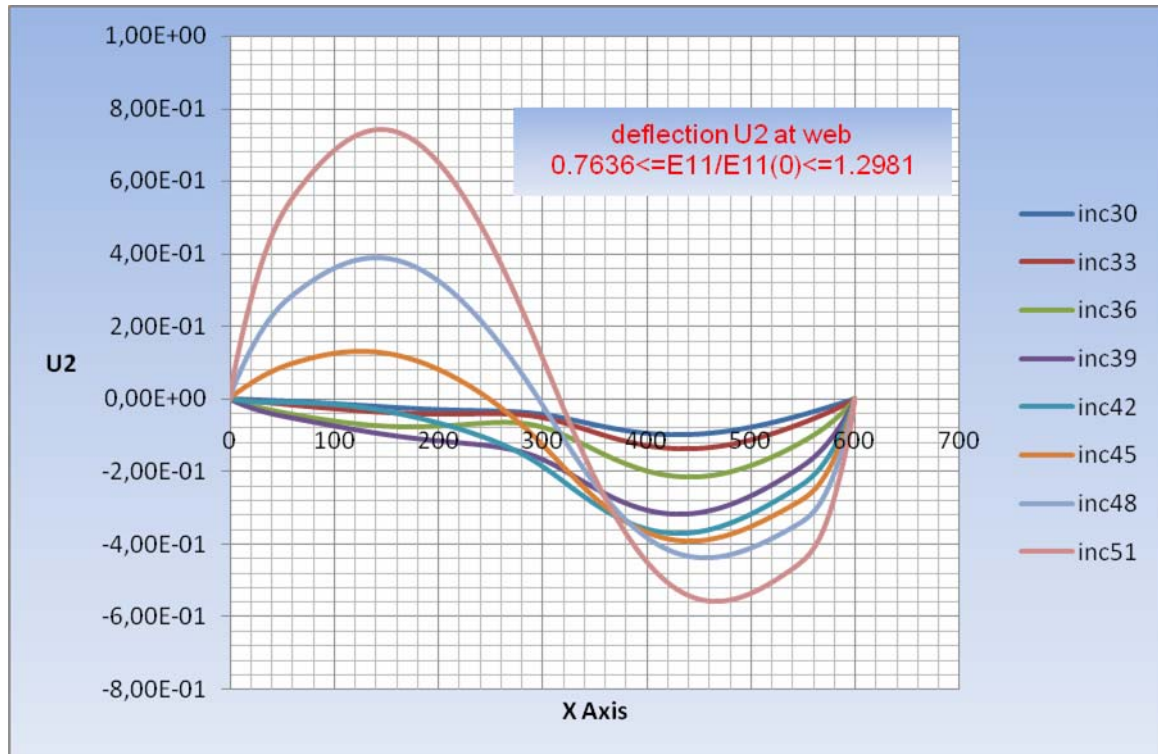


Σχήμα 6.84 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$



Σχήμα 6.85 Διακύμανση U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$

Η διακύμανση του βέλους κάμψης U2 του ενισχυτικού παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με την αντίστοιχη περίπτωση χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η διαφοροποίηση του εν λόγω μεγέθους εξαρτάται αποκλειστικά από το μήκος της ρωγμής στην πλάκα.



Σχήμα 6.86 Διακύμανση βέλους κάμψης U2 στο ενισχυτικό

Η γραφική παράσταση του διαστήματος πλάτυνσης του εξεταζόμενου μοντέλου παραλείπεται καθώς δε διαφοροποιείται από την αντίστοιχη γραφική παράσταση του σχήματος 6.71 για την περίπτωση ασύμμετρης ρωγμής $c=96\text{mm}$ στην πλάκα άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό.

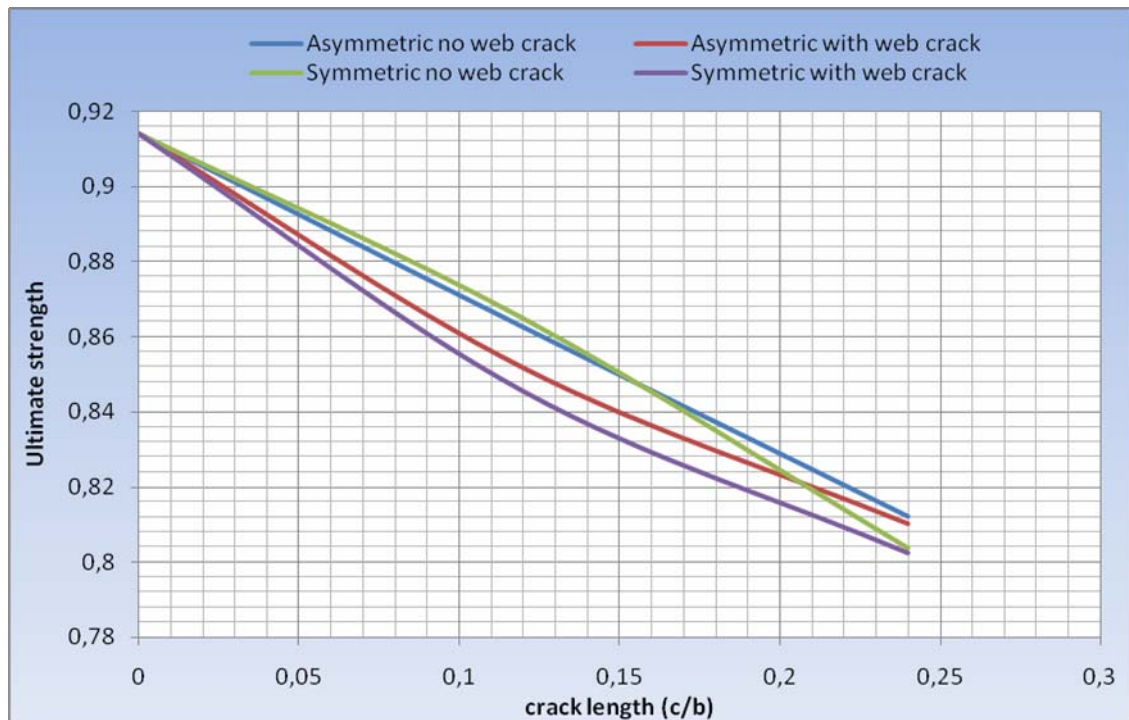
6.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Αξιολόγηση – Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων του εξεταζόμενου λόγου μήκους προς πλάτος $a/b=1.5$. Στο Σχήμα 6.87 που ακολουθεί, απεικονίζεται η πτωτική τάση της μέγιστης αντοχής με την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθούν τα ακόλουθα:

(1) Η περίπτωση ασύμμετρης ρωγμής στην πλάκα με/ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό παρουσιάζει μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών (μικρότερες αποκλίσεις) για το ίδιο μήκος ρωγμής, σε σχέση με την περίπτωση της αντίστοιχης συμμετρικής ως προς τον άξονα συμμετρίας $y=b/2$.

(2) Η περίπτωση ρωγμής που υφίσταται και στα δύο (2) τμήματα της πλάκας είναι δυσμενέστερη από πλευράς μέγιστης αντοχής σε σχέση με την έτερη περίπτωση.

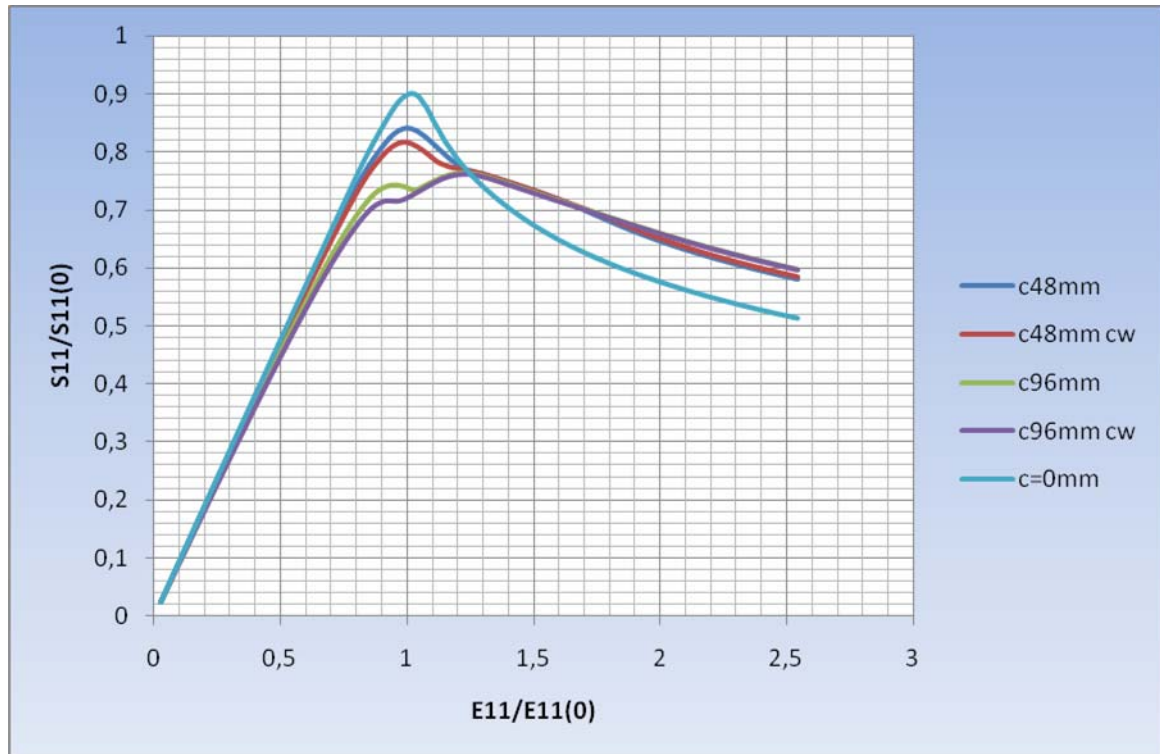
(3) Η θέση της ρωγμής (συμμετρική – ασύμμετρη) παύει να αποτελεί παράγοντα επιρροής της αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος για λόγο μήκους ρωγμής προς πλάτος $c/b=0.24$, καθώς οι καμπύλες του ακόλουθου σχήματος συγκλίνουν προς μια τιμή. Εκτιμάται ότι πέραν αυτού του λόγου c/b , θα έχουμε αντίστροφη στην επίδραση της θέσης ρωγμής, με την περίπτωση ασύμμετρης να αποτελεί τη δυσμενέστερη, λόγω του μεγάλου μήκους αυτής.



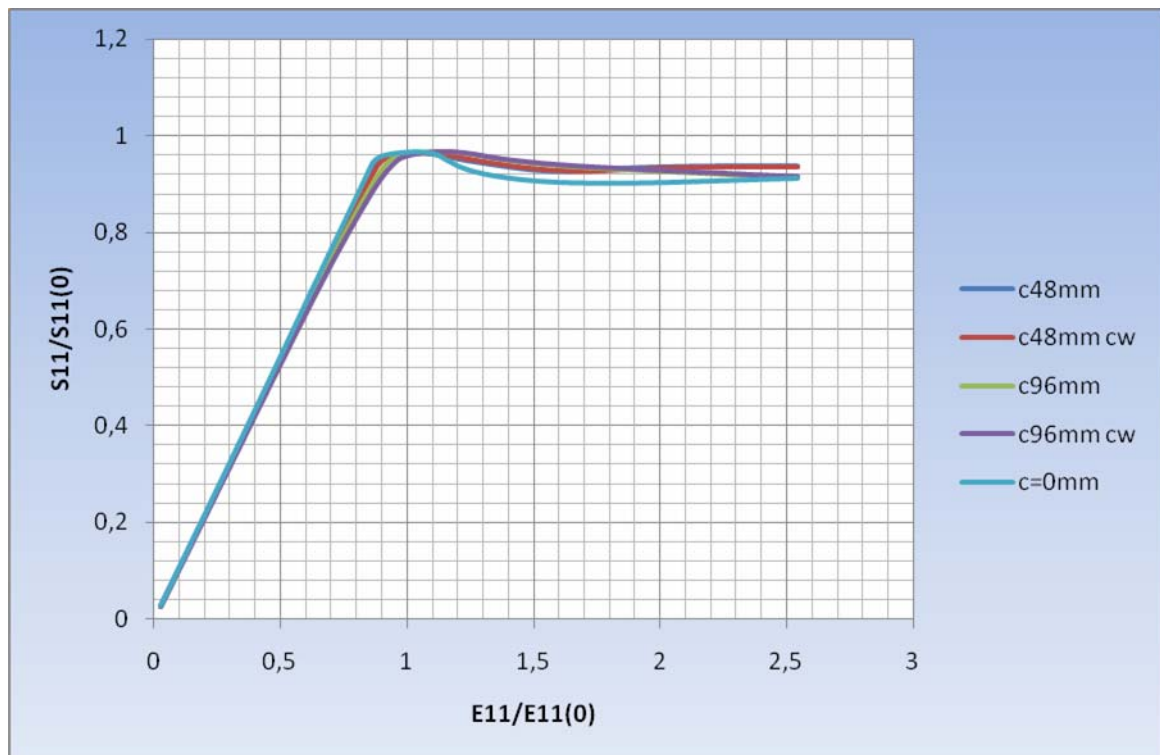
Σχήμα 6.87 Καμπύλες μήκους ρωγμής/ μέγιστη αντοχή ελάσματος $a/b=1.5$

Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης ξεχωριστά για την πλάκα, ενισχυτικό υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- (1) Για ίδιο τύπο ρωγμής στην πλάκα σύμφωνα με τη θέση αυτής
 - (α) Συμμετρική ρωγμή



Σχήμα 6.88 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για συμμετρική ρωγμή



Σχήμα 6.89 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για συμμετρική ρωγμή

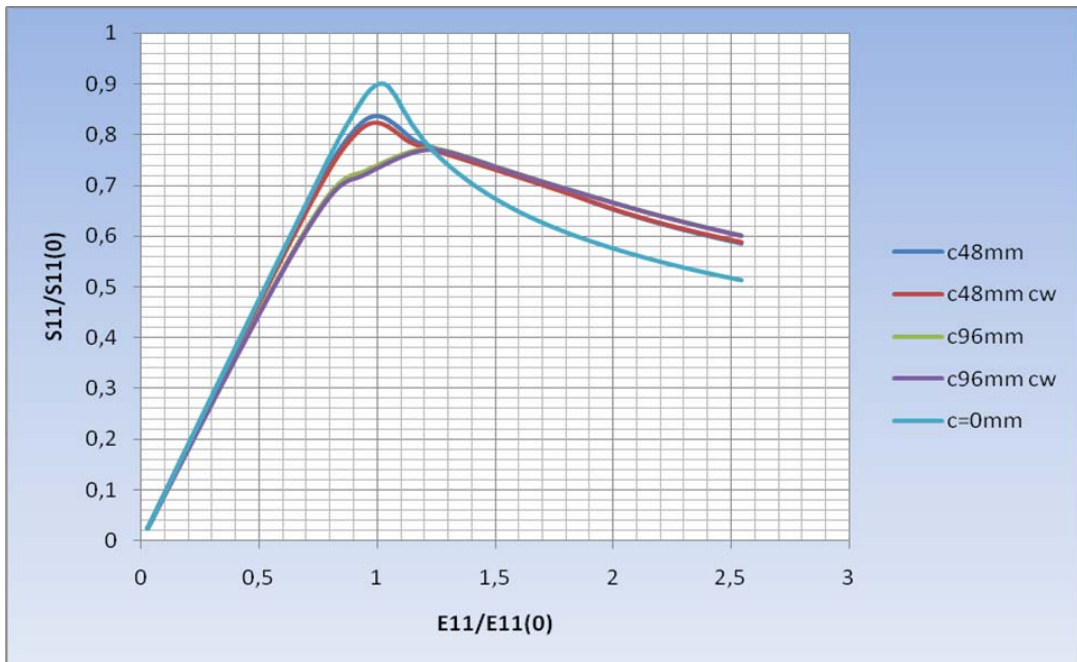
Από την ανάλυση των ανωτέρω καμπύλων καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

(i) Η έναρξη επαφής των επιφανειών της ρωγμής πραγματοποιείται για μικρότερο φορτίο συμπίεσης στην περίπτωση μεγαλύτερου μήκους ρωγμής. Οι καμπύλες της πλάκας στην περίπτωση $c/b=0.12$, παρουσιάζουν εξαιρετική ομοιότητα μετά την επαφή της ρωγμής με τις αντίστοιχες για λόγο $c/b=0.24$ στα υπόλοιπα στάδια συμπίεσης. Εκτιμάται ότι η κατασκευή με τη δημιουργία των δύο (2) ημικυμάτων ενεργοποιεί ένα προσωρινό αμυντικό μηχανισμό ενάντια στη διαδικασία κατάρρευσης που εκπορεύεται από τη συμπίεση. Ο εν λόγω μηχανισμός για συγκεκριμένο εύρος συμπίεσης δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της ασυνέχειας στην πλάκα με αποτέλεσμα το έλασμα να παρουσιάζει την ίδια περίπου ακαμψία. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι όλες οι καμπύλες της πλάκας τέμνονται στο ίδιο (κατά προσέγγιση) σημείο για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E11/E11(0)\approx 1.2417$.

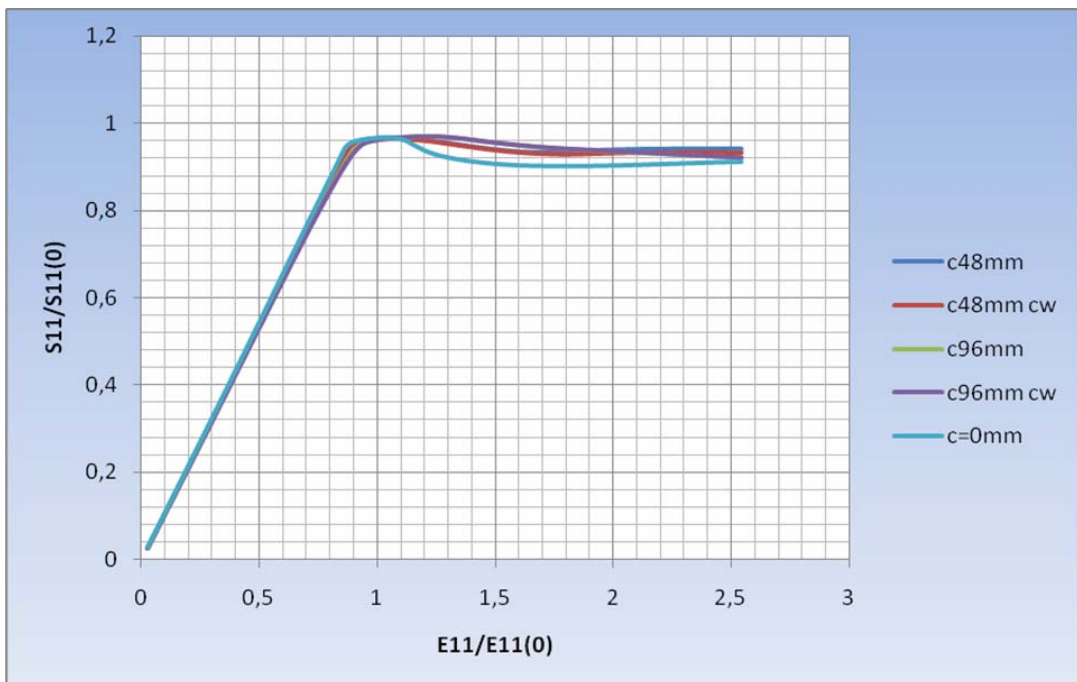
(ii) Οι καμπύλες του ενισχυτικού δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές με εξαίρεση τη μεταβολή της αρχικής ακαμψίας στην ελαστική περιοχή που επιφέρει η ρωγμή πλάκας – ενισχυτικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περιοχή κατάρρευσης, η καμπύλη του ενισχυτικού άνευ ρωγμής στην πλάκα, παρουσιάζει μικρότερες τιμές, γεγονός που φανερώνει ότι συμμετέχει σε μεγαλύτερο βαθμό στην προσπάθεια συγκράτησης της κατασκευής, όπως διαπιστώνουμε και από το σχήμα 6.99 στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου. Συναφώς, οι εν λόγω καμπύλες για διαφορετικούς λόγους c/b παρουσιάζουν διαφορετική κλίση κατά τη διαδικασία κατάρρευσης. Συγκεκριμένα στην περίπτωση $c/b=0.24$ η κλίση της καμπύλης είναι διαρκώς μειούμενη, που σημαίνει ότι το ενισχυτικό συμμετέχει σε κάποιο ποσοστό στη διαδικασία αντίστασης στο εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο.

(iii) Η εισαγωγή της ρωγμής στο ενισχυτικό επηρεάζει τη μέγιστη αντοχή της πλάκας σε μικρό ποσοστό (πτώση 2 – 3% επί της συνολικής) μόνο για την περίπτωση $c/b=0.12$. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι η ύπαρξη της ρωγμής στο ενισχυτικό, ωθεί την επαφή των επιφανειών αυτής (πλάκας – ενισχυτικού) να συμβεί σε μικρότερο ποσοστό συμπίεσης.

(β) Ασύμμετρη ρωγμή



Σχήμα 6.90 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή



Σχήμα 6.91 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή

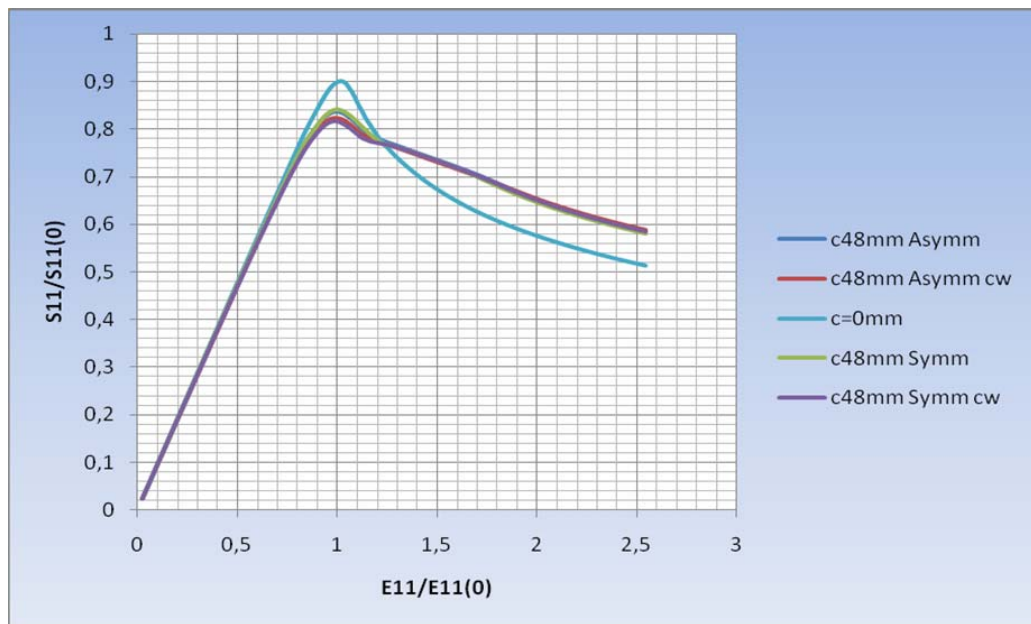
Από την ανάλυση των ανωτέρω καμπύλων καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- (i) Η εισαγωγή της ρωγμής στο ενισχυτικό δεν προκαλεί ουσιαστική μεταβολή στη μέγιστη αντοχή, είτε της πλάκας είτε του ενισχυτικού.

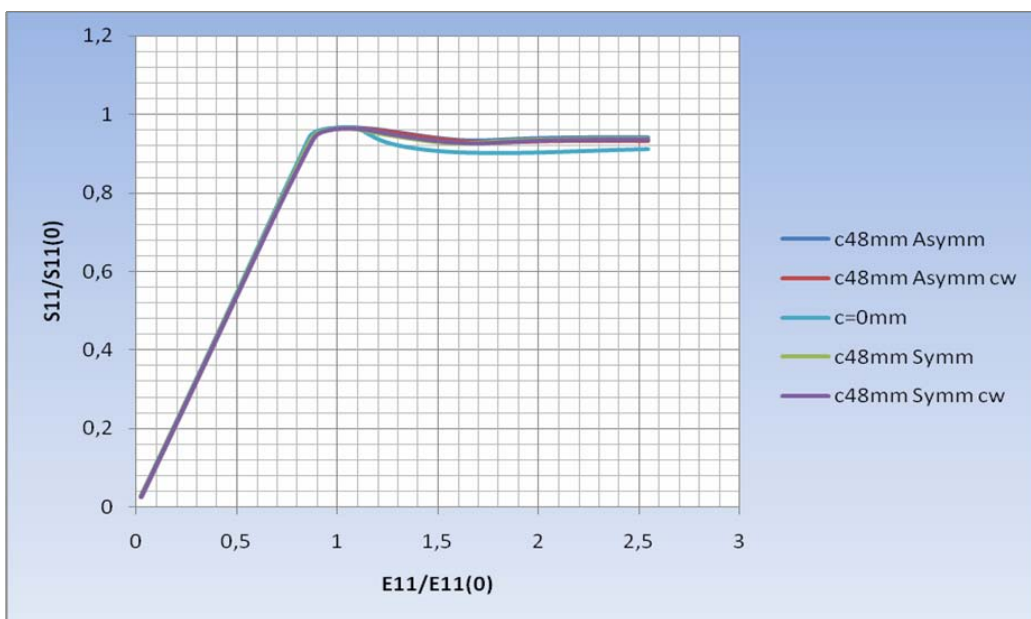
(ii) Παρατηρούμε και σε αυτή την περίπτωση ότι οι καμπύλες της πλάκας τέμνονται στο ίδιο σημείο για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)} \approx 1.2417$.

(2) Με το ίδιο μήκος ρωγμής

(α) Για ρωγή στην πλάκα μήκους $c=48\text{mm}$



Σχήμα 6.92 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ρωγή πλάκας $c=48\text{mm}$



Σχήμα 6.93 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για ρωγή πλάκας $c=48\text{mm}$

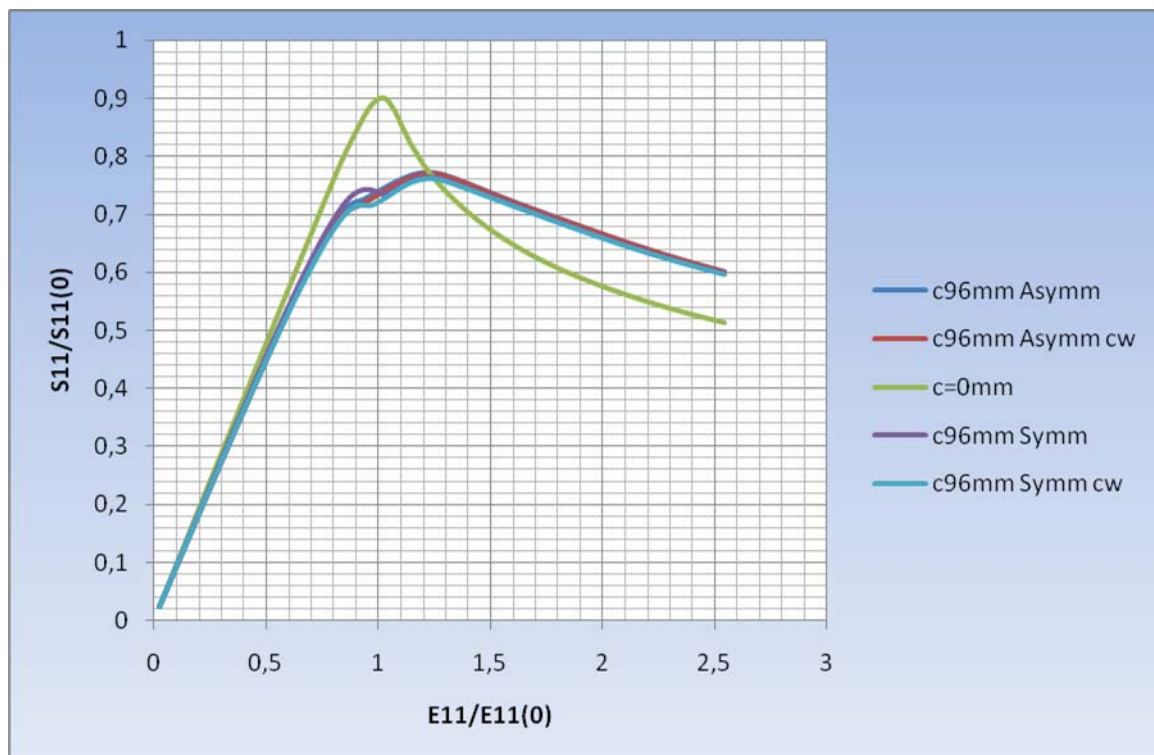
Από την ανάλυση των ανωτέρω καμπυλών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(i) Παρουσιάζεται μεγάλη συγκέντρωση των εν λόγω καμπυλών της πλάκας και του ενισχυτικού.

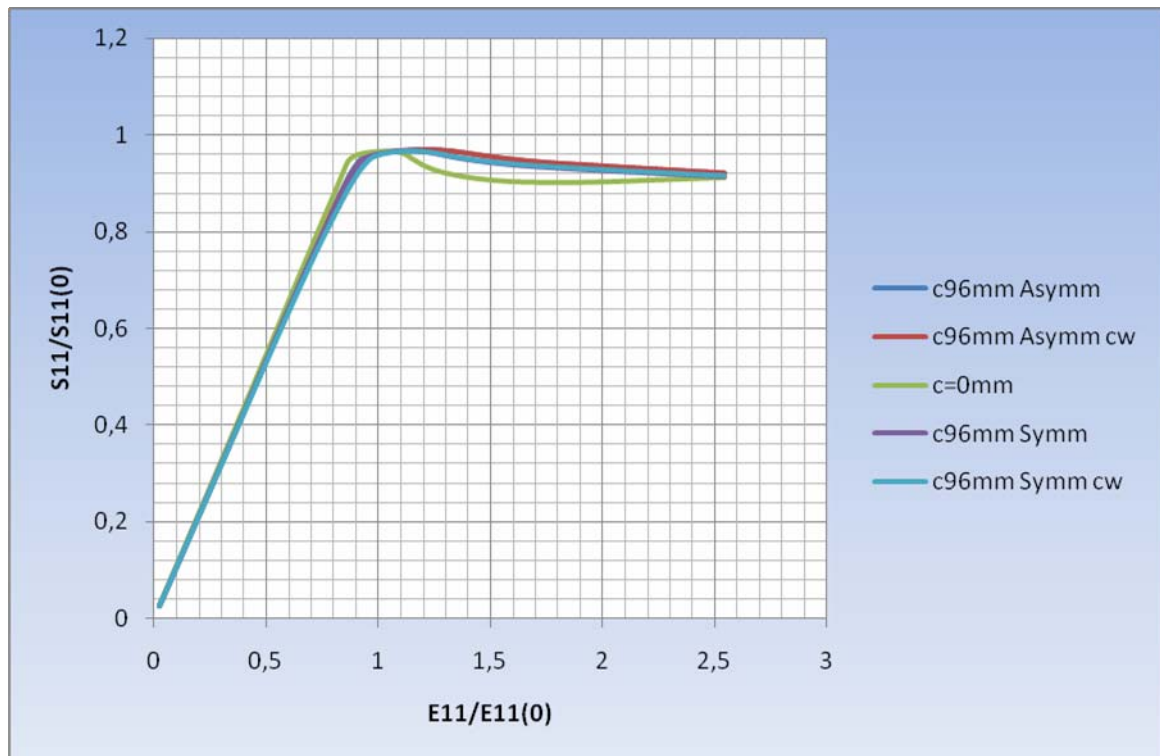
(ii) Οι καμπύλες διέρχονται και σε αυτή την περίπτωση από το ίδιο σημείο για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)} \approx 1.2417$ που σημαίνει ότι το δεδομένο σημείο ($\sigma_u/\sigma_o, E_{11}/E_{11(0)}$) δεν επηρεάζεται από τη θέση.

(iii) Οι καμπύλες του ενισχυτικού παρουσιάζουν την ίδια μορφή στην περιοχή μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής

(β) Για ρωγή στην πλάκα μήκους $c=96\text{mm}$



Σχήμα 6.94 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ρωγή πλάκας $c=96\text{mm}$



Σχήμα 6.95 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για ρωγμή πλάκας $c=96\text{mm}$

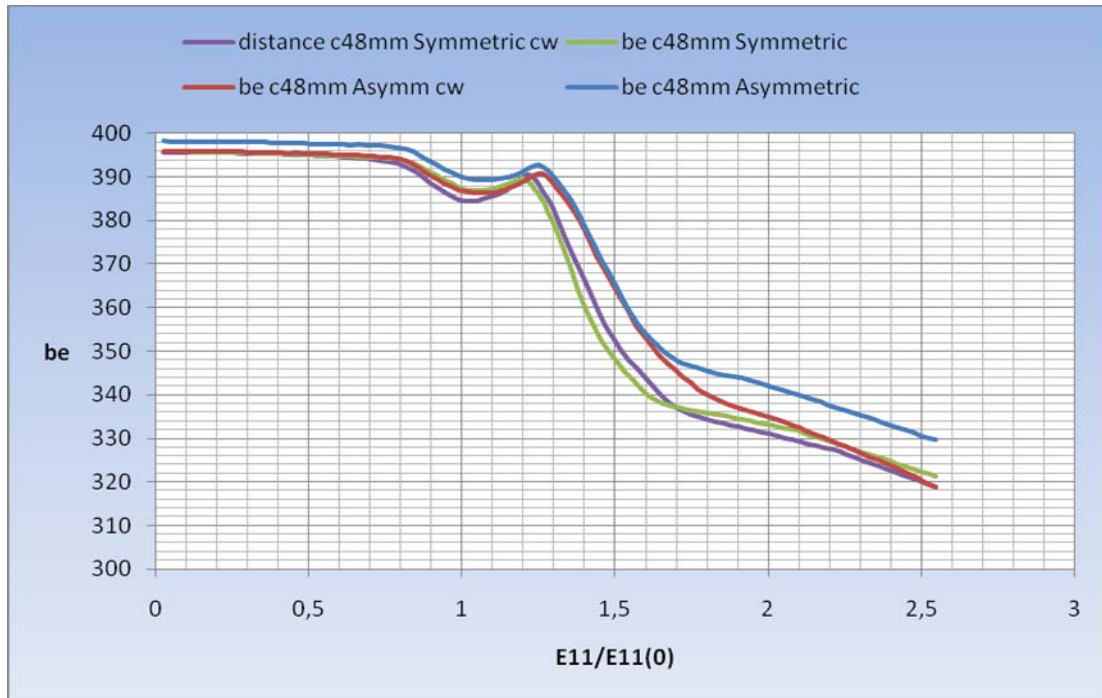
Από την ανάλυση των ανωτέρω καμπυλών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(i) Παρατηρείται εκ νέου η συγκέντρωση των καμπύλων της πλάκας, που σημαίνει ότι η μέγιστη αντοχή της πλάκας δείχνει μεγαλύτερη ευαισθησία στο λόγο μήκους ρωγμής προς πλάτος c/b , από ότι στη θέση της ρωγμής. Επιπρόσθετα το σημείο τομής των εν λόγω καμπύλων (σχήμα 6.94) συμπίπτει κατά προσέγγιση, με το σημείο μέγιστης αντοχής των ρηγματοποιημένων πλακών.

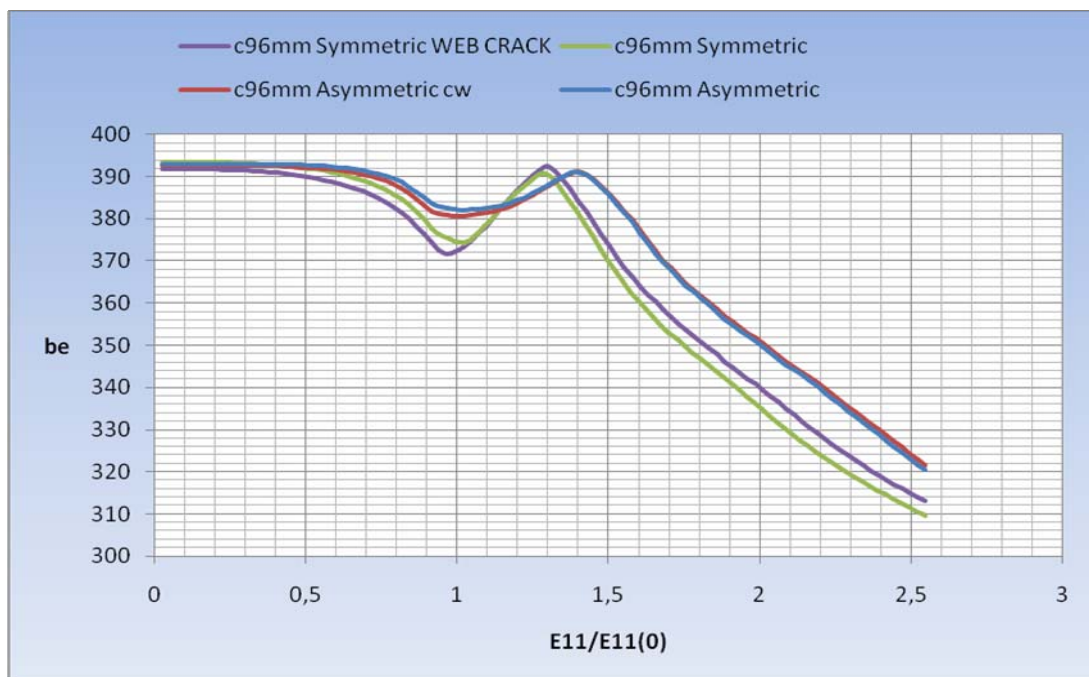
(ii) Οι καμπύλες των ενισχυτικών για $c/b=0.24$ παρουσιάζουν συνεχόμενη πτωτική κλίση στην περιοχή κατάρρευσης σε αντίθεση με τις αντίστοιχες για λόγο $c/b=0.12$.

Η σύγκριση των ισοδύναμων πλατών (effective breadth) μας οδηγεί στα Σχήματα 6.96 (για ρωγμή μήκους $c=48\text{mm}$), 6.97 (για ρωγμή μήκους $c=96\text{mm}$) και 6.98 (για το σύνολο των μοντέλων). Όπως παρατηρούμε το ισοδύναμο πλάτος παρουσιάζει ομοιόμορφη συμπεριφορά στην περιοχή έως $E_{11}/E_{11(0)}=1.01$ και

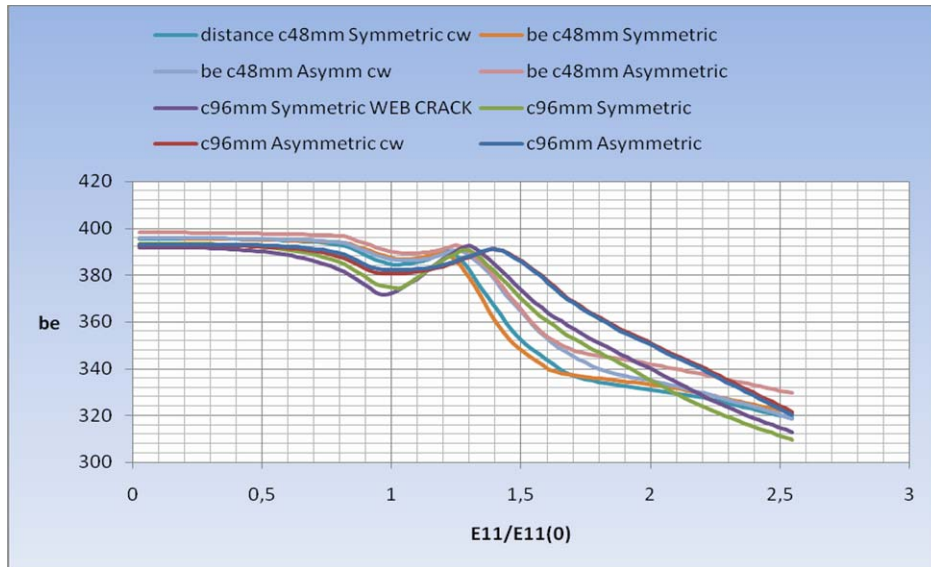
μεγάλη διαφοροποίηση στην υπόλοιπη περιοχή. Επιπρόσθετα η ύπαρξη της ρωγμής στο ενισχυτικό επηρεάζει περισσότερο την κατανομή του φορτίου στην πλάκα με ρωγμή $c=48\text{mm}$ από ότι στην αντίστοιχη περίπτωση με $c=96\text{mm}$. Συναφώς, το εν λόγω μέγεθος δείχνει μεγαλύτερη ευαισθησία στη θέση της ρωγμής (συμμετρική – ασύμμετρη) για λόγο $c/b > 0.12$



Σχήμα 6.96 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας με ρωγμή $c=48\text{mm}$



Σχήμα 6.97 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας με ρωγμή $c=96\text{mm}$

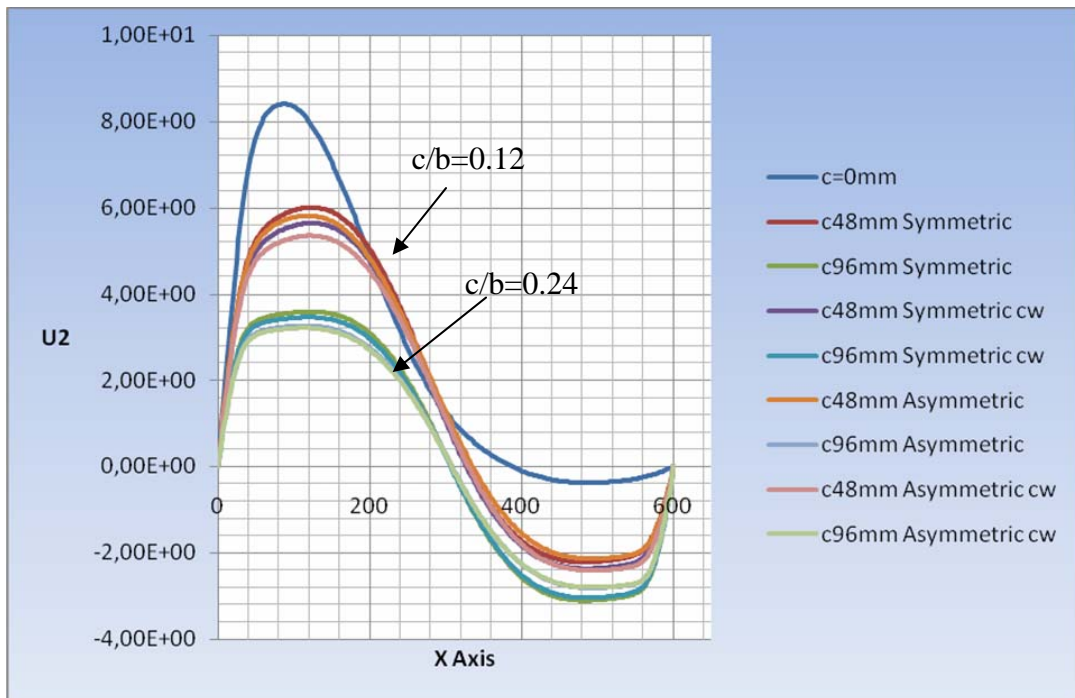


Σχήμα 6.98 Συγκεντρωτική διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας

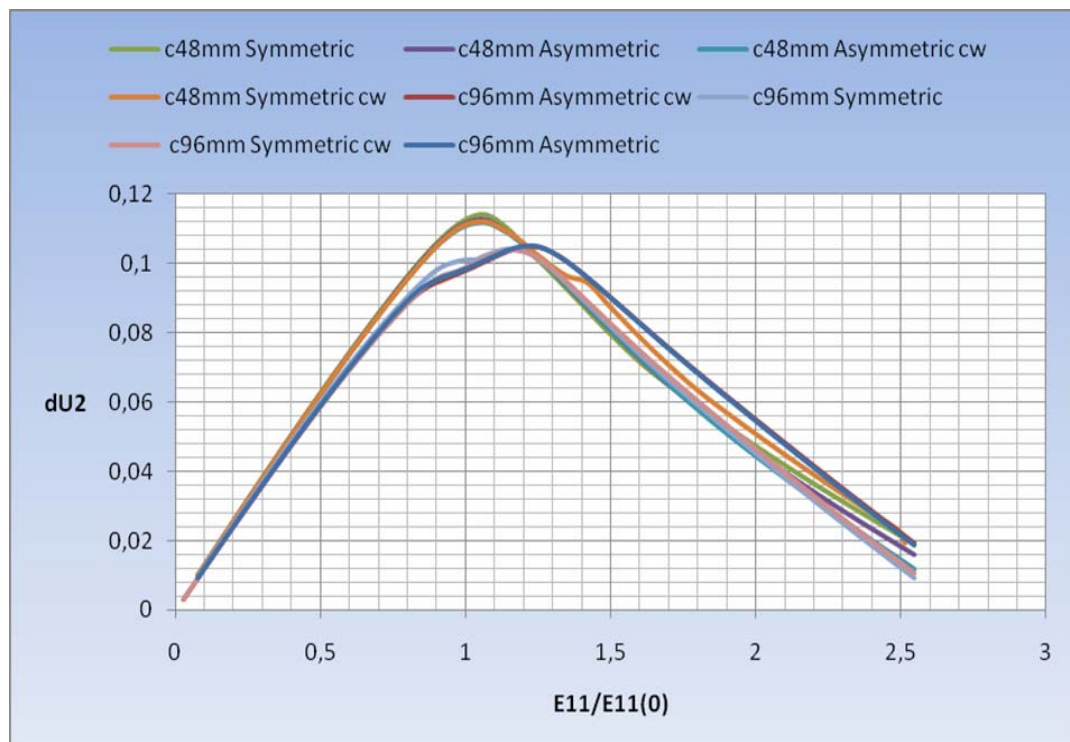
Η διακύμανση του βέλους κάμψης U_2 του ενισχυτικού στο τέλος της φόρτισης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.99, όπου παρατηρούμε ότι με την αύξηση του μήκους της ρωγμής διαφοροποιούνται οι μέγιστες τιμές των δημιουργούμενων κυμάτων. Η μεταβολή του διαστήματος πλάτυνσης των μοντέλων που εξετασθήκαν παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.100. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, για λόγο $c/b=0.12$ έχουμε μια ευαισθησία του μοντέλου στην ύπαρξη ρωγμής στο ενισχυτικό, ενώ για λόγο $c/b=0.24$, η ευαισθησία έγκειται στη θέση της ρωγμής στην πλάκα. Οδηγούμαστε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του μήκους της ρωγμής συγκρατεί το μοντέλο σε μικρότερες τιμές του εν λόγω μεγέθους.

Τέλος, στο Σχήμα 6.101 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η μορφή της παραμορφωμένης κατάστασης (μεταβλητή U_3 – βαθμός μεγέθυνσης 5) στο τέλος της φόρτισης για όλα τα ρηγματοποιημένα ελάσματα $a/b=1.5$. Αξίζει να τονιστεί στα εν λόγω σχήματα, η διαφορά στην ένταση των ημικυμάτων που προκύπτει από τη σύγκριση των δύο (2) λόγων c/b (μεγαλύτερο U_3 για $c/b=0.24$). Συναφώς στο Σχήμα 6.102 (μεταβλητή PEEQ – βαθμός μεγέθυνσης 1) παρουσιάζεται η κατάσταση της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης των εν λόγω μοντέλων, από όπου συμπεραίνουμε ότι η ανισοκατανομή στη φόρτιση των ισοδύναμων πλατών στα δύο (2) τμήματα της πλάκας προέρχεται αφενός από τη διαφοροποίηση των

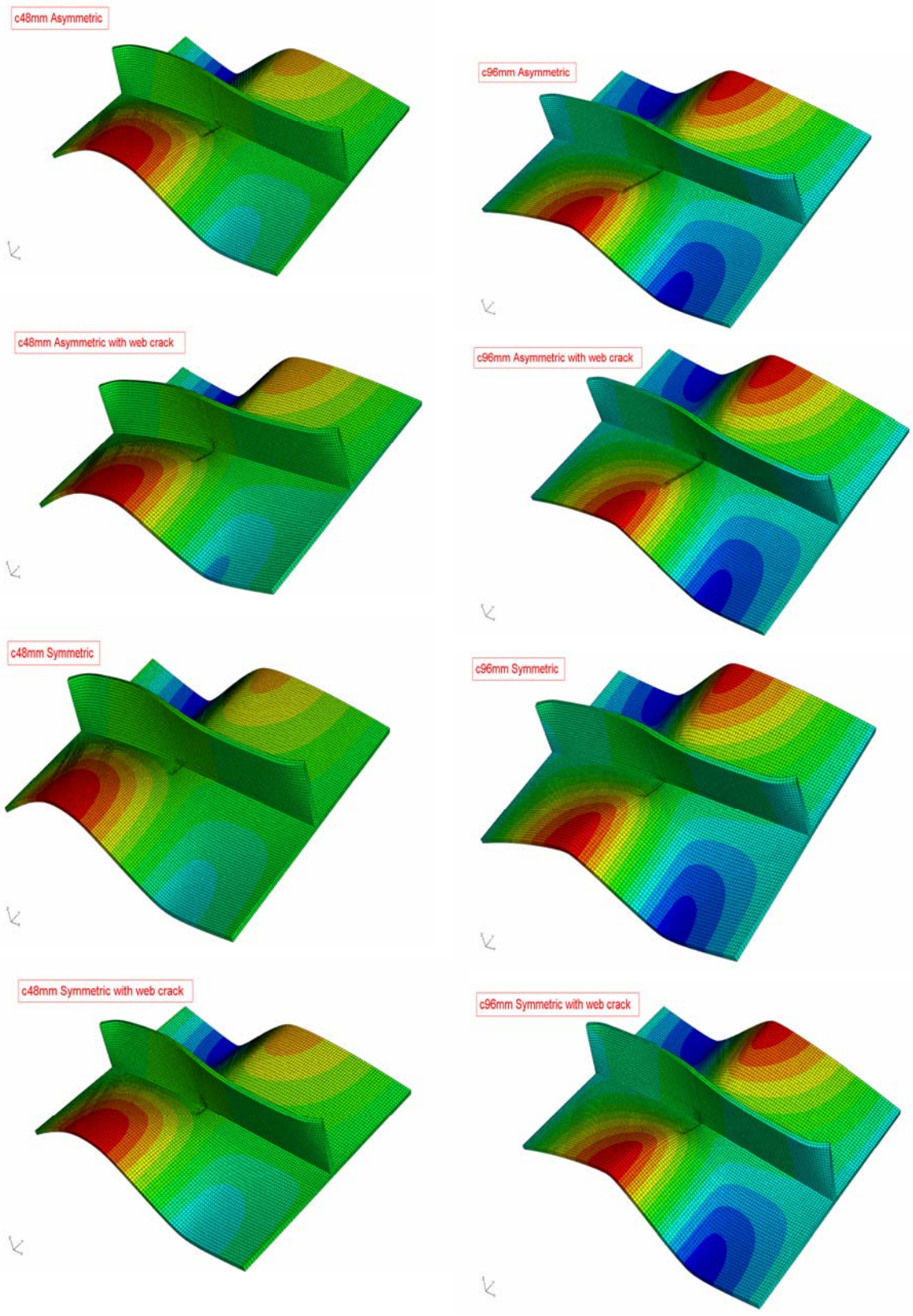
αρχικών ατελειών, αφετέρου στη διαφορετική προσέγγιση των επιφανειών της ρωγμής στα εν λόγω τμήματα.



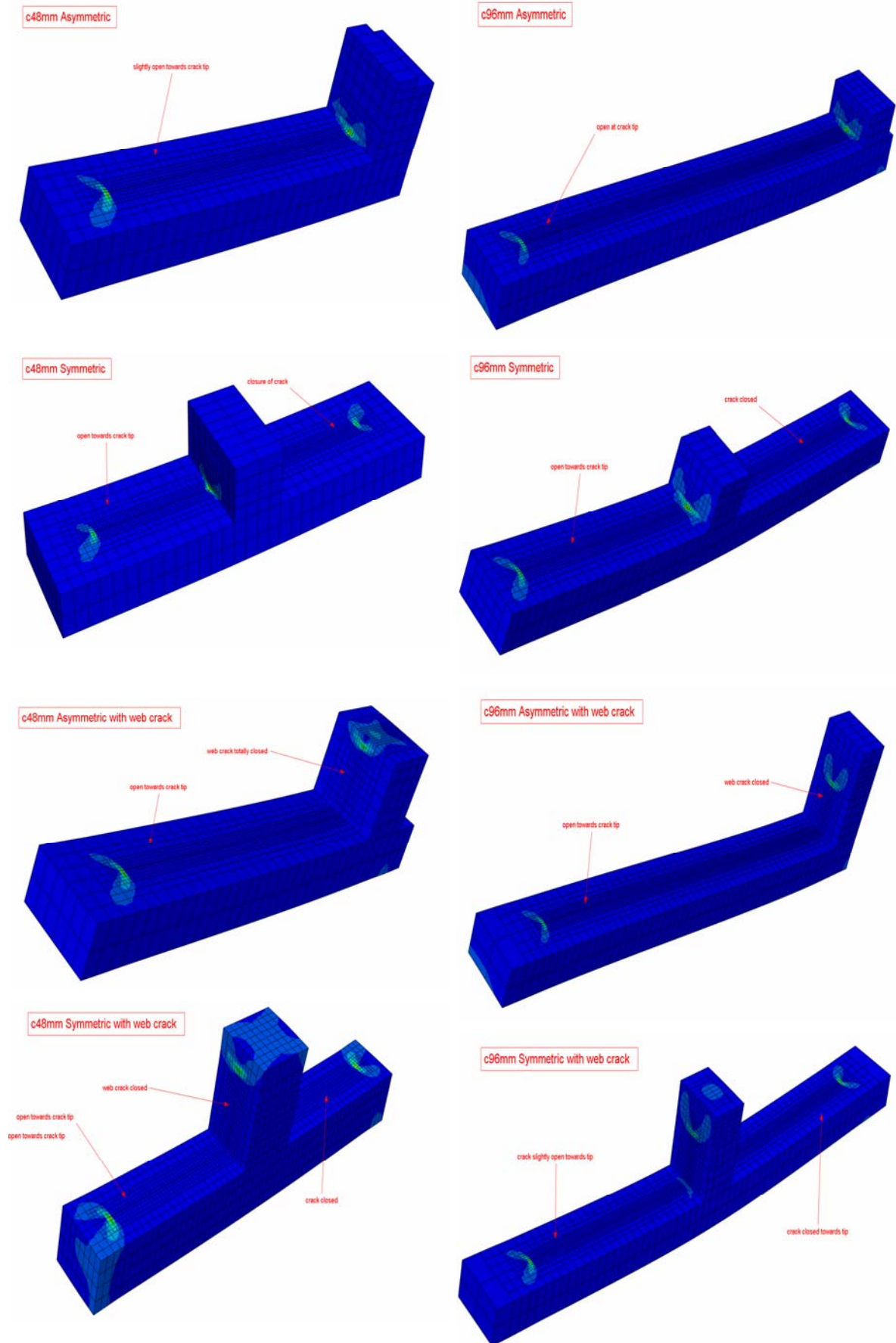
Σχήμα 6.99 Διακύμανση βέλους κάμψης U_2 ενισχυτικού στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 6.100 Συγκεντρωτική διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης



Σχήμα 6.101 Παραμορφωμένη κατάσταση των μοντέλων στο τέλος συμπίεσης



Σχήμα 6.102 Κατάσταση ρωγμής στο τέλος της φόρτισης όλων των περιπτώσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΠΛΑΤΟΣ $A/B=3$

7.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την ανάλυση των μοντέλων με λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=3$, χωρίς ρωγμή, με ρωγμή στην πλάκα πάχους 0.3mm, με ρωγμή στην πλάκα και στο ενισχυτικό, καθώς επίσης και με μεταβολή της θέσεως της ρωγμής της πλάκας κατά αντιστοιχία με τα προηγούμενα κεφάλαια. Επιπρόσθετα για την περίπτωση του ενισχυμένου ελάσματος άνευ ρωγμής, θα εισαχθεί αριθμός κυμάτων ($n=3, 5$) σε συμμετρική και αντισυμμετρική μορφή στις αρχικές γεωμετρικές μετατοπίσεις, όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο 4.3 για τον έλεγχο επιρροής της μέγιστης αντοχής από την εν λόγω αρχική ατέλεια. Τα εν λόγω μοντέλα σύμφωνα με τη σειρά παρουσίασης και η παραμετρική τους διαφοροποίηση συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα 7.1.

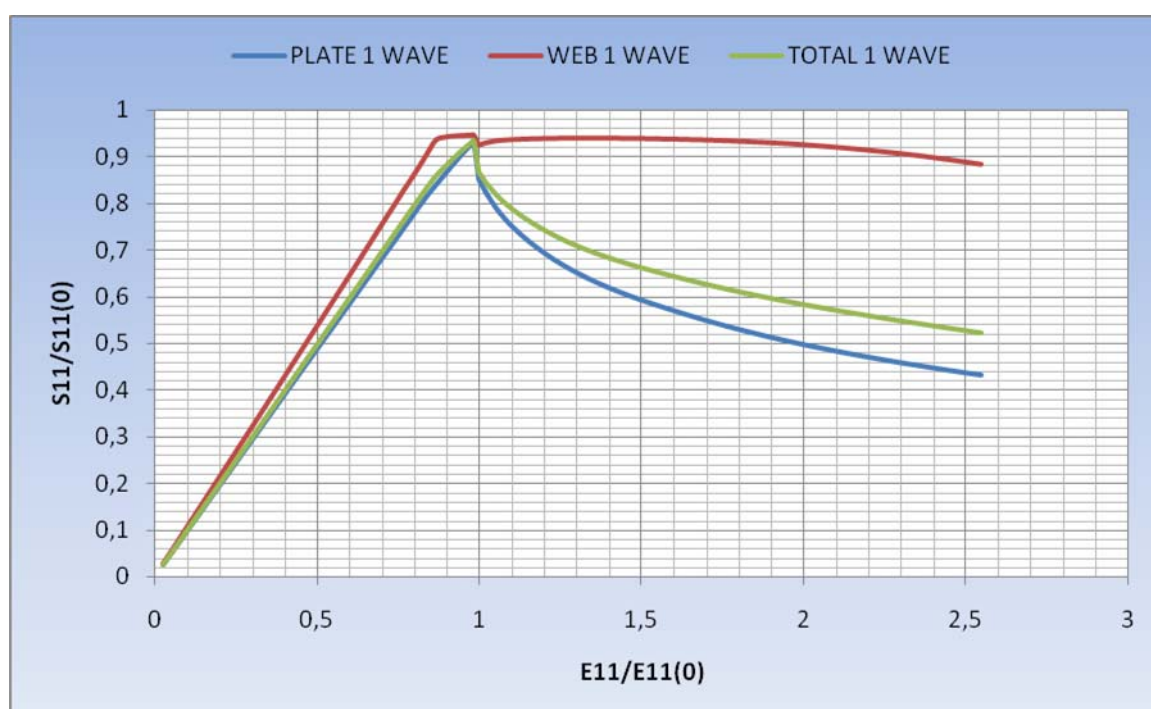
Πίνακας 7.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλων $a/b=3$

A/A	c (mm)	b (mm)	c/b	c_w (mm)	h_w (mm)	c_w/h_w	s (mm)
1	0	200	0	0	40.825	0	0
2	24	200	0.12	0	40.825	0	100
3	48	200	0.24	0	40.825	0	100
4	24	200	0.12	4.9	40.825	0.12	100
5	48	200	0.24	4.9	40.825	0.12	100
6	24	200	0.12	0	40.825	0	88
7	48	200	0.24	0	40.825	0	76
8	24	200	0.12	4.9	40.825	0.12	88
9	48	200	0.24	4.9	40.825	0.12	76

7.2 Ενισχυμένα ελάσματα $a/b=3$ χωρίς ρωγμή

7.2.1 Ενισχυμένο έλασμα με αρχική παραμόρφωση ενός (1) ημικύματος ($n=1$)

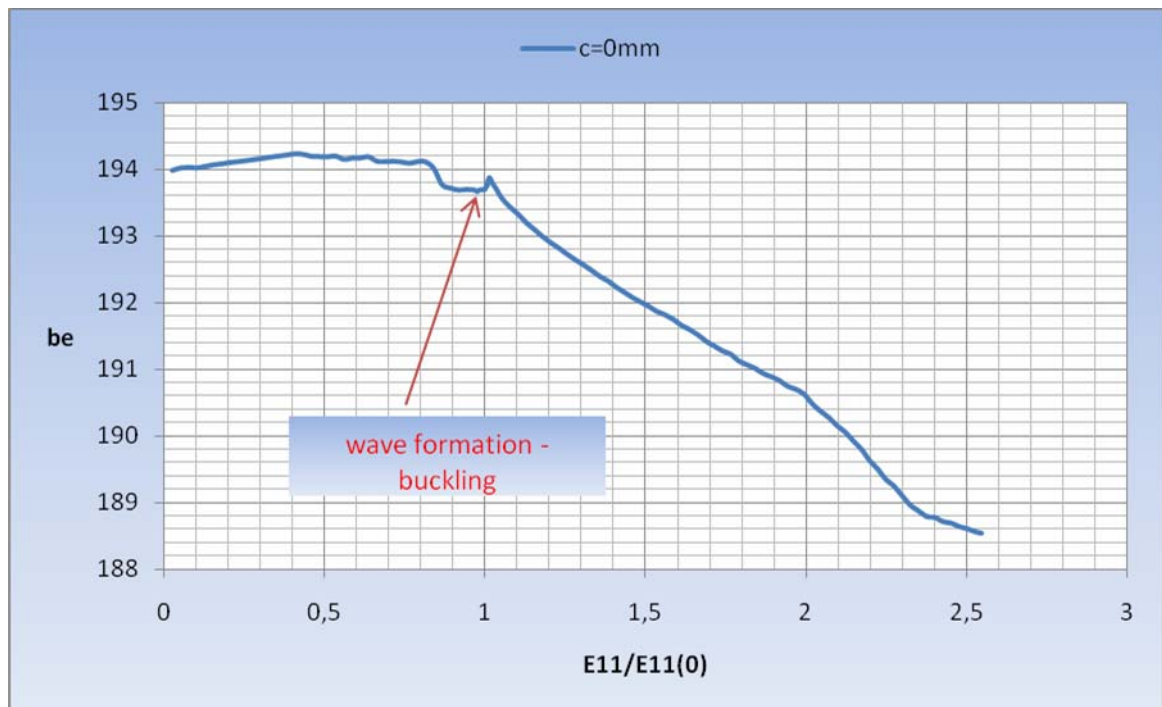
Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 18000 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $4\text{mm} \times 4.0816\text{mm} \times 1.665\text{mm}$ στην πλάκα και $4\text{mm} \times 2.04125\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$ στο ενισχυτικό. Η συγκεκριμένη σχεδίαση επαναλαμβάνεται και στις επόμενες περιπτώσεις διαφορετικού αριθμού κυμάτων στην αρχική μετατόπιση. Το συγκεκριμένο έλασμα θα αποτελέσει και το μέτρο σύγκρισης των αντίστοιχων ρηγματοποιημένων ελασμάτων στο παρόν κεφάλαιο. Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το εν λόγω ενισχυμένο έλασμα παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 7.1.



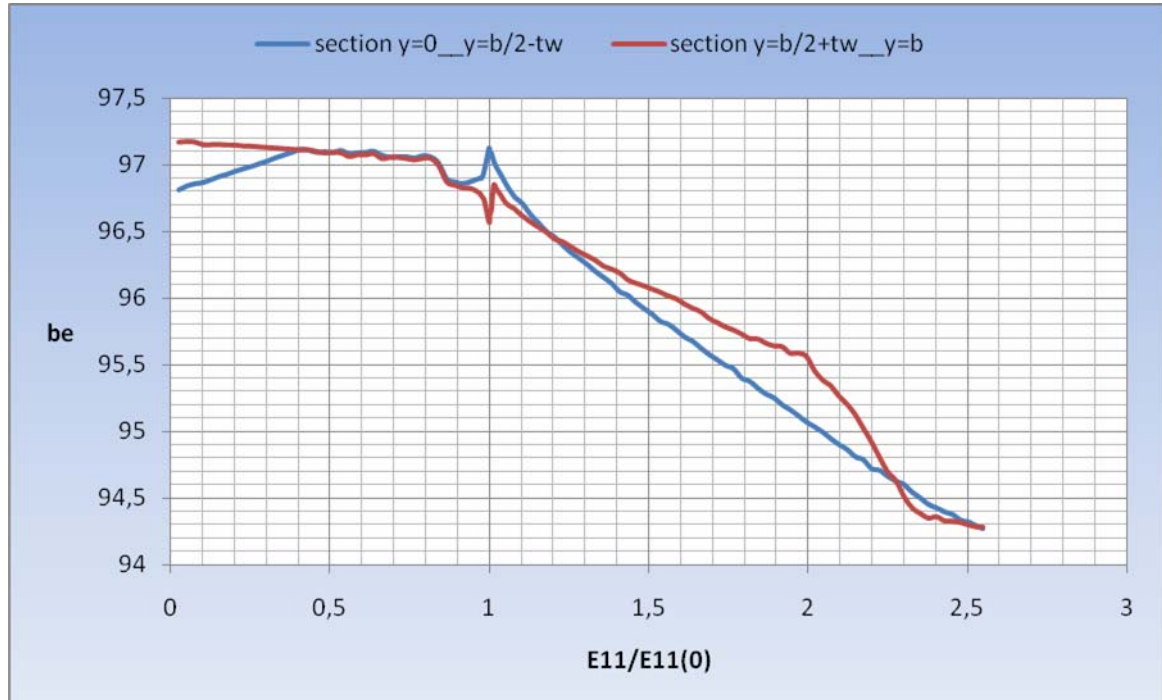
Σχήμα 7.1 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης ενισχυμένου ελάσματος $a/b=3$ ($n=1$)

Όσον αφορά τα ισοδύναμα πλάτη του ενισχυμένου ελάσματος, αυτά απεικονίζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.2 και 7.3. Θα πρέπει να επισημανθεί η διαταραχή που παρατηρείται στις καμπύλες πριν το στάδιο συμπίεσης

$E_{11}/E_{11}(0)=0.8654$, καθώς επίσης η αύξηση αυτού που συμβαίνει μετά τη δημιουργία των κυμάτων με την καθολική κατάρρευση κατόπιν.

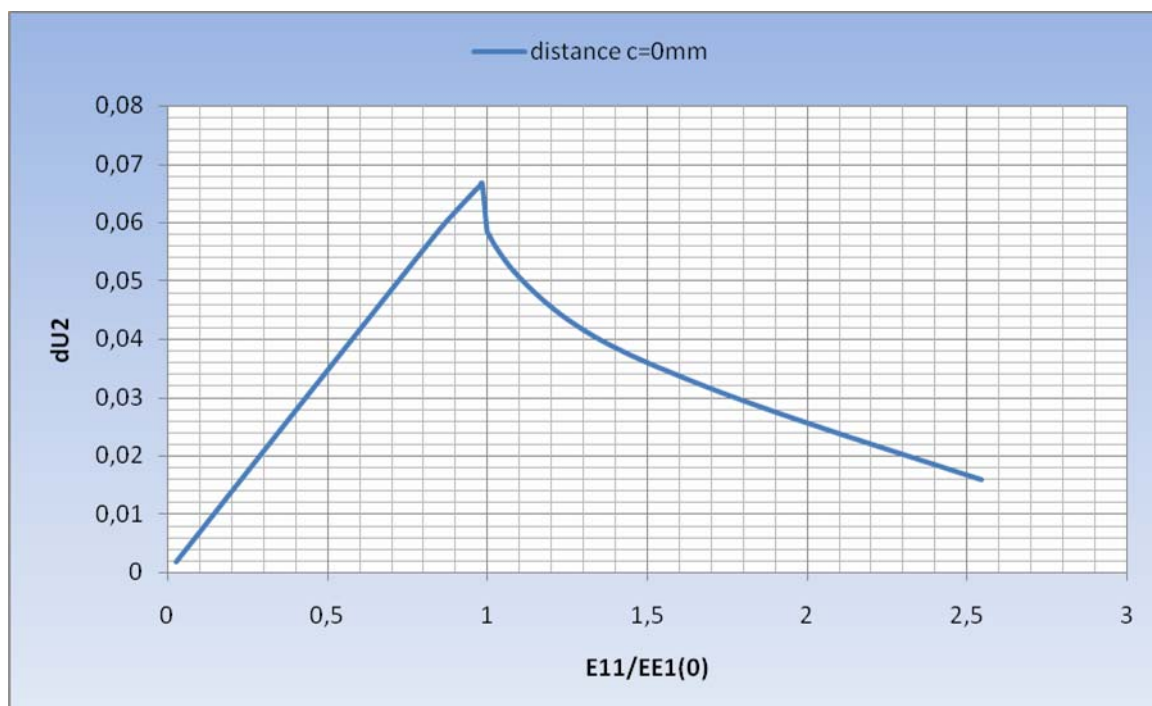


Σχήμα 7.2 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους στην εξέλιξη της συμπίεσης



Σχήμα 7.3 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα δύο (2) τμήματα της πλάκας

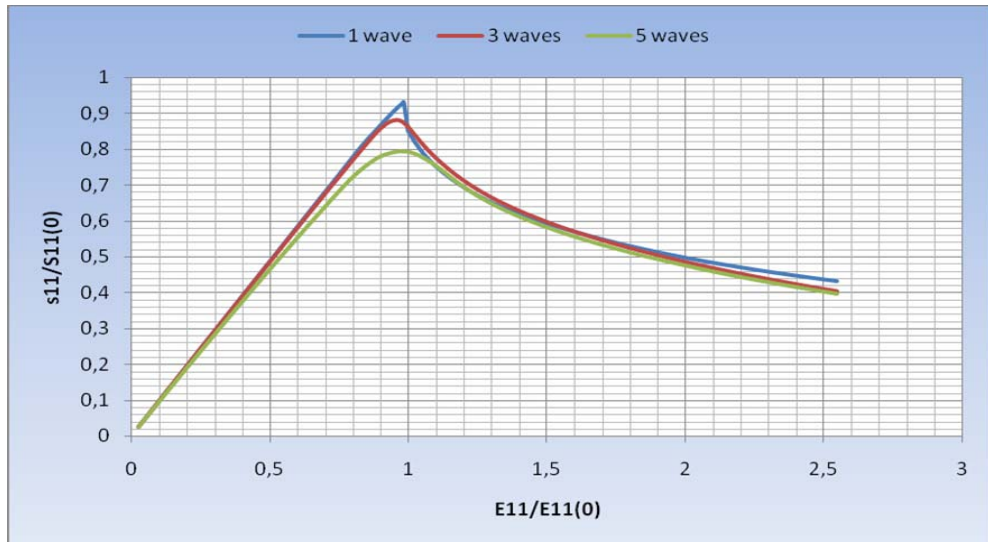
Το διάστημα πλάτυνσης του εξεταζόμενου μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ευδιάκριτο το σημείο λυγισμού με τη ταυτόχρονη δημιουργία κυμάτων (άνω κοίλο καμπύλης).



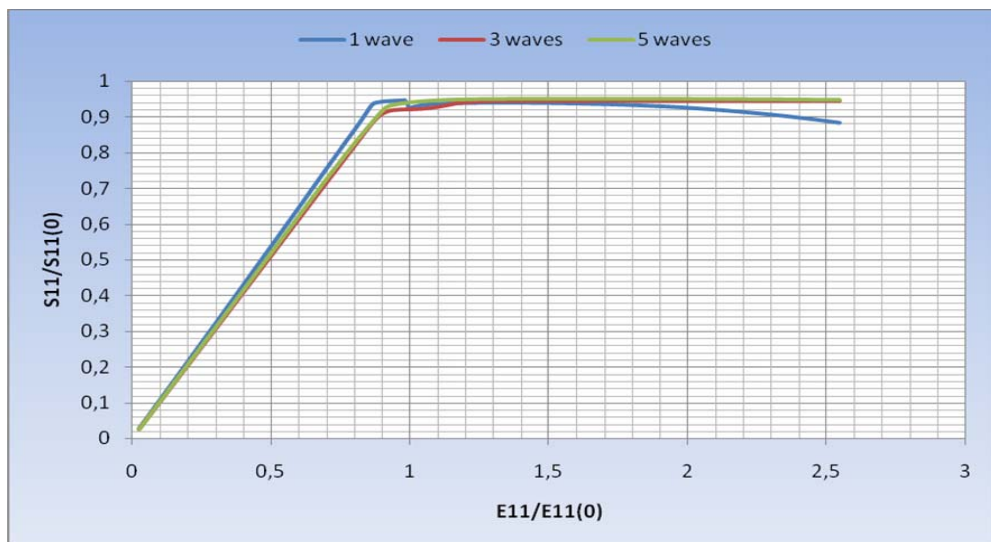
Σχήμα 7.4 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης μοντέλου $a/b=3$

7.2.2 Ενισχυμένα ελάσματα με αρχική παραμόρφωση πολλαπλών κυματώσεων ($n=3,5$) συμμετρικής μορφής στα δύο (2) τμήματα της πλάκας

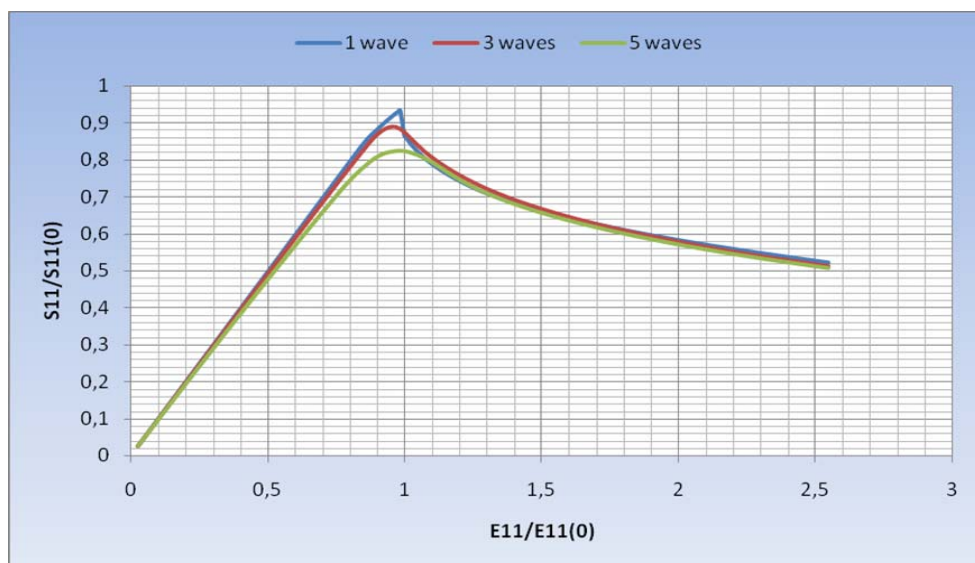
Η εισαγωγή της κυματοειδούς αρχικής μετατόπισης στα ενισχυμένα ελάσματα θέματος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την εξίσωση 4.5, διατηρώντας πάντα την ίδια μέγιστη τιμή για όλες τις περιπτώσεις. Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για αριθμό κυμάτων $n=3, 5$ συμμετρικής μορφής παρουσιάζονται από κοινού στα ακόλουθα Σχήματα 7.5 (έλασμα), 7.6 (ενισχυτικό) και 7.7 (συνολική). Στις εν λόγω γραφικές παραστάσεις είναι εμφανής η μείωση στην αντοχή με την αύξηση του αριθμού των κυματώσεων. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί η αλλαγή στη μορφή της καμπύλης του ενισχυτικού που επιφέρουν οι κυματώσεις.



Σχήμα 7.5 Μειωτικές καμπύλες για έλασμα (πλάκα) $a/b=3$ με κύματα $n=1,3,5$



Σχήμα 7.6 Μειωτικές καμπύλες για ενισχυτικό $a/b=3$ με κύματα $n=1,3,5$

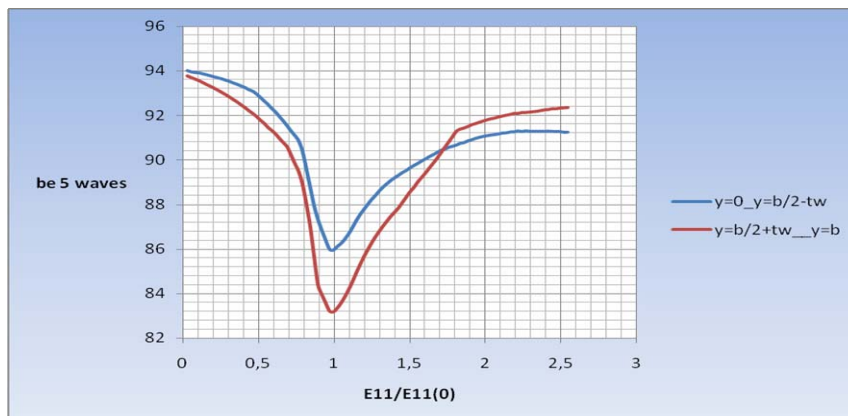


Σχήμα 7.7 Μειωτικές καμπύλες για ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ και $n=1,3,5$

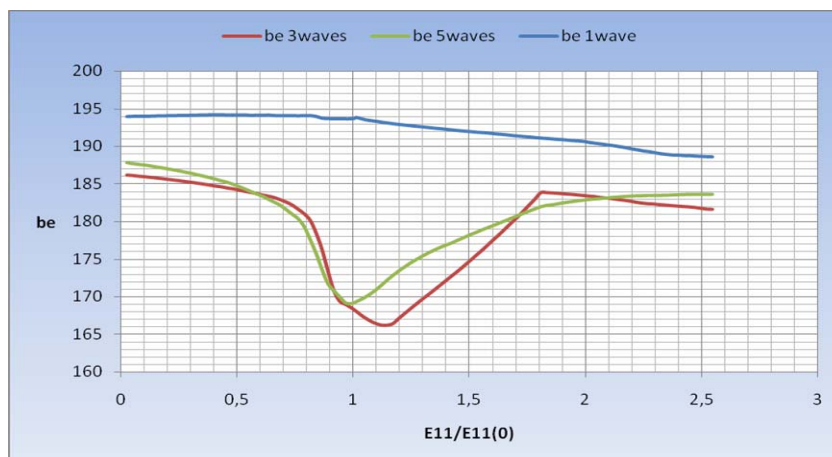
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ευαισθησία που δείχνει το ισοδύναμο πλάτος του ελάσματος στον αριθμό της κυμάτωσης των αρχικών μετατοπίσεων. Έτσι, παρατηρούμε στα Σχήματα 7.8 (τρία (3) κύματα) και 7.9 (πέντε (5) κύματα) τη διαφοροποίηση στην κατανομή του φορτίου που επιφέρει η αύξηση των κυμάτων. Αντίστοιχα στο Σχήμα 7.10 απεικονίζεται η σύγκριση των συνολικών ισοδύναμων πλατών για $n=1,3$ και 5 .



Σχήμα 7.8 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών πλάκας για $n=3$



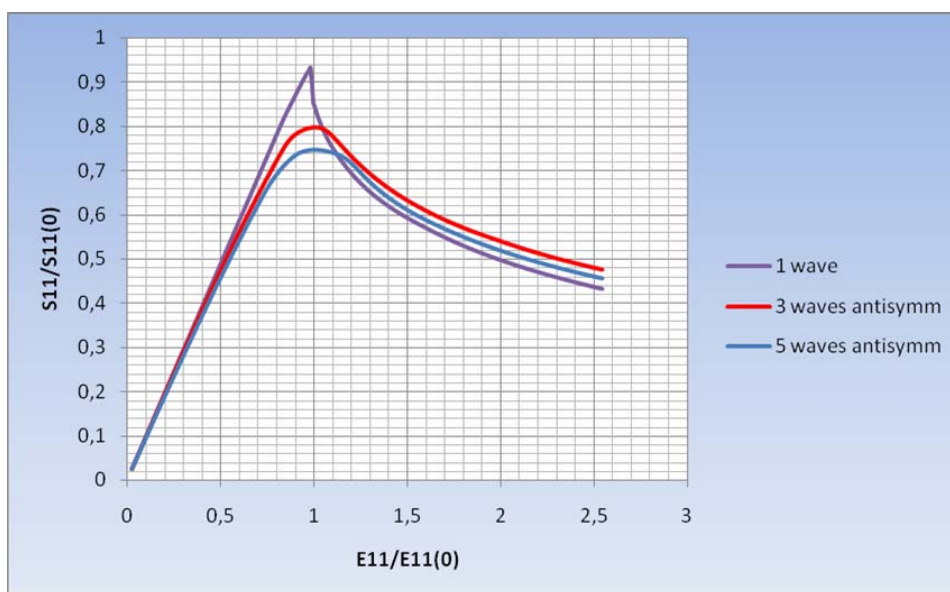
Σχήμα 7.8 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών πλάκας για $n=5$



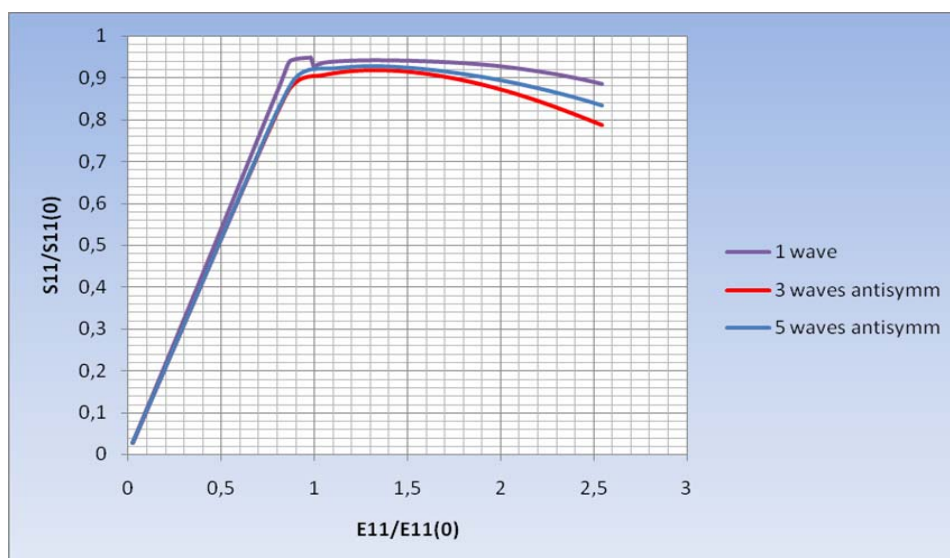
Σχήμα 7.9 Διακύμανση συνολικών ισοδύναμων πλατών με $n=1,3,5$

7.2.3 Ενισχυμένα ελάσματα με αρχική παραμόρφωση πολλαπλών κυματώσεων ($n=3,5$) αντισυμμετρικής μορφής στα δύο (2) τμήματα της πλάκας.

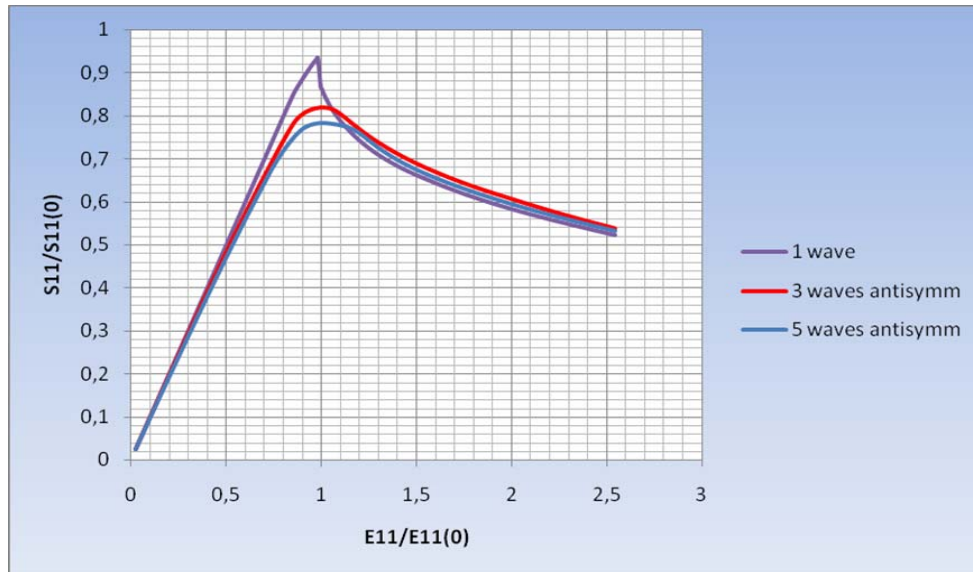
Αντίστοιχα με την προηγούμενη θεματική ενότητα οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης του ενισχυμένου ελάσματος $a/b=3$ με εισαγωγή αντισυμμετρικής μορφής κυμάτων παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.10 (έλασμα), 7.11 (ενισχυτικό) και 7.12 (συνολική). Η σύγκριση της αντισυμμετρικής μορφής για αριθμό κυμάτων $n=3,5$ πραγματοποιείται με τη συμμετρική μορφή ενός (1) κύματος που θα αποτελέσει τη βάση της σύγκρισης των ρηγματοποιημένων ελασμάτων.



Σχήμα 7.10 Μειωτικές καμπύλες για έλασμα (πλάκα) $a/b=3$ $n=1,3,5$ (antisymm)



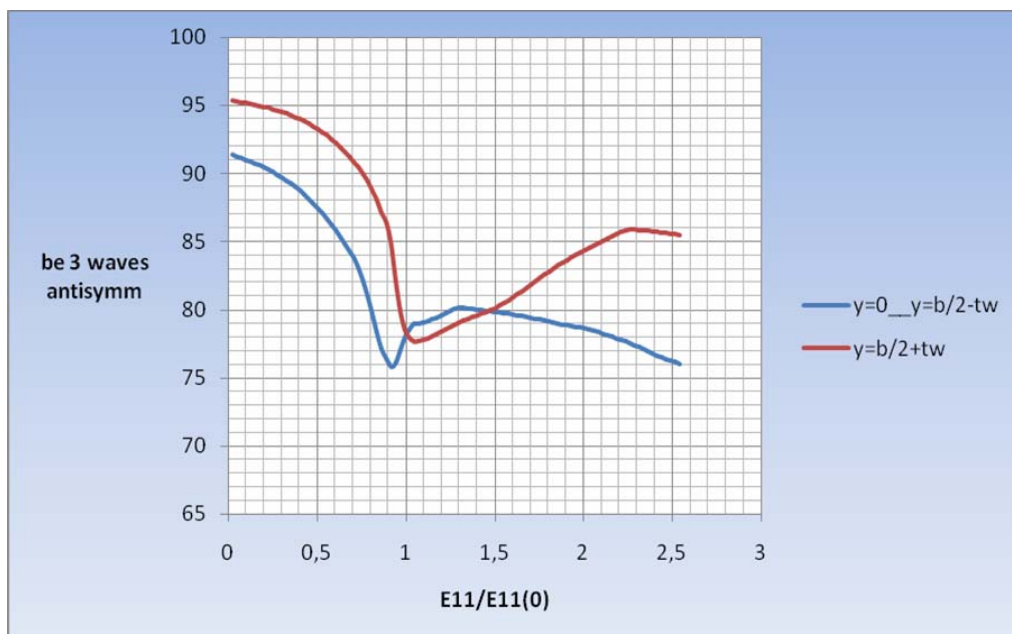
Σχήμα 7.11 Μειωτικές καμπύλες για ενισχυτικό $a/b=3$ $n=1,3,5$ (antisymm)



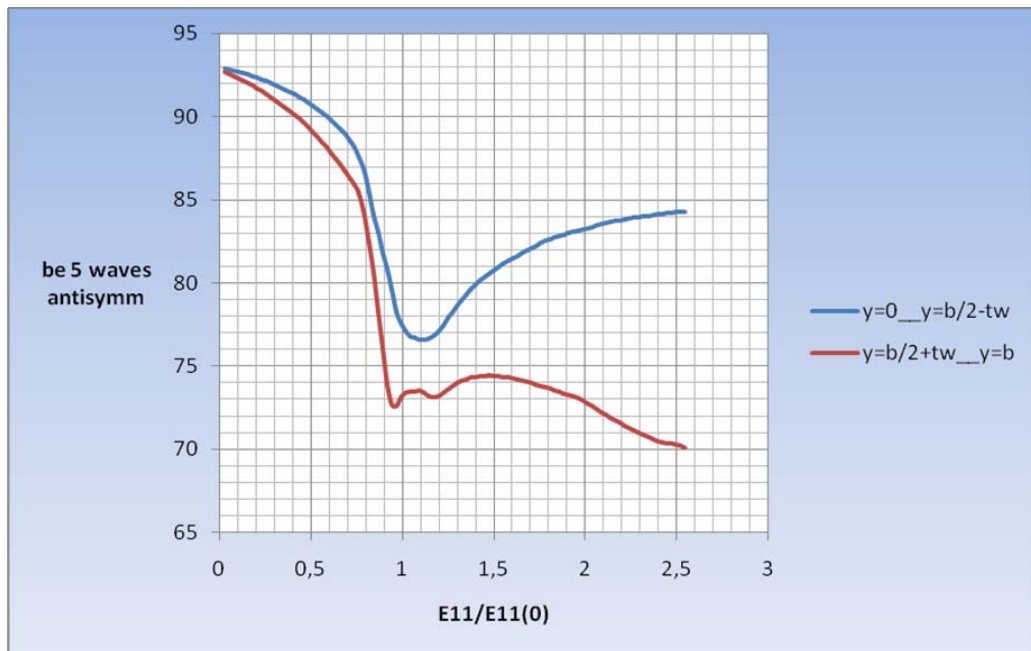
Σχήμα 7.12 Μειωτικές καμπύλες για ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ $n=1,3,5$ (antisymm)

Αξιοσημείωτη είναι η μείωση της αντοχής που προκαλείται στο ενισχυτικό για τα τρία (3) κύματα, σε αντίθεση με τα πέντε (5) που παρουσιάζουν υψηλότερες μέγιστες τιμές.

Τα ισοδύναμα πλάτη για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.13 (τρία (3) κύματα), 7.14 (πέντε (5) κύματα) και 7.15 (σύγκριση με τη συμμετρική μορφή ενός (1) κύματος).



Σχήμα 7.13 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών πλάκας για $n=3$ (antisymm)



Σχήμα 7.14 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών πλάκας για $n=5$ (antisymm)

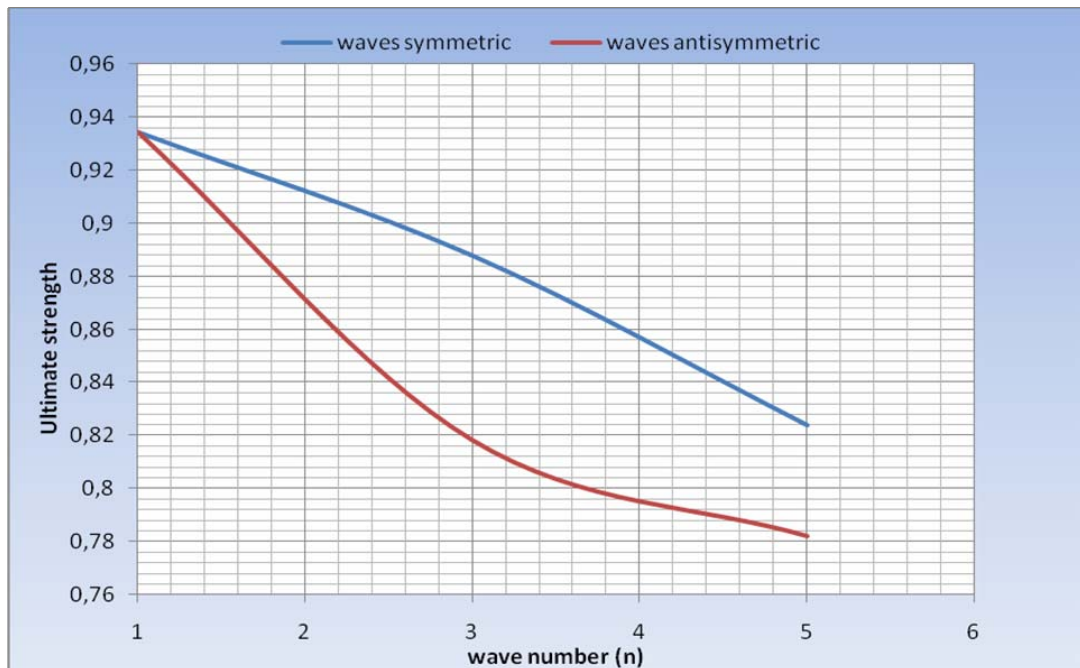


Σχήμα 7.15 Διακύμανση συνολικών ισοδύναμων πλατών με $n=1,3,5$ (antisymm)

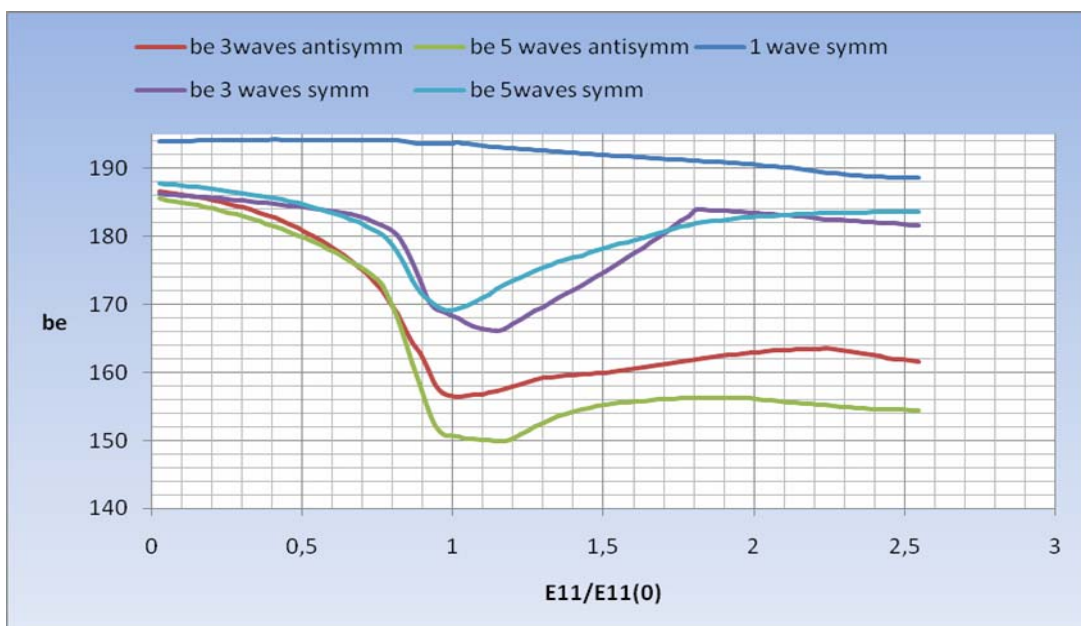
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η διαφορά μεταξύ συμμετρικής και αντισυμμετρικής μορφής κυματώσεων, όσον αφορά τα μεγέθη που εξετασθήκαν είναι σχετικά μεγάλη. Στην επόμενη παράγραφο γίνεται μια συνολική σύγκριση των ανωτέρω περιπτώσεων και παρουσιάζονται οι παραμορφωμένες κατασκευές στο τέλος της φόρτισης.

7.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ της συμμετρικής και αντισυμμετρικής μορφής κυματώσεων αρχικών μετατοπίσεων

Από τη σύγκριση των τιμών μέγιστης αντοχής των ανωτέρω περιπτώσεων προκύπτει το Σχήμα 7.16, ενώ στο Σχήμα 7.17 απεικονίζεται η διαφοροποίηση των ισοδύναμων πλατών.

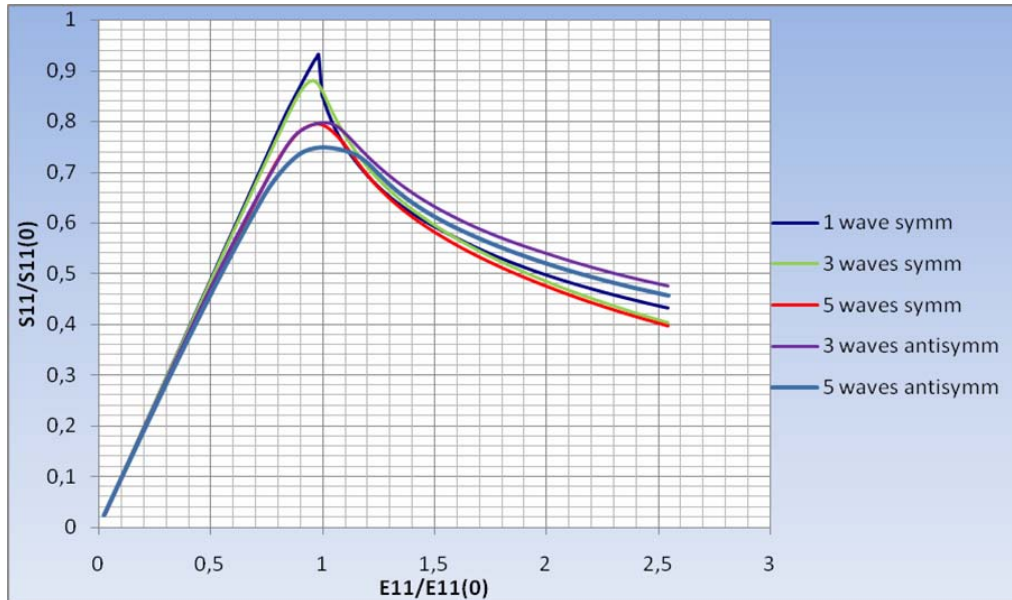


Σχήμα 7.16 Επίδραση αριθμού κυμάτων και μορφής στη μέγιστη αντοχή

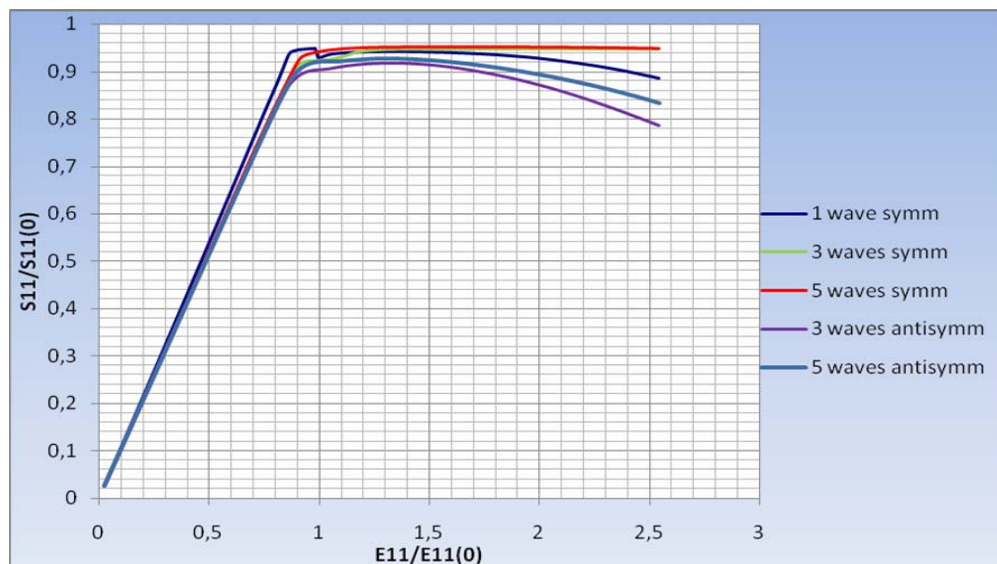


Σχήμα 7.17 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών σύμφωνα με αριθμό – μορφή κυμάτων

Οι μειωτικές καμπύλες για το σύνολο των περιπτώσεων παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.18 (έλασμα) και 7.19 (ενισχυτικό). Από την ανάλυση των ακόλουθων γραφικών παραστάσεων προκύπτει ότι η δυσμενέστερη περίπτωση για την πλάκα είναι η αντισυμμετρική πέντε (5) κυμάτων, ενώ για το ενισχυτικό η αντισυμμετρική με τρία (3) κύματα.

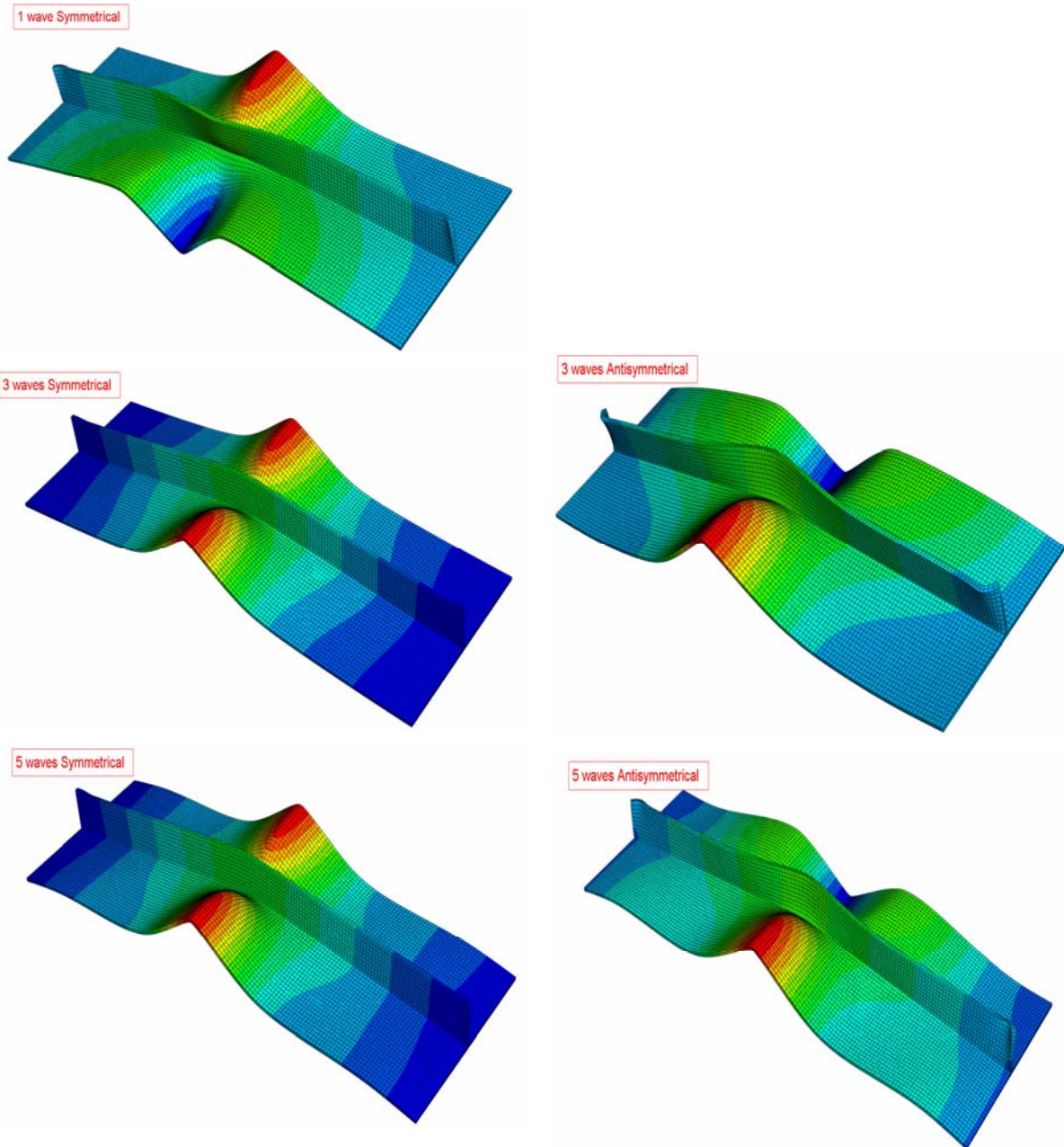


Σχήμα 7.18 Μειωτικές καμπύλες πλάκας σύμφωνα με αριθμό – μορφή κυμάτων



Σχήμα 7.19 Μειωτικές καμπύλες ενισχυτικού σύμφωνα με αριθμό – μορφή κυμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μορφή της παραμορφωμένης κατασκευής (μεταβλητή U3 – βαθμός μεγέθυνσης 5) στο τέλος του φορτίου για όλες τις περιπτώσεις μοντέλων που εξετάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο.



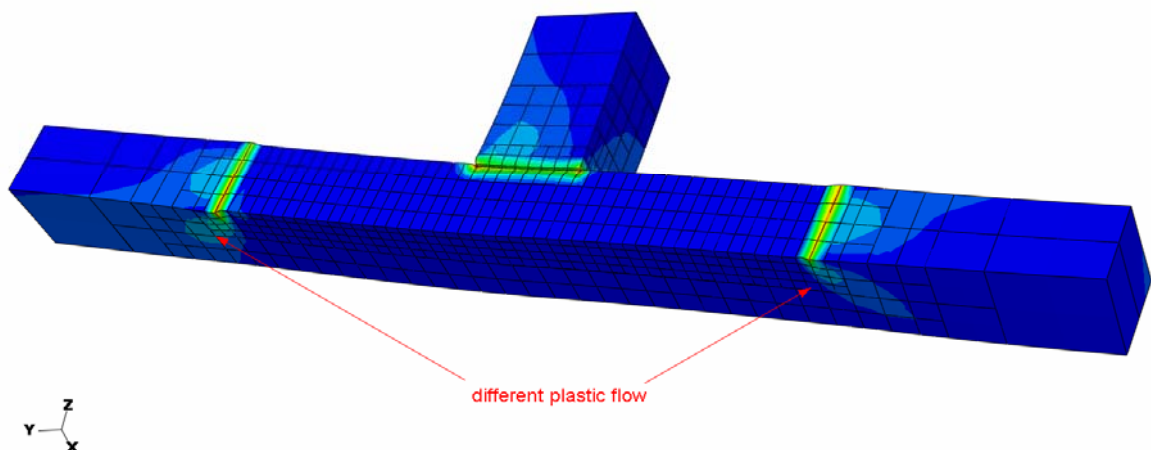
Σχήμα 7.20 Παραμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος ανά αριθμό – μορφή κύματος

Όπως παρατηρούμε, υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στην παραμόρφωση του ενισχυμένου ελάσματος ανάλογα με τη μορφή της αρχικής μετατόπισης. Συγκεκριμένα για ένα (1) κύμα αρχικής ατέλειας συμμετρικής μορφής οδηγούμαστε σε δύο (2) αντισυμμετρικά εκατέρωθεν του ενισχυτικού, ενώ για μεγαλύτερο αριθμό προκύπτουν κύματα συμμετρικής μορφής ανά τμήμα πλάκας. Συναφώς σε κύματα αντισυμμετρικής μορφής ($n > 3$) οδηγούμαστε σε δύο (2)

αντίστοιχα αντισυμμετρικά σύμφωνα με τη μορφή της εισαχθείσας ατέλειας. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι εισήχθη αριθμός κύματος μεγαλύτερος του ενός, το ενισχυμένο έλασμα στο τέλος της φόρτισης παρουσιάζει μία τάση προς το σχηματισμό, ενός μόνο κεντρικού κύματος.

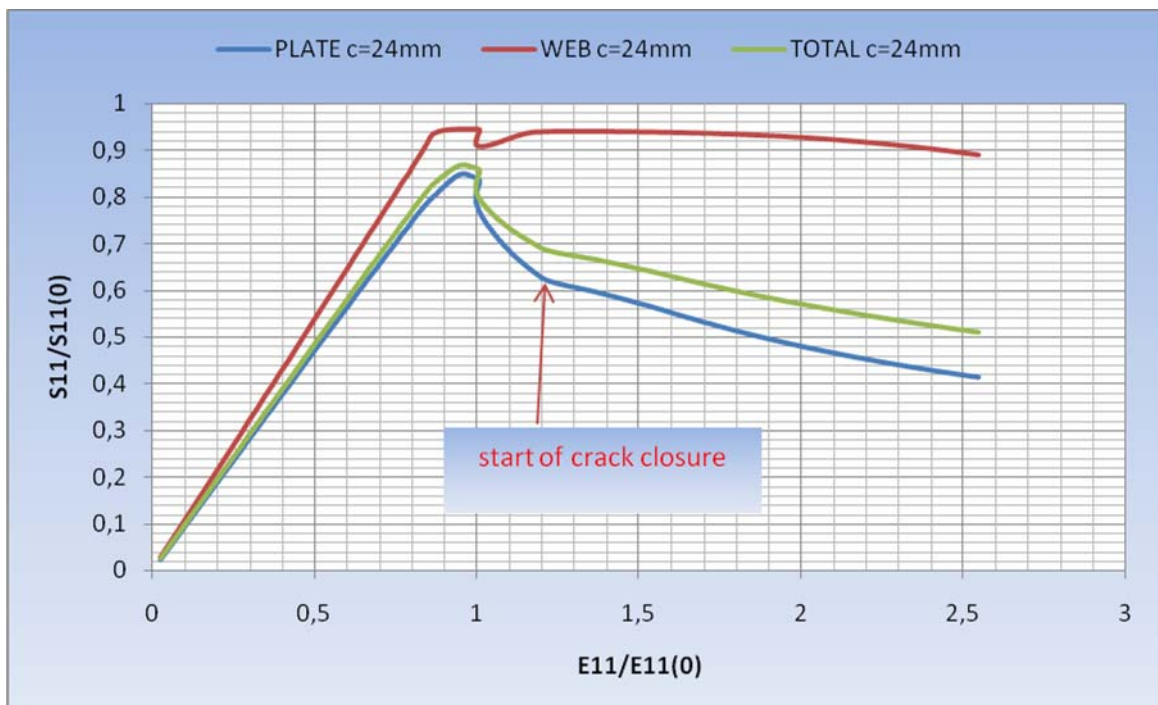
7.3 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με συμμετρική ρωγμή $c=24\text{mm}$

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 21048 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8325\text{mm}$ στη λεπτομέρεια της ρωγμής και $4\text{mm} \times 3.9\text{mm} \times 1.665\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ αντίστοιχα οι διαστάσεις στο ενισχυτικό είναι $4\text{mm} \times 2.04125\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Να ληφθεί υπόψη ότι η εν λόγω ανάλυση κατά τα $2/3$ του σταδίου συμπίεσης πραγματοποιήθηκε με την αριθμητική μέθοδο RIKS λόγω της δυσκολίας του αλγόριθμου Newton – Raphson (μέθοδος εφαπτομένης) στην εξεύρεση λύσεως (θέσεως ισορροπίας). Στο Σχήμα 7.21 που ακολουθεί απεικονίζεται η πλαστική ροή σε τελικό στάδιο συμπίεσης, όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε τη διαφοροποίηση του συγκεκριμένου μεγέθους (μεταβλητή PEEQ) μεταξύ των δύο (2) τμημάτων της πλάκας.



Σχήμα 7.21 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής σε τελικό στάδιο συμπίεσης

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης για το εν λόγω ενισχυμένο έλασμα παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 7.22. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπύλη του ενισχυτικού εξακολουθεί να εμφανίζει το κάτω κοίλο στην περιοχή φόρτισης $E_{11}/E_{11(0)}=1.01$, πλην όμως σε πιο έντονη μορφή σε σχέση με την περίπτωση άνευ ρωγμής, ενώ ανακτά την ακαμψία του με την προσέγγιση των επιφανειών της ρωγμής. Συναφώς το «κλείσιμο» της ρωγμής επιφέρει αλλαγή στην κλίση της καμπύλης της πλάκας στην περιοχή κατάρρευσης του μοντέλου. Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι η προσέγγιση των επιφανειών της ρωγμής συμβαίνει χρονικά, σε στάδιο αρκετά μετά το σημείο μέγιστης αντοχής.



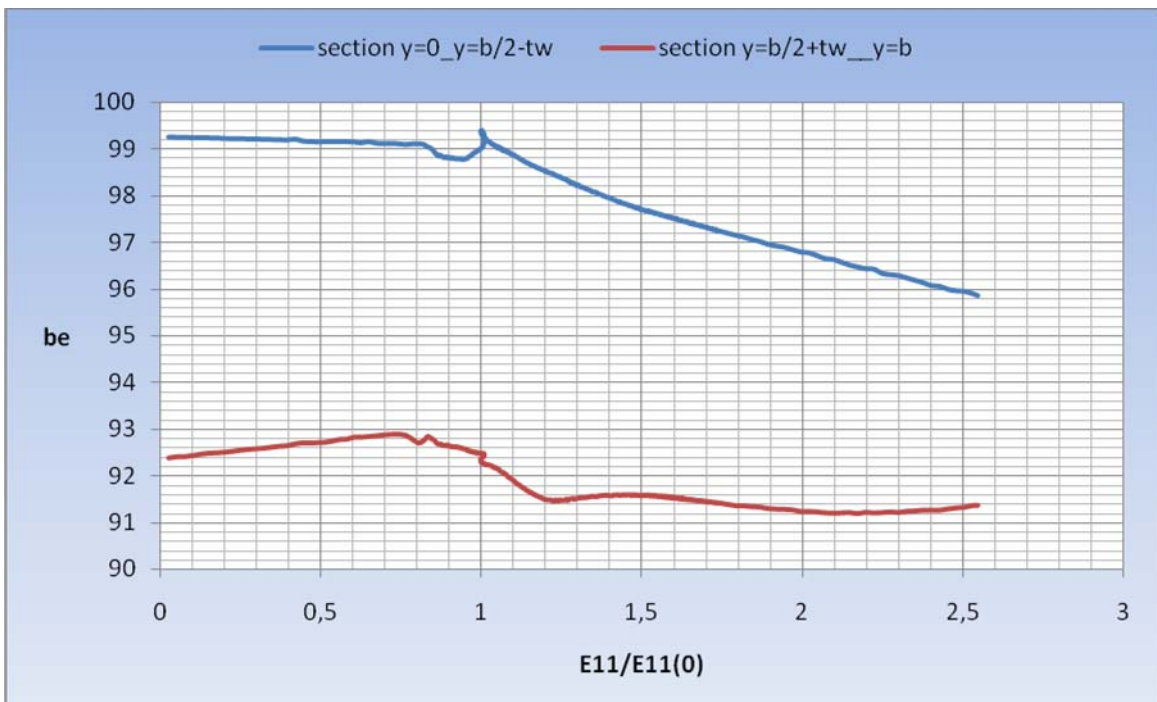
Σχήμα 7.22 Μειωτικές καμπύλες ενισχυμένου ελάσματος $a/b=3$ με ρωγμή $c=24\text{mm}$

Τα ισοδύναμα πλάτη για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.23 και 7.24. Στις εν λόγω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε αφενός την αρχή της πτώσης του ισοδύναμου πλάτους μετά το στάδιο φορτίου $E_{11}/E_{11(0)}=0.7305$, που εκτιμάται ότι αποτελεί το σημείο διεύλεσης από την ελαστική προς την ελαστο – πλαστική περιοχή, αφετέρου την προσωρινή αποφόρτωση της πλάκας με το λυγισμό σε κύματα και την επακόλουθη απότομη μείωση του εν λόγω μεγέθους. Συναφώς θα πρέπει να σημειωθεί η μεγάλη διαφοροποίηση στη φόρτιση των δύο (2) τμημάτων της πλάκας, με την περιοχή από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$ να παραλαμβάνει μεγάλο ποσοστό του φορτίου συμπίεσης, ενώ το έτερο τμήμα αρχίζει να συμβάλλει στην κατασκευή μετά τη δημιουργία των

κυμάτων. Το φαινόμενο της ανομοιομορφίας της φόρτισης του ενισχυμένου ελάσματος επιβεβαιώνει και το σχήμα 7.21, όπου η πλαστική ροή έχει διαφορετική κατανομή.

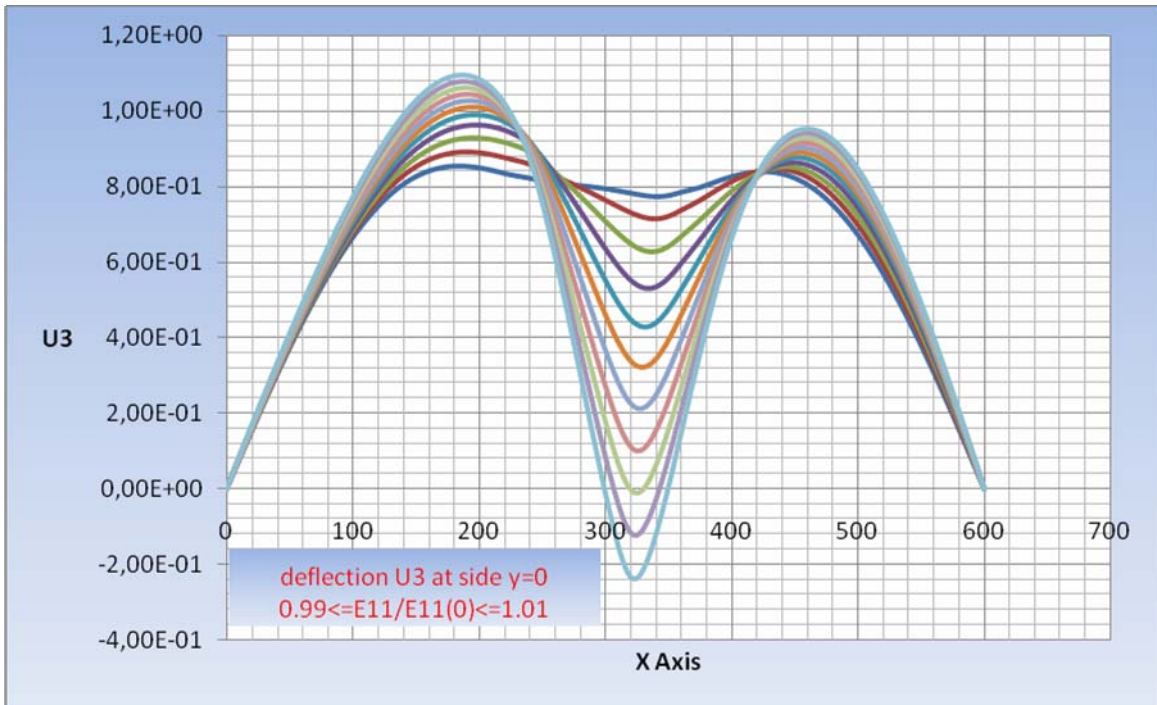


Σχήμα 7.23 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή $c=24\text{mm}$

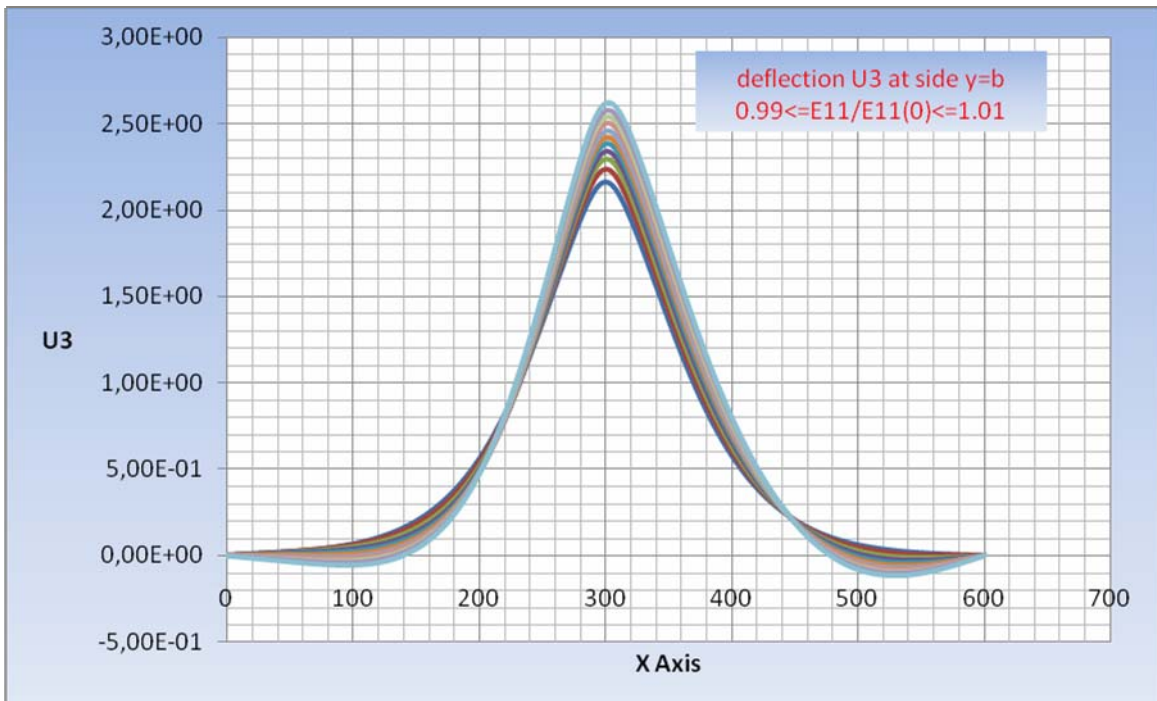


Σχήμα 7.24 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας

Οι διακυμάνσεις του βέλους κάμψης στις αφόρτιστες πλευρές στο κρίσιμο σημείο του λυγισμού με τη δημιουργία κυμάτων απεικονίζονται στα Σχήματα 7.25 ($y=0$) και 7.26 ($y=b$).

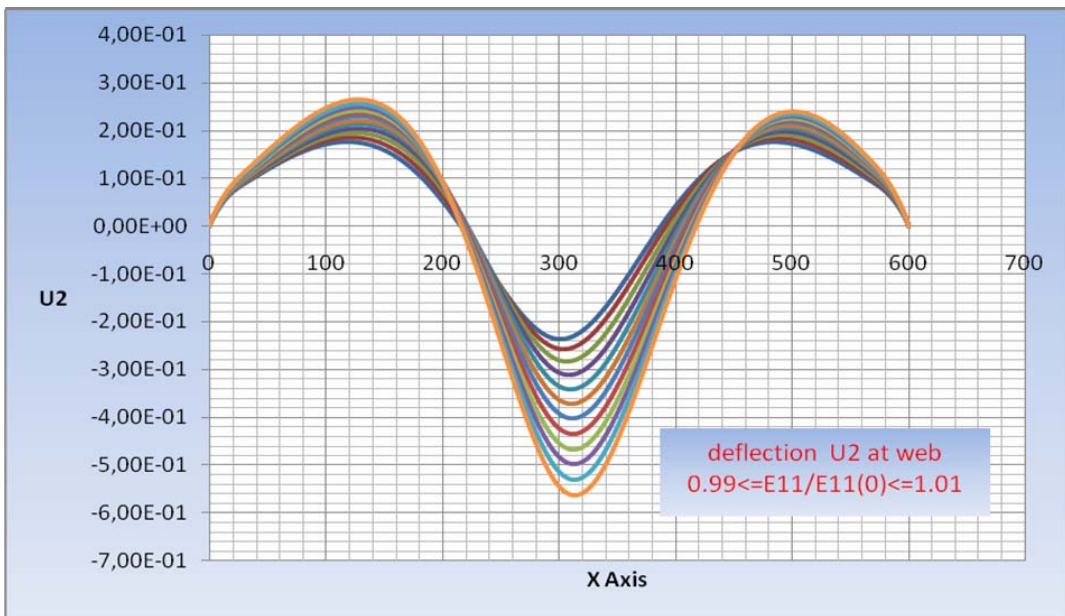


Σχήμα 7.25 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=0$ στο στάδιο λυγισμού με κύματα

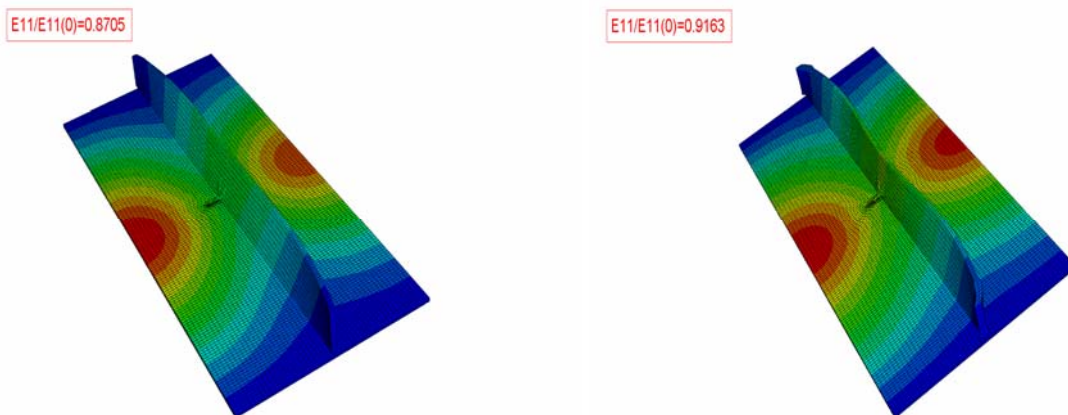


Σχήμα 7.26 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=b$ στο στάδιο λυγισμού με κύματα

Αντίστοιχα για το ίδιο φορτίο συμπίεσης στο ακόλουθο Σχήμα 7.27 απεικονίζεται το βέλος κάμψης U_2 του ενισχυτικού. Όπως παρατηρούμε το ενισχυτικό έχει ήδη παραμορφωθεί σε κύματα, σε αντίθετη διεύθυνση από την αρχικά εισαχθείσα μετατόπιση. Συγκεκριμένα στο ενισχυτικό αρχίζει η διαδικασία δημιουργίας κυμάτων για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)}=0.8705$ (στο σχήμα 7.22 αντιστοιχεί στο πρώτο σημείο αλλαγής κλίσης της καμπύλης φόρτισης του ενισχυτικού) τη στιγμή που στην πλάκα δεν παρατηρούμε κάποια σημαντική διαφοροποίηση στη μεταβλητή U_3 , ενώ για λόγο $E_{11}/E_{11(0)}=0.9163$ τα εν λόγω κύματα έχουν πλήρως σχηματιστεί. Τα ανωτέρω συνοψίζονται στο Σχήμα 7.28, όπου επιπλέον παρατηρούμε ότι η κυμάτωση στο ενισχυτικό ενεργοποιείται από την ένταση της μετατόπισης U_3 στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$.

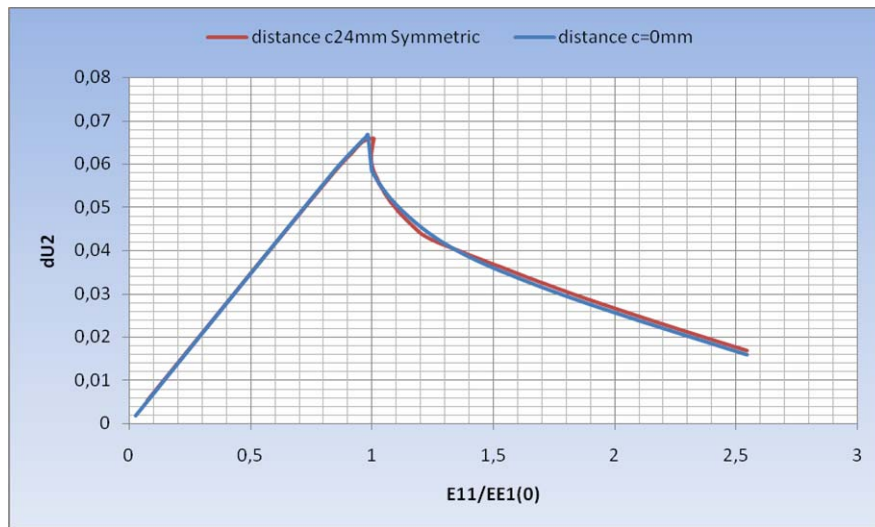


Σχήμα 7.27 Διακύμανση U_2 στο ενισχυτικό στο στάδιο λυγισμού με κύματα



Σχήμα 7.28 Δημιουργία κυματώσεως στο ενισχυτικό

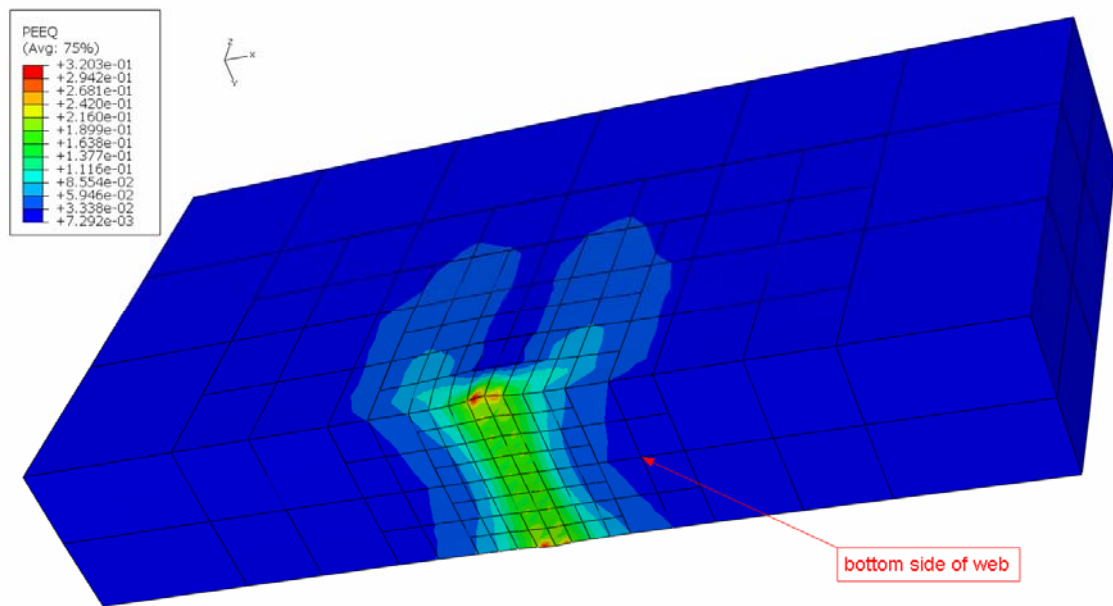
Το διάστημα πλάτυνσης του εν λόγω μοντέλου παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 7.29, σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση άνευ ρωγμής. Όπως παρατηρούμε η ευαισθησία της καμπύλης στη ρωγμή είναι σχετικά μικρή.



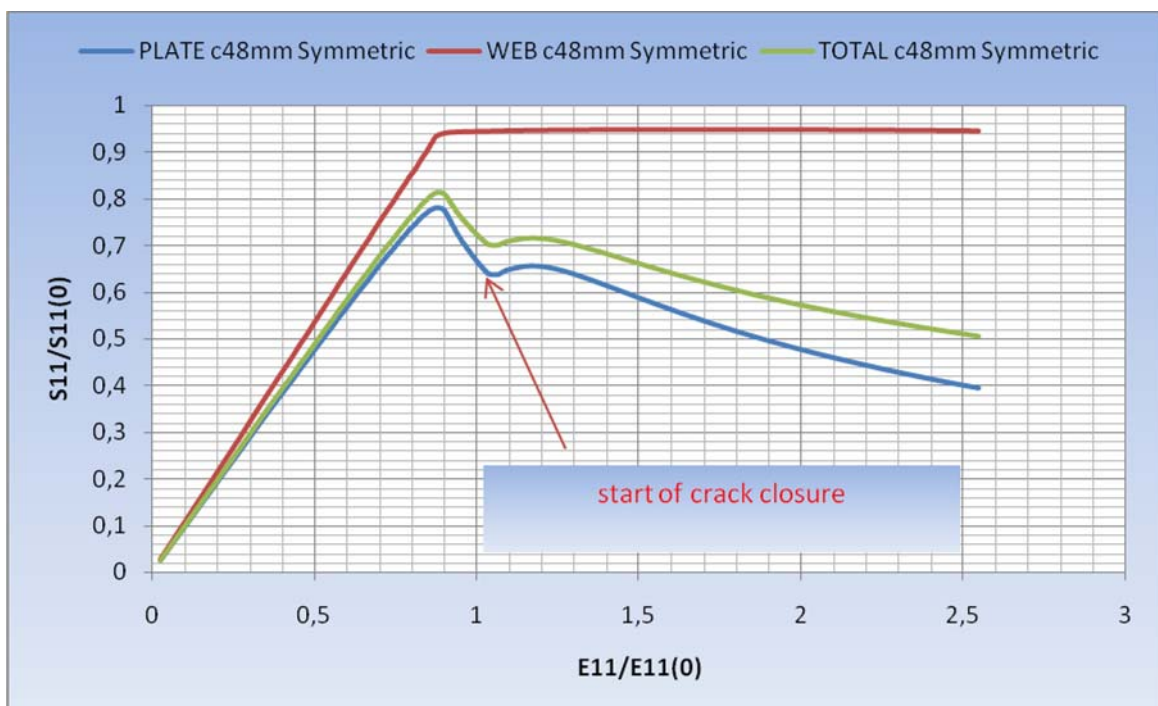
Σχήμα 7.29 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης μοντέλων άνευ/ με ρωγμή $c=24\text{mm}$

7.4 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 22720 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8325\text{mm}$ στη λεπτομέρεια της ρωγμής και $4\text{mm} \times 4.133\text{mm} \times 1.665\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ αντίστοιχα οι διαστάσεις στο ενισχυτικό είναι $4\text{mm} \times 2.04125\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και σε αυτή την περίπτωση, η ανάλυση χωρίστηκε σε δύο (2) τμήματα, στο αρχικό στάδιο συμπίεσης (περίπου το $\frac{1}{2}$ της συνολικής) που πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο RIKS και στο υπόλοιπο το οποίο εκτελέστηκε με τη μέθοδο Newton – Raphson. Στα ακόλουθα Σχήματα 7.30 και 7.31 απεικονίζονται η πλαστική ροή στο τμήμα του ενισχυτικού άνωθεν της ρωγμής (μεταβλητή PEEQ στο τέλος της φόρτισης) και οι μειωτικές καμπύλες του εν λόγω ενισχυμένου ελάσματος.



Σχήμα 7.30 Πλαστική ροή στο ενισχυτικό άνωθεν ρωγμής πλάκας

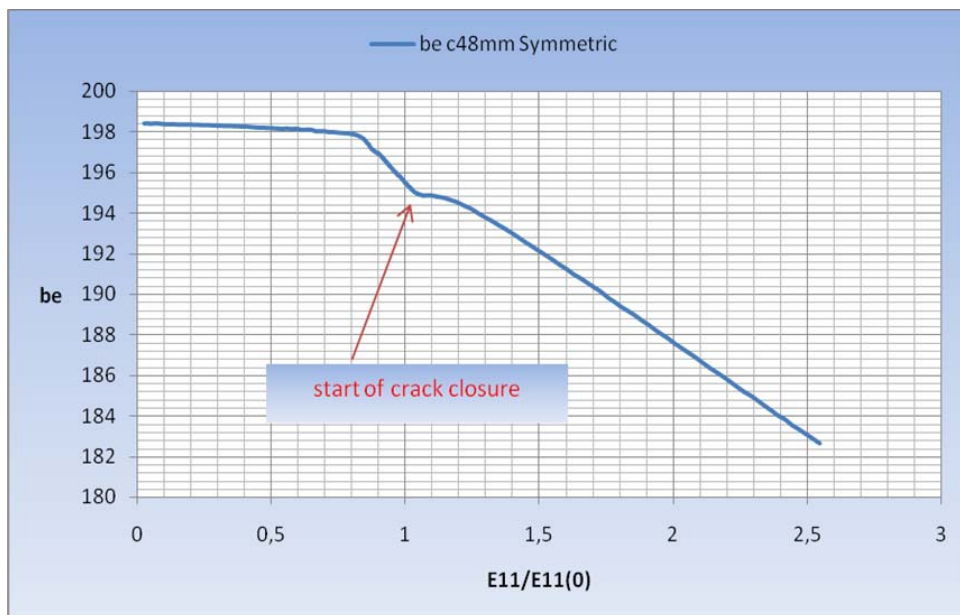


Σχήμα 7.31 Μειωτικές καμπύλες ενισχυμένου ελάσματος $a/b=3$ με ρωγμή $c=48mm$

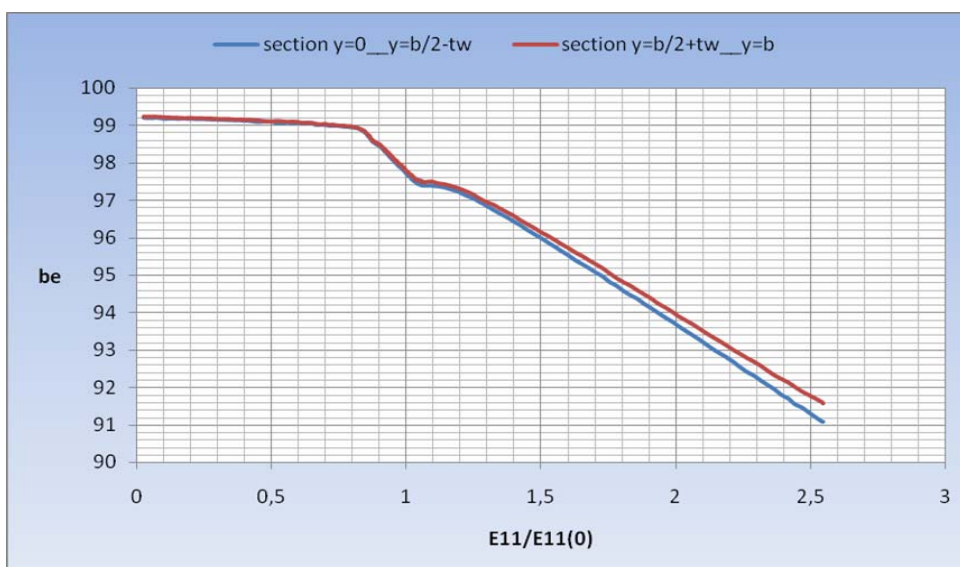
Αξιοσημείωτη είναι ότι η πρώτη επαφή των επιφανειών της ρωγμής γίνεται για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11(0)}=1.01$, στη συνέχεια δεν καταγράφεται επαφή και η έναρξη δυναμικής επαφής πραγματοποιείται για $E_{11}/E_{11(0)}=1.033$. Επιπρόσθετα και σε αυτή την περίπτωση η έναρξη επαφής των επιφανειών της

ρωγμής, πραγματοποιείται αφού το ενισχυμένο έλασμα έχει μπει στη διαδικασία κατάρρευσης.

Τα ισοδύναμα πλάτη για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.32 και 7.33. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η επαφή της ρωγμής προσφέρει ελάχιστα στη μεταλυγισμική συμπεριφορά της πλάκας, ενώ άξιον αναφοράς είναι το γεγονός της ομοιόμορφης φόρτισης στα δύο (2) τμήματα της πλάκας, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τη μορφή παραμόρφωσης του ενισχυμένου ελάσματος στο τέλος της φόρτισης.

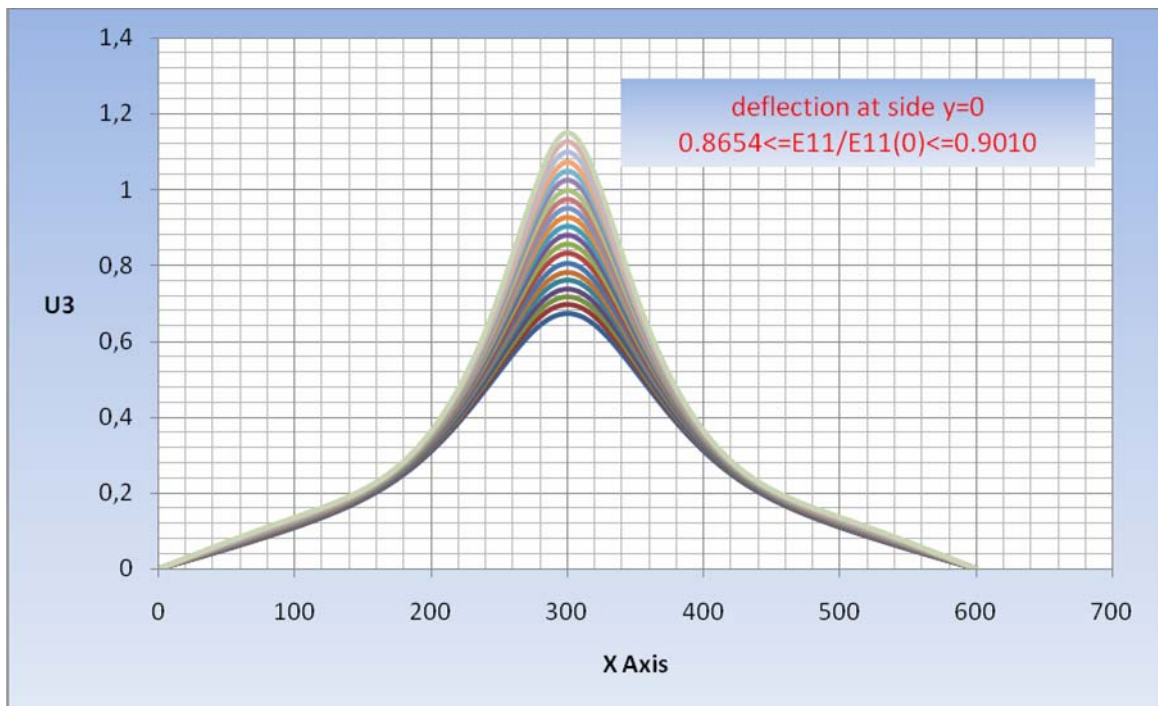


Σχήμα 7.32 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή $c=48\text{mm}$

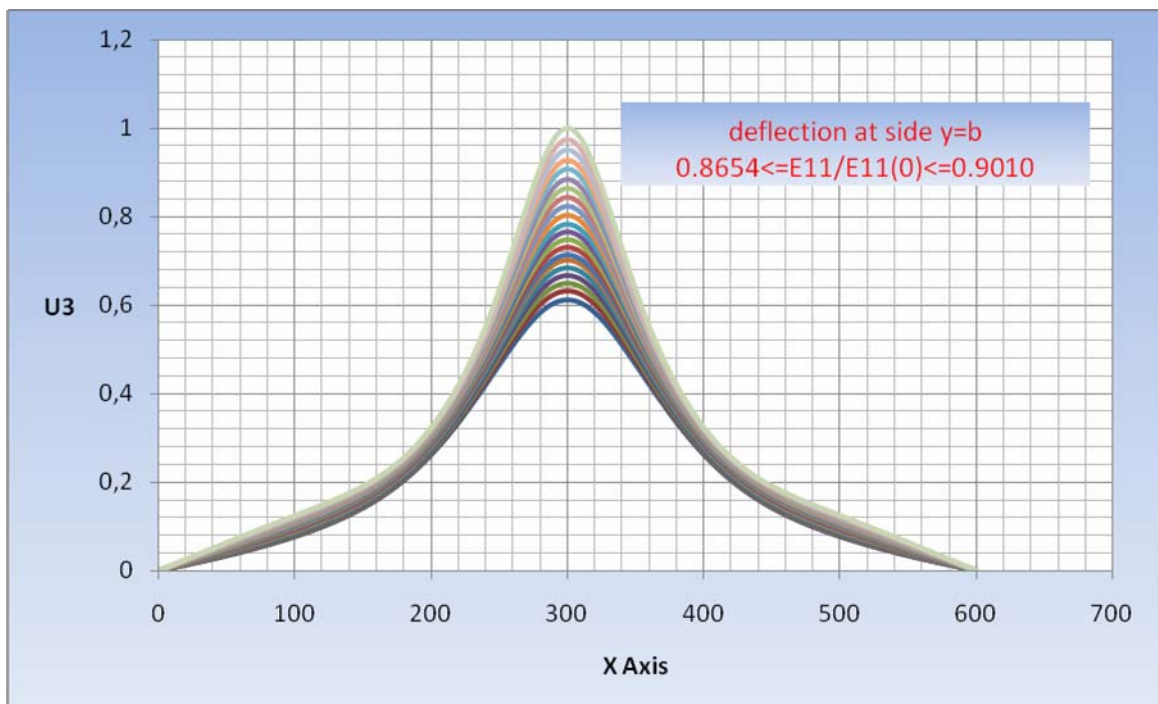


Σχήμα 7.33 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας

Οι διακυμάνσεις του βέλους κάμψης στις αφόρτιστες πλευρές σε διαδοχικά στάδια φόρτισης (περίπου στο σημείο μέγιστης αντοχής) απεικονίζονται στα Σχήματα 7.34 ($y=0$) και 7.35 ($y=b$). Όπως παρατηρούμε, η μετατόπιση στα δύο τμήματα της πλάκας είναι ταυτόσημη, με την αφόρτιστη πλευρά $y=0$ στα εξεταζόμενα στάδια φόρτισης να παρουσιάζει ελαφρά μεγαλύτερες τιμές.

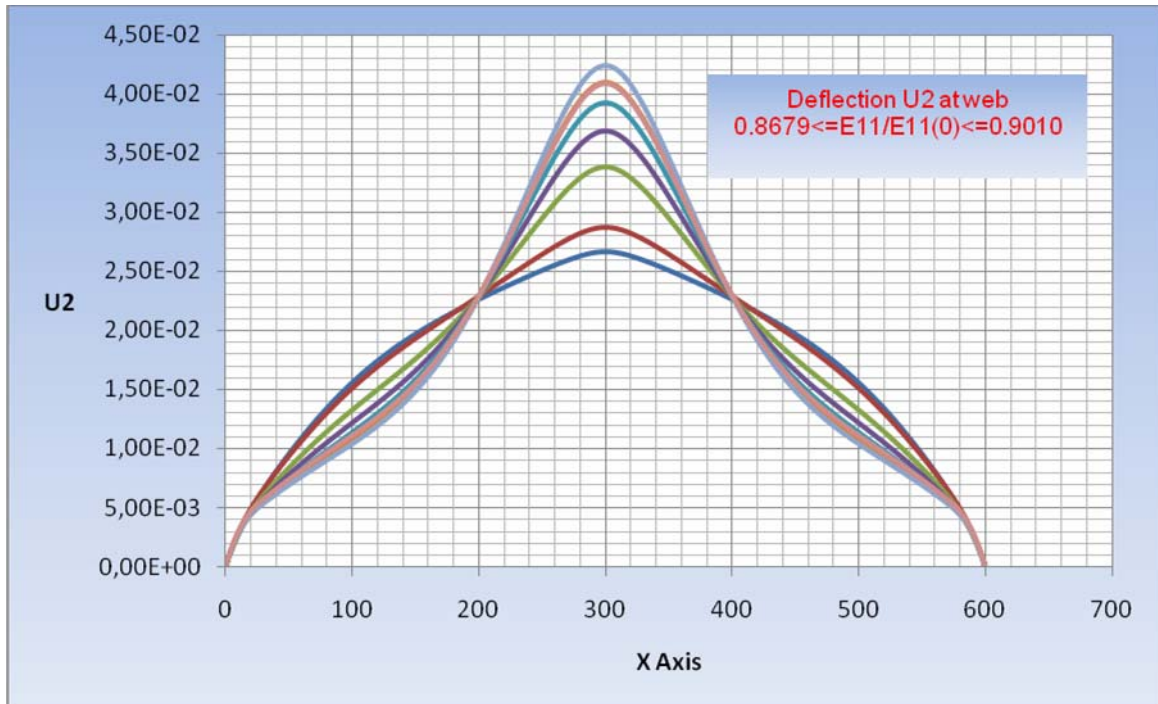


Σχήμα 7.34 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=0$ στο στάδιο μέγιστης αντοχής



Σχήμα 7.35 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=b$ στο στάδιο μέγιστης αντοχής

Το βέλος κάμψης U_2 του ενισχυτικού για αντίστοιχα στάδια φόρτισης απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 7.36. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την αύξηση του μήκους της ρωγμής, αλλάζει η μορφή παραμόρφωσης του ενισχυτικού, καθώς συγκλίνει προς ένα (1) κύριο ημικύμα στο μέσο αυτού (σε αντίθεση με την περίπτωση για μήκος ρωγμής $c=24\text{mm}$).



Σχήμα 7.36 Διακύμανση U_2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης

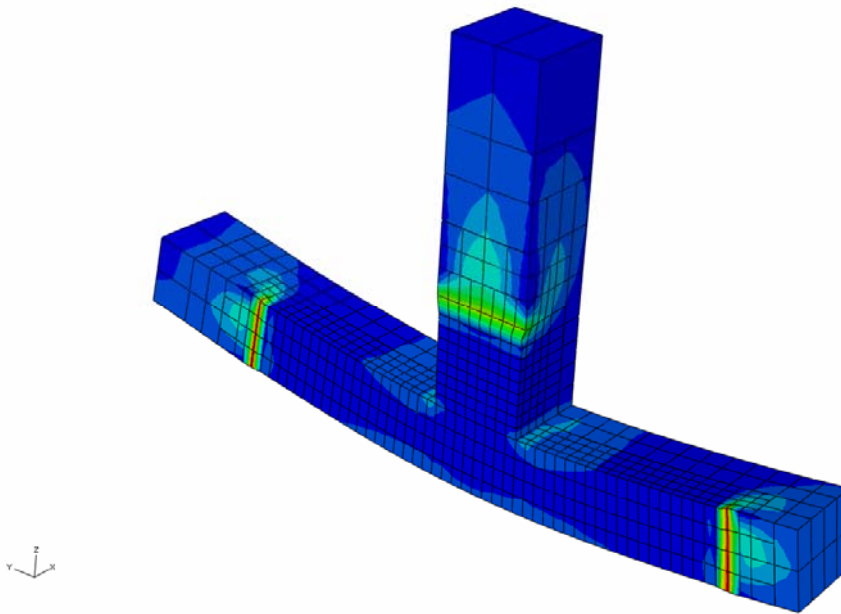
Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των διαστημάτων πλάτυνσης του εξεταζόμενου ελάσματος με τις αντίστοιχες περιπτώσεις για ρωγμή $c=24\text{mm}$ και άνευ ρωγμής. Παρατηρούμε ότι για λόγο μήκους ρωγμής προς πλάτος $c/b>0.12$ συγκρατείται η πλάτυνση του μοντέλου σε μικρότερες τιμές σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις όσον αφορά στην προλυγισμική ζώνη. Στην εξέλιξη της συμπίεσης και ιδιαίτερα μετά την επαφή των επιφανειών της ρωγμής $c=48\text{mm}$, το εν λόγω μοντέλο εμφανίζει συγκράτηση του διαστήματος πλάτυνσης στην περιοχή κατάρρευσης. Εκτιμάται ότι το μεγαλύτερο μήκος της ασυνέχειας στο έλασμα, δημιουργεί μια έλξη στις αφόρτιστες πλευρές (μέσω των μεμβρανικών τάσεων) συγκρατώντας το μοντέλο σε μικρές τιμές πλάτυνσης. Το γεγονός αυτό, πιθανόν καθορίζει και την ομοιόμορφη παραμόρφωση που εμφανίζεται στα δύο (2) τμήματα της πλάκας εκατέρωθεν του ενισχυτικού.



Σχήμα 7.37 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης άνευ/ με ρωγή c=24/48mm

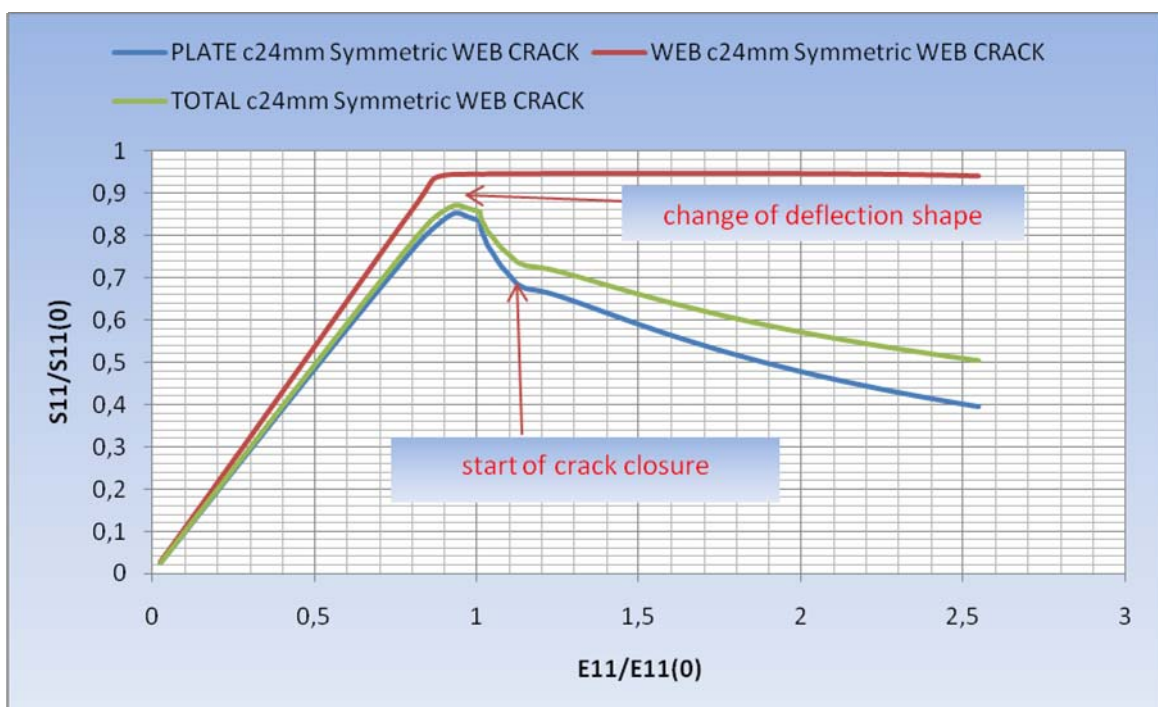
7.5 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με συμμετρική ρωγή $c=24\text{mm}$ και επιπλέον ρωγή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 21064 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8325\text{mm}$ στη λεπτομέρεια της ρωγμής και $4\text{mm} \times 3.9836\text{mm} \times 1.665\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ αντίστοιχα οι διαστάσεις στη ρωγή του ενισχυτικού είναι $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.5103\text{mm}$ και στο κυρίως τμήμα αυτού $4\text{mm} \times 2.04125\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Στο Σχήμα 7.38 απεικονίζεται η κατάσταση της πλαστικής ροής στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης.



Σχήμα 7.38 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης

Οι μειωτικές καμπύλες του εν λόγω μοντέλου παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 7.39. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σημείο μέγιστης αντοχής συμπίπτει με την αλλαγή στη μορφή της παραμόρφωσης U3 στην πλάκα (τα συμμετρικά ημικύματα στα τμήματα της πλάκας μετατρέπονται σε ένα κύριο ημικύμα στο τμήμα από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$). Επιπρόσθετα και σε αυτή την περίπτωση η επαφή των επιφανειών της ρωγμής ξεκινά σε προχωρημένο στάδιο συμπίεσης.

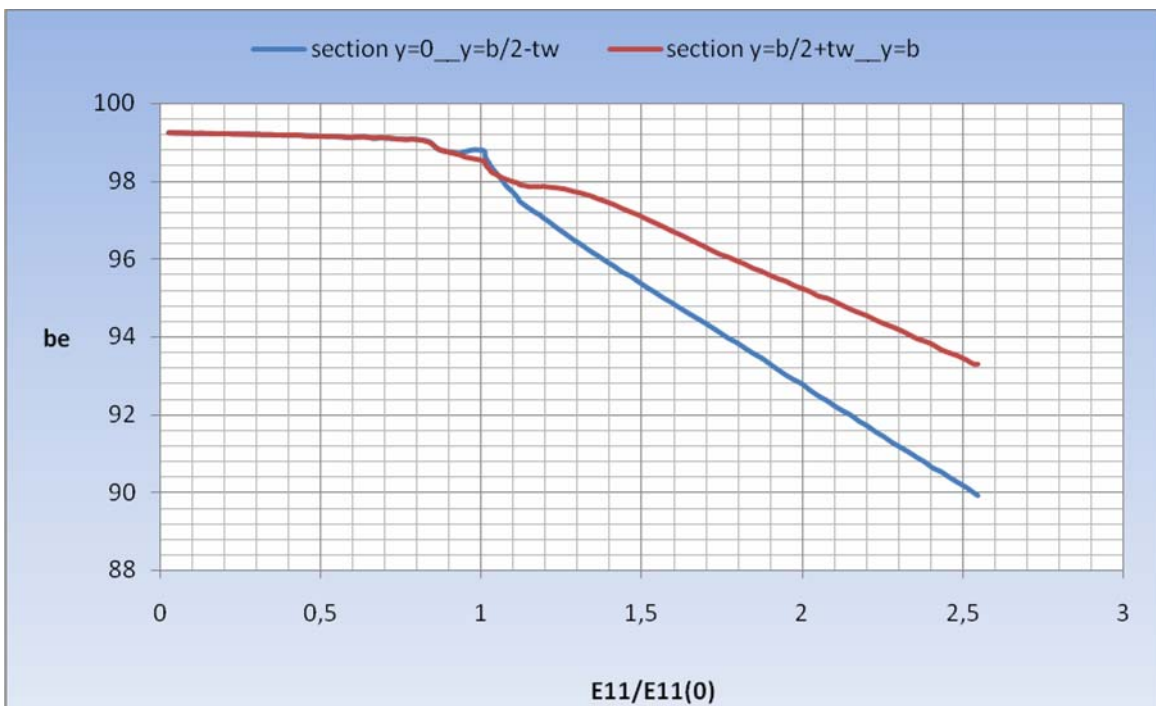


Σχήμα 7.39 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ρωγμή $c=24\text{mm}/c_w=4.9\text{mm}$

Τα ισοδύναμα πλάτη για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.40 και 7.41. Όπως παρατηρούμε με τη διαφοροποίηση της μορφής παραμόρφωσης U3 από τη μορφή των αρχικών ατελειών, αλλάζει η κατανομή του φορτίου στα δύο (2) τμήματα της πλάκας, με το τμήμα $y=0$ έως $y=b/2-t_w$ να αναλαμβάνει το κύριο έργο στην περιοχή μετά το σημείο μέγιστης αντοχής.

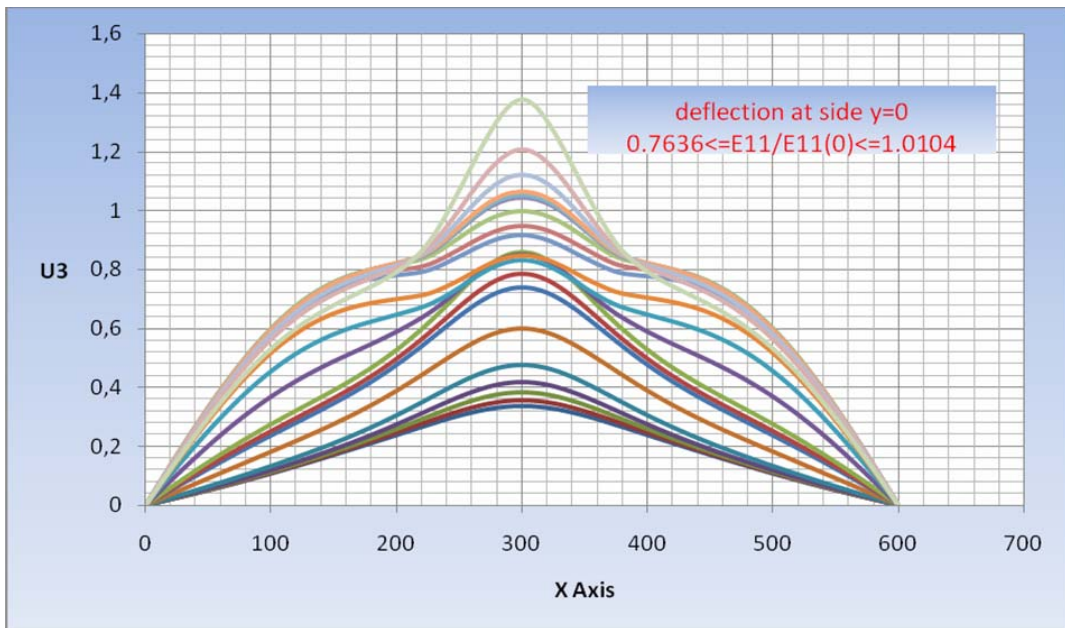


Σχήμα 7.40 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή συμμετρική $c=24mm/c_w=4.9mm$

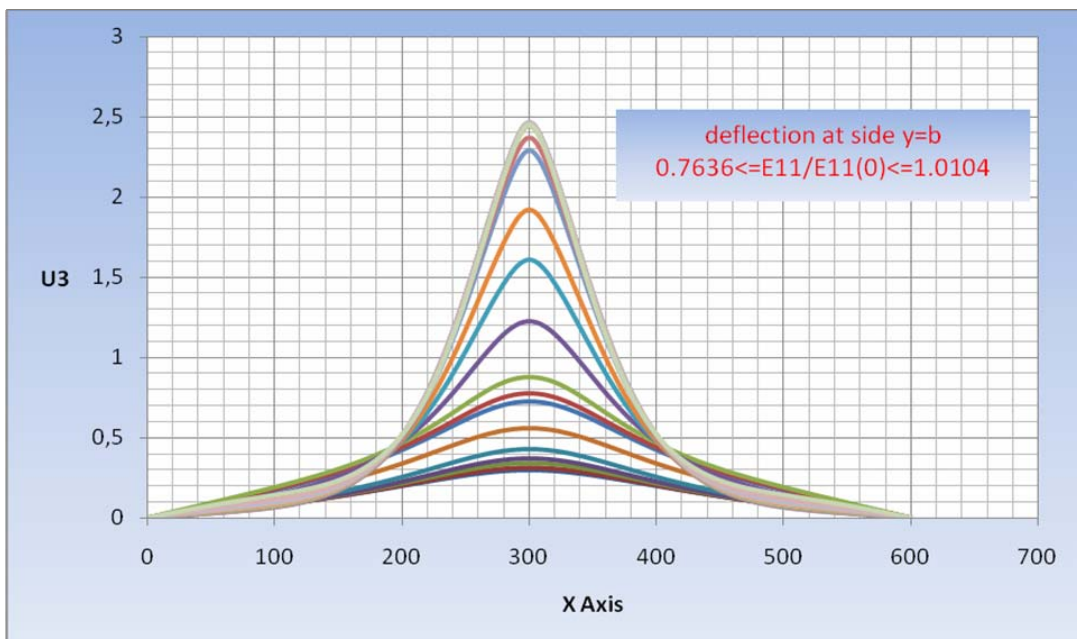


Σχήμα 7.41 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας

Όσον αφορά τη διακύμανση των βελών κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές της πλάκας, αυτή απεικονίζεται στα Σχήματα 7.42 και 7.43. Όπως παρατηρούμε υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση στην εν λόγω μεταβλητή σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό (σχήματα 7.26 και 7.27). Η παραμόρφωση στα δύο τμήματα της πλάκας είναι τώρα ταυτόσημη, όπως στην περίπτωση για μήκος ρωγμής $c=48\text{mm}$, αλλά επιπρόσθετα υπάρχει σημαντική διαφορά στην παραμόρφωση U_3 και μεταξύ των δύο (2) πλευρών τόσο στις τιμές όσο και στη μορφή.

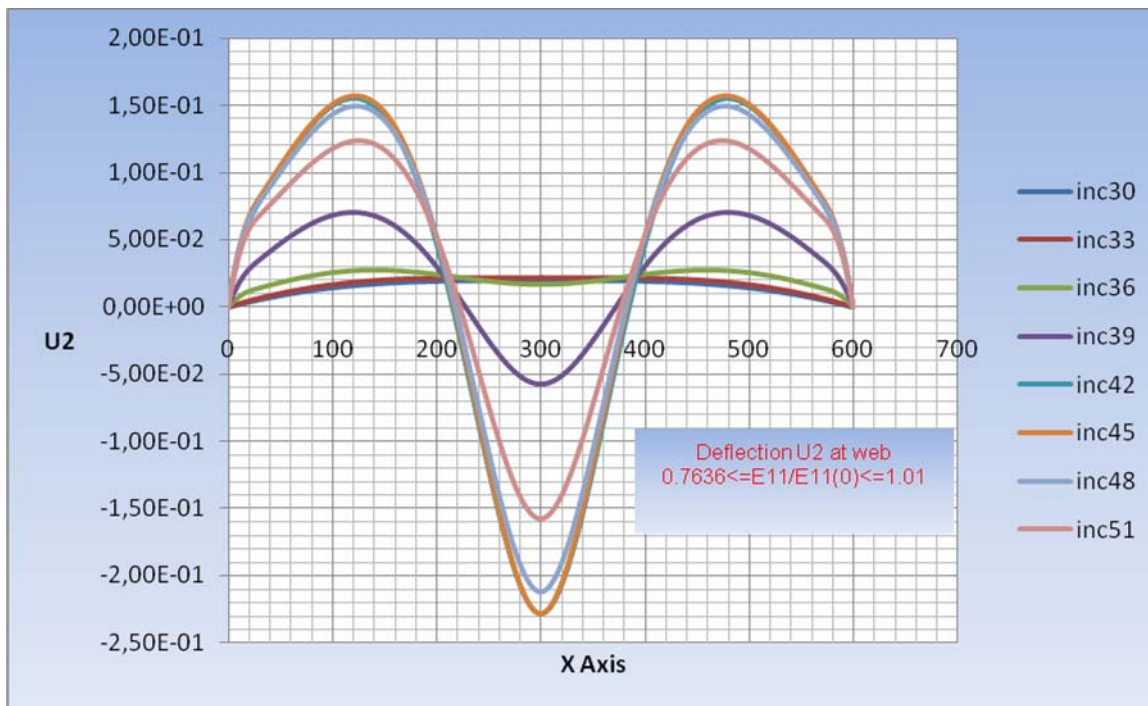


Σχήμα 7.42 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης



Σχήμα 7.43 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης

Το βέλος κάμψης U_2 στο ενισχυτικό παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.44. Επιπρόσθετα στο σχήμα 7.45 απεικονίζεται το διάστημα πλάτυνσης του εν λόγω μοντέλου σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό.



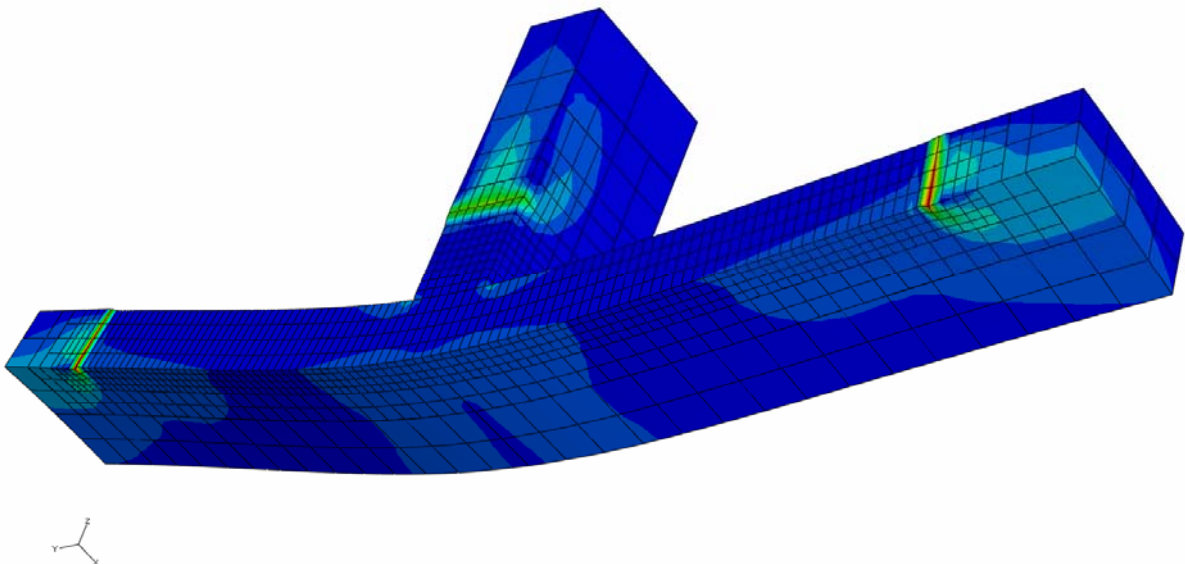
Σχήμα 7.44 Διακύμανση U_2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης



Σχήμα 7.45 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ρωγμή $c=24mm$ και $c_w=4.9mm$

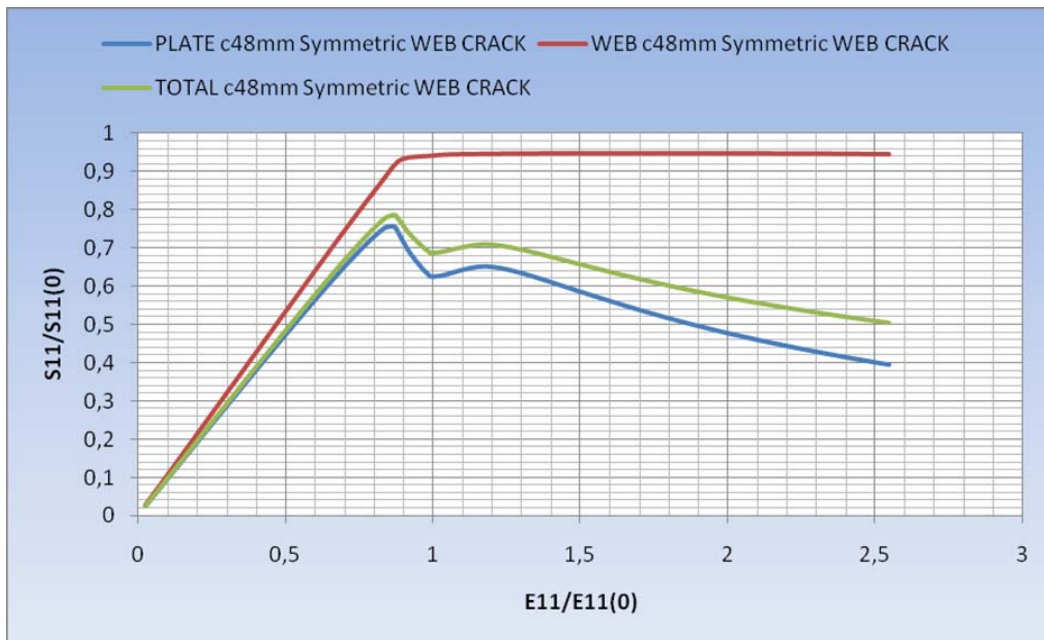
7.6 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με συμμετρική ρωγμή $c=48\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 23080 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8325\text{mm}$ στη λεπτομέρεια της ρωγμής και $4\text{mm} \times 4.125\text{mm} \times 1.665\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ αντίστοιχα οι διαστάσεις στη ρωγμή του ενισχυτικού είναι $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.5103\text{mm}$ και στο κυρίως τμήμα αυτού $4\text{mm} \times 2.04125\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Στο Σχήμα 7.46 απεικονίζεται η κατάσταση της πλαστικής ροής στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης.



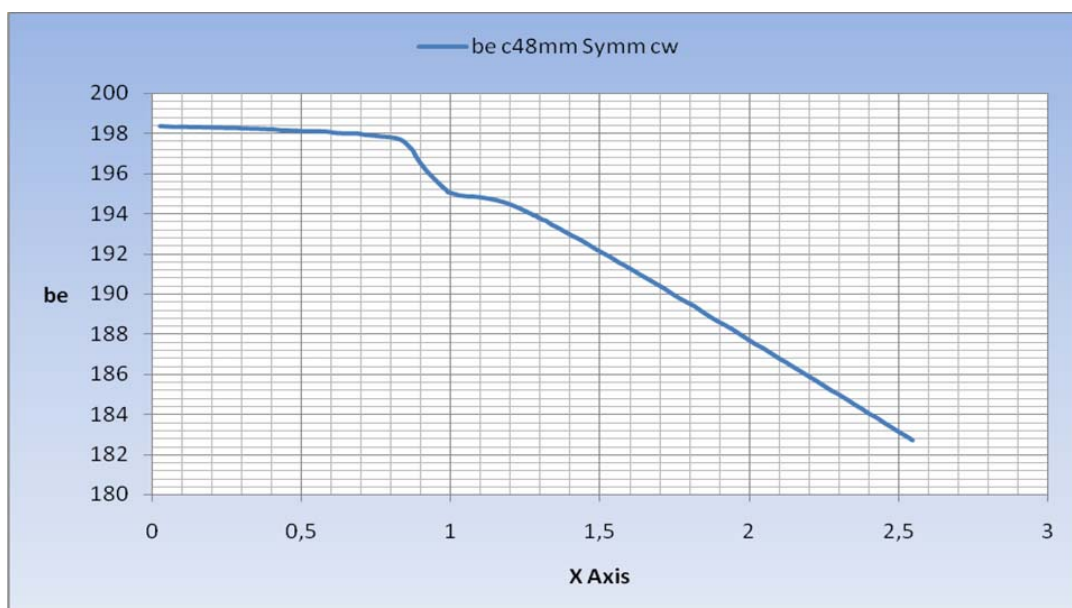
Σχήμα 7.46 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης στο εν λόγω μοντέλο απεικονίζονται στο Σχήμα 7.47. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η έναρξη επαφής των επιφανειών της ρωγμής συμβαίνει σε μικρότερο φορτίο συμπίεσης σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση για μήκος ρωγμής $c=24\text{mm}$. Επιπρόσθετα η επαφή της ρωγμής προσφέρει στο ενισχυμένο έλασμα μια μικρή ανάκαμψη της ακαμψίας αυτού στην περιοχή κατάρρευσης, φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στο μοντέλο ίδιου μήκους ρωγμής άνευ ασυνέχειας στο ενισχυτικό. Εκτιμάται λοιπόν, ότι για λόγο μήκους ρωγμής προς πλάτος $c/b > 0.12$ η επαφή των επιφανειών αυτής προσφέρει στο ενισχυμένο έλασμα μια μικρή αύξηση της ακαμψίας.

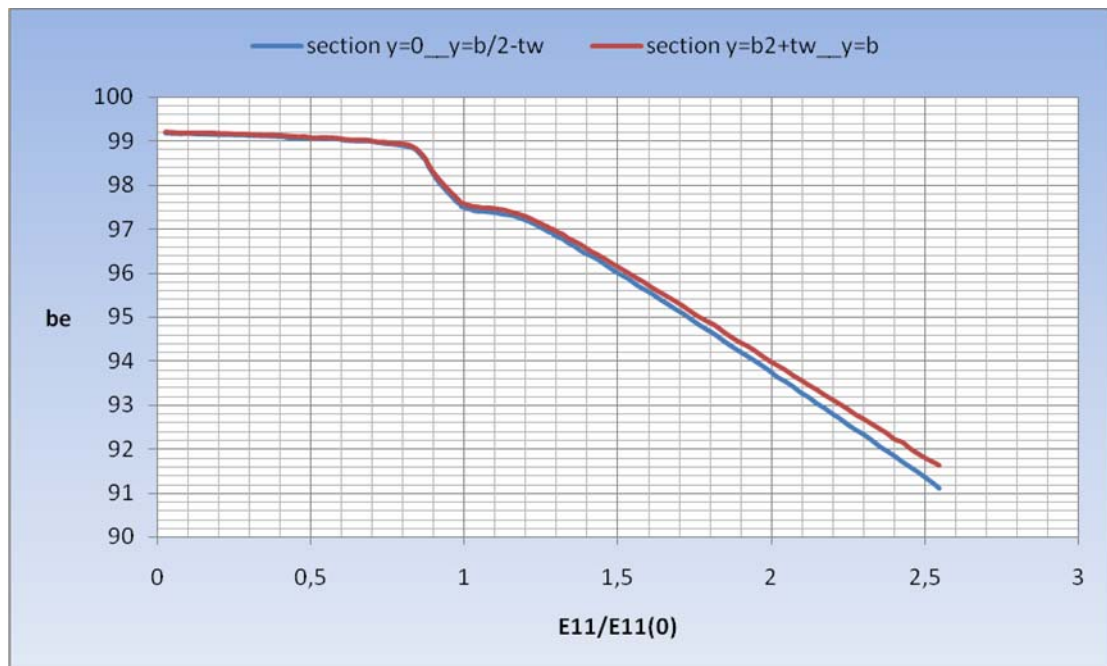


Σχήμα 7.47 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ρωγμή $c=48\text{mm}/c_w=4.9\text{mm}$

Τα ισοδύναμα πλάτη για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.48 και 7.49. Όπως παρατηρούμε η πτώση του εν λόγω μεγέθους χωρίζεται σε δύο (2) στάδια, ένα που οφείλεται στο σταδιακό λυγισμό της πλάκας και την επακόλουθη αύξηση της κάθετης παραμόρφωσης και στο δεύτερο που βρίσκεται στην περιοχή κατάρρευσης, μετά την επαφή των επιφανειών της ευρύτερης ρωγμής (πλάκας – ενισχυτικού). Επιπρόσθετα αξιοσημείωτη είναι η ισοκατανομή στο φορτίο στα δύο (2) τμήματα της πλάκας.

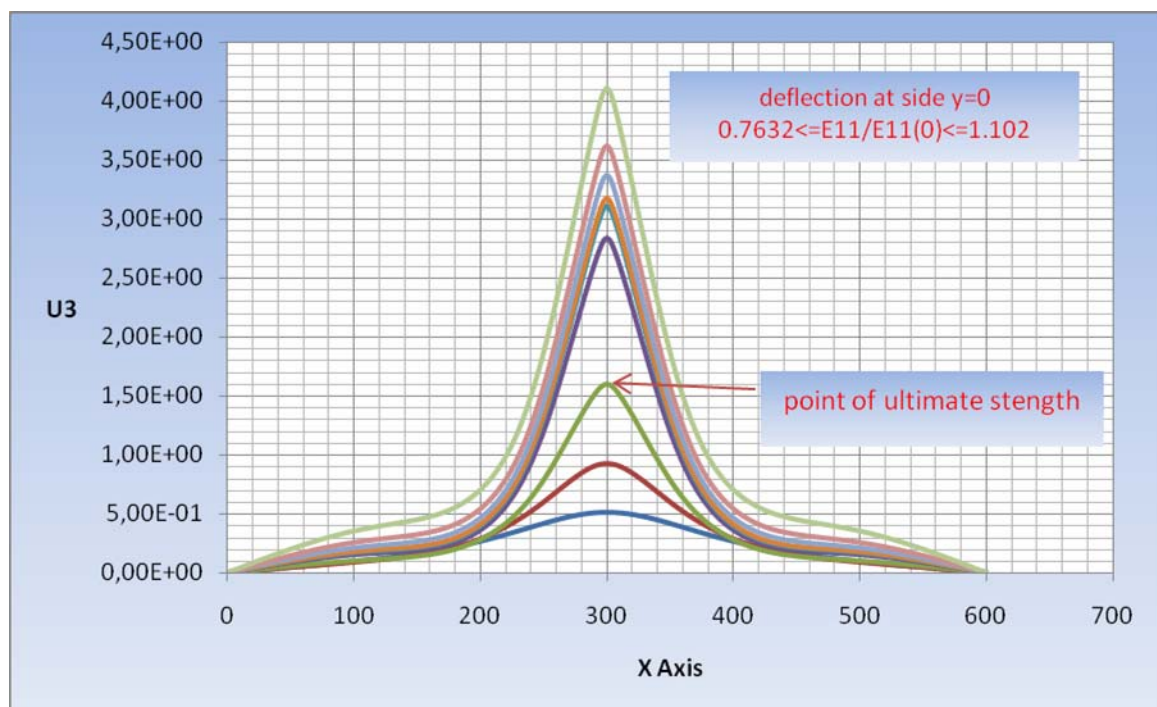


Σχήμα 7.48 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή συμμετρική $c=48\text{mm}/c_w=4.9\text{mm}$

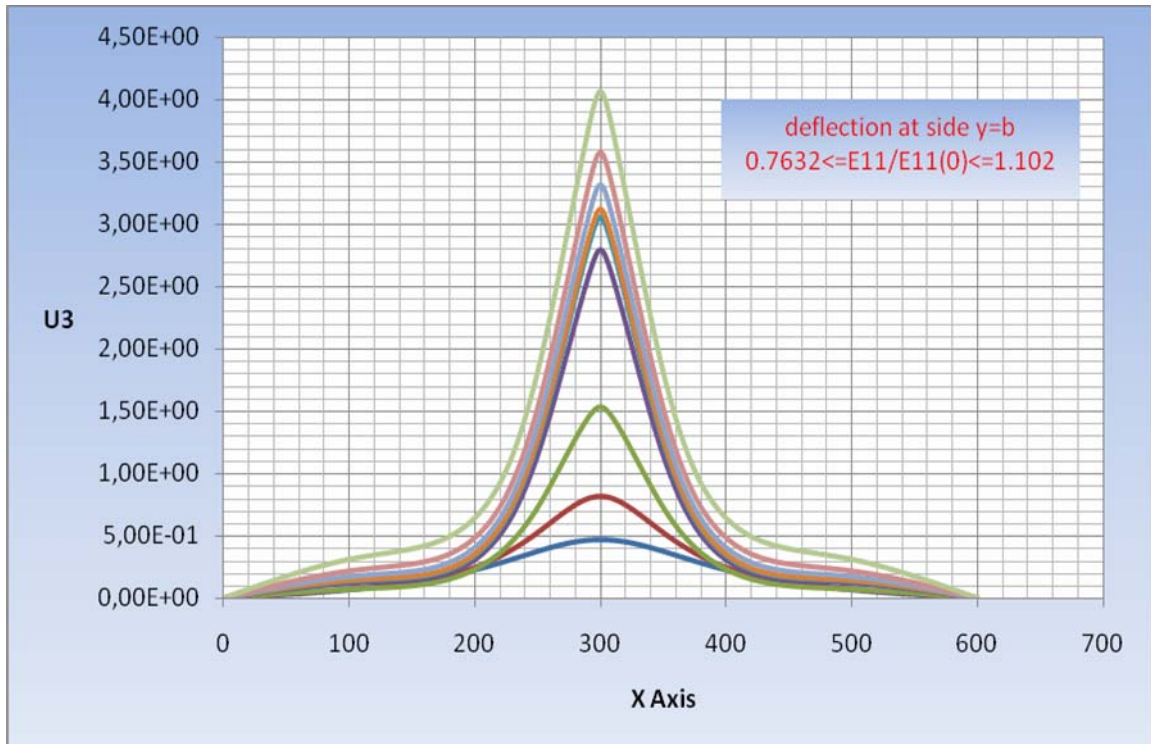


Σχήμα 7.49 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας

Όσον αφορά τη διακύμανση των βελών κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές της πλάκας, αυτή απεικονίζεται στα Σχήματα 7.50 και 7.51. Στα εν λόγω σχήματα παρατηρούμε την σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά του μεγέθους U_3 στα δύο (2) τμήματα της πλάκας, όπως στην αντίστοιχη περίπτωση χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό.

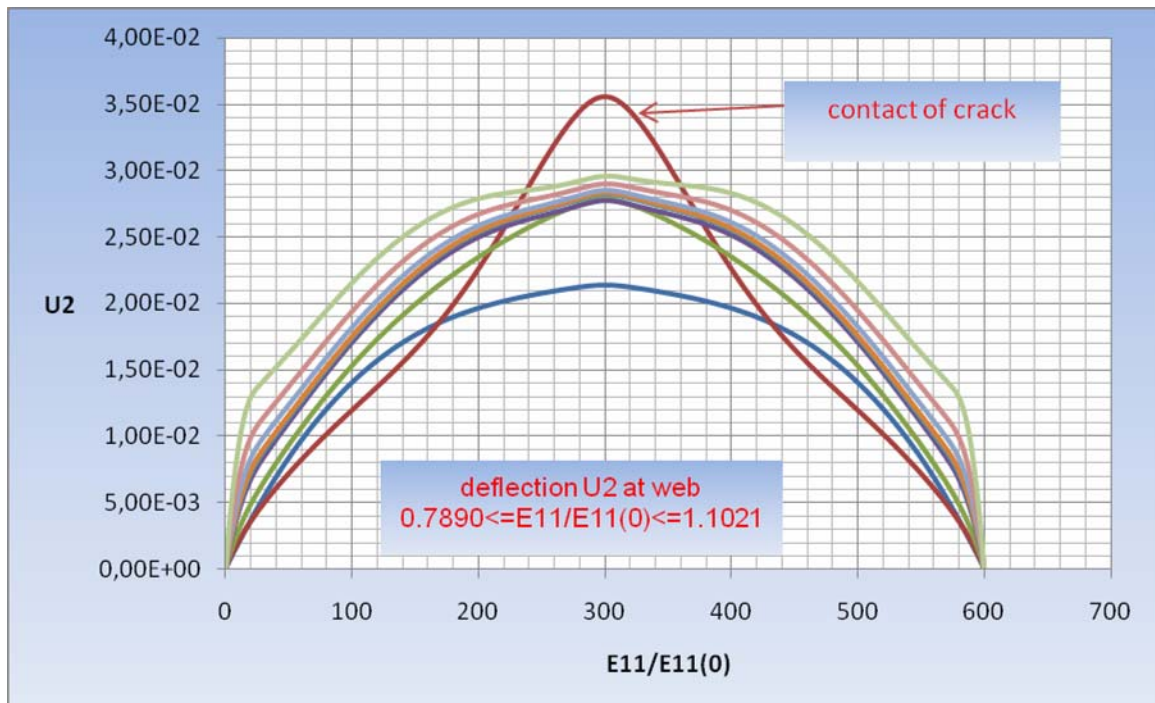


Σχήμα 7.50 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης



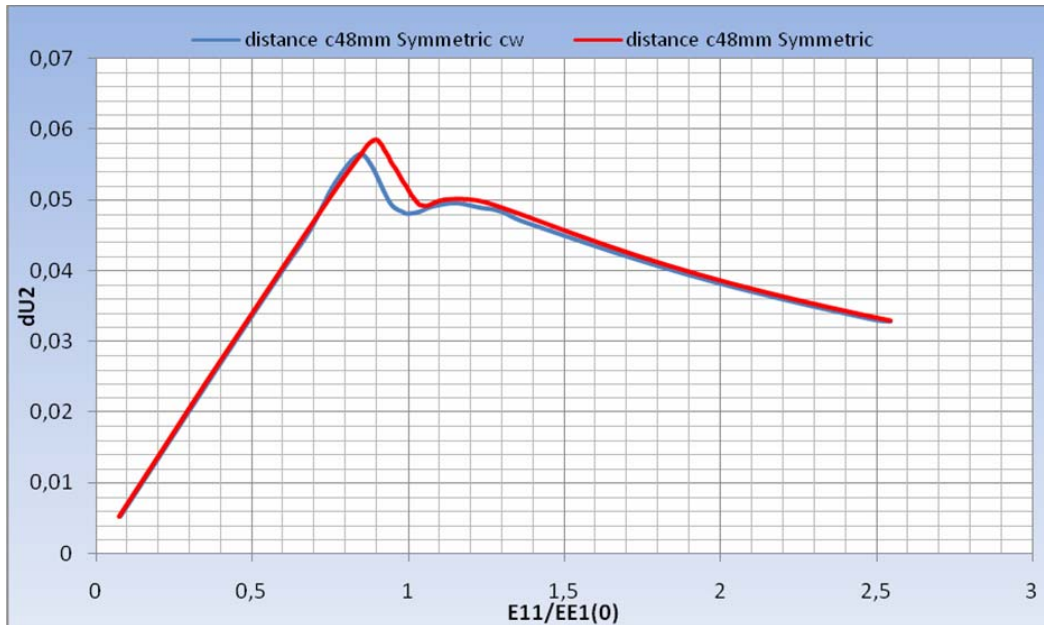
Σχήμα 7.51 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $\gamma=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης

Το βέλος κάμψης U_2 του ενισχυτικού παρουσιάζεται στο σχήμα 7.52, όπου παρατηρούμε τη διαφοροποίηση αυτού με την επαφή των επιφανειών της ρωγμής.



Σχήμα 7.52 Διακύμανση U_2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης

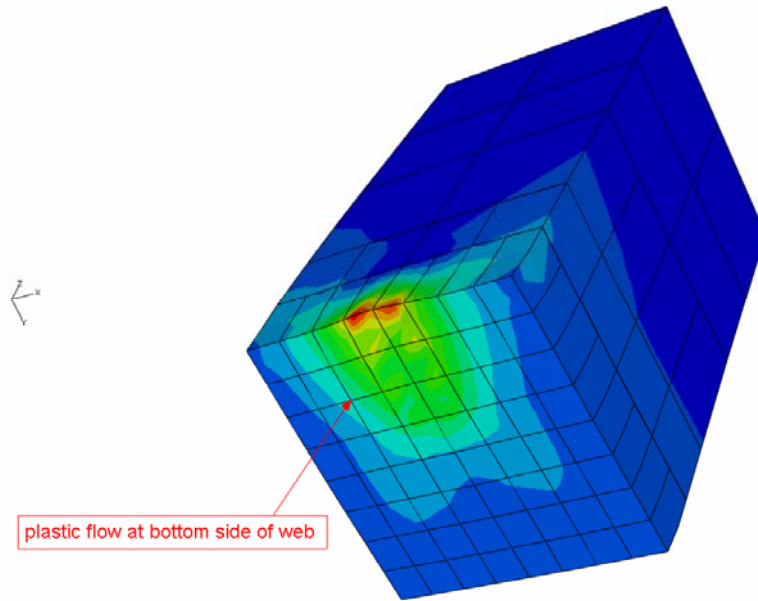
Στο ακόλουθο σχήμα 7.53 απεικονίζεται το διάστημα πλάτυνσης του εν λόγω μοντέλου σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό. Όπως παρατηρούμε η διαφοροποίηση στο εν λόγω μέγεθος εντοπίζεται στην περιοχή μεταξύ της απότομης αύξησης της κάθετης μετατόπισης στην πλάκα και την έναρξη επαφής των επιφανειών της ρωγμής.



Σχήμα 7.53 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ρωγή $c=48mm$ και $c_w=4.9mm$

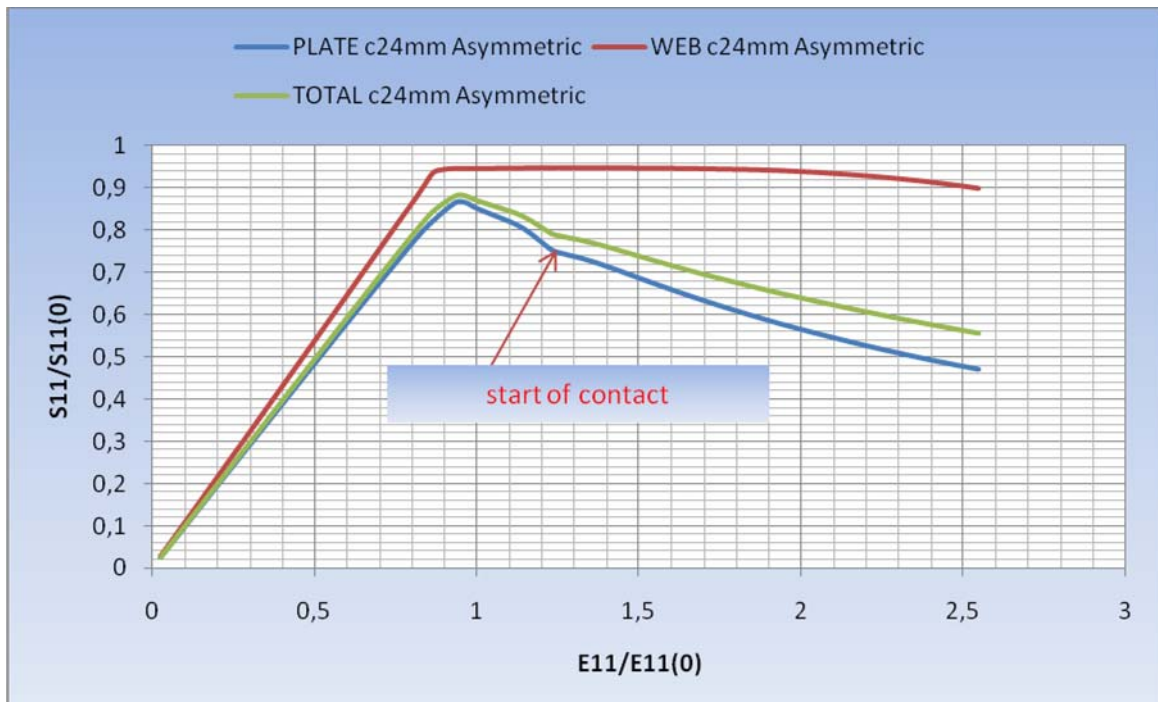
7.7 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με ασύμμετρη ρωγή $c=24mm$ στην πλάκα από $y=76mm$ έως $y=100mm$.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 20616 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $0.35mm \times 0.49mm \times 0.8325mm$ στη λεπτομέρεια της ρωγμής και $4mm \times 4.133mm \times 1.665mm$ στην κυρίως πλάκα, ενώ αντίστοιχα οι διαστάσεις στο ενισχυτικό είναι $4mm \times 2.04125mm \times 4.0825mm$. Στο Σχήμα 7.54 που ακολουθεί απεικονίζεται η πλαστική ροή στο τμήμα του ενισχυτικού που βρίσκεται σε επαφή με τη ρωγή.



Σχήμα 7.54 Πλαστική ροή στο ενισχυτικό άνωθεν της ρωγμής στο τέλος συμπίεσης

Οι μειωτικές καμπύλες του εν λόγω ενισχυμένου ελάσματος απεικονίζονται στο ακόλουθο Σχήμα 7.55. Παρατηρούμε εκ νέου ότι η επαφή των επιφανειών της ρωγμής επέρχεται σε στάδιο συμπίεσης που βρίσκεται στην περιοχή της κατάρρευσης και αρκετά μετά το σημείο μέγιστης αντοχής.

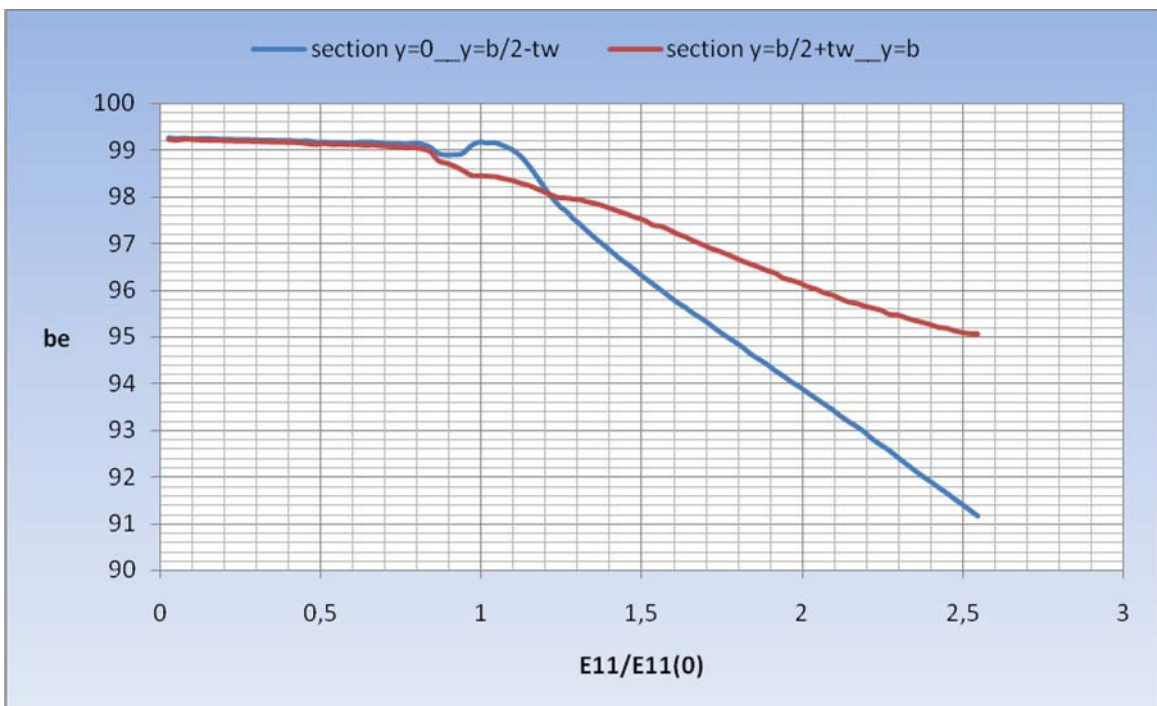


Σχήμα 7.55 Μειωτικές καμπύλες πλάκας με ασύμμετρη ρωγμή c=24mm

Τα ισοδύναμα πλάτη για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.56 και 7.57. Όπως παρατηρούμε, ενώ με το λυγισμό οδηγείται το φορτίο προς το τμήμα από $y=b/2+t_w$ έως $y=b$, με την επαφή της ρωγμής η κατανομή του φορτίου ρέπει προς το τμήμα που φέρει τη ρωγμή μέχρι την ολική κατάρρευση.

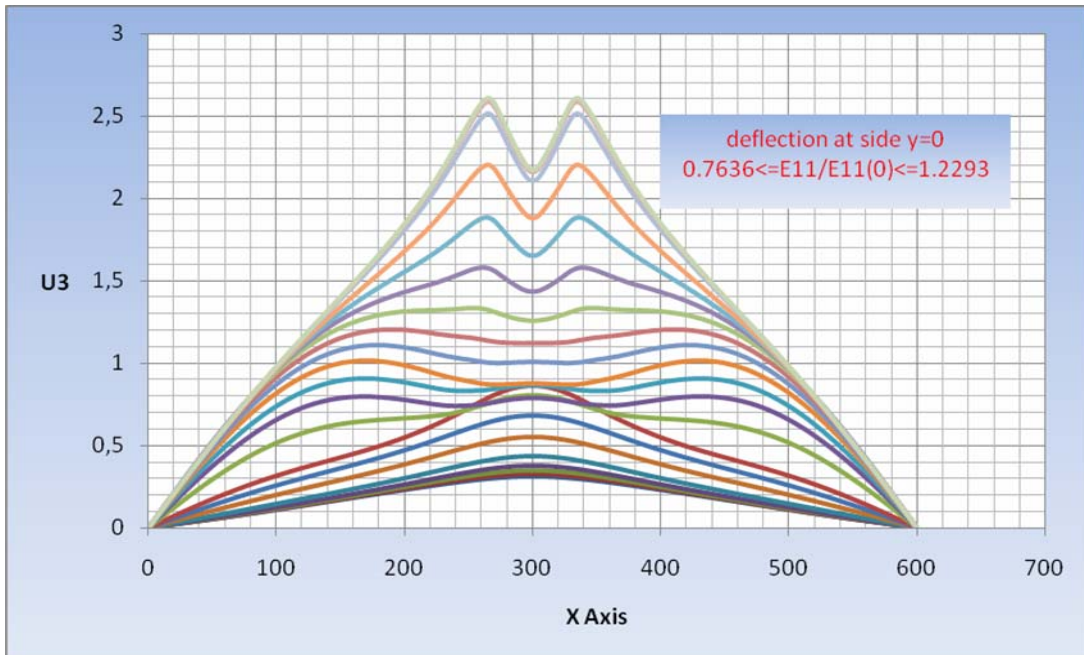


Σχήμα 7.56 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή ασύμμετρη $c=24mm$

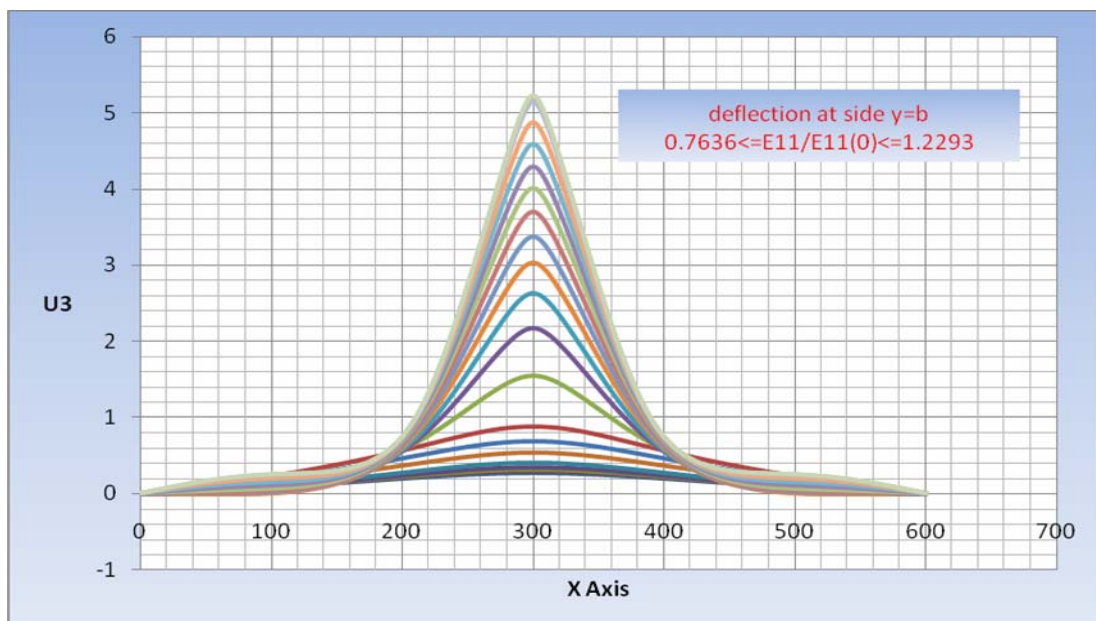


Σχήμα 7.57 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας

Οι διακυμάνσεις των βελών κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές της πλάκας παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.58 και 7.59 σε διαδοχικά στάδια φόρτισης. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε η ασύμμετρη ρωγμή αλλάζει πλήρως τη μορφή παραμόρφωσης της πλάκας. Συγκεκριμένα μετά το σημείο μέγιστης αντοχής, το τμήμα που φέρει τη ρωγμή οδηγείται σε παραμόρφωση δύο (2) ημικυμάτων με άξονα συμμετρίας τη θέση της ρωγμής, ενώ το άλλο τμήμα της πλάκας παραμορφώνεται προσεγγίζοντας ένα (1) κεντρικό ημικύμα.

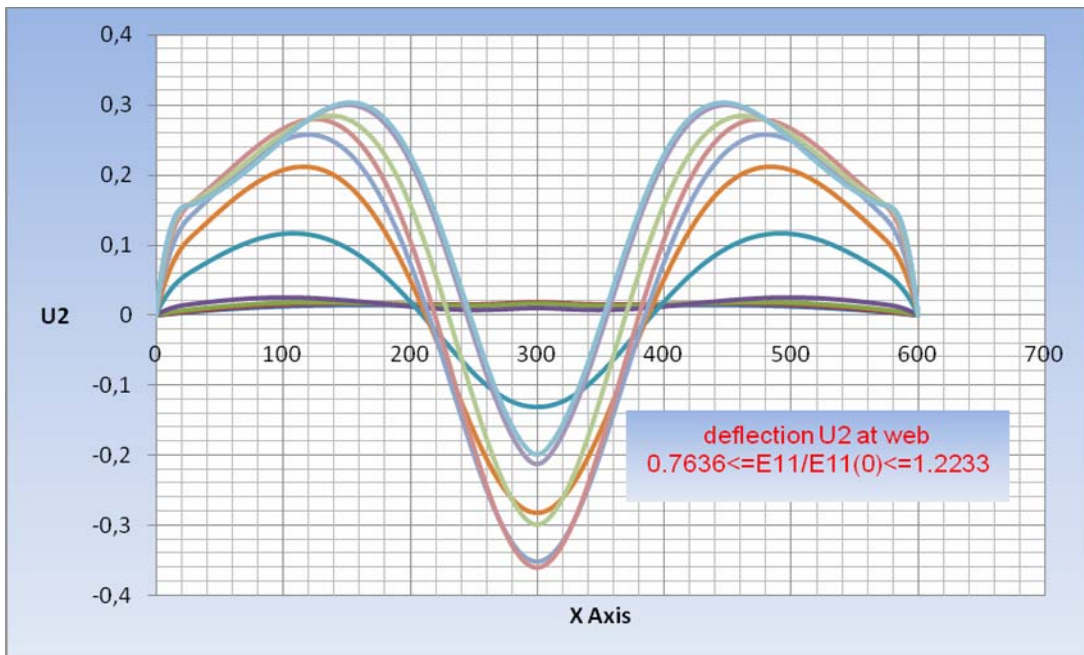


Σχήμα 7.58 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $\gamma=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης

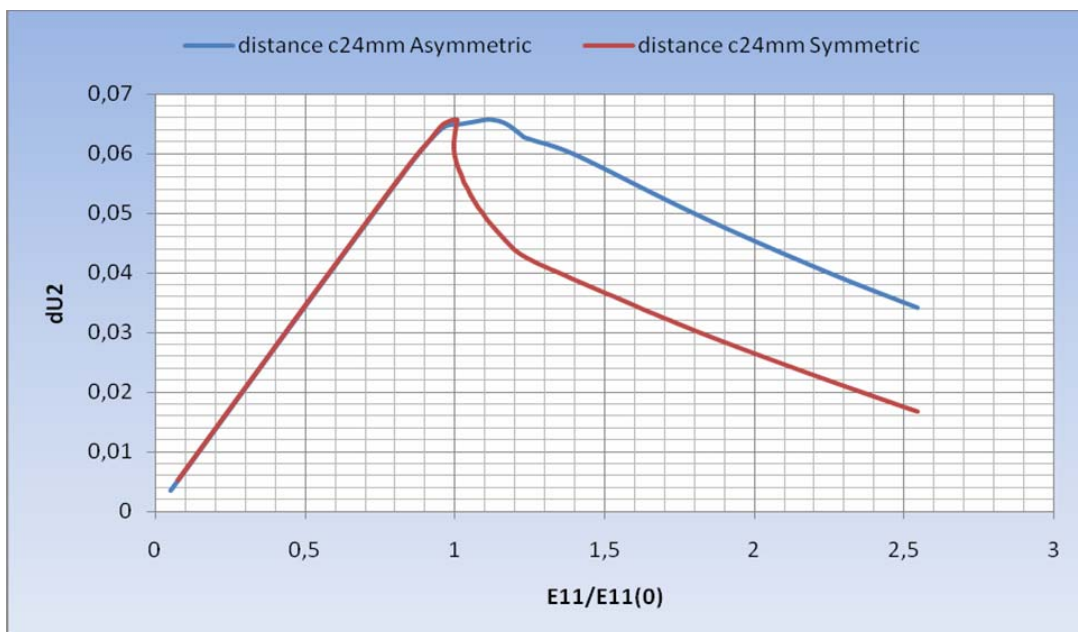


Σχήμα 7.59 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $\gamma=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης

Το βέλος κάμψης του ενισχυτικού U2 για το ίδιο φορτίο συμπίεσης με τα προηγούμενα σχήματα, απεικονίζεται στο Σχήμα 7.60. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αλλαγή στη διεύθυνση της παραμόρφωσης U2, συμπίπτει με το σημείο μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος. Επιπρόσθετα στο Σχήμα 7.61 παρουσιάζεται το διάστημα πλάτυνσης του εν λόγω μοντέλου σε σύγκριση με την περίπτωση συμμετρικής ρωγμής. Όπως διαπιστώνουμε μετά το σημείο μέγιστης αντοχής, η ασύμμετρη ρωγή συγκρατεί το μοντέλο σε μεγαλύτερες τιμές του εν λόγω μεγέθους από την περίπτωση της αντίστοιχης συμμετρικής στην πλάκα.



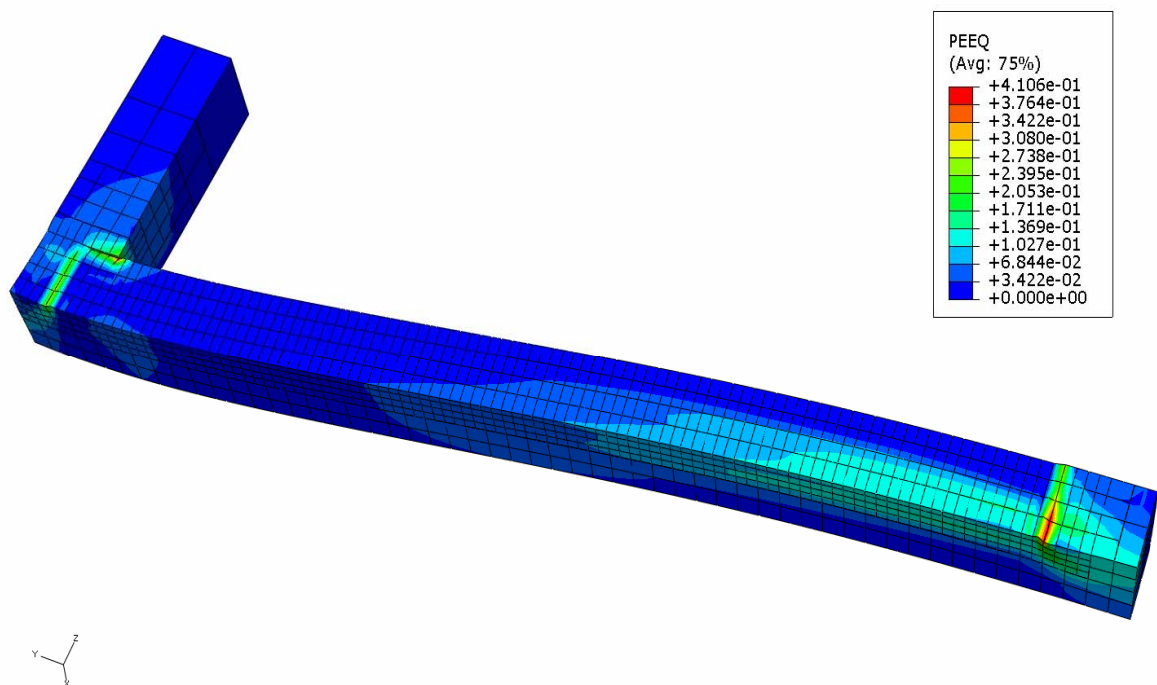
Σχήμα 7.60 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης



Σχήμα 7.61 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ασύμμετρη ρωγή c=24mm

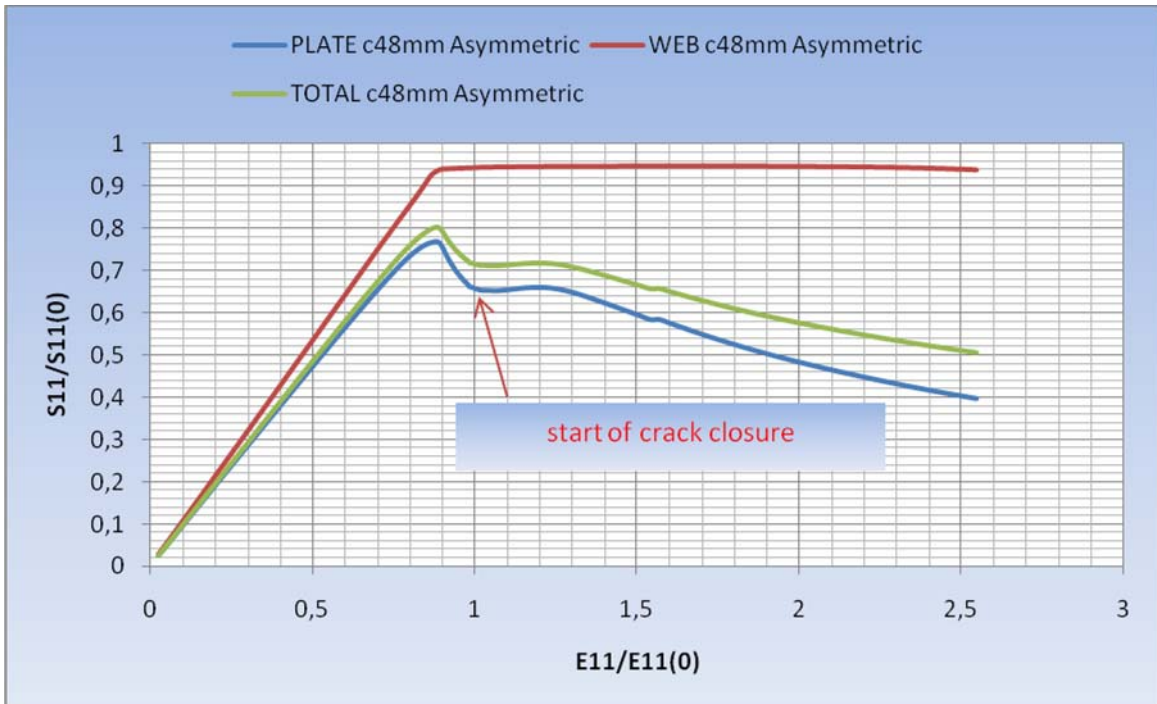
7.8 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ στην πλάκα από $y=76\text{mm}$ έως $y=100\text{mm}$.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 22384 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8325\text{mm}$ στη λεπτομέρεια της ρωγμής και $4\text{mm} \times 4.2\text{mm} \times 1.665\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ αντίστοιχα οι διαστάσεις στο ενισχυτικό είναι $4\text{mm} \times 2.04125\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Στο Σχήμα 7.62 απεικονίζεται η πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της συμπίεσης. Όπως διαπιστώνουμε, η πλαστικοποίηση συσσωρεύεται στο άκρο της ρωγμής προς την αφόρτιστη πλευρά σε όλη την έκταση του πάχους της πλάκας.



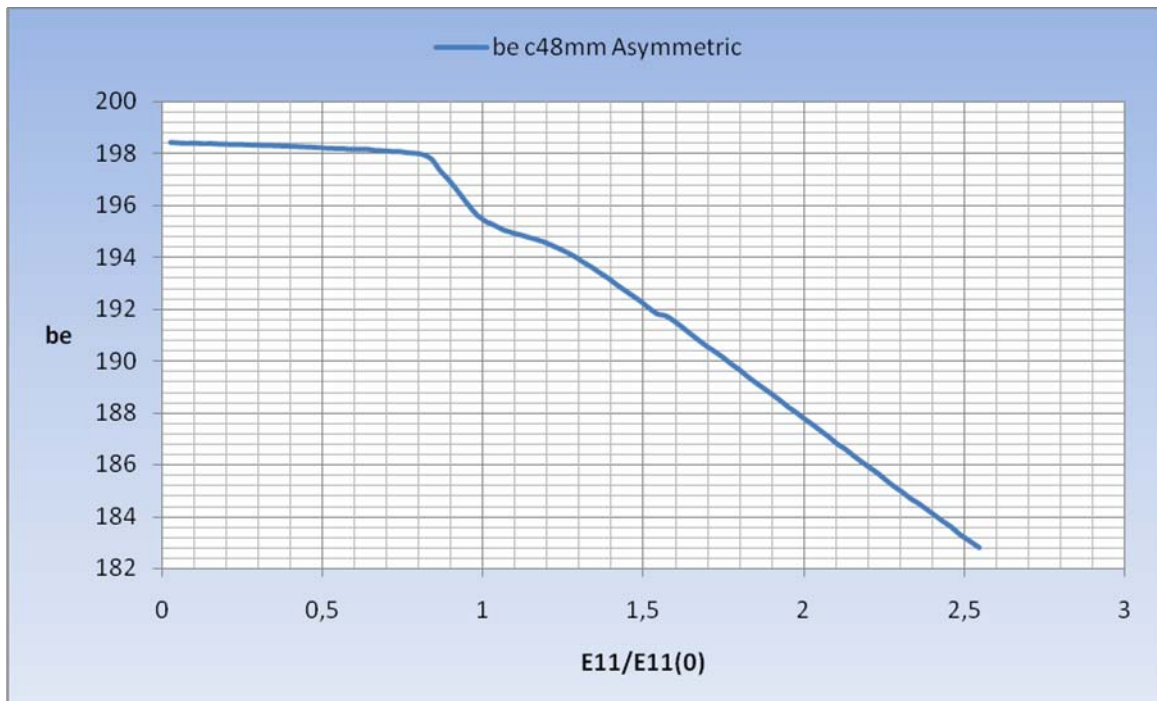
Σχήμα 7.62 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης

Οι μειωτικές καμπύλες του εξεταζόμενου ενισχυμένου ελάσματος απεικονίζονται στο Σχήμα 7.63. Στις εν λόγω γραφικές παραστάσεις διαπιστώνουμε εκ νέου, ότι η έναρξη επαφής των επιφανειών της ρωγμής έπεται του σημείου μέγιστης αντοχής. Επιπρόσθετα, η επαφή της ρωγμής προσδίδει στο ενισχυμένο έλασμα μια ανάκαμψη της ακαμψίας αυτού, στα στάδια συμπίεσης κατά τα οποία έχει ήδη ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός κατάρρευσης.

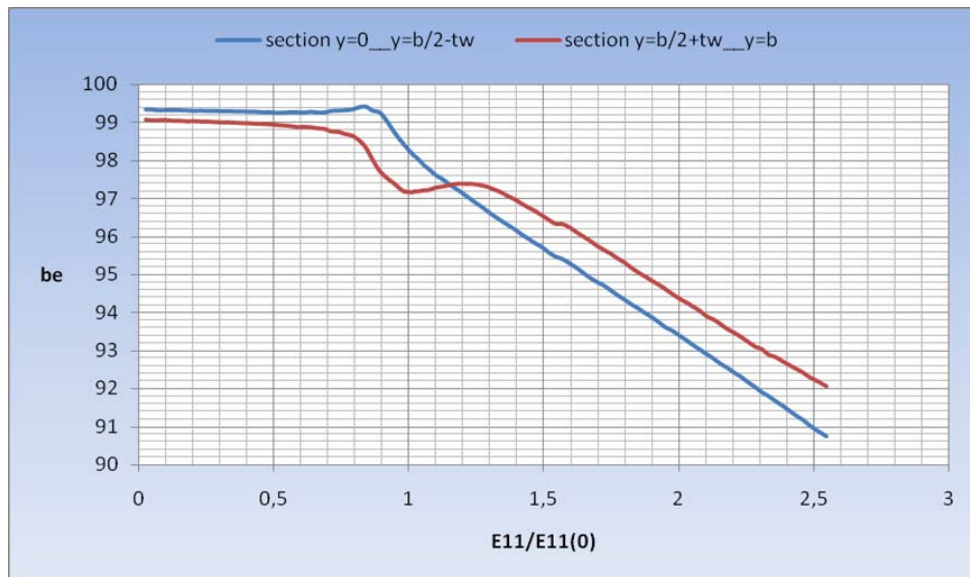


Σχήμα 7.63 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ασύμμετρη ρωγμή $c=48mm$

Τα ισοδύναμα πλάτη για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.64 και 7.65. Θα πρέπει να σημειωθεί η καθολική πτώση του εν λόγω μεγέθους, καθώς και η εναλλαγή στην κατανομή του φορτίου.

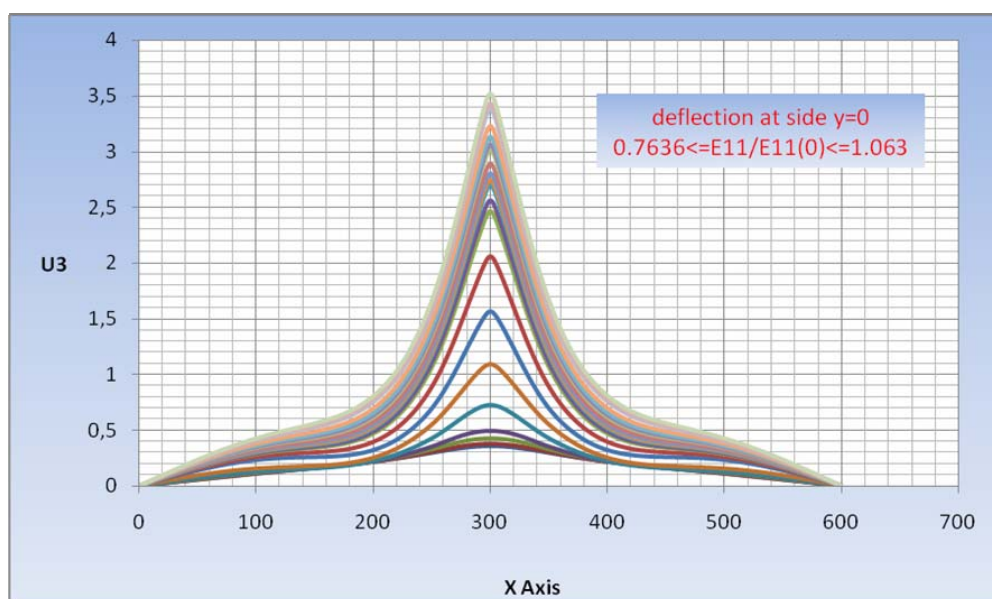


Σχήμα 7.64 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή ασύμμετρη $c=48mm$

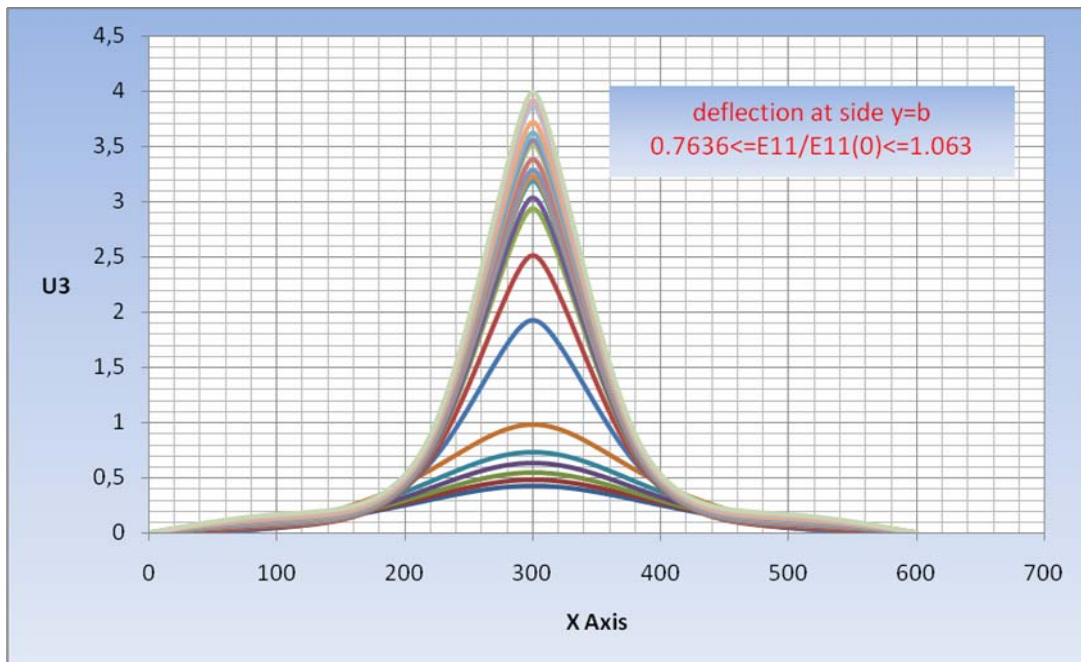


Σχήμα 7.65 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας

Όσον αφορά τα βέλη κάμψης U_3 των αφόρτιστων πλευρών της πλάκας σε διαδοχικά στάδια συμπίεσης απεικονίζονται στα Σχήματα 7.66 ($\gamma=0$) και 7.67 ($\gamma=b$). Στη εξεταζόμενη περίπτωση διαπιστώνουμε ότι με την αύξηση του μήκους της ρωγμής η παραμόρφωση του ενισχυμένου ελάσματος οδηγείται σε διαφορετικό «μονοπάτι» ισορροπίας. Πιο συγκεκριμένα, τα δύο (2) τμήματα της πλάκας συγκλίνουν σε παραπλήσιες ταυτόσημες παραμορφώσεις (όπως για τη συμμετρική $c=48\text{mm}$), με τη διαφορά ότι το τμήμα που δε φέρει τη ρωγμή παρουσιάζει, αφενός δραστική αύξηση στο βέλος κάμψης με την αύξηση της συμπίεσης μετά το σημείο μέγιστης αντοχής, αφετέρου εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης U_3 .

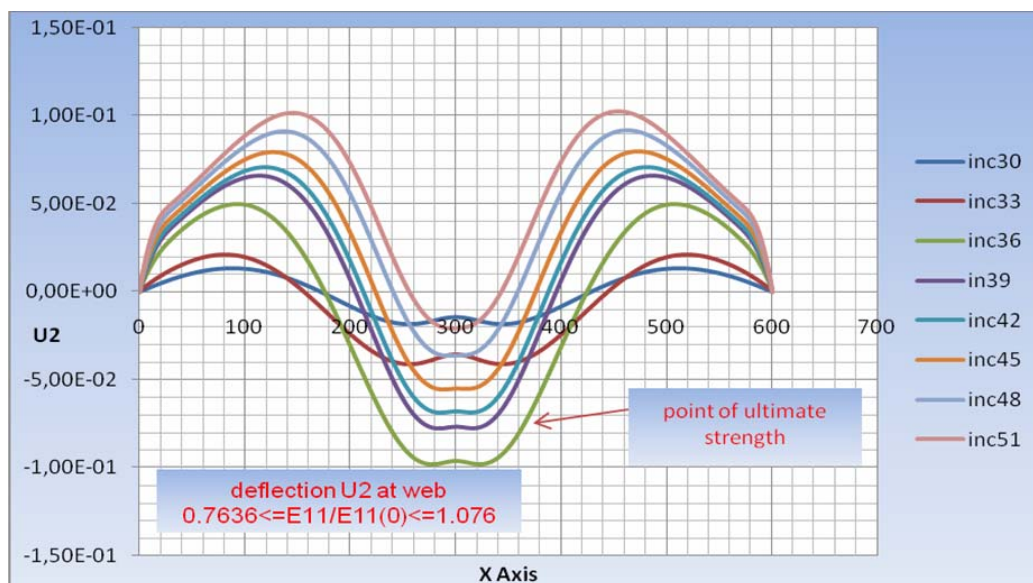


Σχήμα 7.66 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $\gamma=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης



Σχήμα 7.67 Διακύμανση U3 στην πλευρά y=b σε διαδοχικά στάδια φόρτισης

Το βέλος κάμψης του ενισχυτικού U2 για το ίδιο φορτίο συμπίεσης με τα προηγούμενα σχήματα, απεικονίζεται στο Σχήμα 7.68. Από την γραφική παράσταση του εν λόγω μεγέθους διαπιστώνουμε την έντονη αλλαγή στη μετατόπιση U2 που συντελείται για λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E11/E11(0)=0.8908$ και που συμπίπτει με το σημείο μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος. Επιπρόσθετα στην εν λόγω περίπτωση έχουμε τρία (3) σχηματοποιημένα ημικύματα στο ενισχυτικό σε αντίθεση με τις προηγούμενα εξετασθείσες περιπτώσεις



Σχήμα 7.68 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης

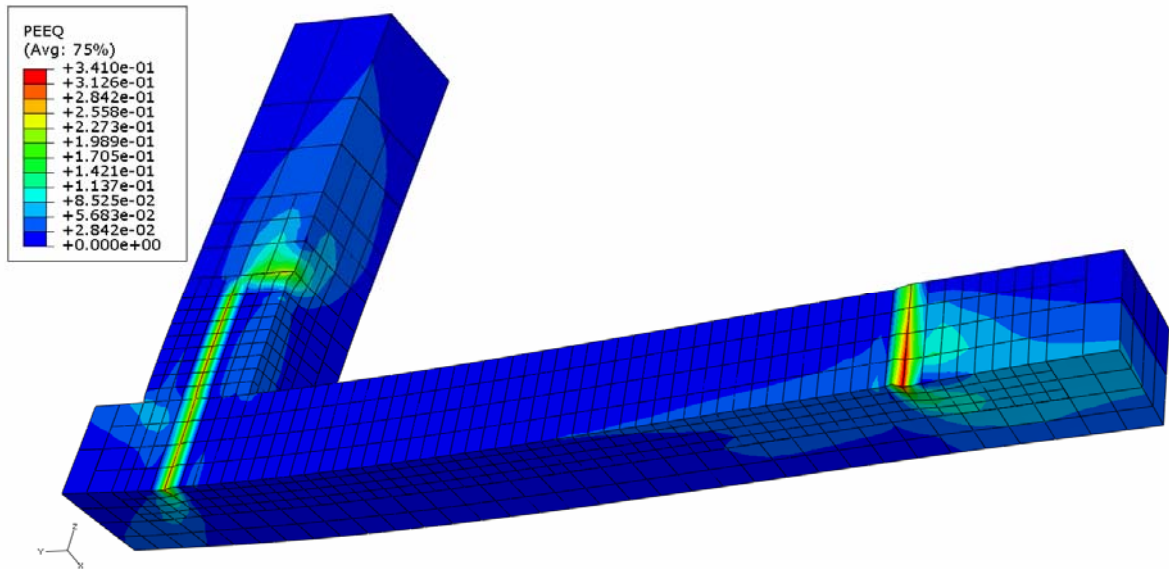
Το διάστημα πλάτυνσης του εξεταζόμενου μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.69 σε σύγκριση με την περίπτωση συμμετρικής ρωγμής ίδιου μήκους. Όπως διαπιστώνουμε οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται κυρίως στα σημεία μέγιστης αντοχής και στην περιοχή κατάρρευσης του ενισχυμένου ελάσματος. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως ότι στο συγκεκριμένο μήκος ρωγμής οι διαφορές εξομαλύνονται σε σύγκριση με την περίπτωση του σχήματος 7.61



Σχήμα 7.69 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ασύμμετρη ρωγμή $c=48mm$

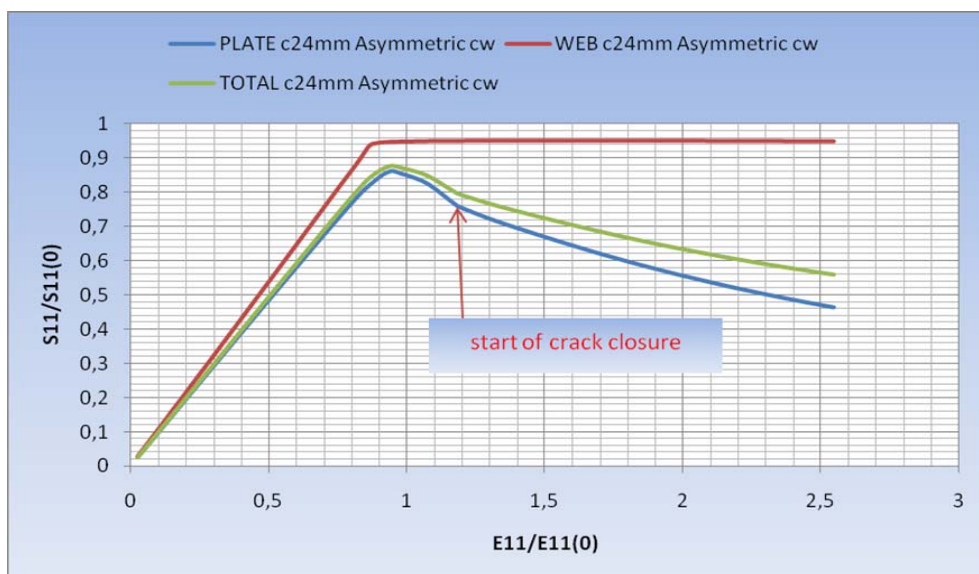
7.9 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=24mm$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9mm$ στο ενισχυτικό.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 21328 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $0.35mm \times 0.49mm \times 0.8325mm$ στη λεπτομέρεια της ρωγμής και $4mm \times 4.133mm \times 1.665mm$ στην κυρίως πλάκα, ενώ αντίστοιχα οι διαστάσεις στη ρωγμή του ενισχυτικού είναι $0.35mm \times 0.49mm \times 0.5103mm$ και στο κυρίως τμήμα αυτού $4mm \times 2.04125mm \times 4.0825mm$. Στο σχήμα 7.70 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατάσταση της πλαστικής ροής στο τέλος της συμπίεσης στη λεπτομέρεια της ρωγμής.



Σχήμα 7.70 Πλαστική ροή στη λεπτομέρεια της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης του εξεταζόμενου ενισχυμένου ελάσματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.71. Η παρατήρηση στην εν λόγω γραφική παράσταση είναι εκ νέου, το γεγονός ότι το ενισχυμένο έλασμα έχει μπει στη διαδικασία κατάρρευσης αρκετά πριν ξεκινήσει η επαφή των επιφανειών της ρωγμής. Συναφώς η επαφή της ρωγμής δεν προσφέρει καμία ανάκαμψη στην ακαμψία του μοντέλου και στο μόνο που συντελεί είναι η αλλαγή κλίσης στην καμπύλη κατάρρευσης που ερμηνεύεται ως μια μικρή επιβράδυνση της αστοχίας.

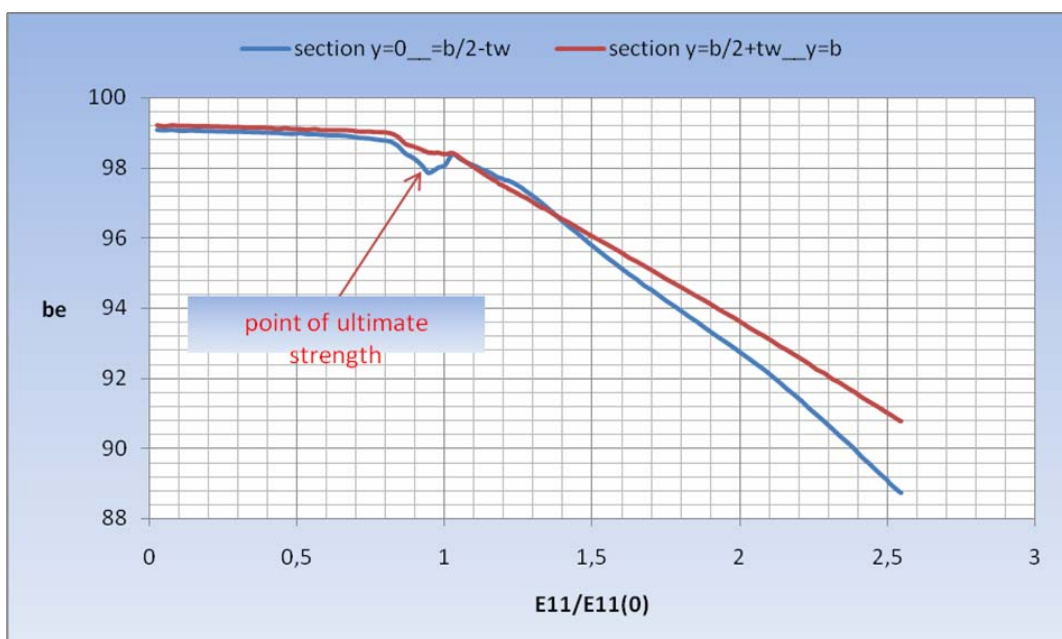


Σχήμα 7.71 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ασύμμετρη ρωγμή $c=24mm$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9mm$ στο ενισχυτικό.

Τα ισοδύναμα πλάτη για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.72 και 7.73. Στη γραφική παράσταση των ισοδυνάμων πλατών ανά τμήμα παρατηρούμε ότι το τμήμα που φέρει τη ρωγμή κρατάει μέρος της φόρτισης μειούμενου όμως, μέχρι του σημείου μέγιστης αντοχής (κάτω κοίλο κυανής καμπύλης). Στη συνέχεια όμως και με την προσέγγιση των επιφανειών της ρωγμής, παρατηρείται διαφοροποίηση στην κατανομή, με το ρωγμώδες τμήμα να παραλαμβάνει μεγαλύτερο φορτίο στην περιοχή κατάρρευσης.

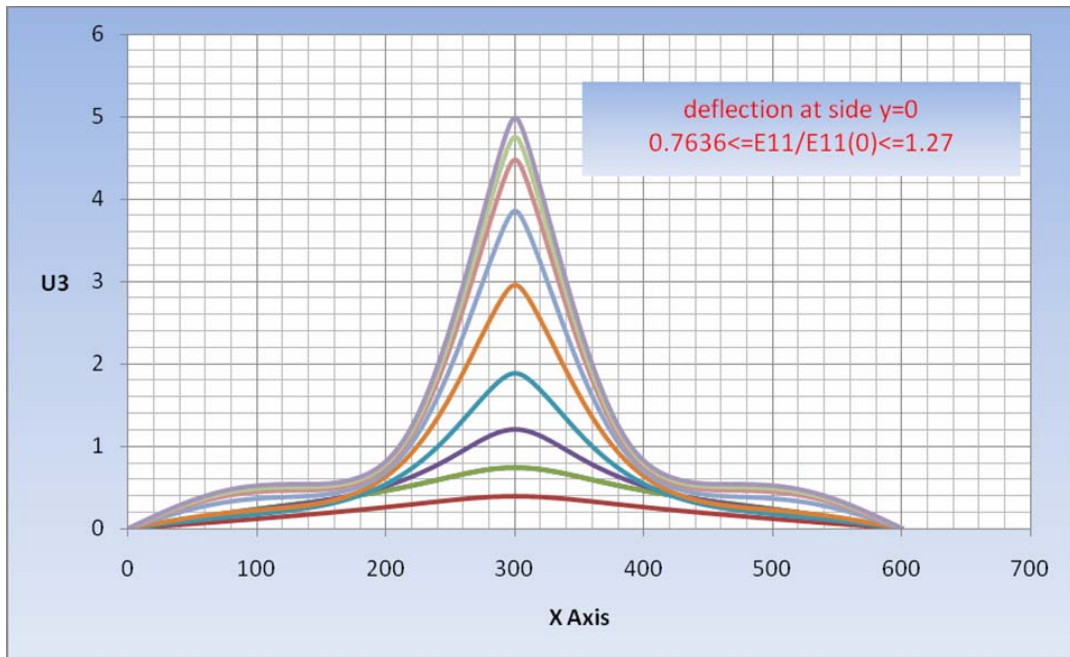


Σχήμα 7.72 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή ασύμμετρη $c=24mm$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9mm$ στο ενισχυτικό.

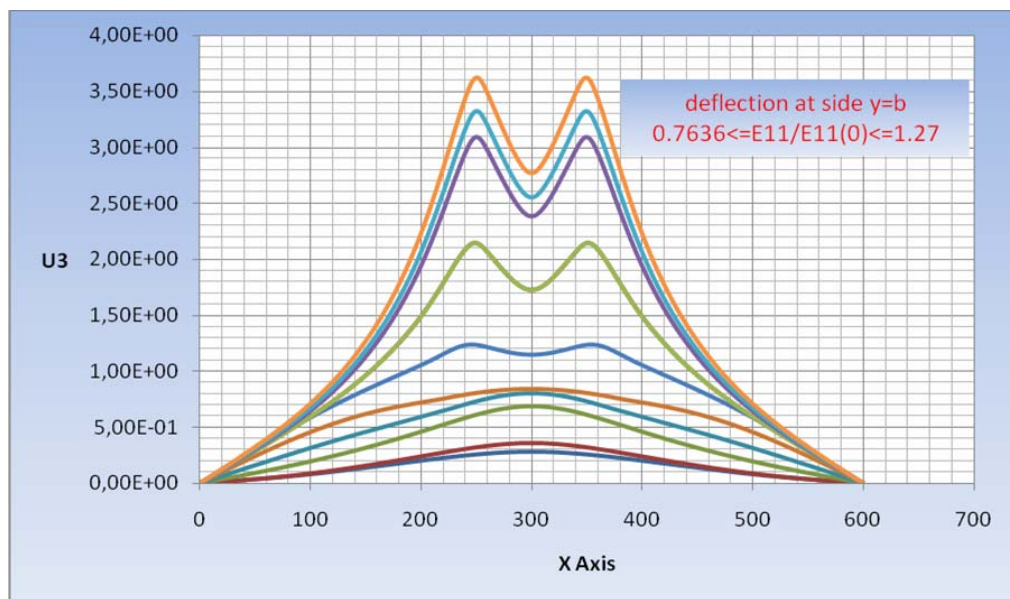


Σχήμα 7.73 Διακύμανση ισοδυνάμων πλατών στα τμήματα της πλάκας

Οι διακυμάνσεις των βελών κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές της πλάκας απεικονίζονται στο Σχήμα 7.74 ($y=0$) και 7.75 ($y=b$) σε διαδοχικά στάδια φόρτισης. Από τις εν λόγω γραφικές παραστάσεις διαπιστώνουμε ότι η αύξηση της ρωγμής στην πλάκα οδηγεί το τμήμα της πλάκας που δε φέρει τη ρωγμή σε παραμόρφωση δύο (2) ημικυμάτων που έχουν άξονα συμμετρίας την προέκταση της ρωγμής.

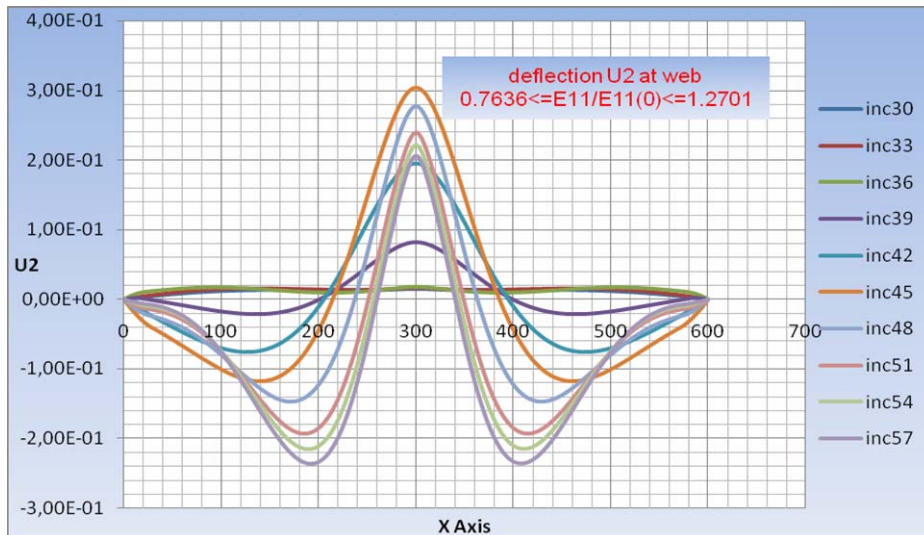


Σχήμα 7.74 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης



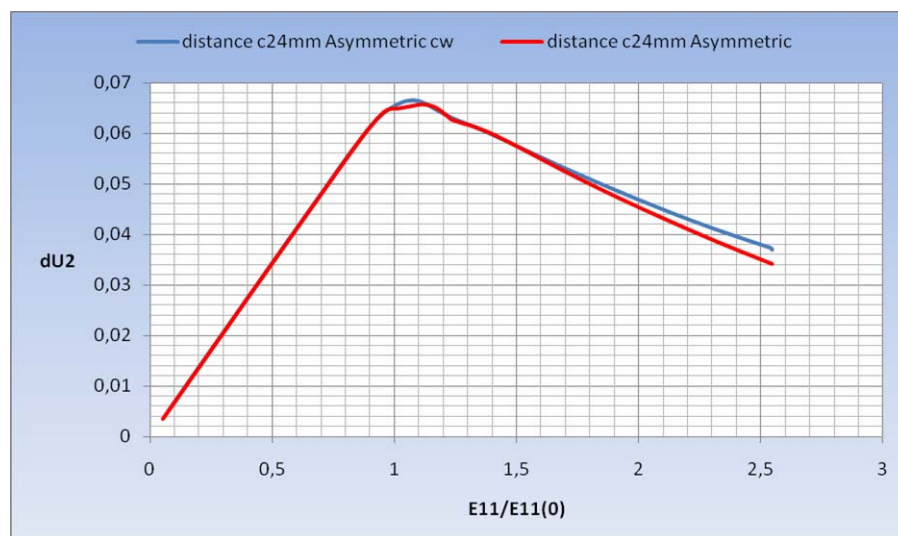
Σχήμα 7.75 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $y=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διακύμανση του βέλους κάμψης στο ενισχυτικό (Σχήμα 7.76), όπου παρατηρούμε ραγδαία αύξηση με το σχηματισμό κυμάτων μετά το σημείο μέγιστης αντοχής (inc 36 προς inc39 στο σχήμα), σταδιακή προσέγγιση μιας τιμής στο κοίλο της καμπύλης U2 και στη συνέχεια υποχώρηση των τιμών του άνω κοίλου προς όφελος του μεγέθους των δύο (2) κάτω κοίλων.



Σχήμα 7.76 Διακύμανση U2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης

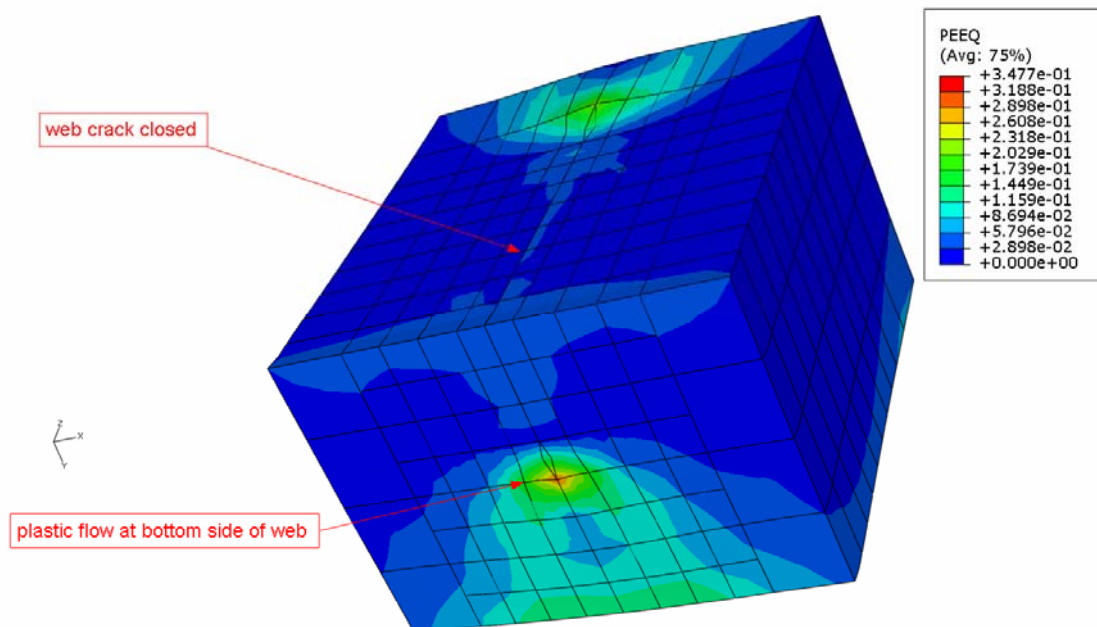
Το διάστημα πλάτυνσης του εξεταζόμενου μοντέλου απεικονίζεται στο Σχήμα 7.77 σε σύγκριση με το μοντέλο άνευ ρωγμής, όπου παρατηρούμε ότι η εισαγωγή της ασυνέχειας στο ενισχυτικό δεν επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση στη γραφική παράσταση του μεγέθους, σε αντίθεση με την περίπτωση συμμετρικής ρωγμής (σχήμα 7.45)



Σχήμα 7.77 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ασύμμετρη ρωγμή $c=24mm$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9mm$ στο ενισχυτικό

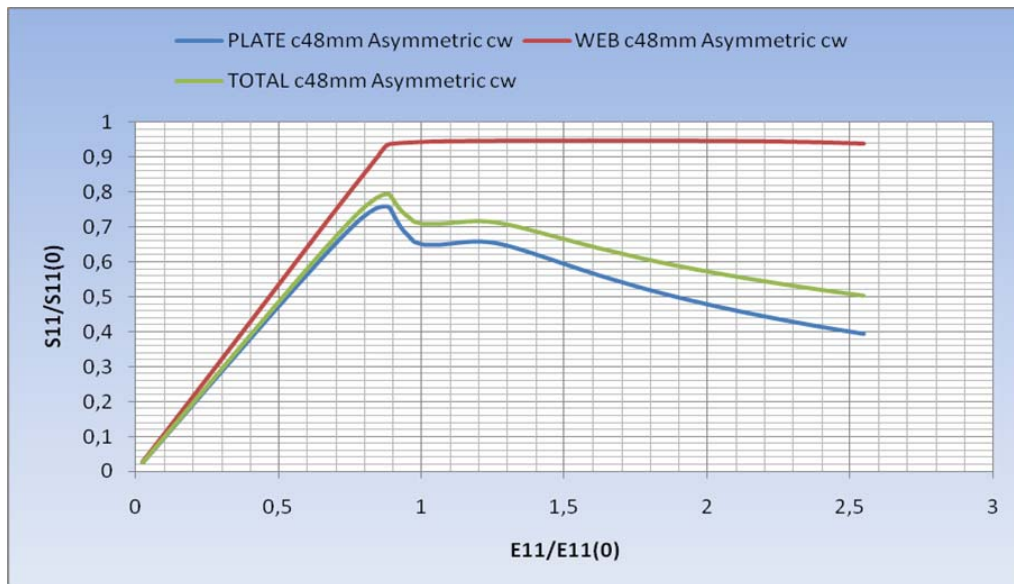
7.10 Ενισχυμένο έλασμα $a/b=3$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=48\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9\text{mm}$ στο ενισχυτικό.

Η σχεδίαση του ενισχυμένου ελάσματος θέματος έγινε με 23080 πεπερασμένα στοιχεία C3D20R με διαστάσεις $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.8325\text{mm}$ στη λεπτομέρεια της ρωγμής και $4\text{mm} \times 4.2\text{mm} \times 1.665\text{mm}$ στην κυρίως πλάκα, ενώ αντίστοιχα οι διαστάσεις στη ρωγμή του ενισχυτικού είναι $0.35\text{mm} \times 0.49\text{mm} \times 0.5103\text{mm}$ και στο κυρίως τμήμα αυτού $4\text{mm} \times 2.04125\text{mm} \times 4.0825\text{mm}$. Η κατάσταση της πλαστικής ροής στο τέλος της φόρτισης όσον αφορά την περιοχή του ενισχυτικού, άνωθεν της ρωγμής στην πλάκα, παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 7.78. Όπως παρατηρούμε οι περιοχές συγκέντρωσης υψηλών τάσεων βρίσκονται στα άκρα της ρωγμής του ενισχυτικού, η οποία έχει κλείσει στο τέλος της φόρτισης.



Σχήμα 7.78 Πλαστική ροή στη ρωγμή του ενισχυτικού στο τέλος της φόρτισης

Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης του εξεταζόμενου μοντέλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.79. Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι η επαφή των επιφανειών της ρωγμής αφενός συμβαίνει χρονικά μετά το σημείο μέγιστης αντοχής, αφετέρου προσδίδει στο ενισχυμένο έλασμα μια ενίσχυση της ακαμψίας στην περιοχή της κατάρρευσης. Επιπρόσθετα το ενισχυτικό, όπως και στις προηγούμενες πειρπτώσεις δε συμμετέχει ενεργά στην αντίσταση της κατασκευής στο εξωτερικό φορτίο.

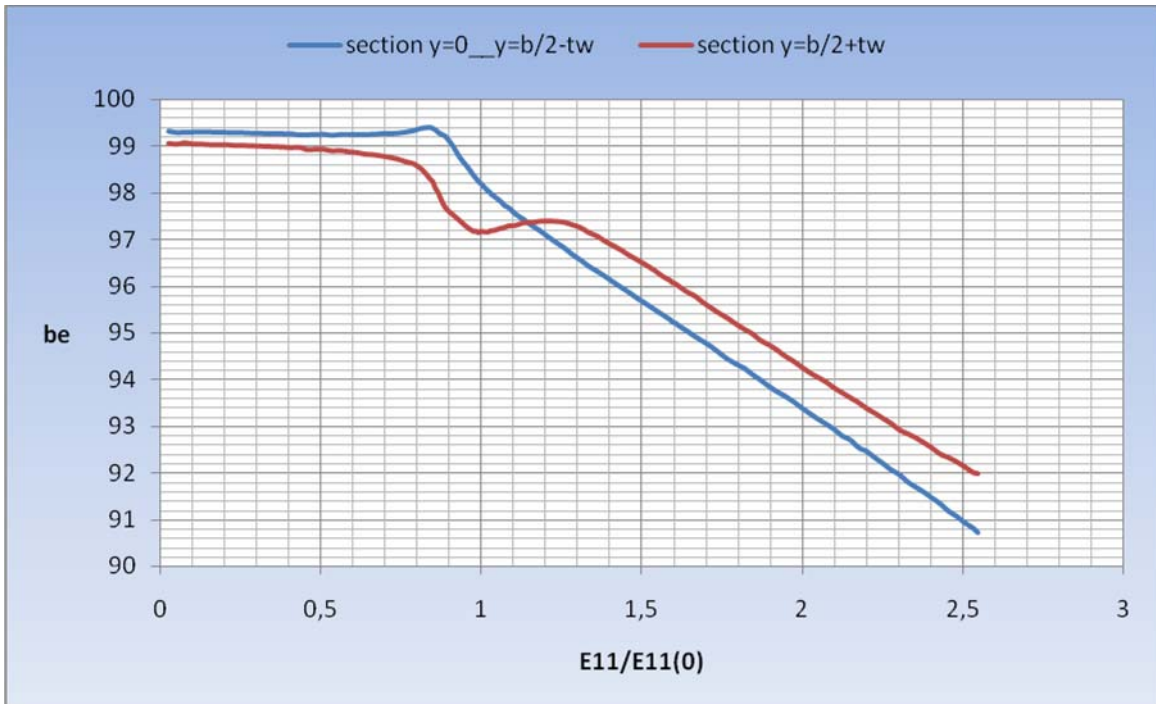


Σχήμα 7.79 Μειωτικές καμπύλες πλάκας συμμετρική με ασύμμετρη ρωγμή $c=48mm$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9mm$ στο ενισχυτικό.

Οι διακυμάνσεις των ισοδύναμων πλατών ανά στάδιο φόρτισης, για την εξεταζόμενη περίπτωση παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.80 και 7.81.



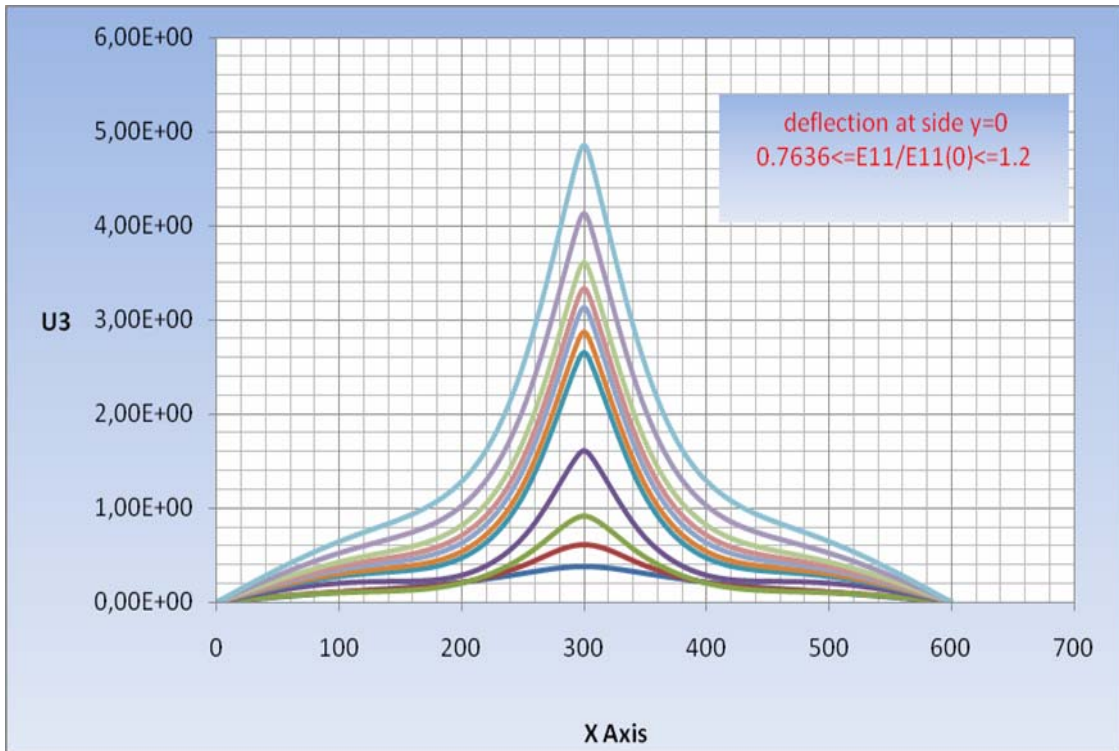
Σχήμα 7.80 Διακύμανση συνολικού ισοδύναμου πλάτους για ρωγμή ασύμμετρη $c=48mm$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9mm$ στο ενισχυτικό.



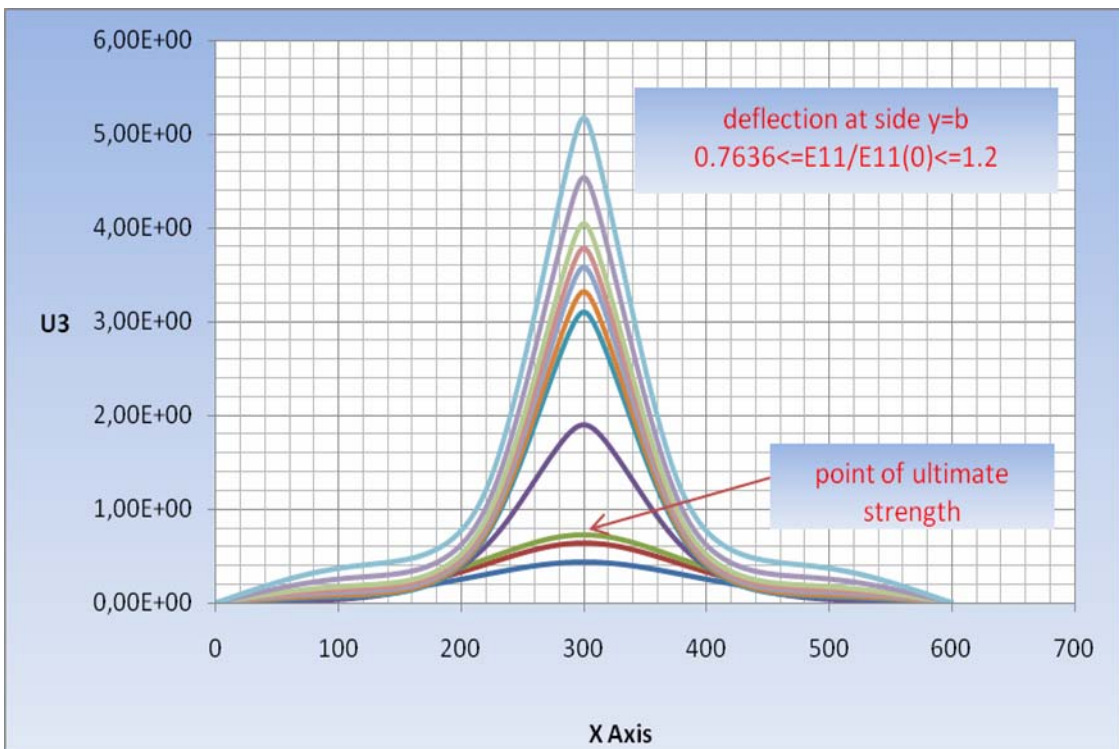
Σχήμα 7.81 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών στα τμήματα της πλάκας

Παρατηρούμε στα ανωτέρω σχήματα αφενός την καθολική πτώση του ισοδύναμου πλάτους της πλάκας με την σταδιακή αύξηση της συμπίεσης, αφετέρου την κατανομή του φορτίου στα δύο (2) τμήματα εκατέρωθεν του ενισχυτικού. Πιο συγκεκριμένα, το τμήμα που φέρει τη ρωγμή παραλαμβάνει περισσότερο φορτίο μετά την επαφή των επιφανειών της ρωγμής.

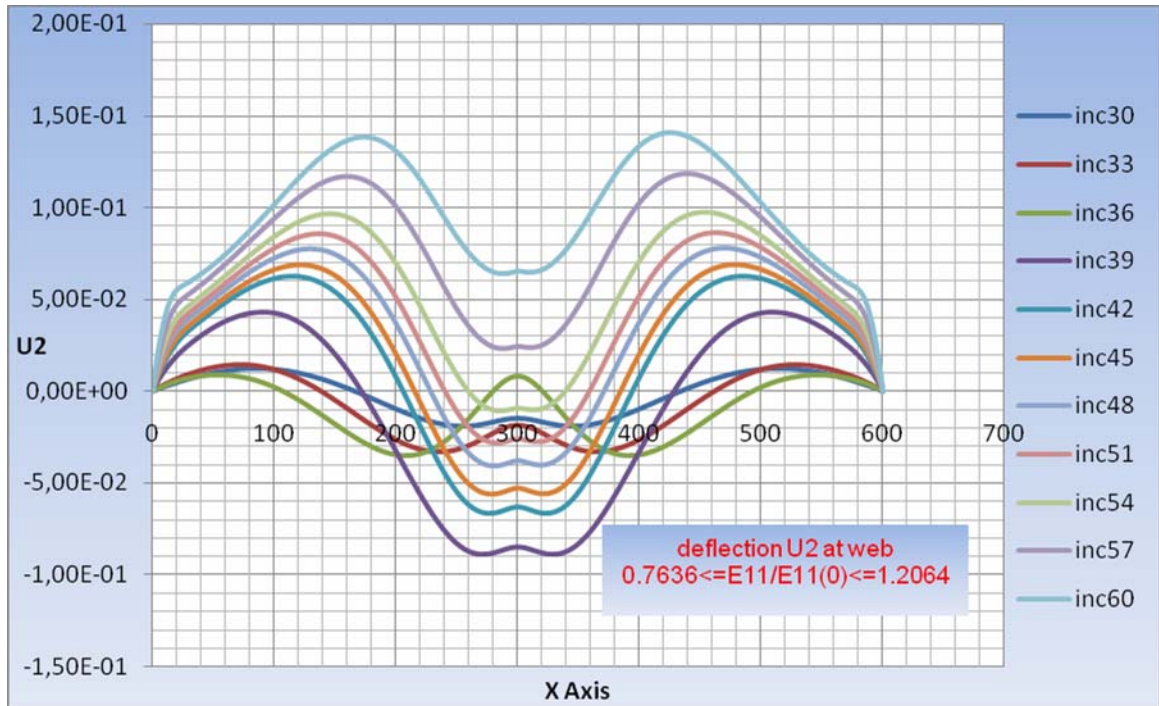
Οι διακυμάνσεις του βέλους κάμψης U_3 στις αφόρτιστες πλευρές της πλάκας σε διαδοχικά στάδια φόρτισης παρουσιάζονται στα ακόλουθα Σχήματα 7.81 ($y=0$) και 7.82 ($y=b$). Όπως διαπιστώνουμε από τις γραφικές παραστάσεις τα εν λόγω μεγέθη και για τα δύο (2) τμήματα συγκλίνουν με την αύξηση του φορτίου προς παραπλήσιες τιμές. Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί ότι μετά την επίτευξη του σημείου μέγιστης αντοχής, η πλάκα εμφανίζει μεγάλες κάθετες μετατοπίσεις. Συναφώς, το τμήμα της πλάκας που δε φέρει τη ρωγμή, εμφανίζει μια τάση συρρίκνωσης των μέγιστων τιμών του βέλους κάμψης στην εγγύτητα της ασυνέχειας στην πλάκα. Στο Σχήμα 7.83 απεικονίζεται η διακύμανση του βέλους κάμψης U_2 στο ενισχυτικό για τα ίδια επίπεδα συμπίεσης. Στη συγκεκριμένη γραφική παράσταση, θα πρέπει να σημειωθεί η αλλαγή διεύθυνσης στην παραμόρφωση U_2 που παρατηρείται μετά το σημείο μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος.



Σχήμα 7.82 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $\gamma=0$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης

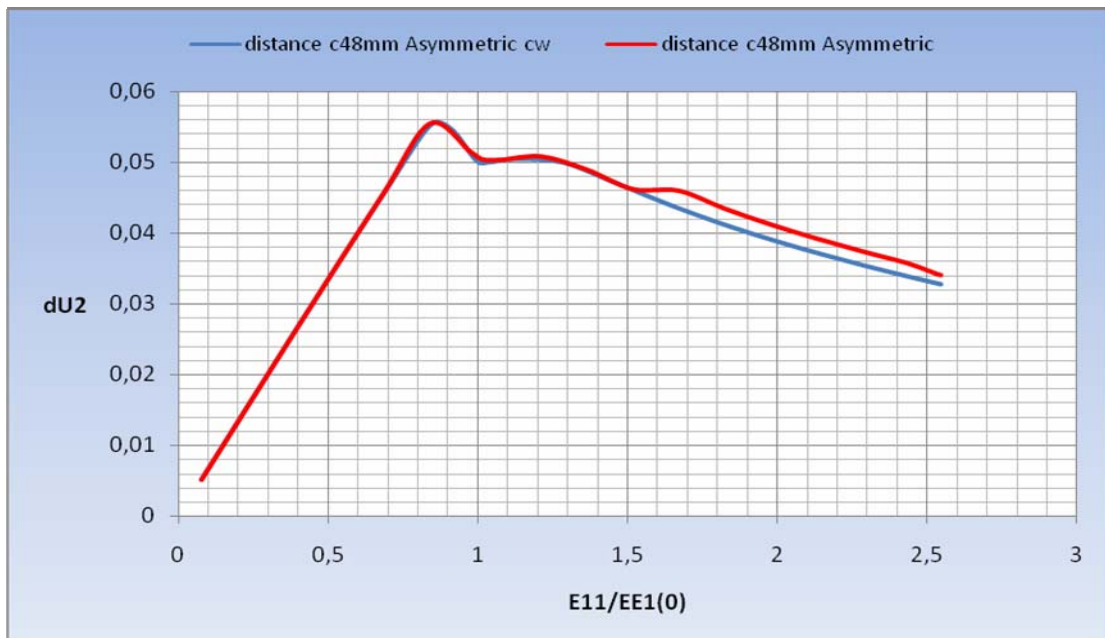


Σχήμα 7.82 Διακύμανση U_3 στην πλευρά $\gamma=b$ σε διαδοχικά στάδια φόρτισης



Σχήμα 7.83 Διακύμανση U_2 στο ενισχυτικό για διαδοχικά στάδια φόρτισης

Το διάστημα πλάτυνσης του εξεταζόμενου μοντέλου παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 7.84 σε σύγκριση με την περίπτωση άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό, όπου παρατηρούμε διαφοροποίηση των τιμών στην περιοχή κατάρρευσης του ενισχυμένου ελάσματος.



Σχήμα 7.84 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης με ασύμμετρη ρωγμή $c=48mm$ και επιπλέον ρωγμή $c_w=4.9mm$ στο ενισχυτικό

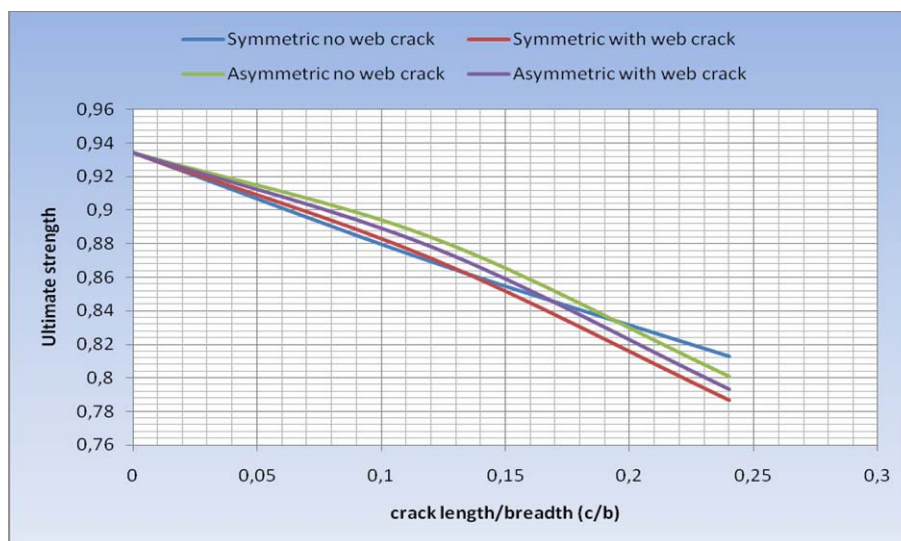
7.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα – Αξιολόγηση – Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων του εξεταζόμενου λόγου μήκους προς πλάτος $a/b=3$, πλην των περιπτώσεων πολλαπλών κυμάτων που αναλύθηκαν στην παράγραφο 7.2.2. Στο Σχήμα 7.85 που ακολουθεί, απεικονίζεται η πτωτική τάση της μέγιστης αντοχής με την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Όπως διαπιστώνουμε, η περίπτωση συμμετρικής ρωγμής στην πλάκα και άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό, παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά από τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθούν τα ακόλουθα:

(1) Για λόγο μήκους ρωγμής προς πλάτος $c/b \geq 0.12$, οι καμπύλες παρουσιάζουν σταθερή πτωτική κλίση (παράλληλες εκτός από την περίπτωση συμμετρικής θέσεως ρωγμής μόνο στην πλάκα).

(2) Οι καμπύλες γενικότερα παρουσιάζουν σχετική συγκέντρωση τιμών με τις διαφορές ανά περίπτωση και μήκος ρωγμής να είναι μικρότερες του 5%.

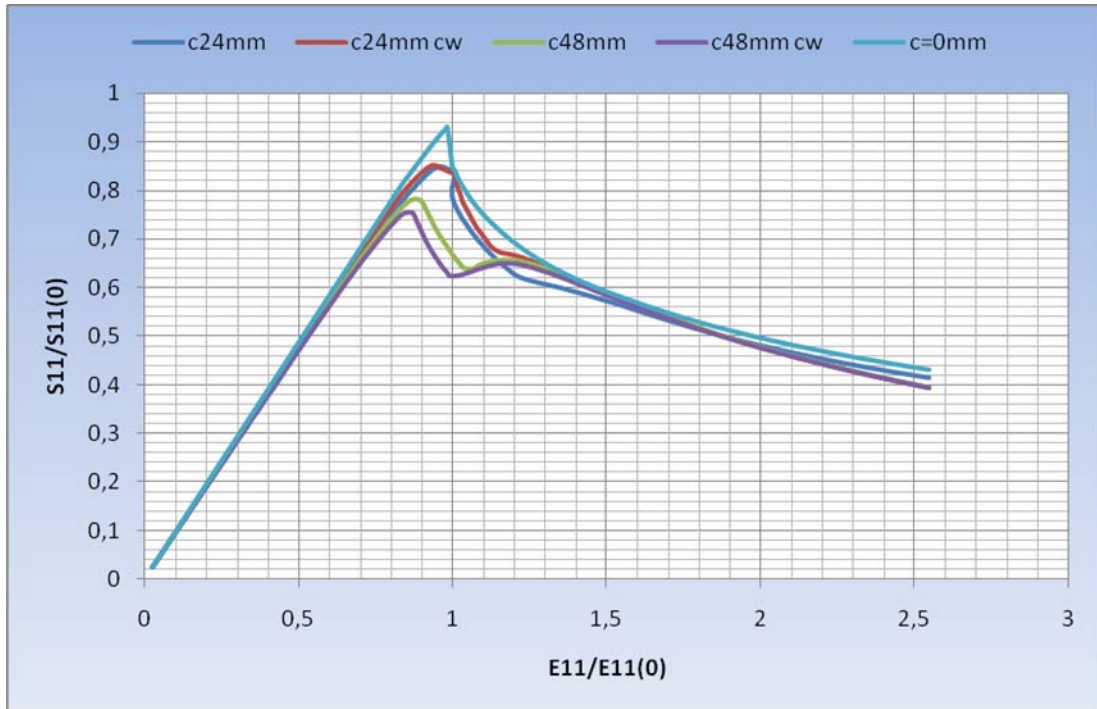
(3) Η εισαγωγή ρωγμής στο ενισχυτικό διαφοροποιεί έντονα την περίπτωση συμμετρικής ρωγμής σε αντίθεση με την ασύμμετρη που παρουσιάζει περίπου την ίδια πτωτική κλίση. Η διαφορά αυτή προκύπτει για την ενδιάμεση ρωγμή στην πλάκα ($c/b=0.12$) και χρειάζεται η ανάλυση μεγαλύτερης ρωγμής για να εξακριβωθεί η απόκλιση των δύο (2) καμπυλών. Η αλλαγή στη συμπεριφορά είναι συνδεδεμένη με τη διαφορετική μεταλυγισμική συμπεριφορά στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως καταδεικνύεται από το σχήμα 7.99



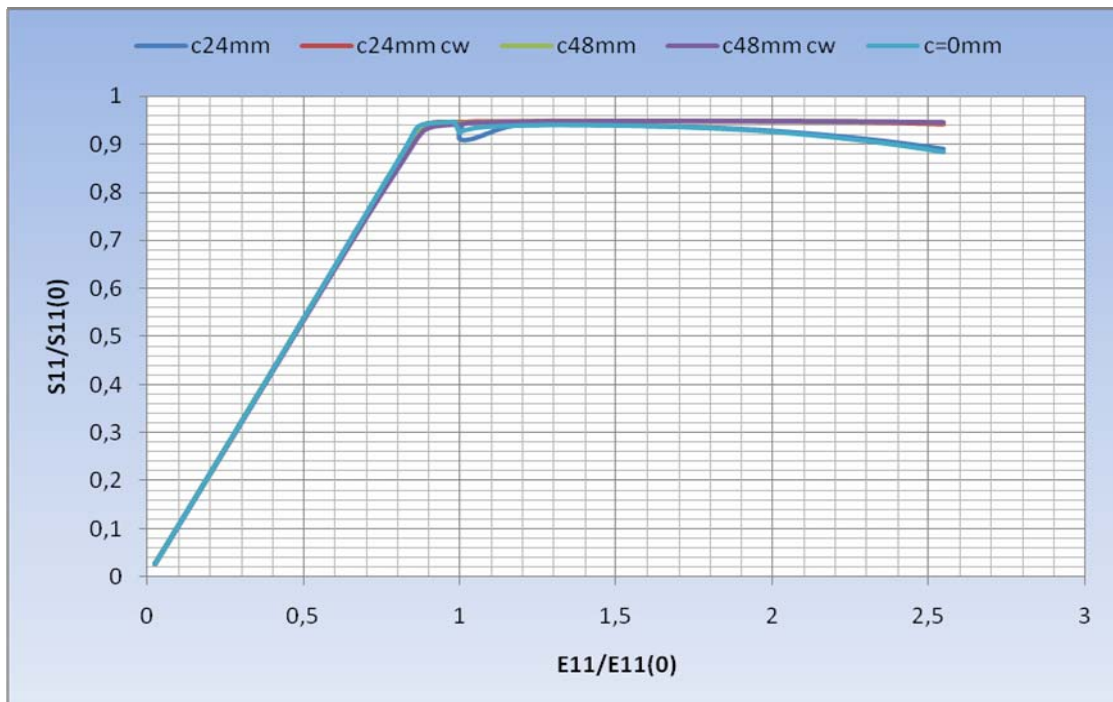
Σχήμα 7.85 Σύγκριση μέγιστης αντοχής $a/b=3$ ανάλογα με τον τύπο της ρωγμής

Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης ξεχωριστά για την πλάκα, ενισχυτικό υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- (1) Για ίδιο τύπο ρωγμής στην πλάκα σύμφωνα με τη θέση αυτής
 (α) Συμμετρική ρωγή (Σχήματα 7.86 και 7.87)

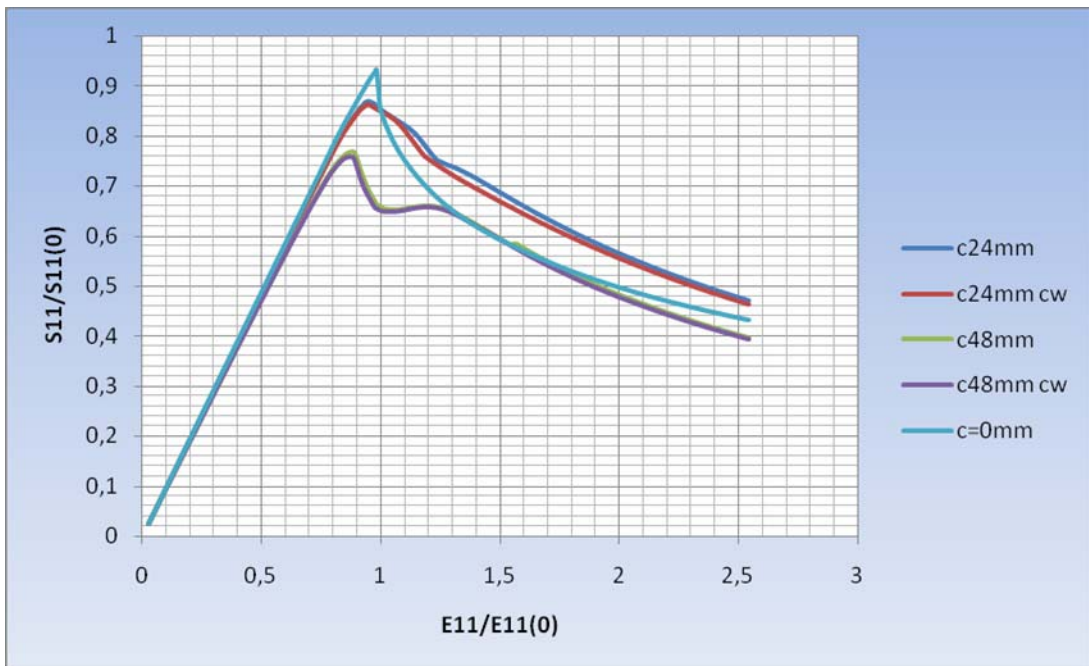


Σχήμα 7.86 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για συμμετρική ρωγή

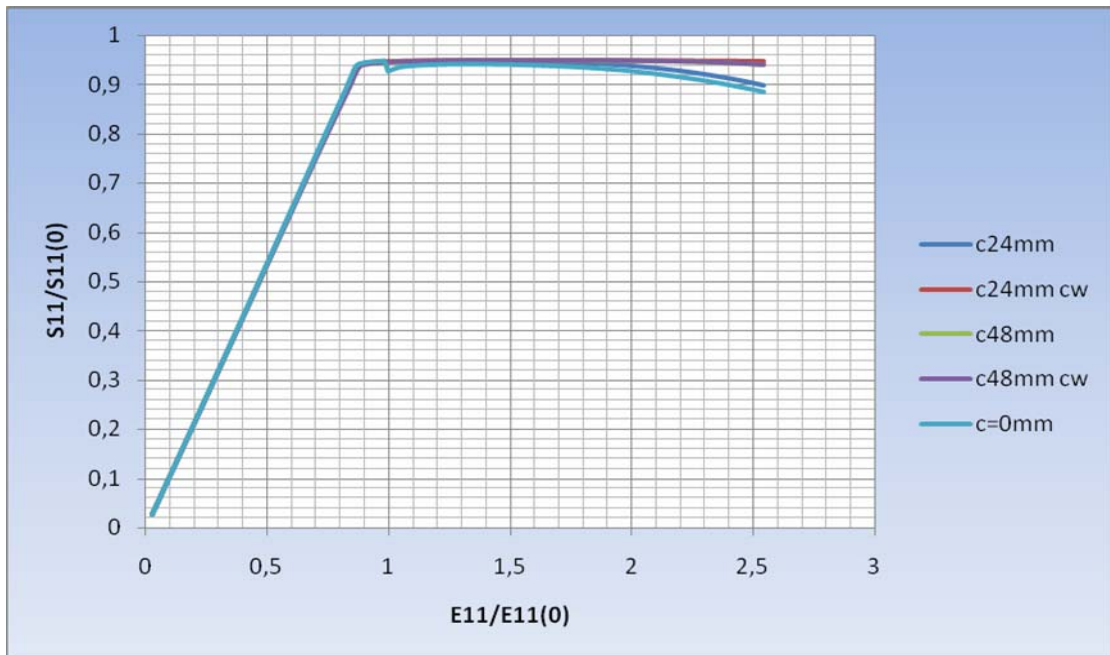


Σχήμα 7.87 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για συμμετρική ρωγή

(β) Ασύμμετρη ρωγμή (Σχήματα 7.88 και 7.89)



Σχήμα 7.88 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή



Σχήμα 7.89 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ασύμμετρη ρωγμή

Από την ανάλυση των ανωτέρω καμπυλών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(i) Η συμμετρική ρωγμή ανεξαρτήτου μήκους εμφανίζει μια σύγκλιση τιμών στην περιοχή της κατάρρευσης του ενισχυμένου ελάσματος σε αντίθεση με την έτερη περίπτωση.

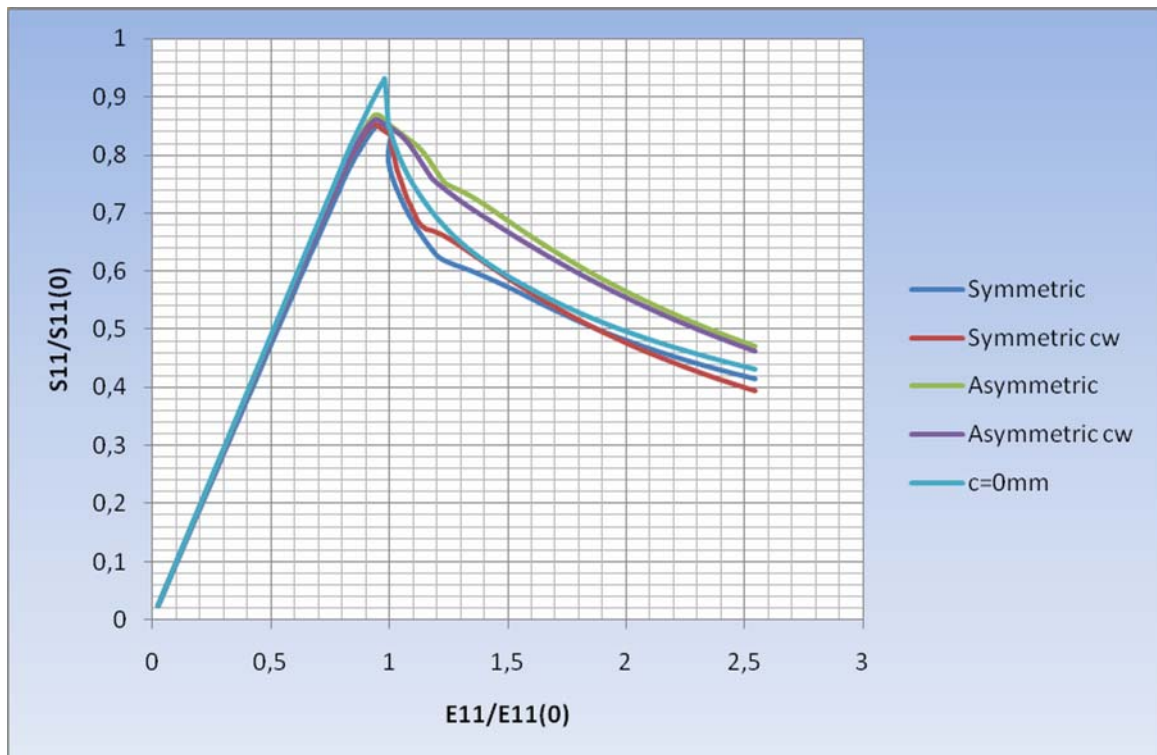
(ii) Η θέση της ρωγμής δεν επηρεάζει σημαντικά το στάδιο συμπίεσης κατά το οποίο προκύπτει επαφή των επιφανειών της ρωγμής και πιο συγκεκριμένα για $c=24\text{mm}$ είναι περίπου $E_{11}/E_{11(0)}=1.2217$, ενώ για $c=48\text{mm}$ έχουμε $E_{11}/E_{11(0)}=0.9926$.

(iii) Η πτώση των τιμών της μέγιστης αντοχής εξαρτάται κυρίως από το μήκος της ρωγμής και όχι από τη θέση.

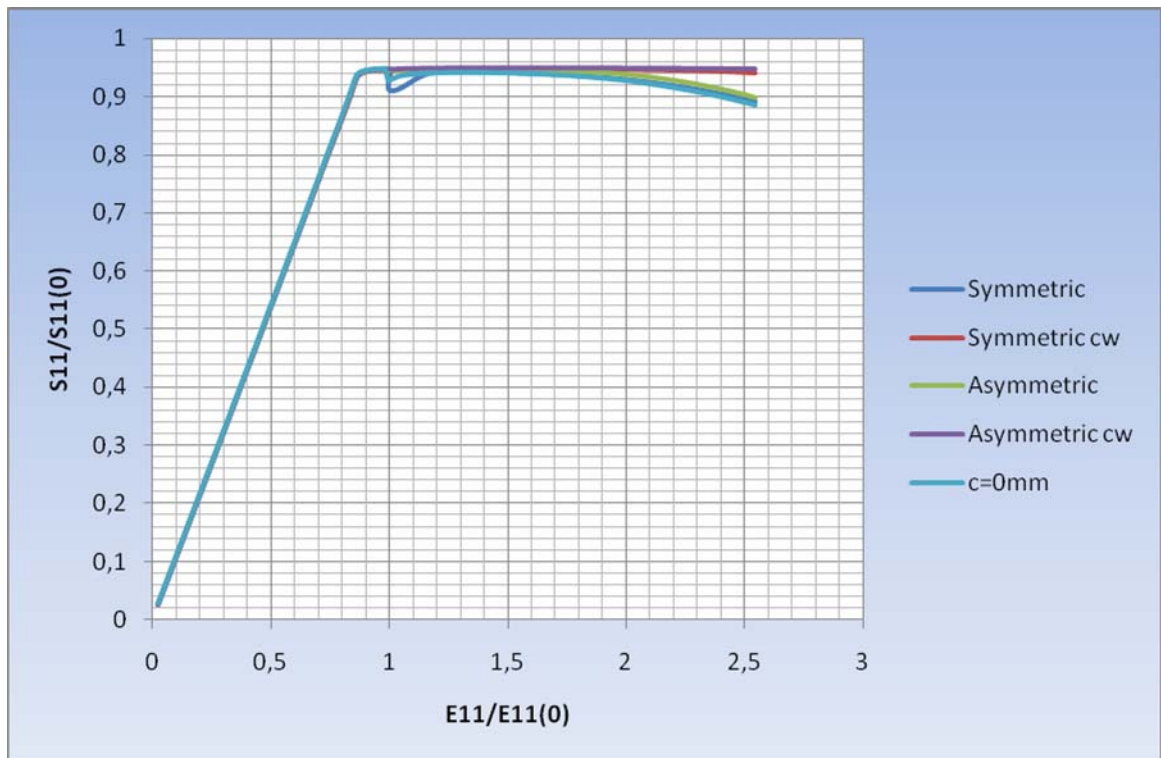
(iv) Οι καμπύλες φόρτισης του ενισχυτικού επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη συμμετρική ρωγμή και κυρίως για $c/b=0.12$ χωρίς ρωγμή στο ενισχυτικό.

(2) Με το ίδιο μήκος ρωγμής

(α) Για ρωγμή στην πλάκα μήκους $c=24\text{mm}$ (Σχήματα 7.90 και 7.91)

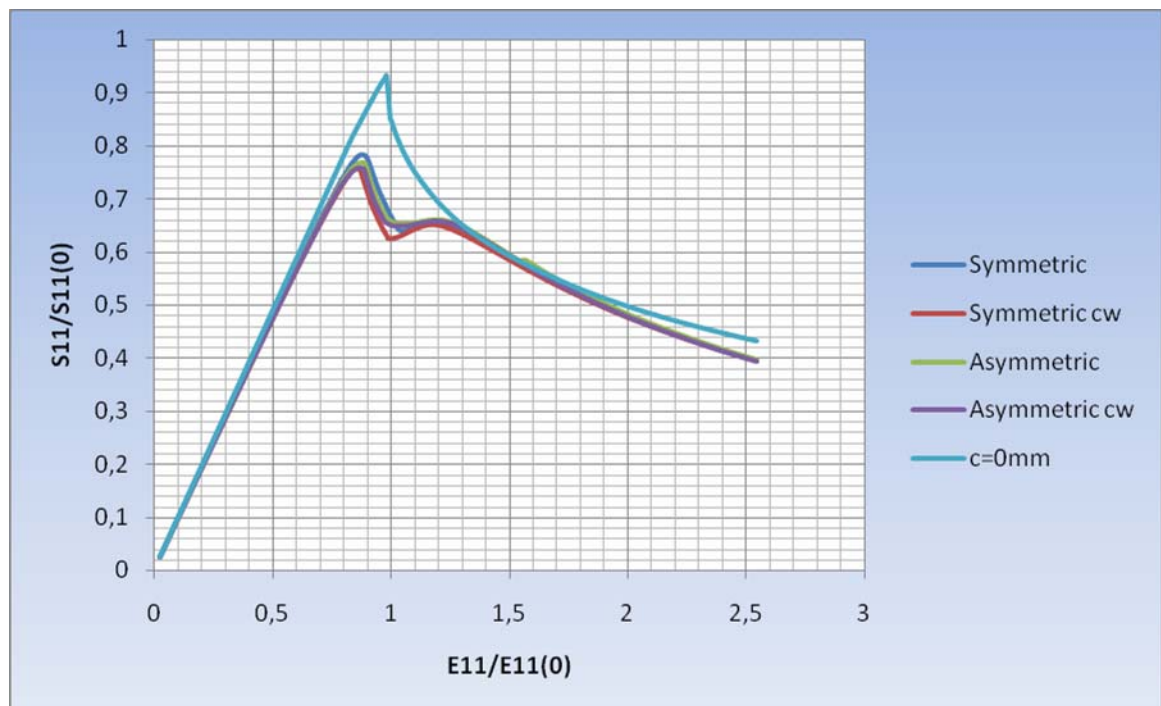


Σχήμα 7.90 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ρωγμή πλάκας $c=24\text{mm}$

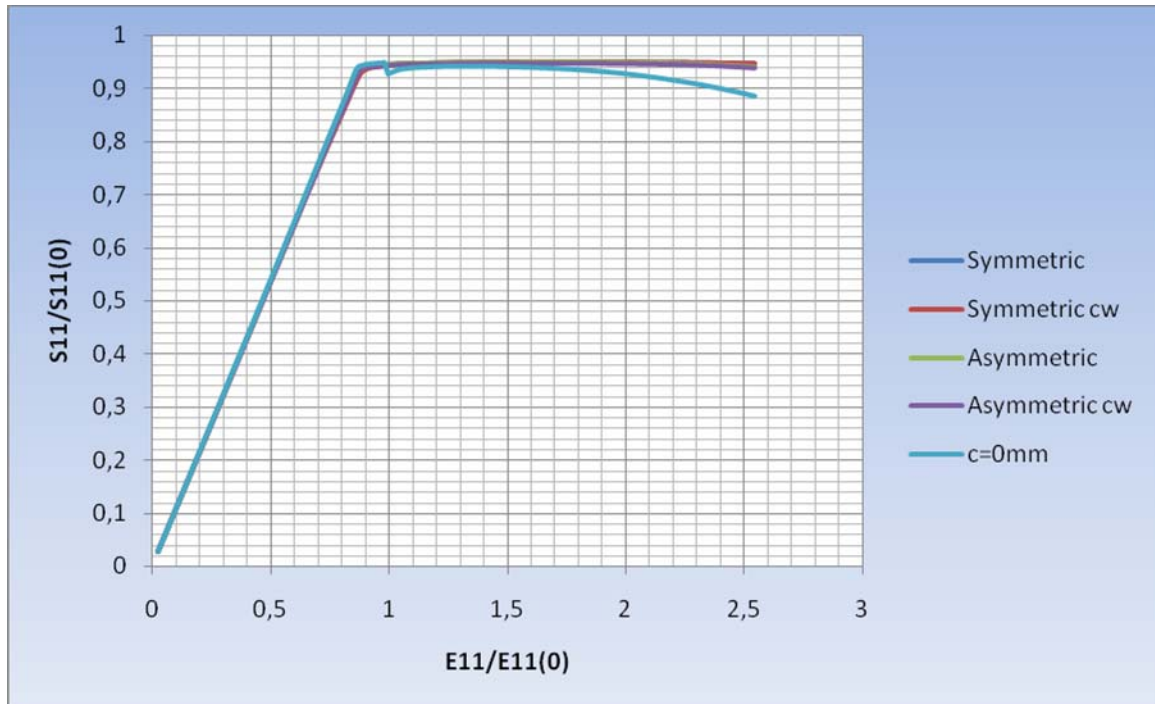


Σχήμα 7.91 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για ρωγμή πλάκας $c=24\text{mm}$

(β) Για ρωγμή στην πλάκα μήκους $c=48\text{mm}$ (Σχήματα 7.92 και 7.93)



Σχήμα 7.92 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών πλάκας για ρωγμή πλάκας $c=48\text{mm}$



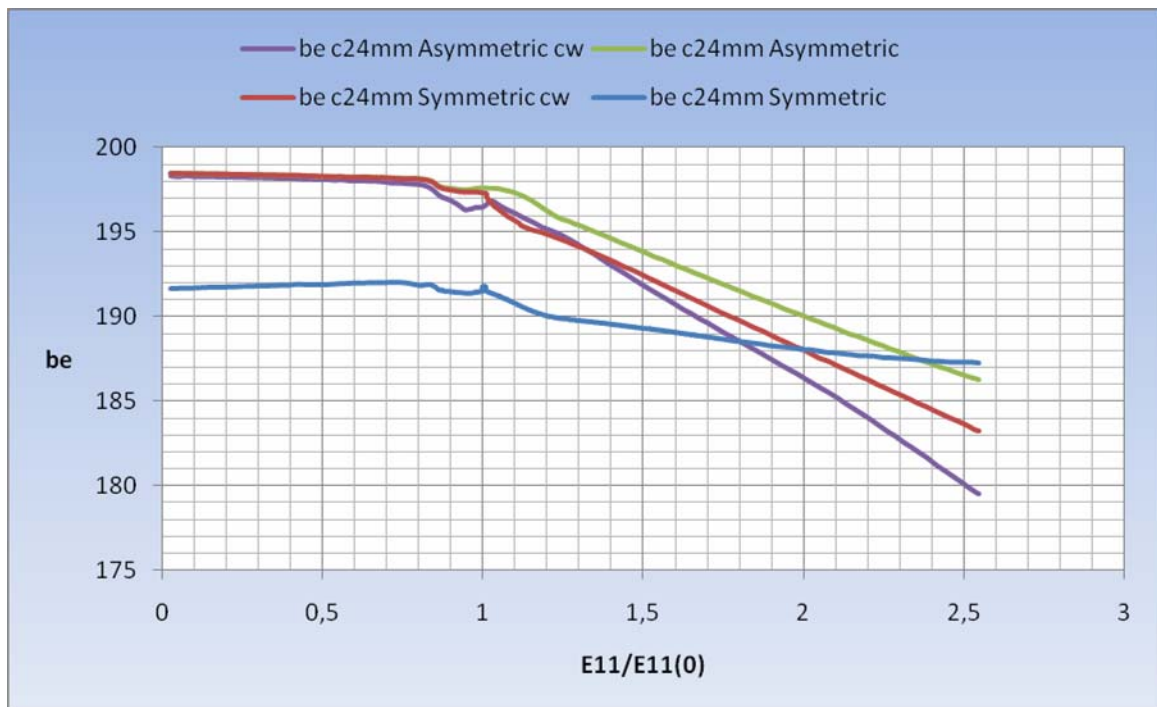
Σχήμα 7.93 Σύγκριση μειωτικών καμπυλών ενισχυτικού για ρωγμή πλάκας $c=48mm$

Από την ανάλυση των ανωτέρω καμπυλών παρατηρούμε μια σχετική μικρή διασπορά των καμπυλών και συνεπώς η θέση της ρωγμής δεν αποτελεί τον κύριο παράγοντα επιρροής της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Ειδικότερα αναφέρονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

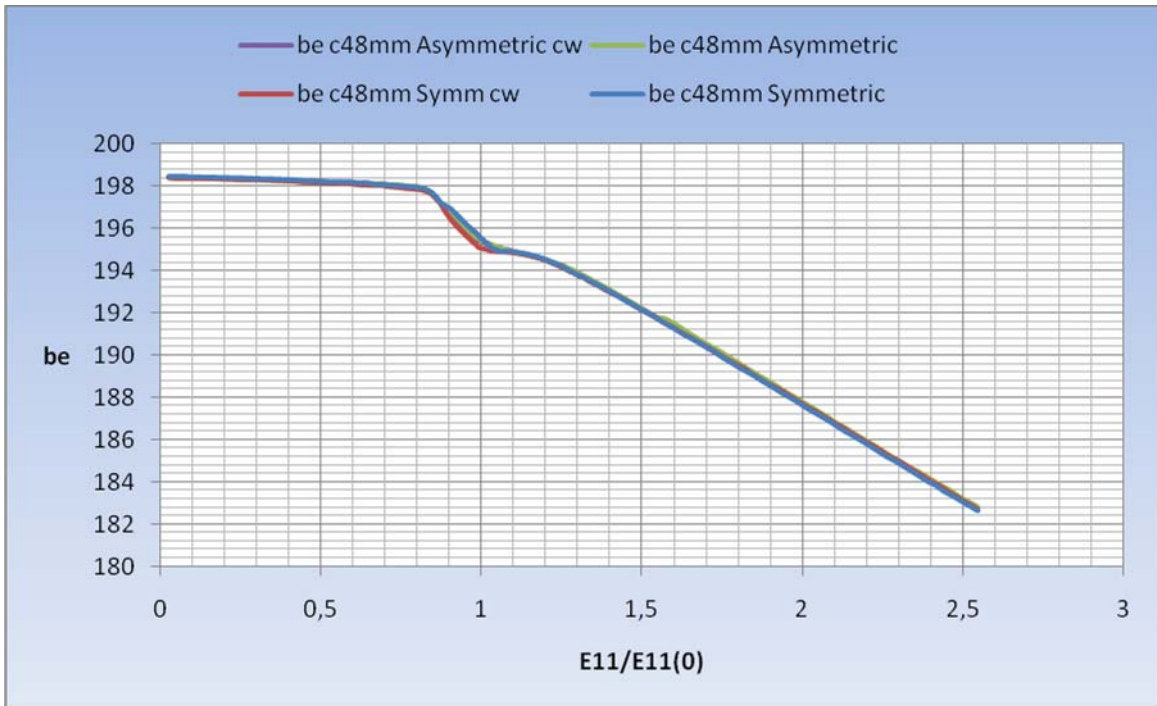
(i) Οι ανωτέρω καμπύλες της πλάκας παρουσιάζουν σχετική συγκέντρωση τιμών στην περιοχή μέγιστης αντοχής. Ειδικότερα για την περίπτωση $c/b=0.24$, οι καμπύλες παρουσιάζουν ταυτόσημη συμπεριφορά σε όλα τα στάδια φόρτισης ανεξάρτητα της θέσεως ρωγμής στην πλάκα ή ύπαρξης ρωγμής στο ενισχυτικό. Αντίθετα στην περίπτωση $c/b=0.12$, οι καμπύλες επηρεάζονται από τη θέση της ρωγμής στην περιοχή κατάρρευσης.

(ii) Οι καμπύλες του ενισχυτικού παρουσιάζουν ταυτόσημη συμπεριφορά για $c/b=0.24$ σε αντίθεση με την περίπτωση $c/b=0.12$. Πιο συγκεκριμένα, για μικρό μήκος ρωγμής και κυρίως για την περίπτωση συμμετρικής ρωγμής μόνο στην πλάκα, το ενισχυτικό δείχνει να επηρεάζεται από την ύπαρξη ρωγμής σε αυτό. Γενικά όμως σε όλες τις περιπτώσεις το ενισχυτικό συνεχίζει να παραλαμβάνει σταθερό φορτίο καθώς αυξάνεται το εξωτερικό φορτίο, ενώ η πλάκα σταδιακά καταρρέει.

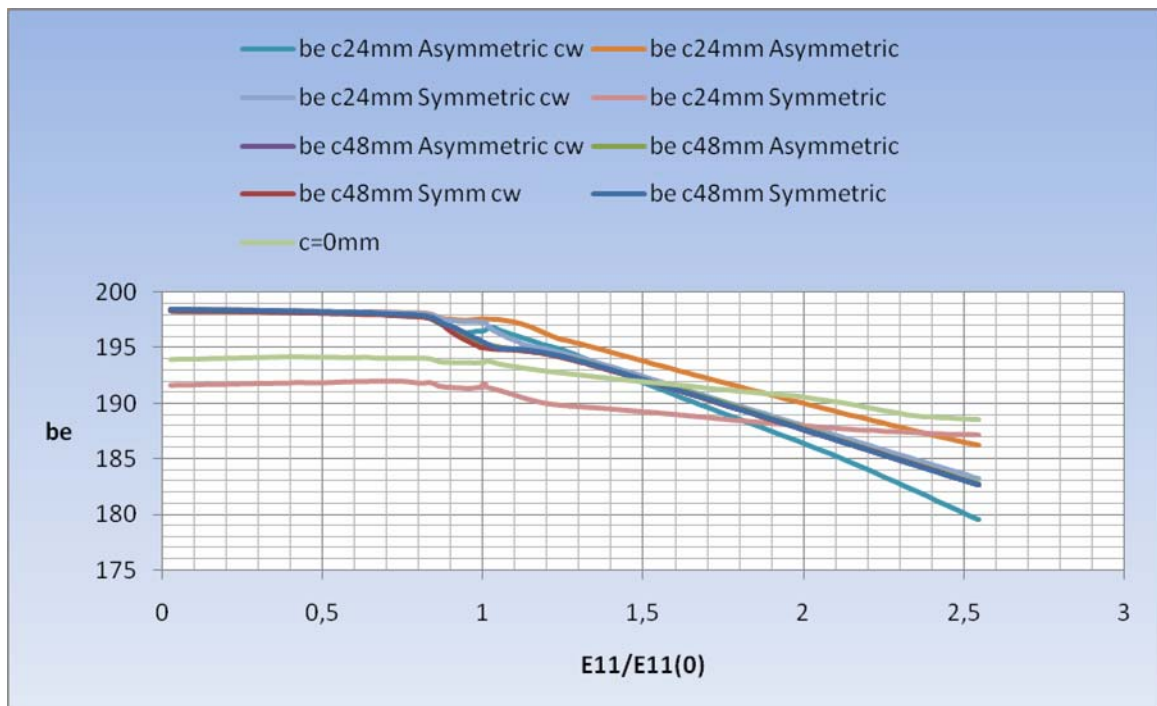
Η σύγκριση των ισοδύναμων πλατών (effective breadth) μας οδηγεί στα Σχήματα 7.94 (για ρωγμή μήκους $c=24\text{mm}$), 7.95 (για ρωγμή μήκους $c=48\text{mm}$) και 7.96 (για το σύνολο των μοντέλων). Όπως διαπιστώνουμε, το εν λόγω μέγεθος διαφοροποιείται σημαντικά για $c/b=0.12$ στη μεταλυγισμική περιοχή και επιπλέον στην περίπτωση συμμετρικής ρωγμής στην πλάκα, άνευ ρωγμής στο ενισχυτικό. Συναφώς για $c/b=0.24$ η διακύμανση του μεγέθους είναι ασήμαντη και είναι πιθανόν, ότι η συμπεριφορά της πλάκας για $c/b \geq 0.24$ είναι ανεξάρτητη της θέσεως της ρωγμής και της ύπαρξης ρωγμής στο ενισχυτικό (η υπόθεση αυτή χρειάζεται να θεμελιωθεί με περαιτέρω αναλύσεις και ισχύει φυσικά για το σταθερό λόγο $c_w/h_w=0.12$ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία).



Σχήμα 7.94 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας με ρωγμή $c=24\text{mm}$



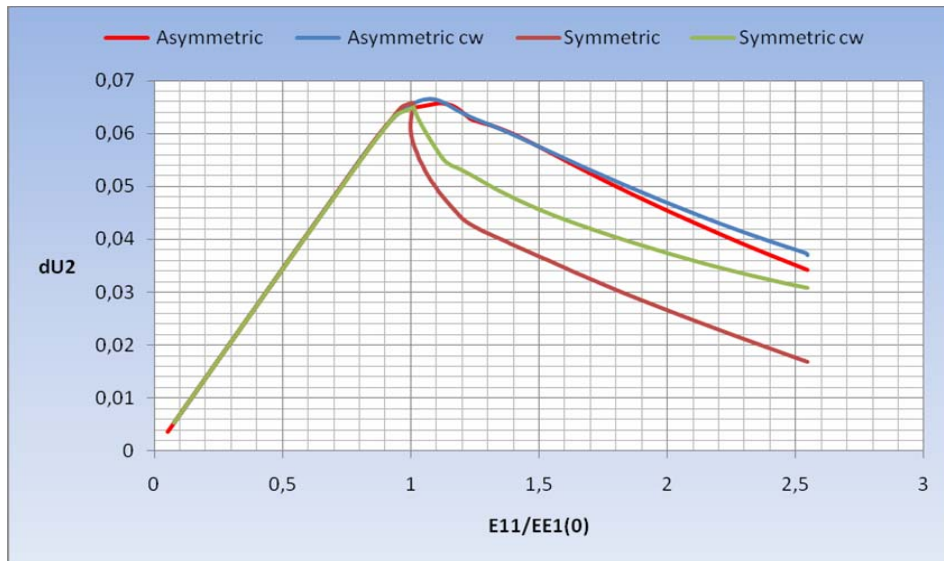
Σχήμα 7.95 Διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας με ρωγμή $c=48\text{mm}$



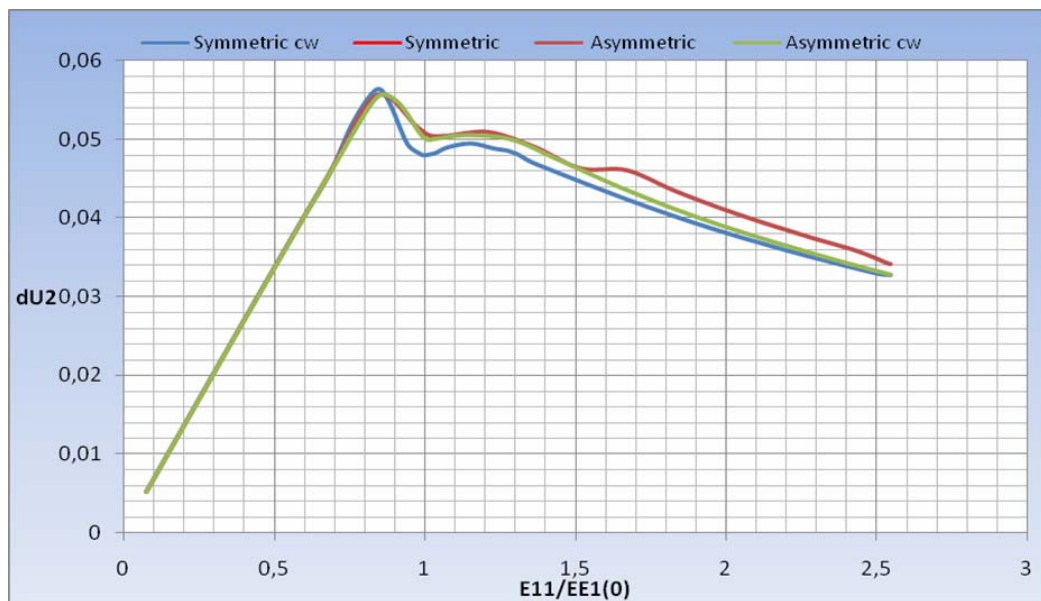
Σχήμα 7.96 Συγκεντρωτική διακύμανση ισοδύναμων πλατών της πλάκας

Η μεταβολή του διαστήματος πλάτυνσης των μοντέλων που εξετασθήκαν απεικονίζεται στα ακόλουθα Σχήματα 7.97, 7.98. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε υπάρχει διαφοροποίηση στη μεταβολή του εν λόγω μεγέθους στην περίπτωση $c/b=0.12$ σε αντίθεση με την περίπτωση ρωγμής μεγάλου μήκους που παρουσιάζει ομοιότητα στην εξέλιξη. Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί ότι για

μήκος ρωγμής $c=24\text{mm}$ παρατηρούμε μικρότερες τιμές πλάτυνσης των μοντέλων σε σχέση με την περίπτωση $c=48\text{mm}$.



Σχήμα 7.97 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης για ρωγμή $c=24\text{mm}$



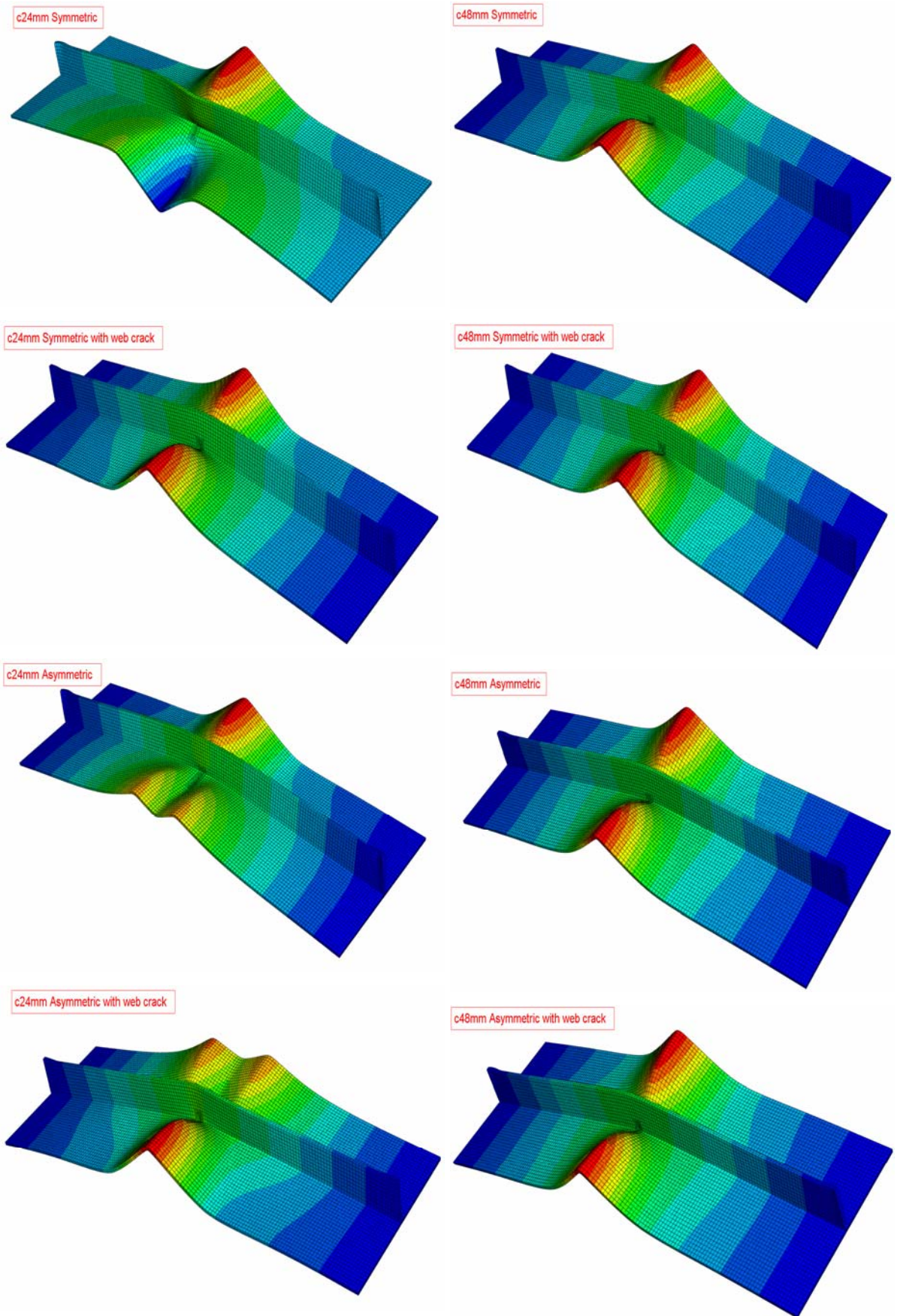
Σχήμα 7.98 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης για ρωγμή $c=48\text{mm}$

Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στις προηγούμενες θεματικές ενότητες διαπιστώθηκε ότι τα βέλη κάμψης U_3 των αφόρτιστων πλευρών διαφοροποιούνταν σημαντικά με το μήκος της ρωγμής, τη θέση αυτής και την ύπαρξη ρωγμής ή όχι στο ενισχυτικό. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται και από το ακόλουθο Σχήμα 7.99, όπου παρουσιάζεται η μορφή της παραμόρφωσης της κατασκευής (μεταβλητή U_3 – βαθμός μεγέθυνσης 5) στο τέλος της φόρτισης για

όλες τις περιπτώσεις ενισχυμένων ελασμάτων $a/b=3$, που εξετασθήκαν στην παρούσα εργασία.

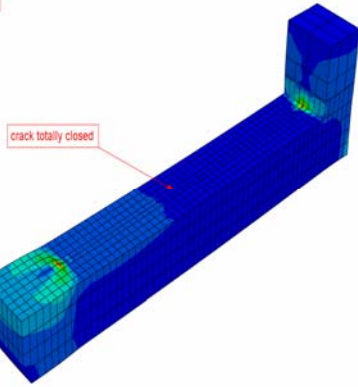
Στο εν λόγω σχήμα παρατηρούμε ότι στην περίπτωση ρωγμής στην πλάκα $c=24\text{mm}$ ($c/b=0.12$), οποιαδήποτε τροποποίηση είτε στη θέση της ρωγμής στην πλάκα, είτε στην ύπαρξη ή όχι ρωγμής στο ενισχυτικό, επηρεάζει το «μονοπάτι» ισορροπίας (equilibrium path) στο οποίο θα οδηγηθεί η λύση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με άλλα λόγια επηρεάζει τη τελική μορφή παραμόρφωσης στο τέλος της φόρτισης. Αντίθετα η μεγαλύτερου μήκους, ρωγμή εμφανίζει σταθερότητα στη τελική μορφή, σχηματίζοντας σε όλες τις περιπτώσεις κύμα συμμετρικής μορφής στα τμήματα της πλάκας εκατέρωθεν του ενισχυτικού, όπως διαπιστώνεται και στο σχήμα 7.99

Τέλος στο Σχήμα 7.100 απεικονίζεται η κατάσταση της ρωγμής στο τέλος της φόρτισης όλων των μοντέλων $a/b=3$ που εξετασθήκαν (μεταβλητή PEEQ).

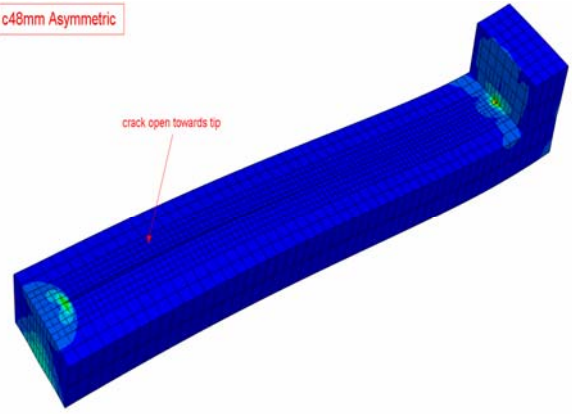


Σχήμα 7.99 Μορφή παραμόρφωσης ελάσματος $a/b=3$ στο τέλος της φόρτισης

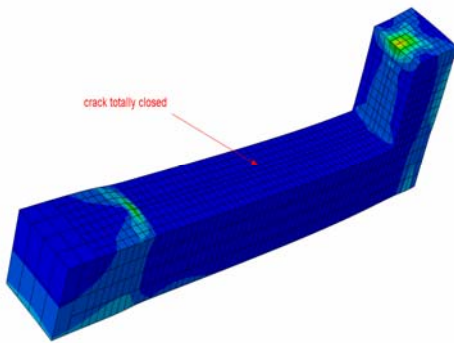
c24mm Asymmetric



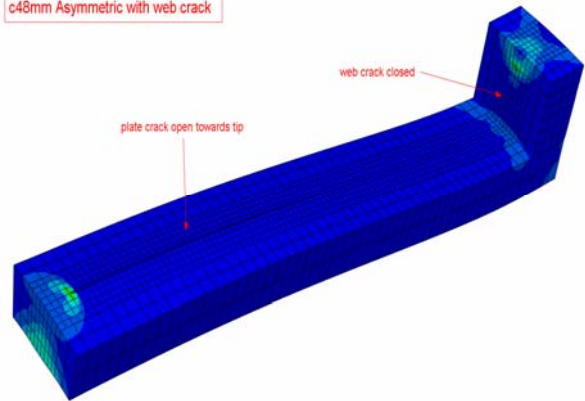
c48mm Asymmetric



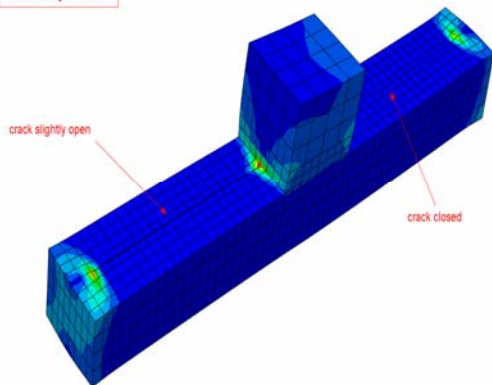
c24mm Asymmetric with web crack



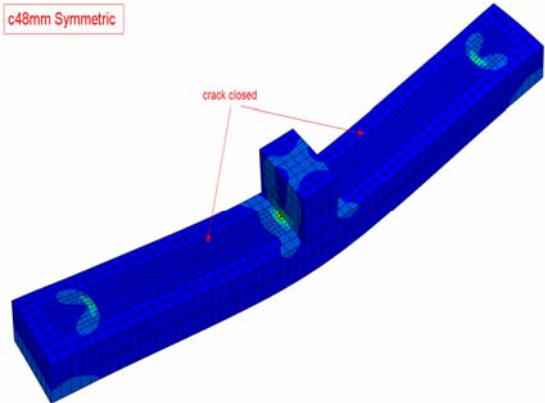
c48mm Asymmetric with web crack



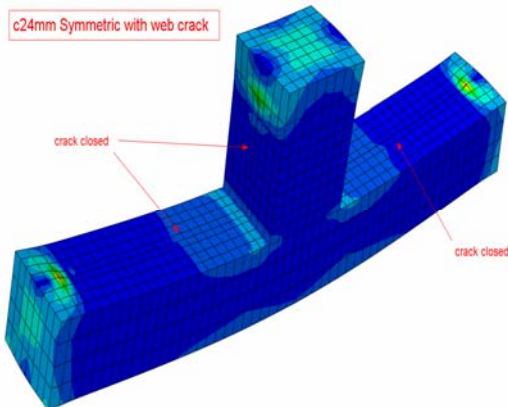
c24mm Symmetric



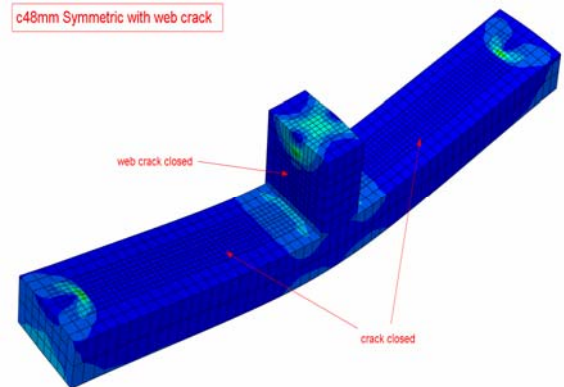
c48mm Symmetric



c24mm Symmetric with web crack



c48mm Symmetric with web crack



Σχήμα 7.100 Κατάσταση ρωγμής στο τέλος της φόρτισης όλων των περιπτώσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑ ΛΟΓΟ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΣ ΠΛΑΤΟΣ (ASPECT RATIO) ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

8.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων με μεταβλητή το λόγο μήκους προς πλάτος (aspect ratio) των ενισχυμένων ελασμάτων και σταθερές τους λόγους μήκους ρωγμής προς πλάτος (c/b), τη θέση της ρωγμής στην πλάκα και την ύπαρξη ή όχι ρωγμής στο ενισχυτικό. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι, όπως αναπτύχθηκε και στα κεφάλαια 5.2.2 και 7.2.4, σημαντικό ρόλο στη μέγιστη αντοχή των ελασμάτων έχουν η συνολική παραμόρφωση της κατασκευής (global deflection) και ο αριθμός των κυματώσεων στις αρχικές ατέλειες αντίστοιχα.

8.2 Σύγκριση μέγιστης αντοχής

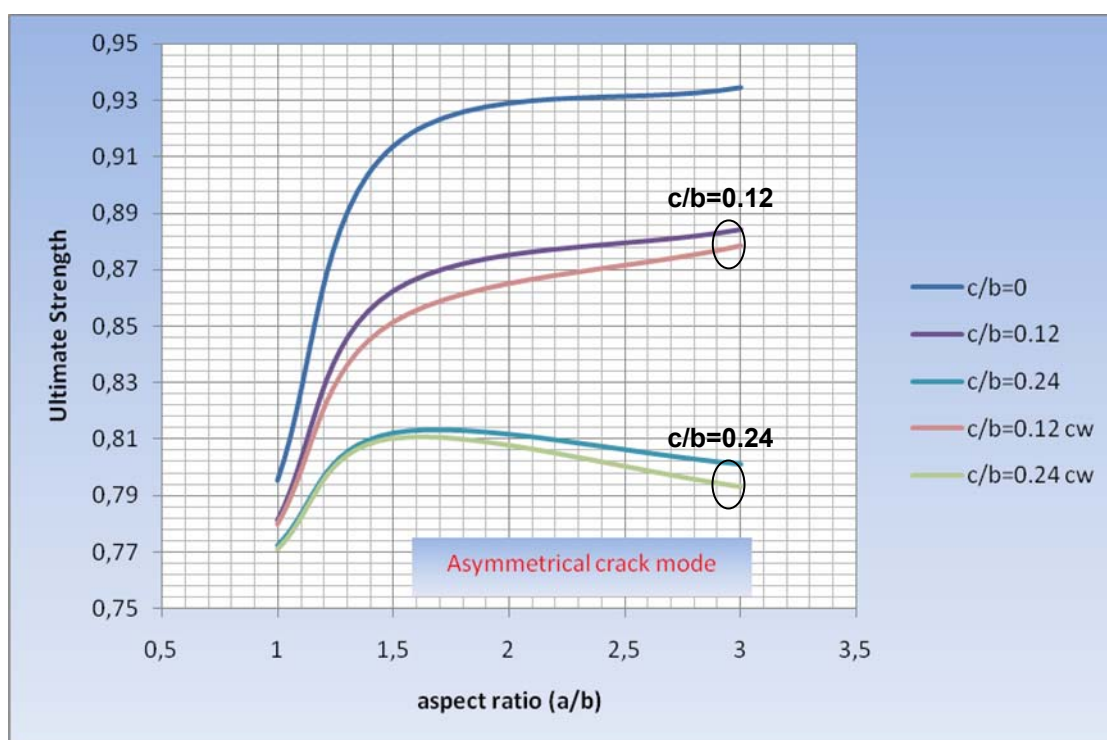
Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής της μέγιστης αντοχής ανά aspect ratio (a/b) σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 8.1 απεικονίζεται η διαφοροποίηση της μέγιστης αντοχής για την περίπτωση ρωγμής που βρίσκεται στο ένα μόνο τμήμα της πλάκας (ασύμμετρη περίπτωση), στο σχήμα 8.2 παρουσιάζεται η εν λόγω μεταβολή για συμμετρική ρωγμή στην πλάκα εκατέρωθεν του ενισχυτικού και τέλος στο σχήμα 8.3 εμφανίζεται η σύγκριση της μέγιστης αντοχής σύμφωνα με τη θέση της ρωγμής στην πλάκα.

Από την ανάλυση των γραφικών παραστάσεων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

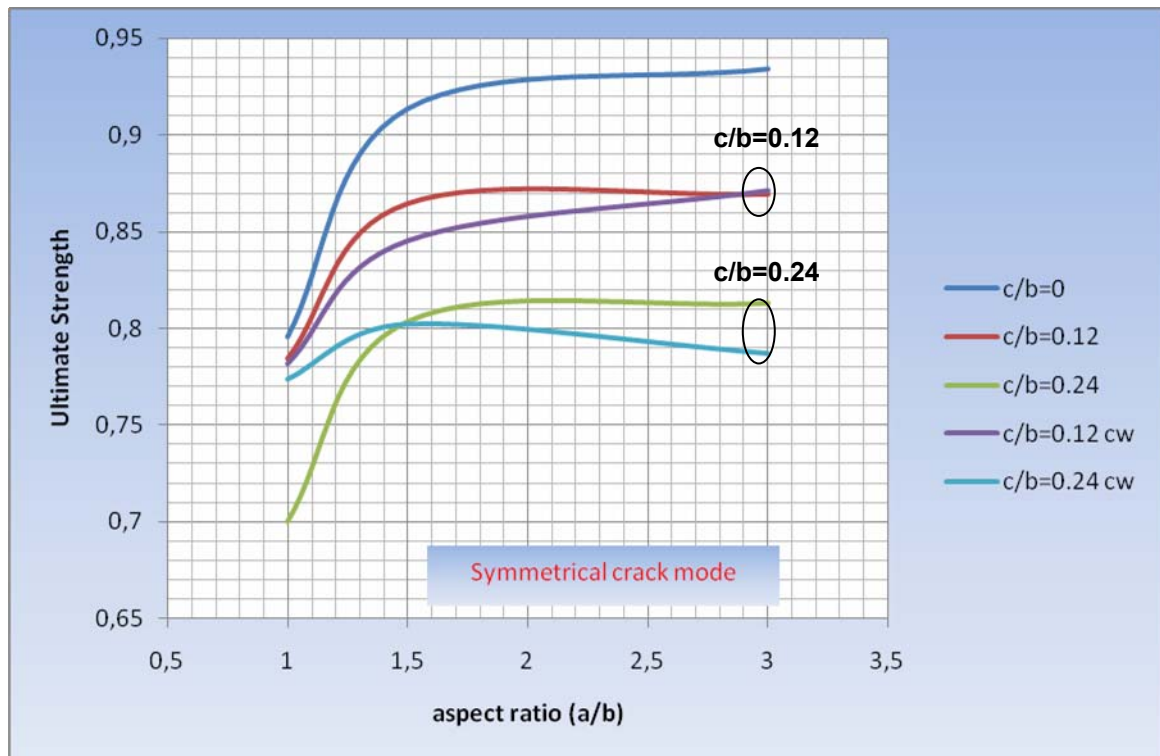
(1) Στην ασύμμετρη περίπτωση ρωγμής στην πλάκα, η εισαγωγή της ρωγμής στο ενισχυτικό υποβιβάζει τη μέγιστη αντοχή του ενισχυμένου ελάσματος κατά ποσότητα, η οποία είναι διαρκώς μειούμενη για $c/b=0.12$ και $a/b>1.5$, καθώς και διαρκώς αυξανόμενη για $c/b>0.12$ και $a/b>1.5$. Επιπρόσθετα, ο βαθμός επιρροής του μήκους της ρωγμής, μεγιστοποιείται με την αύξηση του aspect ratio.

(2) Όσον αφορά τη συμμετρική θέση ρωγμής στην πλάκα, παρατηρούμε μια σχετικά παρόμοια συμπεριφορά για $c/b=0.12$, ενώ υπάρχει διαφοροποίηση για $c/b=0.24$. Επιπρόσθετα, η εισαγωγή της ρωγμής στο ενισχυτικό επιφέρει αύξηση στην αντοχή της κατασκευής για $c/b=0.24$ και $a/b=1.5$, ενώ για $a/b=3$ επέρχεται μείωση. Αντίθετα για $c/b=0.12$ και $a/b>1.5$, η ύπαρξη ρωγμής στο ενισχυτικό παρουσιάζει μια μειούμενη διαφορά αντοχής με την αύξηση του a/b (μέχρι εξισορρόπησης για $a/b=3$) σε σχέση με την περίπτωση ανέπαφου ενισχυτικού.

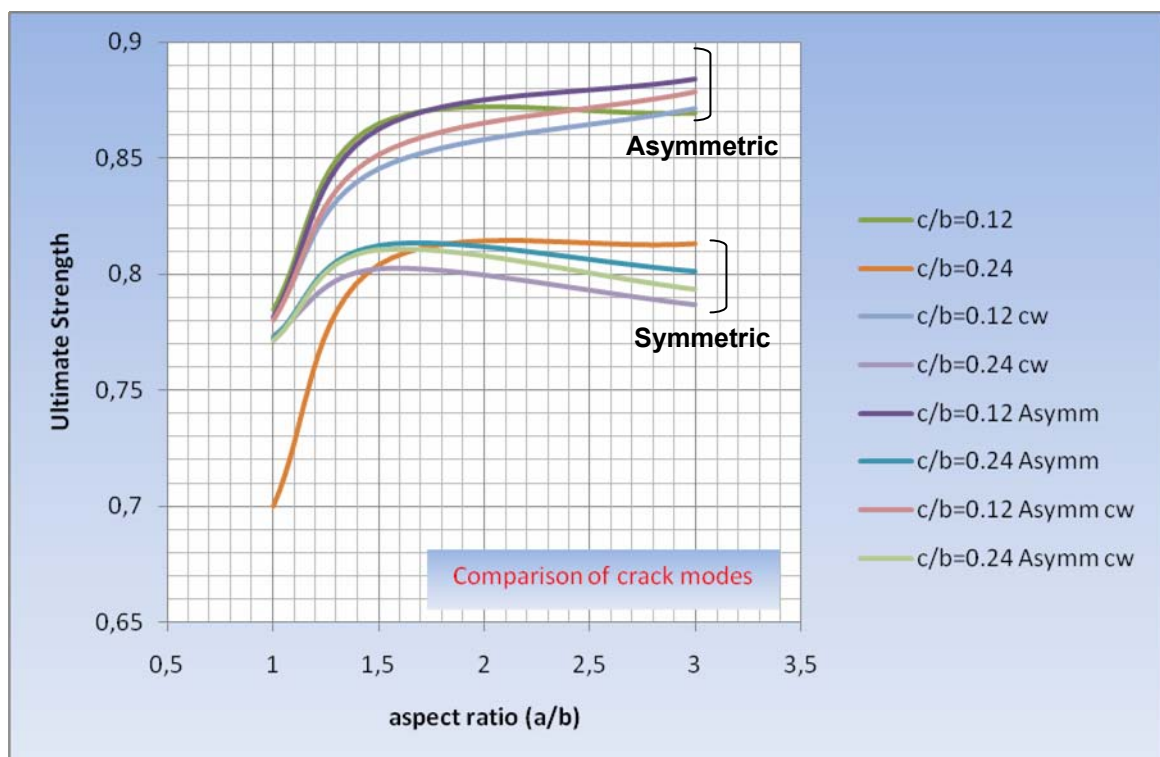
(3) Η σύγκριση των καμπύλων βάσει της θέσης της ρωγμής οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ρωγμή που βρίσκεται συνεχόμενη και στα δύο τμήματα της πλάκας (συμμετρική ρωγμή), αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση από πλευράς αντοχής της κατασκευής.



Σχήμα 8.1 Καμπύλη μέγιστης αντοχής/ aspect ratio για την ασύμμετρη ρωγμή πλάκας



Σχήμα 8.2 Καμπύλη μέγιστης αντοχής/ aspect ratio για την συμμετρική ρωγμή πλάκας



Σχήμα 8.3 Σύγκριση καμπυλών μέγιστης αντοχής/ aspect ratio για τις δύο (2) θέσεις ρωγμής στην πλάκα

(4) Μια γενική παρατήρηση αποτελεί η αύξηση των υπολοίπων αντοχής για $a/b > 1$. Εκτιμάται ότι αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μορφής των αρχικών ατελειών που ενσωματώνονται στην κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, αρχικές μετατοπίσεις, οι οποίες απομακρύνονται από τη μορφή της ιδιομορφής λυγισμού συμβάλλουν στην αύξηση της αρχικής ακαμψίας και της μέγιστης αντοχής [18]. Εξάλλου για $a/b=3$, όπως παρατηρήσαμε στο σχήμα 7.16, επέρχεται σημαντική ελάττωση στη μέγιστη αντοχή της κατασκευής με την αύξηση του αριθμού των ημικυμάτων, τη στιγμή που το ένα (1) ημικύμα μετατόπισης που χρησιμοποιήθηκε στην κύρια ανάλυση των ρηγματοποιημένων μοντέλων απομακρύνεται από την ιδιομορφή λυγισμού (buckling mode).

8.3 Σύγκριση ισοδύναμων πλατών πλάκας

Στα Σχήματα 8.4, 8.5, 8.6 και 8.7 που ακολουθούν, απεικονίζονται οι διαφοροποιήσεις στην τιμή του ισοδύναμου πλάτους ανά aspect ratio και μήκους ρωγμής στην πλάκα. Να ληφθεί υπόψη ότι η εν λόγω τιμή αφορά το ισοδύναμο πλάτος της πλάκας σε λόγο ανηγμένης παραμόρφωσης $E_{11}/E_{11}(0)$ που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης αντοχής.

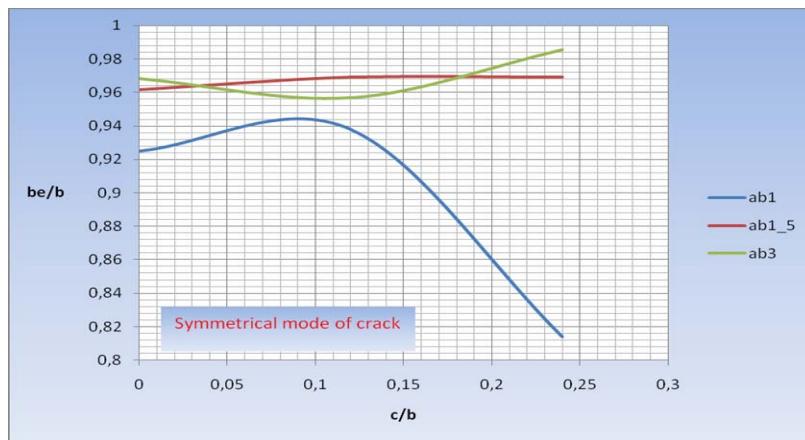
Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η έννοια του ισοδύναμου πλάτους (effective width) πηγάζει από την υπόθεση ότι το φορτίο συμπίεσης που παραλαμβάνει η πλάκα ισοδυναμεί με ένα τμήμα αυτής στην εγγύτητα των ενισχυτικών και στο οποίο επικρατούν ιδεατά ομοιόμορφες μεμβρανικές τάσεις, σε αντικατάσταση της επικρατούσας διακύμανσης. Κατά αυτό τον τρόπο, το εν λόγω μέγεθος αποτελεί ένα κύριο εργαλείο κατά το σχεδιασμό των ενισχυμένων ελασμάτων, όσον αφορά την ικανότητά τους, να φέρουν φορτίο συμπίεσης.

Από την ανάλυση των γραφικών παραστάσεων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

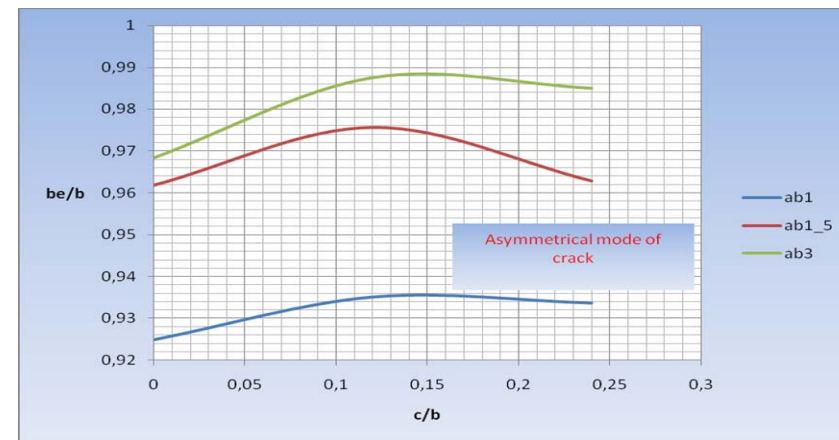
(1) Οι μορφές των καμπύλων στην περίπτωση ασύμμετρης ρωγμής με/ άνευ ρωγμής ενισχυτικού παρουσιάζουν σχετική ομοιότητα, σε αντίθεση με αυτό που συμβαίνει για την περίπτωση της συμμετρικής.

(2) Οι γραφικές παραστάσεις ανά θέση ρωγμής εμφανίζουν τελείως διαφορετική συμπεριφορά ανά λόγο μήκους προς πλάτος (a/b).

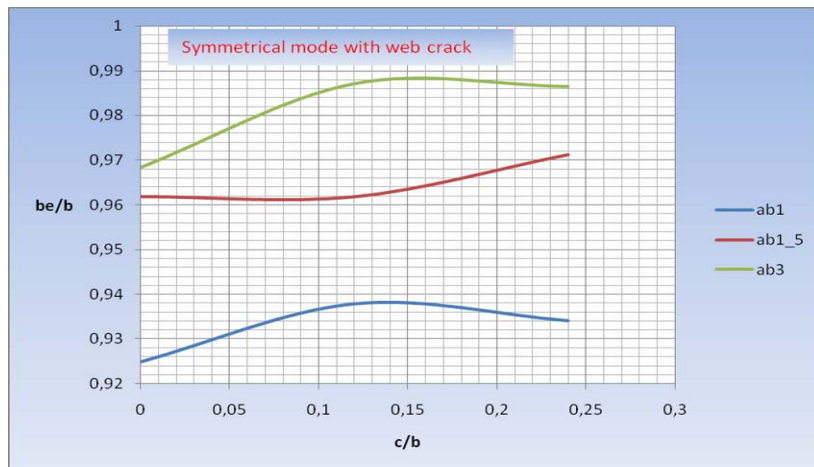
(3) Η ύπαρξη ρωγμής στην πλάκα, γενικά οδηγεί σε μεγαλύτερα ισοδύναμα πλάτη, εκτός από την περίπτωση $a/b=1$ στο σχήμα 8.4. Εκτιμάται ότι αυτό συμβαίνει, διότι με την ύπαρξη της ρωγμής στην εγγύτητα του ενισχυτικού, οι μεμβρανικές τάσεις αναγκάζονται να ξεπεράσουν αυτή την ασυνέχεια, προκειμένου να εξισορροπήσουν το εξωτερικό φορτίο. Προκειμένου να συμβεί αυτό, υπάρχει η ανάγκη μεγαλύτερης ενεργής διατομής.



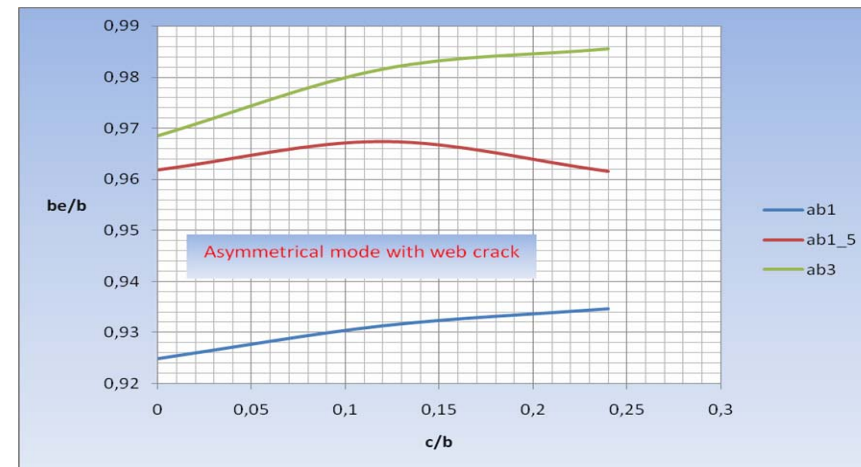
Σχήμα 8.4 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους ανά a/b για συμμετρική ρωγμή



Σχήμα 8.6 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους ανά a/b για ασύμμετρη ρωγμή

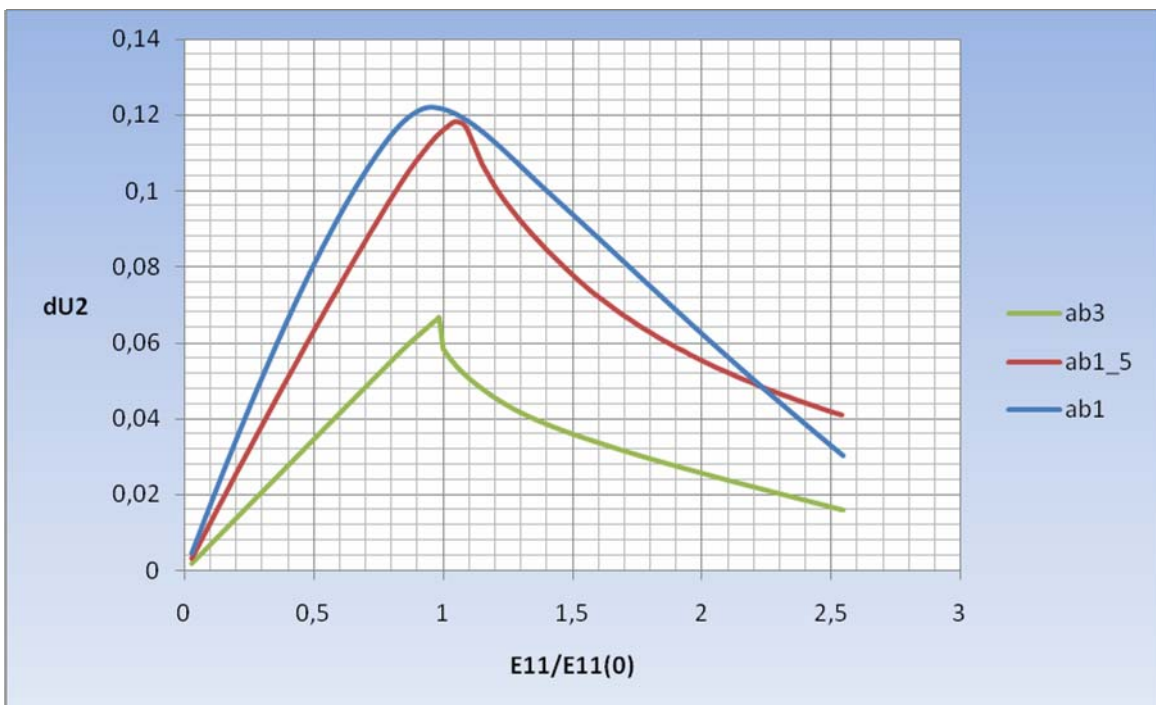


Σχήμα 8.5 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους ανά a/b για συμμετρική ρωγμή και ρωγμή ενισχυτικού



Σχήμα 8.7 Διακύμανση ισοδύναμου πλάτους ανά a/b για ασύμμετρη ρωγμή και ρωγμή ενισχυτικού

Αξιοσημείωτη είναι η διακύμανση του διαστήματος πλάτυνσης των μοντέλων ανά λόγο μήκους προς πλάτος (a/b). Όπως διαπιστώνουμε στο Σχήμα 8.8, η μορφή των καμπύλων διαφοροποιείται σημαντικά με την αύξηση του aspect ratio. Πιο συγκεκριμένα, τις μεγαλύτερες τιμές διαπιστώνουμε για $a/b=1$, μειούμενες σταδιακά με την αύξηση του λόγου μήκους προς πλάτος. Επιπρόσθετα παρατηρούμε ότι για $a/b>1$, μετά το άνω κοίλο της καμπύλης, αλλάζει έντονα η πτωτική κλίση. Συναφώς, εκτιμάται ότι το εν λόγω μετρούμενο μέγεθος επηρεάζεται σημαντικά από την απόσταση του ενισχυτικού με τις αφόρτιστες πλευρές, κατά τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε με τη μείωση του πλάτους να μειώνεται και η πλάτυνση του μοντέλου.



Σχήμα 8.8 Διακύμανση διαστήματος πλάτυνσης ανά aspect ratio

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΘΕΩΡΗΣΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΩΣ ΜΕΡΟΥΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑΣ

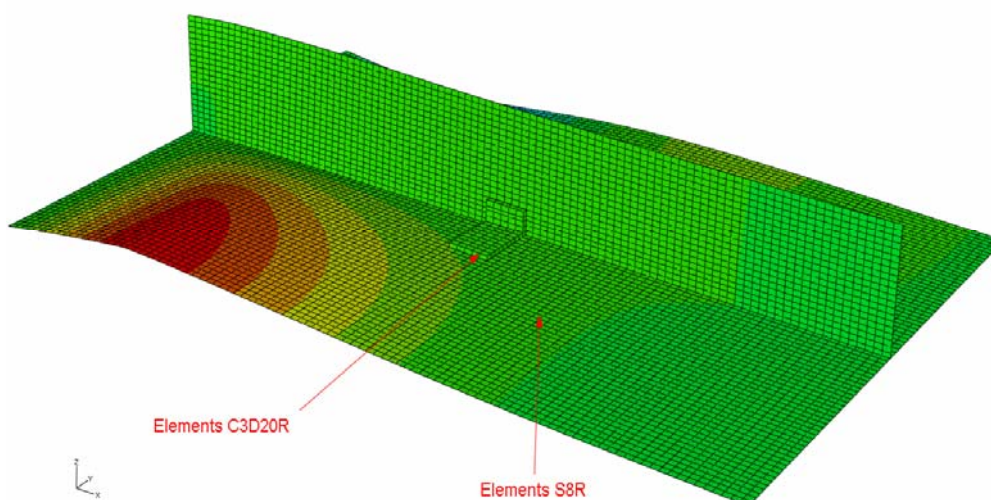
9.1 Γενικά

Τα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων που εξετασθήκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αφορούσαν το συνδυασμό ελάσματος – ενισχυτικού ως μέρους μιας μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας (σχήμα 3.6), παραλείποντας τα γειτονικά στοιχεία και επιβάλλοντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες για την καλύτερη προσομοίωση της κατασκευής. Γεννάται όμως το ερώτημα, αν η αριθμητική επίλυση του εν λόγω συνδυασμού, μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάδειξη της επίπτωσης στην αντοχή μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας ή υπάρχει μεγάλη αλληλεπίδραση από τα υπόλοιπα κατασκευαστικά στοιχεία, αν ενσωματωθούν στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων.

9.2 Ανάλυση ενισχυμένων ελασμάτων (stiffened plating) με πεπερασμένα στοιχεία

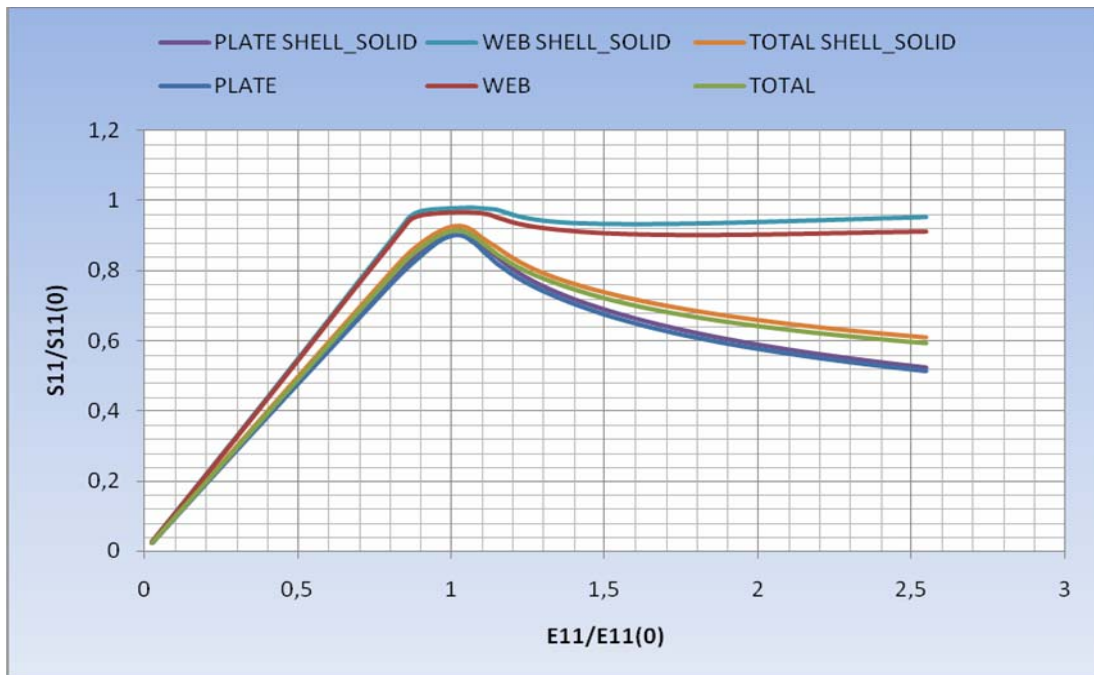
Για τον έλεγχο της επίδρασης των γειτονικών κατασκευαστικών στοιχείων στα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, απαιτείται η επανασχεδίαση των εν λόγω ενισχυμένων ελασμάτων με την προσθήκη επιπλέον ενισχυτικών και πλακών, διατηρώντας τον ίδιο λόγο μήκους προς πλάτος (aspect ratio). Η εισαγωγή όμως, επιπλέον πεπερασμένων στοιχείων δημιουργεί περιορισμούς όσον αφορά τον υπολογιστικό χρόνο και τις δυνατότητες ανάλυσης, δεδομένου του γεγονότος (που μπορεί να φανεί από τα στοιχεία αριθμητικής επίλυσης των μοντέλων) ότι, ήδη βρισκόμαστε σε υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις λόγω της χρησιμοποίησης των στοιχείων συνεχούς μέσου C3D20R.

Προκειμένου ξεπεραστεί το ανωτέρω πρόβλημα, χρησιμοποιήθηκε η εντολή *SHELL TO SOLID που παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης πεπερασμένων στοιχείων διαφορετικών τύπων [19]. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η σύνδεση των στοιχείων C3D20R με στοιχεία κελυφών S8R και με αυτή τη μέθοδο κρατήθηκαν οι υπολογιστικές απαιτήσεις σε χαμηλά επίπεδα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων σε αριθμητικές αναλύσεις των ίδιων μοντέλων με τη χρησιμοποίηση των δύο τύπων πεπερασμένων στοιχείων (shells – continuum) που πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενες εργασίες [17], παρατηρήθηκε από μικρή έως αμελητέα απόκλιση τιμών (ανάλογα με το λόγο μήκους προς πλάτος a/b). Στο σχήμα 9.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή των μοντέλων που θα αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο.



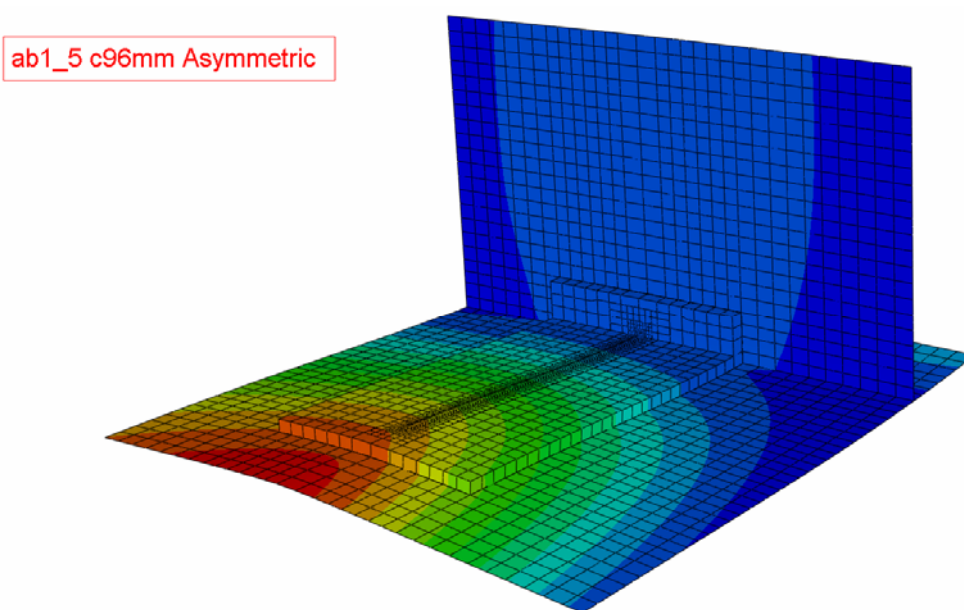
Σχήμα 9.1 Ανάλυση ενισχυμένου ελάσματος με σύνδεση διαφορετικού τύπου Στοιχείων

Απαραίτητη για την αξιοπιστία της περιγραφόμενης ανάλυσης ήταν η σύγκριση των μοντέλων αυτού του τύπου με τα αντίστοιχα που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Αρχικά ελέγχθηκε η περίπτωση του ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1.5$ άνευ ρωγμής που εμφανίζεται στο ανωτέρω σχήμα. Οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης των δύο (2) περιπτώσεων παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 9.2 (μεταβλητή $U3$). Όπως παρατηρούμε, η μορφή των εν λόγω καμπύλων για τις δύο (2) περιπτώσεις είναι αντίστοιχη, ενώ η απόκλιση των τιμών για το συγκεκριμένο έλασμα είναι σε ανεκτά επίπεδα (περίπου 1%), που εκτιμάται ότι οφείλεται στη διαφορετική μαθηματική θεωρία δόμησης των στοιχείων κελυφών.



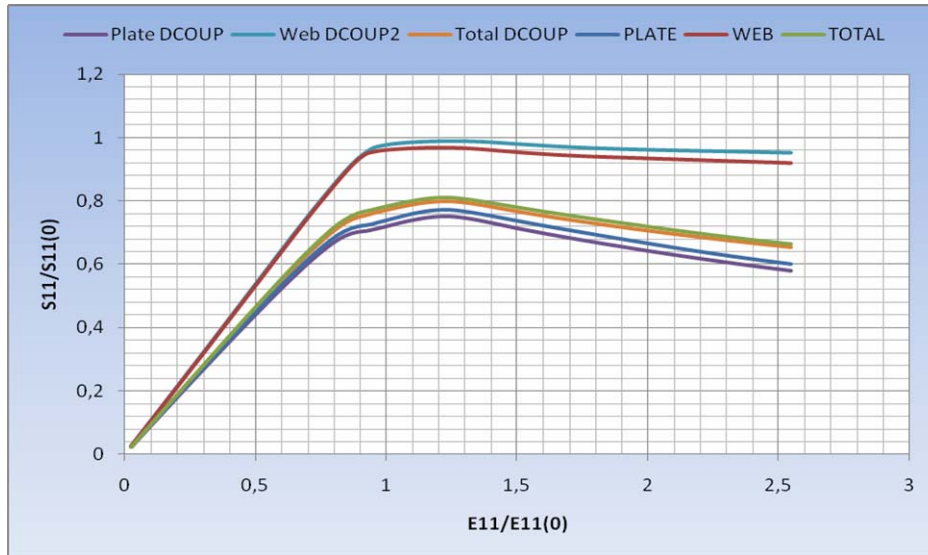
Σχήμα 9.2 Σύγκριση μειωτικών καμπύλων φόρτισης για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης

Στη συνέχεια ελέγχθηκε ο βαθμός επιρροής που επιφέρει στην ανάλυση, η εισαγωγή της ρωγμής στο ανωτέρω μοντέλο. Η σχεδίαση της περίπτωσης ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$ στην πλάκα (μοντέλο παραγράφου 6.8) απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 9.3



Σχήμα 9.3 Εισαγωγή ρωγμής σε μοντέλο διαφορετικού τύπου στοιχείων

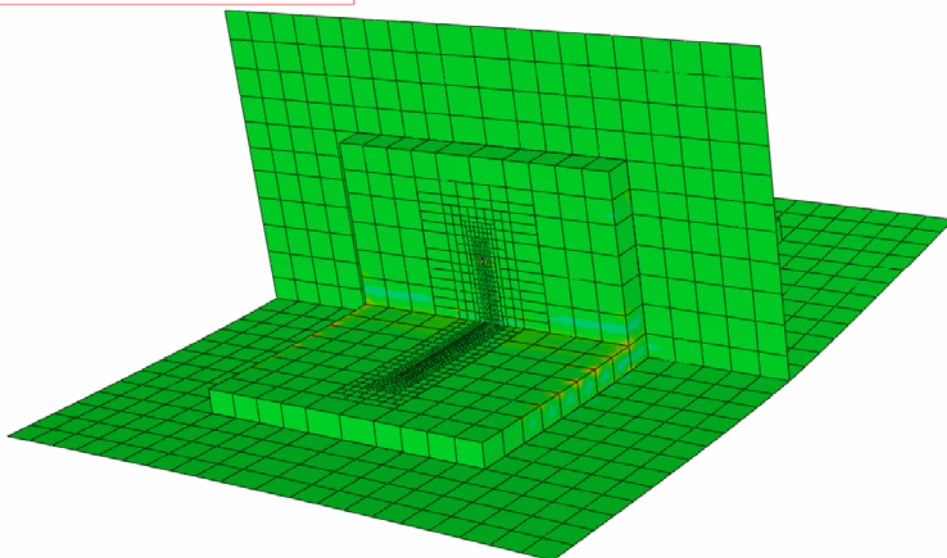
Από τη σύγκριση των μειωτικών καμπύλων φόρτισης για τους δύο (2) τύπους αναλύσεων, προκύπτει το ακόλουθο Σχήμα 9.4. Όπως διαπιστώνουμε οι καμπύλες για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης διατηρούν την ίδια μορφή και η απόκλιση τιμών είναι περίπου στο 1.2%.



Σχήμα 9.4 Σύγκριση μειωτικών καμπύλων φόρτισης για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης ελάσματος $a/b=1.5$ με την ύπαρξη ρωγμής

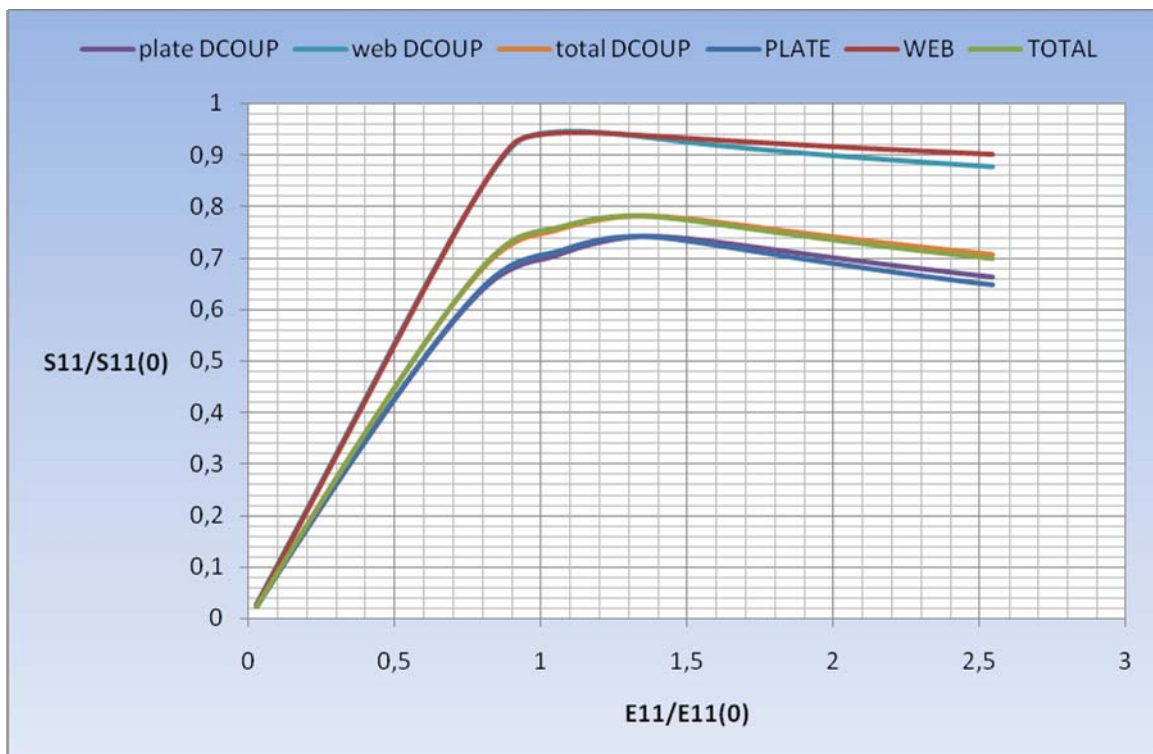
Συναφώς για την αξιοπιστία της διαδικασίας ελέγχθηκε η περίπτωση μοντέλου με διαφορετικό aspect ratio και συγκεκριμένα η περίπτωση ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1$ με ρωγμή συμμετρική στην πλάκα $c=72\text{mm}$ και επιπλέον ρωγμή στο ενισχυτικό (Σχήμα 9.5 – μεταβλητή Von Mises).

ab1 c72mm Symmetric with web crack



Σχήμα 9.5 Ανάλυση ενισχυμένου ελάσματος $a/b=1$ με ρωγμές $c=72\text{mm}/c_w=14.7\text{mm}$

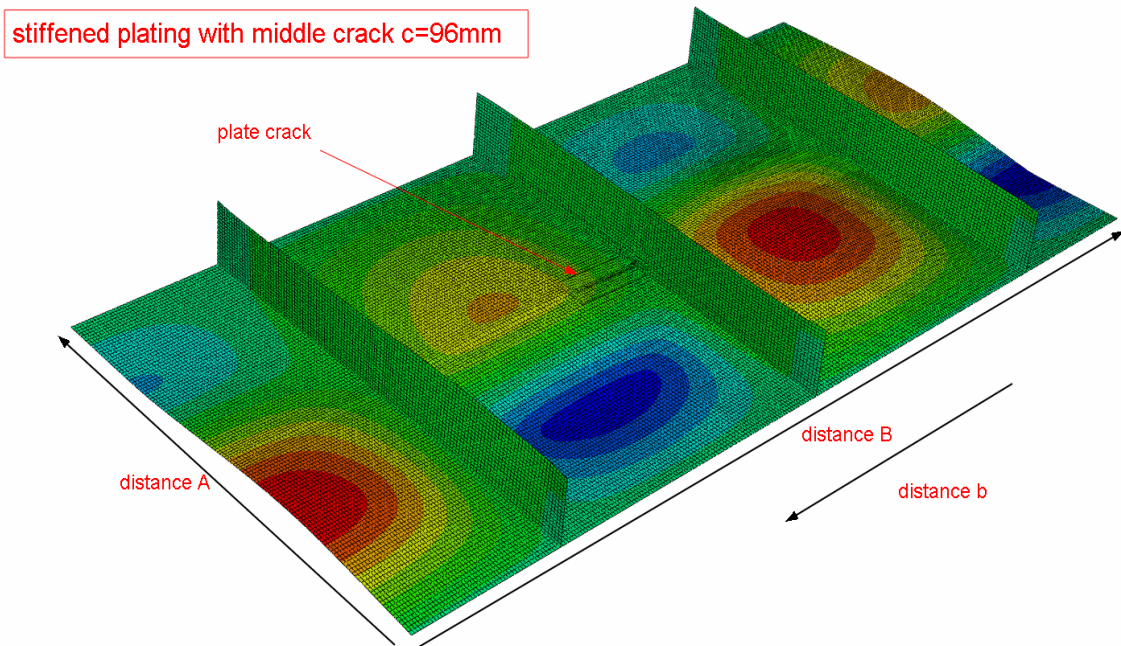
Από την ανωτέρω ανάλυση προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις, όσον αφορά την αντοχή της κατασκευής (Σχήμα 9.6). Όπως διαπιστώνουμε η ταύτιση των καμπύλων είναι καθολική, πλην της γραφικής παράστασης που αφορά το ενισχυτικό και η οποία παρουσιάζει μικρή διαφοροποίηση μετά το σημείο μέγιστης αντοχής. Η εν λόγω απόκλιση εκτιμάται ότι οφείλεται στη σχεδίαση του ενισχυτικού, καθώς τα στοιχεία C3D20R αυτού, συνδέονται με στοιχεία κελυφών S8R στην εγγύτητα της ασυνέχειας επί του ενισχυτικού και όχι τουλάχιστον τρία (3) στοιχεία μακριά από τη ρωγμή, συνθήκη η οποία τηρήθηκε στην πλάκα.



Σχήμα 9.6 Σύγκριση μειωτικών καμπύλων φόρτισης για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης ελάσματος $a/b=1$ με την ύπαρξη ρωγμής

Έχοντας καλύψει την αξιοπιστία της μεθόδου από πλευράς αποτελεσμάτων αντοχής, επιχειρήθηκε ο σχεδιασμός ελάσματος που φέρει περισσότερα του ενός ενισχυτικά, διατηρώντας σταθερό το λόγο μήκους προς πλάτος (a/b) για τα επί μέρους κατασκευαστικά στοιχεία. Κατά αυτό τον τρόπο, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του ενισχυμένου ελάσματος με ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$ στην πλάκα, ως μέρος μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας και πιο συγκεκριμένα ελάσματος που φέρει τρία (3) ενισχυτικά. Το εν λόγω μοντέλο απεικονίζεται στο

Σχήμα 9.7, του οποίου οι συνολικές διαστάσεις είναι $A=600\text{mm}$ και $B=1200\text{mm}$ ($b=400\text{mm}$).

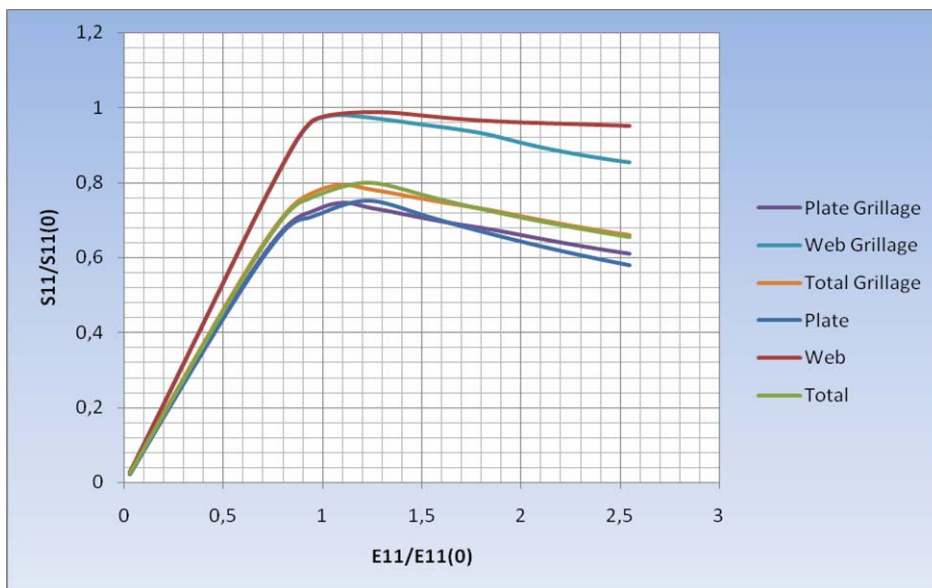


Σχήμα 9.7 Ανάλυση ελάσματος τριών (3) ενισχυτικών επί μέρους λόγων $a/b=1.5$ με ασύμμετρη ρωγμή $c=96\text{mm}$

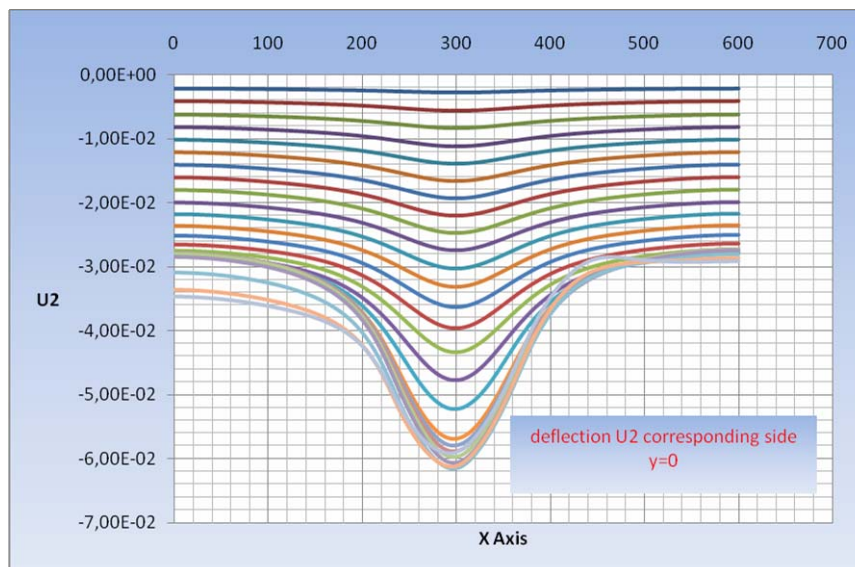
Οι συνοριακές συνθήκες στις φορτισμένες πλευρές ήταν αντίστοιχες με τις αναλύσεις των απλών μοντέλων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, όπως επίσης και στις αφόρτιστες πλευρές, θεωρώντας ότι υπάρχει προέκταση της κατασκευής προς άλλα ομοειδή κατασκευαστικά στοιχεία. Η σύγκριση από πλευράς αντοχής του τμήματος που φέρει τη ρωγμή και βρίσκεται ενσωματωμένο στο μοντέλο του ανωτέρω σχήματος, με το αντίστοιχο (stand alone) που αναλύθηκε στην παράγραφο 6.8, απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 9.8.

Από την ανάλυση του εν λόγω σχήματος παρατηρούμε μια διαφοροποίηση στη μορφή των καμπύλων αντοχής με έμφαση στη γραφική παράσταση του ενισχυτικού, η οποία προφανώς επηρεάζει και τις αντίστοιχες της πλάκας και της συνολικής. Εκτιμάται λοιπόν, ότι η επίδραση των παράπλευρων κατασκευαστικών στοιχείων είναι σημαντική και επηρεάζει την αριθμητική λύση. Πέραν αυτού, όμως η μέγιστη αντοχή του εξεταζόμενου στοιχείου παραμένει η ίδια (απόκλιση 0.06%), πλην όμως πραγματοποιείται σε διαφορετικό στάδιο συμπίεσης.

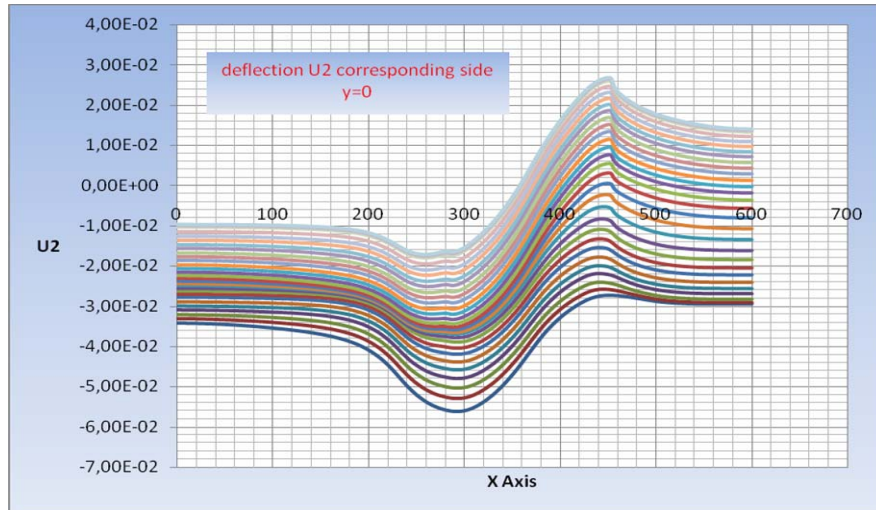
Συναφώς με τα ανωτέρω τίθεται ένας προβληματισμός όσον αφορά τη συνοριακή συνθήκη σταθερής μετατόπισης των κόμβων κατά τον άξονα y , που εφαρμόστηκε στις αφόρτιστες πλευρές στα μοντέλα που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Προς αποσαφήνιση του εν λόγω προβληματισμού ελέγχθηκε στο μοντέλο πολλαπλών ενισχυτικών, η διακύμανση των μετατοπίσεων U_2 των κόμβων που αντιστοιχούν στις αφόρτιστες πλευρές του μονού ενισχυμένου ελάσματος. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 9.9 και 9.10 ($y=0$), 9.11 και 9.12 ($y=b$).



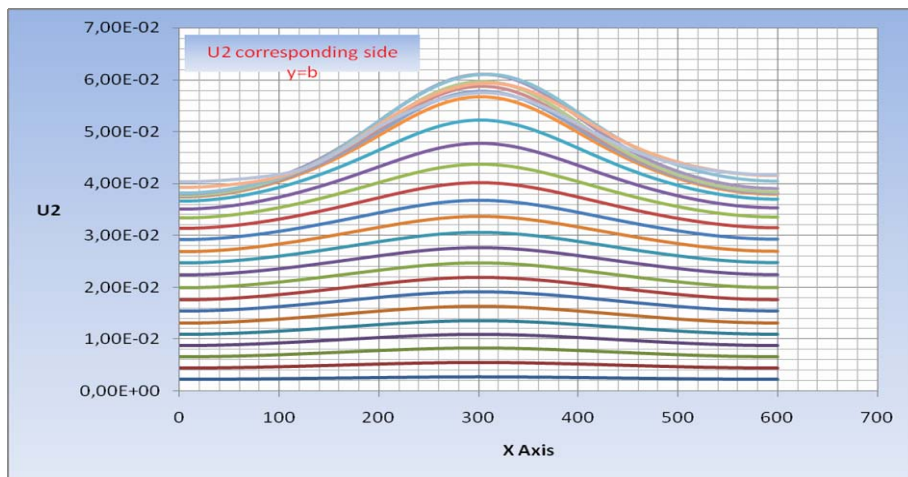
Σχήμα 9.8 Σύγκριση μειωτικών καμπύλων φόρτισης για τις δύο (2) περιπτώσεις ανάλυσης ελάσματος $a/b=1.5$ (stand alone – stiffened plating)



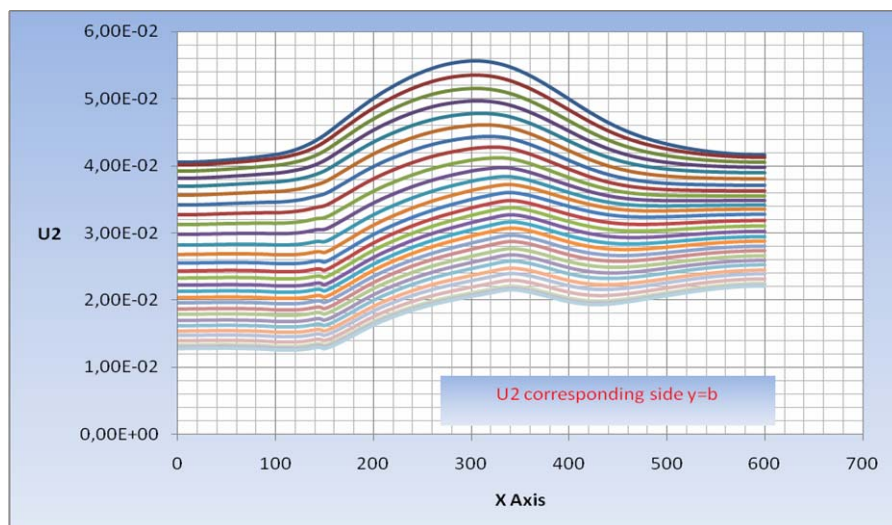
Σχήμα 9.9 Μεταβολή U_2 στους κόμβους που αντιστοιχούν στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ μέχρι του σημείου μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος



Σχήμα 9.10 Μεταβολή U2 στους κόμβους που αντιστοιχούν στην αφόρτιστη πλευρά $y=0$ μετά το σημείο μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος

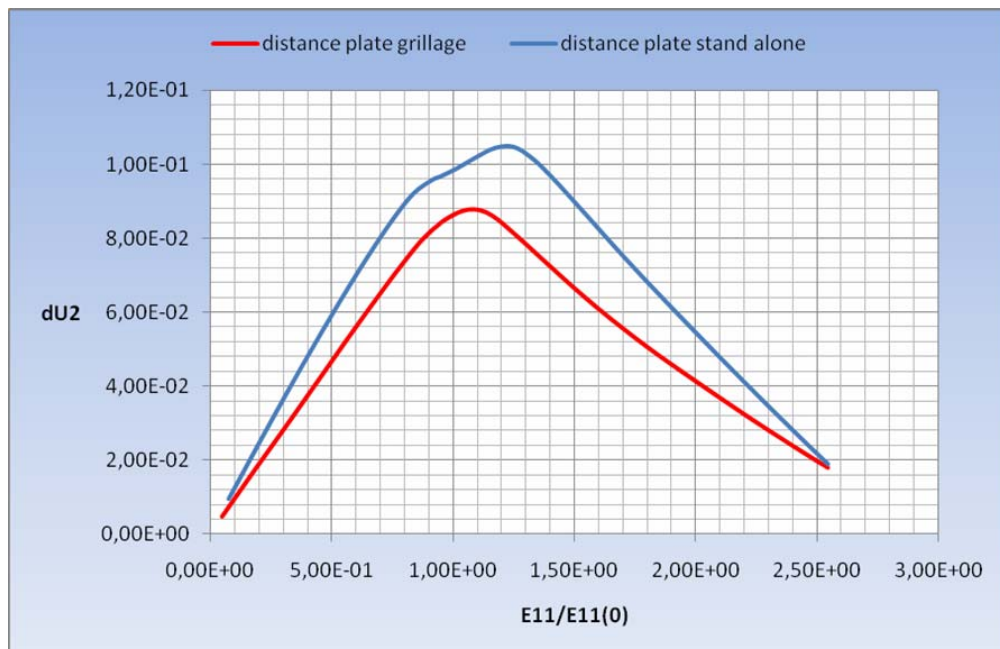


Σχήμα 9.11 Μεταβολή U2 στους κόμβους που αντιστοιχούν στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ μέχρι του σημείου μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος



Σχήμα 9.12 Μεταβολή U2 στους κόμβους που αντιστοιχούν στην αφόρτιστη πλευρά $y=b$ μετά το σημείο μέγιστης αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από τα ανωτέρω σχήματα, η συνοριακή συνθήκη που εφαρμόζουμε στο μονό ενισχυμένο έλασμα, διαφοροποιείται σημαντικά στους αντίστοιχους κόμβους στο έλασμα ιδίων διαστάσεων με πολλαπλά ενισχυτικά, ιδιαίτερα όσο πλησιάζουμε το φορτίο μέγιστης αντοχής και κατόπιν. Αν υπολογίσουμε το μέσο διάστημα πλάτυνσης του εξεταζόμενου μοντέλου και το συγκρίνουμε με το αντίστοιχο του σχήματος 6.71, προκύπτει το ακόλουθο Σχήμα 9.13. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι το ενισχυμένο έλασμα επιμηκύνεται λιγότερο κατά τον άξονα των y , που κατ' επέκταση θα επιφέρει διαφοροποιήσεις και στις υπόλοιπες μεταβλητές του μοντέλου. Μία προφανής μεταβλητή που διαφοροποιείται αν συγκρίνουμε τα σχήματα 6.102 (περίπτωση ασύμμετρης ρωγμής $c=96\text{mm}$) με το σχήμα 9.7, είναι το βέλος κάμψης U_3 και η γένει παραμόρφωση του μοντέλου.



Σχήμα 9.13 Διαφοροποίηση διαστήματος πλάτυνσης φόρτισης για τις περιπτώσεις ανάλυσης ελάσματος $a/b=1.5$ (stand alone – stiffened plating)

9.3 Συμπεράσματα – Αξιολόγηση των μεθόδων

Από την ανάλυση των ανωτέρω μεθόδων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(1) Κατά την ανάλυση του μονού ενισχυμένου ελάσματος υπεισέρχονται σφάλματα, όσον αφορά τη συνοριακή συνθήκη σταθερής μετατόπισης u_y στους κόμβους της αφόρτιστης πλευράς, καθώς όπως αποδείχθηκε ανωτέρω, ουσιαστικά δεν ισχύει, τη στιγμή που υπάρχει επίδραση από τα γειτονικά στοιχεία και η οποία οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση των μεταβλητών της ανάλυσης. Συναφώς εκτιμάται ότι η μεγάλη διαφοροποίηση της μεταβλητής U_2 στους αντίστοιχους κόμβους του ελάσματος πολλαπλών ενισχυτικών σε σχέση με το μονό ενισχυμένο έλασμα, ενισχύεται από την ύπαρξη της ρωγμής στο κέντρο της πλάκας, όπως επίσης και από το γεγονός ότι η παραμόρφωση του ενισχυτικού δεν είναι συμμετρική ως προς άξονα συμμετρίας $x=a/2$, κάτι που έχει παρατηρηθεί μόνο για έλασμα με λόγο μήκους προς πλάτος $a/b=1.5$.

(2) Η εν λόγω συνοριακή συνθήκη, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.4, κρίθηκε αναγκαία αφενός για λόγους συμμετρίας με την υπόλοιπη κατασκευή, αφετέρου για το γεγονός ότι οδηγεί σε πιο «απαισιόδοξα» αποτελέσματα από άποψη αντοχής της κατασκευής, καθώς ενισχύει το έργο των μεμβρανικών τάσεων. Από την εξέταση του σχήματος 9.8 διαπιστώσαμε ότι η τιμή της μέγιστης αντοχής ήταν ταυτόσημη για τις δύο (2) περιπτώσεις μοντέλων, γεγονός που σημαίνει ότι νομιμοποιείται η ανάλυση του μονού ενισχυμένου ελάσματος για τη μέτρηση του υπολοίπου κατασκευαστικής αντοχής.

(3) Εκτιμάται ότι όσο οι ιδιομορφές λυγισμού θα απομακρύνονται από τη συμμετρική παραμόρφωση τόσο ως προς το ενισχυτικό, όσο και ως προς τον άξονα συμμετρίας $x=a/2$ (όπως στην περίπτωση των μοντέλων του παρόντος κεφαλαίου), τόσο θα απομακρυνόμαστε από την εν λόγω επιβαλλόμενη συνοριακή συνθήκη στις αφόρτιστες πλευρές του μονού ενισχυμένου ελάσματος και θα οδηγούμαστε σε διαφορετικά αποτελέσματα. Για την περαιτέρω διερεύνηση του εν λόγω φαινομένου, εκτελέστηκε η αριθμητική ανάλυση μοντέλου με τρία (3) ενισχυτικά και λόγο μήκους προς πλάτος των επι μέρους τμημάτων $a/b=1$ (κατ' αντιστοιχία με το μοντέλο $a/b=1.5$ άνευ ρωγμής) και στο οποίο παρατηρήθηκε πολύ μικρή έως αμελητέα απόκλιση της μεταβλητής U_2 στις αφόρτιστες πλευρές (παράθεση αποτελεσμάτων ανάλυσης δεν περιλαμβάνονται στο παρόν κείμενο). Πλην όμως απαιτούνται επιπλέον αναλύσεις για την στοιχειοθέτηση της εν λόγω παρατήρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

10.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, εξετάστηκε ο ελαστο – πλαστικός λυγισμός και η κατάρρευση ρηγματοποιημένων ενισχυμένων ελασμάτων με λόγους μήκους προς πλάτος $a/b=1, 1.5$ και 3 , που έφεραν διαμπερή ρωγή ανοίγματος 0.3mm στην πλάκα, με λόγο μήκους ρωγμής προς πλάτος $c/b=0.12$ και 0.24 , με αλλαγή της θέσεως της ρωγμής ως προς το ενισχυτικό (συμμετρική – ασύμμετρη περίπτωση). Επιπρόσθετα εισήχθη στα ανωτέρω μοντέλα και ρωγή στο ενισχυτικό με σταθερό λόγο μήκους ρωγμής προς ύψος ενισχυτικού $c_w/h_w=0.12$ στο κέντρο αυτού ($x=a/2$). Η ανάλυση των ενισχυμένων ελασμάτων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Η αρχική παραμόρφωση που επιβλήθηκε στα μοντέλα αφορούσε μόνο γεωμετρικές μετατοπίσεις (άνευ παραμενουσών τάσεων) με ημιτονοειδή μορφή ενός ημικύματος κατά το διάμηκες. Συναφώς όσον αφορά τις εν λόγω ατέλειες, ελέγχθηκαν και οι περιπτώσεις ευαισθησίας της μέγιστης αντοχής στη συνολική μετατόπιση της κατασκευής (global deflection) για $a/b=1$, καθώς επίσης και της μορφής των κυματώσεων για $a/b=3$. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ρωγή στην πλάκα επιδρά δραστικά στη μέγιστη αντοχή της κατασκευής μειώνοντας αυτή κατά ποσοστό, που εξαρτάται αφενός από τη θέση της ρωγμής (ιδιαίτερα για $a/b=1$), αφετέρου από το μήκος αυτής. Επιπρόσθετα η καμπύλη μεταβολής της μέγιστης αντοχής σε σχέση με το aspect ratio για την περίπτωση ανέπαφου ενισχυμένου ελάσματος διαφοροποιείται σημαντικά με την εισαγωγή της ρωγμής.

- Η μορφή της παραμόρφωσης της κατασκευής εξαρτάται κυρίως από τα στοιχεία (θέση – μήκος) της ρωγμής για $a/b > 1$. Ιδιαίτερα για $a/b = 3$ τα χαρακτηριστικά της ρωγμής καθορίζουν την τελική μορφή παραμόρφωσης της κατασκευής. Επιπρόσθετα τα εν λόγω στοιχεία της ρωγμής μεταβάλλουν χρονικά και την ενεργοποίηση διαφόρων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, όπως το σημείο μέγιστης αντοχής, τη δημιουργία κυμάτων και την έναρξη επαφής των επιφανειών της ρωγμής.
- Η δημιουργία των ημικυμάτων στην πλάκα αποτελεί την τελευταία αντίσταση που ενεργοποιεί η κατασκευή ενάντια στο εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο. Ιδιαίτερα τονίζεται ότι η εισαγωγή αρχικής μετατόπισης που είναι αντίθετη στην πρώτη ιδιομορφή λυγισμού επιφέρει στην κατασκευή, αύξηση τόσο της αρχικής ακαμψίας όσο και της συνολικής αντοχής. Το γεγονός αυτό πιστοποιείται από την αύξηση των υπολοίπων αντοχής κατά την αύξηση του λόγου μήκους προς πλάτος ($a/b > 1$), φαινόμενο που είναι σε πλήρη αντιστοιχία με παλαιότερες έρευνες [18].
- Με την αύξηση των κυματώσεων ($n=3,5$) όμως για λόγο $a/b=3$, παρατηρούμε μια δραστική μείωση των υπολοίπων αντοχής της κατασκευής, ιδιαίτερα στην αντισυμμετρική μορφή κυματώσεων στα τμήματα της πλάκας εκατέρωθεν του ενισχυτικού.
- Σημαντικό ρόλο στη μέγιστη αντοχή διαδραματίζει η μετατόπιση της κατασκευής στην περιοχή κάτωθεν ενισχυτικού (global deflection), καθώς με την αύξηση του εν λόγω μεγέθους οδηγούμαστε σε πτωτικές τάσεις των υπολοίπων αντοχής (με αναφορά σε $a/b=1$).
- Η κατανομή του φορτίου στα δύο τμήματα της πλάκας διαφοροποιείται σημαντικά με τη θέση και το μήκος της ρωγμής σε αυτή. Συγκεκριμένα παρατηρείται μια εναλλαγή στην κατανομή του φορτίου μεταξύ των

δύο τμημάτων και ανάλογα με τη φάση που βρίσκεται η κατασκευή (π.χ. ελαστικός λυγισμός, ενεργοποίηση κυματώσεων, επαφή ρωγμής), όπως αναλυτικά παρατέθηκε στα σχετικά κεφάλαια.

- Υφίσταται σχετική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα κατά τη σύγκριση της ανάλυσης του μονού ενισχυμένου ελάσματος (stand alone) και του αντίστοιχου που αποτελεί μέρος μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας. Η εν λόγω διαφοροποίηση εκτιμάται ότι προέρχεται από τη συνθήκη σταθερούς μετατόπισης u_y που εφαρμόζουμε στους κόμβους των αφόρτιστων πλευρών του μονού ενισχυμένου ελάσματος, καθώς όπως αποδείχθηκε στην παρούσα εργασία, η επιρροή από τα γειτονικά κατασκευαστικά στοιχεία είναι σημαντική. Συναφώς, εκτιμάται ότι η ευαισθησία στη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων θα αυξάνεται με την εγγύτητα των ενισχυτικών, με άλλα λόγια με την αύξηση του aspect ratio. Πέραν των ανωτέρω όμως, τα αποτελέσματα της ανάλυσης του μονού ενισχυμένου ελάσματος μπορούν να μας καθοδηγήσουν σε σχετικά ορθά συμπεράσματα, όσον αφορά τα επίπεδα των υπολοίπων αντοχής που διαθέτει έλασμα που φέρει ρωγμή, ως μέρος μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας.

10.2 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Ως επακόλουθο της παρούσας εργασίας, προτείνονται τα ακόλουθα που εκτιμάται απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση:

- Η εισαγωγή παραμενουσών τάσεων στα μοντέλα που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία για την καταγραφή της επίπτωσης τόσο στην μέγιστη αντοχή, όσο και στην τελική μορφή παραμόρφωσης.
- Η αλλαγή του ανοίγματος της ρωγμής σε τιμές μεγαλύτερες του 0.3 mm και σύγκριση των διαφοροποιήσεων σε σχέση με τις εξετασθείσες

περιπτώσεις του παρόντος. Προτεινόμενη τιμή ανοίγματος ρωγμής 0.6mm.

- Η αλλαγή του προσανατολισμού της ρωγμής στην πλάκα και συγκεκριμένα σε παράλληλη στο ενισχυτικό καθώς και σε υπό γωνία (με μεταβολή σε ένα εύρος τιμών με σταθερό μήκος ρωγμής). Συναφώς όσον αφορά την παράλληλη ρωγμή προτείνεται η διατήρηση των ίδιων λόγων c/b που εξετασθήκαν στο παρόν για την περαιτέρω σύγκριση.
- Ο έλεγχος επιρροής του λόγου c_w/h_w στη μέγιστη αντοχή του ενισχυμένου ελάσματος, τη στιγμή που η πλάκα είναι ανέπαφη. Προτείνονται οι τιμές για τον ανωτέρω λόγο να κυμαίνονται από 0.12 – 0.48.
- Η εισαγωγή κυματώσεων και σε ενισχυμένα ελάσματα με $a/b < 3$ για τον έλεγχο του βαθμού ευαισθησίας της μέγιστης αντοχής των μοντέλων στη νέα μορφή αρχικών μετατοπίσεων.
- Η δυναμική ανάλυση των μοντέλων που εξετασθήκαν στο παρόν, με τη διαμέριση του φορτίου συμπίεσης σε αριθμό βημάτων κατά τα οποία θα επιβάλλεται κύκλος φόρτισης και το κάθε στάδιο θα έπεται μετά την επίτευξη ισορροπίας του προηγούμενου. Ακολουθώς, προτείνεται η καταγραφή των αντίστοιχων μεταβλητών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και περαιτέρω αξιοποίηση αυτών, πάντα σε σχέση με την παρούσα εργασία.
- Η μελέτη – σύγκριση τιμών αντοχής του μονού ενισχυμένου ελάσματος με αντίστοιχο, το οποίο θα αποτελεί μέρος μεγαλύτερης κατασκευαστικής λεπτομέρειας, ιδιαίτερα για λόγους $a/b > 1.5$. Συναφώς προτείνεται η μεταβολή της θέσης της ρωγμής (σταθερού μήκους) σε πλαίσια (grillages) διαφόρων λόγων μήκους προς πλάτος

πλακών (aspect ratio) και καταγραφή της επιρροής στη μέγιστη αντοχή σε σχέση με τον αριθμό των ενισχυτικών στο έλασμα και την απόσταση της ρωγμής από τις αφόρτιστες πλευρές του πλαισίου.

- Η προσθήκη σημείων διάβρωσης (localized corrosion) στα ρηγματωποιημένα ενισχυμένα ελάσματα και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της παρούσας εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Στοιχεία Μεταλλουργίας Τόμος Ι, Γ. Σταμουλά [1987]
- [2] Ship Construction, D.J.Eyres [2001]
- [3] Marine Structural Design, Yong Bai [2003]
- [4] Βασική Θεωρία Πλοίου Τόμος Ι, K.J.Rawson and E.C.Tupper [2002]
- [5] Ultimate Limit State Design of Steel Plated Structures, J.K.Paik and A.K.Thayamballi [2003]
- [6] RINA, Strength and stiffness of ships' plating under in – plane compression and tension, C.S.Smith, N.Anderson, J.C.Chapman, P.C.Davidson and P.J.Dowling [1987]
- [7] DNV-RP-C201: Buckling Strength of Plated Structures [2002]
- [8] DNV-RP-C102: Structural Design of Offshore Ships [2002]
- [9] Ultimate strength of cracked plate elements under axial compression or tension, Jeom Kee Paik, Y.V. Satish Kumar, Jae Myung Lee [2004]
- [10] NACA TN-3781: Handbook of structural stability, Buckling of flat plates, George Gerard and Herbert Becker [1957]
- [11] Flexural-Torsional Elasto-plastic buckling in Flat Stiffened Plating Using Dynamic Relaxation, Part 1: Theory, P. A. Caridis and P. A. Frieze, [1988]
- [12] Ultimate strength formulations for stiffened panels under combined axial load, in-plane bending and lateral pressure: a benchmark study, Jeom Kee Paik and Bong Ju Kim [2001]
- [13] SNAME, Principles of Naval Architecture Volume I: Stability and Strength, Edward V. Lewis [1988]
- [14] Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, Μ.Παπαδρακάκης [2001]
- [15] Η μεταλλική κατασκευή του πλοίου, Π.Καρύδης [2000]
- [16] The effect of aspect ratio on the elastoplastic response of stiffened plates loaded in uniaxial edge compression, M. Toullos and P.A. Caridis [2002]
- [17] Ανάλυση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς ενισχυμένων ελασμάτων υπό μονοαξονικό φορτίο, με την παρουσία ή μη, ρωγμών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Ι.Νείλας [2006]

- [18] Ultimate load behaviour of plates in Compression, P.A.Frieze, P.J.Dowling and R.E.Hobbs [1977]
- [19] Abaqus Analysis User's Manual
- [20] A numerical investigation of tripping, Jeom Kee Paik, A.K.Thayamballi and Won Ho Lee [1998]
- [21] EN 1993-1-5:2004 (Plated structural elements)
- [22] Estimation of ultimate strength of continuous stiffened panel under combined transverse thrust and lateral pressure Part 1: Continuous plate, Masahiko Fujikubo Tetsuya Yao, Mohammad Reza Khedmati, Minoru Harada and Daisuke Yanagihara [2005]
- [23] Estimation of ultimate strength of continuous stiffened panel under combined transverse thrust and lateral pressure Part 1: Continuous stiffened panel, Masahiko Fujikubo Tetsuya Yao, Mohammad Reza Khedmati, Minoru Harada and Daisuke Yanagihara [2006]
- [24] Buckling of stiffened steel plates—a parametric study G.Y. Grondin, A.E. Elwi, J.J.R. Cheng [1998]
- [25] Buckling strength of metal structures, Friedrich Bleich [1952]
- [26] Theory of Elastic Stability, Stephen P. Timoshenko [1963]
- [27] RINA, Strength of stiffened plating under combined compression and lateral pressure, C.S.Smith, N.Anderson, J.C.Chapman, P.C.Davidson, P.J.Dowling [1991]
- [28] The new simple design equations for the ultimate compressive strength of imperfect stiffened plates, Özgür Özgüç, Purnendu K. Das and Nigel Barltrop [2006]
- [29] The Finite Element Method: A Practical course, G. R. Liu and S.S. Quek [2003]
- [30] SSC-399, Strength and stability of stiffened plate components, Q.Chen, Zimmerman, D.D.DeGeer, B.W.Kennedy [1997]
- [31] Stiffened Steel Plates under Compression and Bending, G.Y. Grondin, Q.Chen, A.E. Elwi, J.J.R. Cheng [1997]
- [32] Buckling of stiffened steel plates—a parametric study, G.Y. Grondin, A.E. Elwi, J.J.R. Cheng [1998]