

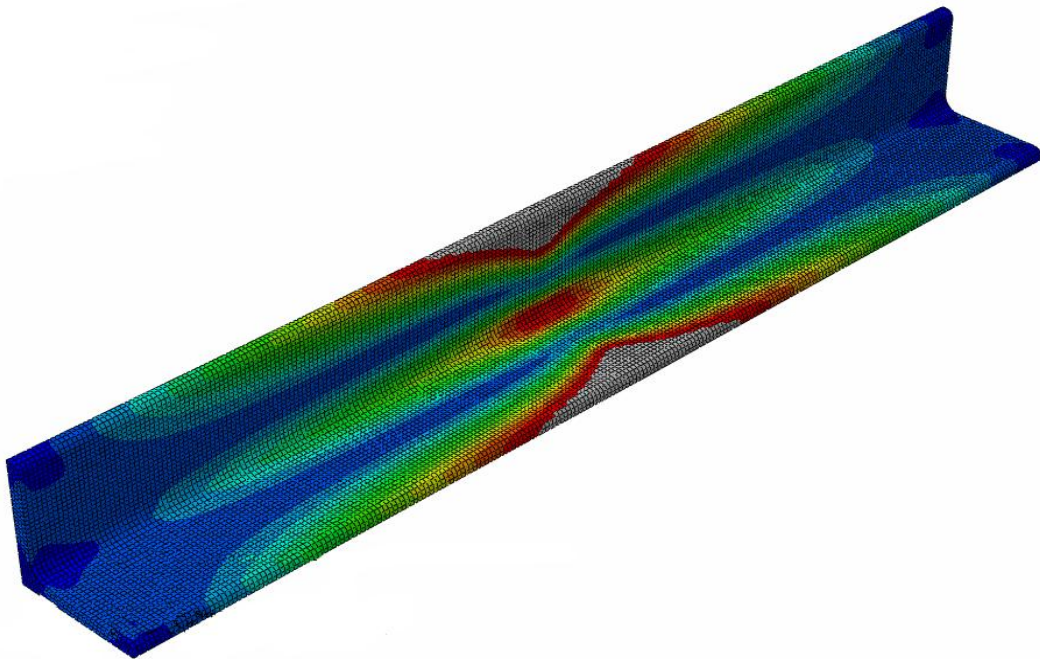


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Αντοχή γωνιακών σε κάμψη και θλίψη



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Χ. Κριαράς

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Ιούλιος 2012

ΕΜΚ ΔΕ 2012/17

Κριαράς Ι. Χ. (2012).
Αντοχή γωνιακών σε κάμψη και θλίψη
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2012/17
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Kriaras I. X. (2012).
Angle bending and compression resistance
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2012/17
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
1 Κατάταξη διατομών κατά τον ευρωκώδικα 3.....	6
1.1 Γενικά.....	6
1.2 Κατάταξη διατομών	6
1.2.1 Βασικές αρχές	6
1.2.2 Κατάταξη	6
1.2.3 Επιλογή διατομών	7
2 Κάμψη γωνιακών διατομών	8
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Μόρφωση μοντέλου στο πρόγραμμα Abaqus για κάμψη	8
2.3 Αποτελέσματα κάμψης.....	12
2.4 Συμπεράσματα.....	38
3 Θλίψη γωνιακών διατομών.....	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Μόρφωση μοντέλου στο πρόγραμμα Abaqus για θλίψη.....	44
3.3 Αποτελέσματα θλίψης.....	46
3.4 Συμπεράσματα.....	60
4 Συμπεράσματα.....	63
5 Βιβλιογραφία.....	64
Παράρτημα Α. Πίνακας βασικών χαρακτηριστικών γωνιακών διατομών.....	65

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2011/17

Αντοχή γωνιακών σε κάμψη και θλίψη

Κριαράς Ι. Χ. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η αντοχή των γωνιακών διατομών σε κάμψη και θλίψη σε σύγκριση με τους περιορισμούς που θέτει ο Ευρωκώδικας EC3. Στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφεται η κατάταξη διατομών και ειδικότερα των γωνιακών σε κατηγορίες σύμφωνα με τα κείμενα του Ευρωκώδικα. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύονται οι διατάξεις του Ευρωκώδικα σχετικά με τα γωνιακά στοιχεία σε κάμψη και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξακρίβωση των καμπτικών αντοχών των γωνιακών σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύονται οι ως άνω διατάξεις αυτή τη φορά σχετικά με τη θλίψη των γωνιακών στοιχείων και η διαδικασία που ακολούθηθηκε για την εξακρίβωση των θλιπτικών αντοχών των γωνιακών σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στο τέταρτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την σύγκριση των θεωρητικών αντοχών των γωνιακών με τις αντοχές που εξάχθηκαν από τις αναλύσεις του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων σε κάμψη και θλίψη.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔE 2012/17

Angle bending and compression resistance

Kriaras I. X. (supervised by Vayas I.)

Abstract

This current diploma thesis investigated the strength of the angle sections in bending and compression compared to the limitations set by Eurocode EC3.

The first chapter describes the classification of steel sections and particularly categorization of steel angle sections according to the provisions of the Eurocode.

The second chapter compares the bending strength of members with angle sections calculated with the provisions of Eurocode 3 and the results obtained for identical angle members from numerical analysis performed with the use of the finite element program ABAQUS.

In the third chapter the strength of a stub column in compression is calculated again with the provisions of Eurocode 3 and through numerical analysis. The results are compared and conclusions are drawn in regard to the classification of angle sections..

The fourth chapter summarizes the conclusions drawn by comparing the theoretical strength of the angles with the ones obtained from the finite elements analysis in bending and compression.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, κύριο Ιωάννη Βάγια, για την καθοδήγησή του και την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Μαρία-Ελένη Δάσιου για την πολύτιμη βοήθειά της και την υπομονή της μέχρι την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

1 Κατάταξη διατομών κατά τον ευρωκώδικα 3

1.1 Γενικά

Η κατάταξη των διατομών αναφέρεται στην παράγραφο 5.5 του ευρωκώδικα 3 (EC3) σύμφωνα με την οποία οι γωνιακές διατομές κατατάσσονται σε κατηγορία 3 ή 4. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, στα κεφάλαια του Ευρωκώδικα 3 (EC3), η κατάταξη των διατομών δείχνει την ικανότητα της διατομής να αποφύγει τον τοπικό λυγισμό.

1.2 Κατάταξη διατομών

1.2.1 Βασικές αρχές

Ο ρόλος της κατάταξης των διατομών είναι να αναγνωρίσει την έκταση στην οποία η αντοχή και η ικανότητα στροφής των διατομών περιορίζεται από την αντοχή τους σε τοπικό λυγισμό.

1.2.2 Κατάταξη

Τέσσερις κατηγορίες διατομών καθορίζονται ως εξής:

- Διατομές κατηγορίας 1 είναι εκείνες που μπορούν να σχηματίσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη από την πλαστική ανάλυση δυνατότητα στροφής χωρίς μείωση της αντοχής τους.
- Διατομές κατηγορίας 2 είναι εκείνες που μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, αλλά έχουν περιορισμένη δυνατότητα στροφής λόγω τοπικού λυγισμού.
- Διατομές κατηγορίας 3 είναι εκείνες στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους, υποθέτοντας ελαστική κατανομή των τάσεων, μπορεί να φτάσει την αντοχή διαρροής, αλλά τοπικός λυγισμός είναι πιθανόν να εμποδίσει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.
- Διατομές κατηγορίας 4 είναι εκείνες στις οποίες ο τοπικός λυγισμός θα συμβεί πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής.

Οι ροπές αντοχής για τις τέσσερις κατηγορίες διατομών είναι:

Κατηγορίες 1 και 2: η πλαστική ροπή ($M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y$)

Κατηγορία 3: η ελαστική ροπή ($M_{el} = W_{el} \cdot f_y$)

Κατηγορία 4: η ροπή τοπικού λυγισμού ($M_0 < M_{el}$)

Ακολουθεί ο πίνακας βάσει του οποίου κατατάσσονται οι γωνιακές διατομές σε κατηγορίες, σύμφωνα με το θλιβόμενο πέλμα και τον κορμό.

<p>Αναφορά επίσης στα “Προεξέχοντα πέλματα” (βλέπε φύλο 2 από 3)</p>			<p>Δεν ισχύει για γωνιακά σε συνεχή επαφή με άλλα στοιχεία</p>
Κατηγορία	Διατομή σε θλίψη		
Κατανομή τάσεων στη διατομή (θλίψη θετική)			
3	$h/t \leq 15\varepsilon; \quad \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$		

Σχήμα 1.1: Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα γωνιακά στοιχεία

1.2.3 Επιλογή διατομών

Στην διπλωματική εργασία εξετάστηκαν 20 ισοσκελείς γωνιακές διατομές με πλάτος πέλματος h και πάχος t για χάλυβα S355 όπου οι 6 διατομές ανήκουν στην κατηγορία 4 και 14 στην κατηγορία 3.

Πίνακας 1.1: Κατάταξη γωνιακών διατομών

Διατομή	Πλάτος πέλματος h(cm)	Πάχος πέλματος t(cm)	h/t	15ε	ε(S355)	Κατάταξη			
							Χάλυβας S355	Χάλυβας S275	Χάλυβας S235
40X4	40	4	10.00	12.15	0.81	3	3	3	
45X5	45	5	9.00	12.15	0.81	3	3	3	
50X4	50	4	12.50	12.15	0.81	4	3	3	
50X6	50	6	8.33	12.15	0.81	3	3	3	
60X6	60	6	10.00	12.15	0.81	3	3	3	
70X6	70	6	11.67	12.15	0.81	3	3	3	
75X6	75	6	12.50	12.15	0.81	4	3	3	
75X8	75	8	9.38	12.15	0.81	3	3	3	
80X8	80	8	10.00	12.15	0.81	3	3	3	
80X10	80	10	8.00	12.15	0.81	3	3	3	
90X7	90	7	12.86	12.15	0.81	4	3	3	
90X9	90	9	10.00	12.15	0.81	3	3	3	
100X8	100	8	12.50	12.15	0.81	4	3	3	
120X12	120	12	10.00	12.15	0.81	3	3	3	
130X12	130	12	10.83	12.15	0.81	3	3	3	
150X10	150	10	15.00	12.15	0.81	4	4	3	
150X15	150	15	10.00	12.15	0.81	3	3	3	
160X15	160	15	10.67	12.15	0.81	3	3	3	
180X18	180	18	10.00	12.15	0.81	3	3	3	
200X16	200	16	12.50	12.15	0.81	4	3	3	
200X20	200	20	10.00	12.15	0.81	3	3	3	

Πίνακας 1.1: γωνιακών διατομών

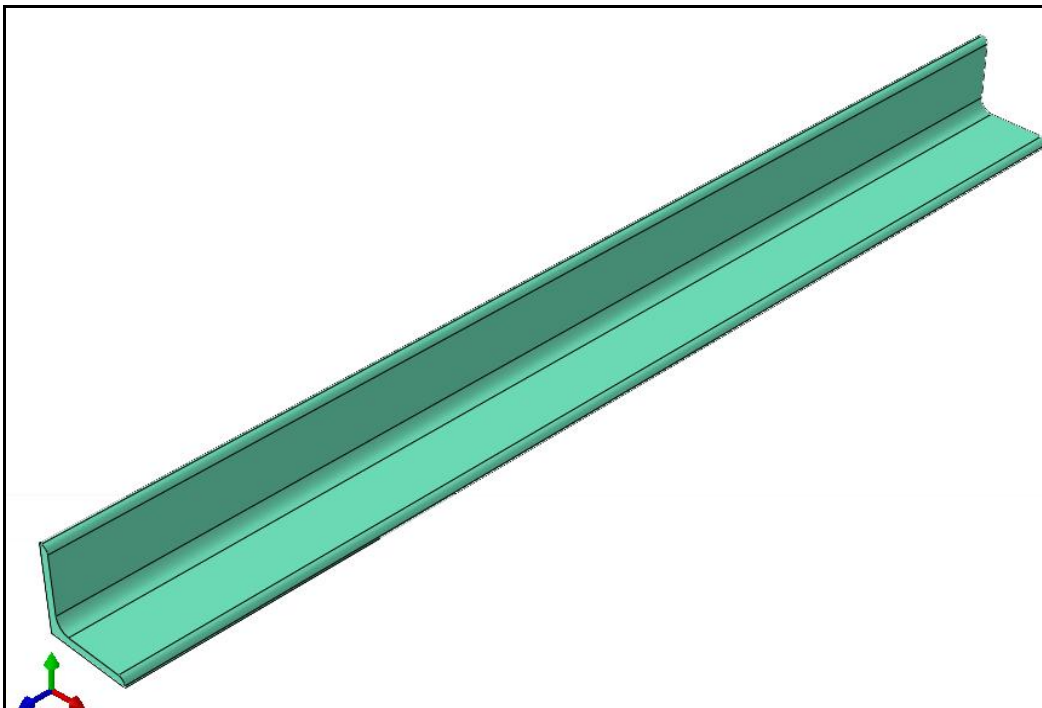
2 Κάμψη γωνιακών διατομών

2.1 Εισαγωγή

Οι διατομές που επιλέχθηκαν υποβλήθηκαν σε κάμψη στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus με αμφιέριστο μοντέλο 0.5m καταπονούμενο στο κέντρο τους από κατανεμημένο φορτίο σε λωρίδα 10mm κατά τον ισχυρό άξονα u και ασθενή άξονα v . Χρησιμοποιήθηκε μη-γραμμική πλαστική ανάλυση, όπου δηλαδή λαμβάνονται υπόψη οι μη γραμμικότητες τόσο του φορέα (επίλυση με βάση την παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα) όσο και του υλικού (η σχέση τάσεων παραμορφώσεων δεν ακολουθεί το νόμο του Hooke αλλά το πραγματικό νόμο του υλικού που παρίσταται με θεώρηση ενός απλοποιημένου διγραμμικού νόμου τάσεων-παραμορφώσεων). Η επίλυση δίνει κατευθείαν τα θεωρητικά οριακά φορτία του φορέα. Τα αποτελέσματα στη συνέχεια θα συγκριθούν με την πλαστική ροπή αντοχής ($M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y$) και την ελαστική ροπή αντοχής ($M_{el} = W_{el} \cdot f_y$) που προβλέπει ο ευρωκώδικας.

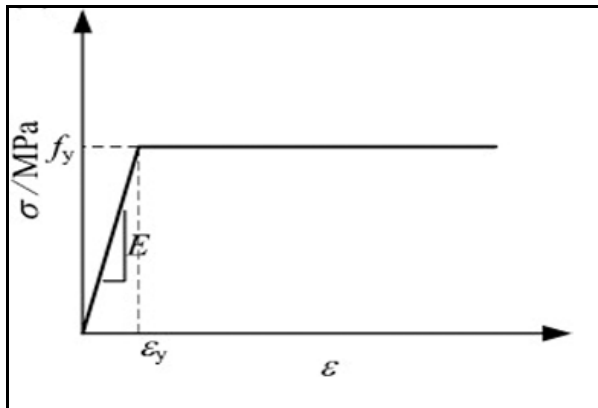
2.2 Μόρφωση μοντέλου στο πρόγραμμα Abaqus για κάμψη

Η κάθε διατομή σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD σε δύο διαστάσεις και στην συνέχεια εισήχθη στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus όπου πήρε τρισδιάστατη μορφή με μήκος 0.5m.



Σχήμα 2.1: Τρισδιάστατη μορφή μοντέλου στο πρόγραμμα Abaqus

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού (Χάλυβας S355). Το υλικό θεωρήθηκε ότι ακολουθεί την ελαστική πλήρως πλαστική κατανομή χωρίς κράτυνση.



Σχήμα 2.2: Διγραμμικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων ελαστοπλαστικού υλικού χωρίς κράτυνση ($E_t=0$)

Μέτρο ελαστικότητας $E=210000000\text{Kn/m}^2$

Λόγος Poisson $\nu=0.3$

Όριο διαρροής $f_y=355000\text{kN/m}^2$

Εφελκυστική αντοχή $f_u=510000\text{kN/m}^2$

Name: S355
 Description: Edit...

Material Behaviors

Density
 Elastic
 Plastic

General Mechanical Thermal Other Delete

Plastic

Hardening: Isotropic Suboptions

Use strain-rate-dependent data
 Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Data

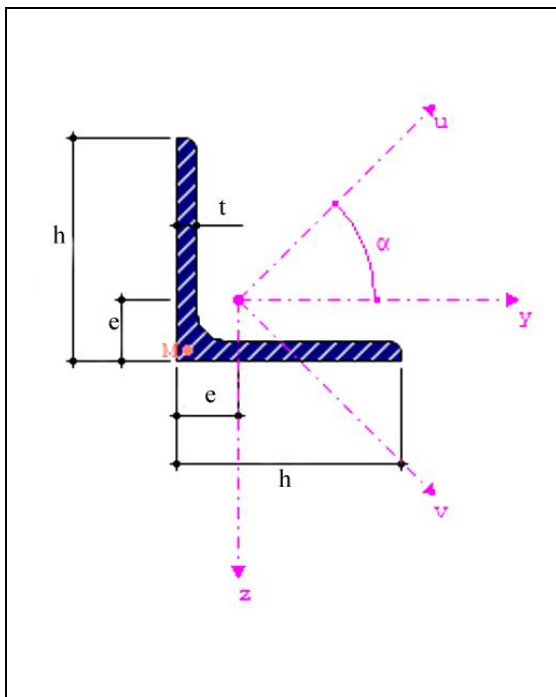
	Yield Stress	Plastic Strain
1	355	0
2	510	0.15

OK Cancel

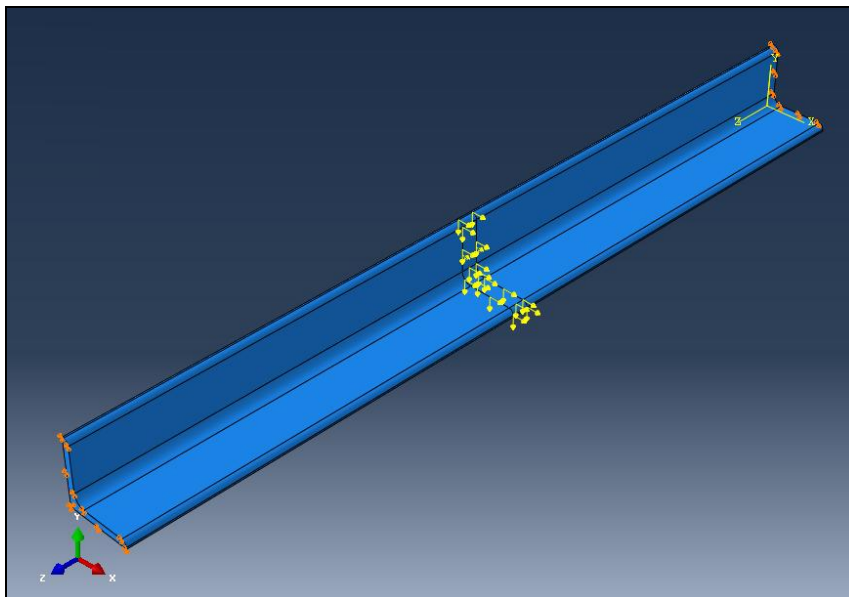
Σχήμα 2.3: Ορισμός πλαστικών ιδιοτήτων του υλικού στο πρόγραμμα

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι συνοριακές συνθήκες του αμφιέριστου μοντέλου με άρθρωση και κύλιση εκατέρωθεν.

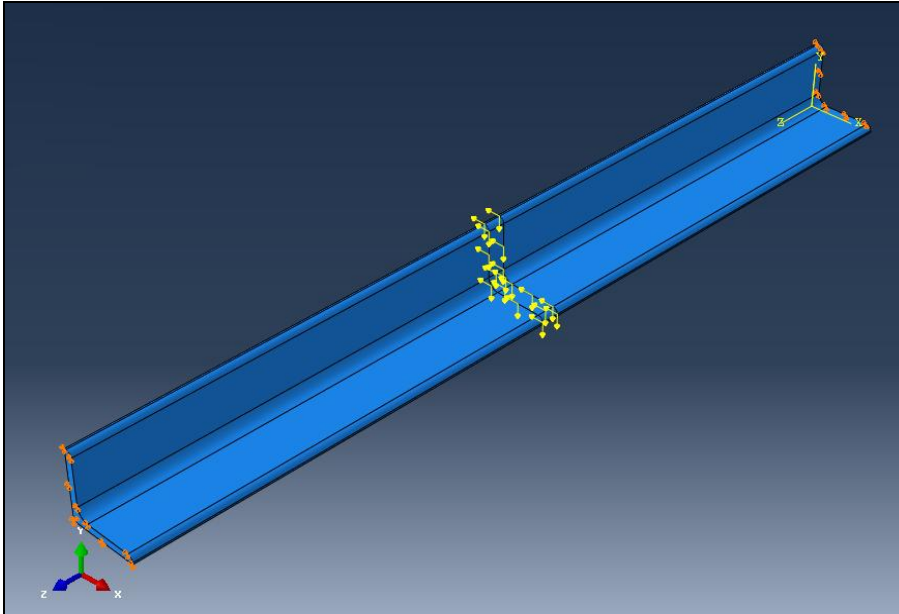
Το στατικό φορτίο για την κάμψη ορίστηκε στη μέση του γωνιακού μοντέλου σε λωρίδα 10mm κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα v και του ασθενή άξονα u ώστε να προκύψει η ροπή αντοχής M_u και M_v αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4: Ισχυρός (v) και ασθενής (u) άξονας γωνιακού

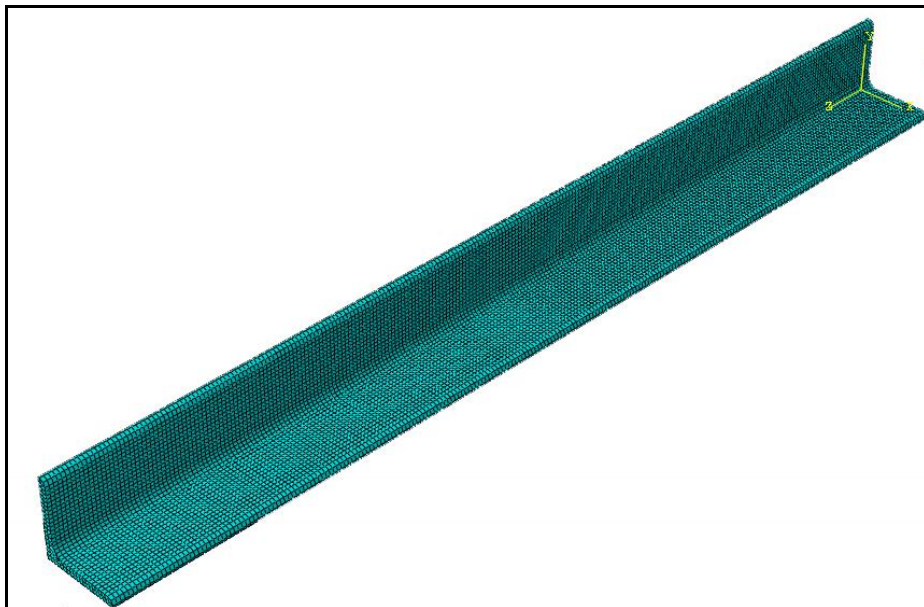


Σχήμα 2.5: Φορτίο κατά τον ασθενή άξονα v



Σχήμα 2.6: Φορτίο κατά τον ισχυρό άξονα u

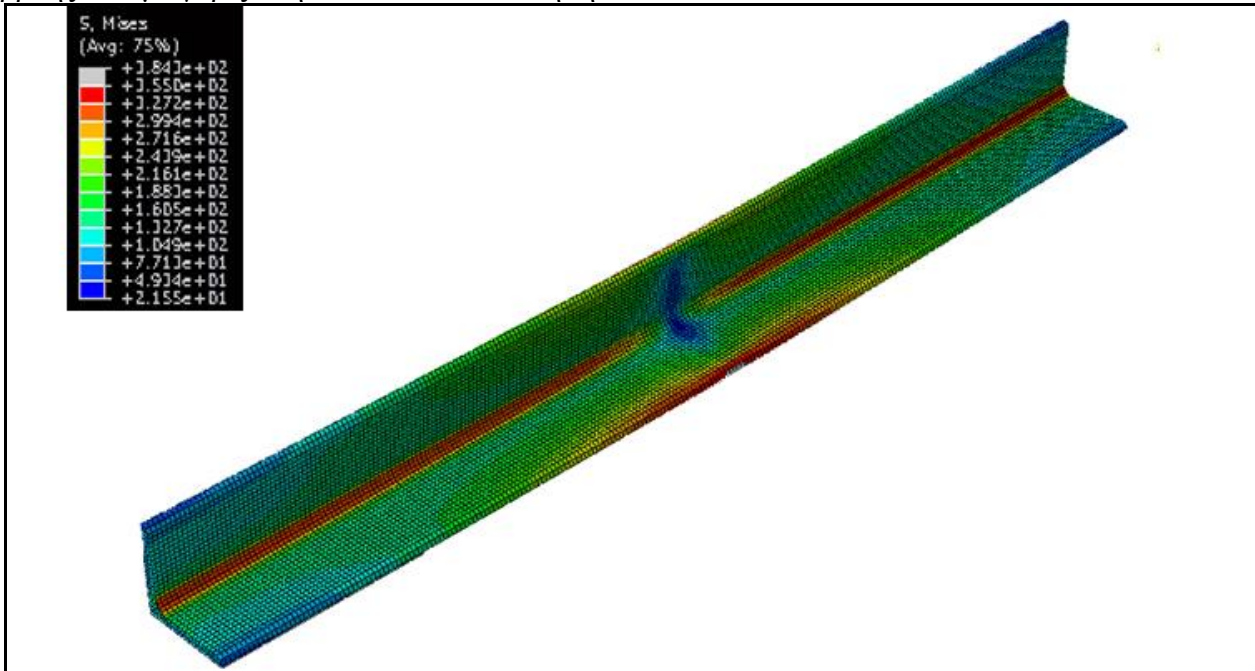
Στη στατική ανάλυση ενεργοποιήθηκε η επιλογή μη γραμμικότητας γεωμετρίας ώστε να συμπεριληφθεί η επιρροή μεγάλων παραμορφώσεων και στροφών Έπειτα ορίστηκε το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων (mesh) και το αποτέλεσμα ήταν όπως στο παρακάτω σχήμα.



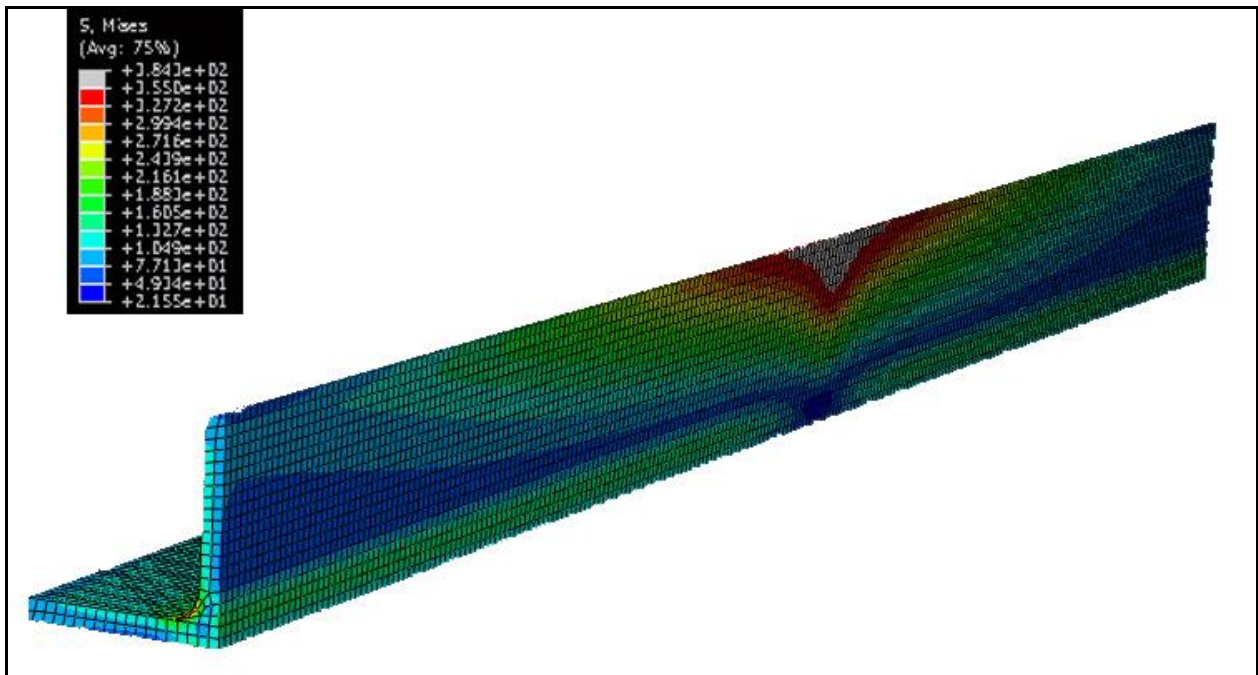
Σχήμα 2.7: Μορφή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

2.3 Αποτελέσματα κάμψης

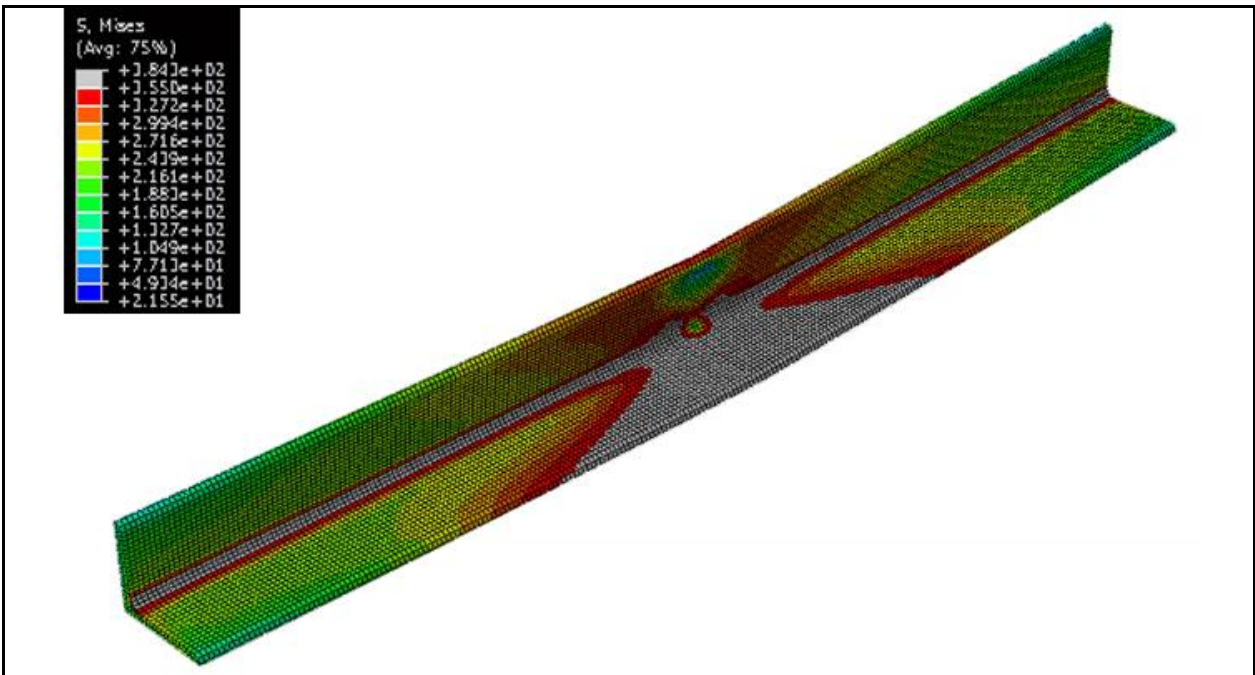
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε διαγράμματα Ροπή αντοχής-Παραμόρφωση είχαν την ακόλουθη μορφή όπου ενδεικτικά για την πρώτη διατομή φαίνεται στη διαρροή και στην πλαστικοποίηση η μορφή των τάσεων όπου το κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει τα σημεία με τάση διαρροής ενώ με γκριζο δηλώνει πλαστικοποίηση.



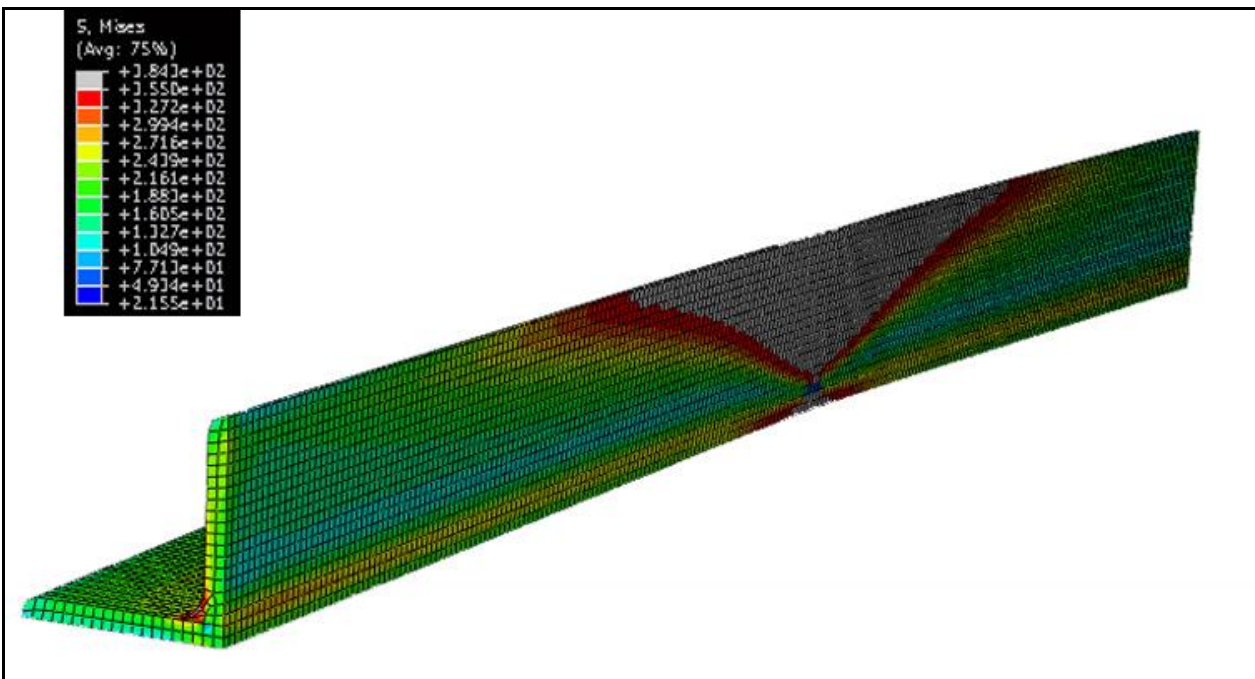
Σχήμα 2.7.1: Τάσεις στην διατομή κατά τη διαρροή για κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα



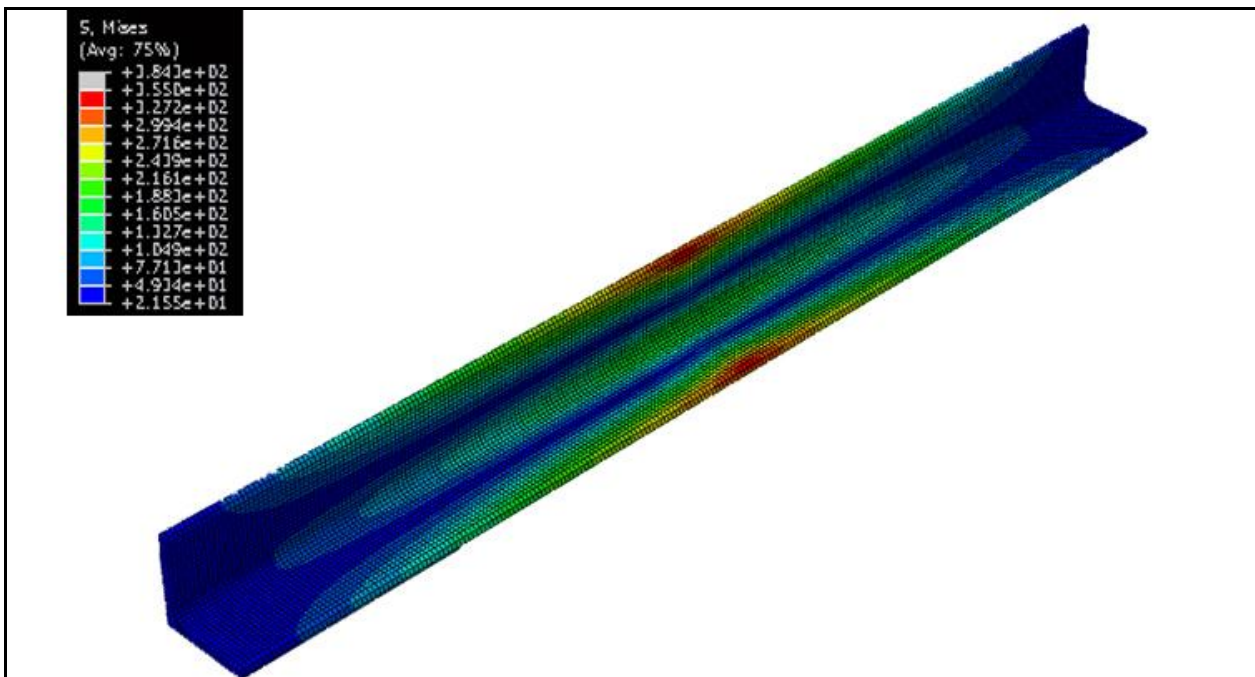
Σχήμα 2.7.2: Τάσεις στην πλάτη της διατομής κατά τη διαρροή για κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα



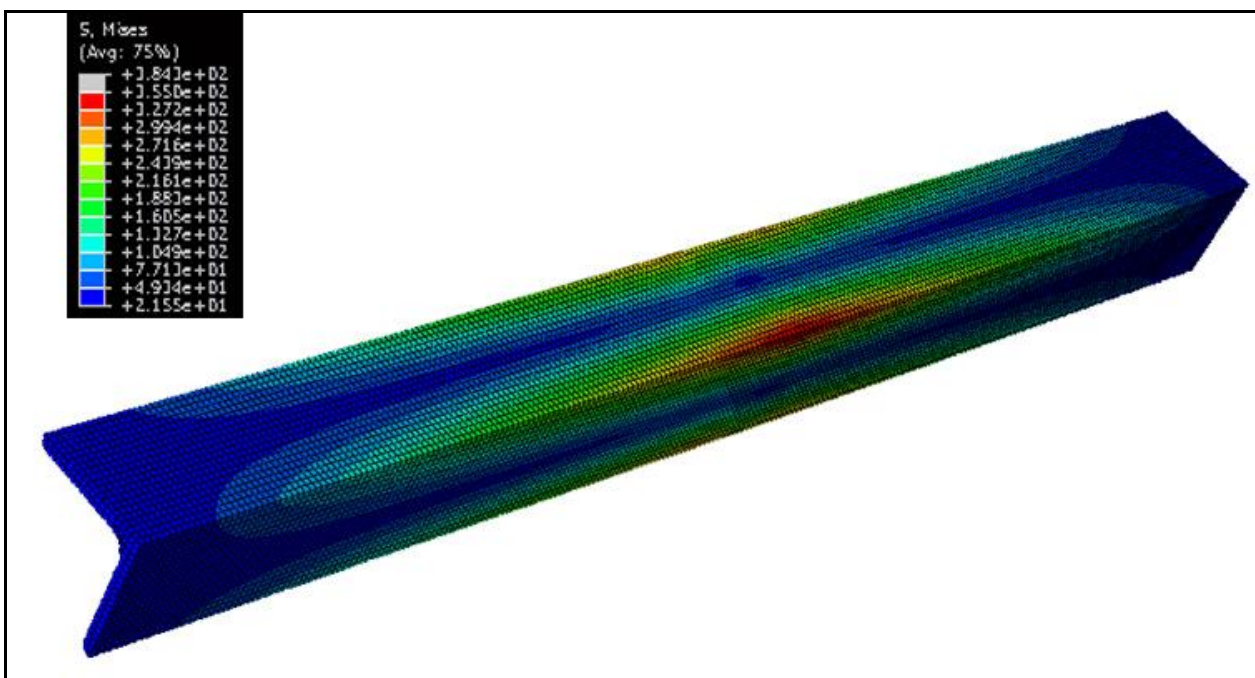
Σχήμα 2.7.3: Τάσεις στην διατομή κατά την αστοχία για κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα



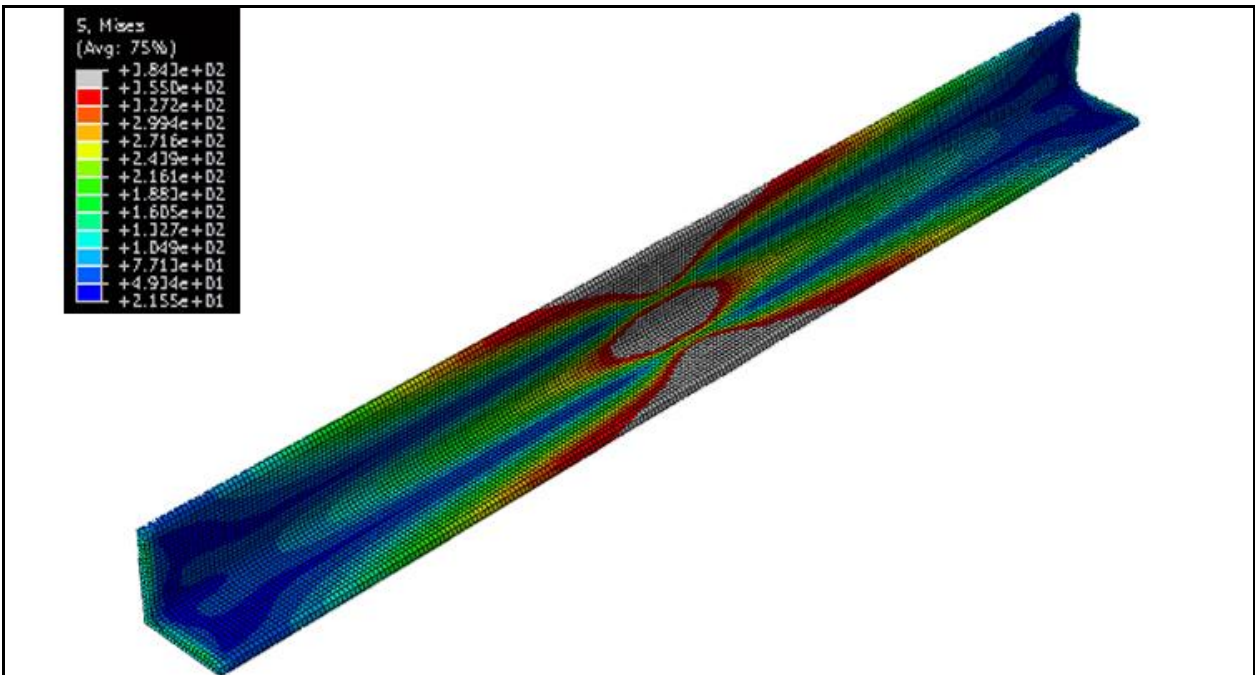
Σχήμα 2.7.4: Τάσεις στην πλάτη της διατομής κατά την αστοχία για κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα



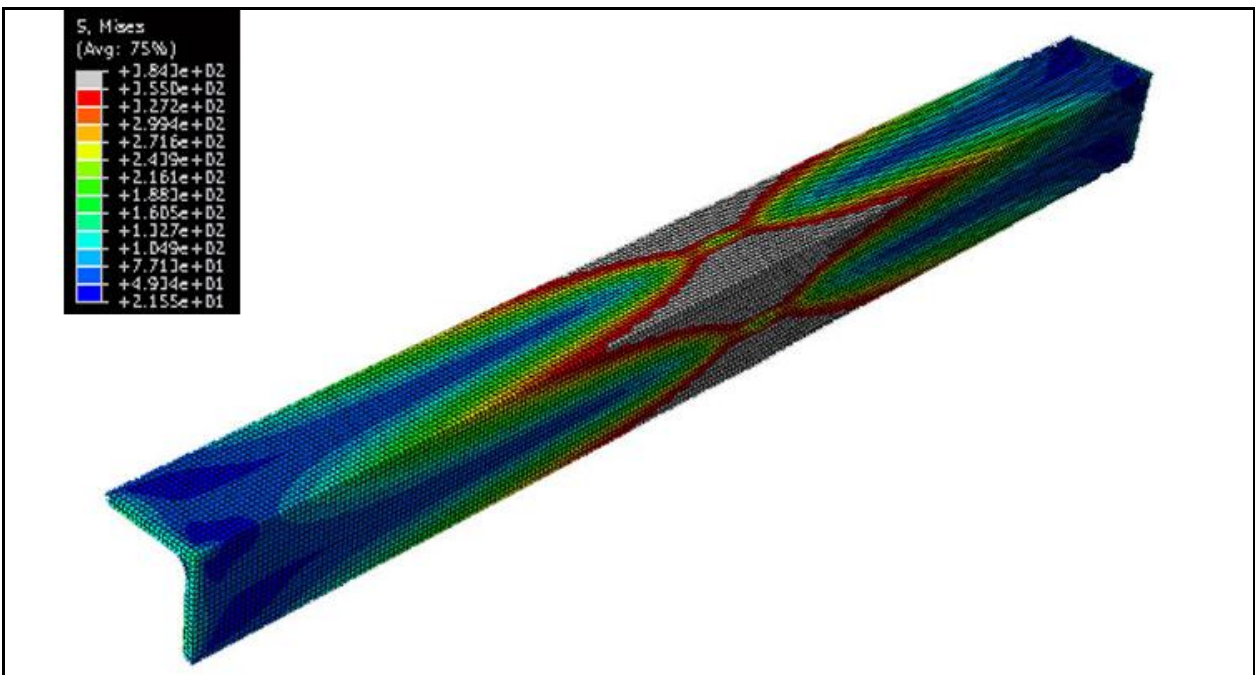
Σχήμα 2.7.5: Τάσεις στην διατομή κατά την διαρροή για κάμψη κατά τον ασθενή άξονα



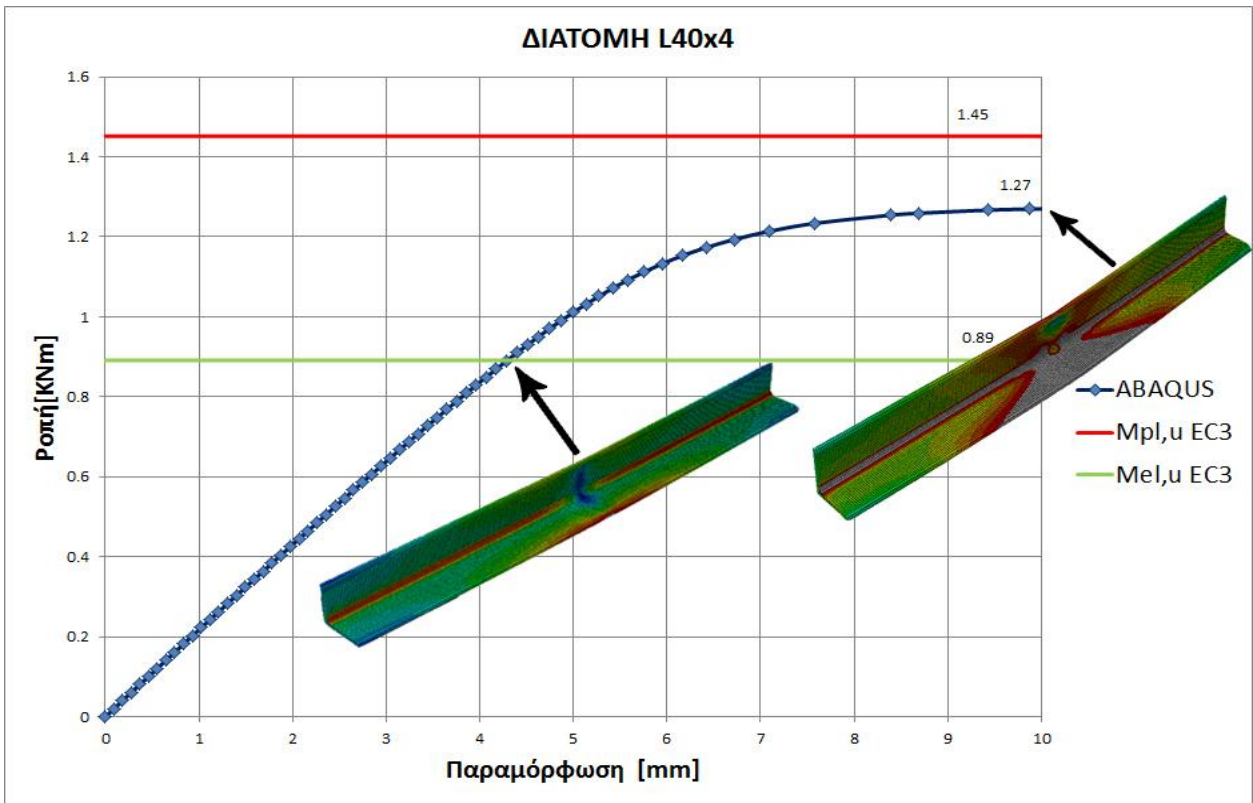
Σχήμα 2.7.6: Τάσεις στην διατομή κατά την διαρροή για κάμψη κατά τον ασθενή άξονα



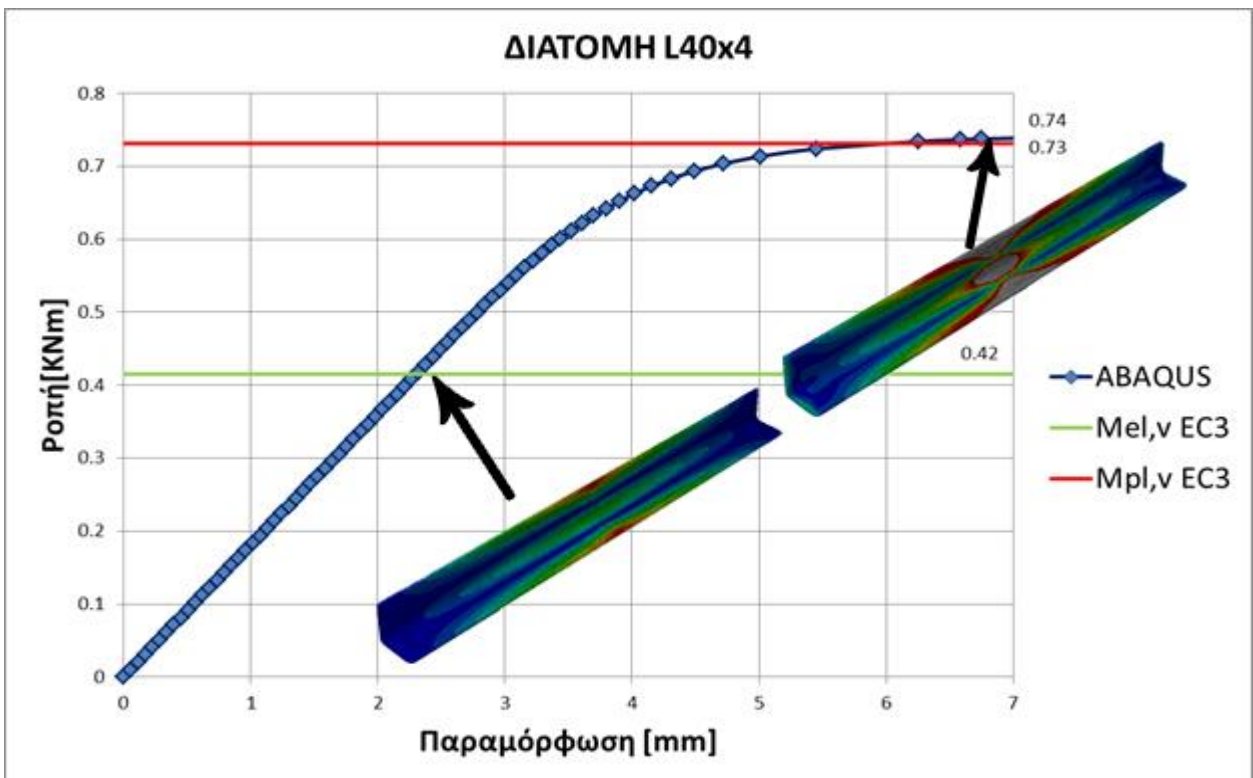
Σχήμα 2.7.7: Τάσεις στην διατομή κατά την αστοχία για κάμψη κατά τον ασθενή άξονα



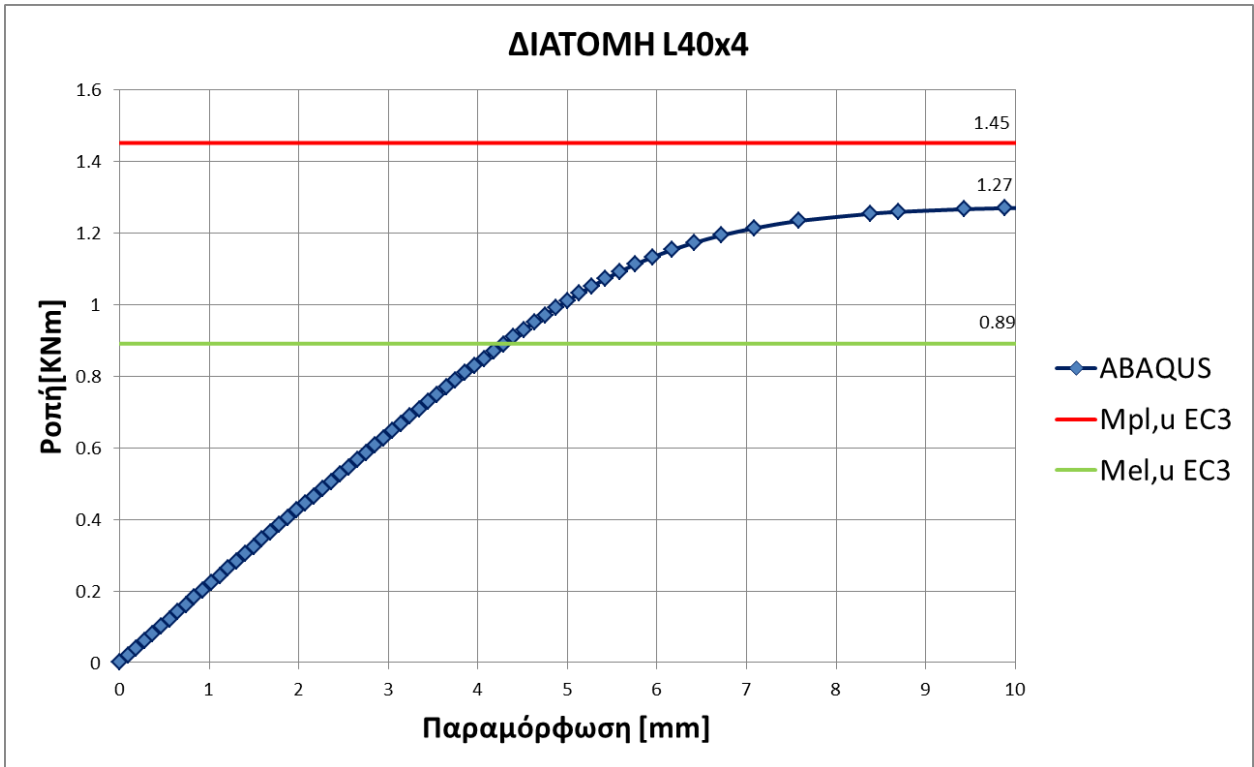
Σχήμα 2.7.8: Τάσεις στην πλάτη της διατομής κατά την αστοχία για κάμψη κατά τον ασθενή άξονα



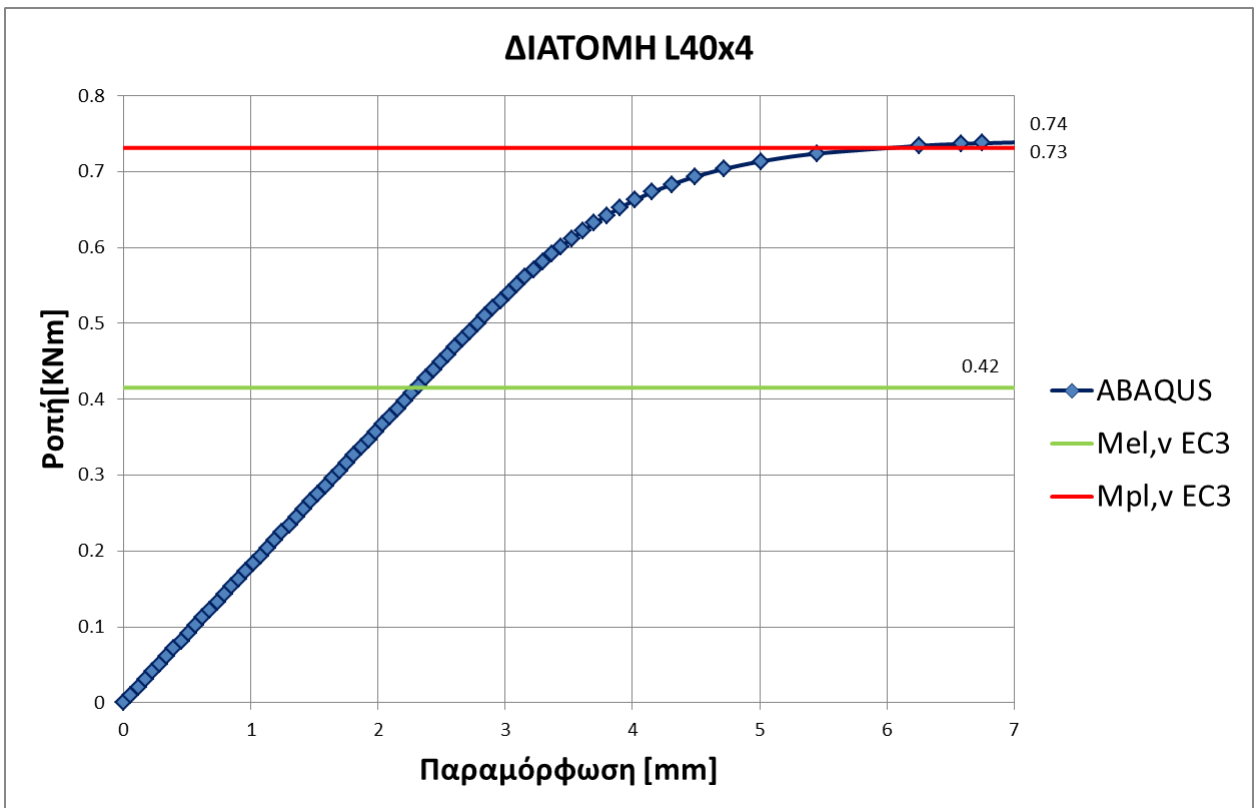
Σχήμα 2.8: Αποτελέσματα κάμψης κατά τον ισχυρό άξονα u



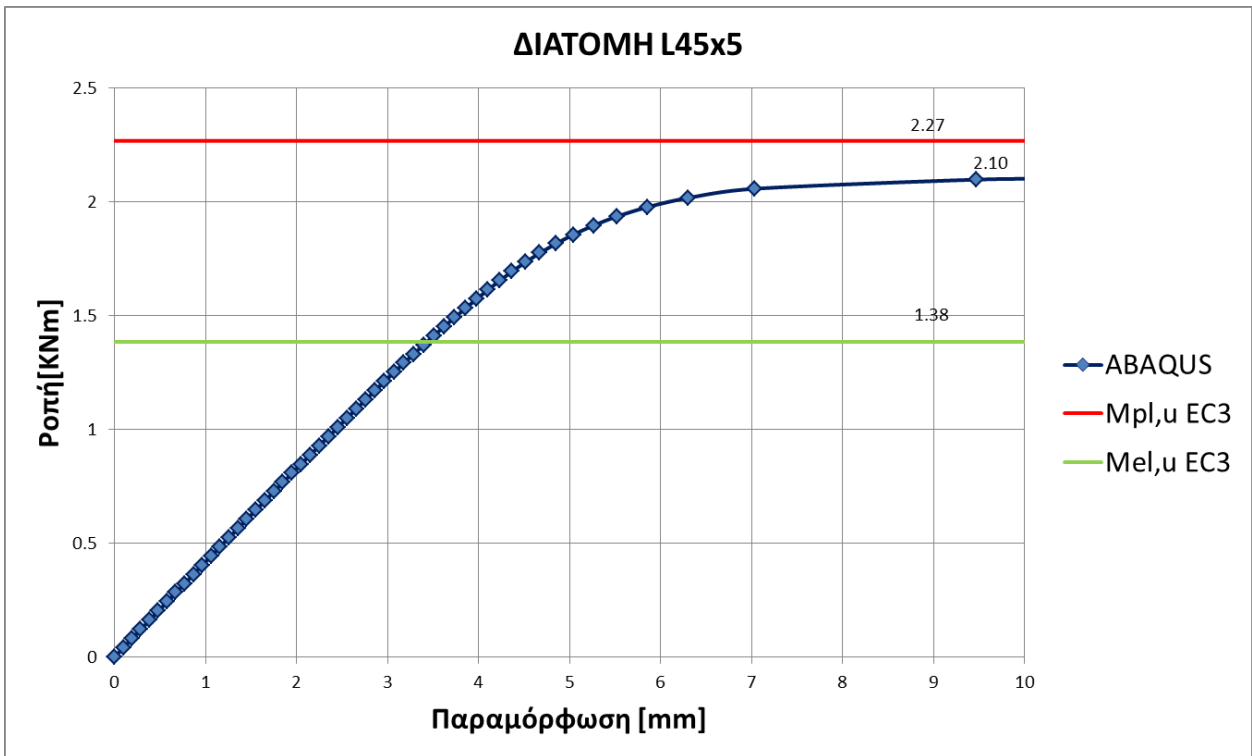
Σχήμα 2.9: Αποτελέσματα κάμψης κατά τον ασθενή άξονα v



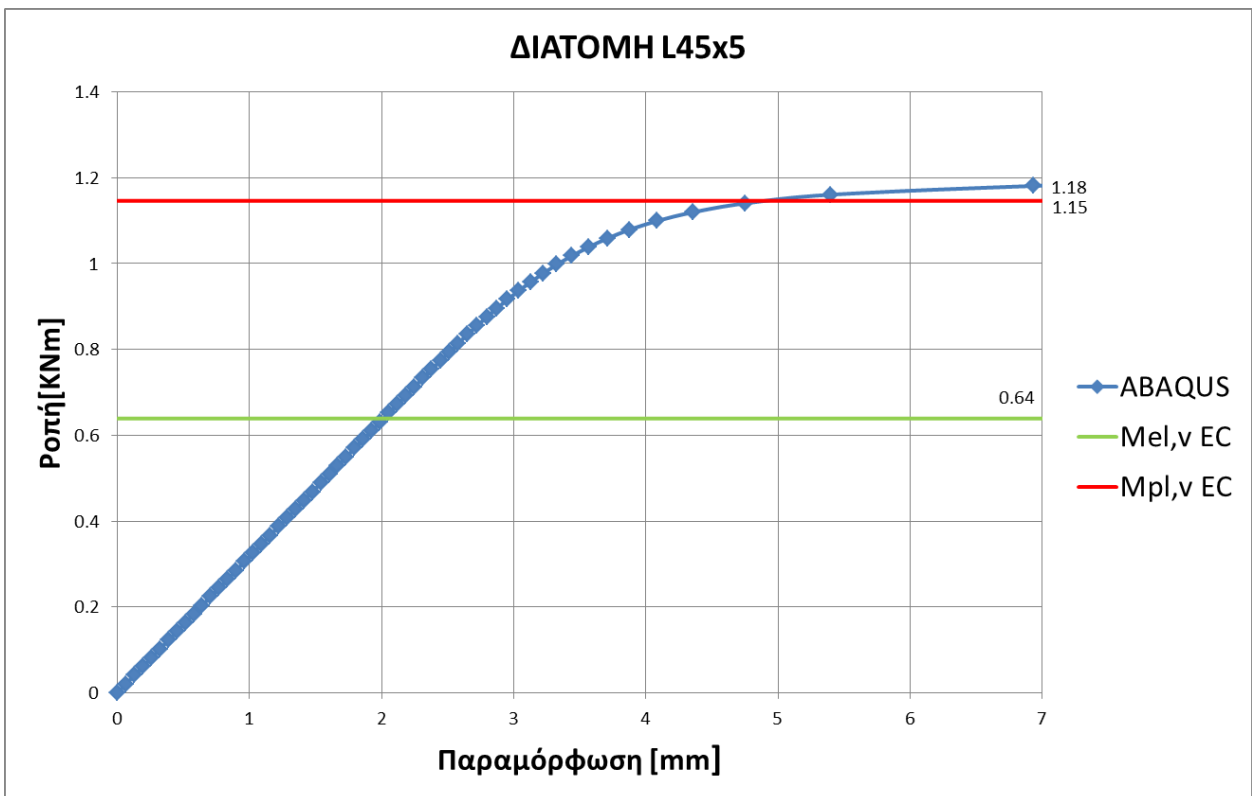
Σχήμα 2.20: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L40x4 κατηγορίας 3



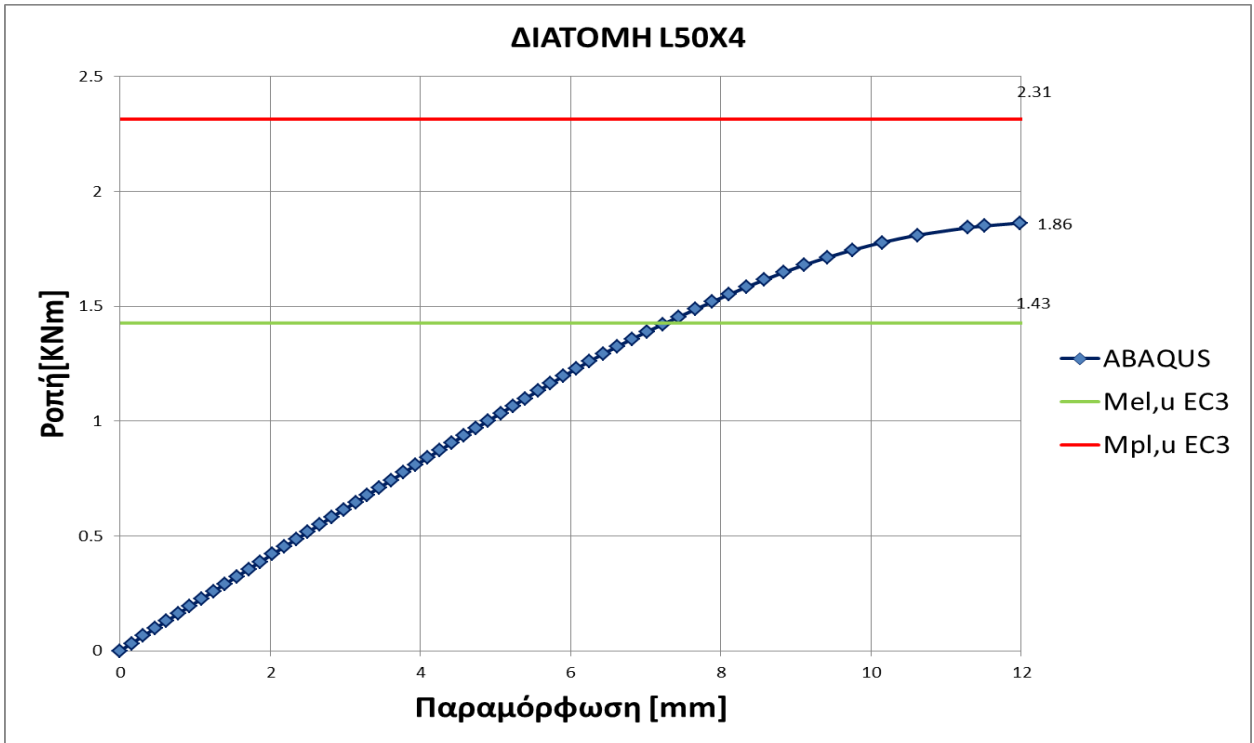
Σχήμα 2.11: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L40x4 κατηγορίας 3



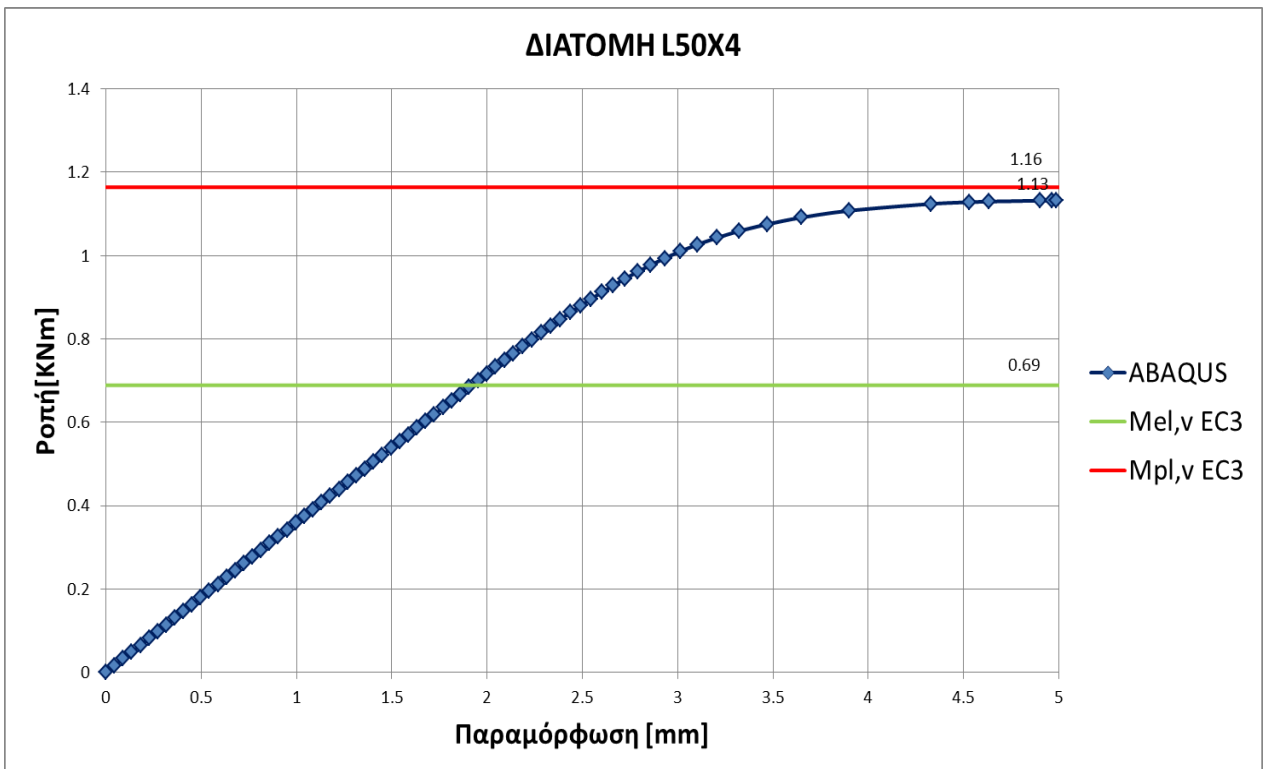
Σχήμα 2.12.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L45x5 κατηγορίας 3



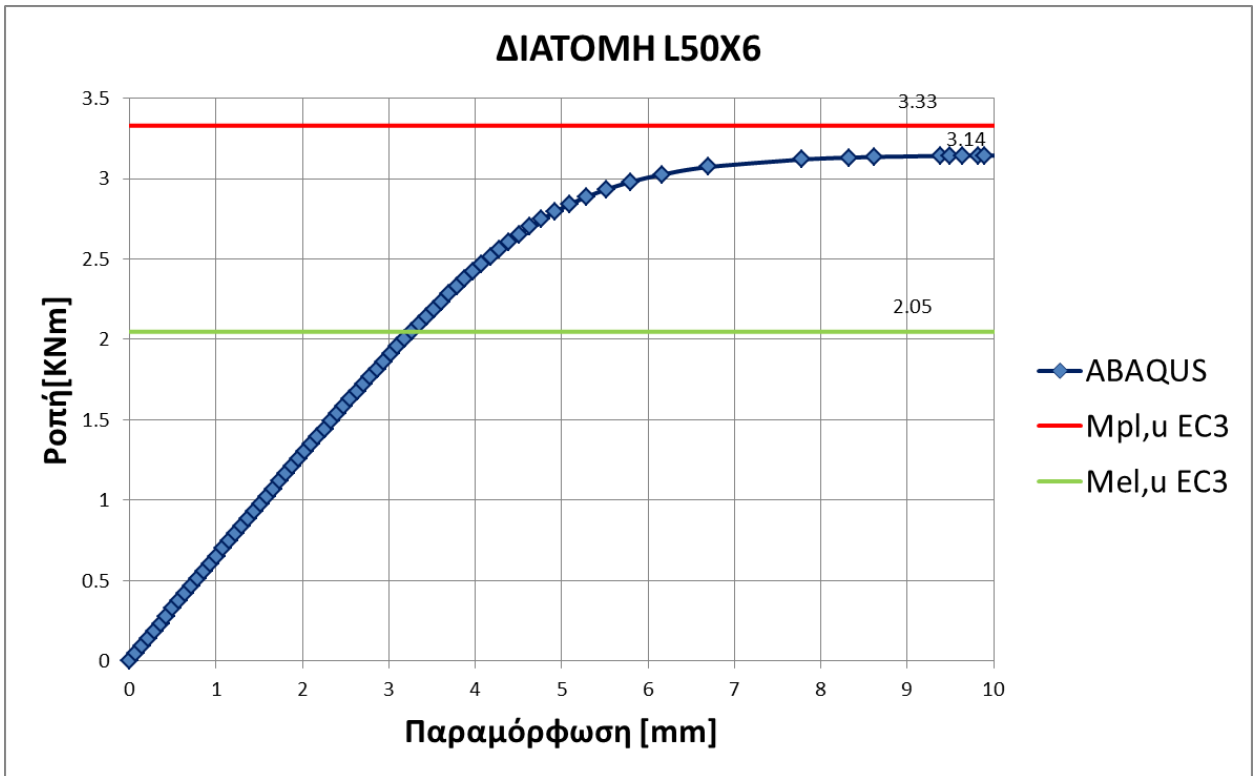
Σχήμα 2.13: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L45x5 κατηγορίας 3



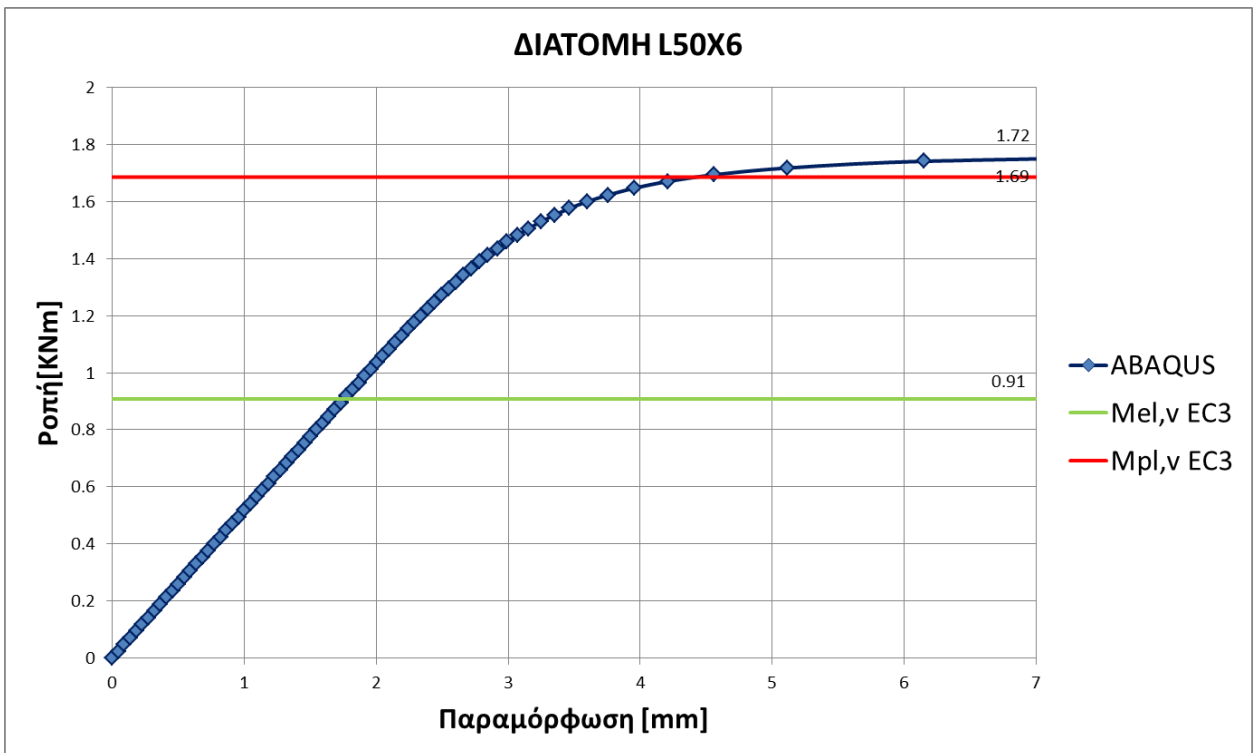
Σχήμα 2.14.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L50x4 κατηγορίας 4



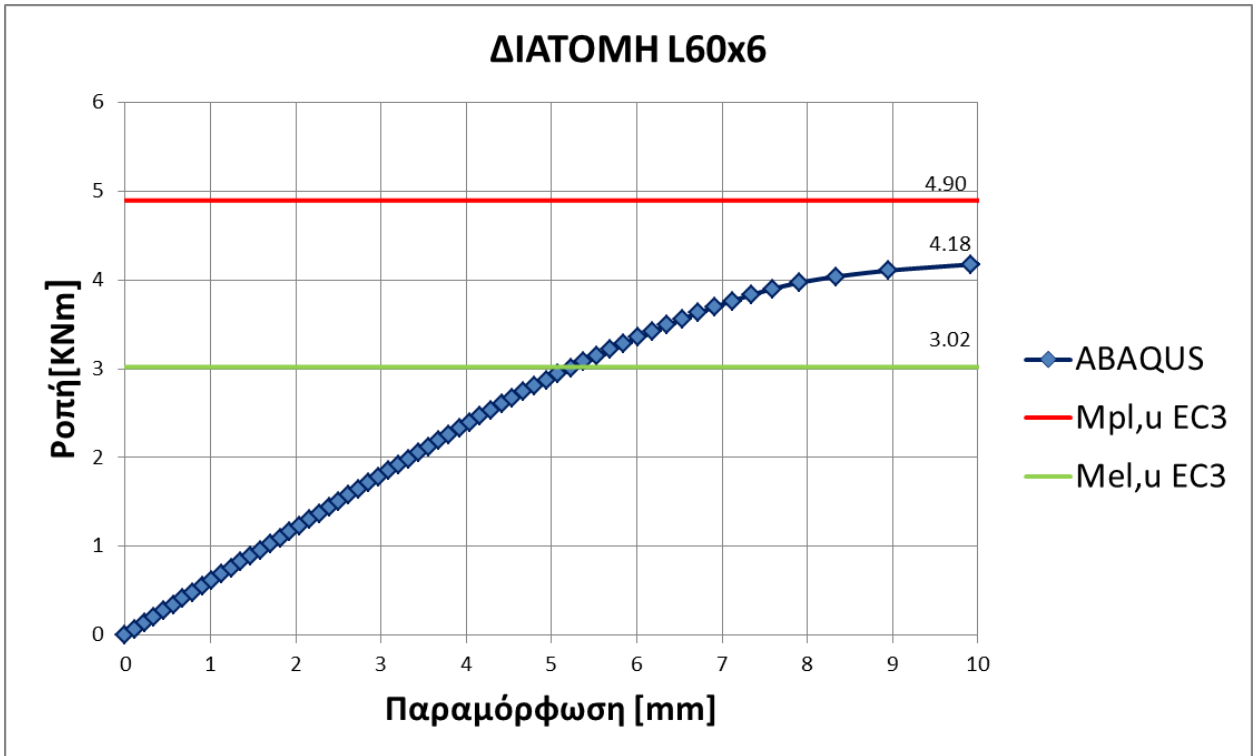
Σχήμα 2.15: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L50x4 κατηγορίας 4



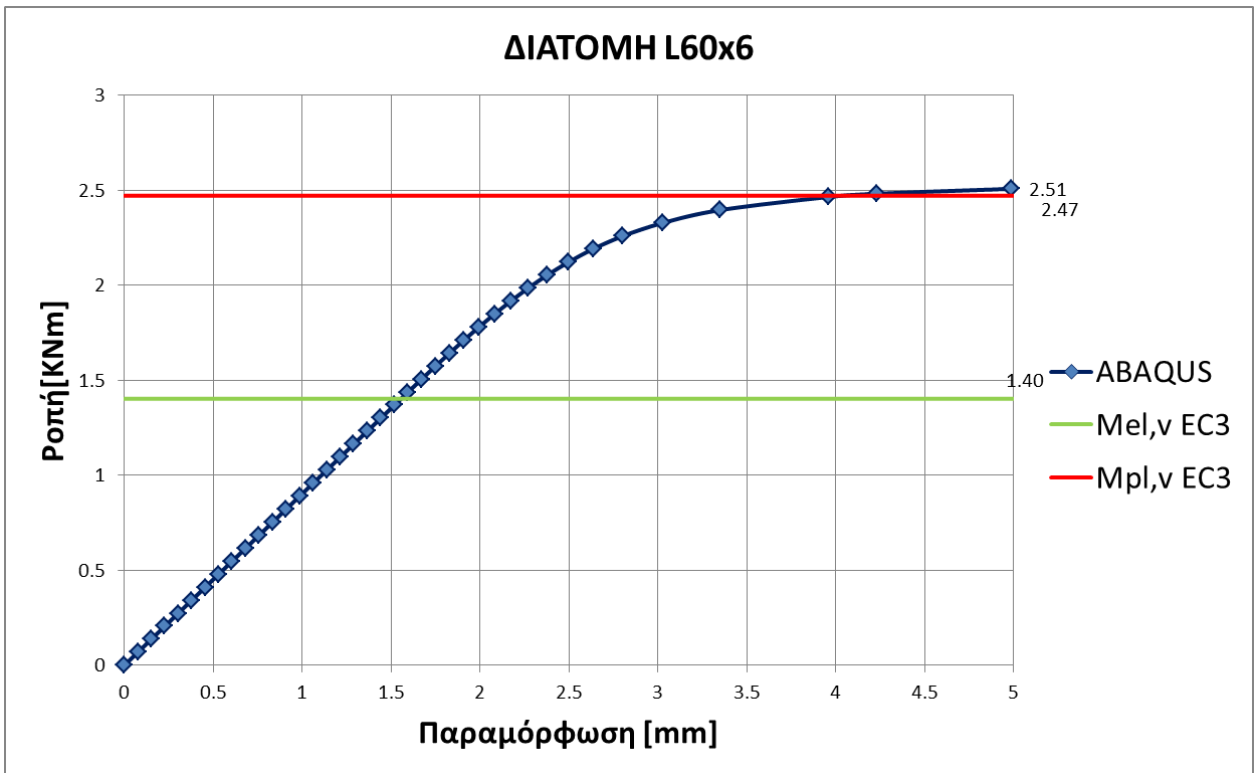
Σχήμα 2.16.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L50x6 κατηγορίας 3



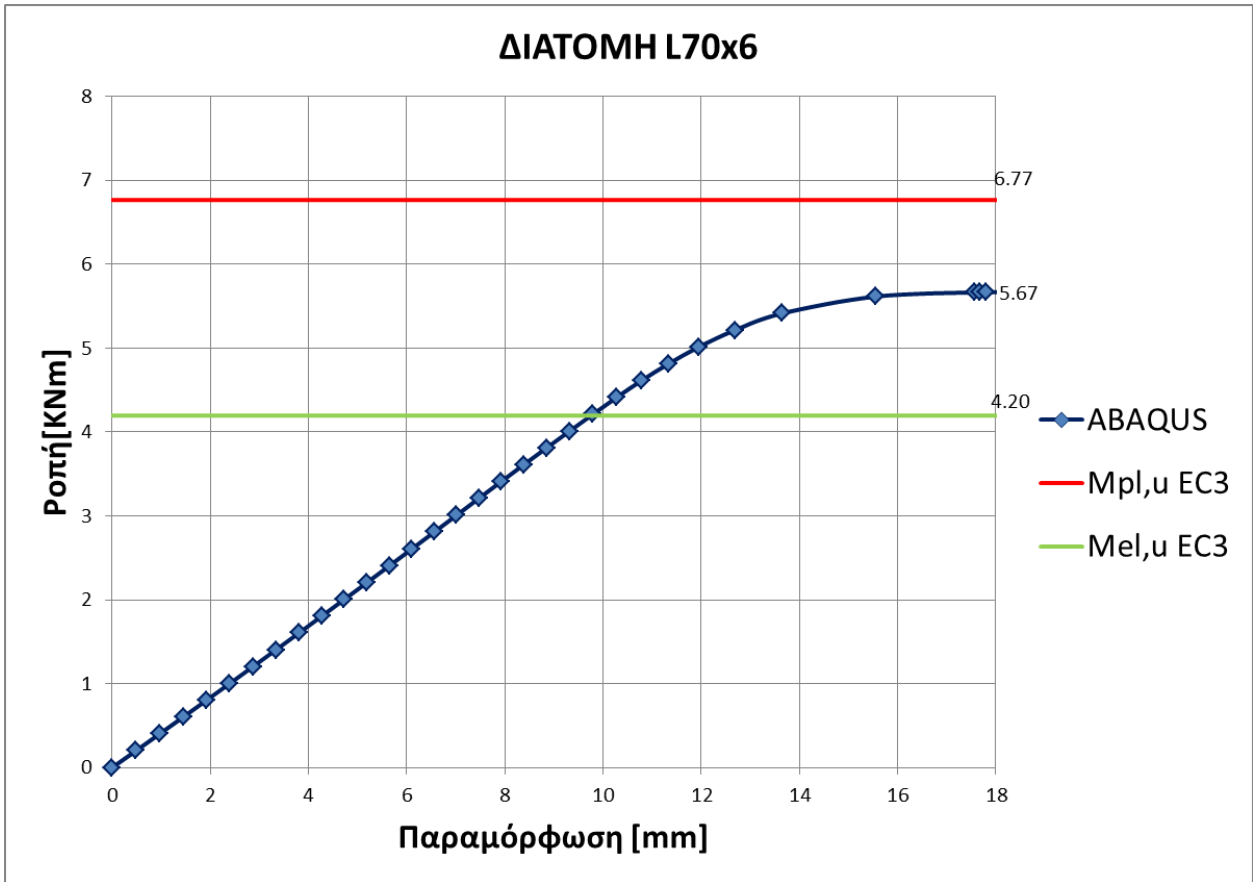
Σχήμα 2.17.: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L50x6 κατηγορίας 3



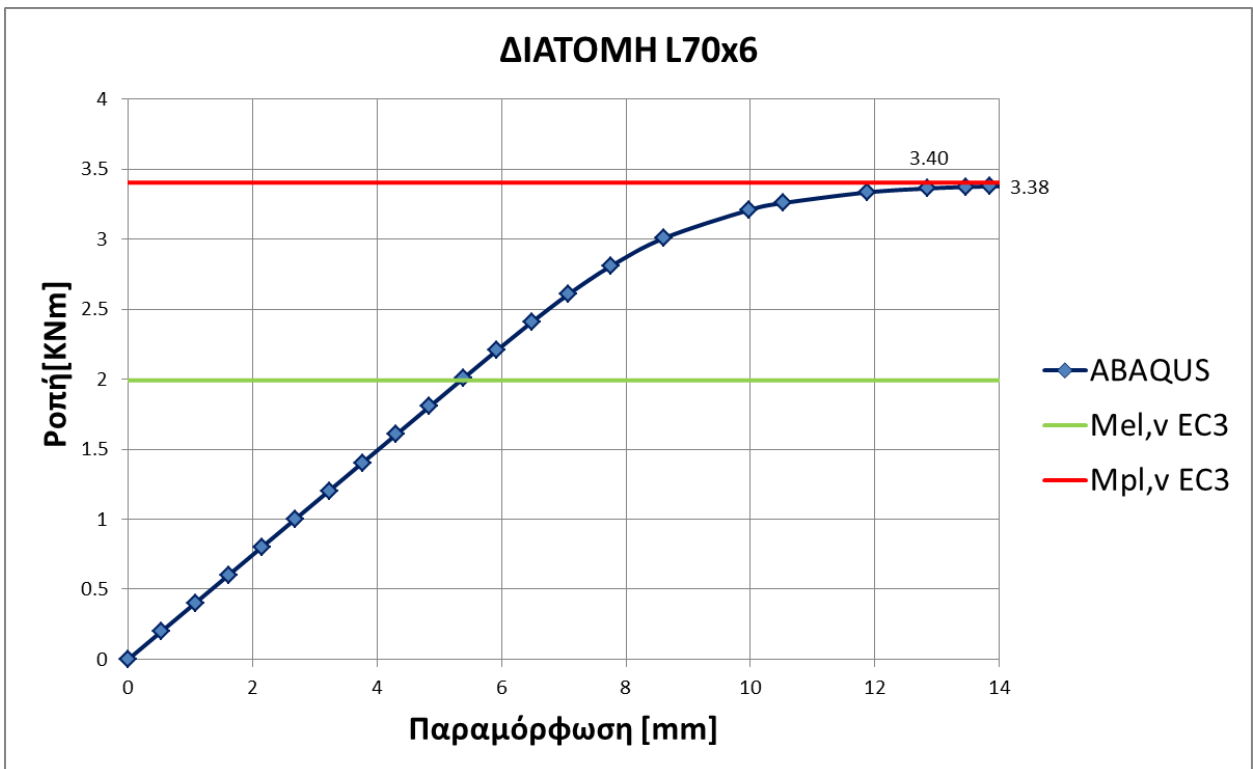
Σχήμα 2.18.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L60x6 κατηγορίας 3



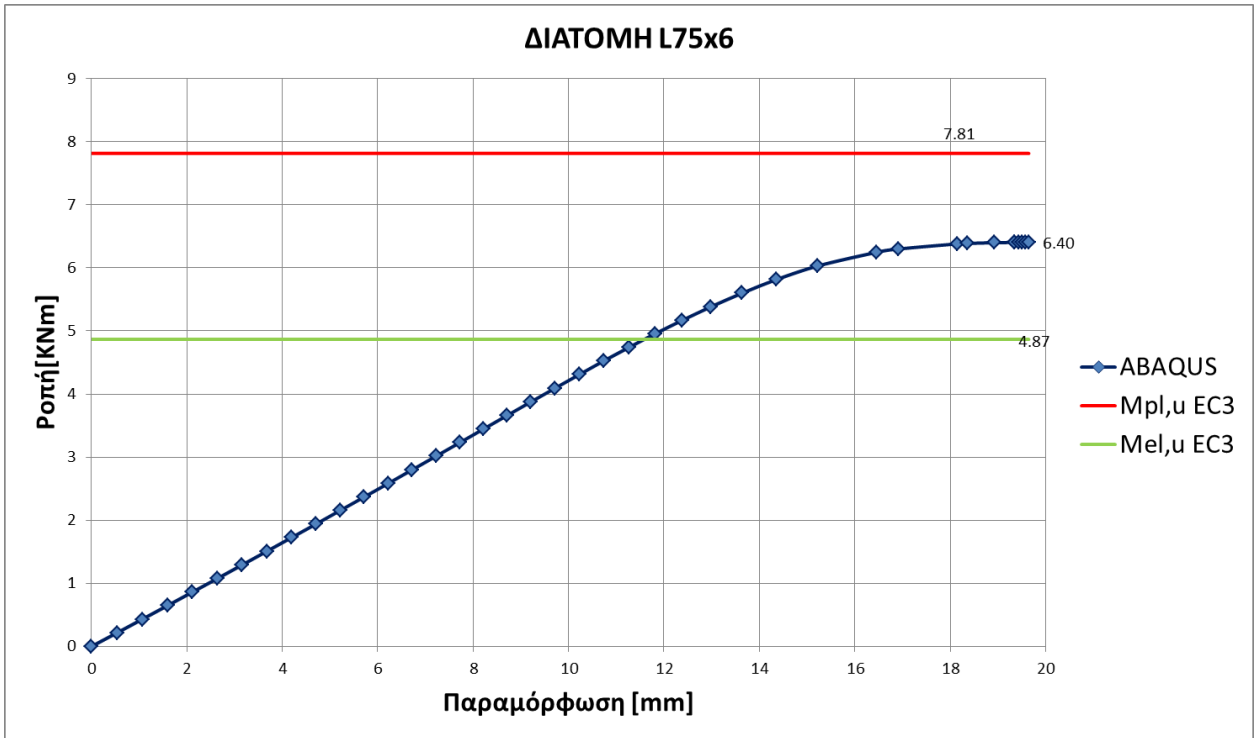
Σχήμα 2.19: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L60x6 κατηγορίας 3



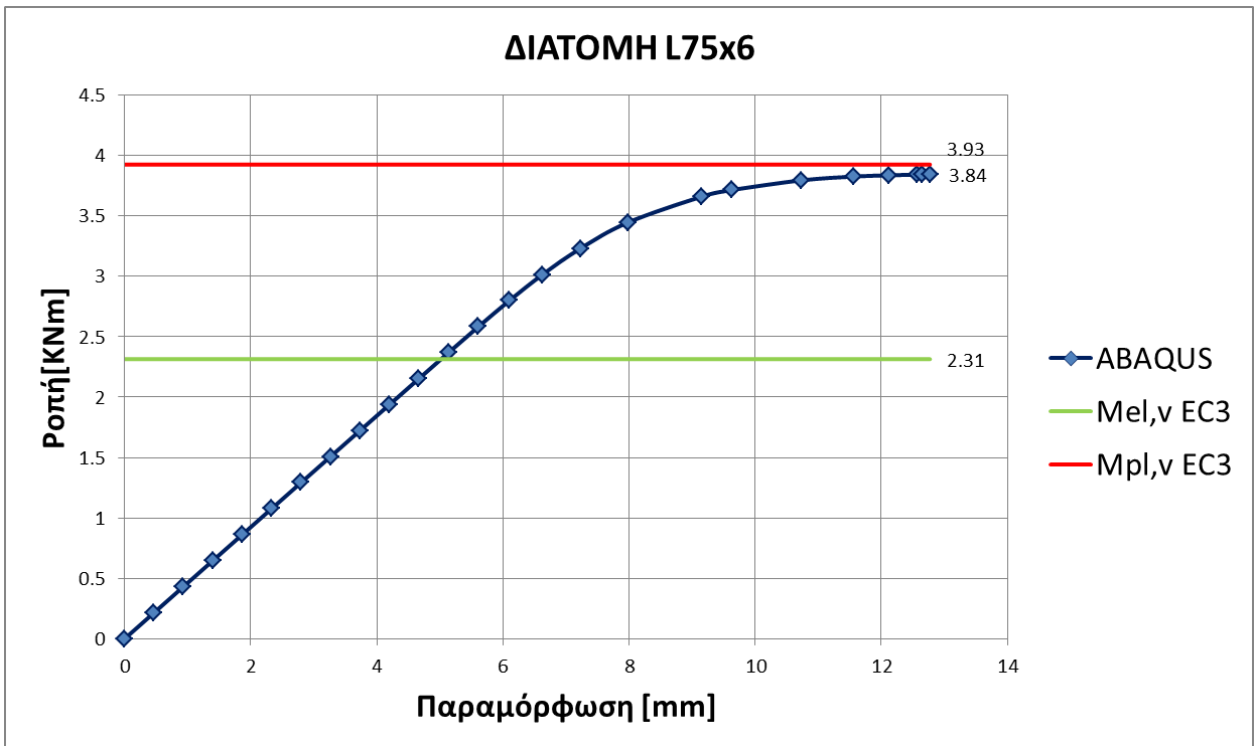
Σχήμα 2.20.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L70x6 κατηγορίας 3



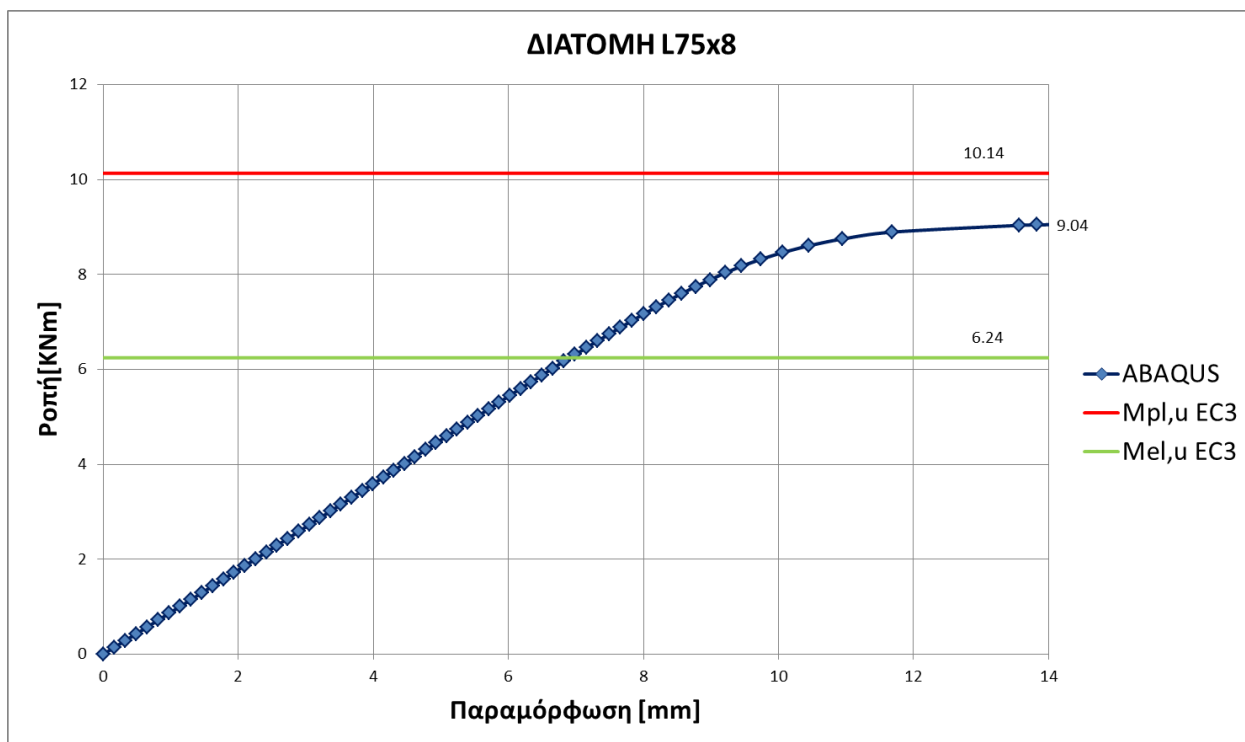
Σχήμα 2.21: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L70x6 κατηγορίας 3



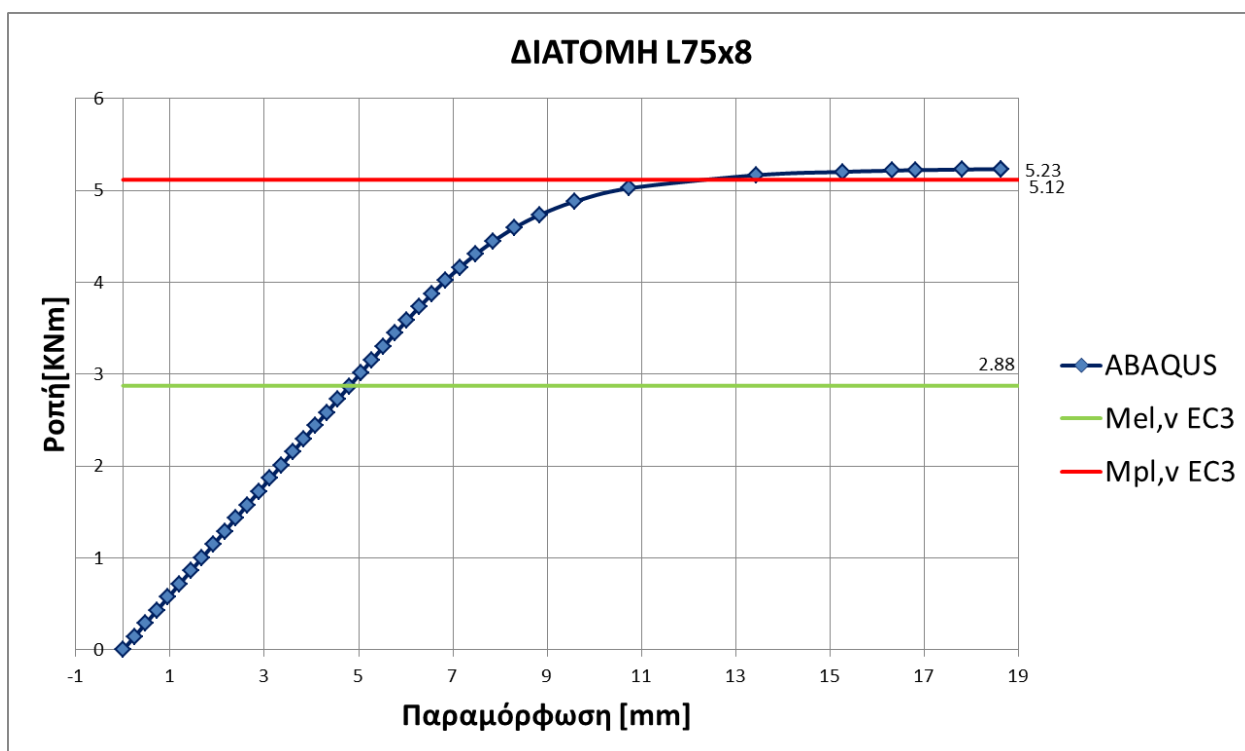
Σχήμα 2.22.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L75x6 κατηγορίας 4



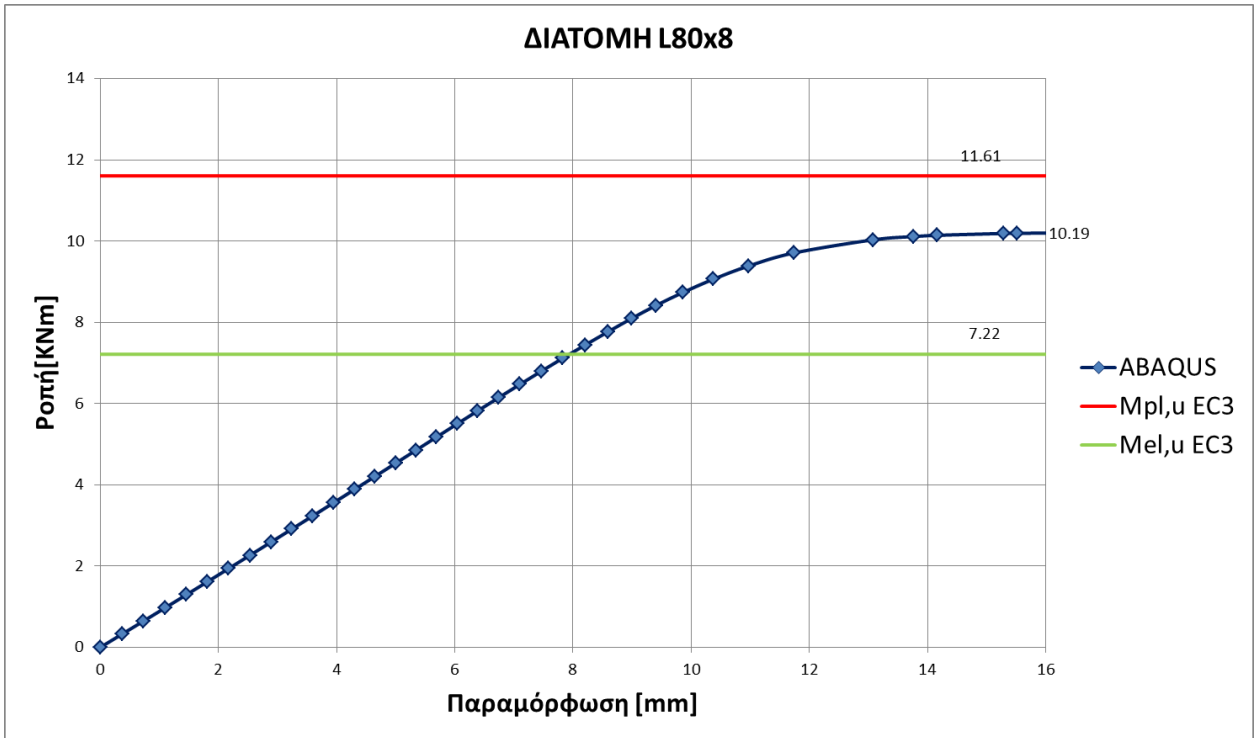
Σχήμα 2.23: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L75x6 κατηγορίας 4



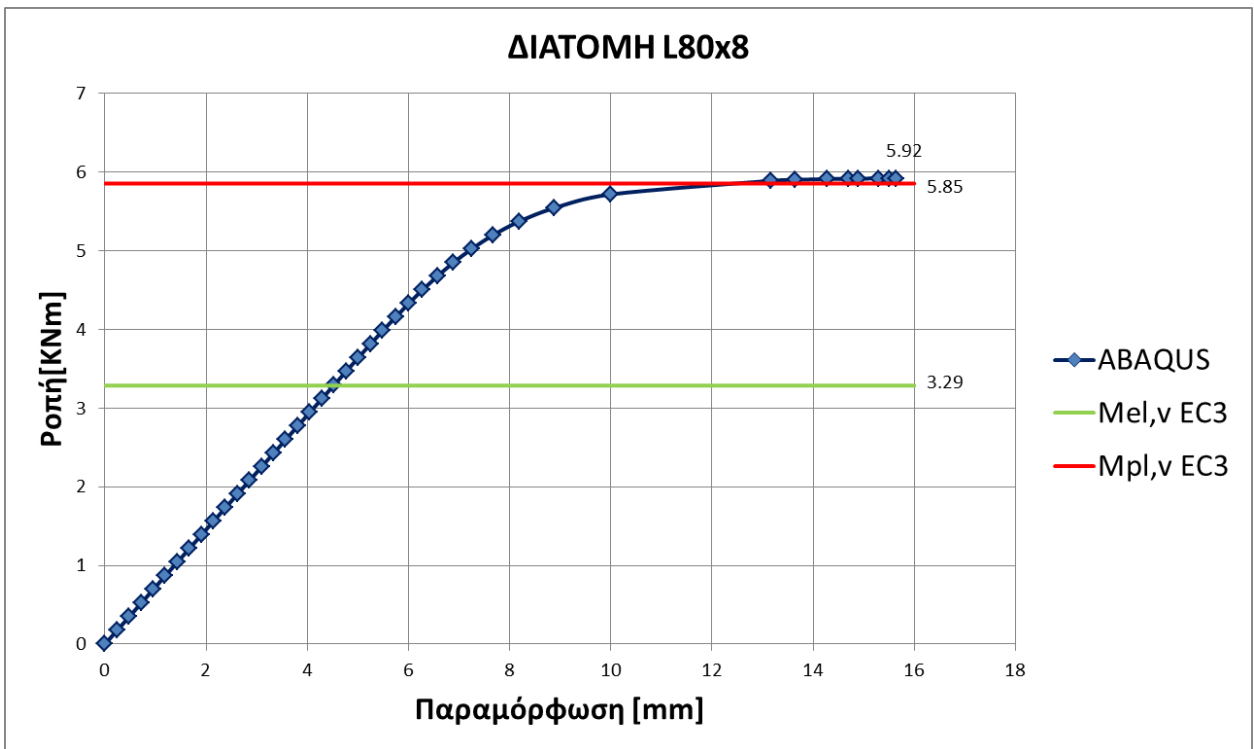
Σχήμα 2.24.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L75x8 κατηγορίας 3



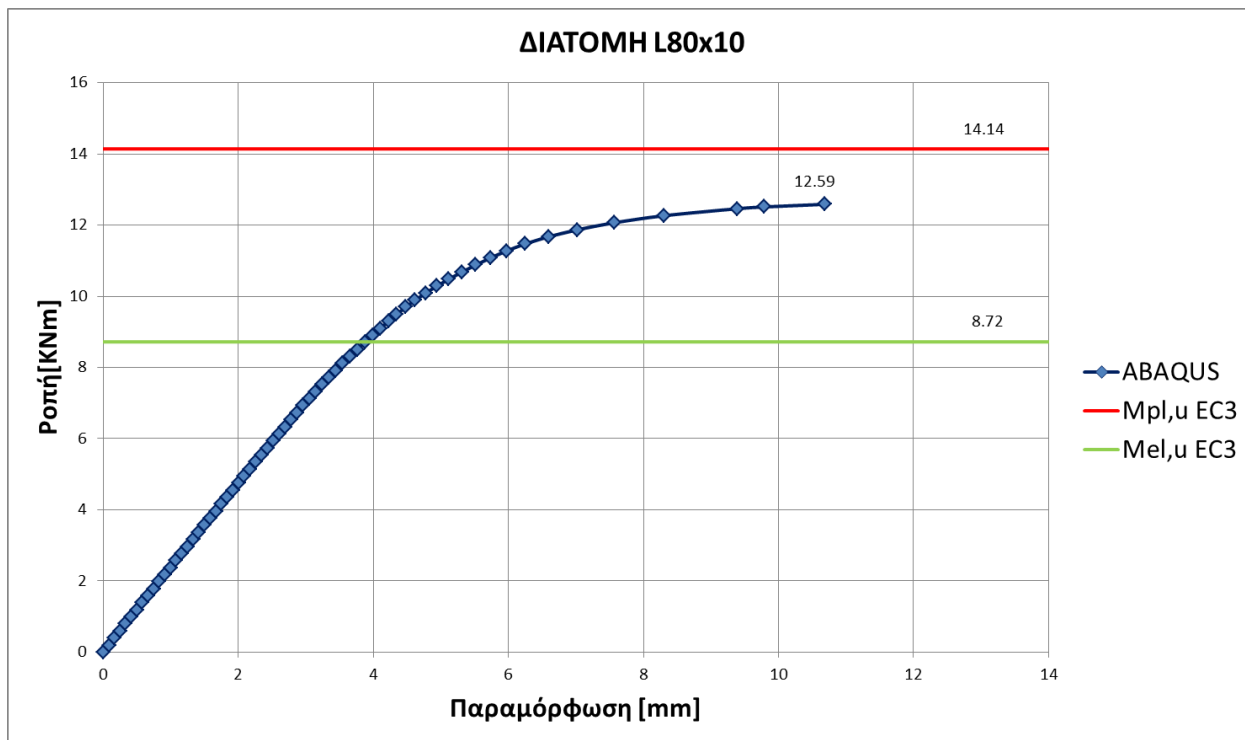
Σχήμα 2.25: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L75x8 κατηγορίας 3



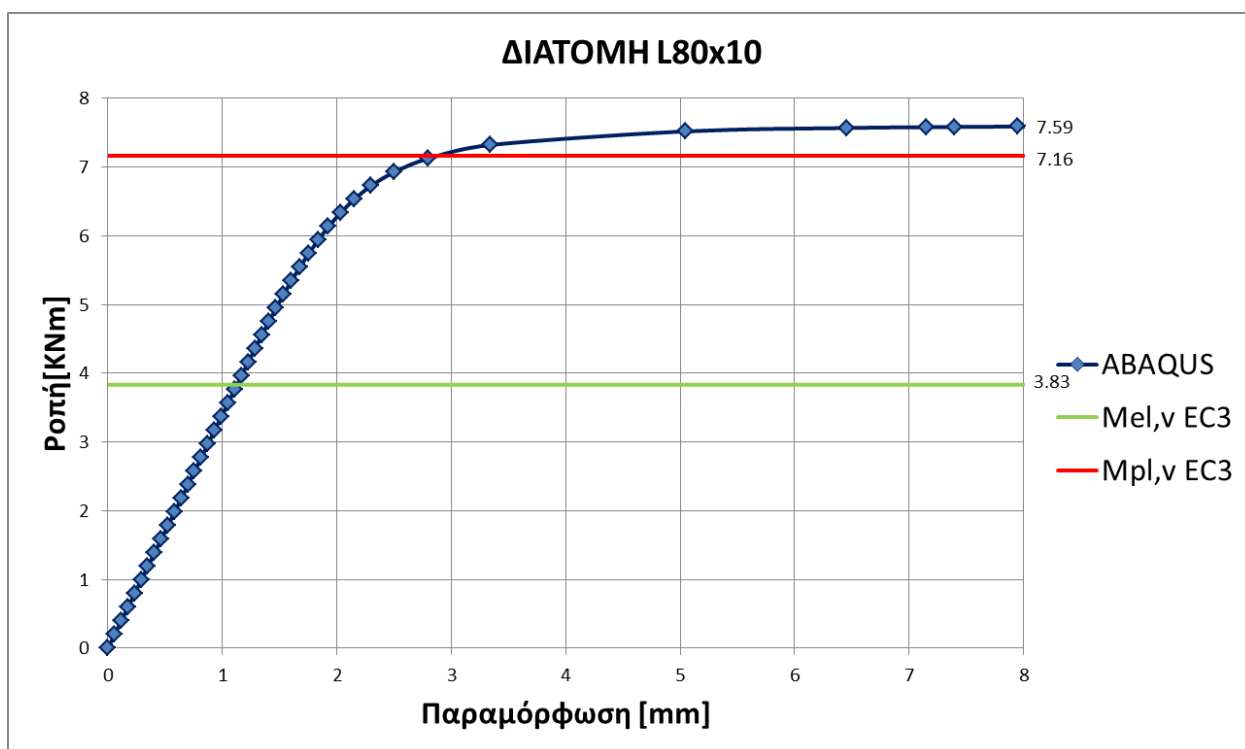
Σχήμα 2.26.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L80x8 κατηγορίας 3



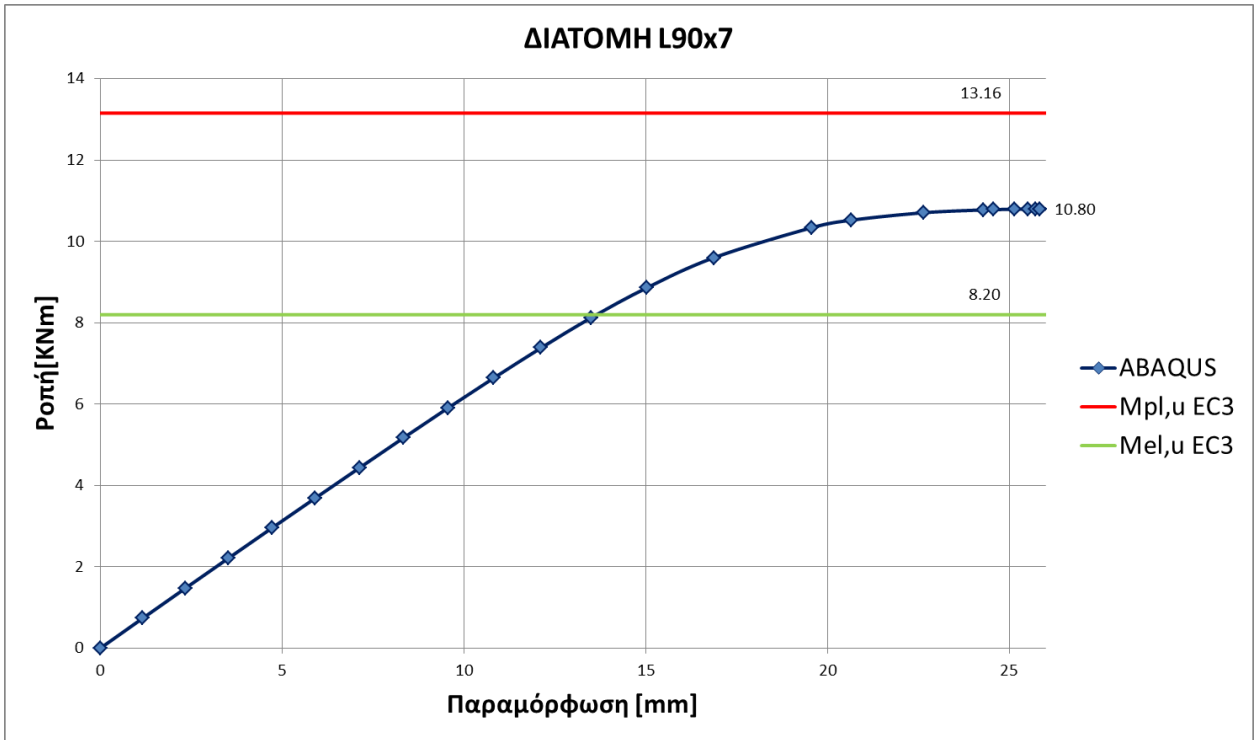
Σχήμα 2.27: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L80x8 κατηγορίας 3



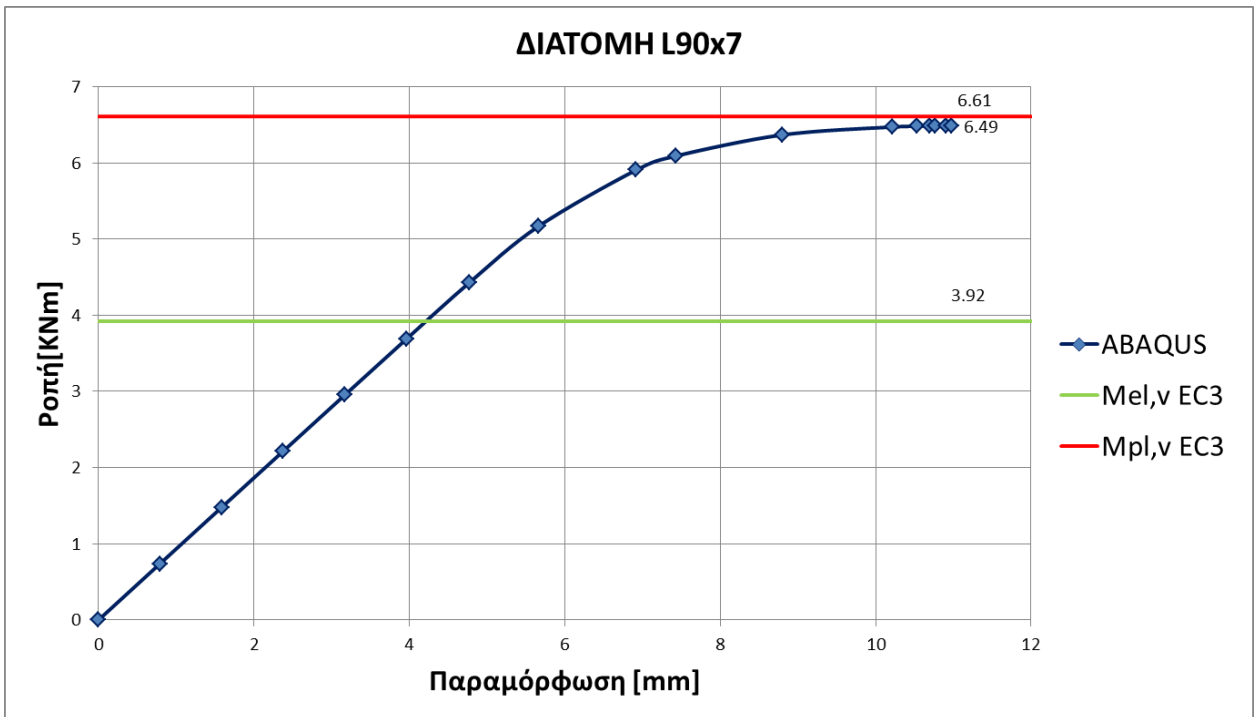
Σχήμα 2.28.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L80x10 κατηγορίας 3



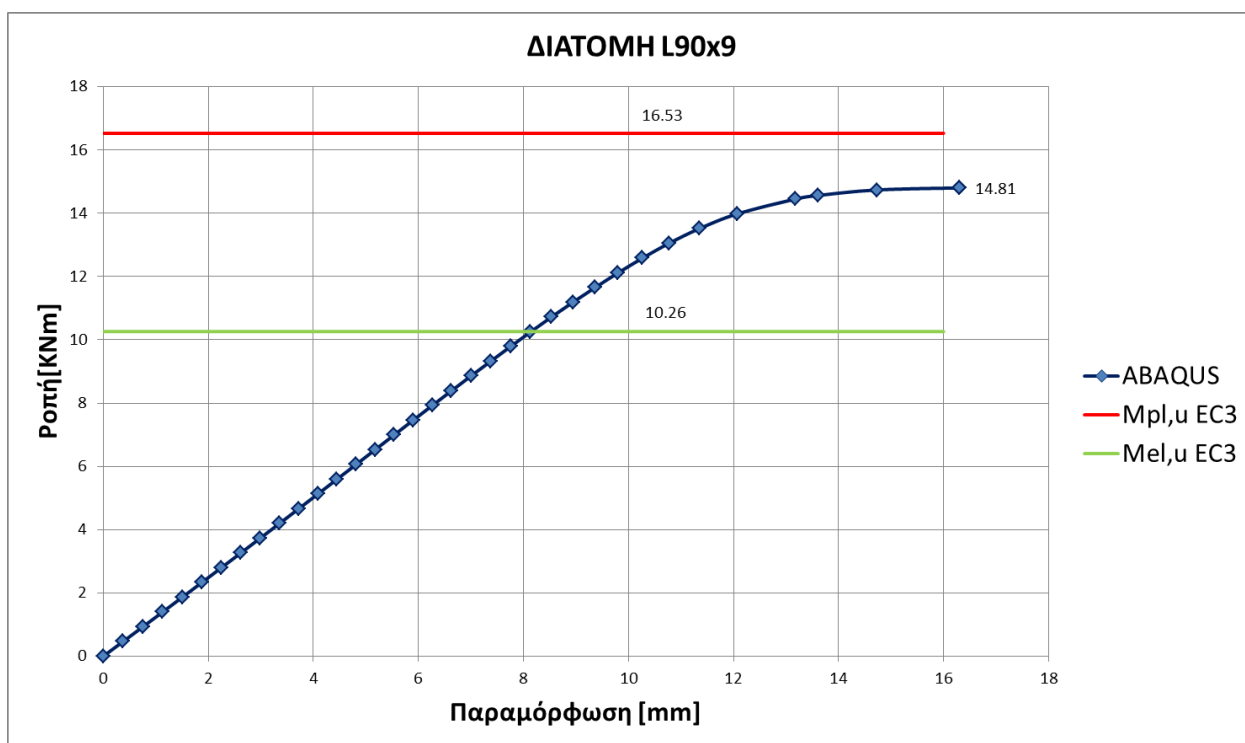
Σχήμα 2.29.: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L80x10 κατηγορίας 3



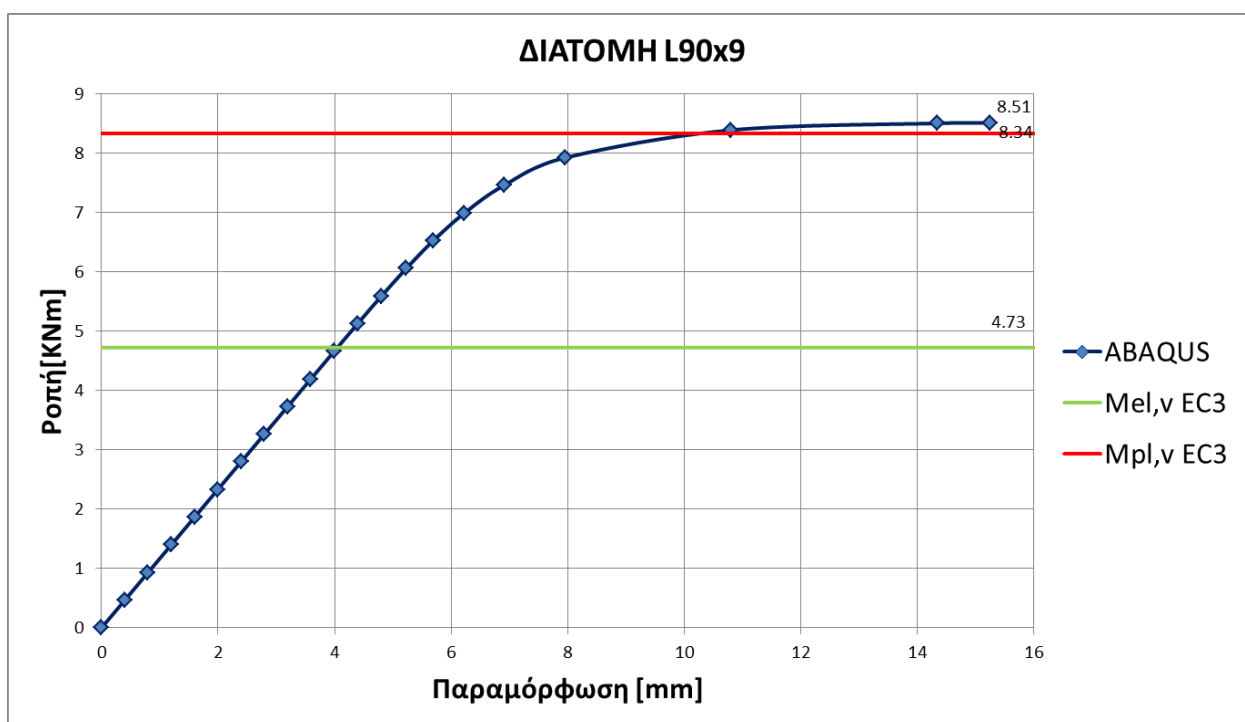
Σχήμα 2.30.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L90x7 κατηγορίας 4



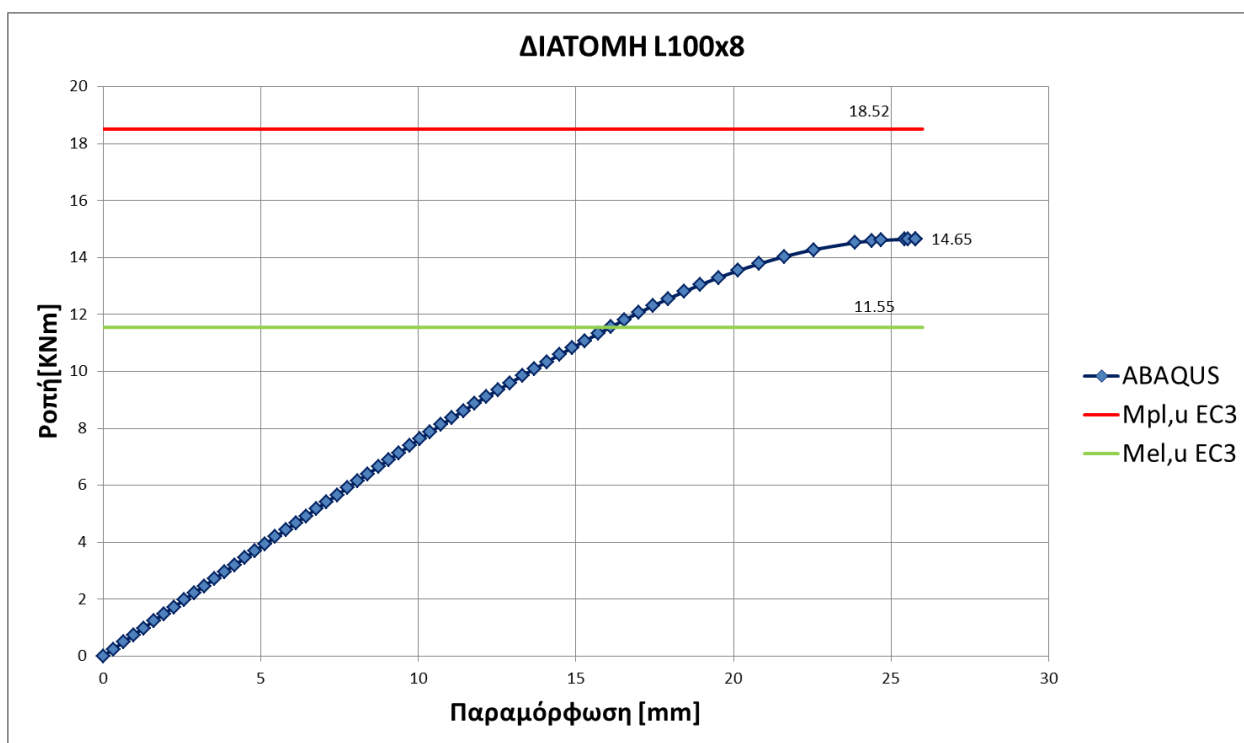
Σχήμα 2.31.: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L90x7 κατηγορίας 4



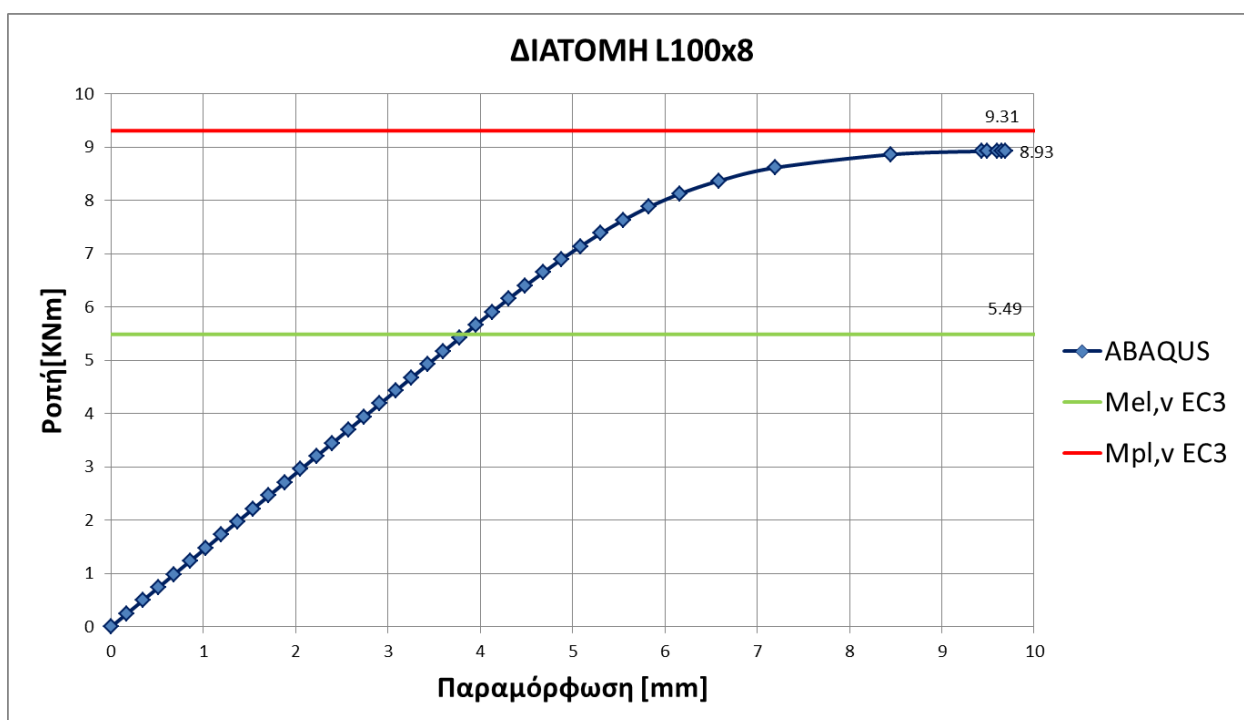
Σχήμα 2.32.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L90x9 κατηγορίας 3



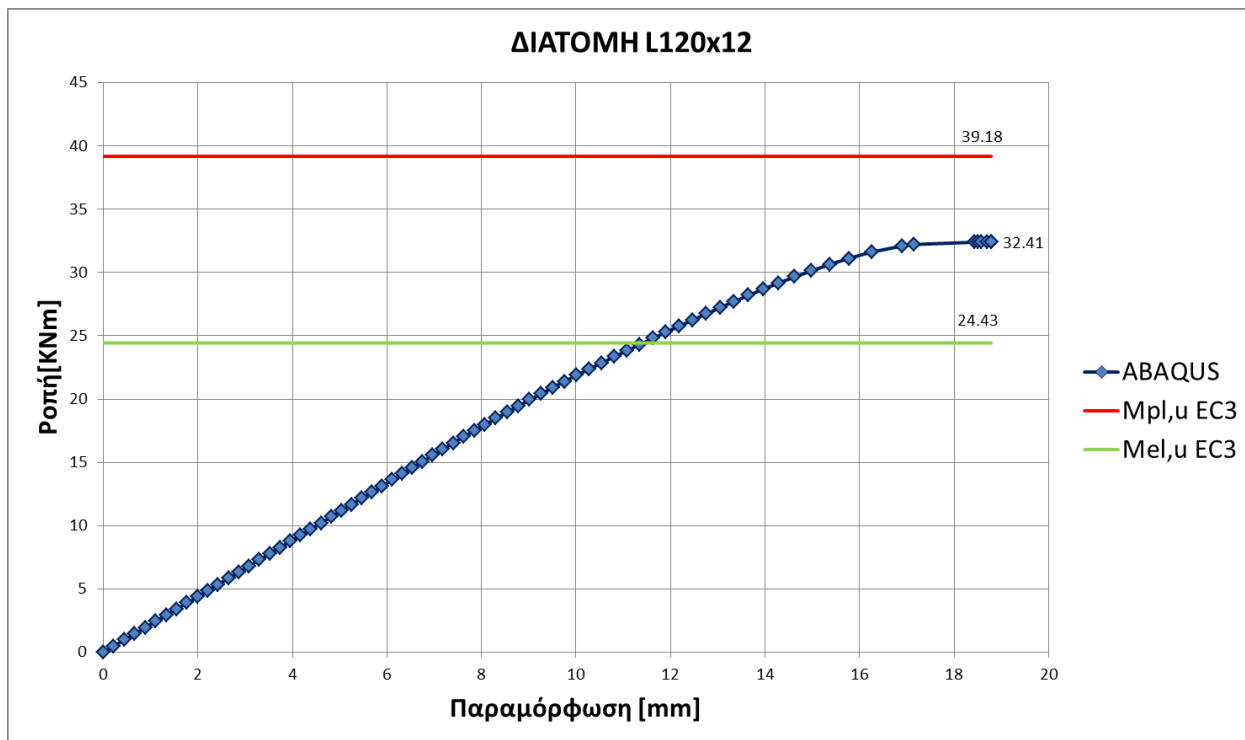
Σχήμα 2.33: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L90x9 κατηγορίας 3



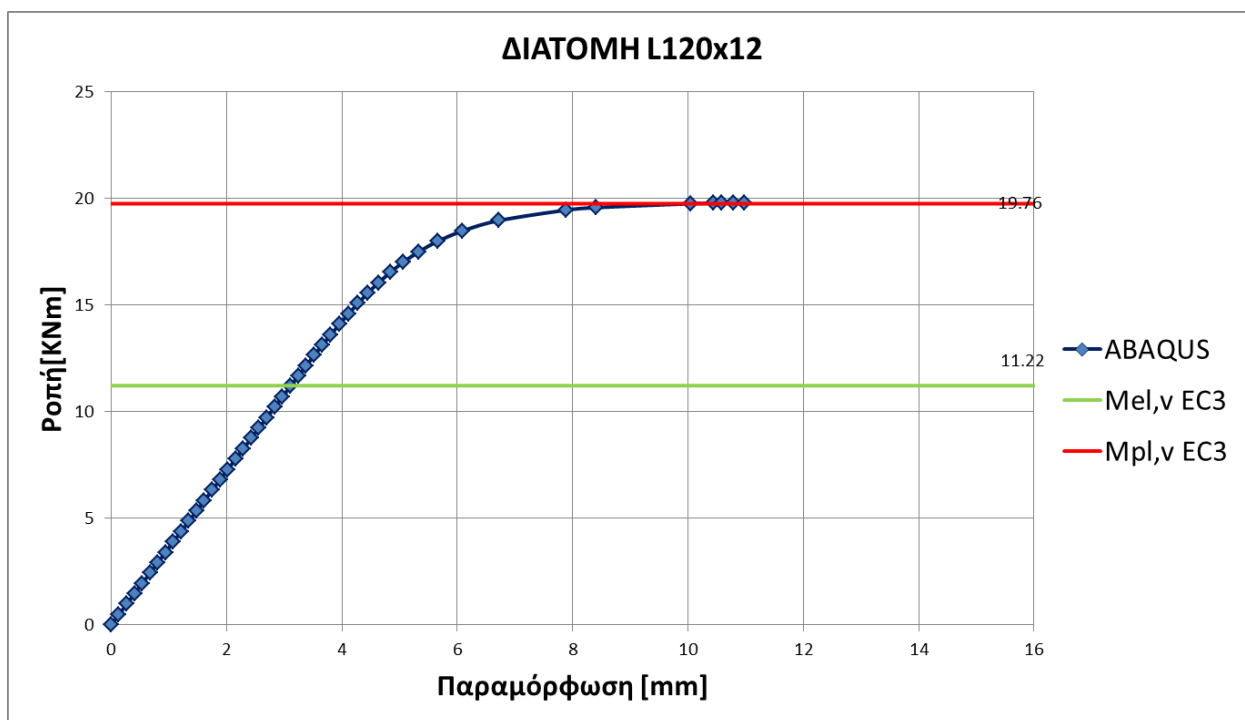
Σχήμα 2.34.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L100x8 κατηγορίας 4



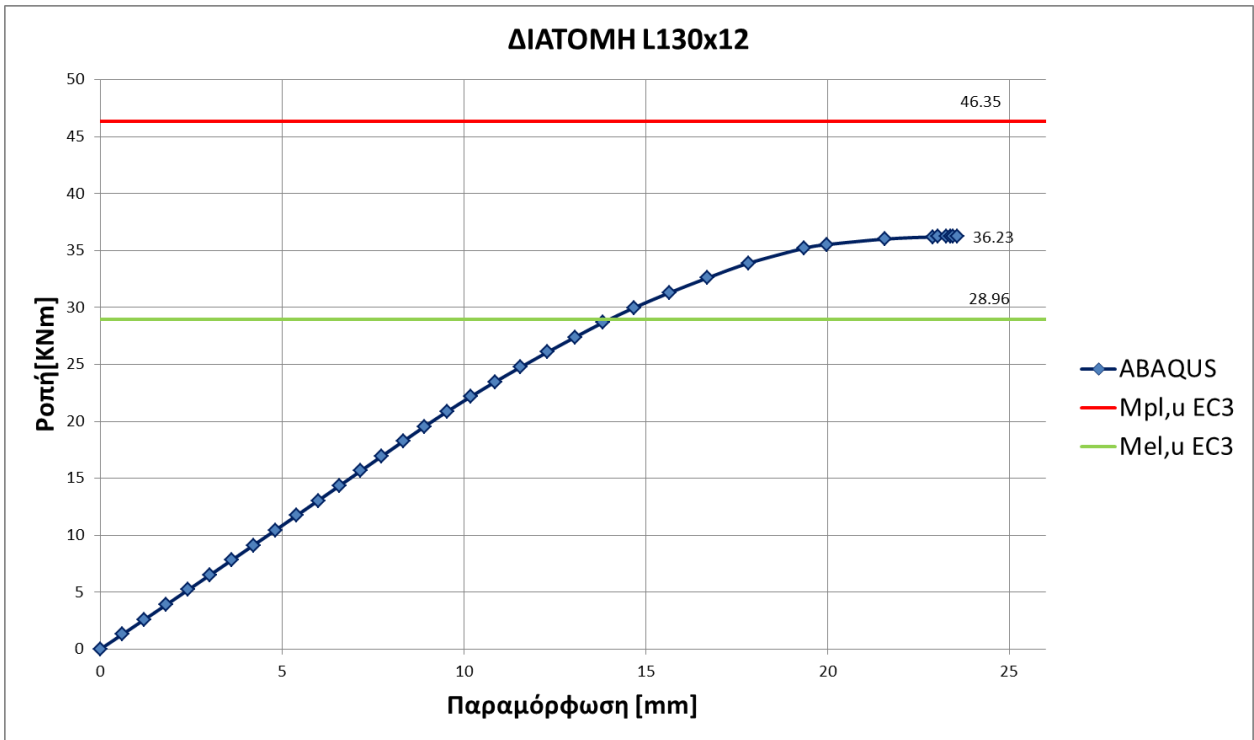
Σχήμα 2.35: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L100x8 κατηγορίας 4



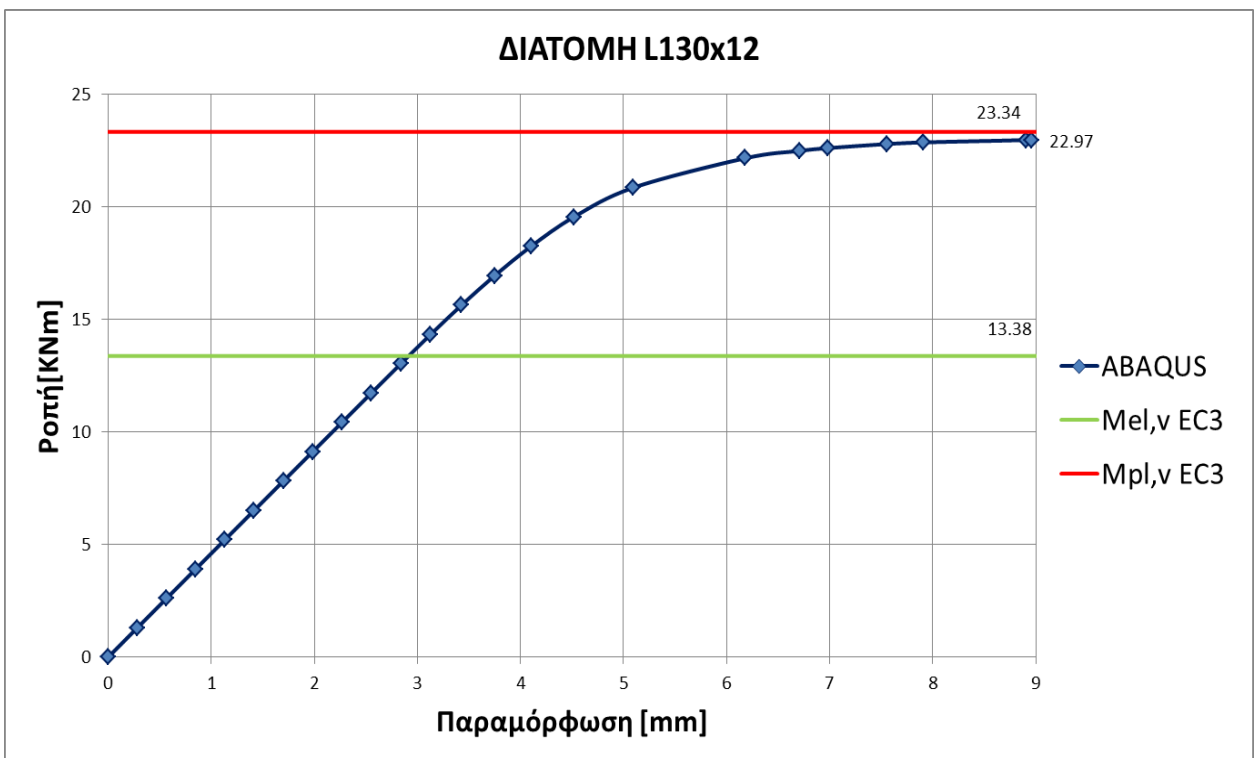
Σχήμα 2.36.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L120x12 κατηγορίας 3



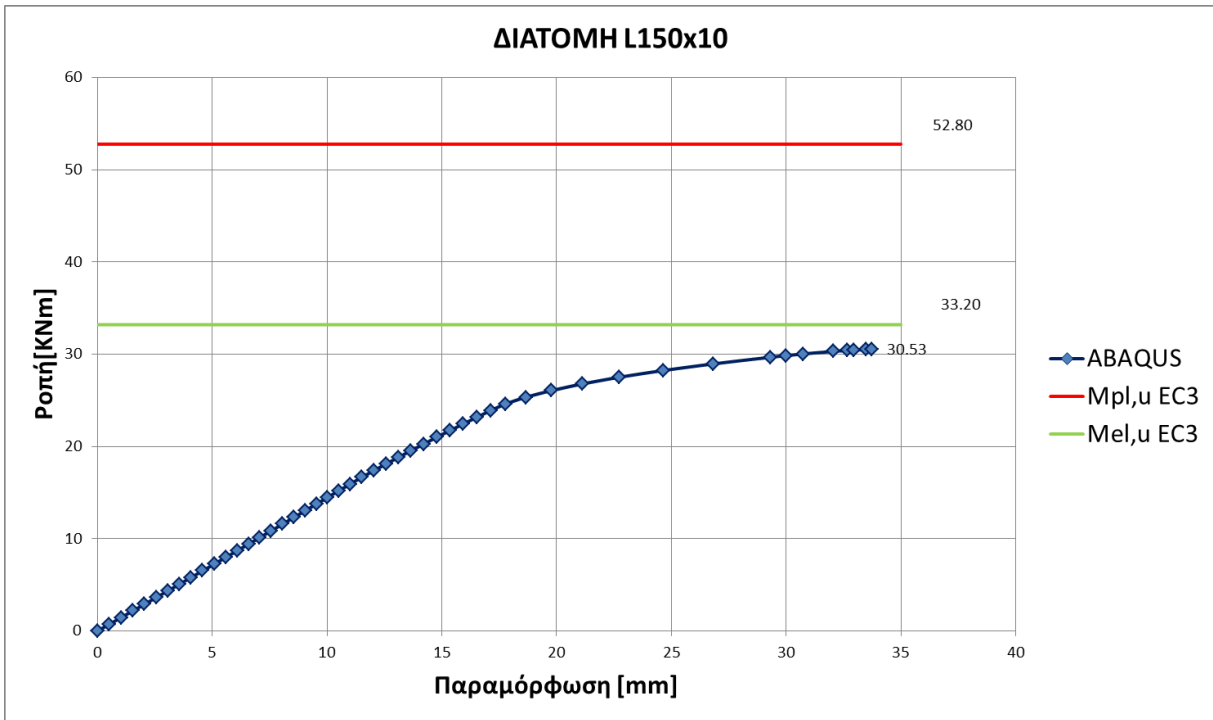
Σχήμα 2.37.: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L120x12 κατηγορίας 3



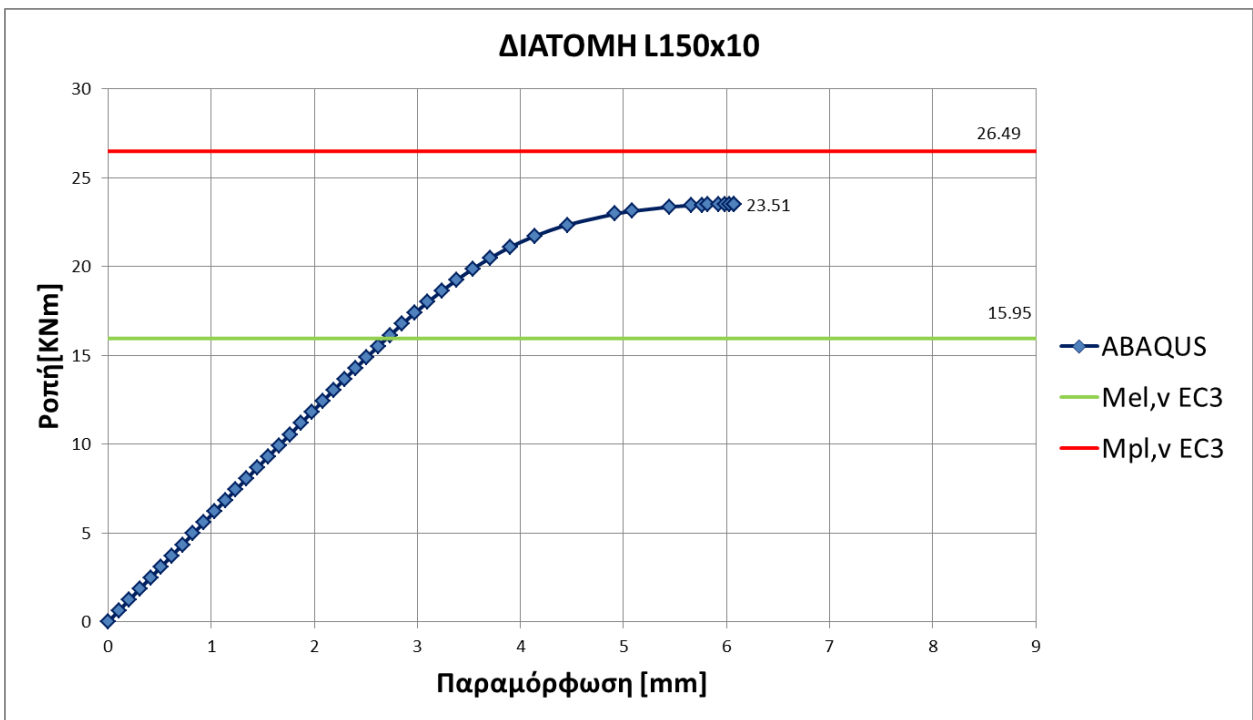
Σχήμα 2.38.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L130x12 κατηγορίας 3



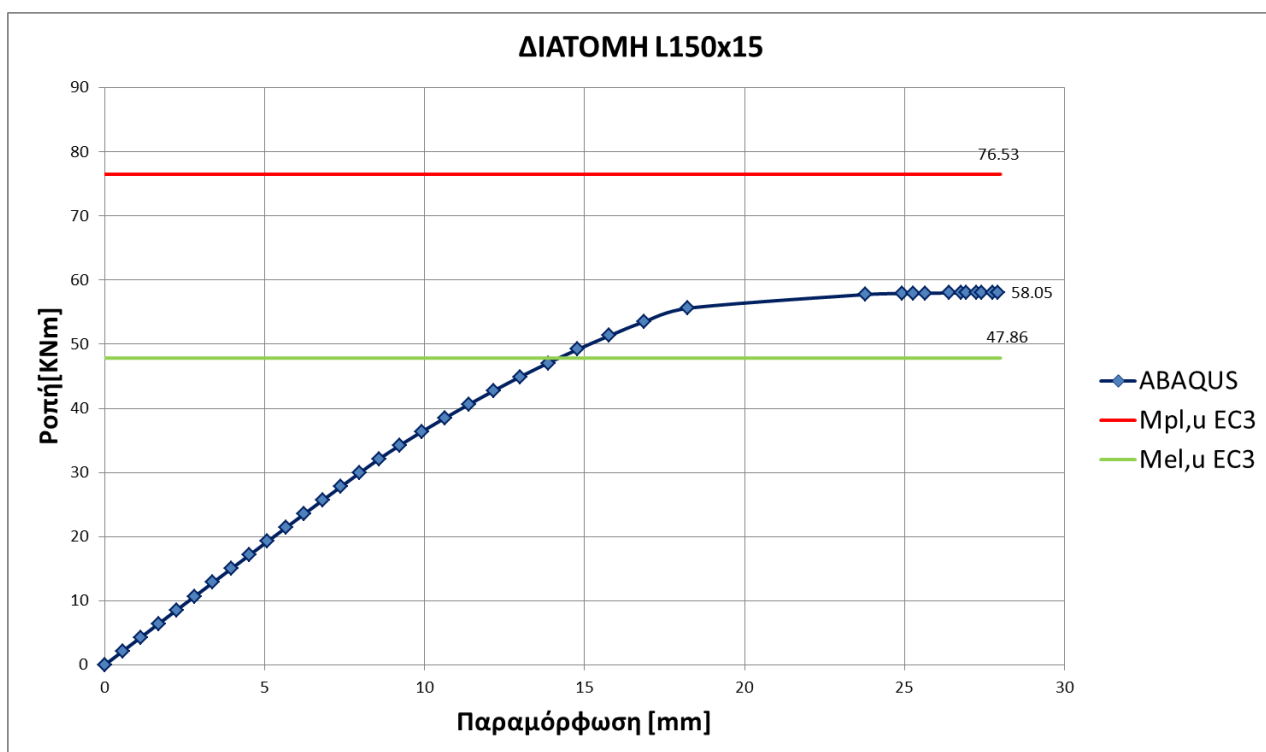
Σχήμα 2.39: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L130x12 κατηγορίας 3



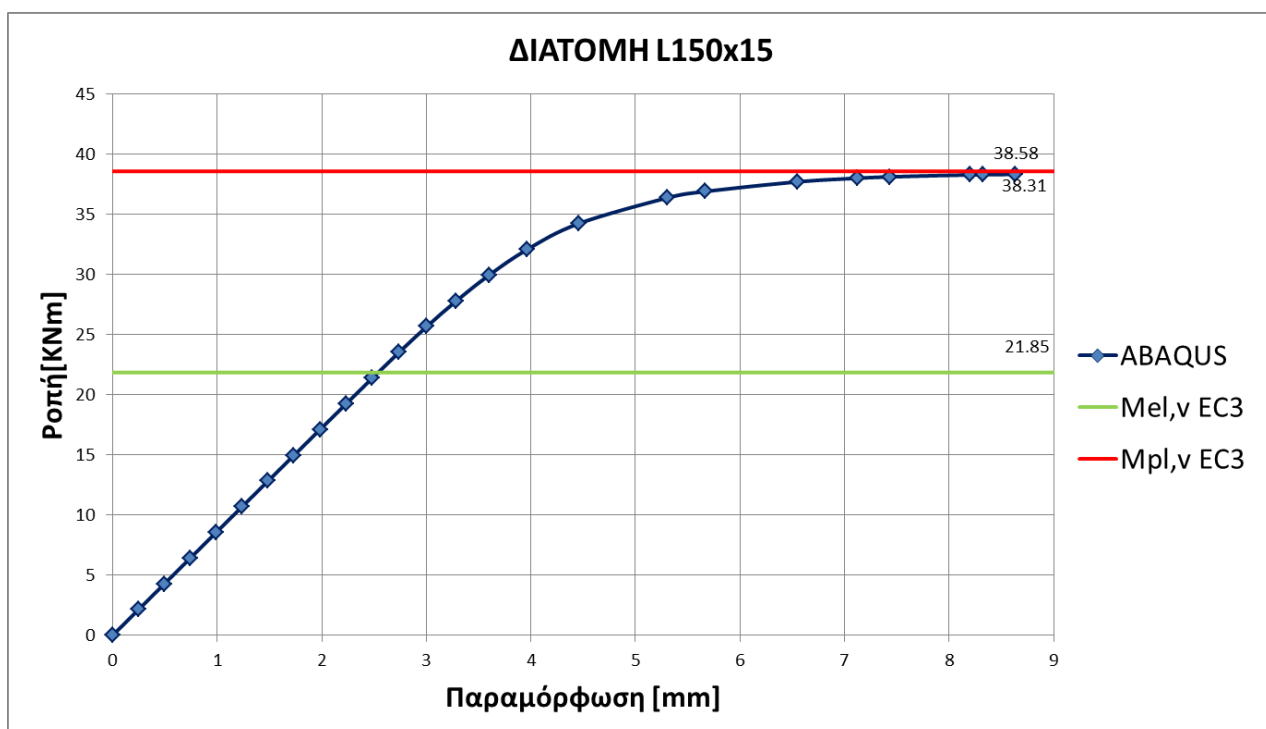
Σχήμα 2.40.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L150x10 κατηγορίας 4



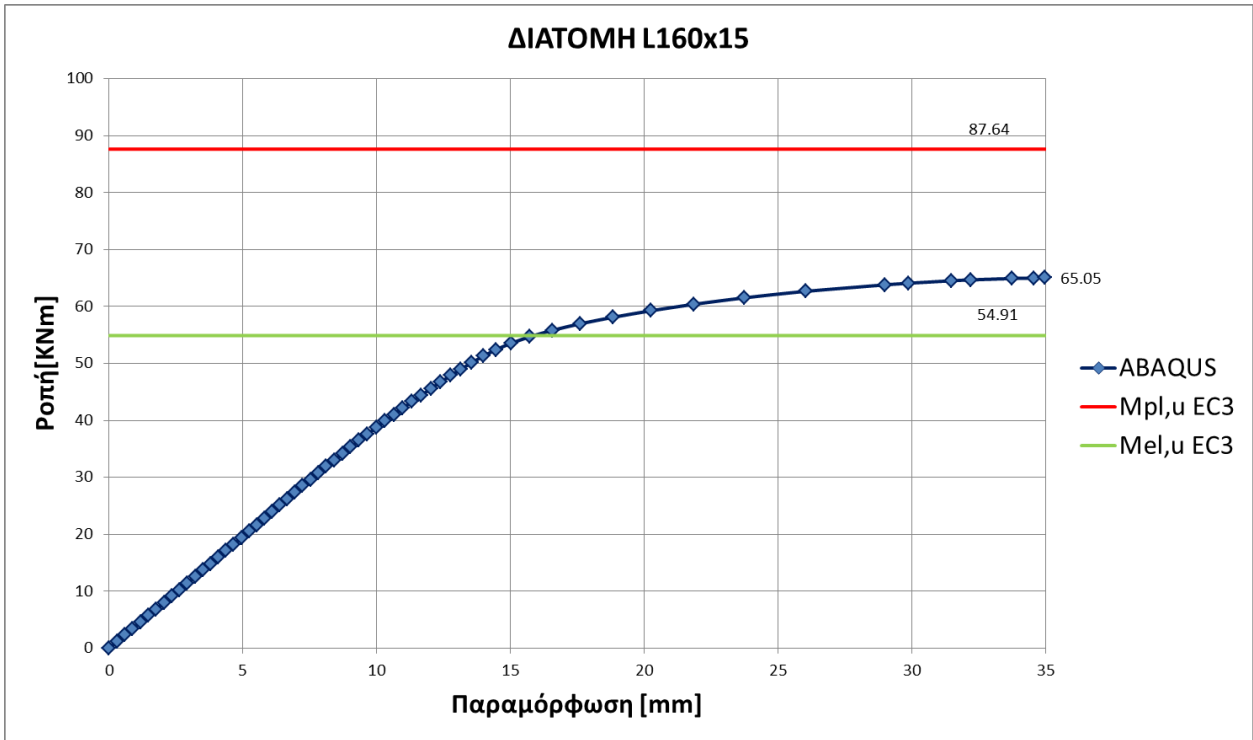
Σχήμα 2.41: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L150x10 κατηγορίας 4



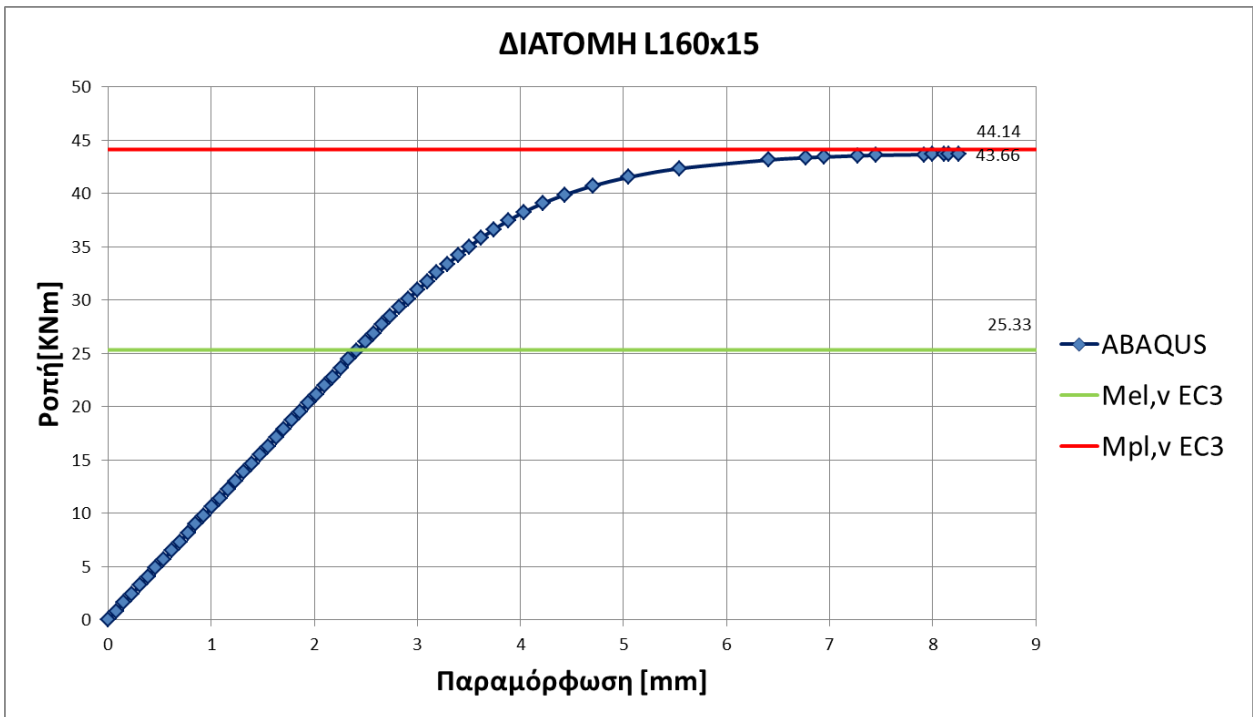
Σχήμα 2.42.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L150x15 κατηγορίας 3



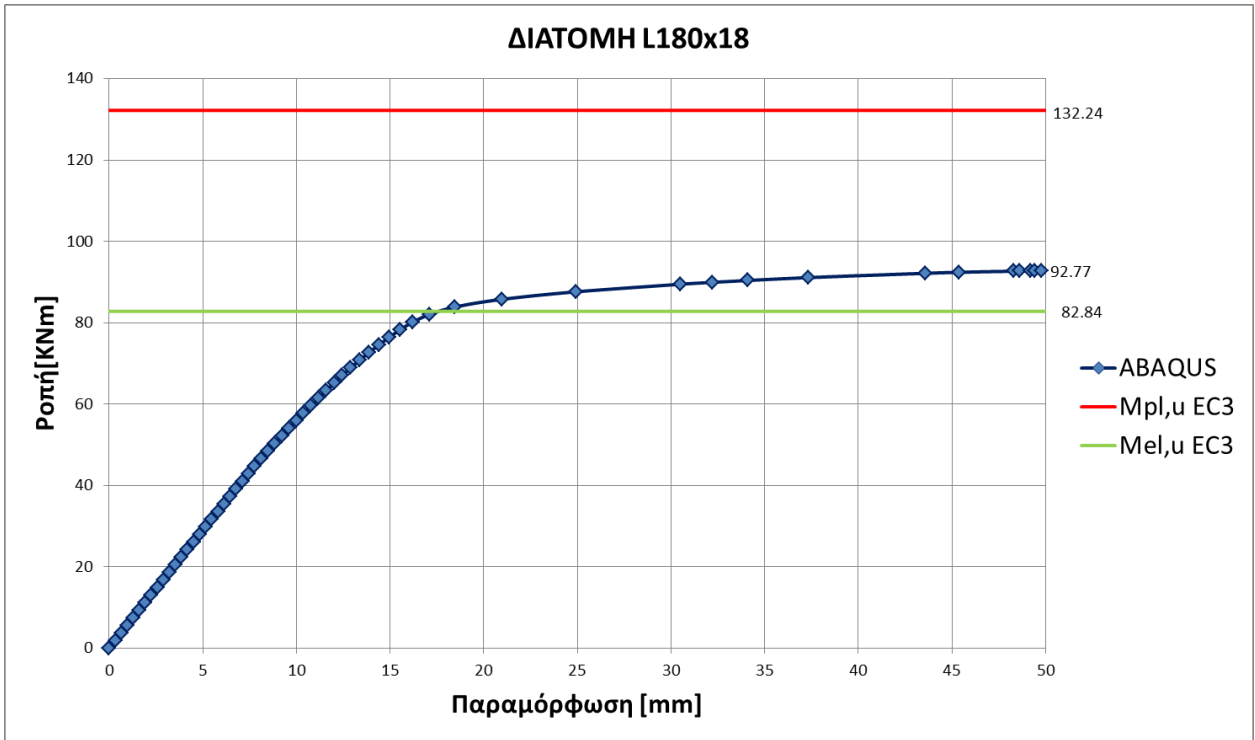
Σχήμα 2.43.: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L150x15 κατηγορίας 3



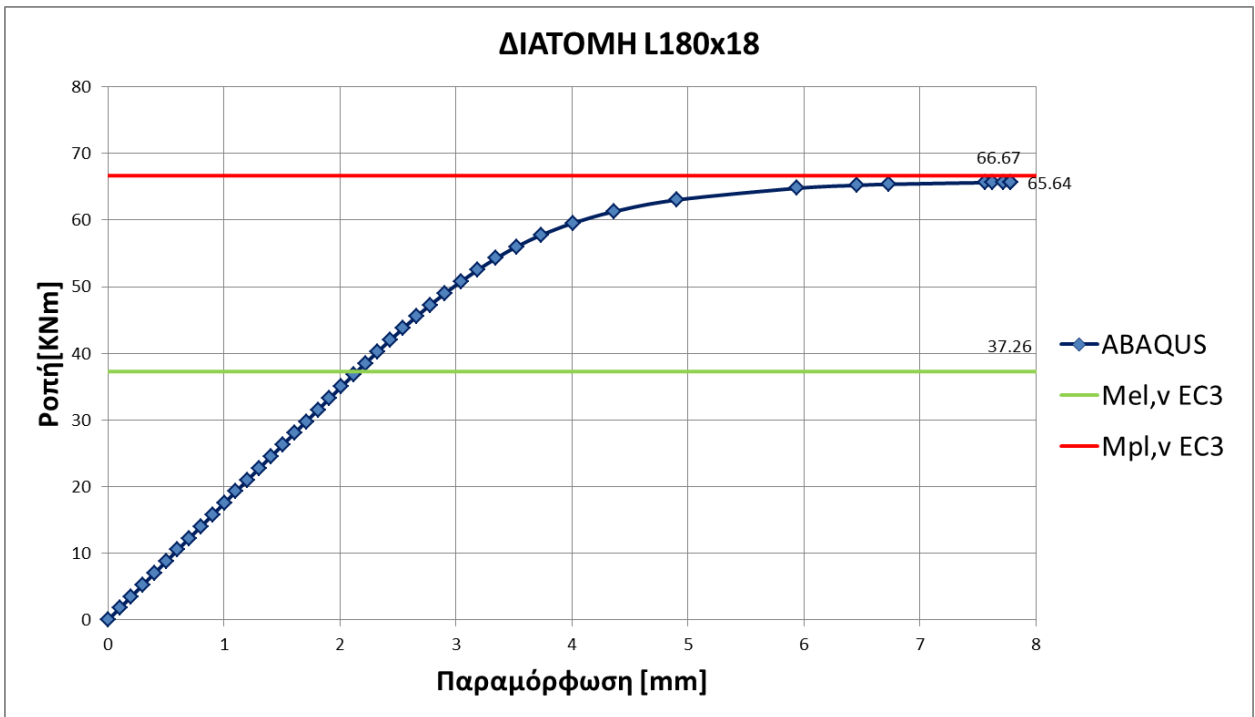
Σχήμα 2.44.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L160x15 κατηγορίας 3



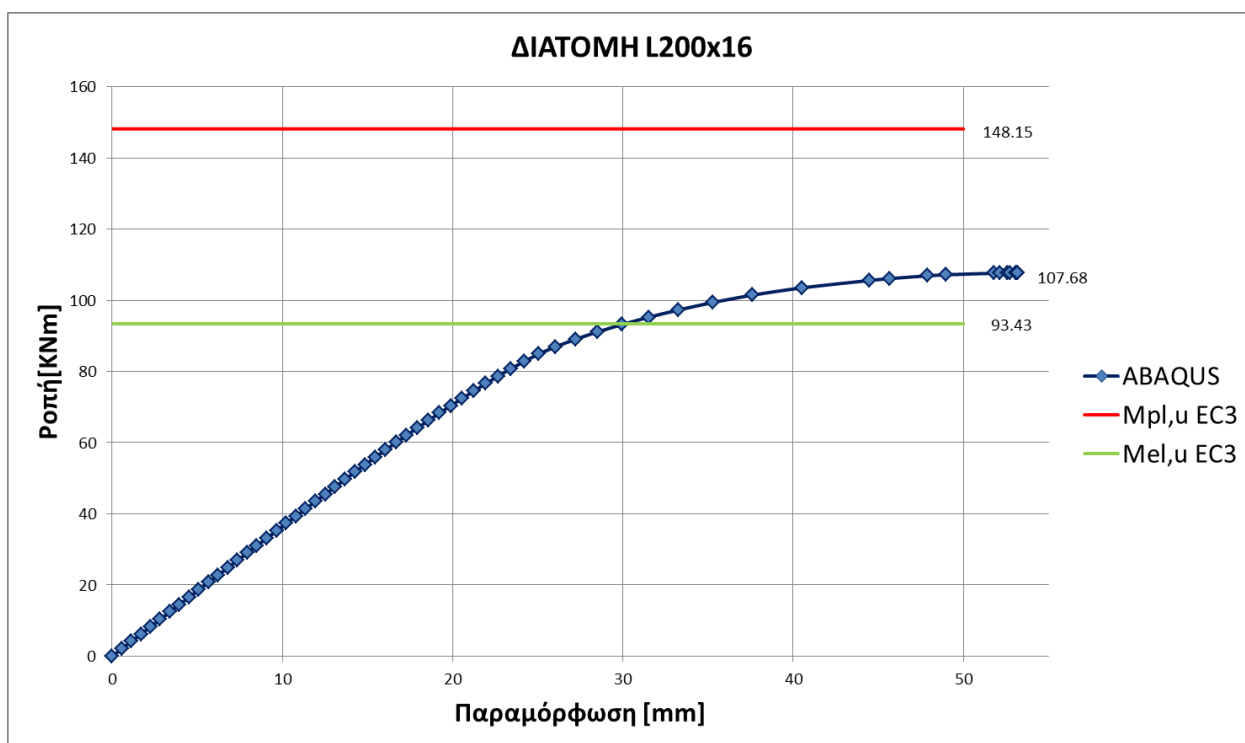
Σχήμα 2.45: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L160x15 κατηγορίας 3



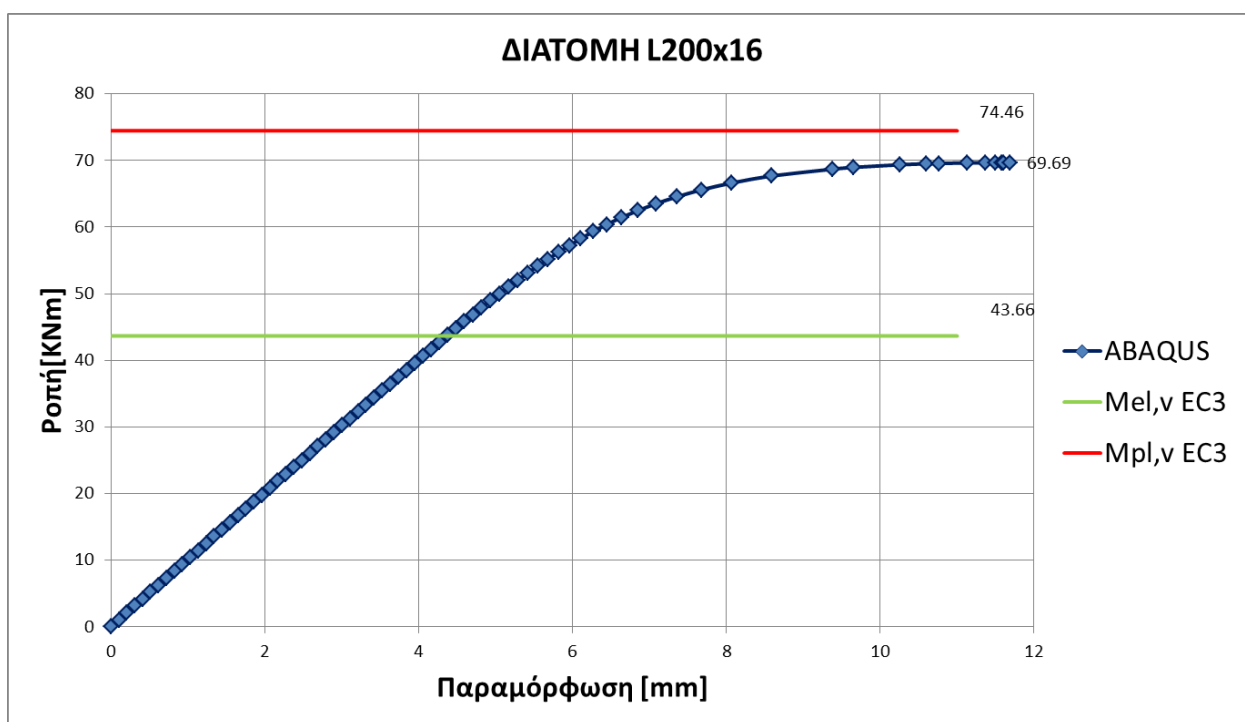
Σχήμα 2.46.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L180x18 κατηγορίας 3



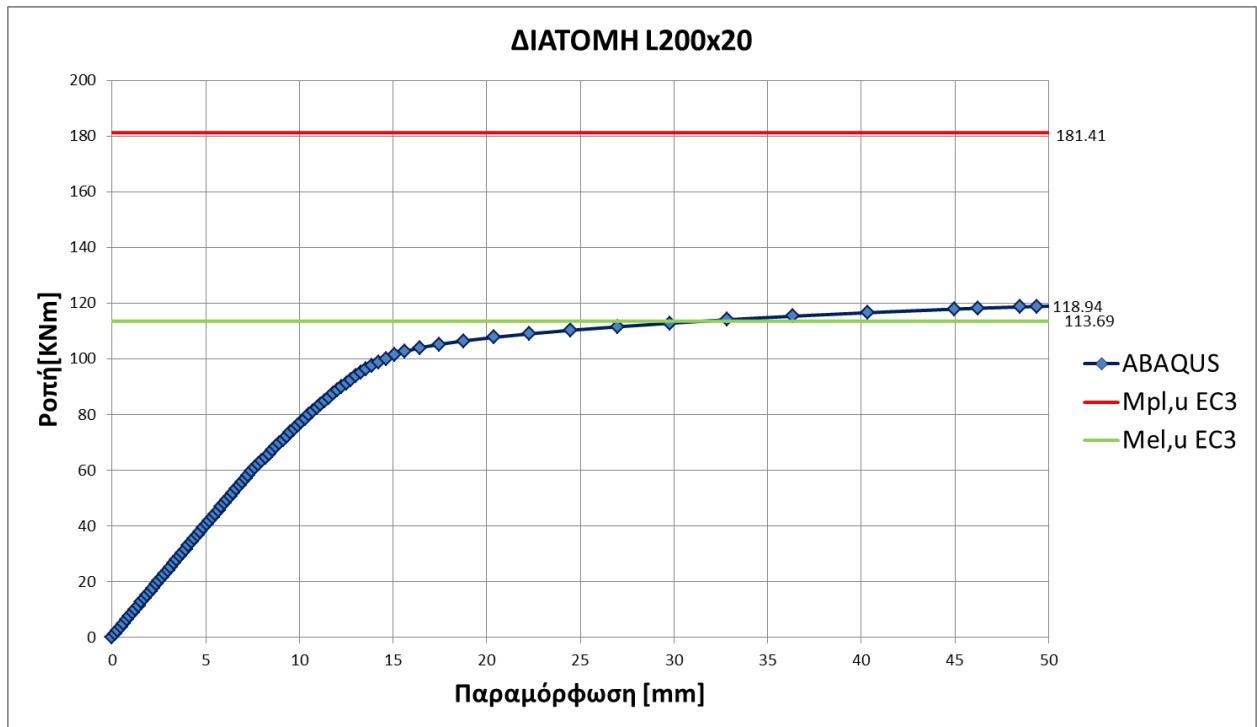
Σχήμα 2.47.: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L180x18 κατηγορίας 3



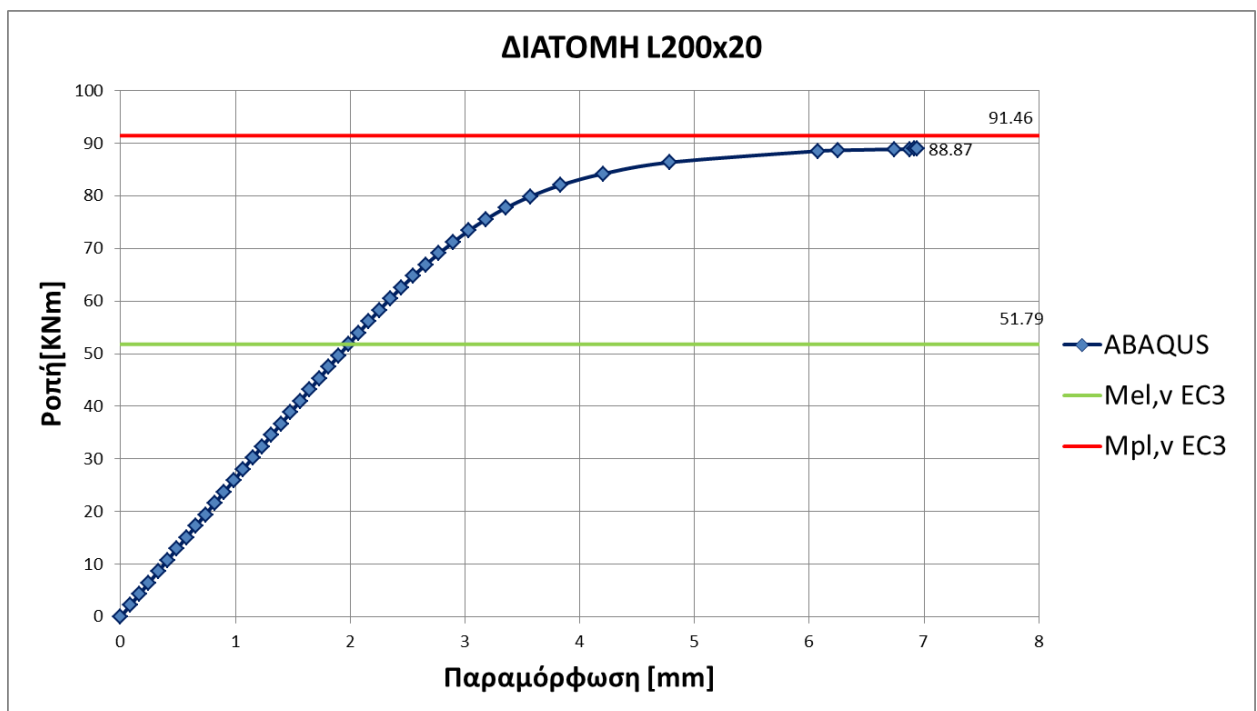
Σχήμα 2.48.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L200x16 κατηγορίας 4



Σχήμα 2.49.: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L200x16 κατηγορίας 4



Σχήμα 2.50.: Κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα (M_u) διατομής L200x20 κατηγορίας 3



Σχήμα 2.51: Κάμψη κατά τον ασθενή άξονα (M_v) διατομής L200x20 κατηγορίας 3

2.4 Συμπεράσματα

Η κατάταξη μίας διατομής όπως προαναφέρθηκε βασίζεται στην ικανότητά της να αναπτύξει τα απαιτούμενα μεγέθη ροπών, χωρίς την πρόωρη εμφάνιση τοπικού λυγισμού η οποία μειώνει τη φέρουσα ικανότητα της.

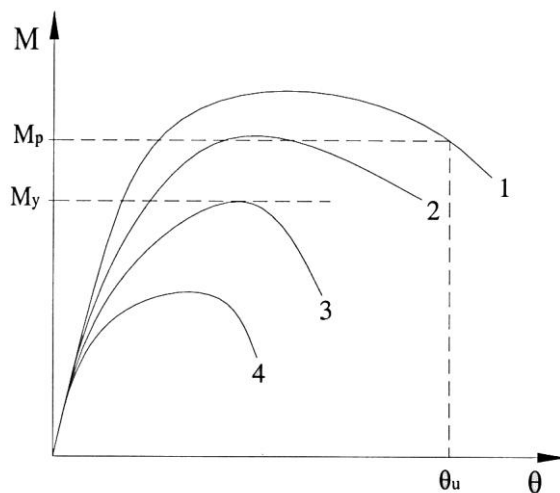
Ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται όταν οι ίδιες οι διατομές παραμορφώνονται, μη διατηρώντας το σχήμα τους. Τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στις λεπτότοιχες διατομές κατηγορίας 4, με μεγάλες τιμές του λόγου b/t των τοιχωμάτων τους.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα οι διατομές κατηγορίας 4 δεν έχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης της ελαστικής ροπής λόγω της πρόωρης εμφάνισης τοπικού λυγισμού και ο συντελεστής εκμετάλλευσής τους πάντα $M/M_{el,rd} < 1$.

Για τις διατομές κατηγορίας 3, δηλαδή αυτές που έχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης της ελαστικής ροπής (ροπή στην οποία στην ακραία ίνα αναπτύσσεται η τάση διαρροής), ο συντελεστής εκμετάλλευσης οριακά είναι $M/M_{el,rd} = 1$.

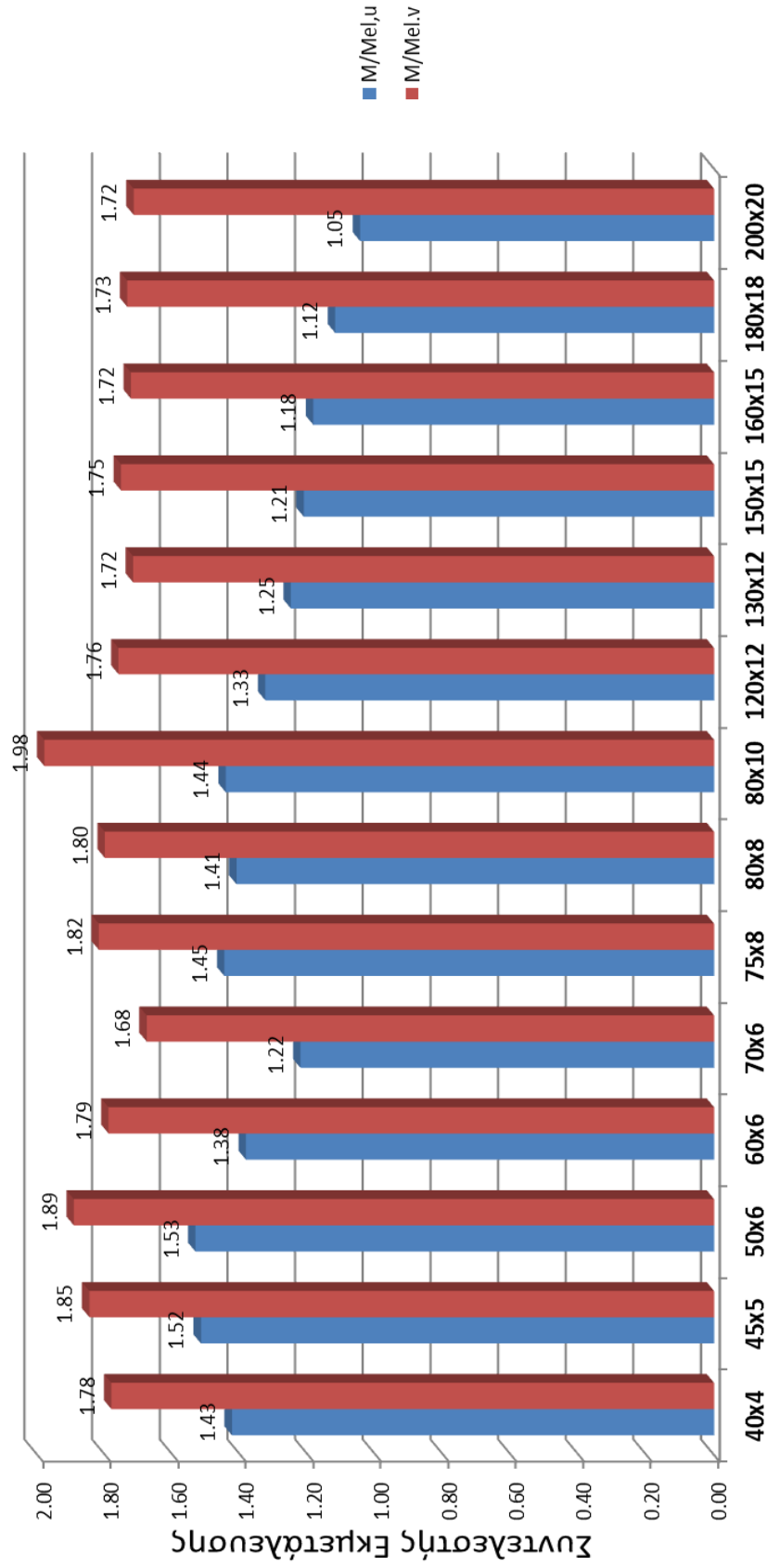
Για τις διατομές κατηγορίας 2, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης της πλαστικής ροπής, ο συντελεστής εκμετάλλευσης $M/M_{el,rd} = 1$ (καθώς σίγουρα αναπτύσσουν την ελαστική ροπή) και $M/M_{pl,rd} = 1$ ή οριακά > 1 .

Τέλος για τις διατομές κατηγορίας 1, που όχι μόνον αναπτύσσουν πλαστική ροπή αλλά έχουν και επαρκή στρωφική ικανότητα ώστε να διατηρήσουν την αντοχή τους και μετά την εμφάνιση των για την ανακατανομή απαιτούμενων πλαστικών στρωφών, ο συντελεστής εκμετάλλευσης $M/M_{el,rd} = 1$ (καθώς σίγουρα αναπτύσσουν την ελαστική ροπή) και $M/M_{pl,rd} > 1$.

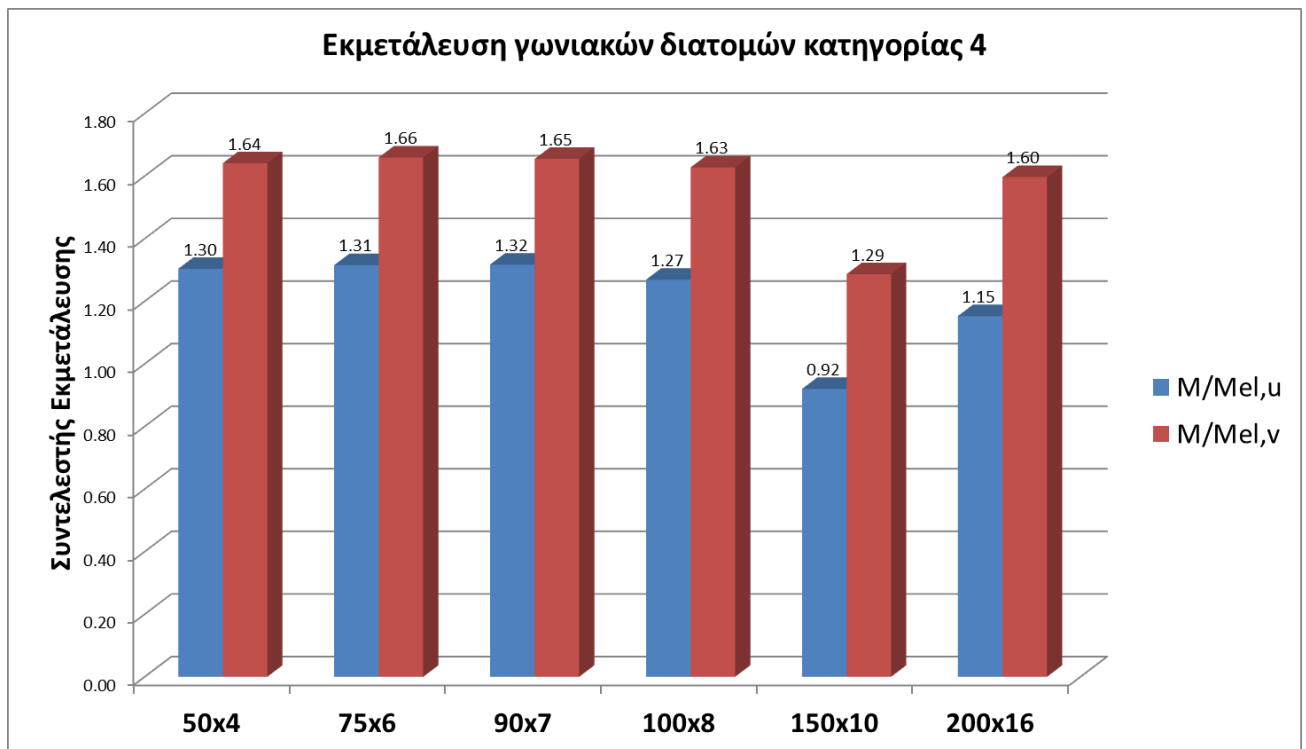


Σχήμα 2.52: Συμπεριφορά κατηγοριών διατομών

Εκμετάλλευση γωνιακών διατομών κατηγορίας 3



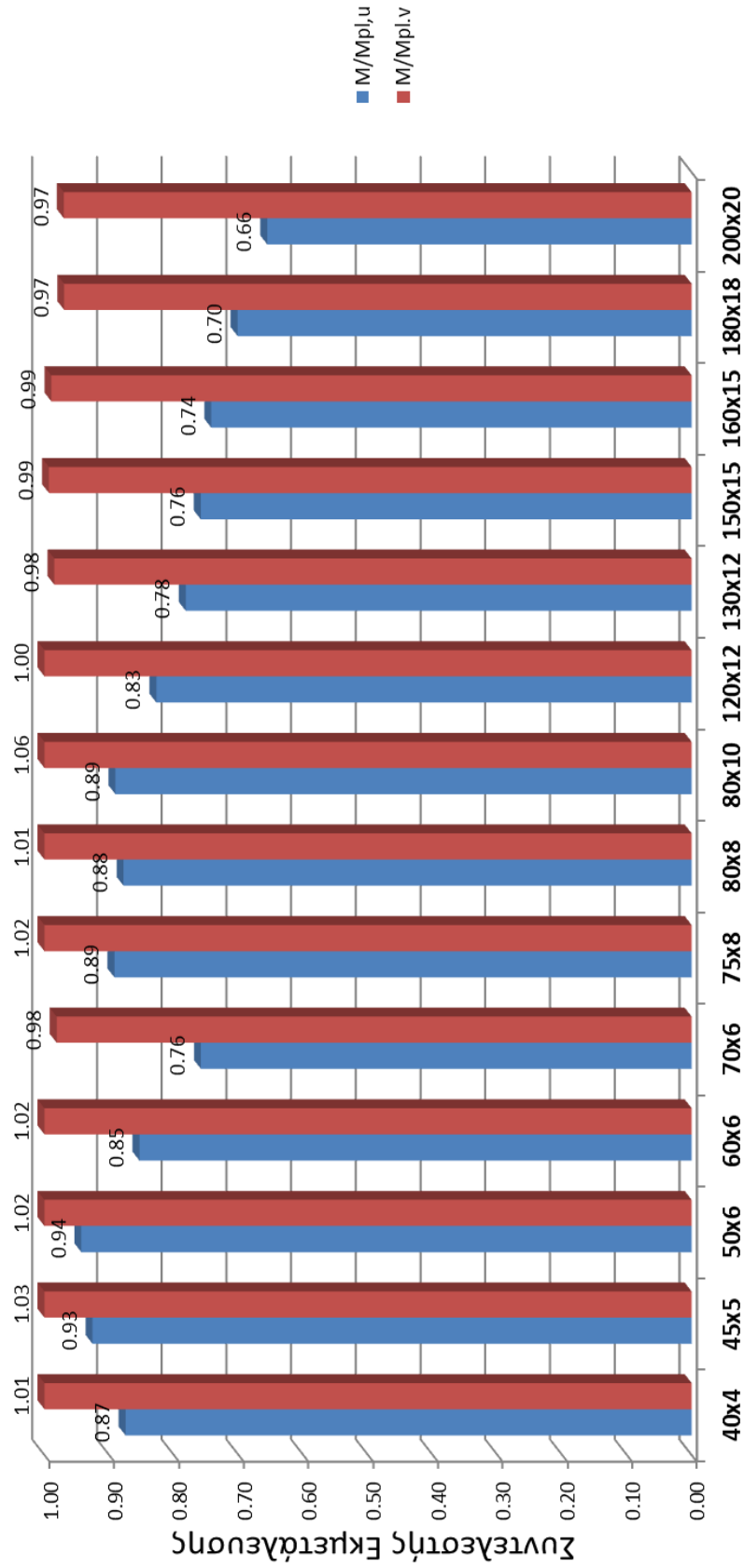
Σχήμα 2.53: Συντελεστές εκμετάλλευσης M/MeI,rd για διατομές κατηγορίας 3



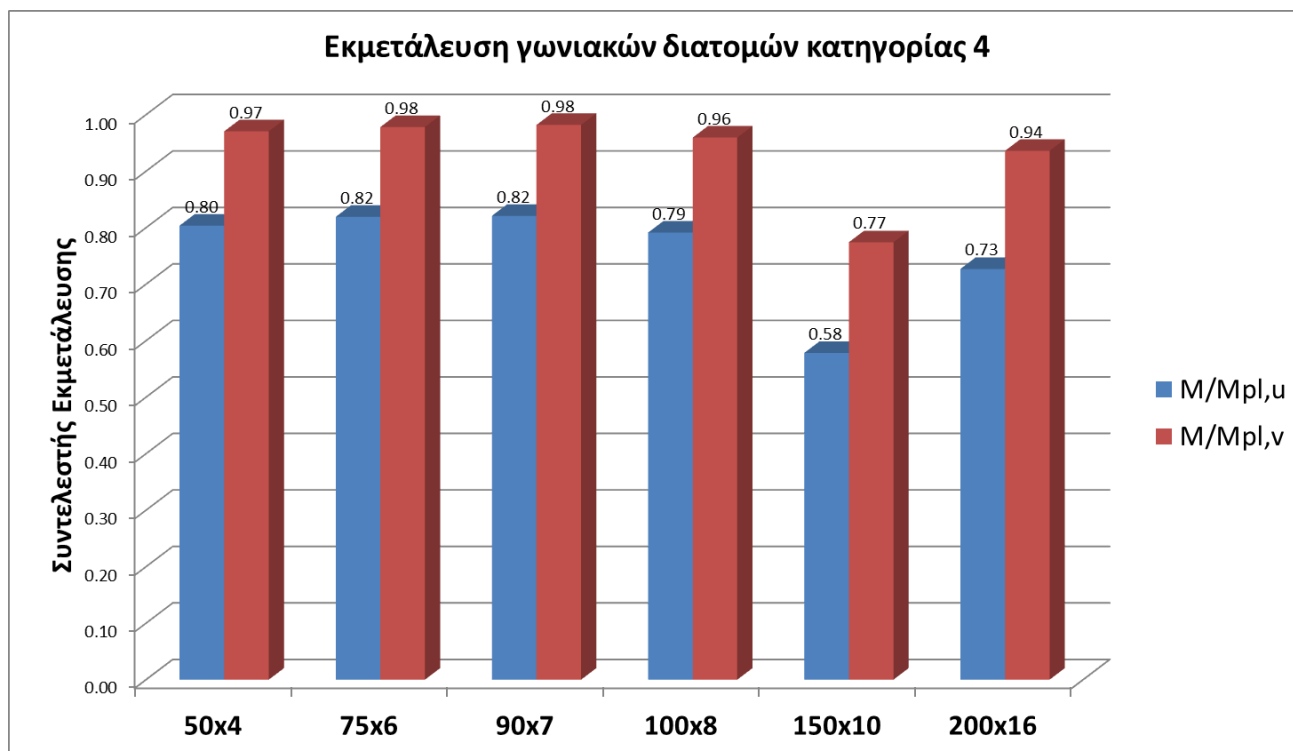
Σχήμα 2.54: Συντελεστές εκμετάλλευσης M/Mel,rd για διατομές κατηγορίας 4

Παρατηρούμε λοιπόν ότι όλες οι διατομές που υποβλήθηκαν στην κάμψη, τόσο κατηγορίας 3 (που ήταν αναμενόμενο να αναπτύξουν την ελαστική ροπή $M/M_{el,rd}=1$) όσο κατηγορίας 4 (που αναμενόταν σύμφωνα με τον ευρωκώδικα EC3 να μην αναπτύξουν την ελαστική ροπή $M/M_{el,rd}<1$), όχι μόνο αναπτύσσουν αλλά ξεπερνούν την ελαστική ροπή τους σε όλες τις περιπτώσεις, κατά τους δύο άξονες κάμψης με εξαίρεση την διατομή 150X10 κατηγορίας 4.

Εκμετάλλευση γωνιακών διατομών κατηγορίας 3



Σχήμα 2.56: Συντελεστές εκμετάλλευσης M/Mpl, u για διατομές κατηγορίας 3



Σχήμα 2.56: Συντελεστές εκμετάλλευσης M/Mpl,rd για διατομές κατηγορίας 4

Όσον αφορά την ανάπτυξη της πλαστικής αντοχής των διατομών, όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα εκμετάλλευσης, παρατηρούμε ότι για τις διατομές κατηγορίας 3 κατά ευρωκώδικα EC3 και για κάμψη κατά τον ασθενή άξονα όλες σχεδόν οι διατομές οριακά αναπτύσσουν πλαστική ροπή χωρίς όμως περιτταίρω περιθώρια στροφικής ικανότητας ($M/M_{pl,rd}=1$ ή οριακά >1 χαρακτηριστικό των διατομών κατηγορίας 2 κατά ευρωκώδικα EC3). Για την κάμψη κατά τον ισχυρό άξονα επίσης παρατηρούμε ότι αναπτύσσεται από τις διατομές κατηγορίας 3 ένα 80% κατά μέσον όρο περίπου της πλαστικής ροπής.

Οι διατομές κατηγορίας 4, για κάμψη κατά τον ασθενή άξονα ανέπτυξαν καμπτική αντοχή σε ποσοστό 96% κατά μέσον όρο της πλαστικής. Για τον ισχυρό άξονα τα αποτελέσματα έδειξαν πως παρόλο που δεν αναπτύσσεται η πλαστική ροπή, υπάρχουν σημαντικά περιθώρια αντοχής πέρα από την ελαστική ροπή, η οποία όπως προαναφέρθηκε για διατομές κατηγορίας 4 σύμφωνα με τον ευρωκώδικα EC3 δεν αναπτύσσεται λόγω πρόωρης αστοχίας λόγω τοπικού λυγισμού.

h(mm)	b(mm)	$M_u/M_{pl,u}$	$M_v/M_{pl,v}$	$M_u/M_{el,u}$	$M_v/M_{el,v}$	Κατηγορία διατομής
50	4	0.80	0.97	1.30	1.64	4
75	6	0.82	0.98	1.31	1.66	4
90	7	0.82	0.98	1.32	1.65	4
100	8	0.79	0.96	1.27	1.63	4
150	10	0.58	0.77	0.92	1.29	4
200	16	0.73	0.94	1.15	1.60	4
40	4	0.87	1.01	1.43	1.78	3
45	5	0.93	1.03	1.52	1.85	3
50	6	0.94	1.02	1.53	1.89	3
60	6	0.85	1.02	1.38	1.79	3
70	6	0.76	0.98	1.22	1.68	3
75	8	0.89	1.02	1.45	1.82	3
80	8	0.88	1.01	1.41	1.80	3
80	10	0.89	1.06	1.44	1.98	3
120	12	0.83	1.00	1.33	1.76	3
130	12	0.78	0.98	1.25	1.72	3
150	15	0.76	0.99	1.21	1.75	3
160	15	0.74	0.99	1.18	1.72	3
180	18	0.70	0.97	1.12	1.73	3
200	20	0.66	0.97	1.05	1.72	3

Πίνακας 2.1: Συντελεστές εκμετάλλευσης γωνιακών διατομών

3 Θλίψη γωνιακών διατομών

3.1 Εισαγωγή

Στόχος της υποβολής των γωνιακών διατομών σε θλίψη ήταν η διερεύνηση της αντοχής τους η οποία σύμφωνα με τον ευρωκώδικα EC3 για διατομές κατηγορίας 3 ή 4 θα προκύπτει μειωμένη λόγω της εμφάνισης του τοπικού λυγισμού, θεωρώντας οριακή αξονική δύναμη την δύναμη πλήρους πλαστικοποίησης $N_{pl,rd} = A \cdot f_{yd}$. Στα γωνιακά μέλη υπο αξονική θλίψη αντιστοιχούν οι δυσμενέστερες καμπύλες λυγισμού επειδή έχουν μικρή στρεπτική δυστρεψία St.Venant και μηδενική αντίσταση σε στρέβλωση και παρουσιάζουν κατά το λυγισμό σημαντικά προβλήματα στρέψης. Για καμπύλη λυγισμού b πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι αντιστοιχεί αρχική ατέλεια $e = L/250$. Το μήκος του μοντέλου ελήφθη 0,5m ώστε το μέλος να έχει μικρή λυγηρότητα και να εμφανισθεί πρώτα ο τοπικός λυγισμός.

Το γραμμικό ελαστικό μοντέλο δεν επιτρέπει από μόνο του να υπολογιστεί η αντοχή της κατασκευής η του μέλους. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε κάθε μη-γραμμικότητα υλικού και μη-γραμμικότητα γεωμετρίας, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της πραγματικής συμπεριφοράς της κατασκευής και της μέγιστης φέρουσας ικανότητας του σε φορτίο.

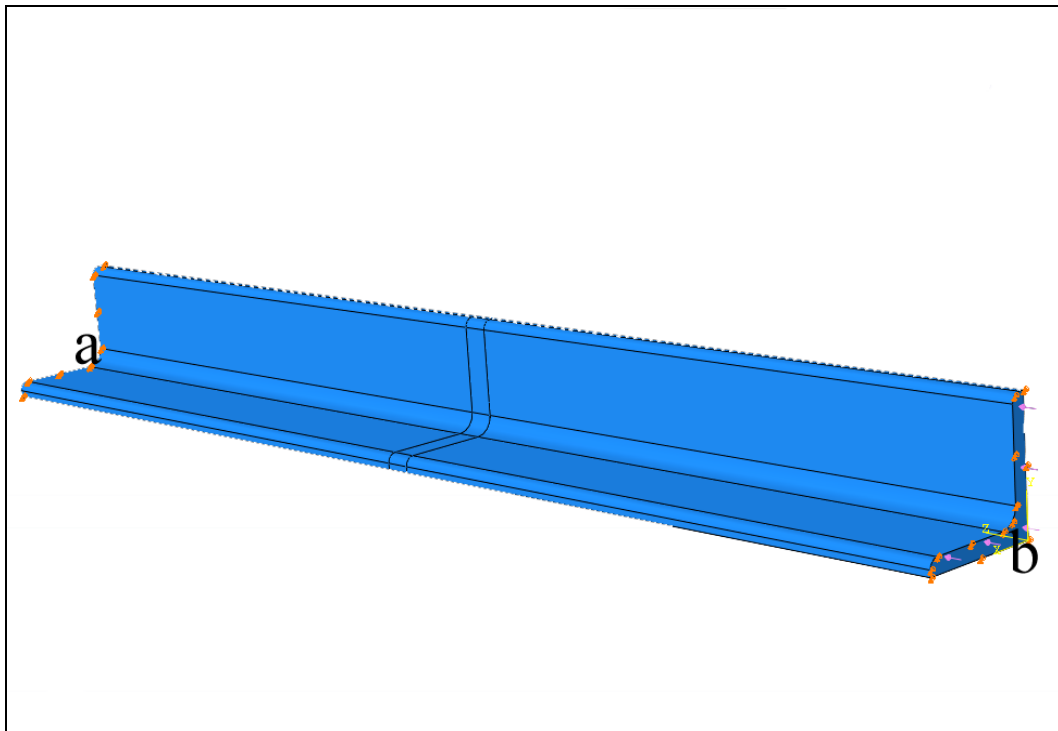
Οι μη γραμμικότητες γεωμετρίας και οι αρχικές ατέλειες, προκαλούν αντίδραση (παραμόρφωση) της κατασκευής, ώστε η συμπεριφορά της να είναι μη γραμμική ακόμα και αν το υλικό είναι μη γραμμικό.

Η σωστή πρόβλεψη των γεωμετρικών ατελειών, ώστε να αντιπροσωπεύουν κατά το δυνατόν την 1^η κανονική μορφή λυγισμού, είναι η προϋπόθεση για την σωστή εφαρμογή της θεωρίας 2^{ης} τάξης όπου δεν είναι απαραίτητη η γνώση του μήκους λυγισμού ή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Μέσω της εισαγωγής ατελειών, εμφανίζονται πρωτογενείς ροπές κάμψης και το πρόβλημα ανάγεται σε επίλυση με τη θεωρία 2^{ης} τάξης. Με την εφαρμογή της θεωρίας 2^{ης} τάξης ελέγχονται οι διατομές του γωνιακού μοντέλου χωρίς να απαιτείται ξεχωριστός έλεγχος ευστάθειας έναντι καμπτικού λυγισμού.

Για αυτό το λόγο στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων μετά την εξαγωγή της αρχικής ατέλειας από την πρώτη ιδιομορφή που προέκυψε από ελαστική ανάλυση σε λυγισμό, έγινε μη γραμμική ανάλυση Riks για να συμπεριληφθούν οι όλες οι μη γραμμικότητες τόσο υλικού όσο και γεωμετρίας.

3.2 Μόρφωση μοντέλου στο πρόγραμμα Abaqus για θλίψη

Το μοντέλο όπως και στην κάμψη είχε μήκος 0,5m με τις ίδιες ιδιότητες υλικού (χάλυβας S355). Οι συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν με πάκτωση και άρθρωση στην πλευρά του γωνιακού όπου εφαρμόστηκε το φορτίο για τον λυγισμό.



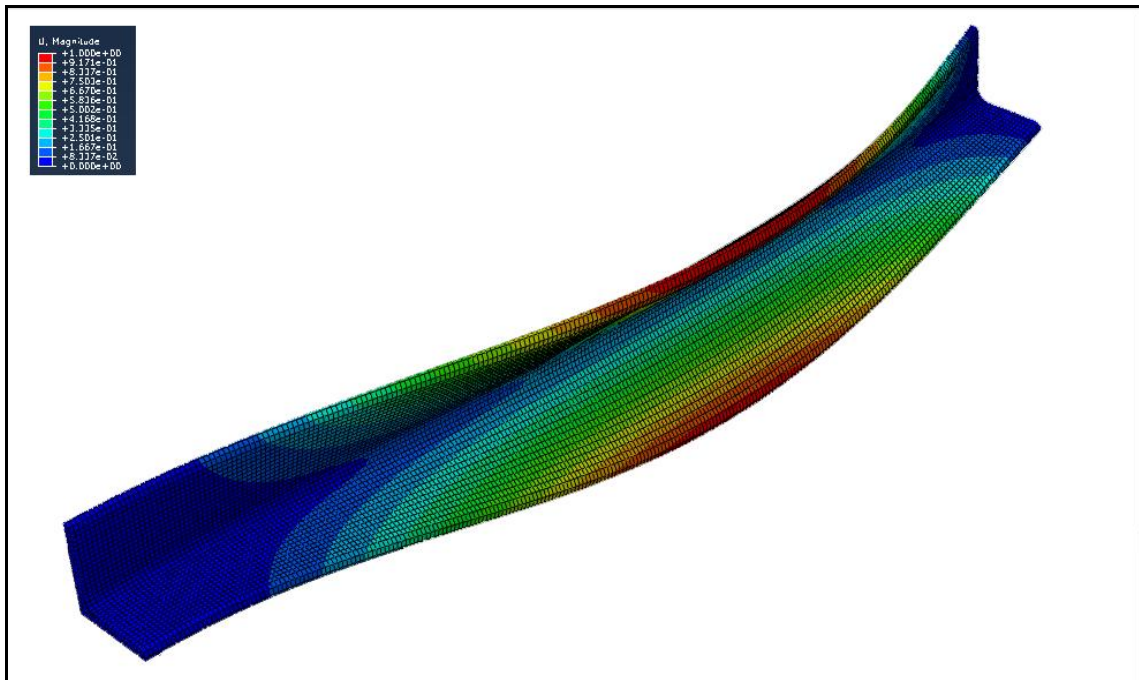
Σχήμα 3.1: Μοντέλο δοκιμής σε θλίψη όπου (a) πάκτωση και (b) άρθρωση

Ο τύπος του φορτίου που εφαρμόστηκε ήταν φορτίο πίεσης (pressure force) κατανεμημένο στην επιφάνεια της ακραίας αρθρωτής διατομής του γωνιακού μοντέλου. Έπειτα ορίστηκε όπως και στην κάμψη το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων και το μοντέλο ήταν έτοιμο. Έτσι υποβλήθηκε το μοντέλο σε λυγισμό (buckling) με γραμμική μέθοδο (linear perturbation) από όπου απαιτήθηκε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων της πρώτης ιδιομορφής.

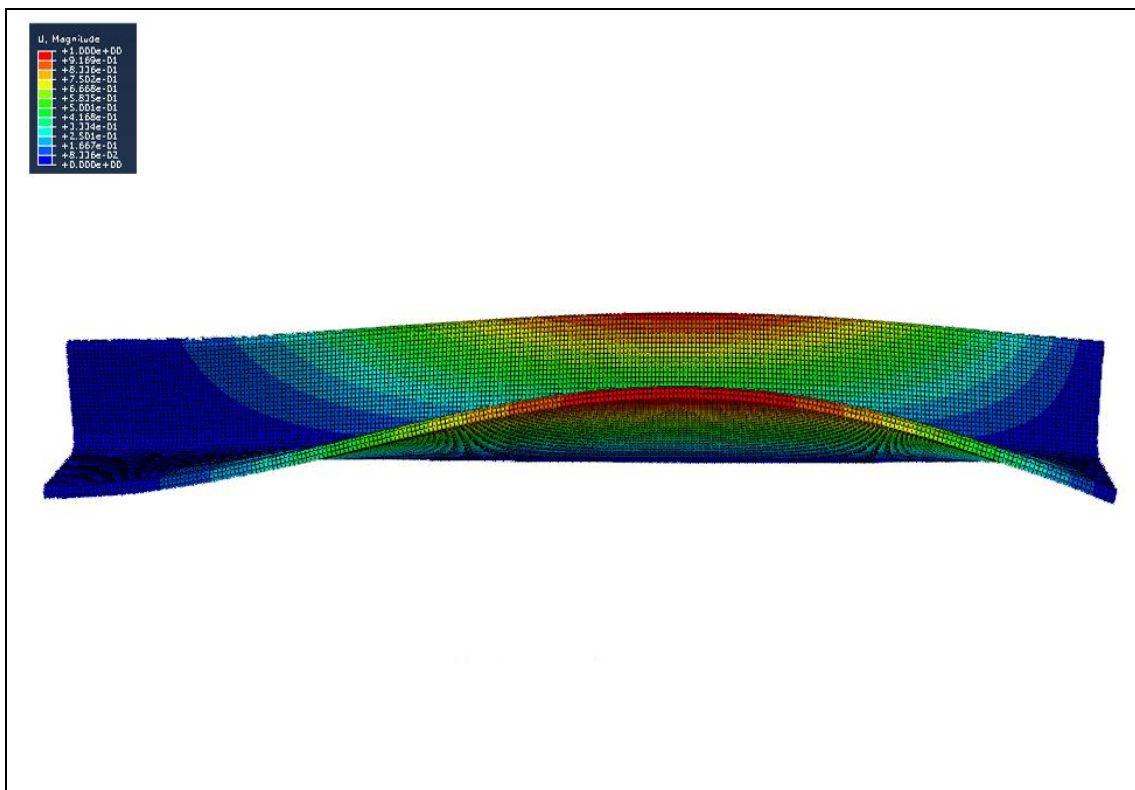
Τα αποτελέσματα του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων για την 1^η ιδιομορφή, που φαίνονται εικονικά με χρωματισμούς που αντιπροσωπεύουν τις παραμορφώσεις στο Σχήμα 3.2 και Σχήμα 3.3, έδωσαν την αρχική ατέλεια για το επόμενο βήμα. Η αρχική ατέλεια του επόμενου βήματος της μη γραμμικής ανάλυσης ήταν συνάρτηση της μέγιστης παραμόρφωσης της 1^{ης} ιδιομορφής που αντιστοιχεί σε $e_0=L/500$ όπου L το μήκος του γωνιακού μοντέλου σε χιλιοστά.

Το ίδιο μοντέλο, με τις ίδιες συνοριακές συνθήκες υποβλήθηκε σε στατική Riks μη-γραμμική ανάλυση με αρχική συνθήκη την γεωμετρική ατέλεια από το προηγούμενο βήμα. Η μέγιστη παραμόρφωση που προέκυψε από την 1^η ιδιομορφή λυγισμού πολλαπλασιάστηκε επι αντίστοιχο συντελεστή ώστε να ισούται με $e_0=L/500$.

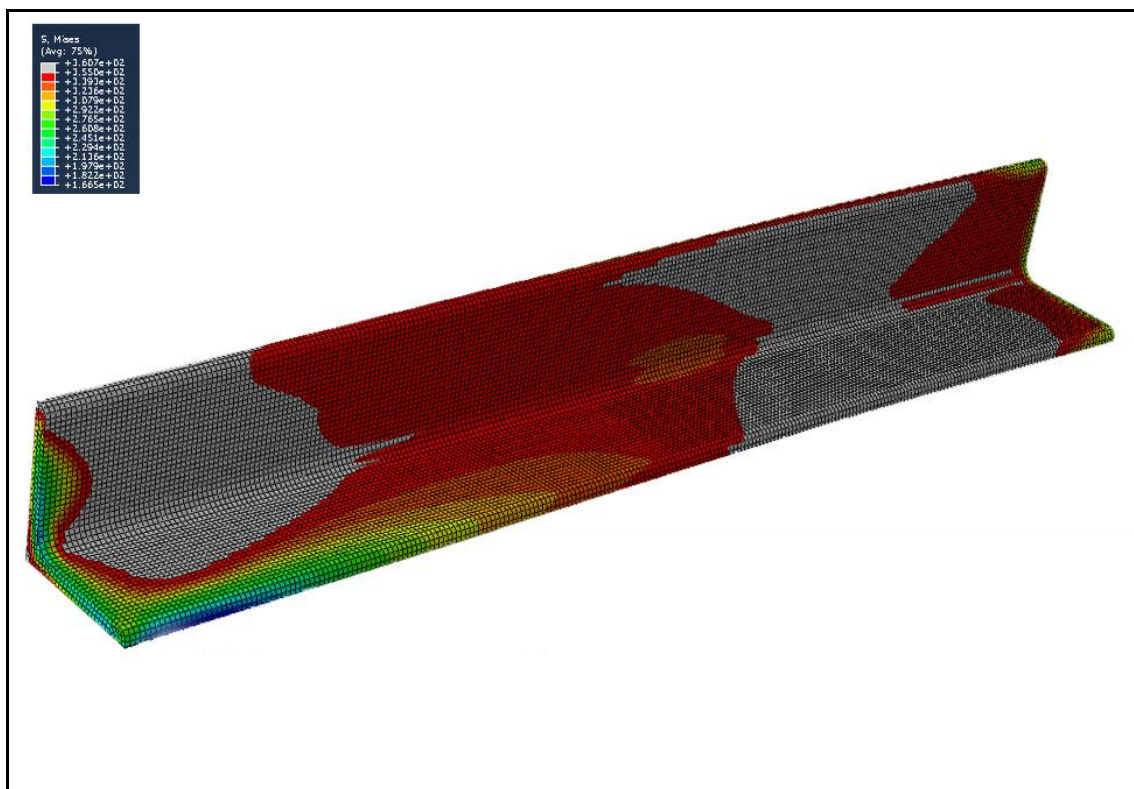
3.3 Αποτελέσματα θλίψης



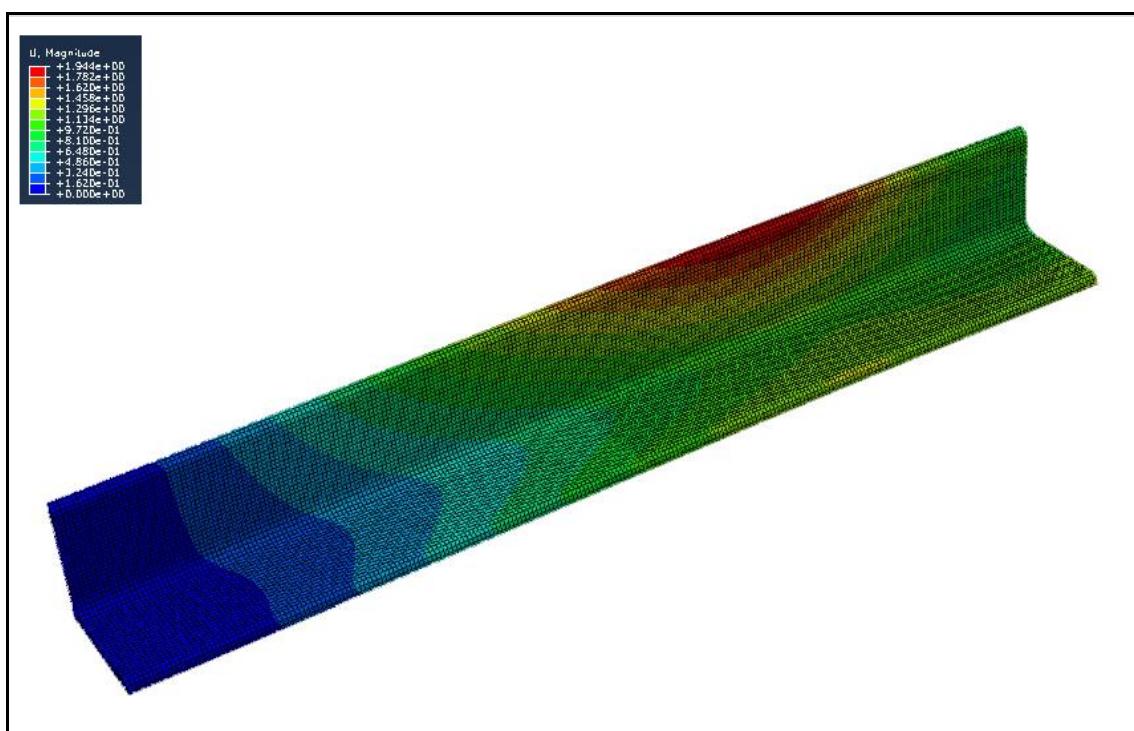
Σχήμα 3.2: Αποτελέσματα ABAQUS για την 1^η ιδιομορφή



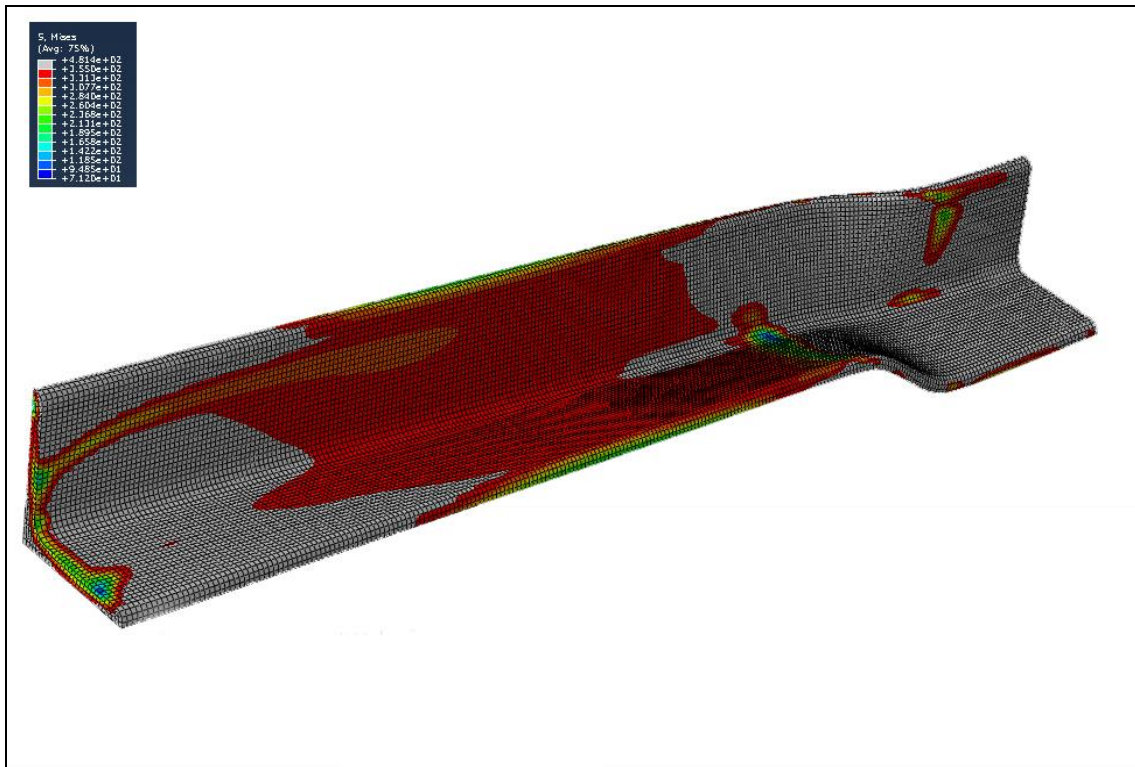
Σχήμα 3.3: Αποτελέσματα ABAQUS για την 1^η ιδιομορφή



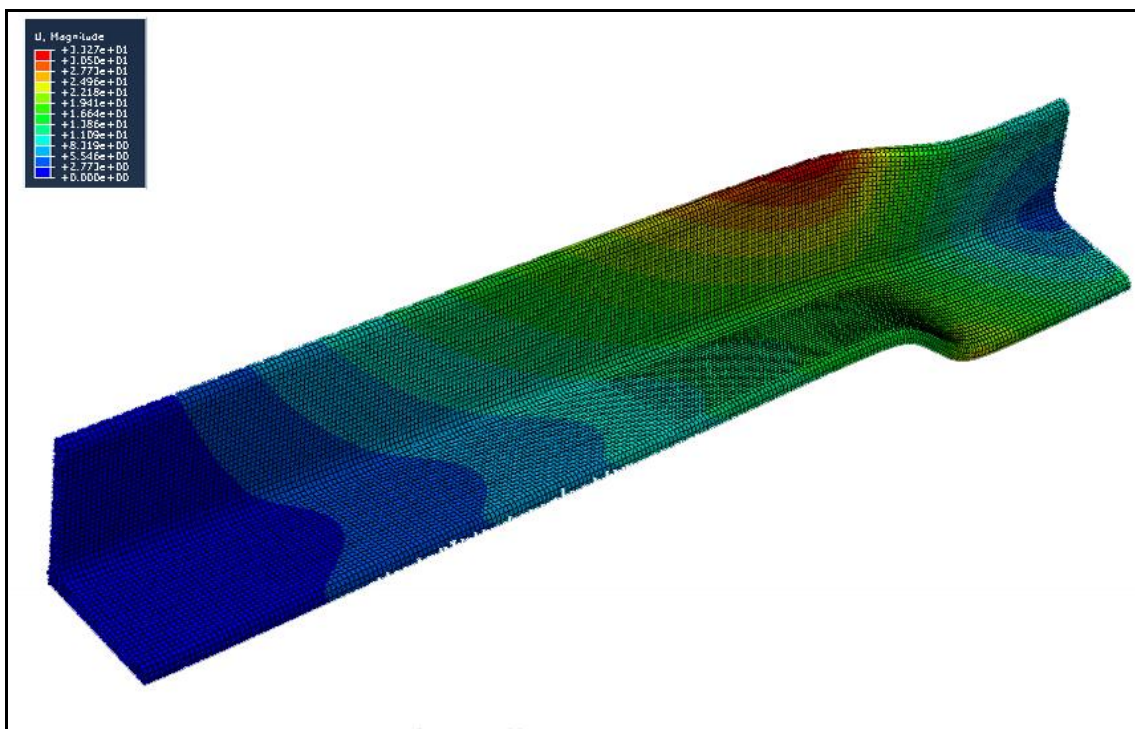
Σχήμα 3.4: Τάσεις στην διατομή στο σημείο μέγιστης αντοχής



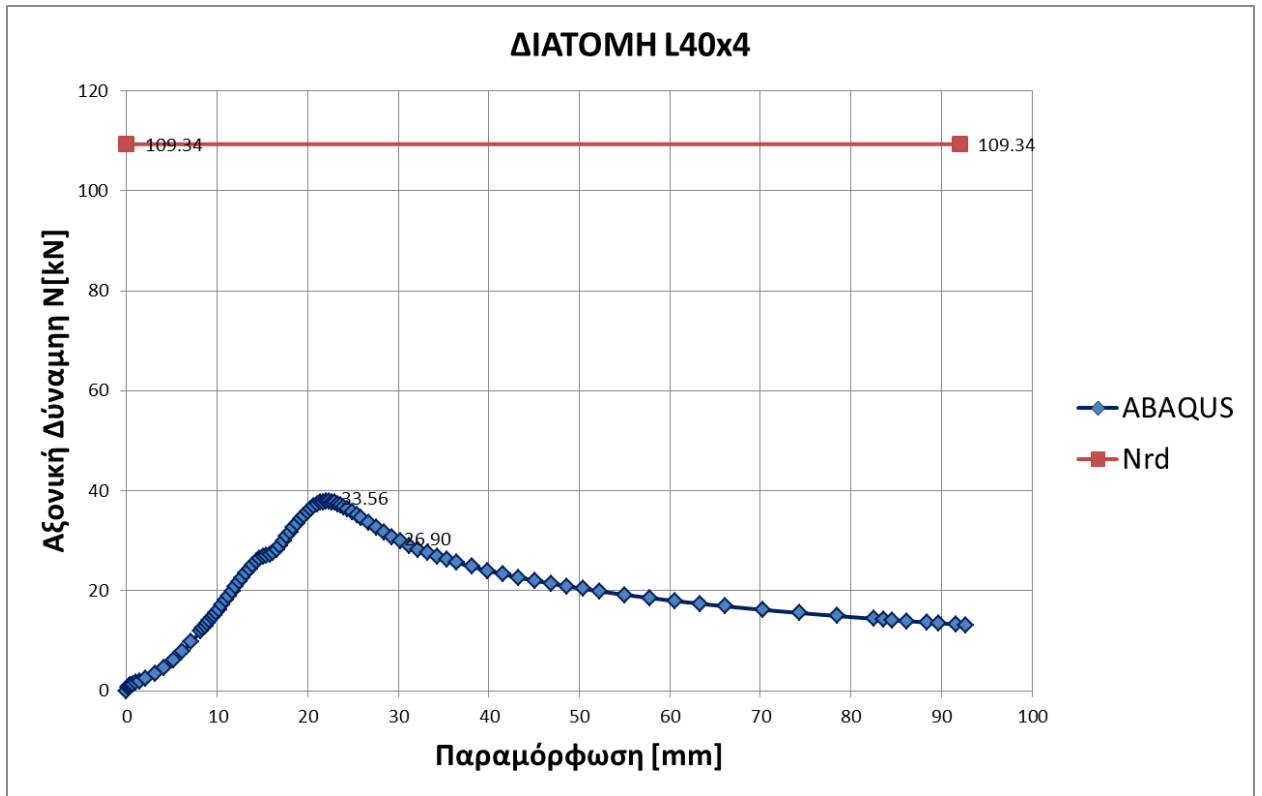
Σχήμα 3.5: Παραμορφώσεις στην διατομή στο σημείο μέγιστης αντοχής



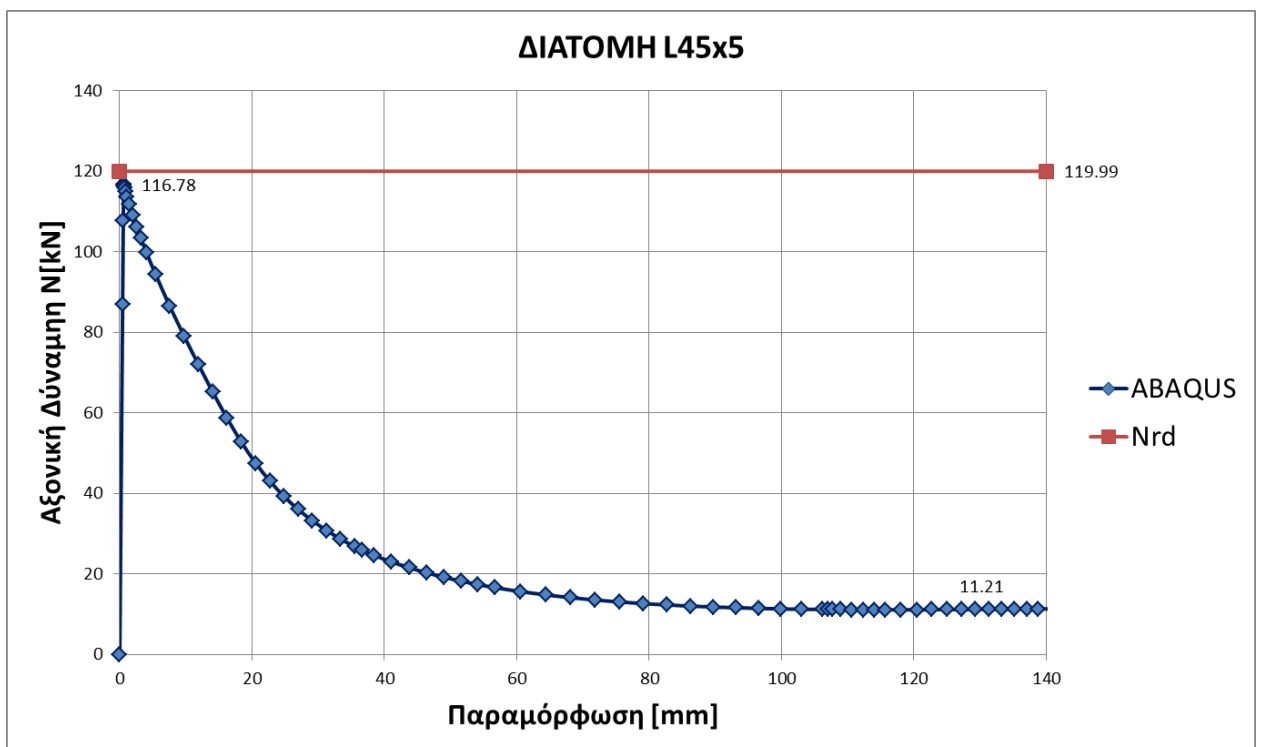
Σχήμα 3.4: Τάσεις στην διατομή σε προχωρημένη φάση αστοχίας



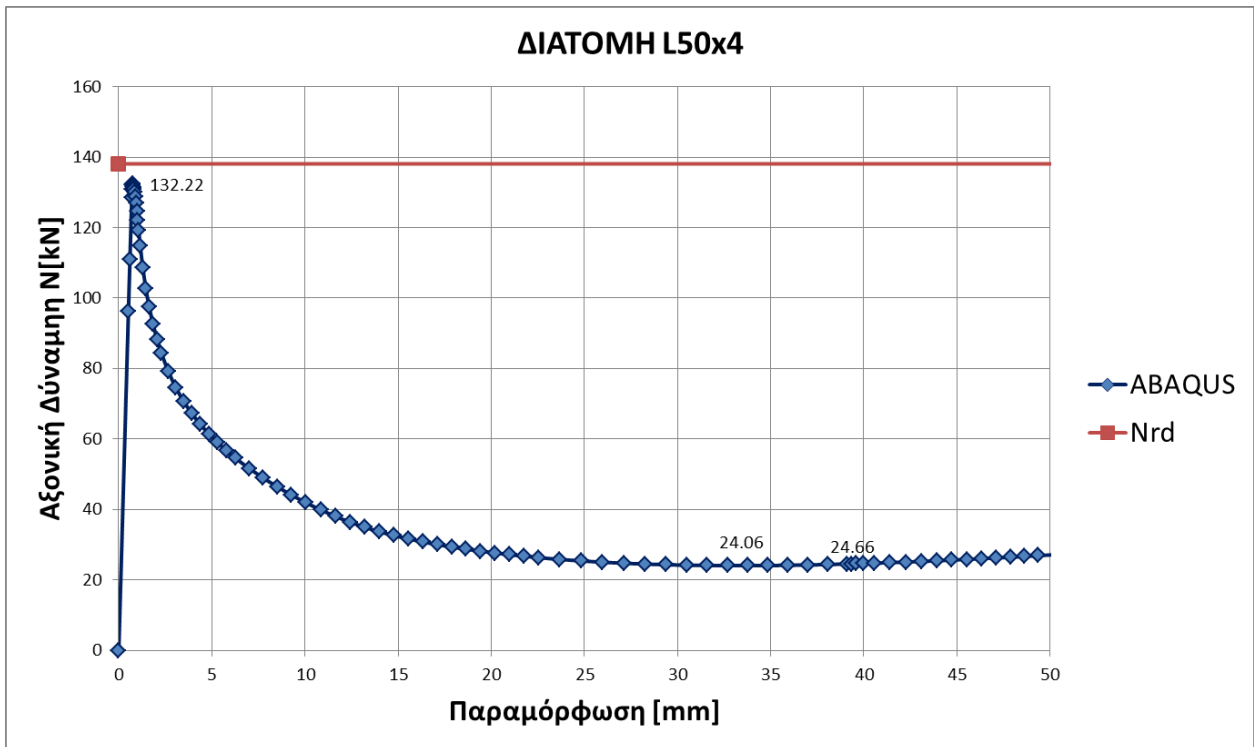
Σχήμα 3.5: Παραμορφώσεις στην διατομή σε προχωρημένη φάση αστοχία



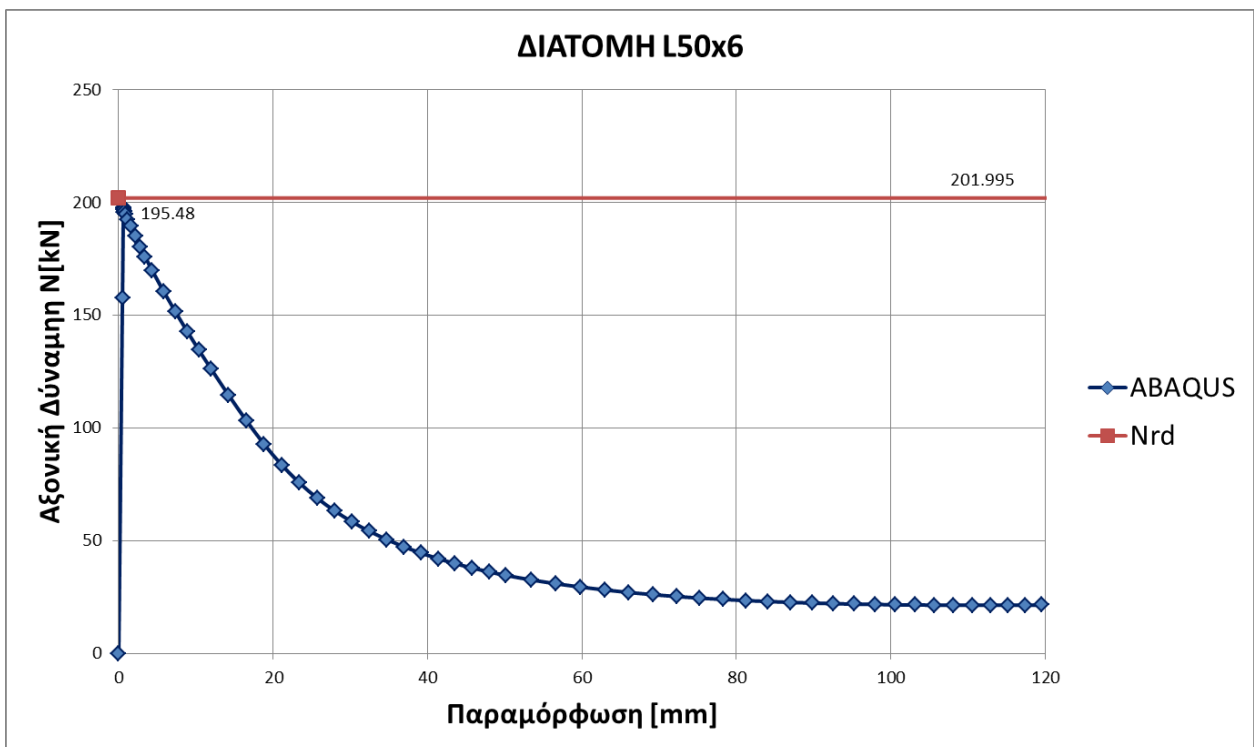
Σχήμα 3.6: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 40x4 σε θλίψη



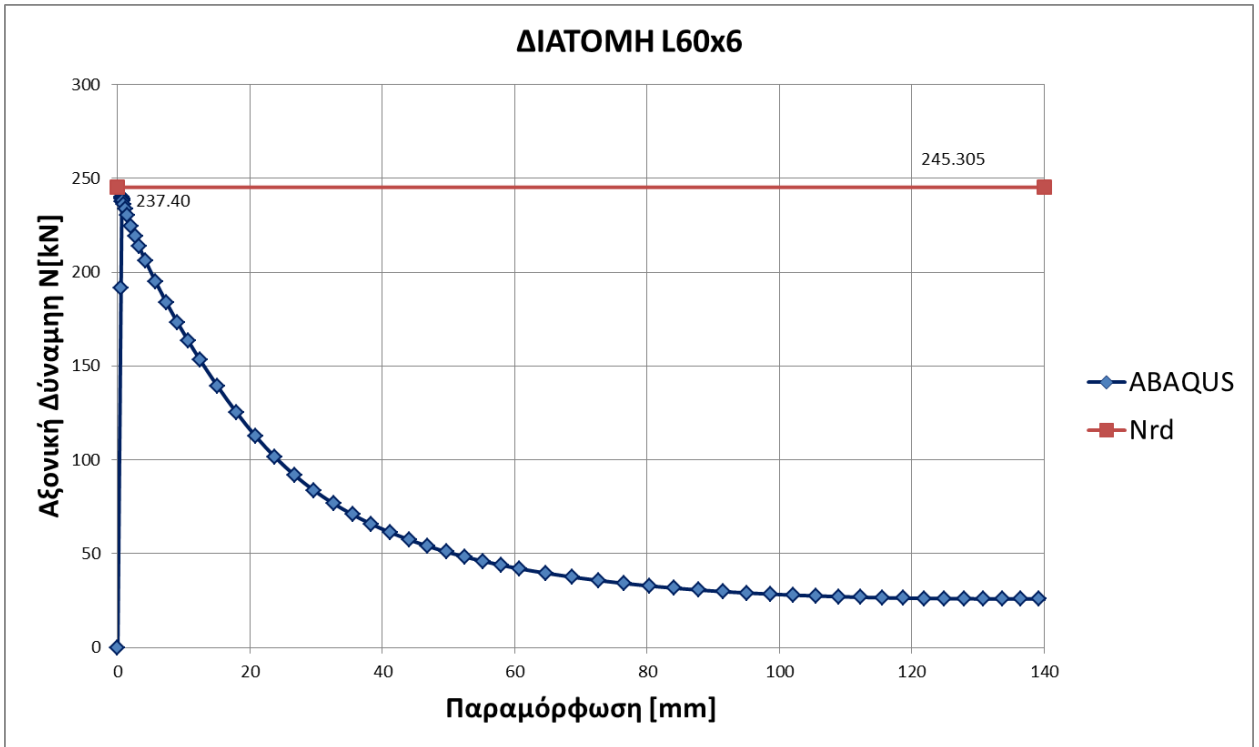
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 45x5 σε θλίψη



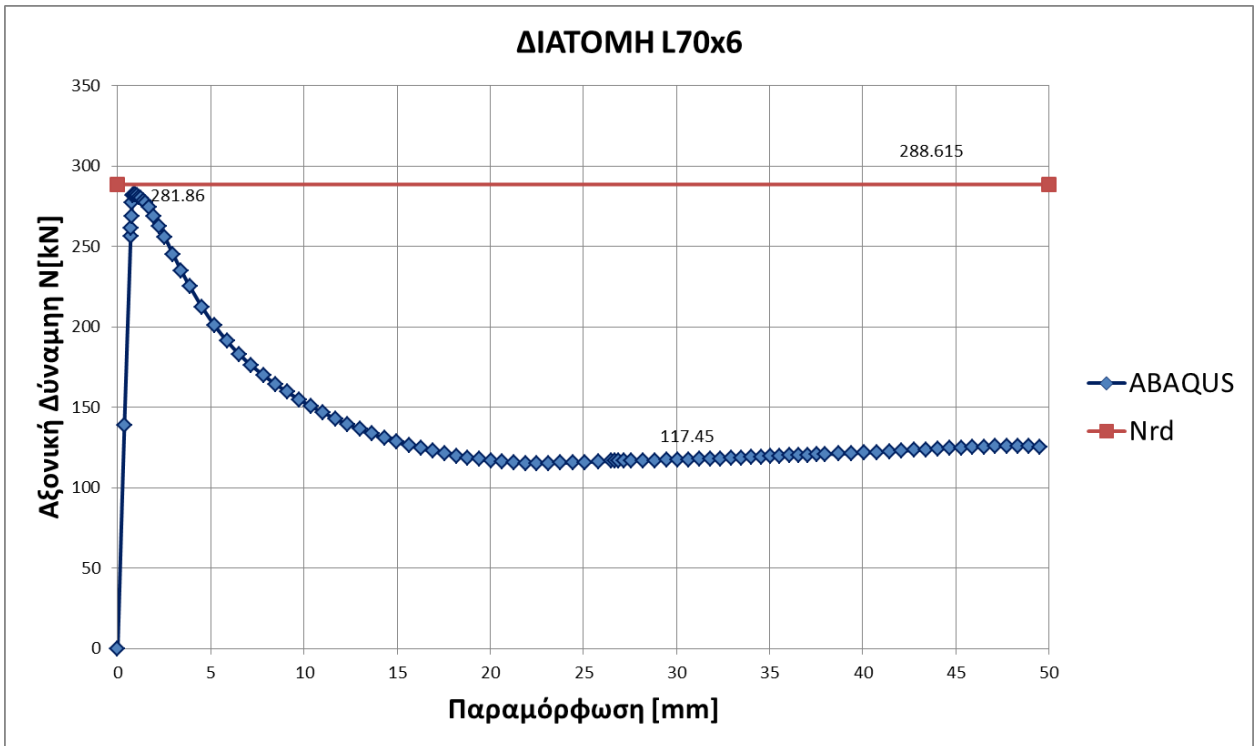
Σχήμα 3.8: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 50x4 σε θλίψη



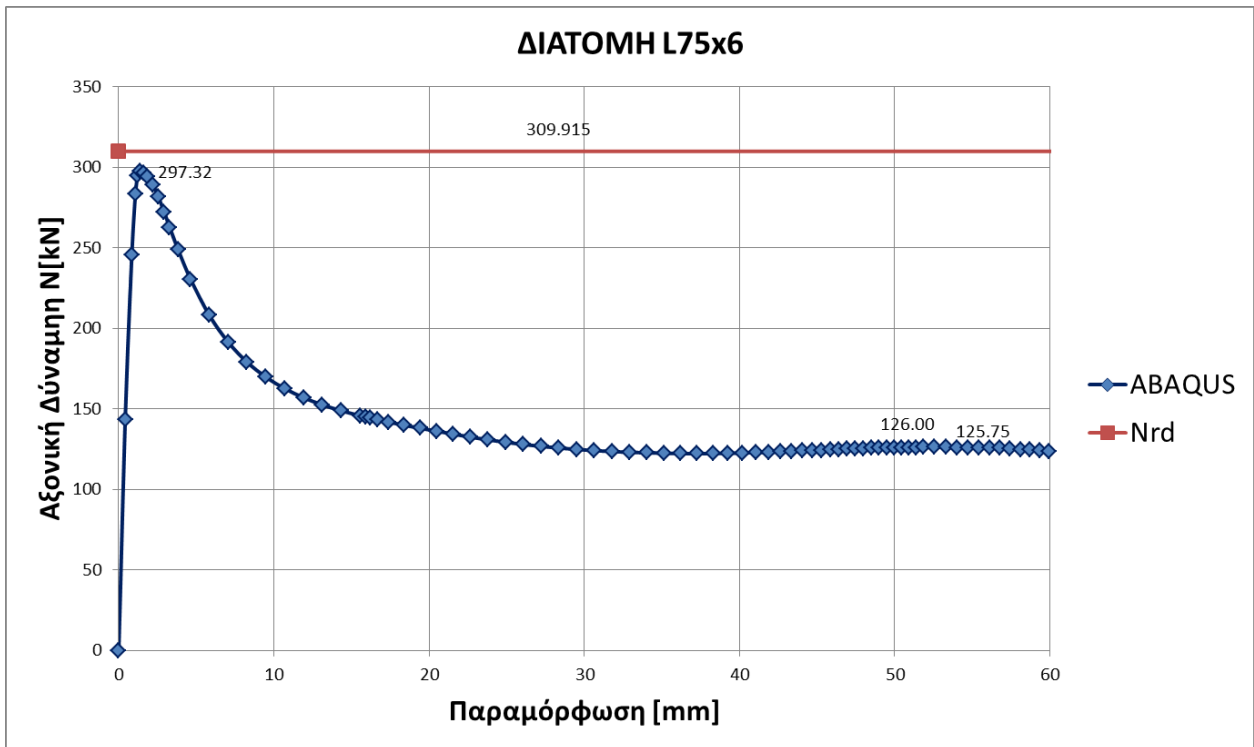
Σχήμα 3.9: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 50x6 σε θλίψη



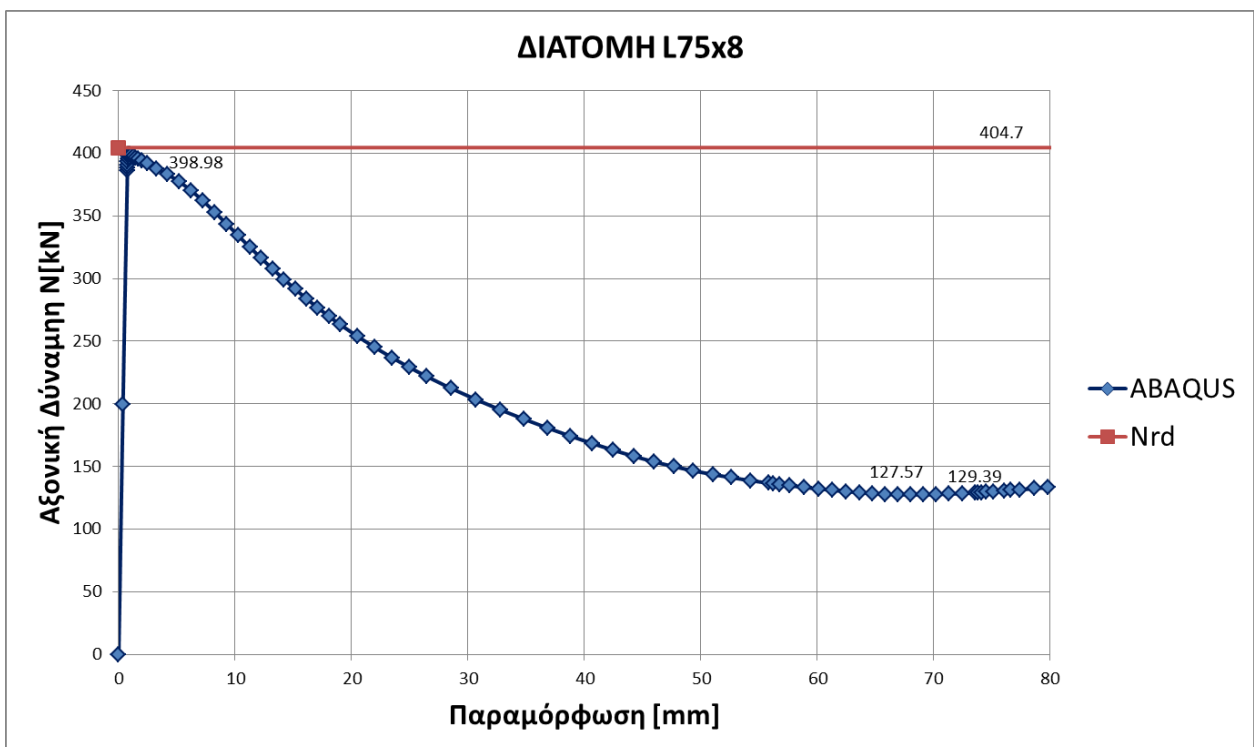
Σχήμα 3.10: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 60x6 σε θλίψη



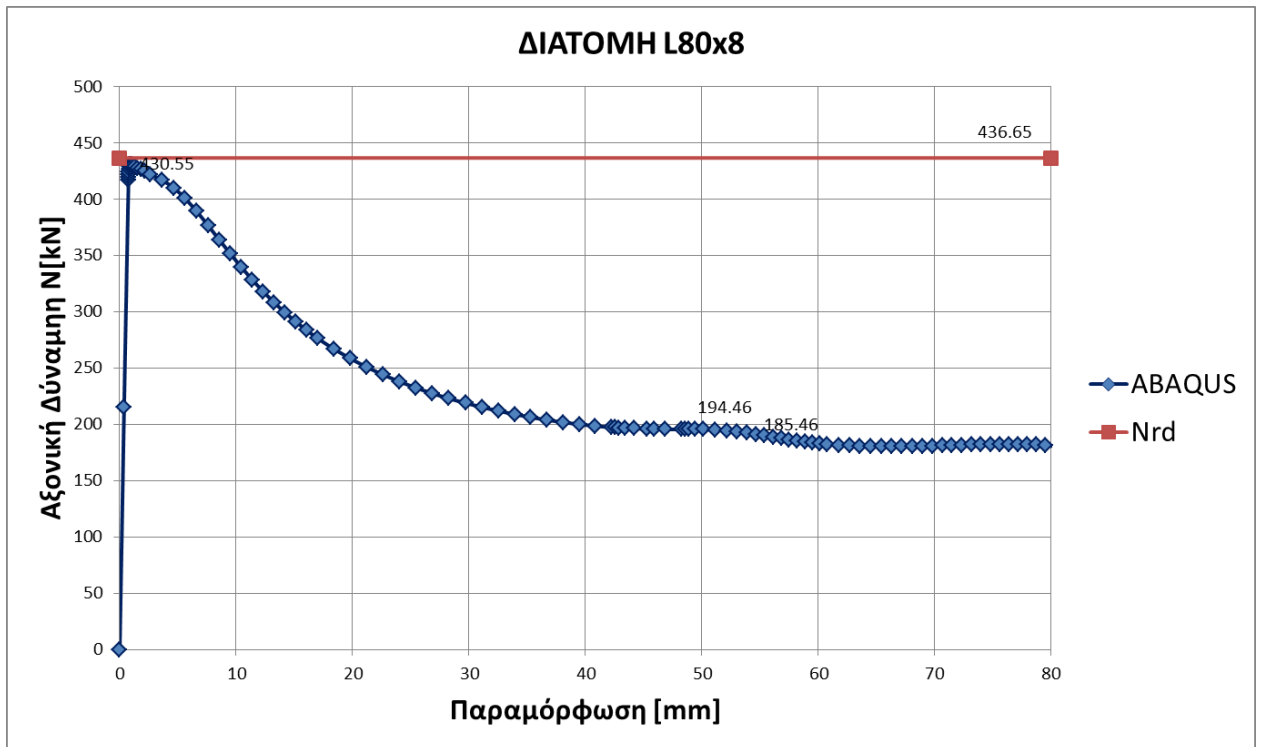
Σχήμα 3.11: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 70x6 σε θλίψη



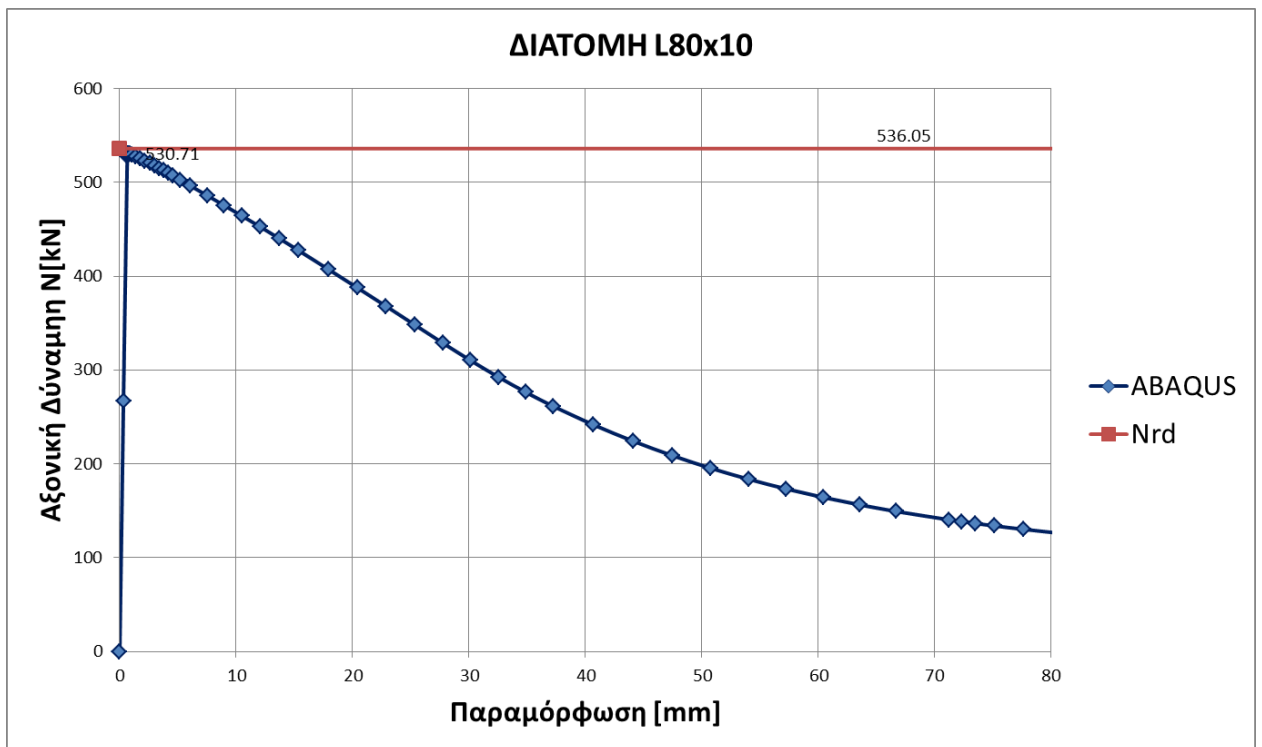
Σχήμα 3.12: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 75x6 σε θλίψη



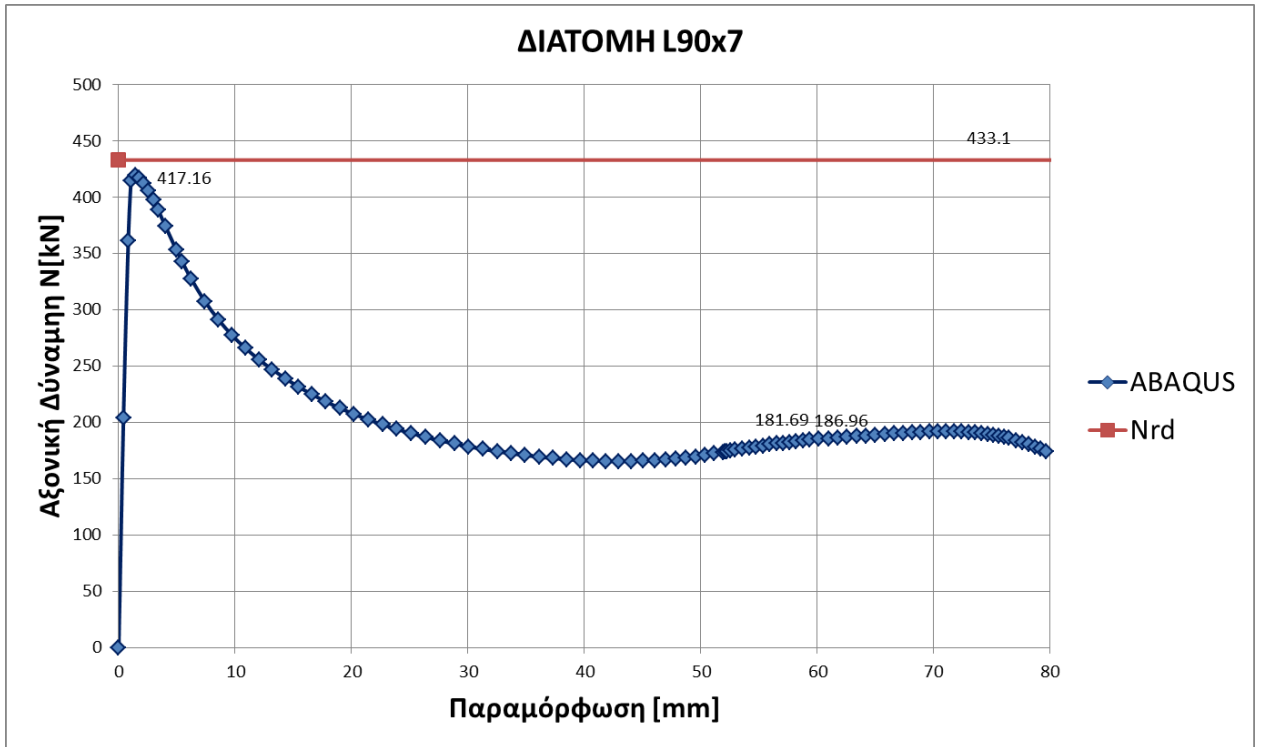
Σχήμα 3.13: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 75x8 σε θλίψη



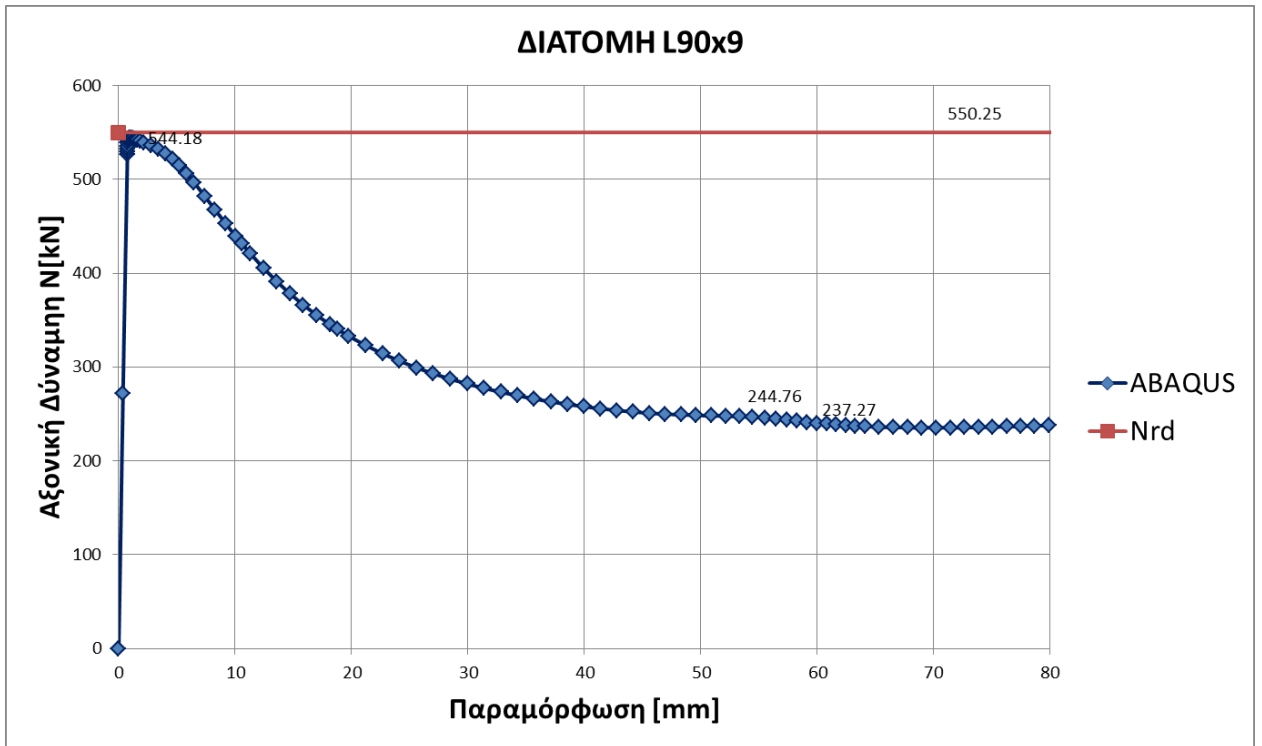
Σχήμα 3.14: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 80x8 σε θλίψη



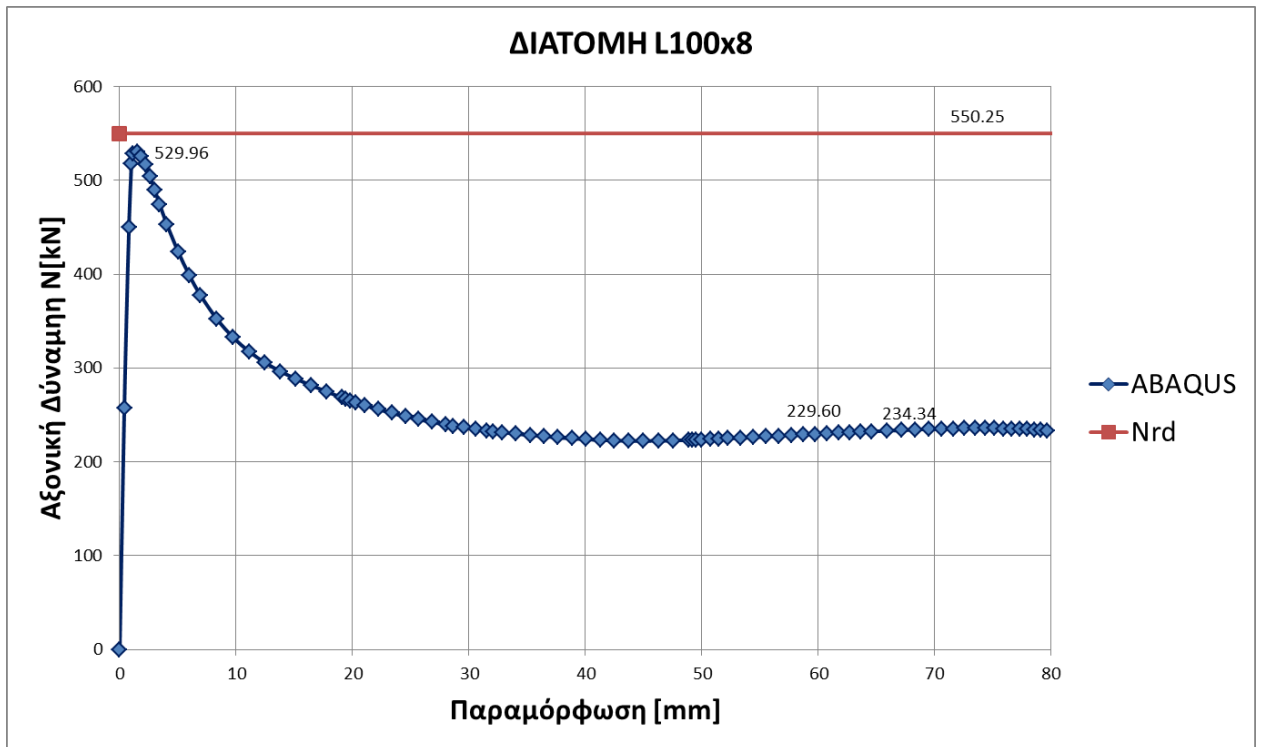
Σχήμα 3.15: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 80x10 σε θλίψη



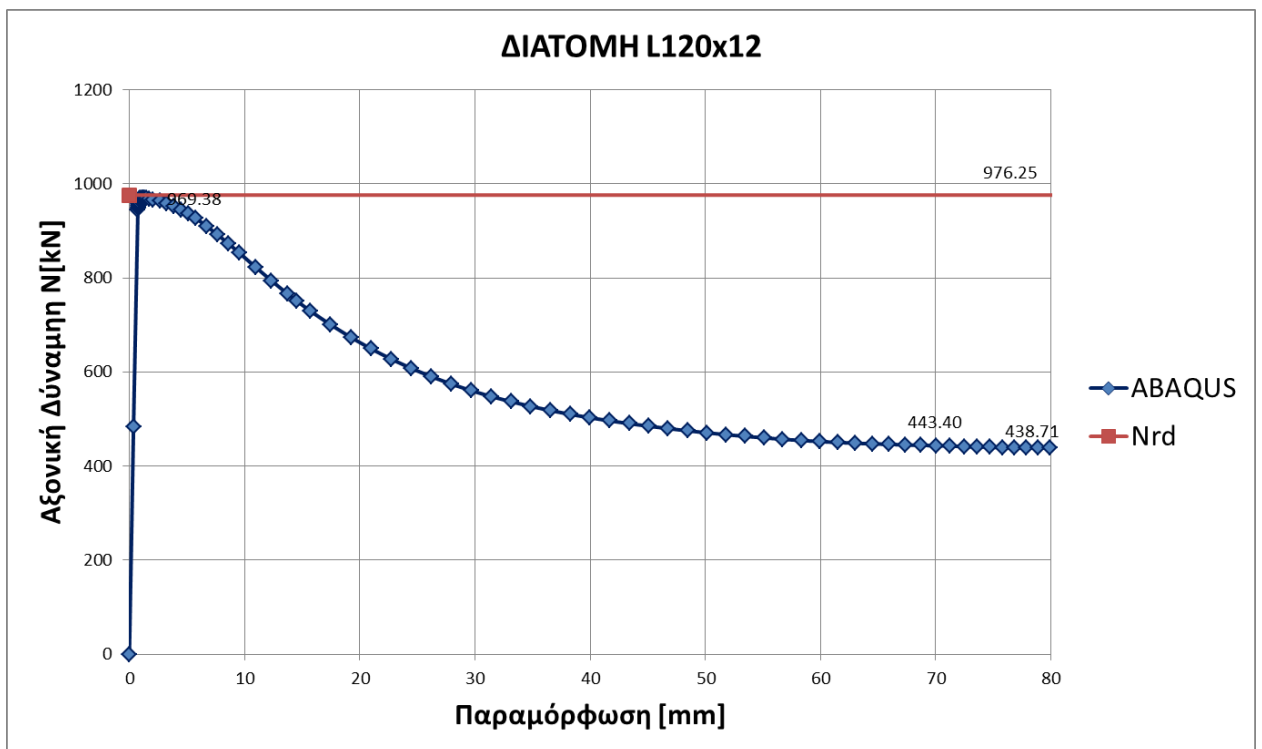
Σχήμα 3.16: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 90x7 σε θλίψη



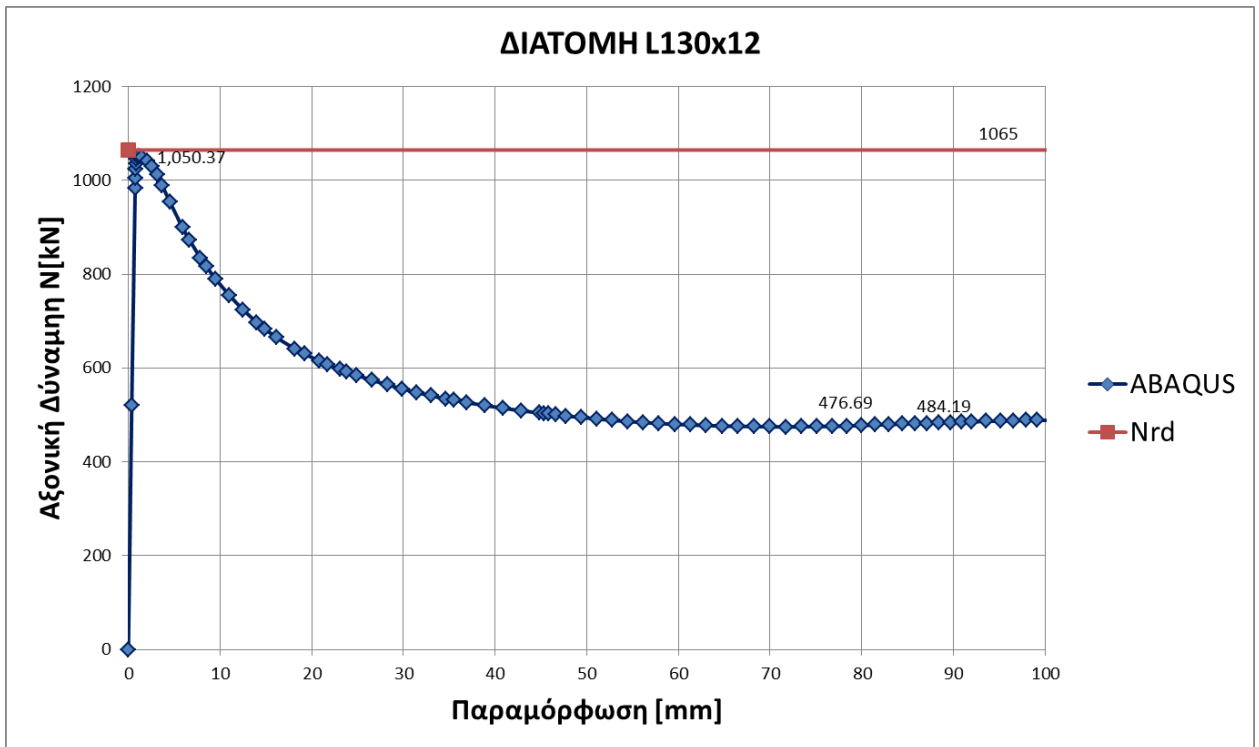
Σχήμα 3.17: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 90x9 σε θλίψη



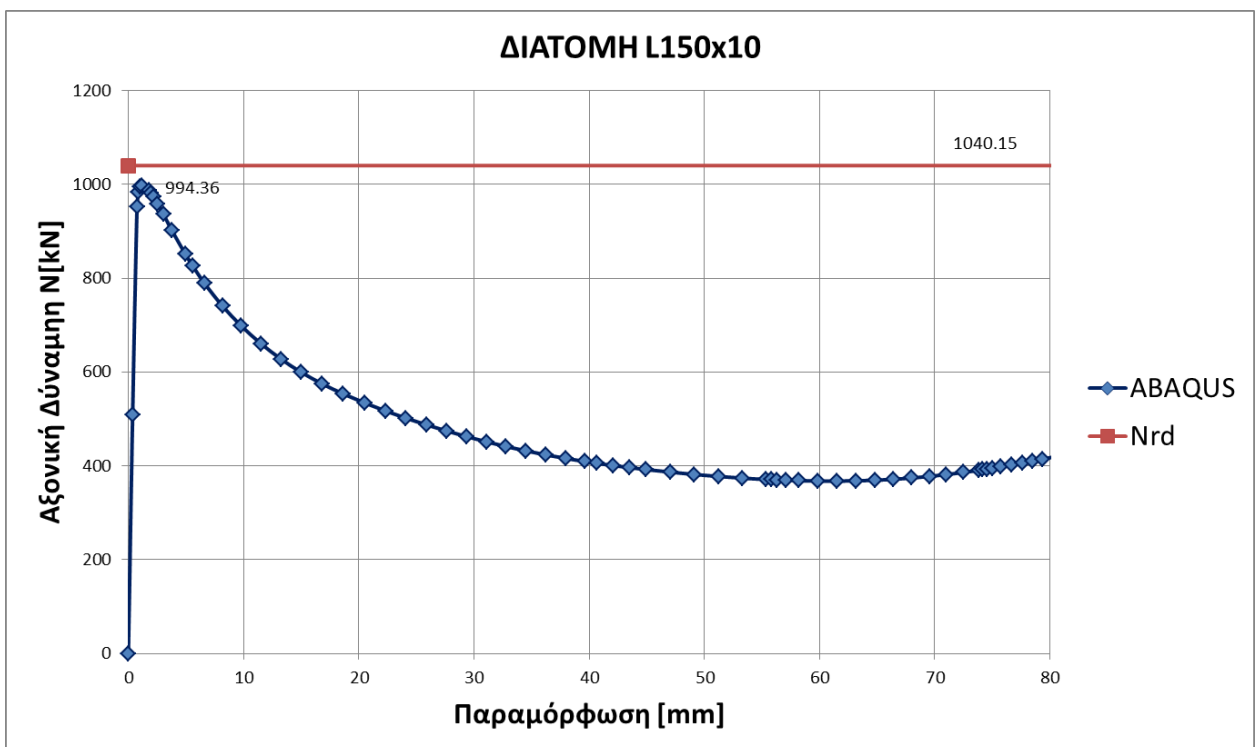
Σχήμα 3.18: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 100x8 σε θλίψη



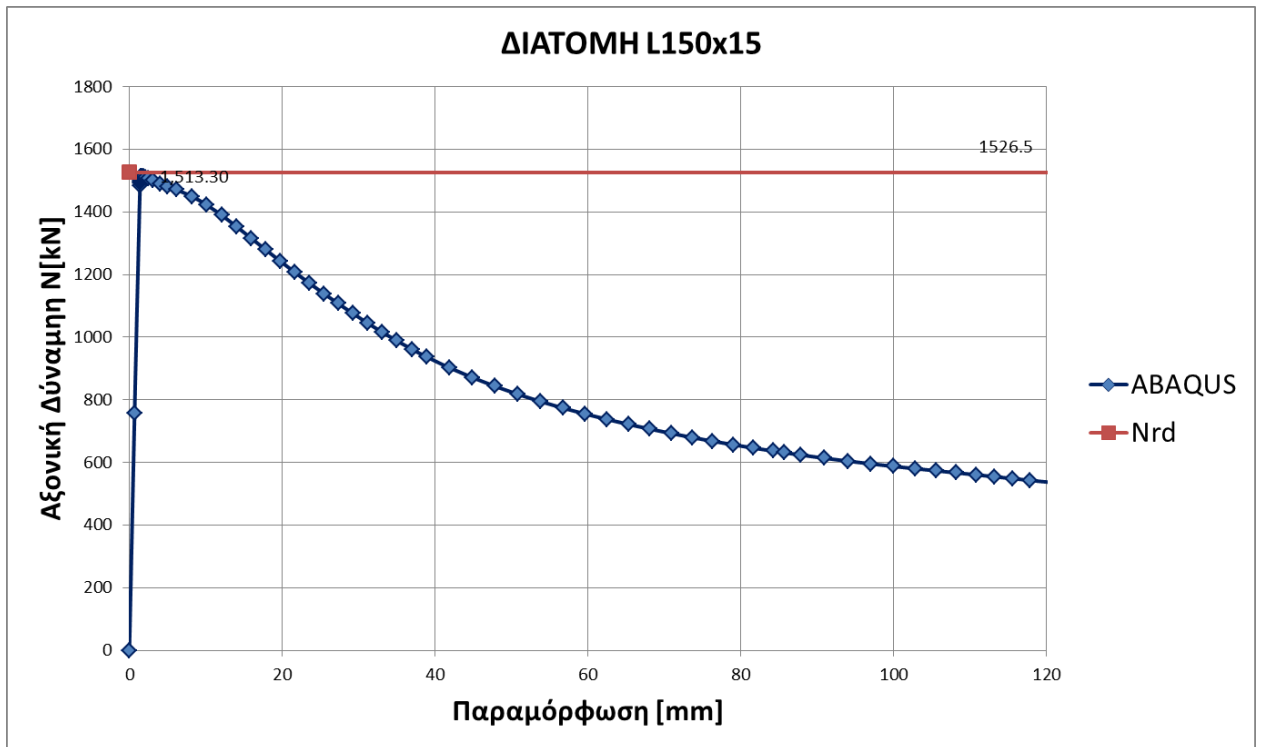
Σχήμα 3.19: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 120x12 σε θλίψη



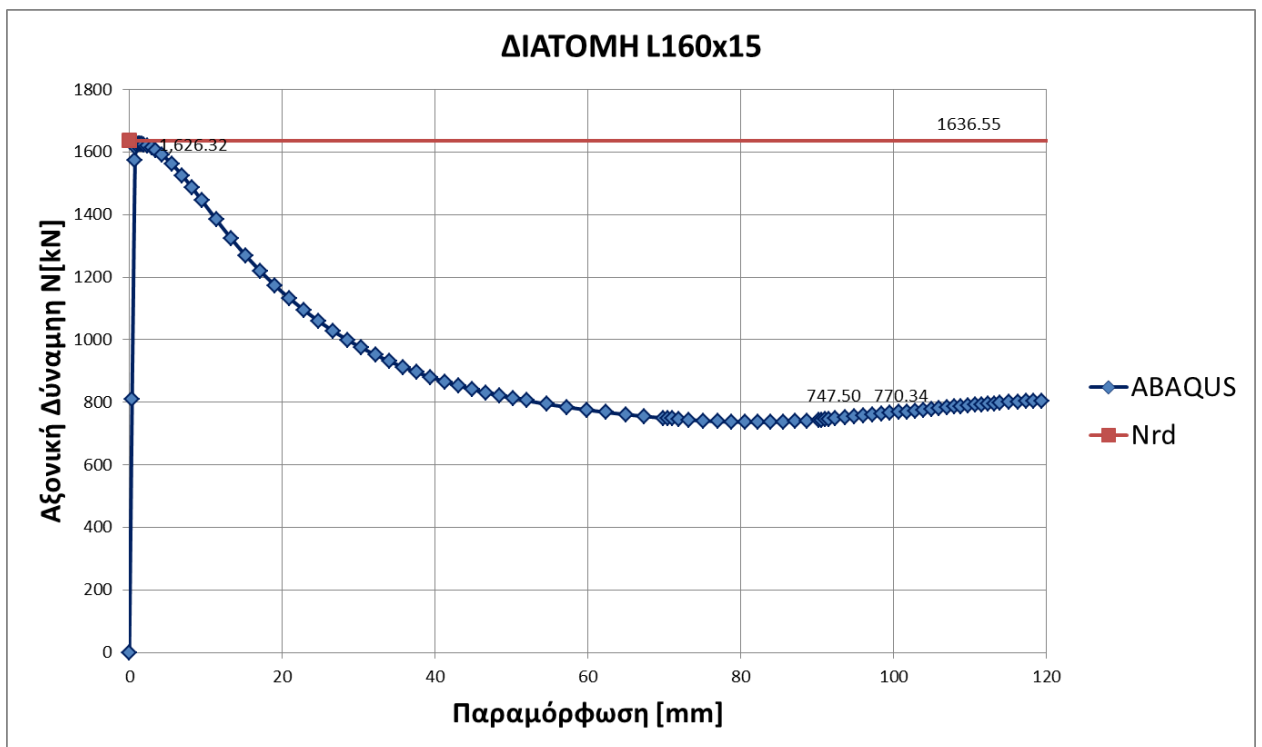
Σχήμα 3.20: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 130x12 σε θλίψη



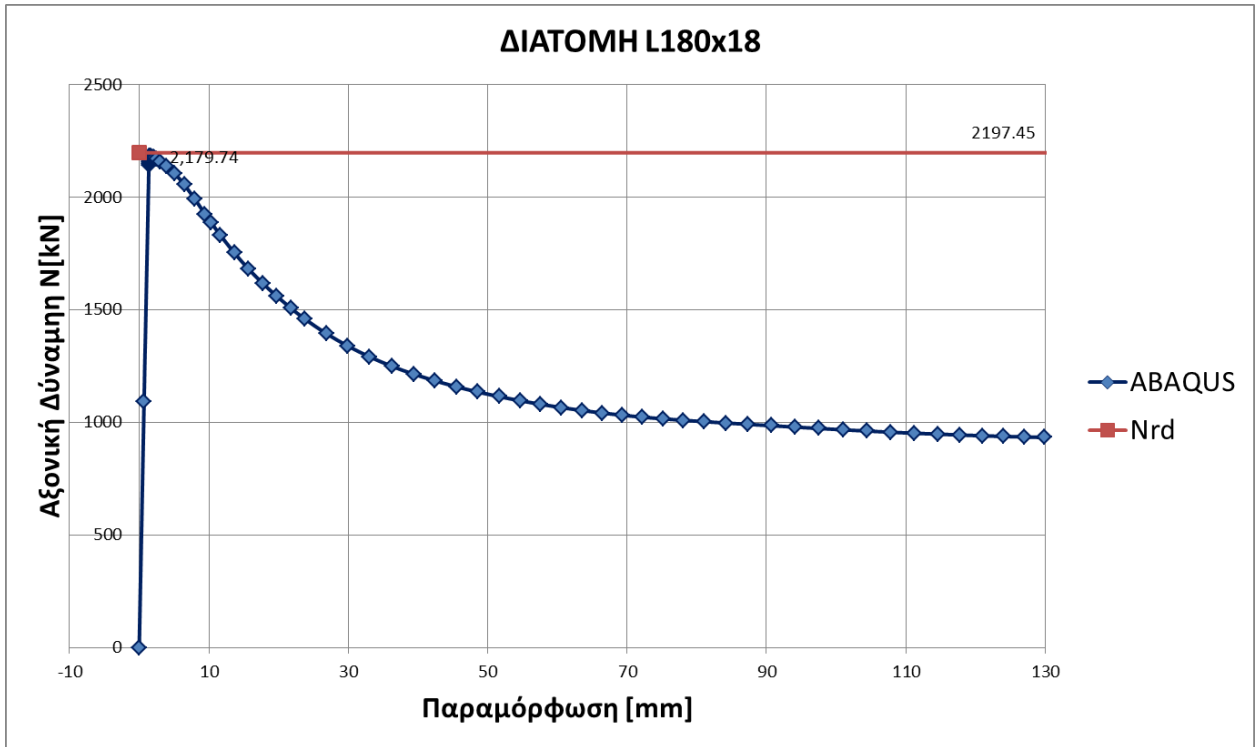
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 150x10 σε θλίψη



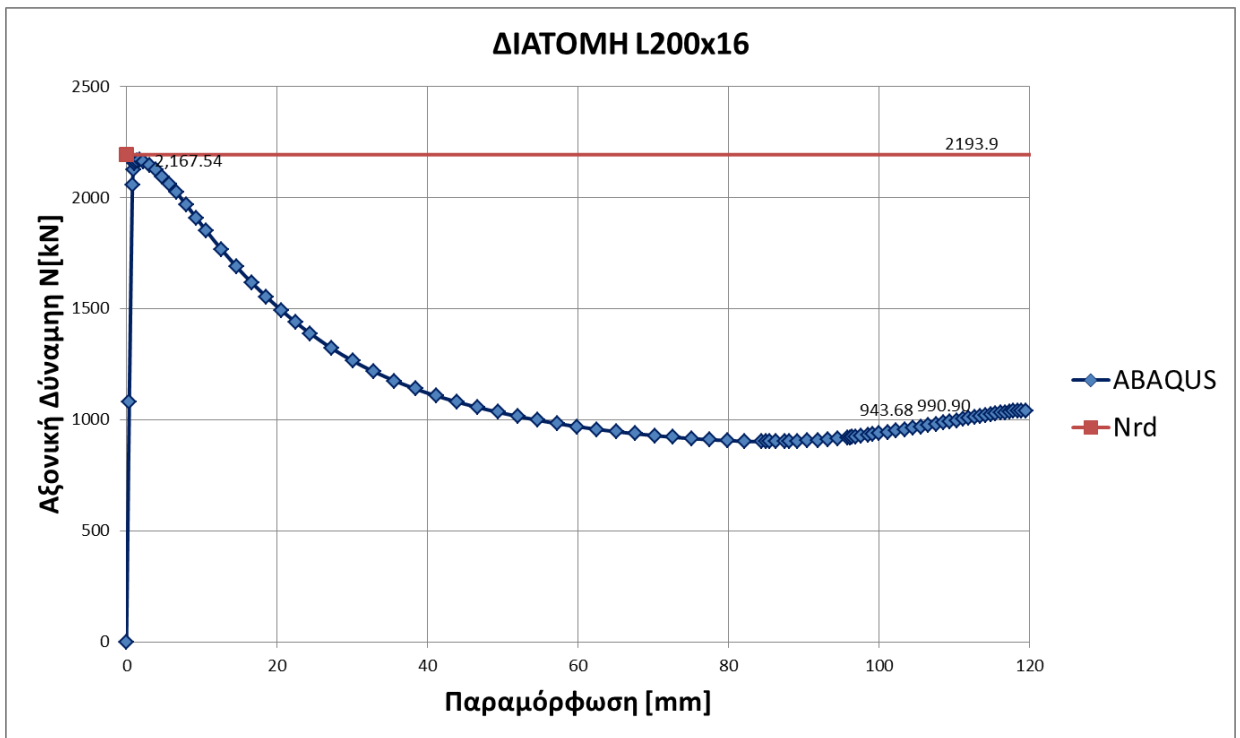
Σχήμα 3.22: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 150x15 σε θλίψη



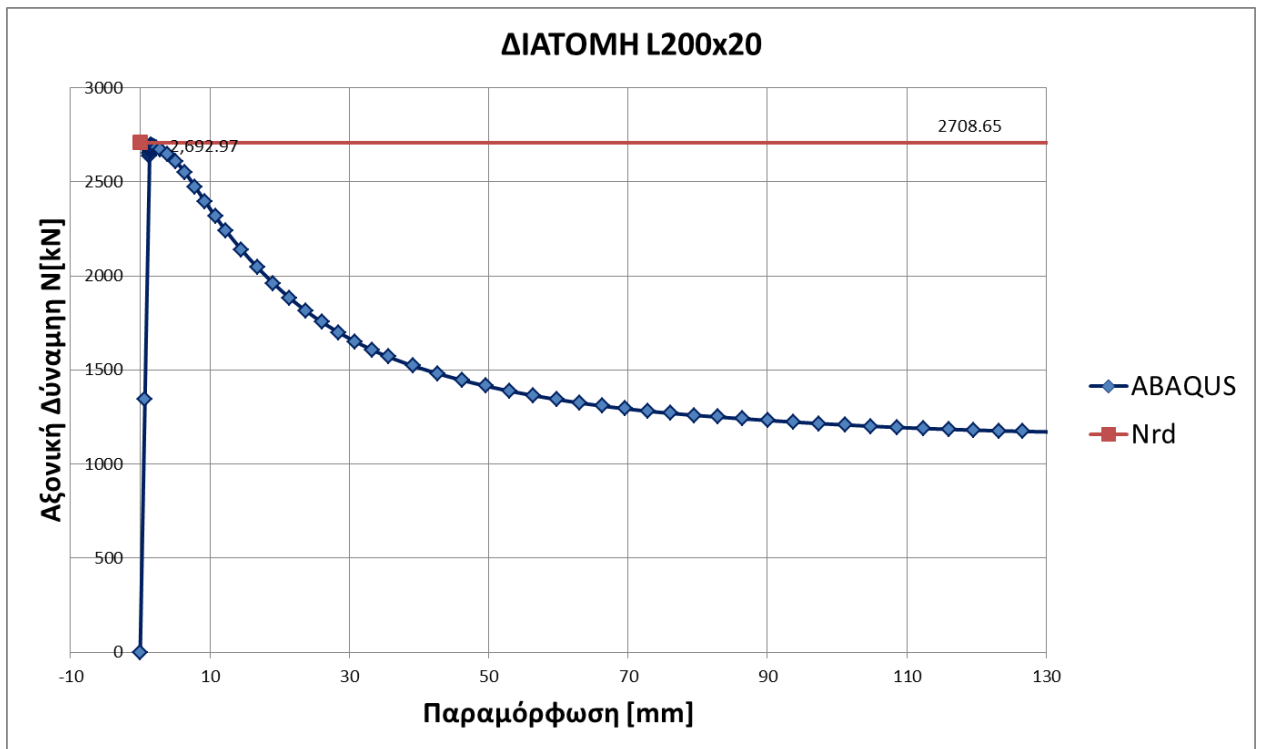
Σχήμα 3.23: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 160x15 σε θλίψη



Σχήμα 3.24: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 180x18 σε θλίψη



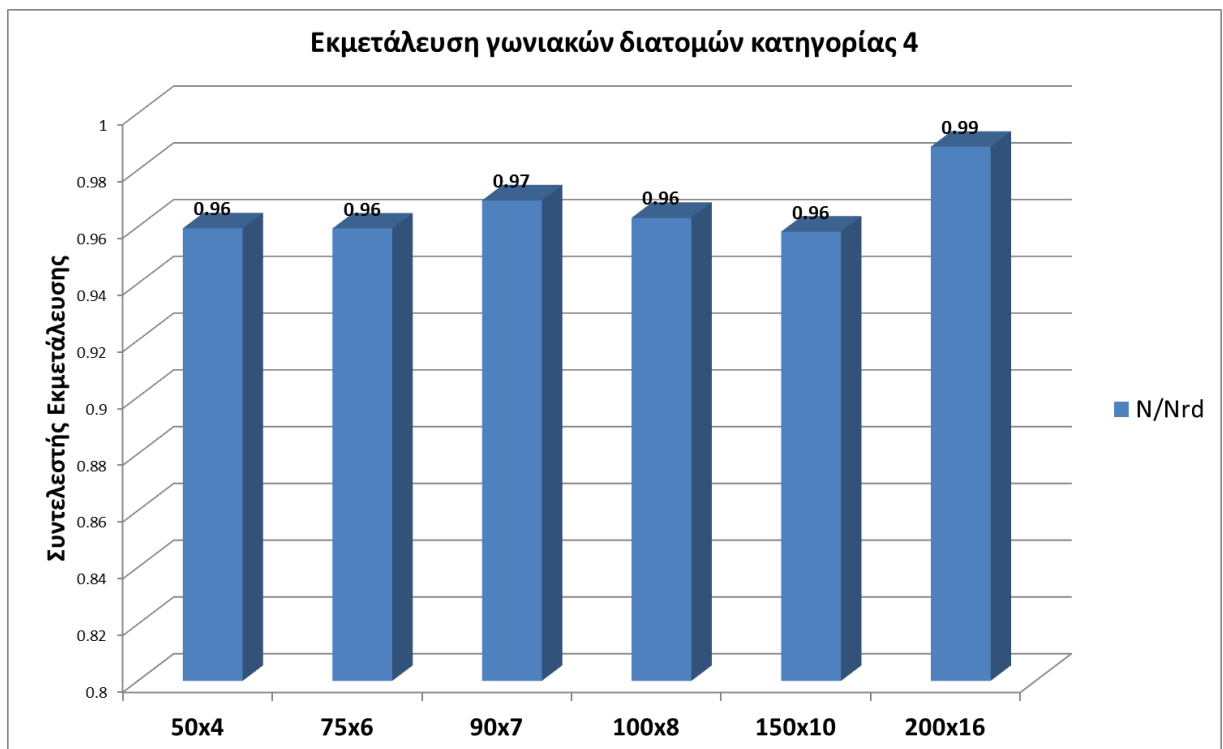
Σχήμα 3.25: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 200x16 σε θλίψη



Σχήμα 3.25: Διάγραμμα αξονικής-παραμόρφωσης διατομής 200x20 σε θλίψη

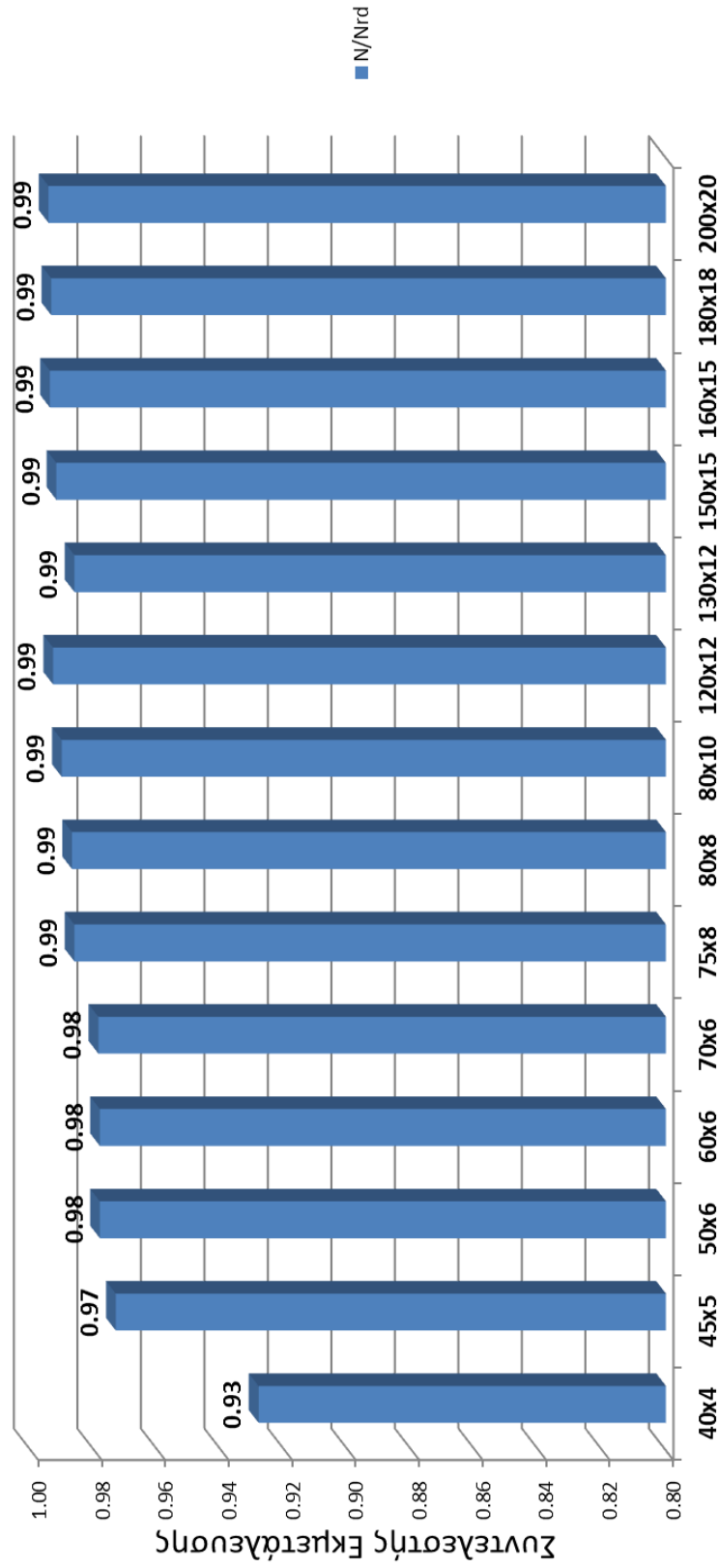
3.4 Συμπεράσματα

Όπως προέκυψε από την σύγκριση της θεωρητικής οριακής πλαστικής αντοχής σε αξονική δύναμη N_{rd} με την θλιπτική αντοχή των εξεταζόμενων γωνιακών διατομών που έδωσε η μη γραμμική ανάλυση εύκολα παρατηρεί κανείς ότι οριακά οι γωνιακές διατομές μπορούν να αποδώσουν την θλιπτική τους αντοχή σε πολύ μεγάλο ποσοστό παρόλο που παρουσιάζουν προβλήματα τοπικού λυγισμού χωρίς όμως να υπάρχουν περεταίρω περιθώρια αντοχής.



Σχήμα 3.26: Γράφημα συντελεστών εκμετάλλευσης γωνιακών κατηγορίας 4 σε θλίψη

Εκμετάλλευση γωνιακών διατομών κατηγορίας 3



Σχήμα 3.27: Γράφημα συντελεστών εκμετάλλευσης γωνιακών διατομών κατηγορίας 3 σε θλίψη

h(mm)	b(mm)	N(Kn)	Nrd(kN)	N/Nrd
50	4	132.4914	138.095	0.959422
75	6	297.317	309.915	0.95935
90	7	419.7848	433.1	0.969256
100	8	529.9623	550.25	0.96313
150	10	996.7237	1040.15	0.95825
200	16	2167.959	2193.9	0.988176
40	4	101.5	109.34	0.928297
45	5	116.783	119.99	0.973273
50	6	197.6078	201.995	0.978281
60	6	239.9771	245.305	0.978281
70	6	282.4848	288.615	0.97876
75	8	399.1645	404.7	0.986322
80	8	431.0032	436.65	0.987068
80	10	530.86	536.05	0.990318
120	12	969.4416	976.25	0.993026
130	12	1050.373	1065	0.986266
150	15	1514.227	1526.5	0.99196
160	15	1626.773	1636.55	0.994026
180	18	2183.36	2197.45	0.993588
200	20	2693.574	2708.65	0.994434

Πίνακας 3.1: Συντελεστές εκμετάλλευσης γωνιακών σε θλίψη

4 Συμπεράσματα

Βασικό συμπέρασμα της κάμψης των επιλεγμένων γωνιακών διατομών είναι ότι παρόλο που ο ευρωκώδικας τις διαχωρίζει σε κατηγορία 3 και 4 με πολύ περιορισμένα περιθώρια αντοχών λόγω του φαινομένου του τοπικού λυγισμού, στην πλειονότητα των περιπτώσεων βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και της μη γραμμικής ανάλυσης, αυτές οι διατομές παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή με αποτέλεσμα πιθανόν να μπορούν να θεωρηθούν μέχρι και κατηγορίας 2 από τη στιγμή που πολλές φορές αγγίζουν την πλαστική ροπή κάμψης.

Όσον αφορά τη θλίψη, οι διατομές επίσης εμφάνισαν αντοχή πολύ κοντά στο πλαστικό όριο αντοχής σε αξονικό φορτίο.

Συνολικά λοιπόν δημιουργείται η υπόνοια ότι οι διατάξεις του ευρωκώδικα και η κατηγοριοποίηση των διατομών σχετικά με τα ισοσκελή γωνιακά είναι συντηρητική και με βάση αυτή τη διπλωματική εργασία υπάρχουν επαρκή περιθώρια αντοχής πέρα από την ελαστική αντοχή.

5 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι., (2003). «Σιδηρές κατασκευές, ανάλυση και διαστασιολόγηση». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα με βάση τα τελικά κείμενα των ευρωκωδίκων, 2η», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
3. ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 3,Κατασκευές από χάλυβα, (ENV1993)
4. Abaqus 6.1 Online Manuals

Παράρτημα Α. Πίνακας βασικών χαρακτηριστικών γωνιακών διατομών

Διατομή	Πλάτος πέλματος h(mm)	Πάχος πέλματος t(mm)	r1(mm)	r2(mm)	A(cm ²)	Κατάταξη	Κατάταξη	Κατάταξη
						Χάλυβας S355	Χάλυβας S275	Χάλυβας S235
40X4	40	4	6.00	3	3.08	3	3	3
45X5	45	5	7.00	3	3.38	3	3	3
50X4	50	4	7.00	3.5	3.89	4	3	3
50X6	50	6	7.00	3.5	5.69	3	3	3
60X6	60	6	8.00	4	6.91	3	3	3
70X6	70	6	9.00	4.5	8.13	3	3	3
75X6	75	6	9.00	4.5	8.73	4	3	3
75X8	75	8	9.00	4.5	11.4	3	3	3
80X8	80	8	10.00	5	12.3	3	3	3
80X10	80	10	10.00	5	15.1	3	3	3
90X7	90	7	11.00	5.5	12.2	4	3	3
90X9	90	9	11.00	5.5	17.1	3	3	3
100X8	100	8	12.00	6	15.5	4	3	3
120X12	120	12	13.00	6.5	27.5	3	3	3
130X12	130	12	14.00	7	30	3	3	3
150X10	150	10	16.00	8	29.3	4	4	3
150X15	150	15	16.00	8	43	3	3	3
160X15	160	15	17.00	8.5	46.1	3	3	3
180X18	180	18	18.00	9	61.9	3	3	3
200X16	200	16	18.00	9	61.8	4	3	3
200X20	200	20	18.00	9	76.3	3	3	3

