



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕ
ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΧΑΛΥΒΑ/FRP**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗ ΛΙΒΕΡΕΤΟΥ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕ
ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΧΑΛΥΒΑ/FRP**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗ ΛΙΒΕΡΕΤΟΥ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ν. Τσούβαλης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Παντελής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2016

Η εργασία αυτή δε θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την καθημερινή υποστήριξη των γονέων μου Μαρίας και Διονύση σε όλα τα επίπεδα, την άκρως απαραίτητη βοήθεια του στενού μου φίλου Στέλιου Κορκοτσίδα σε τεχνικά ζητήματα, τις υποδείξεις των Αστρινού Παπαδάκη και Ηλία Μπιλάλη για το πρόγραμμα ANSYS και την ουσιαστική καθοδήγηση του επιβλέποντος καθηγητή μου κ. Τσούβαλη ο οποίος ήταν υποδειγματικός στον ρόλο του. Θερμές ευχαριστίες σε όλους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ	1
1.1. Εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών στον κατασκευαστικό τομέα	1
1.2. Κανονιστικό πλαίσιο εφαρμογής FRP	5
1.3. Μέθοδος διαμόρφωσης εξολκευμένων διατομών από FRP	7
1.4. Σύγχρονο ερευνητικό επίπεδο – State of the Art.....	8
1.4.1. Ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	8
1.4.2. Ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών.	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	11
2.1. Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.....	11
2.2. Γεωμετρία φορέα	11
2.3. Υλικά – Τιμές μηχανικών ιδιοτήτων.....	14
2.4. Στοιχείο Solid185	15
2.5. Συνοριακές συνθήκες – Φόρτιση.	16
2.6. Προκαταρκτικές δοκιμές	17
2.6.1 Δοκιμή 1 ^η : Αμφίπακτη δοκός τετραγωνικής διατομής με κατανεμημένο φορτίο Γραμμική ανάλυση.....	18
2.6.2 Δοκιμή 2: Αμφίπακτη διατομή τύπου IPE 100 με κατανεμημένο φορτίο – Γραμμική ανάλυση.....	20
2.6.3 Δοκιμή 3: Πρόβολος τετραγωνικής διατομής με αξονική εφελκυστική δύναμη στο ελεύθερο άκρο - Μη γραμμική ανάλυση	22
2.7. Διερεύνηση μεγέθους πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων	23
2.7.1 Δοκιμές για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L	25
2.7.2 Δοκιμές για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar	30
2.7.3 Δοκιμές για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T	33
2.8. Διερεύνηση είδους ανάλυσης: Γραμμική-Μη Γραμμική ανάλυση.....	36
2.9. Ανακεφαλαίωση των επιλογών.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	42
3.1. Καθορισμός Παραμέτρων – Στάδια εργασίας	42

3.2. Διερεύνηση γεωμετριών υβριδικών ενισχυτικών. – 1 ^ο Στάδιο	43
3.2.1 Γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L.....	45
3.2.2 Γεωμετρίες υβριδικού ενισχυτικού για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar	51
3.2.3 Γεωμετρίες υβριδικού ενισχυτικού για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T	53
3.2.4. Μοντελοποίηση στοιχείων εποξικής ρητίνης σύνδεσης	58
3.2.5. Σχολιασμός αποτελεσμάτων 1 ^{ου} Σταδίου	59
3.3. Διερεύνηση συνδυασμών παραμέτρων - 2 ^ο Στάδιο	60
3.3.1. Διερεύνηση για Υβριδικά ενισχυτικά τύπου L.....	62
3.3.1.1. Ροπή αδράνειας χαλύβδινου ενισχυτικού: $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$	62
3.3.2. Διερεύνηση για Υβριδικά ενισχυτικά τύπου flat bar.....	70
3.3.3. Διερεύνηση για Υβριδικά ενισχυτικά τύπου T.....	76
3.3.4 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων	82
3.3.5 Αξιολόγηση παραμέτρων.	98
3.3.6 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων 2 ^{ου} Σταδίου	104
3.4 Διερεύνηση εξοικονόμησης βάρους.....	105
3.4.1 Επιλογή χρήσης γραμμικής ή μη γραμμικής ανάλυσης	105
3.4.2 Αποτελέσματα διερεύνησης εξοικονόμησης μάζας	107
3.5 Συμπεράσματα Εργασίας	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115
ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ.....	118

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της μείωσης βάρους που μπορεί να επιτευχθεί από την αντικατάσταση αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών με ισοδύναμα υβριδικά ενισχυτικά χάλυβα-FRP μικρότερων διαστάσεων. Ως ισοδύναμα υβριδικά ενισχυτικά, ορίζονται για τους σκοπούς της εργασίας, εκείνα τα οποία αναπτύσσουν την ίδια τιμή μέγιστης αξονικής τάσης λόγω κάμψης στο μέσο του ανοίγματος του φορέα, ενώ έχουν μικρότερες διαστάσεις από τα αμιγώς χαλύβδινα ενισχυτικά. Η διερεύνηση γίνεται με την ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα ANSYS.

Εξετάζονται διάφορες γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών και καταγράφεται η ποσοστιαία μείωση στην αναπτυσσόμενη τάση λόγω κάμψης και στο βέλος κάμψης συγκριτικά με το αμιγώς χαλύβδινο ενισχυτικό, διατηρώντας αρχικά σταθερές τις διαστάσεις του ενισχυτικού. Επίσης τιθενται υπό εξέταση οι εξής παράμετροι: η ροπή αδράνειας του χαλύβδινου ενισχυτικού (I_{yy}), ο λόγος εμβαδού ενίσχυσης με σύνθετο υλικό προς το εμβαδόν της χαλύβδινης διατομής (A_{comp}/A_{steel}), το μήκος ενίσχυσης με σύνθετο υλικό προς το μήκος του χαλύβδινου ενισχυτικού (L_{comp}/L_{steel}) και το μέτρο ελαστικότητας παράλληλα στις ίνες του σύνθετου υλικού (E_1).

Κατά τη διερεύνηση των διαφόρων γεωμετριών υβριδικών ενισχυτικών με μη γραμμικές αναλύσεις παρατηρήθηκε μείωση της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης από 12- 30% και μείωση στο αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης από 7-50%, ανάλογα με τη γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού.

Κατά τη διερεύνηση του συνδυασμού των υπολοίπων παραμέτρων, παρατηρήθηκε ότι η ενίσχυση με CFRP στο 70% του μήκους του χαλύβδινου ενισχυτικού, οδηγεί σε πιο αποδοτική ενίσχυση για την ίδια γεωμετρία, ενώ ταυτόχρονα οδηγεί σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα καταπόνησης της εποξικής ρητίνης σύνδεσης.

Συνδυάζοντας τους αποδοτικότερους συνδυασμούς των παραμέτρων και των γεωμετριών, προχωράμε στο σχεδιασμό υβριδικών διατομών προς αντικατάσταση των αμιγώς χαλύβδινων με ζητούμενο τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση βάρους. Η διερεύνηση οδηγεί στο συμπέρασμα πως υπάρχει σχέση εξάρτησης μεταξύ της τιμής του λόγου μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης προς το όριο διαρροής του χάλυβα (σ_{max}/f_y) και της εξοικονόμησης βάρους που μπορεί να επιτευχθεί. Για τιμές του λόγου $\sigma_{max}/f_y=0,7$,1 και 1,06 η δυνατή εξοικονόμηση βάρους προκύπτει ίση με 10,5% , 17,9-19,4% και 23,4-24,9% αντίστοιχα.

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the weight reduction that can be achieved by replacing pure steel strengtheners with equivalent hybrid steel-FRP strengtheners. Equivalent hybrid strengtheners, as defined for the purposes of this study, are those that carry the same maximum axial stress due to bending, but have smaller dimensions than the purely steel strengtheners. The examination is carried out by developing a finite element model in ANSYS program.

Various geometries of hybrid strengtheners are being examined and the percentage reduction of the bending stress and deflection are being recorded, in comparison to a pure steel strengthener, while maintaining the same loading and dimensions of the strengtheners. Also we examine the influence of the following parameters: the moment of inertia of the strengthener (I_{yy}), the ratio of the area of FRP reinforcement to the steel area (A_{comp}/A_{steel}), the ratio of the length of the FRP reinforcement to the total length of the steel beam (L_{comp}/L_{steel}) and the Young's modulus of the FRP (E_1).

The results of non-linear analyzes showed that the bending stress can be reduced at a 12-30% while the deflection can be reduced at a 7-50% depending on the geometry of the hybrid strengthener.

The results of the examination of the other parameters, showed that the reinforcement with Carbon FRP at the 70% of the total length is the more efficient and it also leads to small values of von Mises stress at the epoxy resin, for the same hybrid geometry.

Taking into account the most efficient hybrid geometries and the most efficient combination of the other parameters, we move on to the design of hybrid strengtheners with smaller dimensions to replace the pure steel strengtheners. The results show that weight reduction up to 19.4% is possible. Furthermore, the results show that the weight reduction depends on the ratio of the bending stress to the yield point of the steel. As this ratio increases, the weight reduction that can be achieved increases too.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΤΟΜΕΑ

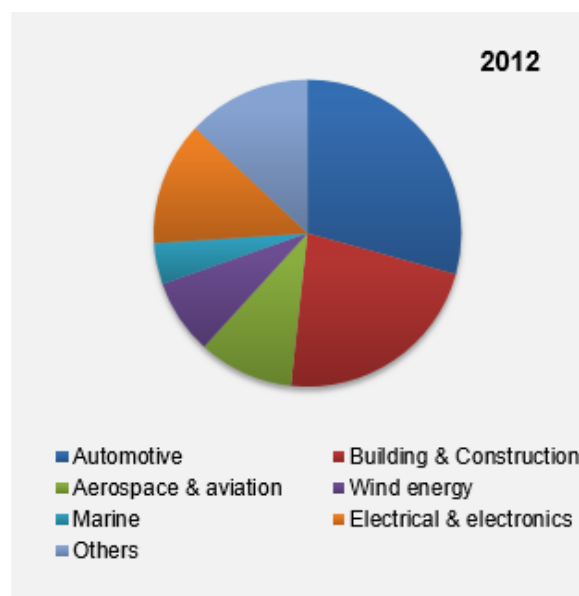
1.1. Εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών στον κατασκευαστικό τομέα

Η χρήση ινοπλισμένων σύνθετων πολυμερών (Fiber Reinforced Polymers – FRP's) έχει καταστεί αρκετά δημοφιλής την τελευταία 20ετία (The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering, 2014), είτε για την ενίσχυση μελών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε ως κύριο δομικό υλικό για νέες κατασκευές.

Τα σύνθετα υλικά ρητίνης/ινών γυαλιού (Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP) και ρητίνης/ινών άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymer- CFRP), παρουσιάζουν εν γένει σημαντικά πλεονεκτήματα ως δομικά υλικά. Διακρίνονται από: (Ν.Τσούβαλης, 1998):

- Χαμηλό ίδιο βάρος, το οποίο οδηγεί σε υψηλές τιμές ειδικών ιδιοτήτων
- Ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης
- Ανθεκτικότητα σε χημικές ενώσεις – οξέα, αλκάλια κ.α.
- Καλά χαρακτηριστικά σε κόπωση
- Μικρές απαιτήσεις συντήρησης
- Ευελιξία στον σχεδιασμό και στην κατασκευή – οικονομία υλικού

Τα πλεονεκτήματά τους αυτά, έχουν οδηγήσει σε καθιέρωση της χρήσης τους στον κατασκευαστικό τομέα, παρά το συγκριτικά υψηλό τους κόστος σε σχέση με το κύριο ανταγωνιστικό υλικό, τον χάλυβα. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η παγκόσμια ζήτηση για FRP's ανά κλάδο, για το έτος 2012. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, ο κατασκευαστικός τομέας καταλαμβάνει ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ζήτησης.



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια κατανάλωση CFRP's ανά τομέα για το έτος 2012.
(www.transparencymarketresearch.com)

Ως δομικό υλικό, τα FRP's διατίθενται συνηθέστερα στις εξής μορφές.

-Ως οπλισμός σκυροδέματος (Σχήμα 1.2) – μορφή ράβδων

-Ως εξωτερική ενίσχυση/περίσφιγξη πλακών, δοκών, υποστυλωμάτων (Σχήμα 1.3) – μορφή ελασμάτων και υφασμάτων

-Ως εξολκευμένες διατομές (pultruded profiles) – (Σχήμα 1.4)



Σχήμα 1.2: FRP σε μορφή ράβδων οπλισμού σκυροδέματος (Correia, 2013)



α.



β.

Σχήμα 1.3: Υφάσματα και ελάσματα FRP. α. Καμπτική ενίσχυση (διαμήκη ελάσματα FRP) και διατμητική ενίσχυση δοκού (εγκάρσια υφάσματα FRP) β. Καμπτική ενίσχυση πλάκας σκυροδέματος με ελάσματα FRP. (www.bow-ingenieure.de , www.hevilifts.com)



Σχήμα 1.4: Προφίλ pultruded διατομών από FRP (www.cjdg.com)

Συνηθέστερη χρήση των σύνθετων υλικών στον κατασκευαστικό τομέα, είναι η δομική ενίσχυση μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα ή και χάλυβα. Η απαίτηση για ενίσχυση ήδη υπαρχουσών κατασκευών προκύπτει από παράγοντες όπως οι αυστηρότερες απαιτήσεις για δομική αντοχή μελών που τίθενται από τους νέους κανονισμούς, η αλλαγή χρήσης κτηρίων και ο επανυπολογισμός της επάρκειας της αντοχής των μελών με δυσμενέστερα φορτία σχεδιασμού, η υπέρβαση της αντοχής διατομών δομικών στοιχείων οφειλόμενη σε σεισμική δράση, η επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων στην αντοχή μελών κατασκευασμένων με παραδοσιακά υλικά και η κόπωση των υλικών.

Η μέθοδος εφαρμογής ενισχυτικών με FRP's, είναι ανταγωνιστική της παλαιότερης μεθόδου ενίσχυσης με κατασκευή μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Έναντι αυτής της μεθόδου πλεονεκτεί στα εξής σημεία:

- Μικρό βάρος (1/4-1/5 του βάρους του χάλυβα). Η χρήση σύνθετων υλικών δεν καταπονεί με νέα επιπρόσθετα φορτία την υφιστάμενη κατασκευή.

- Αύξηση αντοχής και πλαστιμότητας του δομικού στοιχείου μέσω της περίσφυγξής του, δίχως μεταβολή της γεωμετρίας ή της δυσκαμψίας του. Η αύξηση στη δυσκαμψία ενός στοιχείου ενδέχεται να έχει καταστρεπτικές συνέπειες στην απόκριση του συνόλου της κατασκευής υπό την επίδραση εξωτερικού φορτίου μέσω μη προβλεπόμενης ανακατανομής των τάσεων σε αυτή. Όταν λοιπόν στρατηγική της επέμβασης δεν είναι η αύξηση της δυσκαμψίας (πχ. για λόγους μείωσης των μετακινήσεων) ολόκληρης της κατασκευής, τα ινοπλισμένα πολυμερή διαθέτουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι διατηρούν αναλλοίωτη τη δυσκαμψία του ενισχυμένου στοιχείου. Το αμελητέο τους πάχος διατηρεί ταυτόχρονα αναλλοίωτα τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του χώρου.

- Ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και μεγάλη διάρκεια ζωής

- Ιδιαίτερα ανταγωνιστικό κόστος επέμβασης – ευκολία τοποθέτησης.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος ενίσχυσης έναντι της μεθόδου με μανδύες Ο.Σ. είναι τα εξής:

- Δυσκολία επαρκούς αγκύρωσης στην περίπτωση διατμητικής και καμπτικής ενίσχυσης δοκού. Γίνεται χρήση ειδικών βλήτρων για το σκοπό αυτό. Η απόκριση των διάφορων τρόπων και μεθόδων αγκύρωσης αποτελεί ακόμη αντικείμενο μελέτης.

- Ελλιπής αγκύρωση οδηγεί σε πρόωρη ψαθυρή αστοχία με απόσχιση της επικάλυψης σκυροδέματος, σε τάση πολύ μικρότερη της τάσης θραύσης του ινοπλισμένου πολυμερούς και άρα μη εκμετάλλευση της αντοχής του.

- Ψαθυρή θραύση ακόμη και στην περίπτωση επαρκούς αγκύρωσης κατά την εξάντληση της αντοχής του ινοπλισμένου πολυμερούς.

- Επιμελής προετοιμασία του δομικού στοιχείου πριν την τοποθέτηση του υφάσματος. Οι εργασίες περιλαμβάνουν επίστρωση με ειδικό επισκευαστικό τσιμεντοκονίαμα υψηλών αντοχών, αύξηση της καμπυλότητας των γωνιών των στοιχείων για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων και επιμελή καθαρισμό από υπολείματα σκόνης για επίτευξη επαρκούς πρόσφυσης του σύνθετου υλικού με το υπόστρωμα από σκυρόδεμα.

- Απαίτηση εξειδικευμένων συνεργείων.

- Δεν χρησιμοποιούνται όταν στρατηγική του σχεδιασμού είναι η αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής.

Πέραν της ενίσχυσης/επισκευής ήδη υπαρχουσών κατασκευών, τα FRP, χρησιμοποιούνται, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, και για την κατασκευή νέων υβριδικών μελών (σκυρόδεμα-FRP , χάλυβα-FRP ή/και χάλυβα-σκυρόδεμα-FRP) ή ακόμη και για κατασκευές εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένες από σύνθετα υλικά.

Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η καλωδιωτή πεζογέφυρα Kolding Bridge κοντά στην τοποθεσία Kolding, στη Δανία, της οποίας όλα τα κύρια μέρη της ανωδομής (κατάστρωμα γέφυρας, καλώδια, πυλώνας) είναι κατασκευασμένα από εξολκευμένα προφίλ (pultruded profiles) σύνθετων υλικών ρητίνης – ίνων γυαλιού (Glass Fiber Reinforced Polymers-GFRP's). Το κατάστρωμα είναι κατασκευασμένο από προφίλ pultruded GFRP μορφής διατομής γωνιακού, I και σωλήνων και στηρίζεται μέσω καλωδίων από GFRP σε πυλώνα 18 m, επίσης κατασκευασμένο από standard pultruded GFRP διατομές. Η γέφυρα έχει μήκος 40 m, πλάτος 3,2 m και βάρος 12 tn, το οποίο υπολογίζεται λιγότερο από το μισό μιας αντίστοιχης κατασκευής από χάλυβα. Η μελέτη κόστους για την κατασκευή αυτής της γέφυρας έδειξε ότι το κόστος της είναι υψηλότερο συγκριτικά με τις εναλλακτικές κατασκευές από χάλυβα ή οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο όμως εν μέρει αντισταθμίσθηκε λόγω μειωμένου κόστους εγκατάστασης και συντήρησης, ώστε να οδηγήσει σε τελική επιβάρυνση 5-10% συγκριτικά με τις εναλλακτικές επιλογές χάλυβα και σκυροδέματος για την κατασκευή.(International Handbook of FRP in Civil Engineering, 2014)



Σχήμα 1.5: Γέφυρα Kolding, εξ'ολοκλήρου κατασκευασμένη από GFRP.
(The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering, 2014)

1.2. Κανονιστικό πλαίσιο εφαρμογής FRP

Παρά την αυξανόμενη χρήση των FRP στον κατασκευαστικό κλάδο, δεν υπάρχει ακόμη σε επίπεδο κανονισμών στην Ευρώπη, ένα κανονιστικό κείμενο το οποίο να διέπει τον σχεδιασμό ή/και την ενίσχυση κατασκευών με χρήση FRP, αντίστοιχο των Ευρωκώδικων. Ένας λόγος είναι η συνεχώς εξελισσόμενη επιστημονική έρευνα που διεξάγεται γύρω από αυτά τα υλικά.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, μέσω του Joint Research Centre, εργάζεται προς την κατεύθυνση της πρότασης και πιστοποίησης ενός Ευρωκώδικα για κατασκευές ή ενισχύσεις με χρήση FRP (Joint Research Centre, EUR 22864 EN - 2007). Επιπλέον, πάλι με απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και με ευθύνη του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Τεχνικής Πιστοποίησης (*European Organisation for Technical Approvals- EOTA*) θα θεσπιστούν οι ιδιότητες των υλικών FRP σε κανονιστικό κείμενο (A. Weber 2013).

Ταυτόχρονα η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Πιστοποίησης (*Comité Européen de Normalisation- CEN*) ετοιμάζει τη νέα έκδοση του Ευρωκώδικα 2 – Κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, στην οποία πρόκειται να συμπεριληφθεί ως μέρος του κυρίως κειμένου η ενίσχυση του σκυροδέματος με ράβδους FRP. Στόχος είναι να συμπεριληφθούν τόσο FRP από διαφορετικά υλικά (CFRP's, GFRP's, Aramid FRP-AFRP's), όσο και διαφορετικών τιμών ιδιοτήτων, ακριβώς όπως και στην περίπτωση των ράβδων οπλισμού από χάλυβα (A. Weber 2013).

Σε επίπεδο κανονιστικών διατάξεων, το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13706, θέτει κανονισμούς σχετικά με τις δοκιμές και την εφαρμογή εξολκευμένων προφίλ από GFRP (pultruded GFRP profiles). Το συγκεκριμένο ευρωπαϊκό πρότυπο έχει εφαρμογή μόνο για εκείνα τα pultruded profiles τα οποία χρησιμοποιούνται για «κατασκευαστικούς σκοπούς» (“structural purposes”), οι οποίοι σύμφωνα με το πρότυπο, ορίζονται ως περιπτώσεις στις οποίες «η

φέρουσα ικανότητα είναι το κύριο κριτήριο του σχεδιασμού και το προϊόν είναι μέρος ενός φορέα ή συστήματος φορέων».

Σε επίπεδο εθνικών προτύπων, υπάρχουν πρότυπα και κανονισμοί για την εφαρμογή υφασμάτων και ελασμάτων από FRP ως εξωτερική ενίσχυση μελών ή ως ράβδοι οπλισμού ή ως pultruded profiles, όπως τα ιταλικά CNR-DT 200:207 επιμελείας του Ιταλικού Συμβουλίου Ερευνών (*Consiglio Nazionale delle Ricerche- CNR*).

Στην Ελλάδα, η χρήση FRP, προβλέπεται από τον Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Οι ενισχύσεις δομικών στοιχείων υπόκεινται στα προβλεπόμενα του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΦΕΚ Β 42 - 20.01.2012), ο οποίος προέκυψε ως ανάγκη πλήρους, επιστημονικά σύγχρονης, ασφαλούς, οικονομικής, νομικώς συνεπούς και προσαρμοσμένης προς τον Ευρωκώδικα 8 αντιμετώπισης του περίπλοκου θέματος των επεμβάσεων σε υφιστάμενα κτίρια, τα οποία έχουν σχεδιαστεί με παλαιότερους αντισεισμικούς κανονισμούς.

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Επεμβάσεων η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών προβλέπεται στις περιπτώσεις:

- Εφαρμογή εξωτερικής περίσφιξης ραβδόμορφου στοιχείου (ΚΑΝ.ΕΠΕ., Παρ.8.2.1.2.β)
- Επεμβάσεις με στόχο την ενίσχυση της εφελκόμενης ζώνης έναντι ορθής έντασης (ΚΑΝ.ΕΠΕ., Παρ 8.2.1.3.α)
- Ανεπάρκεια οπλισμού διάτμησης (ΚΑΝ.ΕΠΕ., Παρ 8.2.2.2)
- Επεμβάσεις με στόχο την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας (ΚΑΝ.ΕΠΕ., Παρ 8.2.3)
- Ανεπάρκεια οπλισμού κόμβου (ΚΑΝ.ΕΠΕ., Παρ 8.3.2)
- Ανεπάρκεια οπλισμού διάτμησης τοιχωμάτων (ΚΑΝ.ΕΠΕ., Παρ. 8.4.2.2)

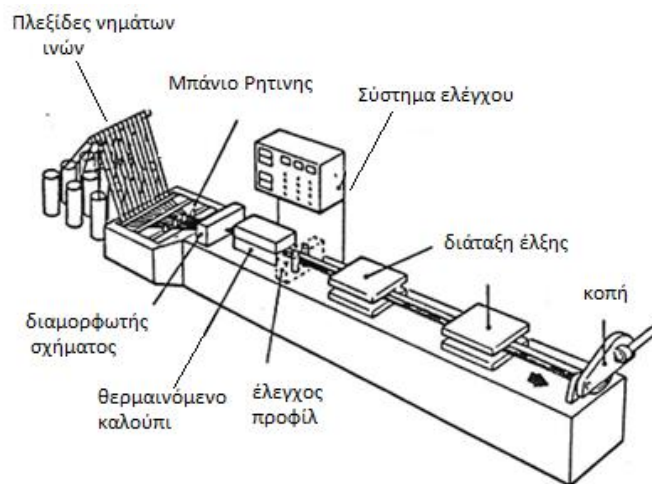
Τεχνικές προδιαγραφές ως προς την εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών δίνονται στις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ)- Εργασίες Αποκατάστασης Ζημιών Κατασκευών του ΕΛΟΤ (ΤΠ 1501-14-01-08-01:2009).

Παράλληλα με τους ευρωπαϊκούς και εθνικούς κανονισμούς υπάρχουν στο ευρωπαϊκό χώρο εγχειρίδια σχεδίασης για FRP's, όπως το Structural Design of Polymer Composites- της EUROCOMP - ομάδα εργασίας του European Structural Polymeric Group. Ο όμιλος αυτός αποτελεί κοινοπραξία από εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο των κατασκευών από FRP ο οποίος ιδρύθηκε το 1989. Στο εν λόγω εγχειρίδιο παρέχονται αρχές σχεδιασμού (Part 1) και παραδείγματα εφαρμογής (Part 2).

Τέλος αξίζει να γίνει αναφορά στα τεχνικά εγχειρίδια που εκδίδουν εταιρείες παραγωγής FRP και στα οποία παρουσιάζονται τόσο αρχές σχεδιασμού, όσο και παραδείγματα εφαρμογής βασισμένα στις ιδιότητες των προϊόντων που παράγουν. Τέτοια εγχειρίδια βρίσκουμε από τις εταιρείες Fiberline®, Pultrex®, Extren DWB®, Bedford® κ.α.

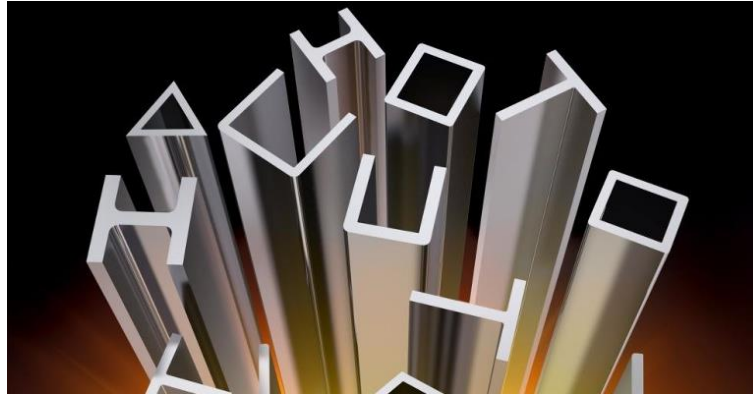
1.3. Μέθοδος διαμόρφωσης εξολκευμένων διατομών από FRP

Η μέθοδος διαμόρφωσης εξολκευμένων διατομών FRP (pultrusion) είναι μια μέθοδος κατασκευής μορφοδοκών σταθερής διατομής από ινοπλισμένο πολυμερές, η οποία παρουσιάζει αρκετά κοινά με τη μέθοδο κατασκευής προφίλ αλουμινίου με εξέλαση. (Τσούβαλης, 1998). Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την έλξη ινών οι οποίες έχουν εμβαπτιστεί σε μπάνιο ρητίνης μέσω ενός θερμαινόμενου χαλύβδινου καλούπιού όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Μέθοδος μορφοποίησης με εξόλκευση (www.johncrane.com)

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης μειώνοντας έτσι τόσο το εργατικό κόστος όσο και τα σφάλματα λόγω ανθρώπινου παράγοντα συγκριτικά με τις μεθόδους hand lay up και molding. Πρόκειται για μια συνεχή μέθοδο παραγωγικής διαδικασίας η οποία επιτρέπει υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και παραγωγικότητας, επιτυγχάνεται υψηλή περιεκτικότητα σε ίνες του συνθέτου, ενώ παράλληλα προσφέρει μια πληθώρα είτε απλών είτε περίπλοκων τελικών προϊόντων (προφίλ διατομών) με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Διατομές FRP διαμορφωμένες με τη μέθοδο pultrusion
(www.compositestoday.com)

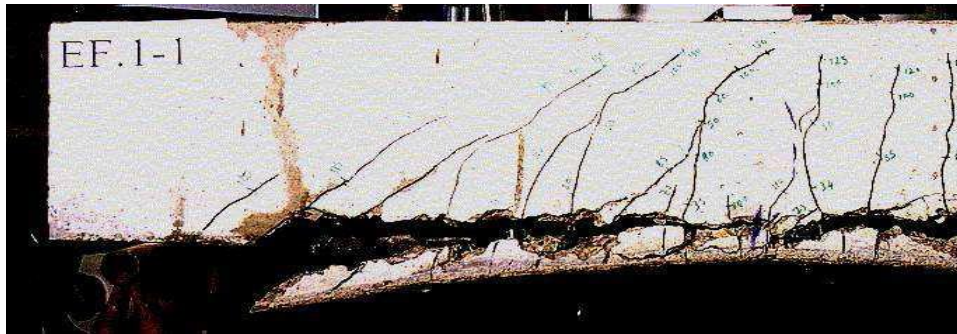
Προϊόντα τα οποία παράγονται από pultruded διατομές FRP είναι μεταξύ άλλων, δομικά πλαίσια, σκαλωσιές, κλιμακοστάσια, δάπεδα και εσχάρες. (www.stronglitecomposites.com)

1.4. Σύγχρονο ερευνητικό επίπεδο – State of the Art

1.4.1. Ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα

Πολυάριθμες είναι στη διεθνή ερευνητική βιβλιογραφία οι αναφορές για την ενίσχυση μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα με εφαρμογή ενισχυτικών ελασμάτων ή υφασμάτων από FRP και κυρίως CFRP (Kaiser 1989, Ahmed et al. 2000, El-Tawil 2001), αυξάνοντας την αντοχή του μέλους του φορέα τόσο σε κάμψη και σε διάτμηση, όσο και της πλαστιμότητάς του.

Ως κύριο πρόβλημα εμφανίζεται η πρόωρη αστοχία με απόσχιση της επικάλυψης σκυροδέματος, σε τάση πολύ μικρότερη της τάσης θραύσης του ινοπλισμένου πολυμερούς και άρα μη εκμετάλλευση της αντοχής του, η αστοχία της συνδετικής ρητίνης και η αποκόλληση του ενισχυτικού ελάσματος ή υφάσματος από το σκυρόδεμα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9. Κάτι τέτοιο, εκτός του ότι θέτει περιορισμούς στην αποδοτικότητα της ενίσχυσης, αποτελεί επιπλέον ψαθυρό τρόπο αστοχίας, κάτι το οποίο απαγορεύεται από τους ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς. Η επιστημονική έρευνα επικεντρώνεται στη μελέτη του τρόπου αστοχίας χρησιμοποιώντας τόσο πειραματικές μεθόδους, όσο και αναλυτικές (Buyukozturk et al. 2002, Arduini et al. 1997, Raoof, Hassanen 2000, Swamy et al. 1997). Για την αντιμετώπιση της αστοχίας αυτής διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί, με κύριο στόχο την επαρκή αγκύρωση της ενίσχυσης, όπως κατάλληλοι τρόποι δεσίματος με επιπλέον υφάσματα από CFRP κατά την εγκάρσια διεύθυνση της δοκού στις άκρες, αγκύρια από ίνες γυαλιού κ.α.



Σχήμα 1.9: Απόσχιση επικάλυψης σκυροδέματος στο πέρας του σύνθετου υλικού (Σ.Δρίτσος 2012)

Πέραν της συνηθισμένης αυτής μεθόδου ενίσχυσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος, έχει αναπτυχθεί μια νέα διαφορετική τεχνική η οποία αποκαλείται “near surface mounted” (NSM). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, λωρίδες ή ράβδοι CFRP εισάγονται σε προσχεδιασμένες εγκοπές κατάλληλων διαστάσεων στη μάζα του σκυροδέματος, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής (De Lorenzis L, Teng JG. 2004, Baros, Dias, Lima, 2007).

Ένας επιπλέον παράγοντας που εισάγει προβλήματα στη σύνδεση σκυροδέματος – FRP, είναι η απορρόφηση υγρασίας στην διεπιφάνεια ρητίνης σκυροδέματος μέσω των πόρων του σκυροδέματος. Η υγρασία μειώνει την ελεύθερη επιφανειακή ενέργεια και επιβαρύνει με επιπλέον ωσμωτική πίεση τη ρητίνη, υποβαθμίζοντας την αντοχή της σύνδεσης και μεταβάλλοντας τον τρόπο αστοχίας από αποκόλληση της σύνδεσης μέσω ρωγμάτωσης της επιφάνειας του σκυροδέματος σε αποκόλληση της ρητίνης από το υπόστρωμα. Τα μόρια του νερού προσβάλλουν την σύνδεση μεταξύ των μορίων της ρητίνης και των πυριτικών ενώσεων οι οποίες εμπεριέχονται στο σκυροδέμα, οδηγώντας σε μείωση της αντοχής της σύνδεσης (Lau 2012, Au 2006, Buyukozturk et al., 2012).

1.4.2. Ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών.

Το μεγαλύτερο μέρος της ερευνητικής βιβλιογραφίας σχετικά με την ενίσχυση χαλύβδινων μελών κατασκευών, επικεντρώνεται στη μελέτη της σύνδεσης του ενισχυτικού FRP με το χάλυβα (Hollaway and Cadei- 2002, Zhao and Zhang 2007, Benachour et al. 2008, Deng et al. 2004, Lenwari et al. 2006, Fawzia et al. 2006, Photiou et al. 2006) , στην αντοχή έναντι κόπωσης και την διάδοση ρωγμών (Tavakkolizadeh and Saadatmanesh 2003(a), Liu et al. 2005(a), Bocciarelli et al. 2009(b)), με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι η χρήση FRP μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην έναρξη της ρωγμής και με αυτόν τον τρόπο να αυξάνεται η ζωή έναντι κόπωσης της δοκού, (B. Täljsten, C.S. Hansen, J.W. Schmidt 2009, H. Jiao, F. Mashiri, X.L. Zhao 2012). καθώς και στην απόκριση του ενισχυμένου φορέα σε κάμψη (Schnerch and Rizkalla 2008, Lenwari et al.2005) και ειδικότερα στην μελέτη ενίσχυσης δοκών γεφυρών (Miller et al. 2001, Hollaway and Cadei 2002, Phares et al. 2003, Moy and Bloodworth 2007, Salar Tabrizi 2015).

Ερευνητές (Hidekuma et al. 2011, Hidekuma et al. 2012, Jiao et al. 2014) προτείνουν μια εναλλακτική λύση ενίσχυσης χαλύβδινων διατομών με χρήση νημάτων (“strands”) μικρής διαμέτρου (της τάξης του 1 mm) από CFRP, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους αφήνοντας κενό το οποίο επιτρέπει στη συνδετική ρητίνη να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας των νημάτων προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια σύνδεσης με τη χαλύβδινη διατομή συγκριτικά με μια ενίσχυση με έλασμα.

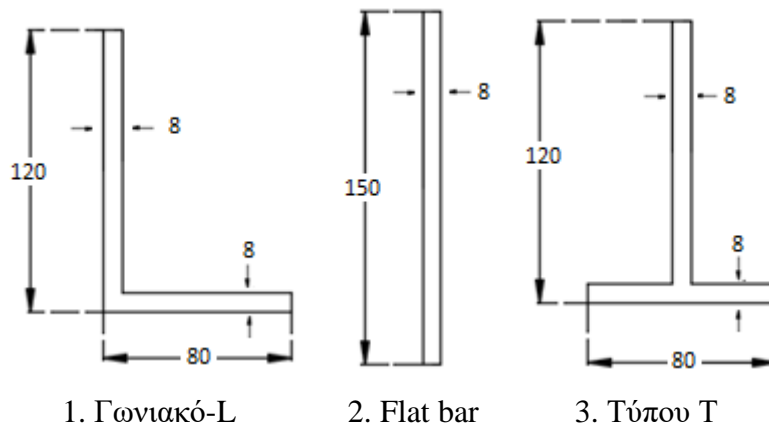
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1. Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS

Η χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί καθιερωμένη μέθοδο ανάλυσης στην επιστημονική πρακτική και έχει αποδειχθεί από ερευνητές, (Barbosa 1998, Kachlakev 2001, Fathelbab 2011, Peiris 2011), ότι παρέχει ικανοποιητική σύγκλιση αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ελλείψει δυνατότητας εκτέλεσης πειραματικών δοκιμών, στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθεί η ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος ANSYS.

2.2. Γεωμετρία φορέα

Θα εξετασθεί η ενίσχυση με σύνθετα υλικά ινών άνθρακα/εποξικής ρητίνης (Carbon/epoxy) και ινών γυαλιού/εποξικής ρητίνης (Glass/epoxy), τριών τύπων χαλύβδινων ενισχυτικών, τύπου L, flat bar και T, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.



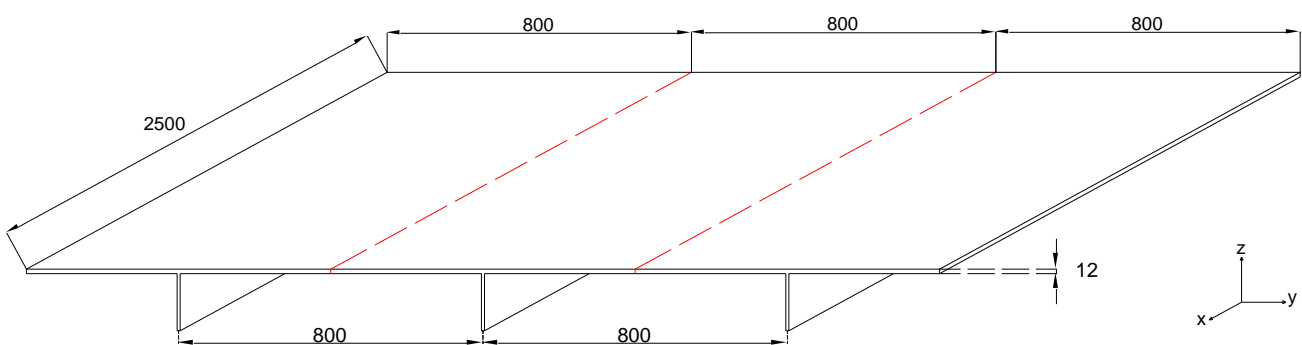
Σχήμα 2.1: Τύποι χαλύβδινων ενισχυτικών

Εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία τα χαλύβδινα ενισχυτικά υποστηρίζουν ορθογώνιο επίπεδο χαλύβδινο έλασμα το οποίο φέρει φορτίο στην άνω επιφάνεια. Για τους σκοπούς της εργασίας θεωρούμε ότι το εν λόγω χαλύβδινο έλασμα πρόκειται για πλάκα δεξαμενής πλοίου. Επιλέγονται έτσι κατ'αρχήν τυπικές διαστάσεις διατομής για το ενισχυτικό τύπου L και ύστερα οι διαστάσεις των ενισχυτικών τύπου flat bar και T, επιλέγονται τέτοιες ώστε να διαθέτουν την ίδια τιμή ροπής αδράνειας με το ενισχυτικό τύπου L. Βασιζόμενοι σε τιμές τυπικής ισαπόστασης ενισχυμένων νομέων κατά τη διαμήκη

διεύθυνση του πλοίου και τυπικής ισαπόστασης διαμήκων ενισχυτικών, επιλέγουμε για το φορέα τις εξής τιμές διαστάσεων:

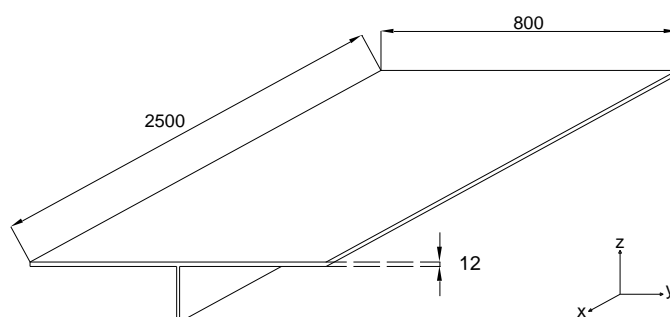
- Μήκος: 2500 mm
- Πάχος: 12 mm
- Απόσταση μεταξύ ενισχυτικών : 800 mm

Η γενική εικόνα του φορέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Σημειώνονται οι διαστάσεις του χαλύβδινου ελάσματος σε mm. Επιλέχθηκε για λόγους παρουσίασης, χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar. Οποιαδήποτε αναφορά σε άξονες θα γίνεται στα επόμενα εδάφια, αναφέρεται στο σύστημα αξόνων x,y και z, το οποίο παρουσιάζεται επίσης στο Σχήμα 2.2.

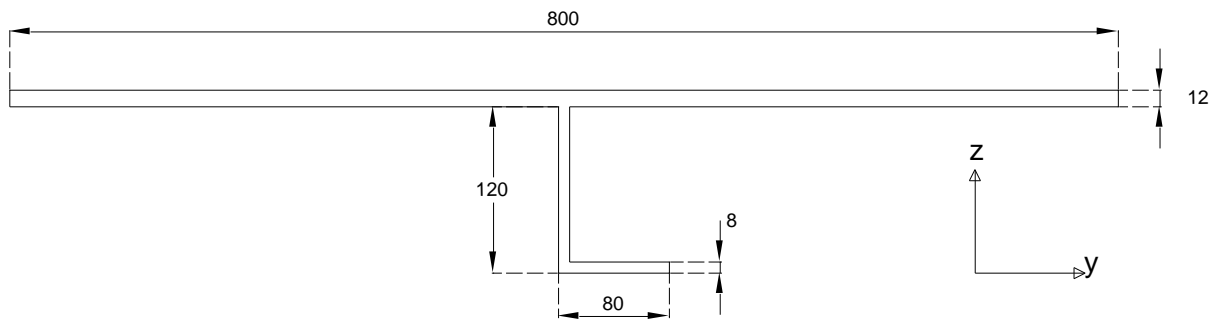


Σχήμα 2.2 : Γενική εικόνα του φορέα

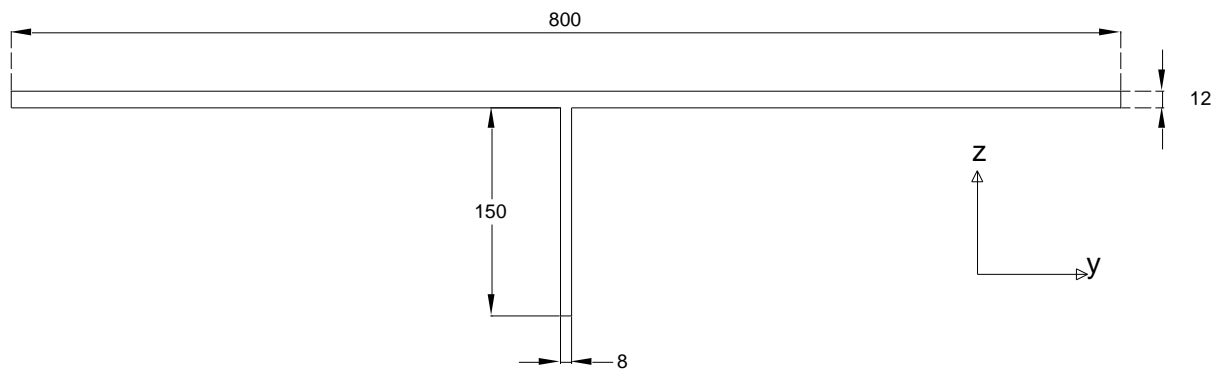
Στο ανωτέρω Σχήμα 2.2, σημειώνονται επίσης με διακεκομμένες κόκκινες γραμμές, οι επιφάνειες επιρροής (συνεργαζομενο πλάτος) για κάθε ενισχυτικό. Οι επιφάνειες αυτές ορίζονται από το μισό της απόστασης εκατέρωθεν του κάθε ενισχυτικού. Έτσι, ο τελικός φορέας προς εξέταση προκύπτει όπως στο Σχήμα 2.3. Στα Σχήματα 2.4-2.6 παρουσιάζεται η διατομή του φορέα για τις περιπτώσεις χαλύβδινου ενισχυτικού τύπου L, flat bar και T, αντίστοιχα.



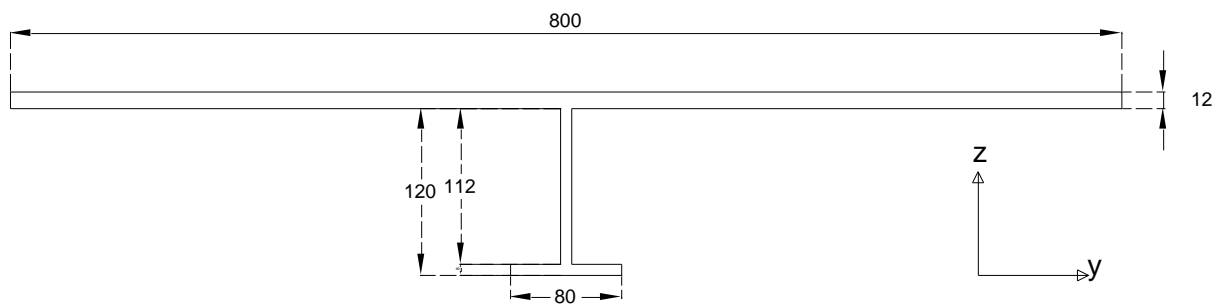
Σχήμα 2.3: Φορέας και διαστάσεις χαλύβδινου ελάσματος



Σχήμα 2.4 : Διατομή φορέα για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L



Σχήμα 2.5 : Διατομή φορέα για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου Flat bar



Σχήμα 2.6: Διατομή φορέα για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T

2.3. Υλικά – Τιμές μηχανικών ιδιοτήτων

Στο εδάφιο αυτό περιγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

A. Χάλυβας.

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του χαλύβδινου ορθογώνιου ελάσματος και των χαλύβδινων ενισχυτικών εξετάζεται ως ιστροπικό γραμμικά ελαστικό-γραμμικά ανελαστικό υλικό, μέτρου ελαστικότητας E_1 (βλ. Πίνακα 2.1.) για την ελαστική περιοχή και E_{tang} για την ανελαστική περιοχή. Ως όριο διαρροής τίθεται η τιμή $\sigma_r=235$ MPa. Για τις τιμές των ιδιοτήτων του χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Βάγιας, Ερμόπουλος, Ιωαννίδης 2008).

B. Σύνθετο υλικό ινών άνθρακα/εποξικής ρητίνης (Carbon/epoxy)

Το σύνθετο υλικό ινών άνθρακα/εποξικής ρητίνης (Carbon/epoxy) χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των ενισχυτικών από ελάσματα και εξολκευμένα προφίλ CFRP, τα οποία εφαρμόζονται στο χαλύβδινο ενισχυτικό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία υβριδικού ενισχυτικού χάλυβα-CFRP. Το Carbon/epoxy, εξετάζεται ως ορθοτροπικό γραμμικά ελαστικό υλικό με ίνες άνθρακα σε μία διεύθυνση (Unidirectional-UD), μέτρου ελαστικότητας E_1 παράλληλα στη διεύθυνση των ινών και E_2 κάθετα στη διεύθυνση των ινών, μέτρου διάτμησης G_{12} και G_{23} και λόγων Poisson ν_{12} , ν_{23} και ν_{13} στα επίπεδα 12, 23 και 13 αντίστοιχα. Για τις τιμές των ιδιοτήτων του Carbon/epoxy χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών έτσι όπως αυτά αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Παπαδάκης, Τσούβαλης, 2014).

Γ. Σύνθετο υλικό ινών γυαλιού/εποξικής ρητίνης (Glass/epoxy)

Αντίστοιχα με την περίπτωση του υλικού Carbon/epoxy, το σύνθετο υλικό ινών γυαλιού/εποξικής ρητίνης (Glass/epoxy) θα χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση των ενισχυτικών από ελάσματα και εξολκευμένα προφίλ GFRP. Εξετάζεται επίσης ως ορθοτροπικό γραμμικά ελαστικό υλικό με ίνες άνθρακα σε μία διεύθυνση (Unidirectional-UD), μέτρου ελαστικότητας E_1 παράλληλα στη διεύθυνση των ινών και E_2 και E_3 κάθετα στη διεύθυνση των ινών, μέτρου διάτμησης G_{12} , G_{23} και G_{13} και λόγων Poisson ν_{12} , ν_{23} και ν_{13} στα επίπεδα 12 και 23 και 13 αντίστοιχα (βλ. Πίνακα 2.1.). Χρησιμοποιήθηκαν ίδιες τιμές ιδιοτήτων με αυτές του Carbon/epoxy, για τα μεγέθη $E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{13}, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$, ενώ τέθηκε $E_1=50$ GPa, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Τσούβαλης 1998).

Δ. Εποξική Ρητίνη.

Η εποξική ρητίνη χρησιμοποιείται για τη μόνιμη σύνδεση των ελασμάτων ή εξολεωμένων διατομών από Carbon/epoxy και Glass/epoxy με τα χαλύβδινα ενισχυτικά. Εξετάζεται ως ιστροπικό γραμμικά ελαστικό υλικό μέτρου ελαστικότητας E_1 , αντοχής σ_t και λόγου Poisson ν_{12} . Για τις τιμές των ιδιοτήτων της εποξικής ρητίνης χρησιμοποιήθηκαν αυτές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία (Τσούβαλης 1998).

Πίνακας 2.1: Τιμές μηχανικών ιδιοτήτων υλικών

Υλικό	γ (g/cm ³)	σ_t (MPa)	E_1 (GPa)	E_{tang} (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{23} (GPa)	G_{13} (GPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
Χάλυβας	7,8	235	207	6	-	-	-	-	-	0,33	-	-
CFRP/epoxy	1,57	507	143.7	-	9.2	9.2	3.4	1.7	3.4	0.32	0.46	0.32
GFRP/epoxy	1,92	185	50	-	9.2	9.2	3.4	1.7	3.4	0.32	0.46	0.32
Εποξική ρητίνη	1,2	85	3	-	-	-	-	-	-	0.37	-	-

2.4. Στοιχείο Solid185

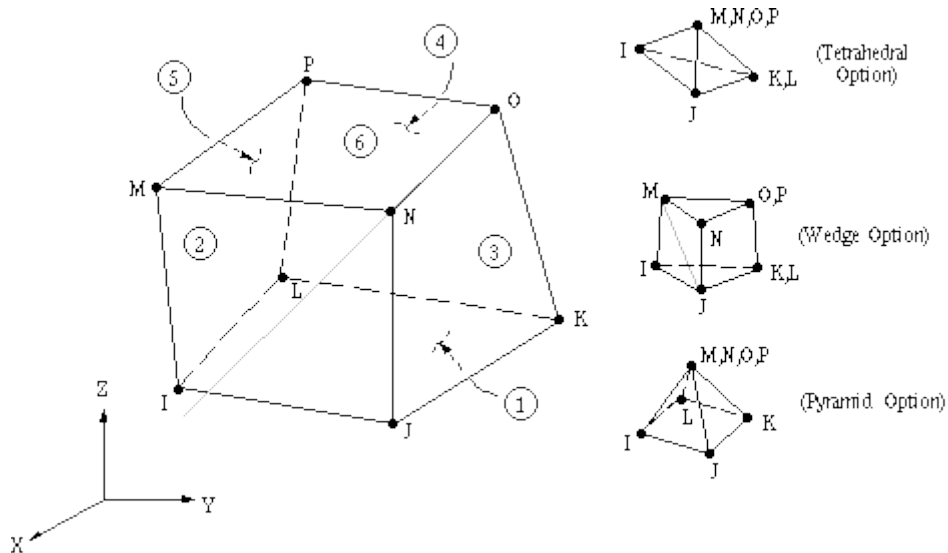
Για τη μοντελοποίηση τόσο του χάλυβα, όσο και των σύνθετων υλικών Carbon/epoxy και Glass/epoxy καθώς και της εποξικής ρητίνης για τη σύνδεση μεταξύ των υλικών, χρησιμοποιήθηκε από την βιβλιοθήκη στοιχείων (Library of Element Types) του ANSYS το στοιχείο Solid185.

Το στοιχείο Solid185 χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη τρισδιάστατων μοντέλων. Ως στερεό διατίθεται στις μορφές εξαέδρου, πρίσματος, τετραέδρου και πυραμίδας και ορίζεται από 8,6,4 και 5 κόμβους αντίστοιχα, με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετακίνηση κατά τη διεύθυνση x, y και z σε κάθε περίπτωση. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η εξαεδρική μορφή του στοιχείου. Οι διαστάσεις των στοιχείων προσδιορίζονται στο εδάφιο 2.7.

Το στοιχείο Solid185 μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως ομογενές στερεό είτε ως πολύστρωτο (layered) στερεό. Οι διατομές από Carbon/epoxy και Glass/epoxy, λόγω του τρόπου διαμόρφωσής τους με τη μέθοδο pultrusion, όπως αυτή έχει περιγραφεί στο εδάφιο 1.3, εξετάζονται μακροσκοπικά, ως ομογενή ορθοτροπικά υλικά. Ο χάλυβας και η εποξική ρητίνη σύνδεσης επίσης εξετάζονται μακροσκοπικά ως ομογενή ιστροπικά υλικά.

Το στοιχείο Solid185 έχει τη δυνατότητα μεγάλων παραμορφώσεων (large deflections), χαρακτηριστικό το οποίο χρησιμοποιείται κατά τις μη-γραμμικές αναλύσεις έτσι όπως αυτές εκτελούνται και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.

Το στοιχείο Solid185, ως ομογενές στερεό, με τις παραλλαγές εξαέδρου, πρίσματος, τετραέδρου και πυραμίδας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.

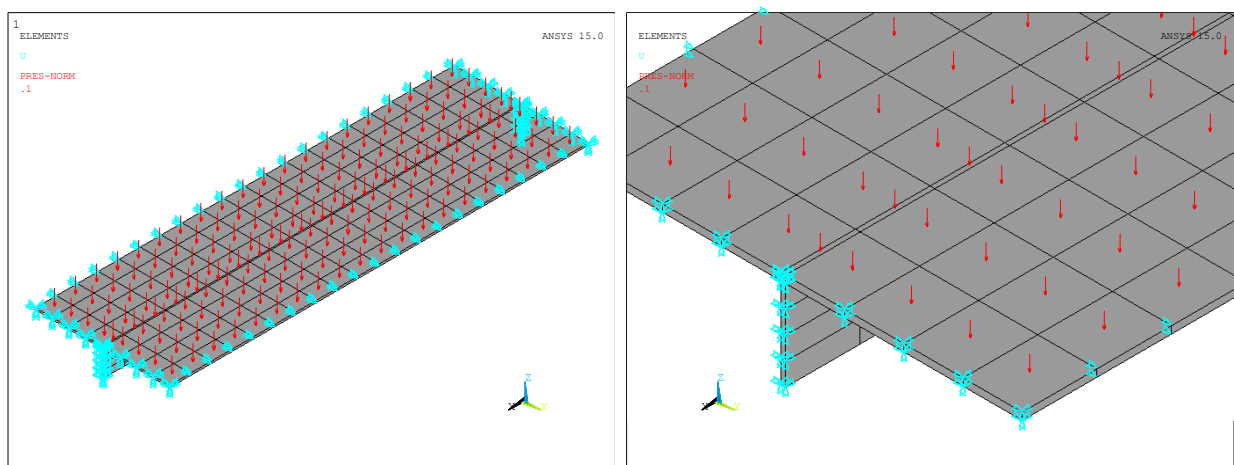


Σχήμα 2.7: Το στοιχείο Solid185 (ANSYS 15.0, 2013)

2.5 Συνοριακές συνθήκες – Φόρτιση.

Ο φορέας εξετάζεται ως αμφίπακτη δοκός με απαγόρευση πλευρικής μετακίνησης κατά τον άξονα y λόγω της πλευρικής στήριξης που θέτει η συνέχεια του χαλύβδινου ελάσματος (βλ. Σχήμα 2.2). Τίθεται τυπική τιμή φόρτισης πυθμένα δεξαμενής πλοίου ίση με 10 tn/m^2 , η οποία αντιστοιχεί σε τιμή πίεσης $P=100 \text{ kPa}$ στην επιφάνεια του φορέα.

Η μοντελοποίηση των πακτώσεων επιτυγχάνεται με την απαγόρευση μετακίνησης των κόμβων των στηρίξεων προς τις διευθύνσεις x, y και z , ενώ η απαγόρευση της πλευρικής μετακίνησης επιτυγχάνεται με την απαγόρευση μετακίνησης κατά τον άξονα y , στους κόμβους του ανοίγματος του χαλύβδινου ελάσματος. Ο φορέας με χρήση ενισχυτικού flat bar, οι συνοριακές συνθήκες και η φόρτιση παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Αριστερά-Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση και δεξιά-λεπτομέρεια.

2.6. Προκαταρκτικές δοκιμές

Εκτελέσθηκαν προκαταρκτικές δοκιμές, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ της αναλυτικής λύσης και αυτής που παράγεται από το πρόγραμμα ANSYS συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.2-2.4. Σημειώνονται οι τιμές της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (σ) και του μέγιστου βέλους κάμψης (W) στο μέσον του ανοίγματος του φορέα και ο αριθμός στοιχείων για κάθε δοκιμή.

Για την εύρεση της αναλυτικής λύσης για την αναπτυσσόμενη τάση και το βέλος κάμψης χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα οι εξισώσεις:

$$\sigma = \frac{My}{I_{yy}} z \quad (1)$$

Όπου,

σ : Η αναπτυσσόμενη τάση (MPa)

M_y : Η ροπή λόγω κάμψης (kN*m)

I_{yy} : Η ροπή αδράνειας της διατομής κατά τον ισχυρό άξονα y (cm⁴)

z : Η απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από τον ουδέτερο άξονα (mm)

$$W = \frac{ql^4}{384 E I_{yy}} \quad (2)$$

Όπου,

W : Το βέλος κάμψης στο μέσο ανοίγματος αμφίπακτης δοκού (mm)

q : Το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του φορέα (kN/m)

l : Το μήκος του φορέα

E : Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (GPa)

I_{yy} : Η ροπή αδράνειας της διατομής κατά τον ισχυρό άξονα y (cm⁴)

2.6.1 Δοκιμή 1^η : Αμφίπακτη δοκός τετραγωνικής διατομής με καταναεμημένο φορτίο - Γραμμική ανάλυση

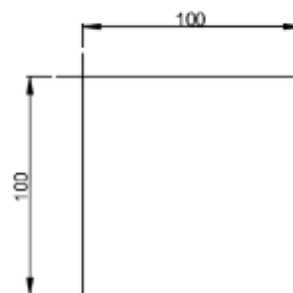
Χαρακτηριστικά φορέα

Μήκος φορέα: $l=2500$ mm

Διαστάσεις διατομής: 100 x 100 mm

Μέτρο Ελαστικότητας υλικού: $E=207$ GPa

Ροπή αδράνειας διατομής: $I_{yy}= 833,3$ cm⁴



Φόρτιση

Σχήμα 2.9: Διαστάσεις διατομής

Καταναεμημένο φορτίο αναλυτικής λύσης $q= 10$ kN/m

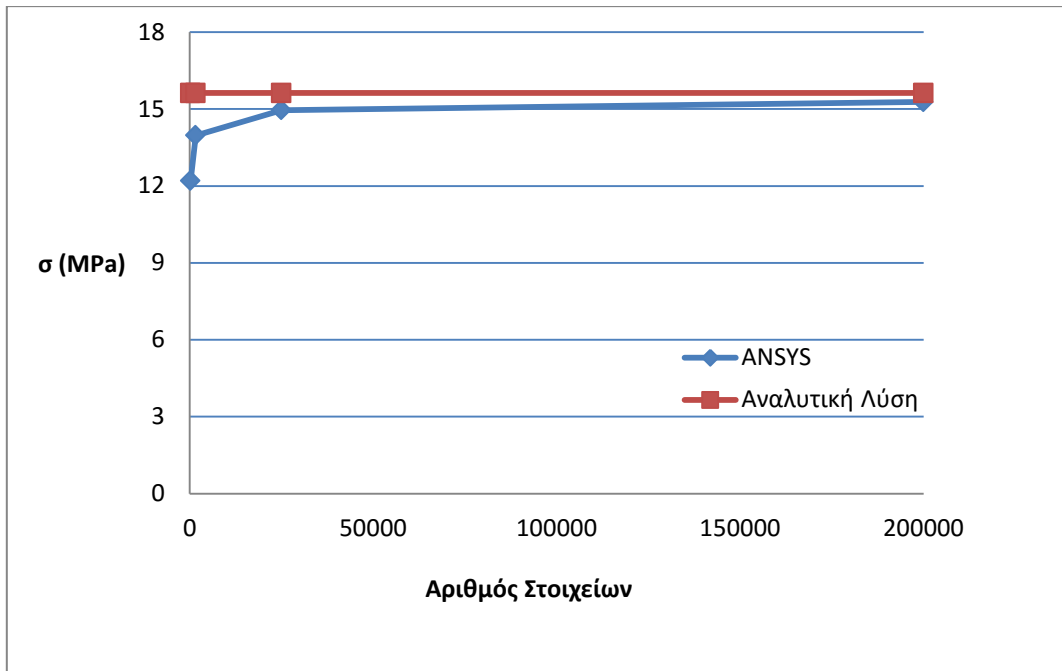
Πίεση στην άνω επιφάνεια για το πρόγραμμα ANSYS: $P=100$ kPa

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (σ) στο μέσο του ανοίγματος του φορέα και το αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης (W) στο ίδιο σημείο, συναρτήσσει του αριθμού στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε test. Σημειώνεται επίσης η αναλυτική λύση για τα δύο αυτά μεγέθη.

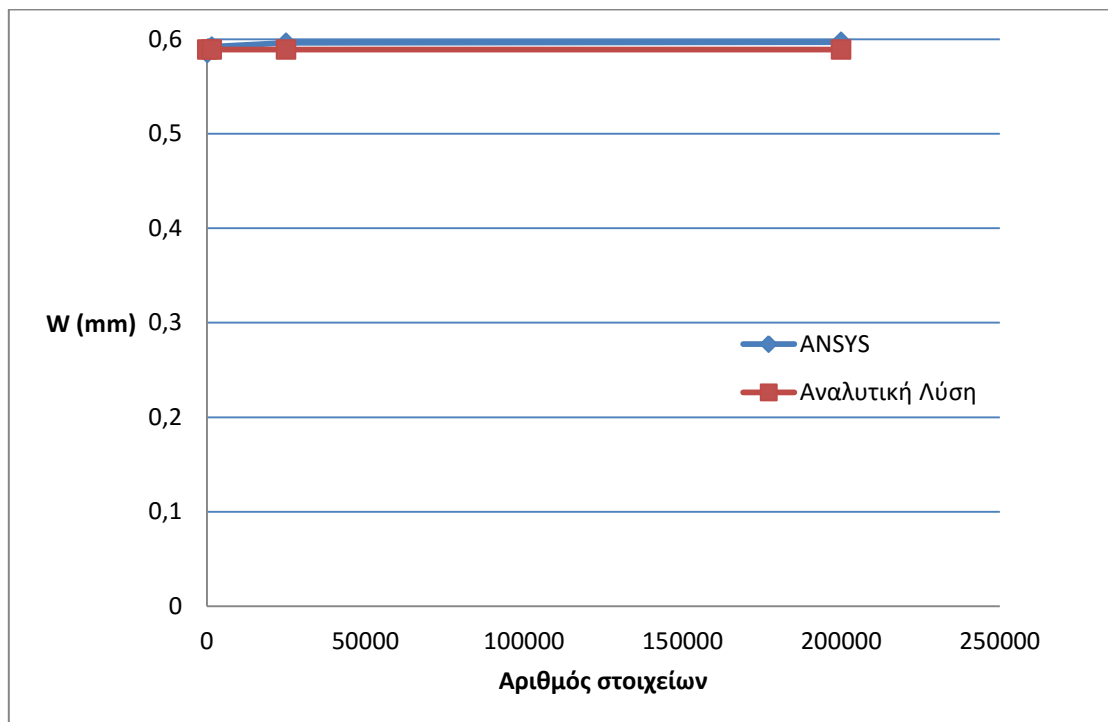
Πίνακας 2.2. Αποτελέσματα 1ης Δοκιμής

Test no.	Αριθμός στοιχείων	σ (MPa)	W (mm)
Test_1	200	12,2	0,585
Test_2	1.600	13,97	0,592
Test_3	25.000	14,953	0,596
Test_4	200.000	15,273	0,597
	Αναλυτική Λύση	15,625	0,589

Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 2.2 καταρτίζονται τα διαγράμματα των Σχημάτων 2.10 και 2.11



Σχήμα 2.10 : Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση (σ) στο μέσο ανοίγματος του φορέα σε σχέση με τον αριθμό στοιχείων.



Σχήμα 2.11: Αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης στο μέσο ανοίγματος του φορέα (W) συναρτήσει του αριθμού στοιχείων.

Η αύξηση του αριθμού των στοιχείων οδηγεί σε αύξηση τόσο της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης σ , όσο και του βέλους κάμψης W . Η αύξηση αυτή δεν είναι

αναλογική συγκριτικά με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων, αλλά βαίνει μειούμενη σε υψηλές τιμές αριθμού στοιχείων. Για την μέν τάση σ , η τιμή τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή της αναλογικής λύσης, με τη μικρότερη παρατηρούμενη απόκλιση να είναι της τάξης του 2,2%. Για το βέλος κάμψης W , η τιμή του ξεκινάει από χαμηλότερες τιμές από την αναλυτική λύση και την ξεπερνά με τη μέγιστη παρατηρούμενη απόκλιση να είναι της τάξης του 1,3%.

2.6.2 Δοκιμή 2: Αμφίπακτη διατομή τύπου IPE 100 με καταναμημένο φορτίο – - Γραμμική ανάλυση

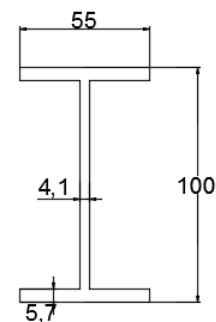
Χαρακτηριστικά φορέα

Μήκος φορέα: $l=2500$ mm

Διαστάσεις διατομής: βλ. Σχήμα 19

Μέτρο Ελαστικότητας υλικού: $E=207$ GPa

Ροπή αδράνειας διατομής: $I_{yy}= 163,3$ cm⁴



Σχήμα 2.12: Διαστάσεις διατομής

Φόρτιση

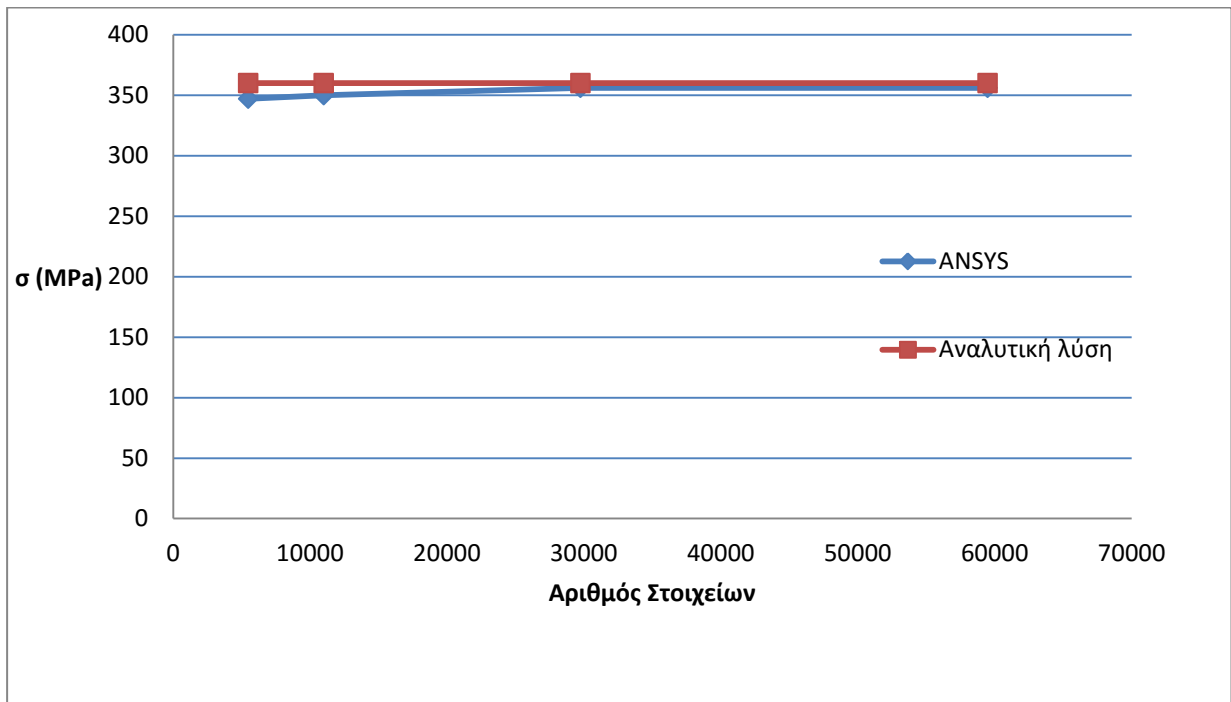
Καταναμημένο φορτίο αναλυτικής λύσης $q= 45$ kN/m

Πίεση στην άνω επιφάνεια για το πρόγραμμα ANSYS: $P= 820$ kPa

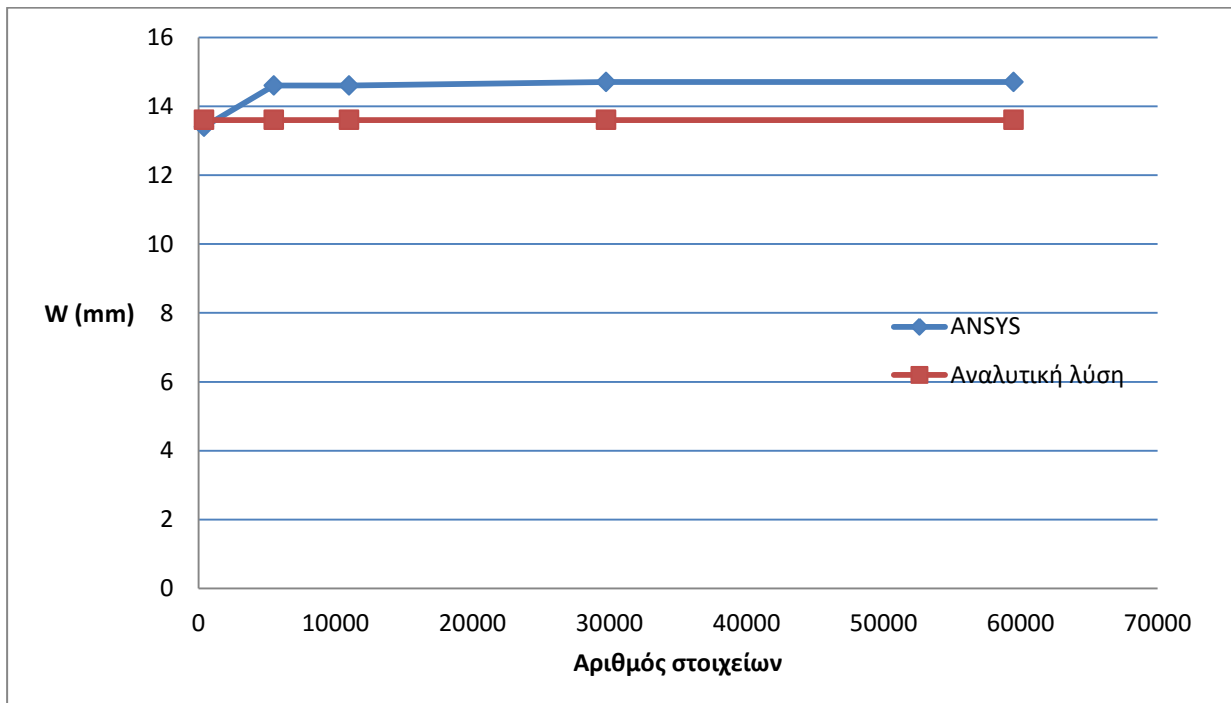
Τα αποτελέσματα της 2^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3. Αποτελέσματα 2ης Δοκιμής			
Test no.	Αριθμός στοιχείων	σ (MPa)	W (mm)
Test_1	400	324	13.4
Test_2	5500	347	14,6
Test_3	11000	350	14,6
Test_4	29750	356	14,7
Test_5	59500	356	14,7
	Αναλυτική λύση	360	13,57

Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 2.3 καταρτίζονται τα διαγράμματα των Σχημάτων 2.13 και 2.14.



Σχήμα 2.13: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση (σ) στο μέσο ανοίγματος του φορέα σε σχέση με τον αριθμό στοιχείων.



Σχήμα 2.14: Αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης στο μέσο ανοίγματος του φορέα (W) συναρτήσει του αριθμού στοιχείων.

Ομοίως με τα αποτελέσματα της 1^{ης} δοκιμής, η αύξηση του αριθμού των στοιχείων οδηγεί σε αύξηση τόσο της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης σ , όσο και του βέλους κάμψης W . Για την μέν τάση σ , η τιμή τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή της αναλογικής λύσης, με τη μικρότερη παρατηρούμενη απόκλιση να είναι της τάξης του 1,1%. Για το βέλος κάμψης W , η τιμή του ξεκινάει από χαμηλότερες τιμές από την αναλυτική λύση και την ξεπερνά με τη μέγιστη παρατηρούμενη απόκλιση να είναι της τάξης του 8,3%.

2.6.3 Δοκιμή 3: Πρόβολος τετραγωνικής διατομής με αξονική εφελκυστική δύναμη στο ελεύθερο άκρο - Μη γραμμική ανάλυση

Χαρακτηριστικά φορέα

Μήκος φορέα: $l=2000$ mm

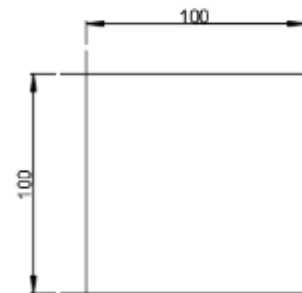
Διαστάσεις διατομής: 100 x 100 mm

Μέτρο Ελαστικότητας υλικού: $E=207$ GPa

Μέτρο ελαστικότητας μετά τη διαρροή: $E_{\text{tang}}=6$ GPa

Τάση διαρροής υλικού: $f_y=235$ MPa

Ροπή αδράνειας διατομής: $I_{yy}= 833,3$ cm⁴



Σχήμα 2.15: Διαστάσεις διατομής

Φόρτιση

Εφελκυστική τάση :

1^η περίπτωση: $\sigma=200$ MPa < f_y

2^η περίπτωση: $\sigma=250$ MPa > f_y

Τα αποτελέσματα της 3^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4

Πίνακας 2.4. Αποτελέσματα 3^{ης} δοκιμής

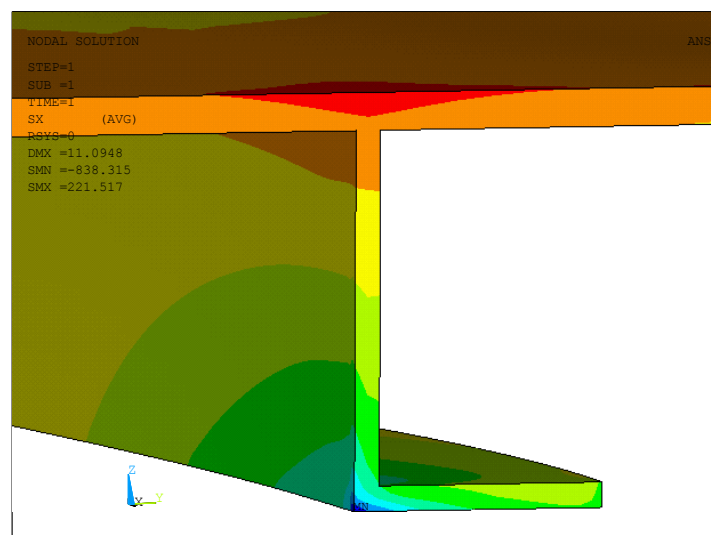
Αριθμός στοιχείων	Για τάση $\sigma=200$ MPa < f_y μήκυνση Δl (mm)	Για τάση $\sigma= 250$ MPa > f_y μήκυνση Δl (mm)
1280	1,99	7,26
Αναλυτική λύση	2	7,35

Παρατηρούμε ότι με χρήση μη γραμμικής ανάλυσης επιτυγχάνεται σύγκλιση αποτελεσμάτων της αριθμητικής με την αναλυτική λύση, τόσο για τάση $\sigma=200$ MPa < f_y , όσο και για τάση $\sigma=250$ MPa > f_y .

2.7. Διερεύνηση μεγέθους πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Όπως προκύπτει από τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου, ο αριθμός και το μέγεθος των στοιχείων που απαρτίζουν το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην προσέγγιση της αναλυτικής λύσης. Αύξηση του αριθμού των στοιχείων οδηγεί σε ακριβέστερα αποτελέσματα, καθιστά όμως ταυτόχρονα την ανάλυση περισσότερο χρονοβόρα. Στην εργασία αυτή εκτελέστηκε μεγάλος αριθμός αναλύσεων, τόσο γραμμικών όσο και μη γραμμικών. Για το λόγο αυτό διερευνάται το κατάλληλο μέγεθος του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (mesh) για κάθε έναν από τους τρεις φορείς που εξετάζουμε, όπως αυτοί έχουν παρουσιαστεί στο εδάφιο 2.2, ώστε να καταλήξουμε σε αριθμό στοιχείων τέτοιο ο οποίος να εξασφαλίζει ταυτόχρονα ακριβή αποτελέσματα και μικρό χρόνο ανάλυσης.

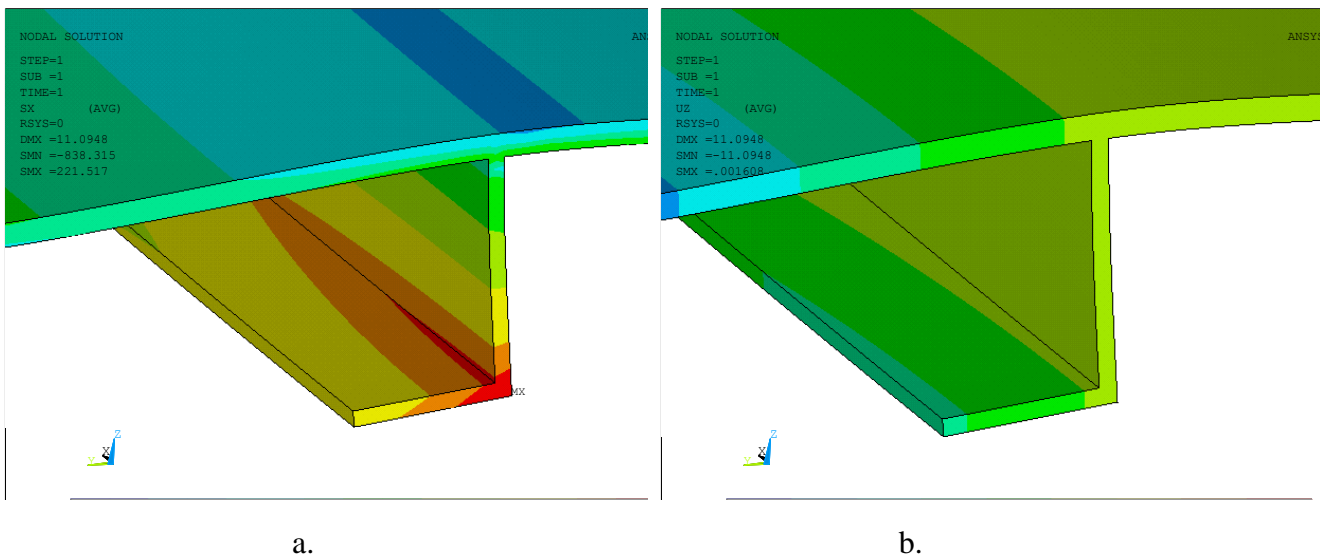
Σκοπός της εργασίας είναι να αντικατασταθεί το χαλύβδινο ενισχυτικό από υβριδικά ενισχυτικά στα οποία θα αναπτύσσεται ίδια τιμή μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (βλ. εδάφιο 3.4.). Για το λόγο αυτό, επικεντρωνόμαστε κατ'αρχήν στην καταπόνηση του χαλύβδινου ενισχυτικού του φορέα και όχι στο χαλύβδινο έλασμα. Αναζητούμε στη συνέχεια τη δυσμενέστερη διατομή του φορέα, από άποψη αναπτυσσόμενης αξονικής τάσης. Ο φορέας εξετάζεται ως αμφίπακτη δοκός όπως έχει ήδη περιγραφεί στο εδάφιο 2.5. και ως εκ τούτου δυσμενέστερες διατομές είναι οι στηρίξεις/πακτώσεις. Όμως το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS υπερεκτιμά σημειακά την αναπτυσσόμενη τάση στις πακτώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16, στο οποίο παρουσιάζεται η περιοχή της πάκτωσης για φορέα με χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L και σημειώνονται οι τιμές της αναπτυσσόμενης αξονικής τάσης. Είναι εμφανής μια σημειακή περιοχή στην οποία η αναπτυσσόμενη τάση υπολογίζεται ίση με $\sigma_x = -838.315$ MPa (εμφανίζεται με σκούρο μπλε χρώμα).



Σχήμα 2.16: Αναπτυσσόμενη αξονική τάση στην πάκτωση (MPa)

Για το λόγο αυτό, επιλέγουμε προς εξέταση το μέσον του ανοίγματος του φορέα και αναζητούμε τα σημεία εκείνα για κάθε τύπο ενισχυτικού, στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη

αξονική τάση λόγω κάμψης και το μέγιστο βέλος κάμψης. Τα σημεία αυτά ταυτίζονται για τα χαλύβδινα ενισχυτικά τύπου flat bar και τύπου T λόγω συμμετρίας των διατομών τους κατά το κατακόρυφο επίπεδο xz. Το σημείο αυτό σημειώνεται ως σημείο [1], με σ [1] την αναπτυσσόμενη τάση στο σημείο και W [1] το αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης στο ίδιο σημείο. Για το χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L, λόγω μη ύπαρξης συμμετρίας κατά το κατακόρυφο επίπεδο xz της διατομής, η μέγιστη τάση και το μέγιστο βέλος κάμψης εμφανίζονται σε διαφορετικά σημεία, όπως παρουσιάζεται στις εικόνες a και b του Σχήματος 2.17, στο οποίο απεικονίζεται η τομή στο μέσον του ανοίγματος του φορέα και σημειώνονται η αναπτυσσόμενη τάση λόγω κάμψης και το βέλος κάμψης.



Σχήμα 2.17: Τομή στο μέσον ανοίγματος του φορέα και a. Αναπτυσσόμενη τάση λόγω κάμψης (MPa) και b. Βέλος κάμψης (mm)

Ως σημείο [1] σημειώνεται το σημείο ανάπτυξης της μέγιστης αξονικής τάσης λόγω κάμψης στο μέσον ανοίγματος του φορέα ενώ ως σημείο [2] σημειώνεται το σημείο ανάπτυξης του μέγιστου βέλους κάμψης. Σημειώνονται για την περίπτωση αυτή ως σ_{\max} [1] και W [1] η μέγιστη τάση και το βέλος κάμψης στο σημείο [1] και ως σ [2] και W_{\max} [2] η αναπτυσσόμενη τάση και το μέγιστο βέλος κάμψης στο σημείο [2].

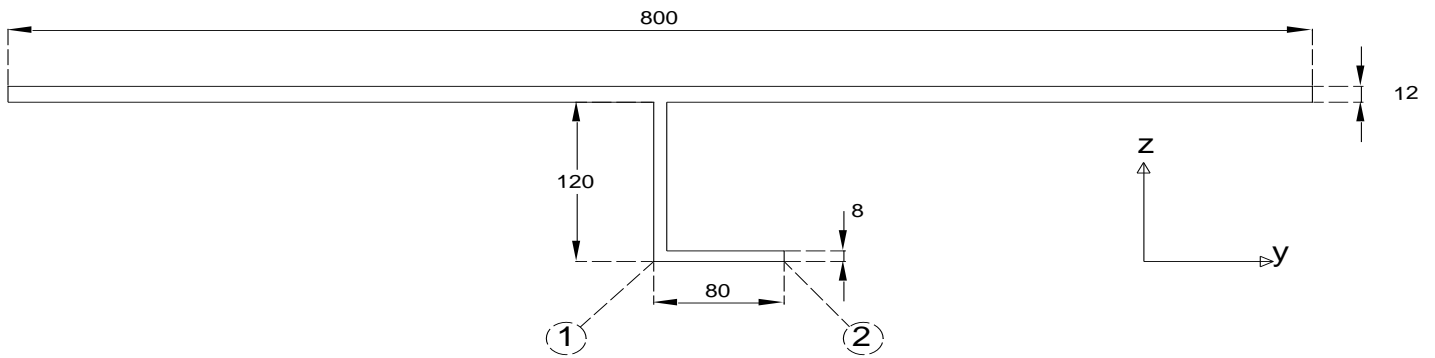
Το πλέγμα που τελικά θα επιλεγεί ώστε να προχωρήσουμε στα επόμενα στάδια της εργασίας, θα είναι εκείνο του οποίου τόσο η τιμή της σ_{\max} [1] όσο και του W_{\max} [2] αποκλίνει μόλις 3% από τις μέγιστες τιμές των μεγεθών αυτών που προκύπτουν από τη διερεύνηση και ταυτόχρονα διαθέτει όσο το δυνατόν μικρότερο αριθμό στοιχείων.

Η αρχική αυτή διερεύνηση του πλέγματος πραγματοποιείται με εκτέλεση γραμμικών αναλύσεων.

Ακολουθεί παρουσίαση των δοκιμών διερεύνησης του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

2.7.1 Δοκιμές για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L

Στο Σχήμα 2.18 παρουσιάζεται η διατομή του φορέα με ενισχυτικό τύπου L σε τομή στο μέσον του ανοίγματος και σημειώνονται τα σημεία [1] και [2] εμφάνισης της μέγιστης αξονικής τάσης λόγω κάμψης σ_{\max} και του μέγιστου βέλους κάμψης W_{\max} , αντίστοιχα.

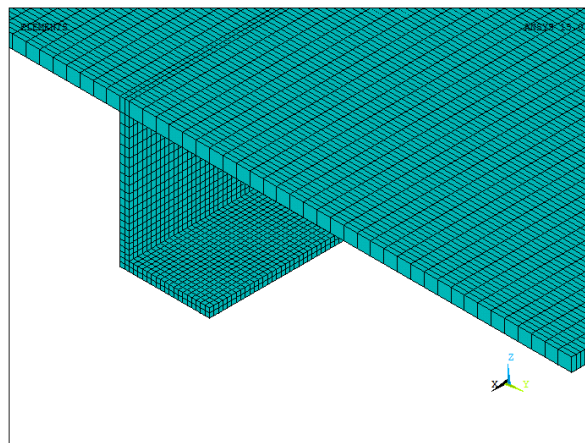


Σχήμα 2.18 : Διαστάσεις διατομής φορέα για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L, και σημεία εμφάνισης μέγιστης τάσης [1] και μέγιστου βέλους κάμψης [2]

Εκτελέστηκαν 9 tests με διαφορετικό μέγεθος και αριθμό στοιχείων σε κάθε περίπτωση. Στα Σχήματα 2.19-2.27 παρουσιάζονται, ο συνολικός αριθμός στοιχείων και οι διαστάσεις των στοιχείων κατά τους άξονες x,y και z, καθώς και μια λεπτομέρεια από την εικόνα του πλέγματος για κάθε test.

Αριθμός στοιχείων	45072	
κατά τον άξονα - x -	x: 4 mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 4 mm
κορμός	z: *διαβ/νο	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm

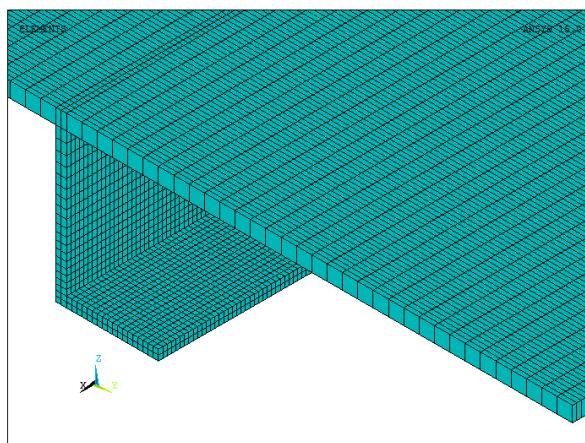
*διαβαθμιζόμενο: 18 elements καθ'ύψος και λόγος μικρότερου προς μεγαλύτερο 1/2



Σχήμα 2.19: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_1

Αριθμός στοιχείων	48444	
κατά τον άξονα - x -	x: 3,4 mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 4 mm
κορμός	z: *διαβ/νο	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm

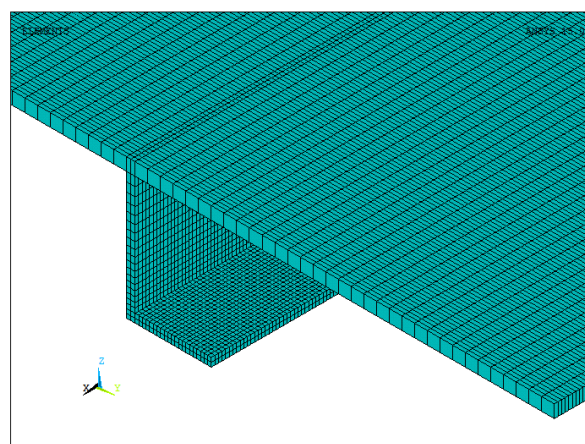
*διαβαθμιζόμενο: 18 elements καθ'ύψος και λόγος μικρότερου προς μεγαλύτερο 1/2



Σχήμα 2.20 : Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_2

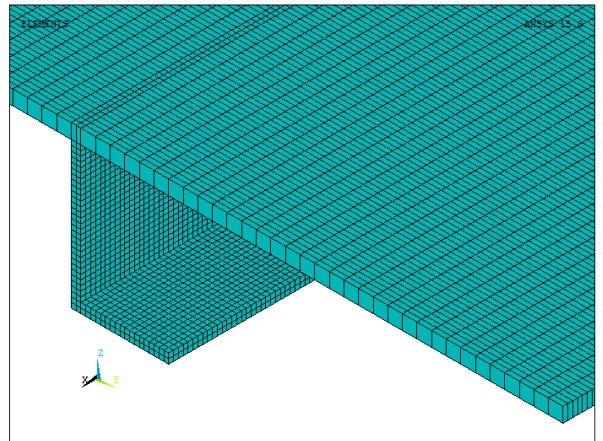
Αριθμός στοιχείων	50646	
κατά τον άξονα - x -	x:3,4 mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 3,5 mm
κορμός	z: *διαβ/νο	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm

*διαβαθμιζόμενο: 12 elements καθ'ύψος και λόγο μικρότερου προς μεγαλύτερο 1/2



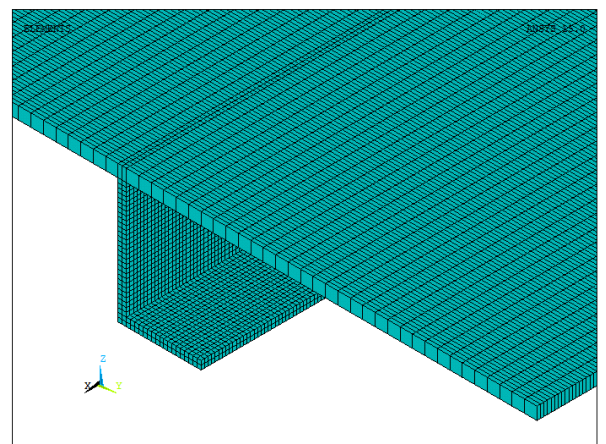
Σχήμα 2.21 : Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_3

Αριθμός στοιχείων	51133	
κατά τον άξονα - x -	x: 4mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 4mm
κορμός	z: 4 mm	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



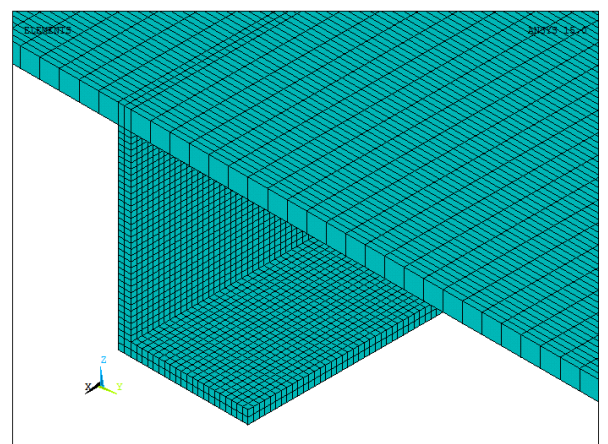
Σχήμα 2.22: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_4

Αριθμός στοιχείων	60188	
κατά τον άξονα - x -	x: 3,4mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 4mm
κορμός	z: 4 mm	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



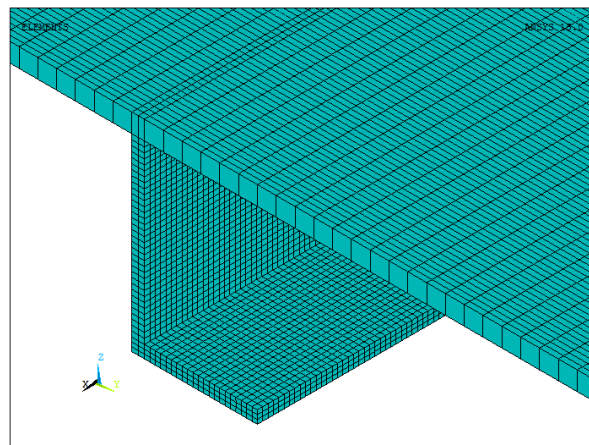
Σχήμα 2.23: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_5

Αριθμός στοιχείων	69730	
κατά τον άξονα - x -	x: 3,4mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 3,5mm
κορμός	z: 3,3 mm	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



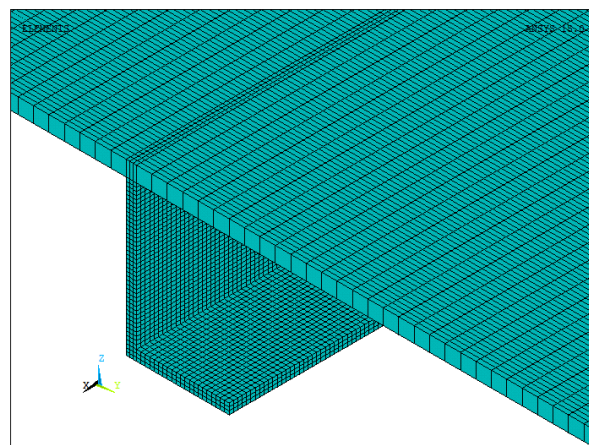
Σχήμα 2.24: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_6

Αριθμός στοιχείων	78170	
κατά τον άξονα - x -	x: 3,4mm	
πέλμα	z: 2,6 mm	y: 3,5mm
κορμός	z: 3,3 mm	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



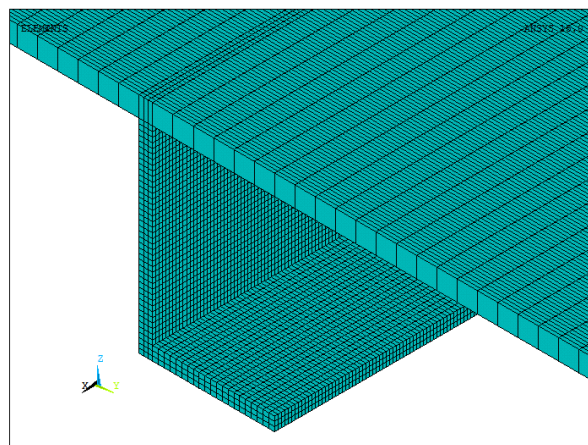
Σχήμα 2.25 : Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_7

Αριθμός στοιχείων	93585	
κατά τον άξονα - x -	x: 3,4mm	
πέλμα	z: 2,6 mm	y: 3,5mm
κορμός	z: 2,9 mm	y: 2,6 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



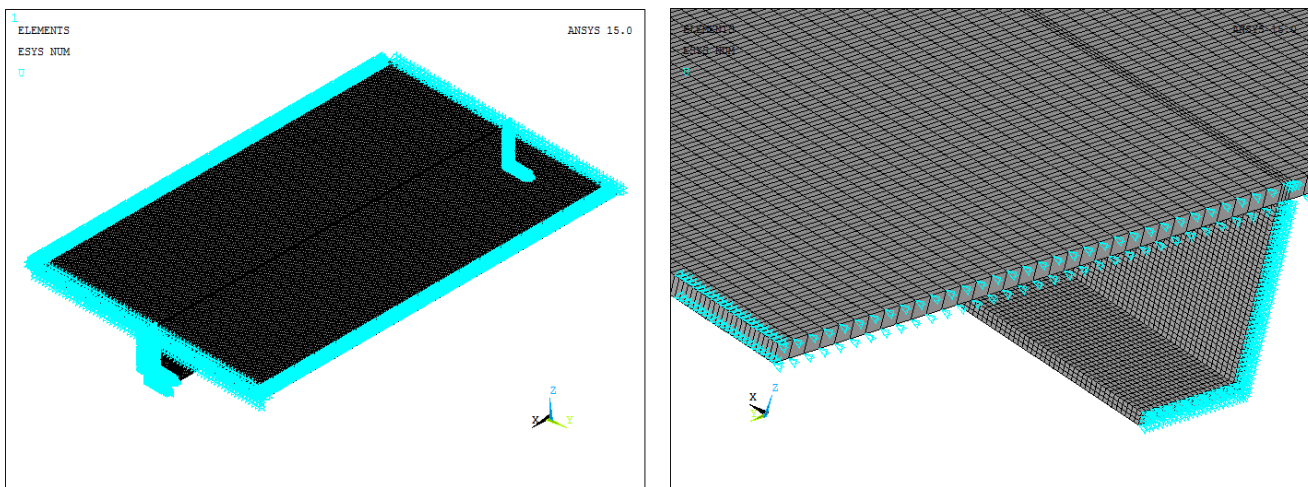
Σχήμα 2.26: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_8

Αριθμός στοιχείων	102500	
κατά τον άξονα - x -	x: 2 mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 4mm
κορμός	z: 4 mm	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



Σχήμα 2.27: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_9

Στον Πίνακα 2.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές (test no.) διερεύνησης πλέγματος για το ενισχυτικό τύπου L. Αρχικώς διερευνήθηκε η δυνατότητα εξέτασης του μισού φορέα, καθώς παρουσιάζει συμμετρία κατά το επίπεδο -yz-. Μοντελοποιήθηκε φορέας ίδιας διατομής με μήκος $L=1250$ mm, έναντι $L=2500$ mm του αρχικού. Διατηρήθηκαν οι ίδιες απαγορεύσεις μετακίνησης των κόμβων στην πλευρά της πάκτωσης και η απαγόρευση μετακίνησης κατά τον άξονα y, στους κόμβους του ανοίγματος του χαλύβδινου ελάσματος. Στους κόμβους της αντιδιαμετρικής πλευράς της πάκτωσης, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση προσομοιάζει το μέσο του ανοίγματος του φορέα, τέθηκε απαγόρευση μετακίνησης κατά το διαμήκη άξονα -x. Ο φορέας που προέκυψε, μαζί με μια λεπτομέρεια των συνοριακών συνθηκών οι οποίες τέθηκαν στο μέσο του ανοίγματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.28.



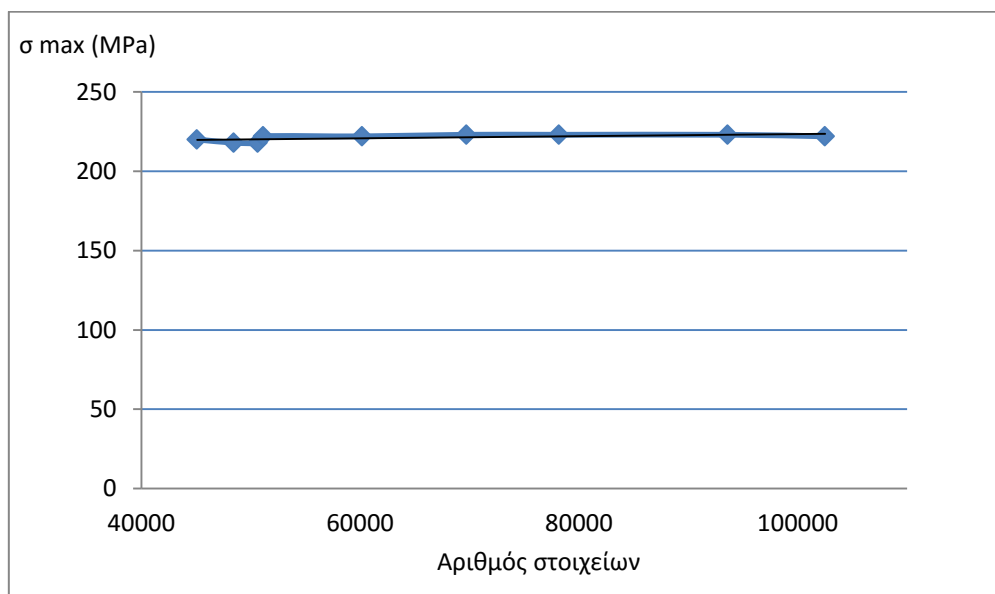
Σχήμα 2.28: Συμμετρικός φορέας ως προς το επίπεδο yz και λεπτομέρεια συνθηκών στήριξης στο μέσο του ανοίγματος

Συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του συμμετρικού φορέα με τον πλήρη φορέα. Ο πλήρης φορέας αναφέρεται στον Πίνακα 2.5 ως test no. 1_full και ο συμμετρικός ως test no. 1_symmetric. Τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών είναι σε πλήρη συμφωνία μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα ο συμμετρικός φορέας απαιτεί τον μισό αριθμό στοιχείων, καθιστώντας έτσι την ανάλυση οικονομικότερη. Ως εκ τούτου, όλες οι υπόλοιπες αναλύσεις εκτελέστηκαν με εξέταση του συμμετρικού φορέα και αναφέρονται ως “symmetric”.

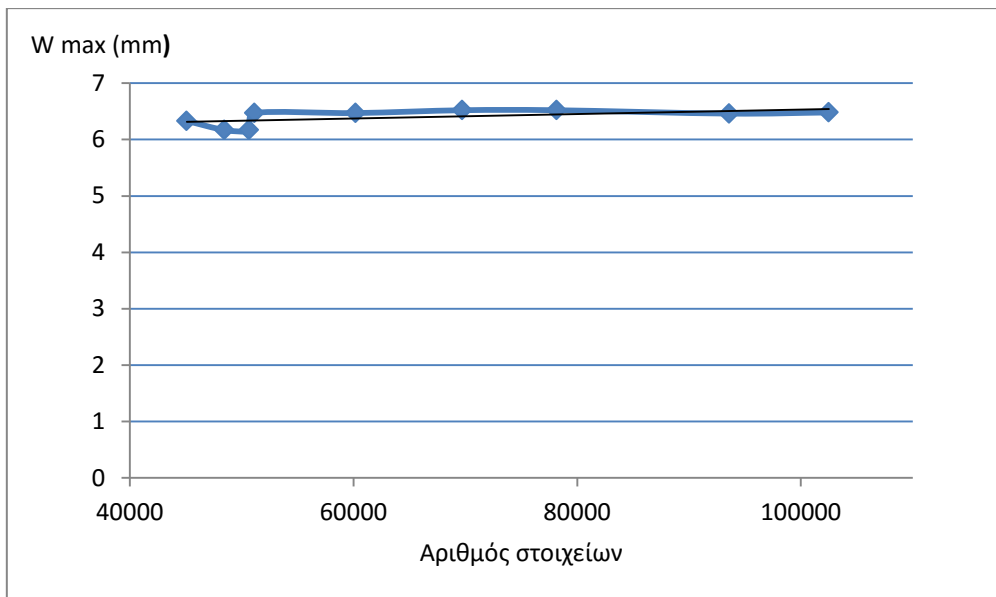
Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα δοκιμών κατά τη διερεύνηση πλέγματος του ενισχυτικού L

Αριθμός στοιχείων	test no.	W [1] (mm)	σ_{\max} [1] (MPa)	W_{\max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)
90144	1_full	4,57	220	6,33	147
45072	1_symmetric	4,57	220	6,33	147
48444	2_symmetric	4,55	218	6,17	150
50646	3_symmetric	4,55	218	6,17	150
51133	4_symmetric	4,59	222	6,47	144
60188	5_symmetric	4,59	222	6,47	144
69730	6_symmetric	4,6	223	6,52	143
78170	7_symmetric	4,6	223	6,52	144
93585	8_symmetric	4,59	223	6,46	145
102500	9_symmetric	4,59	222	6,48	144

Από τις τιμές του Πίνακα 2.5 καταρτίζονται τα διαγράμματα των Σχημάτων 2.29-2.30, στα οποία παρουσιάζεται η μεταβολή στην τιμή της σ_{\max} [1] και του W_{\max} [2] αντίστοιχα.



Σχήμα 2.29: Μεταβολή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης σ_{\max} στο σημείο [1] συναρτήσει του αριθμού στοιχείων του πλέγματος



Σχήμα 2.30: Μεταβολή του μέγιστου βέλους κάμψης στο σημείο [2] συναρτήσει του αριθμού στοιχείων του πλέγματος

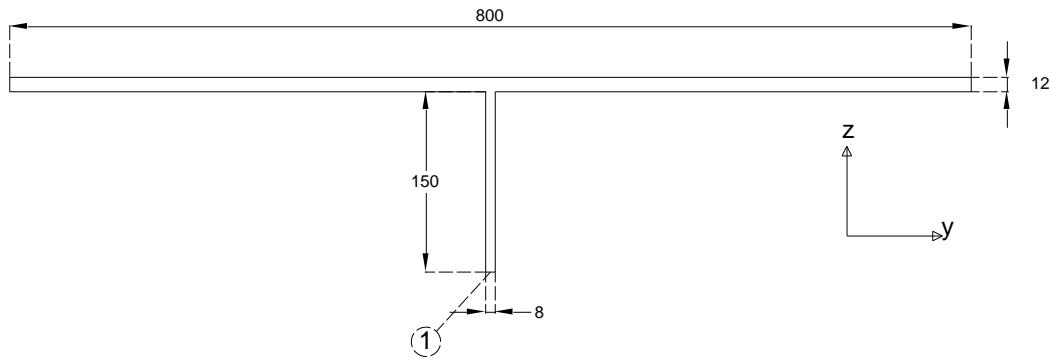
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.5 και από τα διαγράμματα των Σχημάτων 2.29 και 2.30, παρατηρούμε τα εξής:

1. Ο αριθμός των στοιχείων υπερδιπλασιάστηκε από 45072 σε 102500.
2. Υπάρχει μια αυξητική τάση τόσο της $\sigma_{\max}[1]$ όσο και του $W_{\max}[2]$ με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων.
3. Η μέγιστη τιμή της $\sigma_{\max}[1]$ είναι 223 MPa, χωρίς η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των στοιχείων να οδηγεί σε αύξηση της τιμής αυτής.
4. Η μέγιστη τιμή του $W_{\max}[2]$ είναι 6,57 mm, χωρίς η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των στοιχείων να οδηγεί σε αύξηση της τιμής αυτής.
5. Ο υπερδιπλασιασμός των στοιχείων οδήγησε σε αύξηση 2,2% της $\sigma_{\max}[1]$ και σε αύξηση 5,6% του $W_{\max}[2]$.

Το πλέγμα το οποίο επιλέγεται για το χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L ώστε να προχωρήσουμε στα επόμενα στάδια της εργασίας είναι το test no. “1_symmetric” και θα αναφέρεται στα επόμενα στάδια της εργασίας με τον κωδικό “L_steel”. Το πλέγμα αυτό παρουσιάζει τιμή $\sigma_{\max}[1]= 220$ MPa – απόκλιση ίση με 1,3% σε σχέση με την μέγιστη αναπτυσσόμενη τιμή της $\sigma_{\max}[1]$ - και τιμή $W_{\max}[2]= 6,33$ mm - απόκλιση ίση με 1,3% σε σχέση με την μέγιστη αναπτυσσόμενη τιμή του $W_{\max}[2]$ - ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει και το μικρότερο αριθμό στοιχείων.

2.7.2 Δοκιμές για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar

Στο Σχήμα 2.31 παρουσιάζεται, η τομή του φορέα με χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου “flat bar” σε τομή στο μέσον του ανοίγματος και σημειώνεται το σημείο [1] στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη αξονική τάση λόγω κάμψης $\sigma_{\max}[1]$ και το μέγιστο βέλος κάμψης $W_{\max}[1]$.

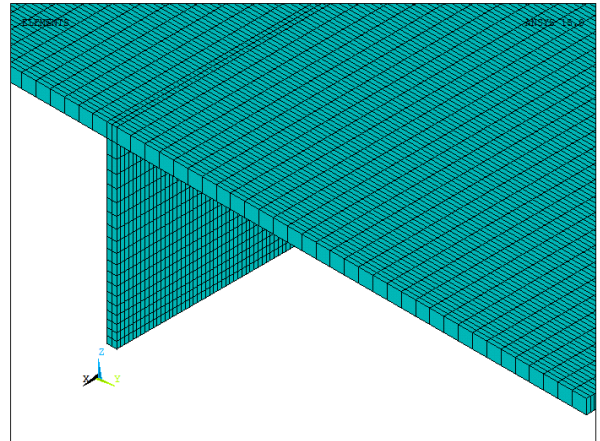


Σχήμα 2.31 : Διαστάσεις διατομής φορέα για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar, και σημείο [1] εμφάνισης μέγιστης τάσης και μέγιστου βέλους κάμψης.

Εκτελέστηκαν 3 test με διαφορετικό μέγεθος και αριθμό στοιχείων σε κάθε περίπτωση. Στα Σχήματα 2.32- 2.34 παρουσιάζονται ο συνολικός αριθμός στοιχείων και οι διαστάσεις των στοιχείων κατά τους άξονες x,y και z, καθώς και μια λεπτομέρεια από την εικόνα του πλέγματος για κάθε test.

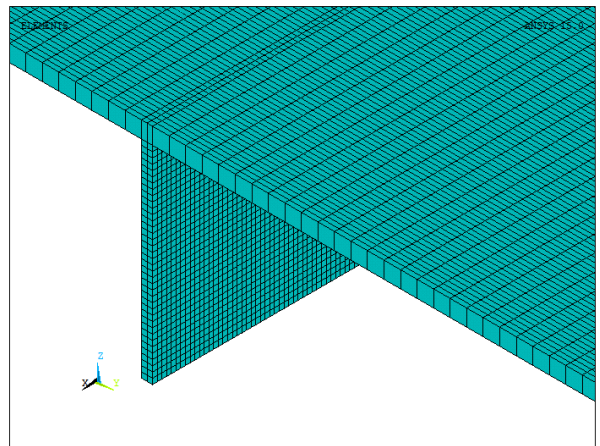
Αριθμός στοιχείων	38168		
κατά τον άξονα - x -	x: 4 mm		
κορμός	z: * διαβ/vo	y: 4 mm	
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm	

*διαβαθμιζόμενο με 18 elements καθ ύψος και λόγο Μικρότερου προς μεγαλύτερο 1/2



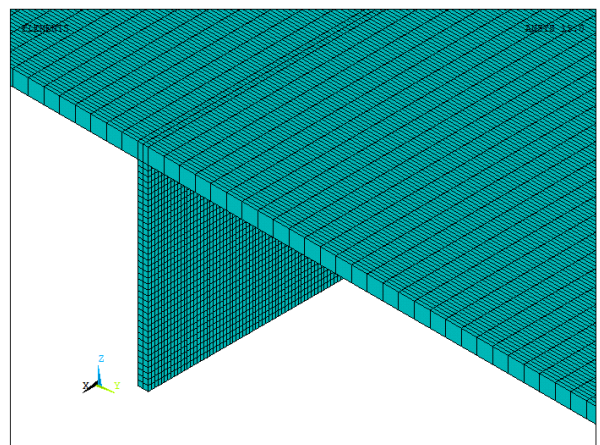
Σχήμα 2.32: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_1

Αριθμός στοιχείων	52848		
κατά τον άξονα - x -	x: 4 mm		
κορμός	z: 4 mm	y: 4 mm	
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm	



Σχήμα 2.33: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_2

Αριθμός στοιχείων	187000		
κατά τον άξονα - x -	x: 2,5 mm		
κορμός	z: 4 mm	y: 4 mm	
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm	



Σχήμα 2.34: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_3

Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές (test no.) διερεύνησης πλέγματος για το ενισχυτικό τύπου flat bar. Και στις τρεις δοκιμές που εκτελέστηκαν εξετάστηκε ο συμμετρικός φορέας.

Πίνακας 2.6: Αποτελέσματα δοκιμών κατά τη διερεύνηση πλέγματος ενισχυτικού flat bar

Αριθμός στοιχείων	test no.	W_{\max} [1] (mm)	σ_{\max} [1] (MPa)
38168	1_symmetric	5,07	333
52848	2_symmetric	5,07	334
187000	3_symmetric	5,08	335

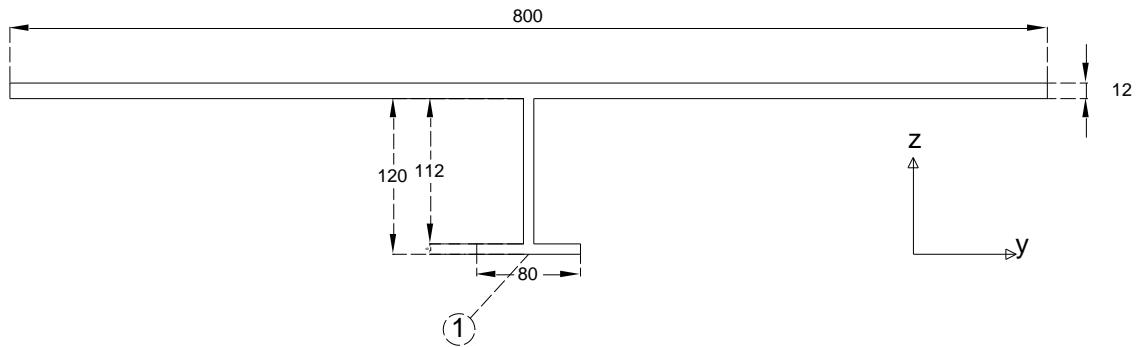
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.6 παρατηρούμε τα εξής:

1. Ο αριθμός των στοιχείων πενταπλασιάστηκε από 38168 σε 187000.
2. Τόσο το βέλος κάμψης όσο και η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εμφανίζονται σταθερά. Η διαφορά της μέγιστης – ελάχιστης τιμής και για τα δύο αυτά μεγέθη είναι αμελητέα
3. Δεν διερευνήθηκαν πλέγματα με μικρότερο αριθμό στοιχείων για λόγους μοντελοποίησης της εποξικής ρητίνης σύνδεσης, η οποία θα απαιτηθεί σε επόμενο στάδιο της εργασίας. Το πάχος της εποξικής ρητίνης σύνδεσης του σύνθετου με τον χάλυβα τίθεται ίσο με 0,2 mm. Η μοντελοποίησή της γίνεται με χρήση του στοιχείου Solid185. Κάτι τέτοιο οδηγεί αναπόφευκτα στο σχηματισμό μακρόστενων στοιχείων. Το πρόγραμμα ANSYS δεν επιτρέπει την μοντελοποίηση στοιχείων με λόγο μεγαλύτερης προς μικρότερης πλευράς μεγαλύτερο του 20. Ενδεχόμενη μείωση λοιπόν του αριθμού των στοιχείων του πλέγματος, οδηγεί σε αύξηση των διαστάσεών τους, ενώ ταυτόχρονα το πάχος της ρητίνης σύνδεσης παραμένει σταθερό. Κατ'αυτόν τον τρόπο η μέγιστη επιτρεπτή διάσταση που τίθεται για τα στοιχεία είναι $20 \times 0,2\text{mm} = 4\text{mm}$

Το πλέγμα το οποίο επιλέγεται για το χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar, είναι το 1_symmetric, το οποίο παρουσιάζει το μικρότερο αριθμό στοιχείων και απόκλιση στην τιμή της σ_{\max} [1] ίση με 0,6% και απόκλιση στην τιμή του W_{\max} [1], ίση με 0,2%. Το πλέγμα αυτό θα αναφέρεται με κωδικό “flat_bar” στα επόμενα στάδια της εργασίας.

2.7.3 Δοκιμές για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T

Στο Σχήμα 2.35 παρουσιάζεται η διατομή του φορέα με ενισχυτικό τύπου T σε τομή στο μέσον του ανοίγματος και σημειώνεται το σημείο [1] στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη αξονική τάση λόγω κάμψης $\sigma_{\max}[1]$ και το μέγιστο βέλος κάμψης $W_{\max}[1]$.

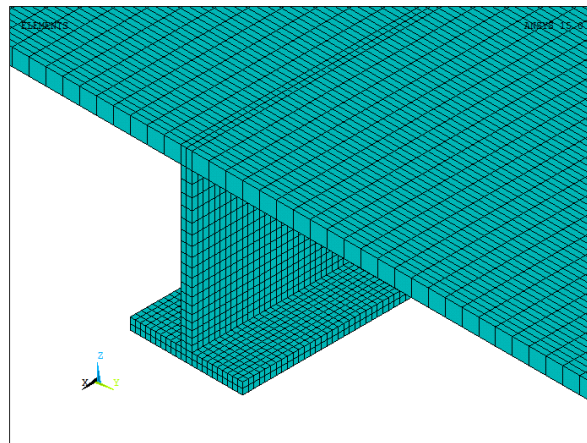


Σχήμα 2.35: Διαστάσεις διατομής φορέα για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T, και σημείο [1] εμφάνισης μέγιστης τάσης και μέγιστου βέλους κάμψης.

Εκτελέστηκαν 5 tests με διαφορετικό μέγεθος και αριθμό στοιχείων σε κάθε περίπτωση. Στα Σχήματα 2.36-2.40 παρουσιάζονται, ο συνολικός αριθμός στοιχείων και οι διαστάσεις των στοιχείων κατά τους άξονες x,y και z, καθώς και μια λεπτομέρεια από την εικόνα του πλέγματος για κάθε test.

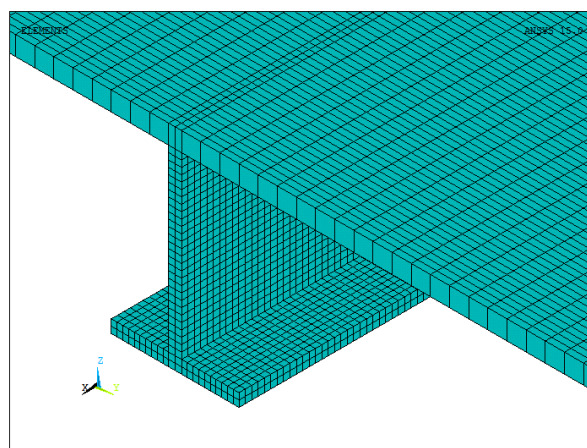
Αριθμός στοιχείων	52848	
κατά τον άξονα - x -	x: 4 mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 4 mm
κορμός	z: *διαβ/νο	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm

*διαβαθμιζόμενο με 18 elements καθ' ύψος και λόγος μικρότερου προς μεγαλύτερο 1/2



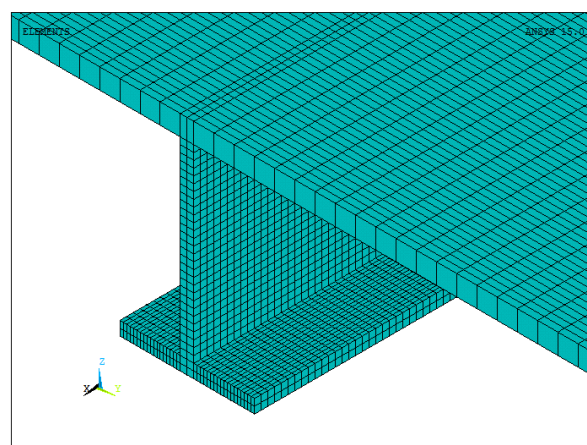
Σχήμα 2.36: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_1

Αριθμός στοιχείων	60188	
κατά τον άξονα - x -	x: 4 mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 4 mm
κορμός	z: 4	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



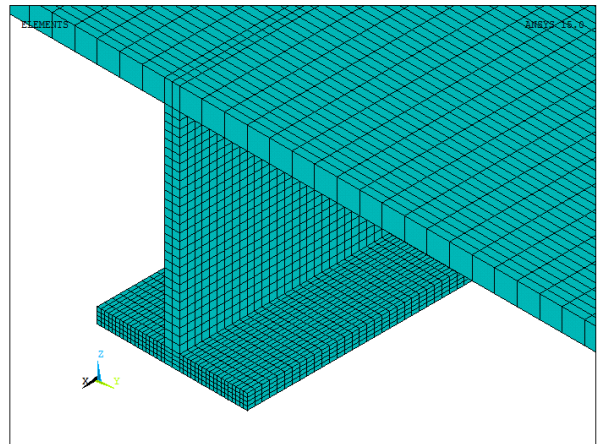
Σχήμα 2.37: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_2

Αριθμός στοιχείων	73400	
κατά τον άξονα - x -	x:4 mm	
πέλμα	z: 4 mm	y: 2mm
κορμός	z: 4 mm	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



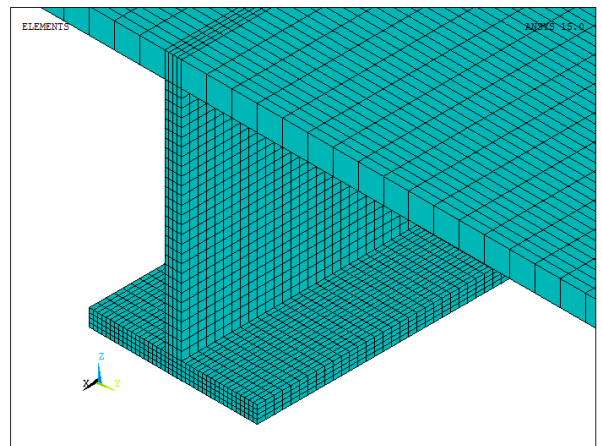
Σχήμα 2.38 : Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_3

Αριθμός στοιχείων	101292	
κατά τον άξονα - x -	x: 4mm	
πέλμα	z: 2 mm	y: 2mm
κορμός	z: 4 mm	y: 4 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



Σχήμα 2.39: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_4

Αριθμός στοιχείων	166618	
κατά τον άξονα - x -	x: 4mm	
πέλμα	z: 2 mm	y: 2mm
κορμός	z: 2 mm	y: 2 mm
έλασμα	z: 12 mm	y: 12 mm



Σχήμα 2.40: Διαστάσεις και εικόνα στοιχείων του test_5

Στον Πίνακα 2.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές (test no.) διερεύνησης πλέγματος για το ενισχυτικό τύπου T. Και στις πέντε δοκιμές που εκτελέστηκαν εξετάστηκε ο συμμετρικός φορέας.

Πίνακας 2.7: Αποτελέσματα δοκιμών κατά τη διερεύνηση πλέγματος ενισχυτικού T

Αριθμός στοιχείων	test no.	W [1] (mm)	σ [1] (MPa)
52848	1_symmetric	4,15	193
60188	2_symmetric	4,15	193
73400	3_symmetric	4,15	193
101292	4_symmetric	4,15	194
166618	5_symmetric	4,15	194

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.7 παρατηρούμε τα εξής:

1.Ο αριθμός των στοιχείων τριπλασιάστηκε από 52848 σε 166618.

2.Τόσο το βέλος κάμψης όσο και η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εμφανίζονται σταθερά. Η διαφορά της μέγιστης – ελάχιστης τιμής και για τα δύο αυτά μεγέθη είναι αμελητέα

3.Δεν διερευνήθηκαν πλέγματα με μικρότερο αριθμό στοιχείων, για λόγους μοντελοποίησης της εποξικής ρητίνης σύνδεσης, όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Το πλέγμα το οποίο επιλέγεται για το χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T, είναι το 1_symmetric, το οποίο παρουσιάζει το μικρότερο αριθμό στοιχείων και απόκλιση στην τιμή της $\sigma_{\max}[1]$ ίση με 0,5% και απόκλιση στην τιμή του $W_{\max}[1]$, ίση με 0%. Το πλέγμα αυτό θα αναφέρεται με κωδικό “T_steel” στα επόμενα στάδια της εργασίας.

2.8. Διερεύνηση είδους ανάλυσης: Γραμμική-Μη Γραμμική ανάλυση

Συγκρίνονται τα αποτελέσματα μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης για κάθε τύπο ενισχυτικού, χρησιμοποιώντας τα πλέγματα “L_steel”, “flat_bar” και “T_steel” αντίστοιχα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 2.7.

Για την εκτέλεση μιας μη γραμμικής ανάλυσης στο πρόγραμμα ANSYS απαιτούνται οι εξής παράμετροι:

1.Καθορισμός ορίου διαρροής f_y (MPa) και μέτρου ελαστικότητας E_{tang} ανελαστικής περιοχής του υλικού. Για το υλικό χάλυβας τίθεται ως $f_y=235$ MPa. Για την τιμή του E_{tang} χρησιμοποιείται η σχέση (3):

$$E_{\text{tang}}=0,03 \times E \text{ (GPa)} \quad (3)$$

Όπου $E=207$ GPa, το μέτρο Ελαστικότητας για την ελαστική περιοχή του χάλυβα.

Προκύπτει από τη σχέση (3) : $E_{\text{tang}}=6$ GPa.

2.Καθορισμός δυνατότητας μεγάλων παραμορφώσεων (large deflections). Επιλέγεται η δυνατότητα μεγάλων παραμορφώσεων καθώς δεν γνωρίζουμε εκ των προτέρων αν θα προκύψουν μικρές ή μεγάλες παραμορφώσεις.

3.Καθορισμός time steps. Το πρόγραμμα ANSYS συνδέει την επιβολή του 100% της φόρτισης με την “χρονική στιγμή” T=1. Ο “χρόνος” αυτός υποδιαιρείται σε κλάσματα (“time steps”) και το φορτίο επιβάλλεται σταδιακά και αναλογικά με την τιμή του time step που έχει καθοριστεί. Απαιτείται ο καθορισμός ενός αρχικού (initial) ενός ελάχιστου (min) και ενός μέγιστου (max) time step. Όσο αυξάνονται οι υποδιαιρέσεις του χρόνου, δηλαδή όσο μειώνεται η τιμή του time step, τόσο πιο ακριβής είναι η ανάλυση στα αποτελέσματα που παράγει, αλλά και πιο χρονοβόρα.

Στον Πίνακα 2.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τεσσάρων συνδυασμών time steps και συγκρίνονται με το αποτέλεσμα της γραμμικής ανάλυσης για το ενισχυτικό L_steel.

Πίνακας 2.8 :Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων για το L_steel

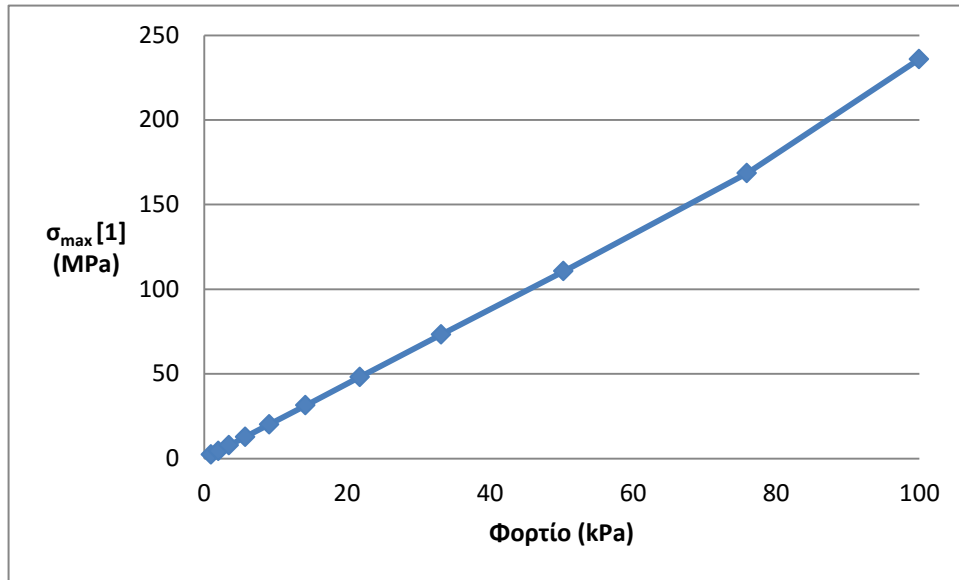
χρόνος ανάλυσης	time steps ($t_{initial}/t_{min}/t_{max}$)	W [1] (mm)	σ_{max} [1] (Mpa)	W_{max} [2] (mm)	σ [2] (Mpa)
1h 15 min	0.01/0.001/0.1	5,57	236	7,14	201
45min	0.01/0.001/0.2	5,57	236	7,14	201
<30 min	0.01/0.001/0.3	5,57	236	7,14	201
<30 min	0.1/0.001/0.1	5,56	236	7,14	201
2min	γραμμική ανάλυση	4,57	220	6,33	147

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα παρατηρούμε τα εξής:

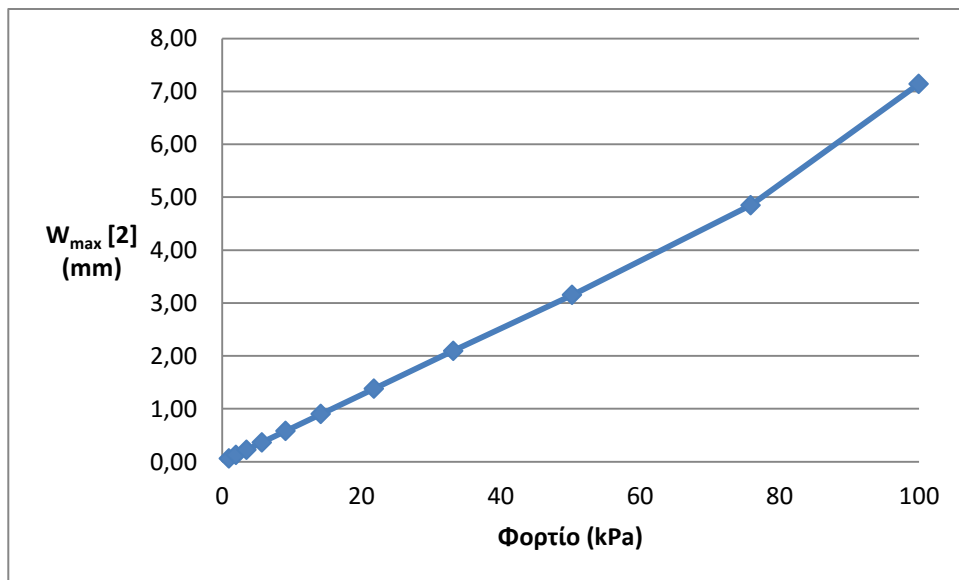
1. Για τις μη γραμμικές αναλύσεις, οι τιμές των μεγεθών W[1], σ_{max} [1], W_{max} [2] και σ [2], παραμένουν αμετάβλητες για τη συγκεκριμένη φόρτιση του φορέα ανεξαρτήτως time steps. Ταυτόχρονα, ο χρόνος ανάλυσης μειώνεται από 1h 15min σε <30 min.

2. Τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης παρουσιάζουν σημαντική αύξηση συγκριτικά με αυτά της γραμμικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, η τιμή της σ_{max} [1] αυξάνεται κατά 7,2%, η τιμή του W [1] αυξάνεται κατά 21,6%, η τιμή της σ [2] αυξάνεται κατά 36,7% και η τιμή του W_{max} [2] αυξάνεται κατά 12,7%.

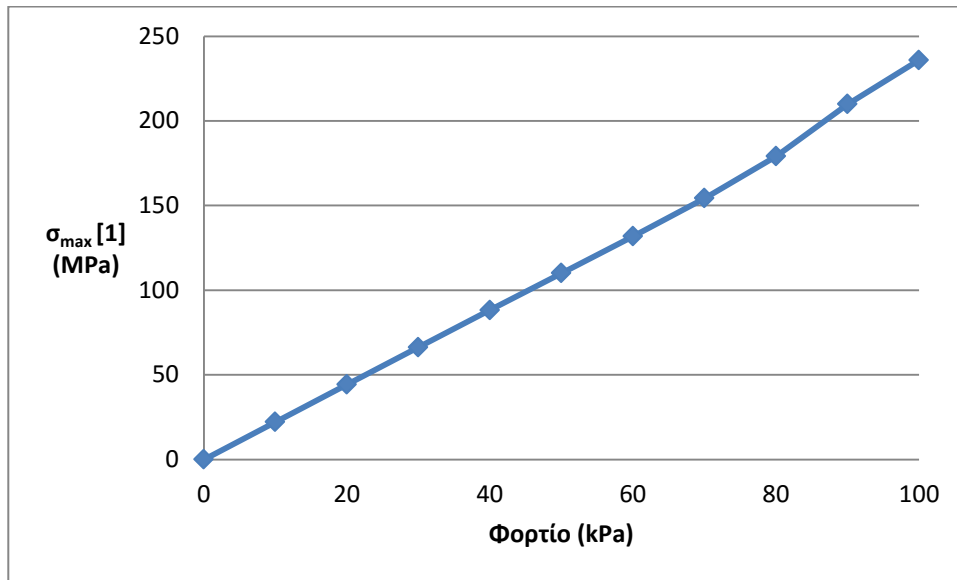
Σύμφωνα με τα παραπάνω, προσανατολιζόμαστε ανάμεσα στην επιλογή των τιμών time steps: 0.01/0.001/0.3 ή 0.1/0.001/0.1, οι οποίες απαιτούν τον μικρότερο χρόνο ανάλυσης. Για την τελική επιλογή, χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα του time history των δύο αναλύσεων, τα οποία απεικονίζουν την εξέλιξη της μεταβολής εκάστοτε μεγέθους συναρτήσεως του φορτίου και τα οποία μας παρέχονται από το πρόγραμμα ANSYS. Στα διαγράμματα των Σχημάτων 2.41- 2.44 παρουσιάζεται η μεταβολή των μεγεθών σ_{max} [1] και W_{max} [2] για τις μη γραμμικές αναλύσεις με time steps 0.01/0.001/0.3 και 0.1/0.001/0.1 αντίστοιχα.



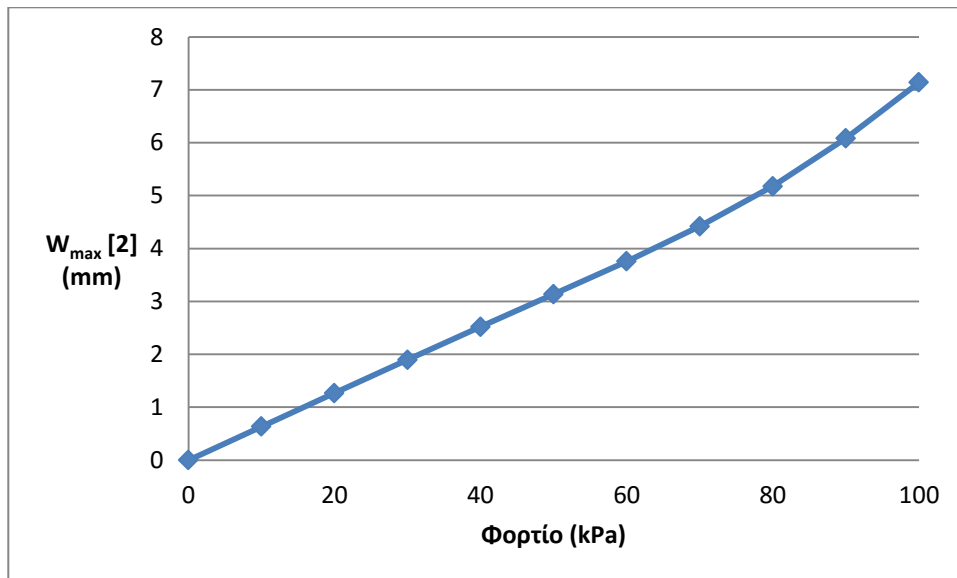
Σχήμα 2.41: Διάγραμμα εξέλιξης της σ_{\max} [1] για επιλογή time steps 0.01/0.001/0.3



Σχήμα 2.42 : Διάγραμμα εξέλιξης του W_{\max} [2] για επιλογή time steps 0.01/0.001/0.3



Σχήμα 2.43: Διάγραμμα εξέλιξης της $\sigma_{\max}[1]$ για επιλογή time steps 0.1/0.001/0.1



Σχήμα 2.44: Διάγραμμα εξέλιξης του $W_{\max} [2]$ για επιλογή time steps 0.1/0.001/0.1

Από τα διαγράμματα των παραπάνω σχημάτων παρατηρούμε ότι η επιλογή time steps 0.1/0.001/0.1 οδηγεί σε διαίρεση του συνολικού φορτίου σε 10 ίσα κλάσματα τα οποία επιβάλλονται σταδιακά στο φορέα, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο ικανοποιητική εποπτία στην εξέλιξη της αναπτυσσόμενης τάσης και του βέλους κάμψης σε όλα τα στάδια επιβολής φορτίου. Αντίθετα, η επιλογή time steps 0.01/0.001/0.3, οδηγεί σε διαίρεση του συνολικού φορτίου σε άνισα κλάσματα, των οποίων η τιμή κυμαίνεται από 0.01 έως και 0.3 του συνολικού, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο μη ικανοποιητική εποπτία στην εξέλιξη της αναπτυσσόμενης τάσης και του βέλους κάμψης. Για το λόγο αυτό προκρίνεται η επιλογή time steps 0.1/0.001/0.1 για την εκτέλεση των μη γραμμικών αναλύσεων.

Εκτελούνται μη γραμμικές αναλύσεις και για τα πλέγματα “flat_bar” και “T_steel” θέτοντας ως τιμή time steps 0.1/0.001/0.1. Στον Πίνακα 2.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο των μη γραμμικών αναλύσεων όσο και των γραμμικών αναλύσεων και για τα τρία πλέγματα L_steel, flat_bar και T_steel.

Πίνακας 2.9 : Αποτελέσματα γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων

Κωδικός	Τύπος ανάλυσης	W_{max} (mm)	σ_{max} (MPa)
L_steel	γραμμική	6,33	220
L_steel	μη γραμμική	7,14	236
Flat_bar	γραμμική	5,07	333
Flat_bar	μη γραμμική	12,8	265
T_steel	γραμμική	4,15	193
T_steel	μη γραμμική	5,24	230

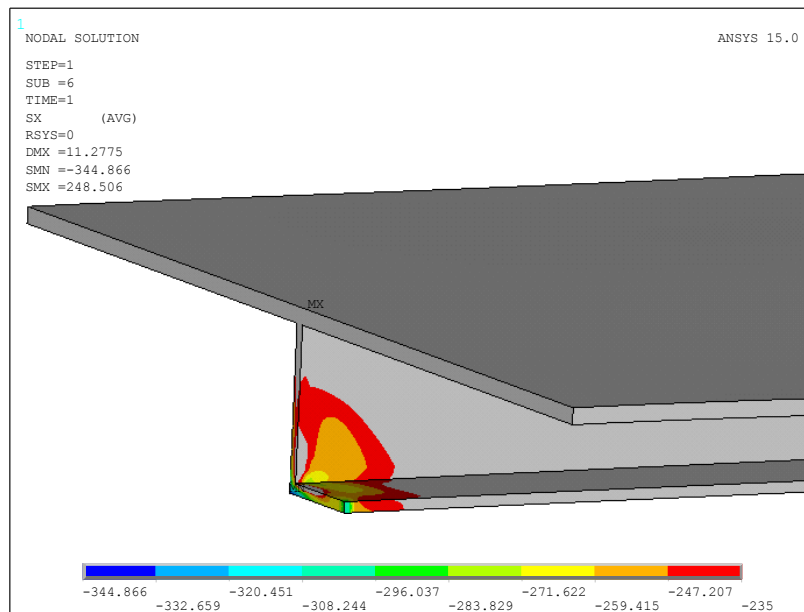
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.9 παρατηρούμε τα εξής:

1. Για τον φορέα L_steel η μη γραμμική ανάλυση οδήγησε σε αύξηση της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης σ_{max} κατά 7,2% και σε αύξηση της τιμής του μέγιστου βέλους κάμψης W_{max} κατά 12,7% σε σχέση με την γραμμική ανάλυση.

2. Για τον φορέα flat_bar η μη γραμμική ανάλυση οδήγησε σε μείωση της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης σ_{max} κατά 25,6% και σε αύξηση της τιμής του μέγιστου βέλους κάμψης W_{max} κατά 124% σε σχέση με την γραμμική ανάλυση.

3. Για τον φορέα T_steel η μη γραμμική ανάλυση οδήγησε σε αύξηση της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης σ_{max} κατά 19,2% και σε αύξηση της τιμής του μέγιστου βέλους κάμψης W_{max} κατά 26,3% σε σχέση με την γραμμική ανάλυση.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων διαφέρουν σημαντικά από αυτά των γραμμικών αναλύσεων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι υπό τη συγκεκριμένη τιμή φορτίου, η περιοχή των στηρίξεων εισέρχεται στην πλαστική περιοχή και κατά συνέπεια ο φορέας μετατρέπεται από αμφίπακτη σε αμφίερστη δοκό με αποτέλεσμα μεγαλύτερη αναπτυσσόμενη τάση και βέλος κάμψης στο μέσον του φορέα. Η μη γραμμική ανάλυση λαμβάνει υπ’όψιν τη μη γραμμικότητα του υλικού, σε αντίθεση με τη γραμμική ανάλυση, οδηγώντας σε ακριβέστερα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, στα επόμενα στάδια της εργασίας και όπου αυτό απαιτείται, θα εκτελούνται μη γραμμικές αναλύσεις. Στο Σχήμα 2.45 παρουσιάζεται το παραμορφωμένο σχήμα του φορέα λόγω της φόρτισης και σημειώνονται οι περιοχές στις οποίες οι αναπτυσσόμενη τάση έχει υπερβεί το όριο διαρροής του υλικού, $f_y=235$ MPa.



Σχήμα 2.45: Δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στη στήριξη

2.9. Ανακεφαλαίωση των επιλογών

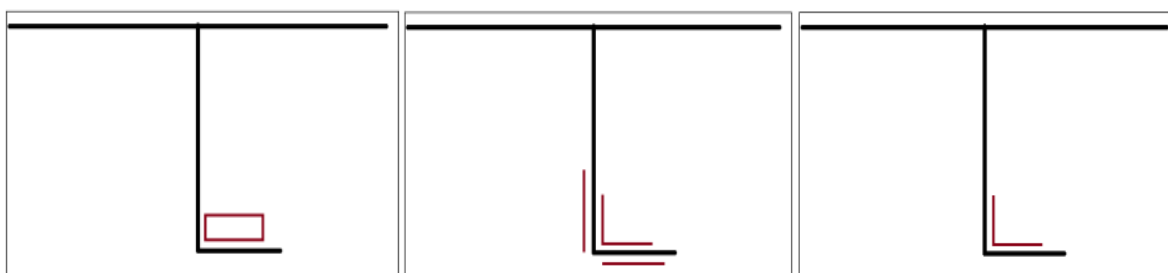
Στα εδάφια του κεφαλαίου «Διερεύνηση πλέγματος» εξετάστηκαν διάφοροι τύποι πλέγματος με μεταβαλλόμενο αριθμό στοιχείων για κάθε τύπο ενισχυτικού, έγινε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις και τέλος εξετάστηκαν συνδυασμοί τιμών $t_{init}/t_{min}/t_{max}$ για τα time steps των μη γραμμικών αναλύσεων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω διερεύνηση, επιλέγεται στα επόμενα στάδια της εργασίας, κατά τα οποία θα εξεταστεί η ενίσχυση με Carbon/epoxy και Glass/epoxy των αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών τύπου L, flat bar και T, η εκτέλεση μη γραμμικών αναλύσεων με τιμες $t_{init}/t_{min}/t_{max} = 0.1/0.001/0.1$ για τα time steps. Για τα ενισχυτικά τύπου L, flat_bar και T, θα χρησιμοποιηθούν τα πλέγματα L_steel, flat_bar και T_steel, αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

3.1. Καθορισμός Παραμέτρων – Στάδια εργασίας

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται η ενίσχυση των αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών τύπου L, flat bar και T με προφίλ pultruded διατομών από σύνθετα υλικά Carbon/epoxy και Glass/epoxy. Δημιουργούνται κατ' αυτόν τον τρόπο υβριδικά ενισχυτικά χάλυβα-Carbon/epoxy και χάλυβα-Glass/epoxy. Οι διάφορες γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών παρουσιάζονται λεπτομερώς στα εδάφια του παρόντος κεφαλαίου. Στις εικόνες του Σχήματος 3.1 παρατίθενται ενδεικτικά κάποια υβριδικά ενισχυτικά τύπου L. Με μαύρο χρώμα σημειώνεται το χαλύβδινο μέρος του υβριδικού ενισχυτικού και με κόκκινο το εφαρμοζόμενο FRP.



Σχήμα 3.1: Ενδεικτικές γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών τύπου L.

Τίθενται προς εξέταση οι εξής παράμετροι:

1. Η γεωμετρία του υβριδικού ενισχυτικού.

Εξετάζονται διάφορες γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών, ξεχωριστά για κάθε τύπο χαλύβδινου ενισχυτικού L, flat bar και T.

2. Η ροπή αδράνειας της διατομής, I_{yy} .

Όπως έχει ήδη περιγραφεί στο εδάφιο 2.2, επιλέχθηκαν τυπικές διαστάσεις για το ενισχυτικό τύπου L. Η ροπή αδράνειας προέκυψε $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και οι διαστάσεις των ενισχυτικών τύπου flat bar και T επιλέχθηκαν τέτοιες ώστε να διαθέτουν την ίδια τιμή ροπής αδράνειας. Έτσι στην παραμετρική μελέτη θα διερευνηθούν οι τιμές ροπής $I_{yy1}=228,4 \text{ cm}^4$ και η διπλάσια τιμή ροπής αδράνειας, $I_{yy2}=460 \text{ cm}^4$, η οποία αντιστοιχεί επίσης σε διαστάσεις τυπικών χαλύβδινων ενισχυτικών.

3. Ο λόγος εμβαδού του προστιθέμενου σύνθετου υλικού (comp.) προς το εμβαδό της χαλύβδινης διατομής, A_{comp}/A_{steel} .

Βασίζομενοι στις τυπικές διαστάσεις πάχους που μπορεί να διαθέτει μια λωρίδα από σύνθετο υλικό (έως 12-13mm) και με δεδομένες τις διαστάσεις των χαλύβδινων ενισχυτικών, εξετάζονται δύο τιμές : $A_{comp}/A_{steel}=0,4$ και $A_{comp}/A_{steel}=0,6$.

4. Ο λόγος μήκους του προστιθέμενου σύνθετου υλικού (comp.) προς το συνολικό μήκος του φορέα, L_{comp}/L_{steel} .

Θεωρώντας ότι η ενίσχυση στο 100% του μήκους του χαλύβδινου ενισχυτικού είναι πρακτικώς αδύνατη, λόγω της ανάγκης συγκόλλησης του ενισχυτικού στις στηρίξεις με τον υπόλοιπο φέροντα οργανισμό της κατασκευής, επιλέγονται προς εξέταση δύο τιμές του λόγου: $L_{comp}/L_{steel}=0,9$ και $L_{comp}/L_{steel}=0,7$. Η τιμή 0,7 επιλέγεται τέτοια ώστε η άκρη της ενίσχυσης από σύνθετο υλικό, να βρίσκεται εκτός των περιοχών των στηρίξεων όπου αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις (διατμητικές και αξονικές) λόγω κάμψης.

5. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου κατά τη διεύθυνση των ινών E_1 , η οποία καθορίζει και το υλικό είτε ως Carbon/epoxy, είτε ως Glass/epoxy.

Εξετάζονται δύο τιμές του μέτρου ελαστικότητας: $E_1=143,7$ GPa (για το Carbon/epoxy) και $E_1=50$ GPa (για το Glass/epoxy).

Η παραμετρική μελέτη αποτελείται από δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο εξετάζονται για κάθε τύπο χαλύβδινου ενισχυτικού διάφορες γεωμετρίες ενίσχυσης από σύνθετο υλικό διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων και ίσες με $I_{yy}=228,4$ cm⁴, $A_{comp}/A_{steel}=0,4$, $L_{comp}/L_{steel}=0,9$ και $E_1=143,7$ GPa (Carbon/epoxy). Για κάθε υβριδικό ενισχυτικό καταγράφονται τα αποτελέσματα της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (σ_{max}) και του μέγιστου βέλους κάμψης (W_{max}) στο μέσον ανοίγματος του φορέα και συγκρίνονται με αυτά των αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών. Καταγράφεται επίσης η μέγιστη αναπτυσσόμενη αξονική τάση στο Carbon/epoxy (σ_{FRP}) καθώς και η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης (sepoxy) και το μέγιστο φορτίο ως ποσοστό % της συνολικής εφαρμοζόμενης πίεσης ($P=100$ kPa) το οποίο μπορεί να φέρει πριν την αστοχία της η εποξική ρητίνη σύνδεσης (P_{max}). Οι γεωμετρίες αυτές βαθμολογούνται ανάλογα με τις τιμές των μεγεθών αυτών και προκρίνονται για κάθε τύπο ενισχυτικού αυτές οι οποίες αποσπών την υψηλότερη βαθμολογία.

Στο δεύτερο στάδιο, εξετάζονται για τις γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών που επιλέχθηκαν, όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των υπόλοιπων παραμέτρων. Καταγράφονται επίσης, όπως και στο πρώτο στάδιο, οι τιμές της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης και του μέγιστου βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος του φορέα, καθώς και της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises και το σημείο εμφάνισης αυτής, όπως επίσης και της μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονικής τάσης στο FRP. Επιπλέον καταγράφεται για κάθε συνδυασμό παραμέτρων η % αύξηση στο βάρος που προκύπτει από την προσθήκη του επιπλέον υλικού συγκριτικά με την αμιγώς χαλύβδινη ενίσχυση. Τέλος γίνεται αξιολόγηση των συνδυασμών των παραμέτρων βάσει των αποτελεσμάτων και της ποσοστιαίας (%) αύξησης του βάρους.

3.2. Διερεύνηση γεωμετριών υβριδικών ενισχυτικών. – 1^ο Στάδιο

Στα εδάφια 3.2.1-3.2.3 εξετάζονται διαφορετικές γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών για κάθε τύπο χαλύβδινου ενισχυτικού διατηρώντας τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων σταθερές. Οι τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Τιμές Παραμέτρων

Παράμετρος	Τιμή παράμετρου
I_{yy} (cm ⁴)	224,8
Acomp/Asteel	0,4
Lcomp/Lsteel	0,9
E_1 (GPa)	143,7

Στους Πίνακες 3.2 και 3.3 , παρουσιάζονται τα δεδομένα του φορέα και των υλικών συγκεντρωμένα για εποπτικούς λόγους, όπως αυτά έχουν περιγραφεί ήδη σε προηγούμενες παραγράφους.

Πίνακας 3.2 : Δεδομένα για το φορέα

Δεδομένα για τον φορέα	Τιμή
Φόρτιση, P (kPa)	100
Μήκος φορέα, L (mm)	2500
Διαστάσεις χαλύβδινου ελάσματος, b x t (mm x mm)	800 x 12
Ροπή αδράνειας διατομής χαλύβδινων ενισχυτικών, I_{yy} (cm ⁴)	228,4

Πίνακας 3.3 : Δεδομένα για τα υλικά

Δεδομένα για τα υλικά	Τιμή
Μέτρο ελαστικότητας ελαστικής περιοχής χάλυβα, E (GPa)	207
Μέτρο ελαστικότητας ανελαστικής περιοχής χάλυβα, E_{tang} (GPa)	6
Λόγος Poisson χάλυβα , ν	0,3
Τάση διαρροής χάλυβα, f_y (MPa)	235
Μέτρο ελαστικότητας Carbon/epoxy κατα τη διεύθυνση των ινών E_1 (GPa)	143,7
Μέτρο ελαστικότητας Glass/epoxy κατα τη διεύθυνση των ινών E_1 (GPa)	50
Μέτρο ελαστικότητας Carbon/epoxy και Glass/epoxy κάθετα στη διεύθυνση των ινών E_{23}, E_{13} (GPa)	9,2
Λόγος Poisson Carbon/epoxy και Glass/epoxy , ν_{12}, ν_{13}	0,32
Δευτερεύων λόγος Poisson Carbon/epoxy και Glass/epoxy, ν_{23}	0,46
Αντοχή Carbon/epoxy, σ_t (MPa)	507
Αντοχή Glass/epoxy, σ_t (MPa)	185
Μέτρο ελαστικότητας εποξικής ρητίνης σύνδεσης, E (GPa)	3
Λόγος Poisson εποξικής ρητίνης σύνδεσης, ν	0,37
Αντοχή εποξικής ρητίνης σύνδεσης, σ_t (MPa)	85
Πάχος εποξικής ρητίνης σύνδεσης, t (mm)	0,2

Για την μοντελοποίηση των υβριδικών ενισχυτικών, όπου ήταν δυνατό, διατηρήθηκε το πλέγμα του αντίστοιχου αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού. Αυτό δεν ήταν δυνατό σε πολλές περιπτώσεις λόγω της μοντελοποίησης των στοιχείων του σύνθετου υλικού και της εποξικής ρητίνης σύνδεσης. Όπως όμως έχει προκύψει από τη διερεύνηση πλέγματος, η μεταβολή του αριθμού των στοιχείων οδηγεί σε έως το πολύ 3% μεταβολή του αντίστοιχου μεγέθους. Ως εκ τούτου μας παρέχεται η δυνατότητα μικρών μεταβολών του αριθμού και των διαστάσεων των στοιχείων του πλέγματος, όπου απαιτείται. Η

μοντελοποίηση της εποξικής ρητίνης με στοιχεία Solid185 οδηγεί αναπόφευκτα στην δημιουργία μακρόστενων στοιχείων και εντός του πλέγματος του χάλυβα, όπως παρουσιάζεται στο εδάφιο 3.2.4 «Έυρος Σφάλματος», όπου και σημειώνεται η απόκλιση των αποτελεσμάτων που οφείλεται στις μεταβολές του αριθμού και του μεγέθους των στοιχείων.

Ακολουθεί η παρουσίαση των διαφόρων γεωμετριών υβριδικών ενισχυτικών με χρήση Carbon/epoxy, για κάθε τύπο χαλύβδινου ενισχυτικού καθώς και τα αποτελέσματα από την φόρτιση του φορέα ύστερα από εκτέλεση μη γραμμικών αναλύσεων.

3.2.1 Γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται σκαρίφημα της διατομής του φορέα για το χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L. Στις εικόνες του Σχήματος 3.3 παρουσιάζονται οι τύποι υβριδικών ενισχυτικών. Σημειώνεται με κόκκινο χρώμα το Carbon/epoxy.

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων για κάθε γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού τύπου L, για πίεση $P=100$ kPa. Σημειώνονται οι διαστάσεις της ενίσχυσης από σύνθετο υλικό για κάθε γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού, καθώς και εναλλακτικοί συνδυασμοί διαστάσεων για την ίδια γεωμετρία. Σημειώνονται επίσης για κάθε υβριδική γεωμετρία, οι τιμές των αναπτυσσόμενων μεγεθών ως εξής:

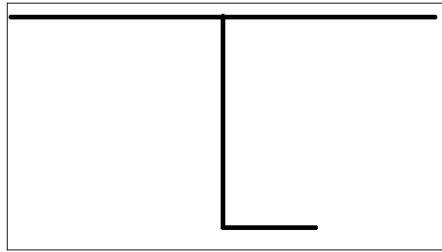
- Η μέγιστη αξονική τάση στο χαλύβδινο μέρος του υβριδικού ενισχυτικού στο μέσον ανοίγματος του ενισχυτικού, σ_{\max} [1], και το βέλος κάμψης W [1] στο σημείο αυτό. Σημειώνονται τα αντίστοιχα μεγέθη αυτά και για την αμιγώς χαλύβδινη ενίσχυση.

- Το μέγιστο βέλος κάμψης που αναπτύσσεται στο χαλύβδινο μέρος του υβριδικού ενισχυτικού στο μέσον ανοίγματος του φορέα, W_{\max} [2] και η αναπτυσσόμενη αξονική τάση σ [2] στο σημείο αυτό. Σημειώνονται τα αντίστοιχα μεγέθη αυτά και για την αμιγώς χαλύβδινη ενίσχυση.

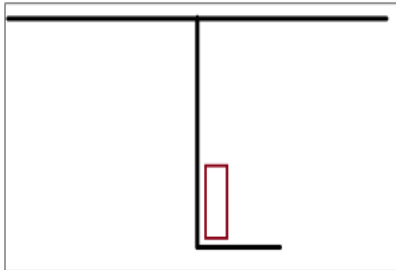
- Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τιμή της τάσης Von Mises για την εποξική ρητίνη σύνδεσης- σ_{epoxy} .

- Το φορτίο αστοχίας της εποξικής ρητίνης ως ποσοστό % της εφαρμοζόμενης πίεσης στον φορέα ($P=100$ kPa) - P_{\max}

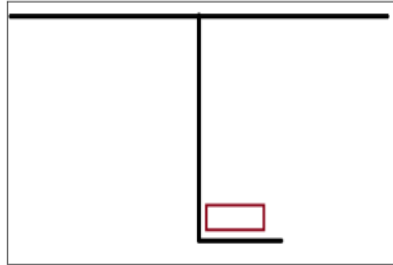
- Η μέγιστη αναπτυσσόμενη αξονική τάση παράλληλα στη διεύθυνση των ινών του Carbon/epoxy – σ_{FRP} .



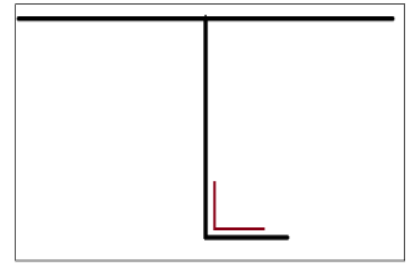
Σχήμα 3.2: Σκαρίφημα διατομής φορέα με χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L



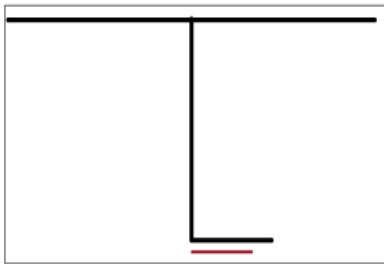
a. "rectangular"



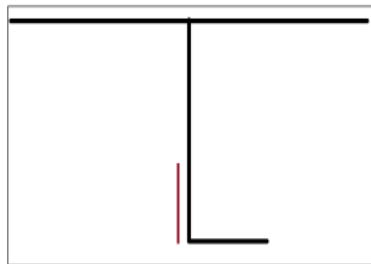
b. "rectangular"



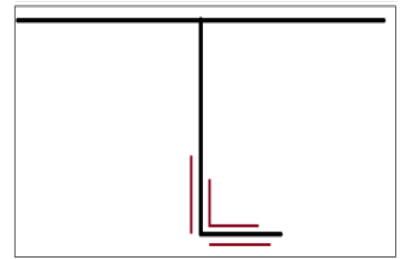
c. "Inner Angle"



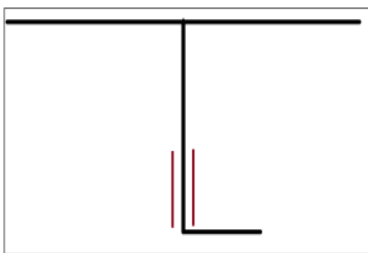
d. "bottom"



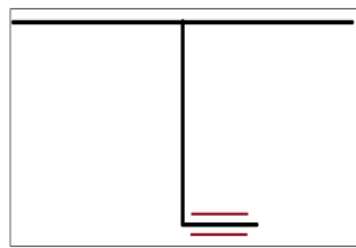
e. "side"



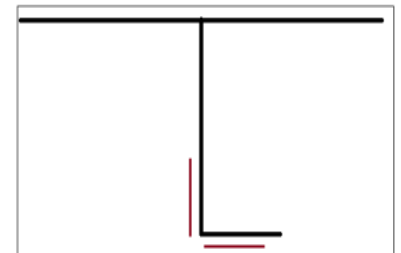
f. "Outer angle"



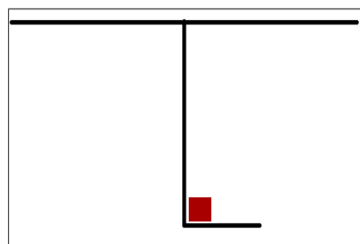
g. "two verticals"



h. "two horizontals"



i. "double angle"



j. "square rod"

Σχήμα 3.3:a-j : Σκαριφήματα και κωδικές ονομασίες α-η γεωμετριών υβριδικού ενισχυτικού τύπου L.

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα δοκιμών γεωμετρικών υβριδικών ενισχυτικών τύπου L

Τύπος υβριδικού ενισχυτικού	Κωδικός Ενίσχυσης	Διαστάσεις πρόσθετου FRP (mm)	Εμβαδόν ενίσχυσης (mm ²)	Χαλύβδινο Μέρος				Εποξική Ρητίνη Σύνδεσης		Carbon/epoxy
				W [1] (mm)	σ_{\max} [1] (MPa)	W _{max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
χωρίς ενίσχυση	L_steel	-	-	5,56	236	7,14	201	-	-	-
Rectangular	a.1	56.6x28.3x4	615.2	4,14	184	5,49	138	117	69	114
	a.2	42x21x6	612	4,09	180	5,47	134	123	70	112
Rectangular	b.1	56.6x28.3x4	615.2	4,11	184	5,61	124	93	92	113
	b.2	42x21x6	612	4,07	179	5,58	123	97	88	111
Inner Angle	c.1	72x4 + 81x4	612	4,91	208	6,56	154	70	100	130
	c.2	38x8 +38x8	608	4,77	197	6,19	158	80	100	124
Bottom	d.1	80x7,7	616	4,45	181	5,92	129	95	70	135
	d.2	51x12	612	4,36	172	5,67	137	100	69	133
side	e.1	77x8	616	4,88	201	6,10	176	87	92	141
	e.2	51x12	612	4,72	191	5,93	172	90	70	134
Outer Angle	f.1	80x4 + 74x4	616	4,65	190	6,16	147	69	100	137
	f.2	38x8 +38x8	608	4,50	179	5,83	153	83	100	134
two verticals	g.1	80x4 + 72x4	612	4,94	205	6,30	176	71	100	143
	g.2	38x8 +38x8	608	4,71	191	5,98	167	92	81	134
	g.3	26x12+25x12	612	4,63	186	5,88	164	101	70	130
Two horizontals	h.1	51x6 + 51x6	612	4,55	184	6,06	139	83	100	136
	h.2	26x12 + 25x12	612	4,49	178	5,84	148	97	71	138
Double angle	i.1	38x38,6x4 + 2x39x4	618	4,60	185	5,95	154	67	100	134
Square rod	j.1	24.8x24.8	615	4,74	194	6,16	158	107,465	70	122

Στον Πίνακα 3.5, παρουσιάζεται η % μείωση που επιτυγχάνεται για κάθε εξεταζόμενο μέγεθος και για κάθε μία γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού τύπου L, συγκριτικά με το αμιγώς χαλύβδινο ενισχυτικό. Το πρόσημο μείον (-) παραλείπεται για λόγους εποπτίας των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3.5: Μείωση % συγκριτικά με το L_steel

Τύπος υβριδικού ενισχυτικού	Κωδικός Ενίσχυσης	Διαστάσεις ενίσχυσης (mm)	W [1] (%)	σ_{max} [1] (%)	W_{max} [2] (%)	σ [2] (%)
Rectangular	a.1	56.6x28.3x4	26	22	23	31
	a.2	42x21x6	26	24	22	33
Rectangular	b.1	56.6x28.3x4	26	22	21	39
	b.2	42x21x6	27	24	22	40
Inner Angle	c.1	72x4 + 81x4	12	12	8	23
	c.2	38x8 + 38x8	14	17	13	21
Bottom	d.1	80x7,7	20	23	17	36
	d.2	51x12	22	27	21	32
side	e.1	77x8	12	15	15	13
	e.2	51x12	15	19	17	14
Outer Angle	f.1	80x4 + 74x4	16	19	14	27
	f.2	38x8 + 38x8	19	24	18	24
two verticals	g.1	80x4 + 72x4	11	13	12	13
	g.2	38x8 + 38x8	15	19	16	17
	g.3	26x12+25x12	17	21	18	18
Two horizontals	h.1	51x6 + 51x6	18	22	15	31
	h.2	26x12 + 25x12	19	25	18	27
Double angle	i.1	38x38,6x4 + 2x39x4	17	21	17	23
Square rod	j.1	24.8x24.8	15	18	14	21

Για την αξιολόγηση των υβριδικών ενισχυτικών λαμβάνεται υπ' όψιν η τιμή των παρακάτω μεγεθών:

1. Η μείωση στην μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στο μέσον ανοίγματος του χαλύβδινου ενισχυτικού. - σ_{max} [1]
2. Η μείωση στο μέγιστο αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος του χαλύβδινου ενισχυτικού - W_{max} [2]
3. Το ποσοστό επί του συνολικού φορτίου, έως την εξάντληση της αντοχής της εποξικής ρητίνης σύνδεσης, $f_u=85$ Mpa - P_{max}
4. Η μέγιστη τάση στο Carbon/epoxy - σ FRP.

5. Η απλότητα/οικονομία/ευελιξία για την πρακτική εφαρμογή της εκάστοτε γεωμετρίας ενισχυτικού - simpl.

Ακολουθείται η εξής κλίμακα βαθμολογίας:

1. Άριστα: 5. Το λαμβάνει για κάθε μέγεθος, η διατομή που εμφανίζει τη μεγαλύτερη % μείωση σε σχέση με το αμιγώς χαλύβδινο ενισχυτικό.

2. Κακώς: 1. Το λαμβάνει για κάθε μέγεθος, η διατομή που εμφανίζει τη μικρότερη % μείωση σε σχέση με το αμιγώς χαλύβδινο ενισχυτικό.

3. Για την βαθμολογία των ενδιάμεσων τιμών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής.

4. Για τη μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο Carbon/epoxy, εφόσον σε κάθε περίπτωση αυτή βρίσκεται μακριά από το φορτίο θραύσης, βαθμολογήσαμε από 3-5, ανάλογα με την αναπτυσσόμενη τάση.

5. Για το φορτίο αστοχίας της εποξικής ρητίνης ως ποσοστού επί του συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου (100 kPa), χρησιμοποιείται η φόρμουλα $0 \div 1 \times 5$ (πχ για φορτίο 70 kPa: $0,7 \times 5 = 3,5$).

6. Για την απλότητα κατασκευής, εφαρμόστηκε ποιοτική βαθμολόγηση.

7. Τίθεται συντελεστής βαρύτητας (Σ.Β.) για κάθε εξεταζόμενο μέγεθος.

Τα εξεταζόμενα μεγέθη, η κλίμακα βαθμολόγησης και ο Σ.Β. για κάθε μέγεθος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6 : Εξεταζόμενα μεγέθη, κλίμακα βαθμολόγησης και Σ.Β.

Μέγεθος	Κλίμακα βαθμολόγησης	Σ.Β.
σ_{\max} [1]	1÷5	1,5
W_{\max} [2]	1÷5	1
P_{\max} epoxy	1÷5	1,5
σ FRP.	1÷5	1,5
simpl.	1÷5	1,25

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7 .

Πίνακας 3.7: Αξιολόγησης υβριδικών ενισχυτικών τύπου L.

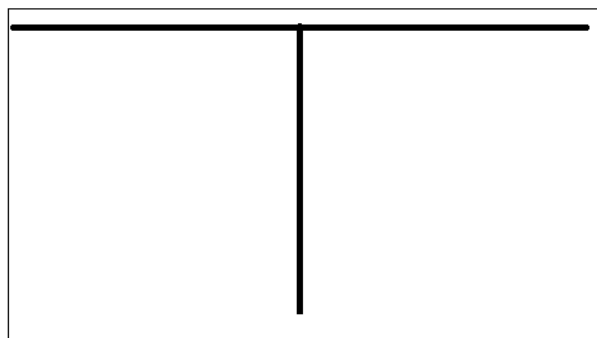
Τύπος υβριδικής ενίσχυσης	Κωδικός Ενίσχυσης	Διαστάσεις ενίσχυσης (mm)	σ max [1]	w max [2]	σ epoxy	simpl.	σ comp.	Σύνολο	Κατάταξη
			(x1,5)	(x1,0)	(x1,5)	(x1,25)	(x1,5)		
Rectangular	a.1	56.6x28.3x4	3,7	5,3	3,5	2	5	26,0	
	a.2	42x21x6	4,1	5,0	3,5	2	5	26,4	
Rectangular	b.1	56.6x28.3x4	3,6	4,9	4,6	2	5	27,2	
	b.2	42x21x6	4,2	5,0	4,4	2	5	27,9	3
Inner Angle	c.1	72x4 + 81x4	1,0	1,5	5,0	3	4	20,3	
	c.2	38x8 +38x8	2,2	2,8	5,0	3	4	23,4	
Bottom	d.1	80x7,7	4,0	3,8	3,5	5	4	27,3	
	d.2	51x12	5,0	4,6	3,5	5	4	29,6	1
side	e.1	77x8	1,8	3,1	4,6	5	3	23,4	
	e.2	51x12	2,8	3,7	3,5	5	4	25,5	
Outer Angle	f.1	80x4 + 74x4	3,0	2,9	5,0	4	3	24,4	
	f.2	38x8 +38x8	4,3	4,1	5,0	4	4	29,0	2
two verticals	g.1	80x4 + 72x4	1,3	2,4	5,0	4	3	21,4	
	g.2	38x8 +38x8	2,9	3,6	4,1	4	4	25,0	
	g.3	26x12+25x12	3,5	3,9	3,5	4	3	23,9	
Two horizontals	h.1	51x6 + 51x6	3,6	3,3	5,0	4	4	27,2	
	h.2	26x12 + 25x12	4,3	4,1	3,6	4	3	25,4	
Double angle	i.1	38x38,6x4 + 2x39x4	3,5	3,7	5,0	1	4	23,7	
Square rod	j.1	24.8x24.8	2,5	2,9	3,5	2	4	20,4	

Από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης προκύπτει ως συμπέρασμα ότι ανάλογα με την γεωμετρία του υβριδικού ενισχυτικού επιτυγχάνονται σημαντικές διαφορές τόσο στην μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στο χαλύβδινο μέρος του ενισχυτικού (σ_{max}), όσο και στην αναπτυσσόμενη τάση στην εποξική ρητίνη (σεροxy), για την ίδια ποσότητα σύνθετου υλικού Carbon/epoxy. Επίσης η αύξηση του πάχους του ενισχυτικού σε σχέση με την διάσταση του πλάτους, για την ίδια γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού, οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση στην τιμή της σ_{max} , αλλά ταυτόχρονα έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη καταπόνηση της εποξικής ρητίνης.

3.2.2 Γεωμετρίες υβριδικού ενισχυτικού για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται σκαρίφημα της διατομής του φορέα για το χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar. Στις εικόνες του Σχήματος 3.5 παρουσιάζονται οι τύποι υβριδικών ενισχυτικών. Σημειώνεται με κόκκινο χρώμα το Carbon/epoxy.

Στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων για κάθε γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού τύπου flat bar. Σημειώνονται οι διαστάσεις της ενίσχυσης από σύνθετο υλικό για κάθε γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού, καθώς και εναλλακτικοί συνδυασμοί διαστάσεων για την ίδια γεωμετρία. Σημειώνονται επίσης τα αναπτυσσόμενα μεγέθη, όπως αυτά έχουν περιγραφεί στο εδάφιο 3.2.1.



Σχήμα 3.4 : Σκαρίφημα διατομής φορέα με χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου flat bar.



a. “single side”

b. “double side”

Σχήμα 3.5: a,b Σκαριφήματα και κωδικές ονομασίες γεωμετριών υβριδικού ενισχυτικού τύπου flat bar

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα δοκιμών υβριδικών ενισχυτικών τύπου flat bar

Τύπος υβριδικού ενισχυτικού	Κωδικός Ενίσχυσης	Διαστάσεις ενίσχυσης (mm)	Εμβαδόν (mm ²)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική Ρητίνη Σύνδεσης		Carbon/epoxy
				W _{max} (mm)	σ _{max} (MPa)	P _{max} (kPa)	σ epoxy (MPa)	σ FRP (MPa)
χωρίς ενίσχυση	Flat_bar	-	-	12,82	265	-	-	-
single side	a.1	80x6	480	6,68	240	94	90	268
	a.2	40x12	480	6,08	238	93	90	232
double side	b.1	2x40x6	480	6,03	238	106	80	230
	b.2	2x20x12	480	5,76	237	113	60	214
	b.3	2x80x3	480	6,63	239	103	90	266

Στον Πίνακα 3.9 παρουσιάζεται η % μείωση που επιτυγχάνεται για κάθε έναν από τους παραπάνω τύπους υβριδικού ενισχυτικού τύπου flat bar, συγκριτικά με το αμιγώς χαλύβδινο ενισχυτικό. Το πρόσημο μείον (-) παραλείπεται για λόγους εποπτίας των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3.9: Μείωση % συγκριτικά με το flat bar.

Κωδικός	Τύπος ενίσχυσης	Διαστάσεις (mm)	W (%)	σ (%)
a.1	single side	80x6	48	10
a.2	single side	40x12	53	10
b.1	double side	2x40x6	53	10
b.2	double side	2x20x12	55	11
b.3	double side	2x80x3	48	10

Για την αξιολόγηση των υβριδικών ενισχυτικών τύπου flat bar ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε στο εδάφιο 3.2.1 με τις εξής διαφοροποιήσεις:

1. Δεν τίθεται καθόλου ως κριτήριο η μείωση % της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης στο χαλύβδινο ενισχυτικό καθότι δεν παρουσιάζονται μεταβολές μεταξύ των διαφόρων γεωμετριών υβριδικού ενισχυτικού, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.8

2. Επειδή οι διαφορές και στο βέλος κάμψης είναι πολύ μικρές βαθμολογήθηκαν με άριστα 5, οι τρεις υβριδικές ενισχύσεις που έχουν παρουσιάζουν τιμή μείωσης >50% και με 4 οι άλλες δύο.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10:

Πίνακας 3.10: Αξιολόγηση υβριδικών ενισχυτικών τύπου flat bar.

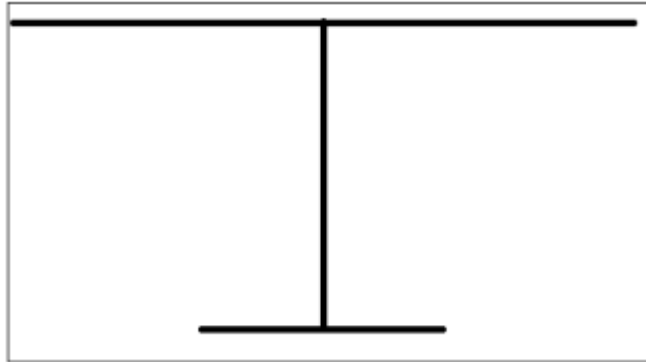
Κωδικός	W_{max}	P_{max} epoxy	σ_{FRP}	simpl.	Σύνολο	Κατάταξη
	(x1,0)	(x1,5)	(x1,5)	(x1,25)		
a.1	4,0	4,5	1	5	18,5	4
a.2	5,0	4,5	3	5	22,5	1
b.1	5,0	4	3	3	19,3	3
b.2	5,0	3	5	3	20,8	2
b.3	5	4,5	1	3	17,0	5

3.2.3 Γεωμετρίες υβριδικού ενισχυτικού για χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T

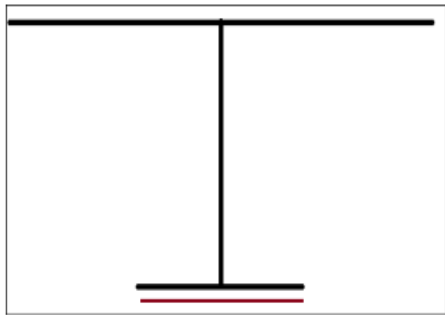
Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται σκαρίφημα της διατομής του φορέα για το χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T. Στις εικόνες του Σχήματος 3.6 παρουσιάζονται οι τύποι υβριδικών ενισχυτικών. Σημειώνεται με κόκκινο χρώμα το Carbon/epoxy.

Στον Πίνακα 3.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων για κάθε γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού τύπου T. Σημειώνονται οι διαστάσεις της ενίσχυσης από σύνθετο υλικό για κάθε γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού, καθώς και

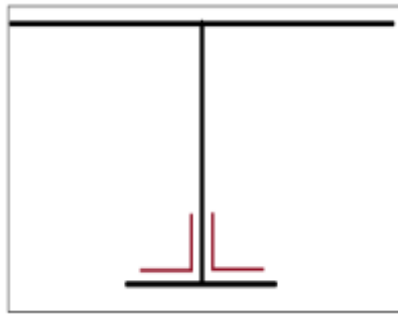
εναλλακτικοί συνδυασμοί διαστάσεων για την ίδια γεωμετρία και η αναπτυσσόμενη τάση στην εποξική ρητίνη σύνδεσης και στο Carbon/epoxy, κατά τα γνωστά.



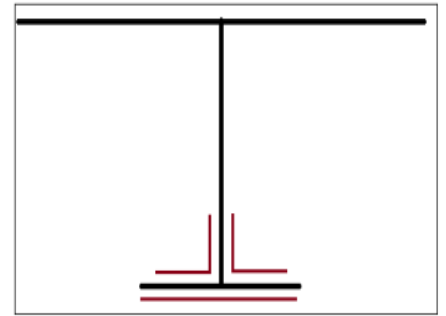
Σχήμα 3.6: Σκαρίφημα διατομής φορέα με χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου T.



a. "bottom"



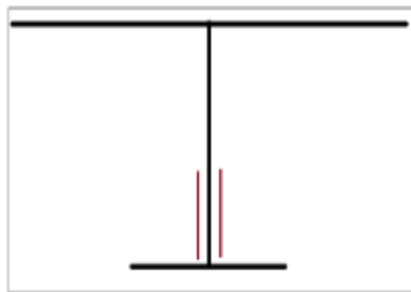
b. "double angle"



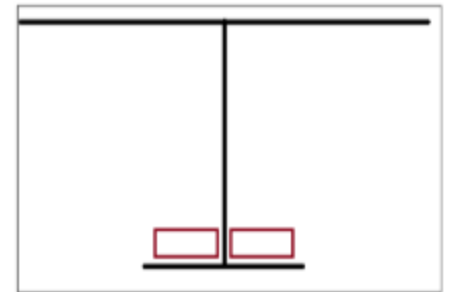
c. "double angle
horizontal"



d. "double horizontal"



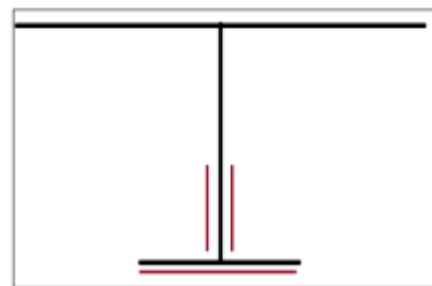
e. "double vertical"



f. "double Rectangular"



g. "double horizontal bottom"



h. "double vertical bottom"

Σχήμα 3.7: a-h Υβριδικές γεωμετρίες ενίσχυσης για ενισχυτικά τύπου T.

Πίνακας 3.11. Αποτελέσματα δοκιμών γεωμετριών υβριδικών ενισχυτικών τύπου T.

Τύπος υβριδικού ενισχυτικού	Κωδικός Ενίσχυσης	Διαστάσεις υβριδικού ενισχυτικού (mm)	Εμβαδόν (mm ²)	χαλύβδινο Μέρος		Εποξική Ρητίνη Σύνδεσης		Carbon/epoxy
				W _{max} (mm)	σ _{max} (MPa)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
χωρίς ενίσχυση	T_steel	-	-	5,24	230	-	-	-
bottom	a.1	80x7.7	616	4,1	161	82	100	121
	a.2	51x12	612	4,076	160	89	100	125
double angle	b.1	2x(41x36x4)	616	4,45	182	67	100	116
	b.2	2x(22.5x16x8)	616	4,45	182	80	100	116
double angle horizontal	c.1	40x4 + 2x(37x20x4)	616	4,41	179	67	100	130
double horizontal	d.1	2x(36x8.5)	612	4,37	176	78	100	112
double vertical	e.1	2x(51x6)	612	4,61	191	84	100	122
	e.2	2x(25,5x12)	612	4,47	182	99	80	116
double rectangular	f.1	2x(23x23x4)	608	4,45	181	86	100	116
double horizontal bottom	g.1	80x4 + 2x(36x4)	608	4,23	167	64	100	122
double vertical bottom	h.1	80x4 + 2x(37x4)	616	4,3	173	66	100	125

Στον Πίνακα 3.12 παρουσιάζεται η % μείωση που επιτυγχάνεται για κάθε έναν από τους παραπάνω τύπους υβριδικού ενισχυτικού τύπου T, συγκριτικά με το αμιγώς χαλύβδινο ενισχυτικό. Το πρόσημο μείον (-) παραλείπεται για λόγους εποπτίας των αποτελεσμάτων.

Πίνακα 3.12 Πίνακας : Μείωση % συγκριτικά με το T_steel.

Κωδικός	Τύπος υβριδικής	Διαστάσεις (mm)	W _{max} %	σ _{max} %
a.1	bottom	80x7.7	22	30
a.2		51x12	22	30
b.1	double_angle	2x(41x36x4)	15	21
b.2		2x(22.5x16x8)	15	21
c.1	double angle bottom	40x4 + 2x(37x20x4)	16	22
d.1	double horizontal	2x(36x8.5)	17	24
e.1	double vertical	2x(51x6)	12	17
e.2		2x(25,5x12)	15	21
f.1	double rectangular	2x(23x23x4)	15	21
g.1	Double horizontal bottom	80x4 + 2x(36x4)	19	27
h.1	Double vertical bottom	80x4 + 2x(37x4)	18	25

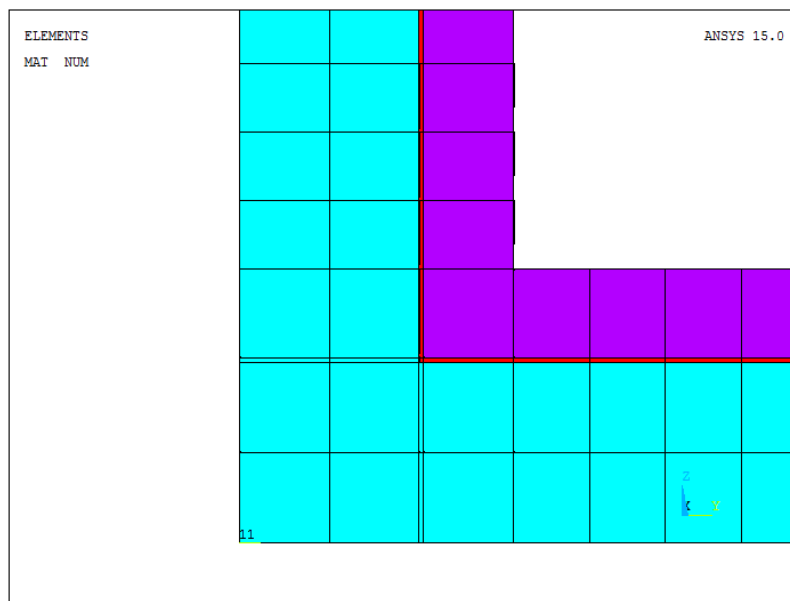
Η αξιολόγηση των ενισχυτικών T ακολουθεί τη διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμολόγηση ενισχυτικών τύπου L. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.13

Πίνακας 3.13 :Αξιολόγηση υβριδικών ενισχυτικών τύπου T.

κωδικός	Τύπος υβριδικού ενισχυτικού	w _{max} [2]	σ _{max} [1]	P _{max} epoxy	simpl.	σFRP	Σύνολο	Κατάταξη
		(x1,0)	(x1,5)	(x1,5)	(x1,25)	(x1.5)		
a.1	bottom	4,9	5,0	5	5	4	32	1
a.2		5,0	5,0	5	5	4	32	
b.1	double_angle	2,2	2,2	5	3	5	24	
b.2		2,2	2,2	5	3	5	24	
c.1	double angle bottom	2,5	2,5	5	1	3	20	
d.1	double horizontal	2,8	3,0	5	4	5	27	
e.1	double vertical	1,0	1,0	5	4	5	23	
e.2		2,1	2,2	4	4	5	24	
f.1	double rectangular	2,2	2,3	5	2	5	23	
g.1	Double horizontal bottom	3,9	4,2	5	3	4	27	2
h.1	Double vertical bottom	3,4	3,4	5	3	4	26	

3.2.4. Μοντελοποίηση στοιχείων εποξικής ρητίνης σύνδεσης

Η εποξική ρητίνη σύνδεσης μοντελοποιείται ως ιστροπικό ομογενές υλικό και τίθεται πάχος 0,2 mm ως τυπική τιμή. Η μοντελοποίηση της εποξικής ρητίνης με στοιχεία Solid185, οδηγεί αναπόφευκτα στη δημιουργία μακρόστενων στοιχείων και στο πλέγμα του χαλύβδινου μέρους του υβριδικού ενισχυτικού. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στην εικόνα του Σχήματος 3.8. Παρουσιάζεται μια λεπτομέρεια από ένα υβριδικό ενισχυτικό τύπου L. Διακρίνονται τα στοιχεία του χαλύβδινου μέρους (γαλάζια), του σύνθετου (μωβ) και της εποξικής ρητίνης σύνδεσης (κόκκινα). Είναι εμφανή στην εικόνα, τα μακρόστενα στοιχεία εντός του πλέγματος του χαλύβδινου μέρους, τα οποία προκύπτουν λόγω της μοντελοποίησης της κόλλας.



Σχήμα 3.8: Μακρόστενα στοιχεία λόγω της μοντελοποίησης της εποξικής ρητίνης σύνδεσης

Τα παραπάνω στοιχεία εμφανίζονται μόνο για τις περιπτώσεις υβριδικού ενισχυτικού τύπου L και τύπου T και όχι για τα υβριδικά ενισχυτικά τύπου “flat bar”, λόγω γεωμετρίας του χαλύβδινου ενισχυτικού.

Εκτελείται μια δοκιμή (test) μόνο για το χαλύβδινο μέρος των υβριδικών ενισχυτικών L και T , με την ονομασία L_steel_epoxy και T_steel_epoxy αντίστοιχα, κάνοντας χρήση γραμμικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά των L_steel και T_steel αντίστοιχα στον Πίνακα 3.14.

Πίνακας 3.14: Αποτελέσματα πλεγμάτων με και χωρίς στοιχεία εποξικής ρητίνης σύνδεσης.

τύπος ενισχυτικού	W [1] (mm)	σ [1] (MPa)	W [2] (mm)	σ [2] (MPa)
L_steel	4,57	220	6,33	147
L_steel_epoxy	4,57	220	6,33	147
T_steel	4,15	193	4,15	192
T_steel_epoxy	4,15	193	4,15	192

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.14, η παρουσία των μακρόστενων στοιχείων που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση των στοιχείων της εποξικής ρητίνης σύνδεσης δεν μεταβάλλει καθόλου τα αποτελέσματα.

3.2.5. Σχολιασμός αποτελεσμάτων 1^{ου} Σταδίου

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στα εδάφια του 1^{ου} Σταδίου, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Οι τιμές της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης σ_{\max} οι οποίες εμφανίζονται στα υβριδικά ενισχυτικά μειώνονται σε σχέση με αυτήν των αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών κατά:

12-27% για τα ενισχυτικά τύπου L, ανάλογα με τη γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού

10% για τα ενισχυτικά τύπου flat bar, ανάλογα με τη γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού

17-30% για τα ενισχυτικά τύπου T, ανάλογα με τη γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού

3. Οι τιμές του μέγιστου αναπτυσσόμενου βέλους κάμψης W_{\max} οι οποίες εμφανίζονται στα υβριδικά ενισχυτικά μειώνονται σε σχέση με αυτήν των αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών κατά:

8-23% για τα ενισχυτικά τύπου L, ανάλογα με τη γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού

48-53% για τα ενισχυτικά τύπου flat bar, ανάλογα με τη γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού

12-22% για τα ενισχυτικά τύπου T, ανάλογα με τη γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού

4. Γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών τύπου L, οι οποίες οδηγούν σε μεγάλη μείωση στην τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης, παρουσιάζουν ταυτόχρονα έντονη καταπόνηση της εποξικής ρητίνης σύνδεσης. Σε πολλές περιπτώσεις η αναπτυσσόμενη τάση von Mises υπερβαίνει την αντοχή της ρητίνης. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται για τα υβριδικά ενισχυτικά τύπου T.

5. Η μέγιστη αξονική τάση που αναπτύσσεται στο Carbon/epoxy, είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μικρότερη από την αντοχή του.

6. Η αύξηση του πάχους του σύνθετου σε σχέση με την άλλη διάσταση, για την ίδια γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού και για τον ίδιο λόγο εμβαδών Acomp/Asteel οδηγεί σε ανάπτυξη μικρότερης τάσης στο χάλυβα και σε μεγαλύτερη τάση στην εποξική ρητίνη σύνδεσης.

7. Για τα επόμενα στάδια εργασίας προκρίνονται οι γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών οι οποίες απέσπασαν τη μεγαλύτερη βαθμολογία κατά την αξιολόγηση η οποία έγινε στα εδάφια 3.2.1-3.2.3. Συγκεκριμένα:

Για τα υβριδικά ενισχυτικά τύπου L: Προκρίνονται οι γεωμετρίες “bottom d.2” , “outer angle f.2” και “rectangular b.2”

Για τα υβριδικά ενισχυτικά τύπου flat bar: Προκρίνονται οι γεωμετρίες “single side a.2” και “double side b.2”

Για τα υβριδικά ενισχυτικά T: Προκρίνονται οι γεωμετρίες τύπου “bottom a.1” και “double horizontal d.2”

3.3. Διερεύνηση συνδυασμών παραμέτρων - 2^ο Στάδιο

Στα εδάφια 3.3.1. – 3.3.3 διερευνώνται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των παραμέτρων, έτσι όπως αυτές καθορίστηκαν στο εδάφιο 3.1. Η διερεύνηση θα γίνει για τις γεωμετρίες υβριδικών ενισχυτικών οι οποίες απέσπασαν την μεγαλύτερη βαθμολογία ανά τύπο ενισχυτικού L, flat_bar και T, κατά την αξιολόγηση η οποία παρουσιάστηκε στα εδάφια 3.2.1-3.2.3.

Εξετάζεται αρχικώς η δυνατότητα διαξαγωγής γραμμικών αναλύσεων. Για το σκοπό αυτό διερευνάται η επίδραση της αύξησης της τιμής του λόγου A_{comp}/A_{steel} , για ένα υβριδικό ενισχυτικό τύπου L γεωμετρίας rectangular με χρήση μη γραμμικής και γραμμικής ανάλυσης. Οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων διατηρούνται σταθερές και ίσες με $I_{yy}=224,8cm^4$, $L_{comp}/L_{steel}=0,9$ και $E_I=0,4$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.15.

Πίνακας 3.15: Διερεύνηση επιρροής παραμέτρου A_{comp}/A_{steel} με γραμμική και μη γραμμική ανάλυση.

ΜΗ γραμμική ανάλυση								
Διαστάσεις ενίσχυσης από FRP	Τιμή λόγου A_{comp}/A_{steel}	Χαλύβδινο μέρος				Ρητίνη		Σύνθετο
		W [1] (mm)	σ_{max} [1] (MPa)	W _{max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ_{epoxy} (MPa)	P max (MPa)	σ_{FRP} (MPa)
56.6x28.3x4	0,4	4,11	184	5,61	124	93	92	113
59x29,5x6	0,6	3,99	175	5,49	111	92	92	107
	Μεταβολή %	2,9	5,1	2,1	10,2	0,7	0,0	5,3
Γραμμική ανάλυση								
Διαστάσεις ενίσχυσης από FRP	Τιμή λόγου A_{comp}/A_{steel}	Χαλύβδινο μέρος				Ρητίνη		Σύνθετο
		W [1] (mm)	σ_{max} [1] (MPa)	W _{max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ_{epoxy} (MPa)	P max (MPa)	σ_{FRP} (MPa)
56.6x28.3x4	0,4	4,15	188	5,84	111	94	90	115
59x29,5x6	0,6	4,03	179	5,72	101	94	90	109
	Μεταβολή %	2,9	4,8	2,1	9,0	0,0	0,0	5,2

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.15 παρατηρούμε ότι η αύξηση του λόγου A_{comp}/A_{steel} οδηγεί σε ίσες μεταβολές των εξεταζόμενων μεγεθών είτε με χρήση γραμμικής είτε μη γραμμικής ανάλυσης. Επιλέγεται ως εκ τούτου η διενέργεια γραμμικών αναλύσεων για το στάδιο αυτό της παραμετρικής μελέτης.

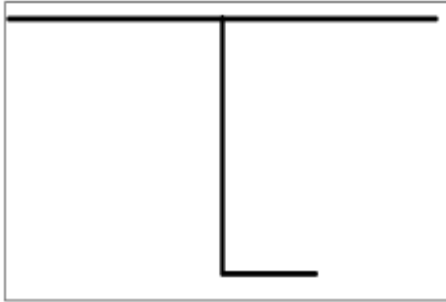
Ακολουθούν στα εδάφια 3.3.1-3.3.2, τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης ανά τύπο υβριδικού ενισχυτικού L,flat bar και T κατά σειρά. Σε κάθε περίπτωση ο συνδυασμός παραμέτρων σημειώνεται με το συμβολισμό $\frac{A_{comp}}{A_{steel}} / \frac{L_{comp}}{L_{steel}} / EI$.

Σημειώνονται στην αρχή κάθε παραγράφου η ροπή αδράνειας του χαλύβδινου ενισχυτικού και οι τιμές της πυκνότητας του χάλυβα και των CFRP και GFRP.

Στους πίνακες κάθε παραγράφου σημειώνονται καταρχήν οι τιμές των μεγεθών για το χαλύβδινο μέρος, την εποξική ρητίνη σύνδεσης και το FRP καθώς και η πρόσθετη μάζα ανά μέτρο μήκους, λόγω της εφαρμογής του FRP. Σημειώνεται ύστερα, η μεταβολή στη συνολική μάζα ως ποσοστό % σε σύγκριση με τη μάζα του αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού καθώς και η μεταβολή % των μεγεθών της αναπτυσσόμενης τάσης και βέλους κάμψης τόσο σε απόλυτη τιμή, όσο και ανά ποσοστιαία % αύξηση μάζας λόγω εφαρμογής FRP. Έτσι έχουμε μια εικόνα της «αποδοτικότητας» κάθε συνδυασμού παραμέτρων. Το πρόσημο μείον (-) παραλείπεται για την καλύτερη εποπτία των αποτελεσμάτων.

3.3.1. Διερεύνηση για Υβριδικά ενισχυτικά τύπου L

3.3.1.1. Ροπή αδράνειας χαλύβδινου ενισχυτικού: $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$



Ροπή αδράνειας χαλύβδινου ενισχυτικού, I_y (cm^4)	228,4
Φόρτιση, P (kPa)	100

Διαστάσεις χαλύβδινου ενισχυτικού (mm)	120x80x8
Εμβαδόν χαλύβδινου Ενισχυτικού (mm^2)	1536
Μήκος Χαλύβδινου ενισχυτικού (m)	2,5
Πυκνότητα Χάλυβα (kg/m^3)	7800
Μάζα χαλ. Ενισχυτικού ανά μέτρο μήκους	11,98

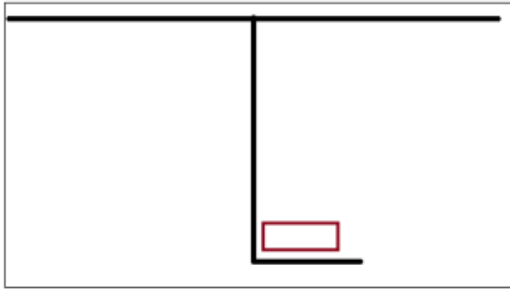
Μέτρο Ελαστικότητας CFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	143,70
Πυκνότητα UD-Carbon/epoxy (kg/m^3)	1570

Μέτρο Ελαστικότητας GFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	50,00
Πυκνότητα UD-Glass/epoxy (kg/m^3)	1920

Αποτελέσματα Γραμμικής Ανάλυσης για το L_steel.

Τύπος	$W[1]$ (mm)	σ_{\max} [1] (MPa)	W_{\max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)
L_steel	4,57	220	6,33	147

3.3.1.1.α. Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "Rectangular pultruded"



Acomp/Asteel=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 612

Διαστάσεις σύνθετου (mm): 42x21x6

Acomp/Asteel=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 918

Διαστάσεις σύνθετου (mm): 59x29,5x6

Πίνακας 3.16: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος				Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		W[1] (mm)	σ_{max} [1] (MPa)	W _{max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	0,86	4,1	183	5,81	110	98	86	112
0.4/0.9/50	1,06	4,35	203	6,04	133	71	100	44
0.4/0.7/143.7	0,67	4,2	188	5,8	117	37	100	115
0.4/0.7/50	0,82	4,42	206	6,01	137	36	100	44
0.6/0.9/143.7	1,30	4,03	179	5,72	101	94	90	109
0.6/0.9/50	1,59	4,3	200	5,93	129	61	100	43
0.6/0.7/143.7	1,01	4,16	184	5,88	108	37	100	113
0.6/0.7/50	1,23	4,38	203	6,03	136	37	100	44

Πίνακας 3.17: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την L_{steel}.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την L _{steel}					Μεταβολή % ανά μονάδα μάζας πρόσθετου FRP			
	Αύξηση μάζας %	W [1] (%)	σ_{max} [1] (%)	W _{max} [2] (%)	σ [2] (%)	W [1] (%)	σ_{max} [1] (%)	W _{max} [2] (%)	σ [2] (%)
0.4/0.9/143.7	7,22	10,3	16,8	8,2	25,2	1,4	2,3	1,1	3,5
0.4/0.9/50	8,83	4,8	7,7	4,6	9,5	0,5	0,9	0,5	1,1
0.4/0.7/143.7	5,61	8,1	14,5	8,4	20,4	1,4	2,6	1,5	3,6
0.4/0.7/50	6,87	3,3	6,4	5,1	6,8	0,5	0,9	0,7	1,0
0.6/0.9/143.7	10,83	11,8	18,6	9,6	31,3	1,1	1,7	0,9	2,9
0.6/0.9/50	13,24	5,9	9,1	6,3	12,2	0,4	0,7	0,5	0,9
0.6/0.7/143.7	8,42	9,0	16,4	7,1	26,5	1,1	1,9	0,8	3,2
0.6/0.7/50	10,30	4,2	7,7	4,7	7,5	0,4	0,8	0,5	0,7

3.3.1.1.β .Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "bottom"



Acomp/Asteel=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 612

Διαστάσεις σύνθετου (mm): 42x21x6

Acomp/Asteel=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 918

Διαστάσεις σύνθετου (mm): 59x29,5x6

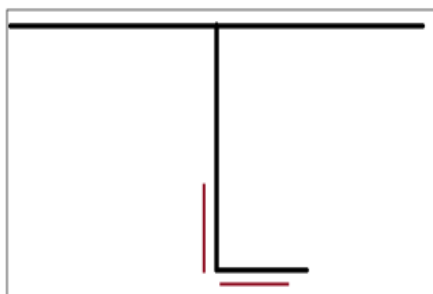
Πίνακας 3.18: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος				Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		W[1] (mm)	σ_{max} [1] (MPa)	W _{max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	0,86	3,82	160	5,28	103	132	64	124
0.4/0.9/50	1,06	4,22	192	5,76	129	92	93	52
0.4/0.7/143.7	0,67	3,95	167	5,37	110	16	100	130
0.4/0.7/50	0,82	4,3	196	5,86	136	21	100	53
0.6/0.9/143.7	1,29	3,69	152	5,27	79	128	66	118
0.6/0.9/50	1,58	4,13	186	5,73	116	91	93	51
0.6/0.7/143.7	1,00	3,82	160	5,35	88	14	100	124
0.6/0.7/50	1,23	4,23	191	5,83	121	20	100	52

Πίνακας 3.19: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την L_{steel}.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την L _{steel}					Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP			
	Αύξηση μάζας %	W [1] (%)	σ_{max} [1] (%)	W _{max} [2] (%)	σ [2] (%)	W [1] (%)	σ_{max} [1] (%)	W _{max} [2] (%)	σ [2] (%)
0.4/0.9/143.7	7,22	16,4	27,3	16,6	29,9	2,3	3,8	2,3	4,1
0.4/0.9/50	8,83	7,7	12,7	9,0	12,2	0,9	1,4	1,0	1,4
0.4/0.7/143.7	5,61	13,6	24,1	15,2	25,2	2,4	4,3	2,7	4,5
0.4/0.7/50	6,87	5,9	10,9	7,4	7,5	0,9	1,6	1,1	1,1
0.6/0.9/143.7	10,76	19,3	30,9	16,7	46,3	1,8	2,9	1,6	4,3
0.6/0.9/50	13,15	9,6	15,5	9,5	21,1	0,7	1,2	0,7	1,6
0.6/0.7/143.7	8,37	16,4	27,3	15,5	40,1	2,0	3,3	1,9	4,8
0.6/0.7/50	10,23	7,4	13,2	7,9	17,7	0,7	1,3	0,8	1,7

3.3.1.1.γ. Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "Angle"



A_{comp}/A_{steel}=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 608

Διαστάσεις σύνθετου (mm): 2x38x8

A_{comp}/A_{steel}=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 912

Διαστάσεις σύνθετου (mm): 2x38x12

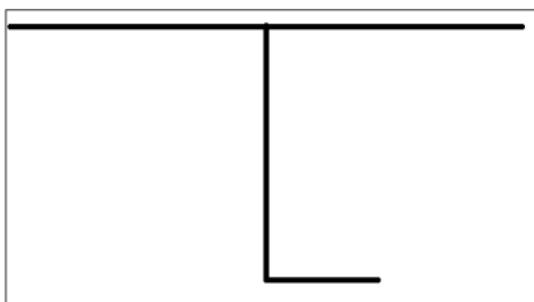
Πίνακας 3.20: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος				Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		W[1] (mm)	σ _{max} [1] (MPa)	W _{max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	0,86	3,87	163	5,28	117	119	71	122
0.4/0.9/50	1,05	4,25	194	5,85	136	82	100	51
0.4/0.7/143.7	0,67	4,01	170	5,48	122	18	100	127
0.4/0.7/50	0,82	4,34	199	5,97	140	18	100	52
0.6/0.9/143.7	1,29	3,65	145	4,94	106	122	70	113
0.6/0.9/50	1,58	4,12	183	5,64	128	90	94	50
0.6/0.7/143.7	1,00	3,8	153	5,18	114	13	100	119
0.6/0.7/50	1,23	4,23	189	5,72	133	18	100	51

Πίνακας 3.21: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την L_{steel}.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την L _{steel}					Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP			
	Αύξηση μάζας (%)	W [1] (%)	σ _{max} [1] (%)	W _{max} [2] (%)	σ [2] (%)	W [1] (%)	σ _{max} [1] (%)	W _{max} [2] (%)	σ [2] (%)
0.4/0.9/143.7	7,17	15,3	25,9	16,6	20,4	2,1	3,6	2,3	2,8
0.4/0.9/50	8,77	7,0	11,8	7,6	7,5	0,8	1,3	0,9	0,9
0.4/0.7/143.7	5,58	12,3	22,7	13,4	17,0	2,2	4,1	2,4	3,0
0.4/0.7/50	6,82	5,0	9,5	5,7	4,8	0,7	1,4	0,8	0,7
0.6/0.9/143.7	10,76	20,1	34,1	22,0	27,9	1,9	3,2	2,0	2,6
0.6/0.9/50	13,15	9,8	16,8	10,9	12,9	0,7	1,3	0,8	1,0
0.6/0.7/143.7	8,37	16,8	30,5	18,2	22,4	2,0	3,6	2,2	2,7
0.6/0.7/50	10,23	7,4	14,1	9,6	9,5	0,7	1,4	0,9	0,9

3.3.1.2. Ροπή αδράνειας $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$



Ροπή αδράνειας χαλύβδινου ενισχυτικού, I_y (cm^4)	460
Φόρτιση, P (kPa)	100

Διαστάσεις χαλύβδινου ενισχυτικού (mm)	130x130x11
Εμβαδόν χαλύβδινου Ενισχυτικού: (mm^2)	2740
Μήκος Χαλύβδινου ενισχυτικού (m)	2,5
Πυκνότητα Χάλυβα (kg/m^3)	7800
Μάζα χαλ. Ενισχυτικού ανά μέτρο μήκους	21,37

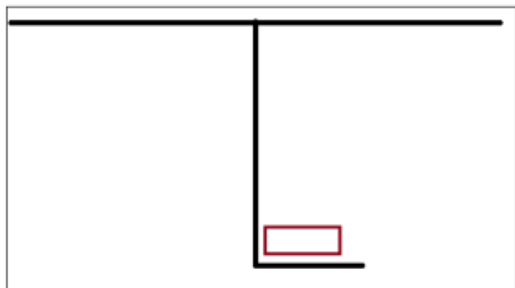
Μέτρο Ελαστικότητας CFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	143,70
Πυκνότητα UD-Carbon/epoxy (kg/m^3)	1570,00

Μέτρο Ελαστικότητας GFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	50,00
Πυκνότητα UD-Glass/epoxy (kg/m^3)	1920,00

Αποτελέσματα Γραμμικής Ανάλυσης

Τύπος	W [1] (mm)	σ_{\max} [1] (MPa)	W_{\max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)
L_steel	2,94	151	5,28	17

3.3.1.2.α. Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "Rectangular pultruded"



Acomp/Asteel=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 1096

Διαστάσεις σύνθετου (mm): 70x35x6

Acomp/Asteel=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 1644

Διαστάσεις σύνθετου (mm): 79x39,5x8

Πίνακας 3.22: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο μέρος				Εποξική Ρητίνη		FRP
		W[1] (mm)	σmax [1] (MPa)	Wmax [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ epoxy (MPa)	Pmax (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	0,86	4,1	183	5,81	110	98	86	112
0.4/0.9/50	1,06	4,35	203	6,04	133	71	100	44
0.4/0.7/143.7	0,67	4,2	188	5,8	117	37	100	115
0.4/0.7/50	0,82	4,42	206	6,01	137	36	100	44
0.6/0.9/143.7	1,30	4,03	179	5,72	101	94	90	109
0.6/0.9/50	1,59	4,3	200	5,93	129	61	100	43
0.6/0.7/143.7	1,01	4,16	184	5,88	108	37	100	113
0.6/0.7/50	1,23	4,38	203	6,03	136	37	100	44

Πίνακας 3.23: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την L_steel.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την L_steel					Μεταβολή % ανά μάζα πρόσθετου FRP			
	Αύξηση μάζας (%)	W [1] (%)	σmax [1] (%)	Wmax [2] (%)	σ [2] (%)	W [1] (%)	σmax [1] (%)	Wmax [2] (%)	σ [2] (%)
0.4/0.9/143.7	7,22	10,3	16,8	8,2	25,2	1,4	2,3	1,1	3,5
0.4/0.9/50	8,83	4,8	7,7	4,6	9,5	0,5	0,9	0,5	1,1
0.4/0.7/143.7	5,61	8,1	14,5	8,4	20,4	1,4	2,6	1,5	3,6
0.4/0.7/50	6,87	3,3	6,4	5,1	6,8	0,5	0,9	0,7	1,0
0.6/0.9/143.7	10,83	11,8	18,6	9,6	31,3	1,1	1,7	0,9	2,9
0.6/0.9/50	13,24	5,9	9,1	6,3	12,2	0,4	0,7	0,5	0,9
0.6/0.7/143.7	8,42	9,0	16,4	7,1	26,5	1,1	1,9	0,8	3,2
0.6/0.7/50	10,30	4,2	7,7	4,7	7,5	0,4	0,8	0,5	0,7

3.3.1.2.β. Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "bottom"



A_{comp}/A_{steel}=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου
(mm²): 1096
Διαστάσεις
σύνθετου (mm): 91x12

A_{comp}/A_{steel}=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου
(mm²): 1644
Διαστάσεις
σύνθετου (mm): 130x12,6

Πίνακας 3.24: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος				Εποξική ρητίνη		FRP
		W[1] (mm)	σ _{max} [1] (MPa)	W _{max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	1,55	2,53	114	4,48	2	90	94	88
0.4/0.9/50	1,89	2,76	135	4,91	11	62	100	37
0.4/0.7/143.7	1,20	2,6	119	4,62	5	14	100	92
0.4/0.7/50	1,47	2,8	138	4,99	12	17	100	37
0.6/0.9/143.7	2,32	2,5	113	4,48	2	92	92	88
0.6/0.9/50	2,84	2,7	133	4,84	7	64	100	36
0.6/0.7/143.7	1,81	2,57	118	4,61	5	14	100	91
0.6/0.7/50	2,2	2,78	136	4,93	9	17	100	37

Πίνακας 3.25: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την L_{steel}.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την L _{steel}					Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP			
	Αύξηση μάζας (%)	W [1] (%)	σ _{max} [1] (%)	W _{max} [2] (%)	σ [2] (%)	W [1] (%)	σ _{max} [1] (%)	W _{max} [2] (%)	σ [2] (%)
0.4/0.9/143.7	7,25	13,9	24,5	15,2	88,2	1,9	3,4	2,1	12,2
0.4/0.9/50	8,86	6,1	10,6	7,0	35,3	0,7	1,2	0,8	4,0
0.4/0.7/143.7	5,64	11,6	21,2	12,5	70,6	2,1	3,8	2,2	12,5
0.4/0.7/50	6,89	4,8	8,6	5,5	29,4	0,7	1,2	0,8	4,3
0.6/0.9/143.7	10,87	15,0	25,2	15,2	88,2	1,4	2,3	1,4	8,1
0.6/0.9/50	13,29	8,2	11,9	8,3	58,8	0,6	0,9	0,6	4,4
0.6/0.7/143.7	8,45	12,60	21,9	12,7	70,6	1,5	2,6	1,5	8,3
0.6/0.7/50	10,34	5,4	9,9	6,6	47,1	0,5	1,0	0,6	4,6

3.3.1.2.γ. Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "Angle"



Acomp/Asteel=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου
(mm²): 1096
Διαστάσεις
σύνθετου (mm): 2X45.6X12

Acomp/Asteel=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου
(mm²): 1644
Διαστάσεις
σύνθετου (mm): 2x68.5x12

Πίνακας 3.26: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

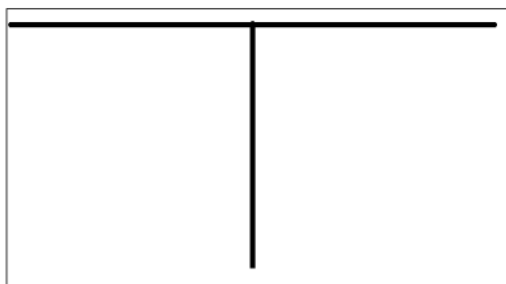
Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος				Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		W[1] (mm)	σ_{\max} [1] (MPa)	W_{\max} [2] (mm)	σ [2] (MPa)	σ epoxy (MPa)	P_{\max} (kPa)	
0.4/0.9/143.7	1,55	2,45	106	4,13	16	84	100	82
0.4/0.9/50	1,89	2,72	130	4,75	17	61	100	35
0.4/0.7/143.7	1,20	2,54	111	4,37	16	9	100	86
0.4/0.7/50	1,47	2,78	133	4,88	18	15	100	36
0.6/0.9/143.7	2,32	2,38	100	4,09	11	82	100	77
0.6/0.9/50	2,84	2,67	126	4,67	15	60	100	34
0.6/0.7/143.7	1,81	2,47	106	4,27	13	7	100	82
0.6/0.7/50	2,21	2,74	130	4,81	16	14	100	35

Πίνακας 3.27: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την L_steel.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την L_steel					Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP			
	Αύξηση μάζας (%)	W [1] (%)	σ_{\max} [1] (%)	W_{\max} [2] (%)	σ [2] (%)	W [1] (%)	σ_{\max} [1] (%)	W_{\max} [2] (%)	σ [2] (%)
0.4/0.9/143.7	7,25	16,7	29,8	21,8	5,9	2,3	4,1	3,0	0,8
0.4/0.9/50	8,86	7,5	13,9	10,0	0,0	0,8	1,6	1,1	0,0
0.4/0.7/143.7	5,64	13,6	26,5	17,2	5,9	2,4	4,7	3,1	1,0
0.4/0.7/50	6,89	5,4	11,9	7,6	5,9	0,8	1,7	1,1	-0,9
0.6/0.9/143.7	10,87	19,0	33,8	22,5	35,3	1,8	3,1	2,1	3,2
0.6/0.9/50	13,29	9,2	16,6	11,6	11,8	0,7	1,2	0,9	0,9
0.6/0.7/143.7	8,45	16,0	29,8	19,1	23,5	1,9	3,5	2,3	2,8
0.6/0.7/50	10,34	6,8	13,9	8,9	5,9	0,7	1,3	0,9	0,6

3.3.2. Διερεύνηση για Υβριδικά ενισχυτικά τύπου flat bar

3.3.2.1. Ροπή αδράνειας $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$



Ροπή αδράνειας χαλύβδινου ενισχυτικού, I_y (cm^4)	228,4
Φόρτιση, P (kPa)	100

Διαστάσεις χαλύβδινου ενισχυτικού (mm)	150x8
Εμβαδόν χαλύβδινου Ενισχυτικού (mm^2)	1200
Μήκος Χαλύβδινου ενισχυτικού (m)	2,5
Πυκνότητα Χάλυβα (kg/m^3)	7800
Μάζα χαλ. Ενισχυτικού ανά μέτρο μήκους	9,36

Μέτρο Ελαστικότητας CFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	143,70
Πυκνότητα UD-Carbon/epoxy (kg/m^3)	1570,00

Μέτρο Ελαστικότητας GFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	50,00
Πυκνότητα UD-Glass/epoxy (kg/m^3)	1920,00

Αποτελέσματα Γραμμικής Ανάλυσης		
Τύπος	W_{\max} (mm)	σ_{\max} (MPa)
Flat_bar	5,07	333

3.3.2.1.α. Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "single side"



Acomp/Asteel=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 480

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 40x12:

Acomp/Asteel=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 720

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 60x12

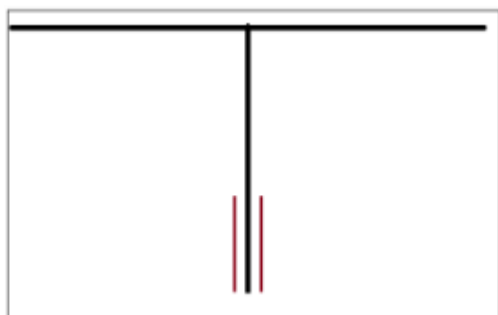
Πίνακας 3.28: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		σ_{\max} (MPa)	W_{\max} (mm)	σ epoxy (MPa)	P_{\max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	1,55	106	4,13	84	100	82
0.4/0.9/50	1,89	130	4,75	61	100	35
0.4/0.7/143.7	1,20	111	4,37	9	100	86
0.4/0.7/50	1,47	133	4,88	15	100	36
0.6/0.9/143.7	2,32	100	4,09	82	100	77
0.6/0.9/50	2,84	126	4,67	60	100	34
0.6/0.7/143.7	1,81	106	4,27	7	100	82
0.6/0.7/50	2,21	130	4,81	14	100	35

Πίνακας 3.29: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την flat_bar.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την flat_bar			Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP	
	Αύξηση μάζας (%)	σ_{\max} (%)	W_{\max} (%)	σ_{\max} (%)	W_{\max} (%)
0.4/0.9/143.7	7,25	17,9	28,8	2,5	4,0
0.4/0.9/50	8,86	8,5	13,5	1,0	1,5
0.4/0.7/143.7	5,64	15,6	24,9	2,8	4,4
0.4/0.7/50	6,89	6,5	11,1	0,9	1,6
0.6/0.9/143.7	10,87	21,7	33,3	2,0	3,1
0.6/0.9/50	13,29	10,5	16,2	0,8	1,2
0.6/0.7/143.7	8,45	19,1	29,7	2,3	3,5
0.6/0.7/50	10,34	8,1	13,8	0,8	1,3

3.3.2.1. β. "Υβριδική ενίσχυση τύπου "double side"



Acomp/Asteel=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 480

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 2x20x12

Acomp/Asteel=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 720

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 2x30x12

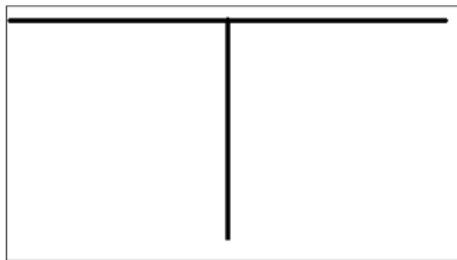
Πίνακας 3.30: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		σ_{\max} (MPa)	W_{\max} (mm)	σ epoxy (MPa)	P_{\max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	0,68	3,96	224	160	53	155
0.4/0.9/50	0,83	4,54	281	115	74	68
0.4/0.7/143.7	0,53	4,16	238	21	100	164
0.4/0.7/50	0,65	4,68	291	28	100	70
0.6/0.9/143.7	1,02	3,71	201	146	58	139
0.6/0.9/50	1,24	4,38	265	111	77	64
0.6/0.7/143.7	0,79	3,92	216	14	100	149
0.6/0.7/50	0,97	4,55	277	25	100	67

Πίνακας 3.31: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την flat_bar.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την flat_bar			Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP	
	Αύξηση μάζας (%)	σ_{\max} (%)	W_{\max} (%)	σ_{\max} (%)	W_{\max} (%)
0.4/0.9/143.7	7,25	21,9	32,7	3,0	4,5
0.4/0.9/50	8,86	10,5	15,6	1,2	1,8
0.4/0.7/143.7	5,64	17,9	28,5	3,2	5,1
0.4/0.7/50	6,89	7,7	12,6	1,1	1,8
0.6/0.9/143.7	10,87	26,8	39,6	2,5	3,6
0.6/0.9/50	13,29	13,6	20,4	1,0	1,5
0.6/0.7/143.7	8,45	22,7	35,1	2,7	4,2
0.6/0.7/50	10,34	10,3	16,8	1,0	1,6

3.3.2.2. Ροπή αδράνειας $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$



Ροπή αδράνειας χαλύβδινου ενισχυτικού, I_y (cm^4)	460
Φόρτιση, P (kPa)	100

Διαστάσεις χαλύβδινου ενισχυτικού (mm)	177x10
Εμβαδόν χαλύβδινου Ενισχυτικού (mm^2)	1770
Μήκος Χαλύβδινου ενισχυτικού (m)	2,5
Πυκνότητα Χάλυβα (kg/m^3)	7800
Μάζα χαλ. Ενισχυτικού ανά μέτρο μήκους	13,81

Μέτρο Ελαστικότητας CFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	143,70
Πυκνότητα UD-Carbon/epoxy (kg/m^3)	1570,00

Μέτρο Ελαστικότητας GFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	50,00
Πυκνότητα UD-Glass/epoxy (kg/m^3)	1920,00

Αποτελέσματα Γραμμικής Ανάλυσης		
Τύπος	W_{\max} (mm)	σ_{\max} (MPa)
Flat_bar	2,77	198

3.3.2.2.α.Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "single side"



A_{comp}/A_{steel}=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 708:

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 59x12:

A_{comp}/A_{steel}=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 1062

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 88,5x12:

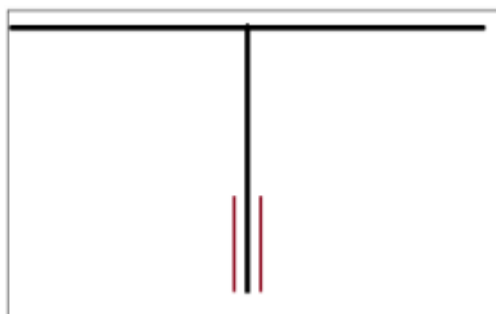
Πίνακας 3.33: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		σ _{max} (MPa)	W _{max} (mm)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	1,00	2,34	145	90	94	100
0.4/0.9/50	1,22	2,56	175	66	100	42
0.4/0.7/143.7	0,78	2,4	150	9	100	103
0.4/0.7/50	0,95	2,61	179	14	100	43
0.6/0.9/143.7	1,50	2,28	137	86	100	95
0.6/0.9/50	1,84	2,54	169	65	100	41
0.6/0.7/143.7	1,17	2,32	143,9	12	100	99
0.6/0.7/50	1,43	2,59	174	13	100	42

Πίνακας 3.34: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την flat_bar.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την flat_bar			Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP	
	Αύξηση μάζας (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)
0.4/0.9/143.7	7,25	15,5	26,8	2,1	3,7
0.4/0.9/50	8,86	7,6	11,6	0,9	1,3
0.4/0.7/143.7	5,64	13,4	24,2	2,4	4,3
0.4/0.7/50	6,89	5,8	9,6	0,8	1,4
0.6/0.9/143.7	10,87	17,7	30,8	1,6	2,8
0.6/0.9/50	13,29	8,3	14,6	0,6	1,1
0.6/0.7/143.7	8,45	16,2	27,3	1,9	3,2
0.6/0.7/50	10,34	6,5	12,1	0,6	1,2

3.3.2.2.β. Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "double side"



A_{comp}/A_{steel}=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 708

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 2x29.5x12

A_{comp}/A_{steel}=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 1062

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 2x44.3x12

Πίνακας 3.35: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

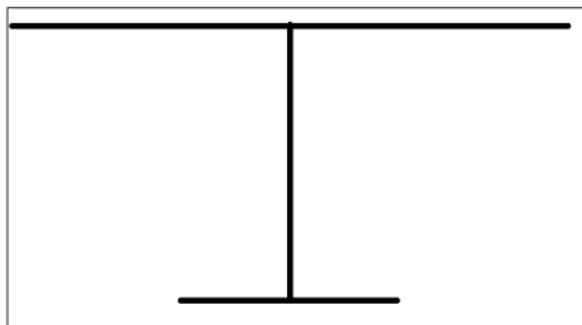
Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		σ _{max} (MPa)	W _{max} (mm)	σ εροxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	1,00	2,21	135	96	89	93
0.4/0.9/50	1,22	2,51	169	70	100	41
0.4/0.7/143.7	0,78	2,31	143	13	100	99
0.4/0.7/50	0,95	2,58	174	17	100	42
0.6/0.9/143.7	1,50	2,1	123	91	93	85
0.6/0.9/50	1,84	2,44	160	69	100	39
0.6/0.7/143.7	1,17	2,21	131	9	100	91
0.6/0.7/50	1,43	2,52	167	16	100	40

Πίνακας 3.36: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την flat_bar.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την flat_bar			Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP	
	Αύξηση μάζας (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)
0.4/0.9/143.7	7,25	20,2	31,8	2,8	4,4
0.4/0.9/50	8,86	9,4	14,6	1,1	1,7
0.4/0.7/143.7	5,64	16,6	27,8	2,9	4,9
0.4/0.7/50	6,89	6,9	12,1	1,0	1,8
0.6/0.9/143.7	10,88	24,2	37,9	2,2	3,5
0.6/0.9/50	13,30	11,9	19,2	0,9	1,4
0.6/0.7/143.7	8,46	20,2	33,8	2,4	4,0
0.6/0.7/50	10,35	9,0	15,7	0,9	1,5

3.3.3. Διερεύνηση για Υβριδικά ενισχυτικά τύπου T

3.3.3.1. Ροπή αδράνειας $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$



Ροπή αδράνειας χαλύβδινου ενισχυτικού, I_y (cm^4)	228,4
Φόρτιση, P (kPa)	100

Διαστάσεις χαλύβδινου ενισχυτικού (mm)	120x80x8
Εμβαδόν χαλύβδινου Ενισχυτικού (mm^2)	1536
Μήκος Χαλύβδινου ενισχυτικού (m)	2,5
Πυκνότητα Χάλυβα (kg/m^3)	7800
Μάζα χαλ. Ενισχυτικού ανά μέτρο μήκους	11,98

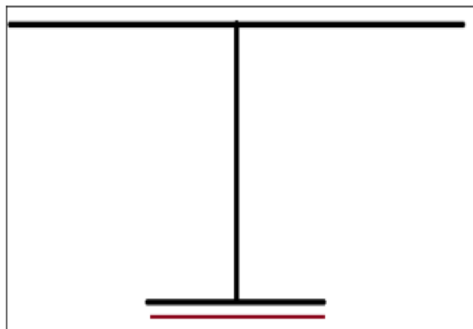
Μέτρο Ελαστικότητας CFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	143,70
Πυκνότητα UD-Carbon/epoxy (kg/m^3)	1570,00

Μέτρο Ελαστικότητας GFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	50,00
Πυκνότητα UD-Glass/epoxy (kg/m^3)	1920,00

Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης

Τύπος	W_{\max} (mm)	σ_{\max} (MPa)
T_steel	4,15	193

3.3.3. 1.α.Υβριδικό ενισχυτικό τύπου “bottom”



A_{comp}/A_{steel}=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 616

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 80x7,7

A_{comp}/A_{steel}=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 920

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 80x12 (11.5)

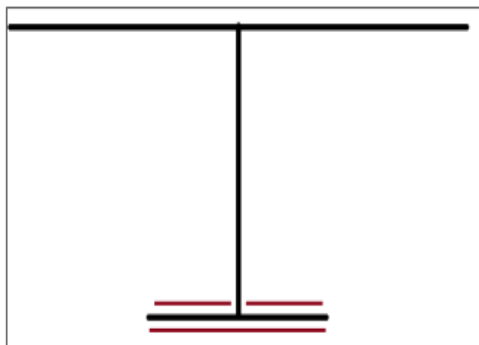
Πίνακας 3.37: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		σ _{max} (MPa)	W _{max} (mm)	σ εποxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	0,87	3,46	140	96	89	105
0.4/0.9/50	1,06	3,84	169	65	100	44
0.4/0.7/143.7	0,68	3,62	147	17	100	111
0.4/0.7/50	0,83	3,93	174	18	100	45
0.6/0.9/143.7	1,30	3,25	124	98	87	96
0.6/0.9/50	1,59	3,71	159	72	100	43
0.6/0.7/143.7	1,01	3,4	132	12	100	102
0.6/0.7/50	1,24	3,92	165	17	100	45

Πίνακας 3.38: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την T_{steel}.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την T _{steel}			Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP	
	Αύξηση μάζας (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)
0.4/0.9/143.7	7,27	16,6	27,5	2,3	3,8
0.4/0.9/50	8,88	7,5	12,4	0,8	1,4
0.4/0.7/143.7	5,65	12,8	23,8	2,3	4,2
0.4/0.7/50	6,91	5,3	9,8	0,8	1,4
0.6/0.9/143.7	10,85	21,7	35,8	2,0	3,3
0.6/0.9/50	13,27	10,6	17,6	0,8	1,3
0.6/0.7/143.7	8,44	18,1	31,6	2,1	3,7
0.6/0.7/50	10,32	5,5	14,5	0,5	1,4

3.3.3.1.β.Υβριδικό ενισχυτικό τύπου “double horizontal bottom”



A_{comp}/A_{steel}=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 608

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 80x4 + 2x36x4

A_{comp}/A_{steel}=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 912

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 80x6 + 2x36x6

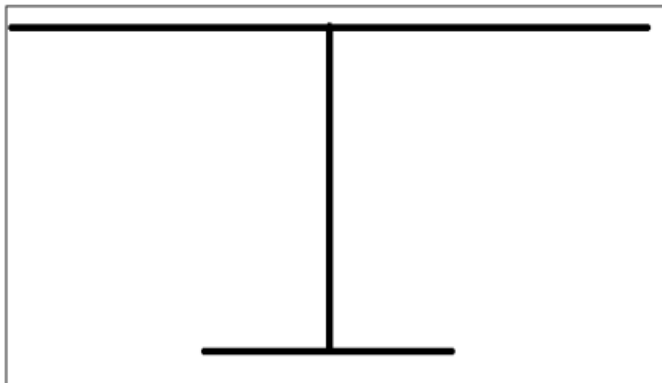
Πίνακας 3.39: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		σ _{max} (MPa)	W _{max} (mm)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	0,86	3,52	144	76	100	105
0.4/0.9/50	1,05	3,88	172	50	100	43
0.4/0.7/143.7	0,67	3,68	152	17	100	110
0.4/0.7/50	0,82	3,96	176	14	100	44
0.6/0.9/143.7	1,29	3,34	129	81	100	96
0.6/0.9/50	1,58	3,77	163	58	100	42
0.6/0.7/143.7	1,00	3,5	139	14	100	103
0.6/0.7/50	1,23	3,87	168	15	100	44

Πίνακας 3.40: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την T_{steel}.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την T _{steel}			Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP	
	Αύξηση μάζας (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)
0.4/0.9/143.7	7,17	15,2	25,4	2,1	3,5
0.4/0.9/50	8,77	6,5	10,9	0,7	1,2
0.4/0.7/143.7	5,58	11,3	21,2	2,0	3,8
0.4/0.7/50	6,82	4,6	8,8	0,7	1,3
0.6/0.9/143.7	10,76	19,5	33,2	1,8	3,1
0.6/0.9/50	13,15	9,2	15,5	0,7	1,2
0.6/0.7/143.7	8,37	15,7	28,0	1,9	3,3
0.6/0.7/50	10,23	6,7	13,0	0,7	1,3

3.3.3.2. Ροπή αδράνειας $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$



Ροπή αδράνειας χαλύβδινου ενισχυτικού, I_y (cm^4)	460
Φόρτιση, P (kPa)	100

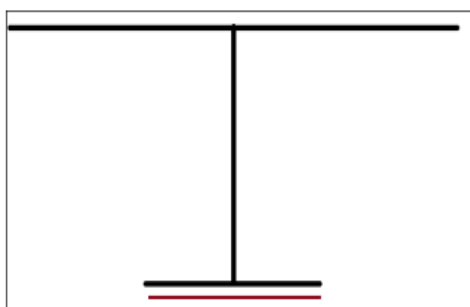
Διαστάσεις χαλύβδινου ενισχυτικού (mm)	130x130x11
Εμβαδόν χαλύβδινου Ενισχυτικού (mm^2)	2740
Μήκος Χαλύβδινου ενισχυτικού (m)	2,5
Πυκνότητα Χάλυβα (kg/m^3)	7800
Μάζα χαλ. Ενισχυτικού ανά μέτρο μήκους	21,37

Μέτρο Ελαστικότητας CFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	143,70
Πυκνότητα UD-Carbon/epoxy (kg/m^3)	1570,00

Μέτρο Ελαστικότητας GFRP παράλληλα στις ίνες (GPa)	50,00
Πυκνότητα UD-Glass/epoxy (kg/m^3)	1920,00

Αποτελέσματα Γραμμικής Ανάλυσης		
Τύπος	W_{\max} (mm)	σ_{\max} (MPa)
T_steel	2,23	94

3.3.3.2.α.Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "bottom"



A_{comp}/A_{steel}=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 1092

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 130x8,4

A_{comp}/A_{steel}=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 1638

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 130x12,6

Πίνακας 3.41: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		σ_{\max} (MPa)	W_{\max} (mm)	σ epoxy (MPa)	P_{\max} (kPa)	σ_{FRP} (MPa)
0.4/0.9/143.7	1,54	1,94	70	47	100	53
0.4/0.9/50	1,89	2,11	83	32	100	22
0.4/0.7/143.7	1,20	2,00	73	9	100	56
0.4/0.7/50	1,47	2,14	85	9	100	23
0.6/0.9/143.7	2,31	1,85	62	50	100	50
0.6/0.9/50	2,83	2,05	79	36	100	22
0.6/0.7/143.7	1,80	1,90	66	6	100	53
0.6/0.7/50	2,20	2,09	81	9	100	23

Πίνακας 3.42: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την T_{steel}.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την T _{steel}			Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP	
	Αύξηση μάζας (%)	σ_{\max} (%)	W_{\max} (%)	σ_{\max} (%)	W_{\max} (%)
0.4/0.9/143.7	7,22	13,0	25,5	1,8	3,5
0.4/0.9/50	8,83	5,4	11,7	0,6	1,3
0.4/0.7/143.7	5,62	10,3	22,3	1,8	4,0
0.4/0.7/50	6,87	4,0	9,6	0,6	1,4
0.6/0.9/143.7	10,83	17,0	34,0	1,6	3,1
0.6/0.9/50	13,24	8,1	16,0	0,6	1,2
0.6/0.7/143.7	8,42	14,8	29,8	1,8	3,5
0.6/0.7/50	10,30	6,3	13,8	0,6	1,3

3.3.3.2.β.Υβριδικό ενισχυτικό τύπου "double horizontal bottom"



A_{comp}/A_{steel}=0,4:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²) 1096

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 130x4,4 + 2x59,5x4,4

A_{comp}/A_{steel}=0,6:

Εμβαδόν σύνθετου (mm²): 1644

Διαστάσεις σύνθετου (mm) 130x6,6 + 2x59,5x6,6

Πίνακας 3.43: Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων παραμετρικής μελέτης.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μάζα FRP/μέτρο μήκους (kg/m)	Χαλύβδινο Μέρος		Εποξική ρητίνη σύνδεσης		FRP
		σ _{max} (MPa)	W _{max} (mm)	σ epoxy (MPa)	P _{max} (kPa)	σ FRP (MPa)
0.4/0.9/143.7	1,55	1,97	72	39	100	53
0.4/0.9/50	1,89	2,12	85	26	100	22
0.4/0.7/143.7	1,20	2,04	76	9	100	55
0.4/0.7/50	1,47	2,16	87	7	100	22
0.6/0.9/143.7	2,32	1,89	65	42	100	49
0.6/0.9/50	2,84	2,08	81	29	100	21
0.6/0.7/143.7	1,81	1,97	70	8	100	52
0.6/0.7/50	2,21	2,12	84	8	100	22

Πίνακας 3.44: Ποσοστιαία Μεταβολή σε σύγκριση με την T_{steel}.

Συνδυασμός Παραμέτρων	Μεταβολή % σε σύγκριση με την T _{steel}			Μεταβολή % ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας FRP	
	Αύξηση μάζας (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)	σ _{max} (%)	W _{max} (%)
0.4/0.9/143.7	7,25	11,7	23,4	1,6	3,2
0.4/0.9/50	8,86	4,9	9,6	0,6	1,1
0.4/0.7/143.7	5,64	8,5	19,1	1,5	3,4
0.4/0.7/50	6,89	3,1	7,4	0,5	1,1
0.6/0.9/143.7	10,87	15,2	30,9	1,4	2,8
0.6/0.9/50	13,29	6,7	13,8	0,5	1,0
0.6/0.7/143.7	8,45	11,7	25,5	1,4	3,0
0.6/0.7/50	10,34	4,9	10,6	4,8	1,0

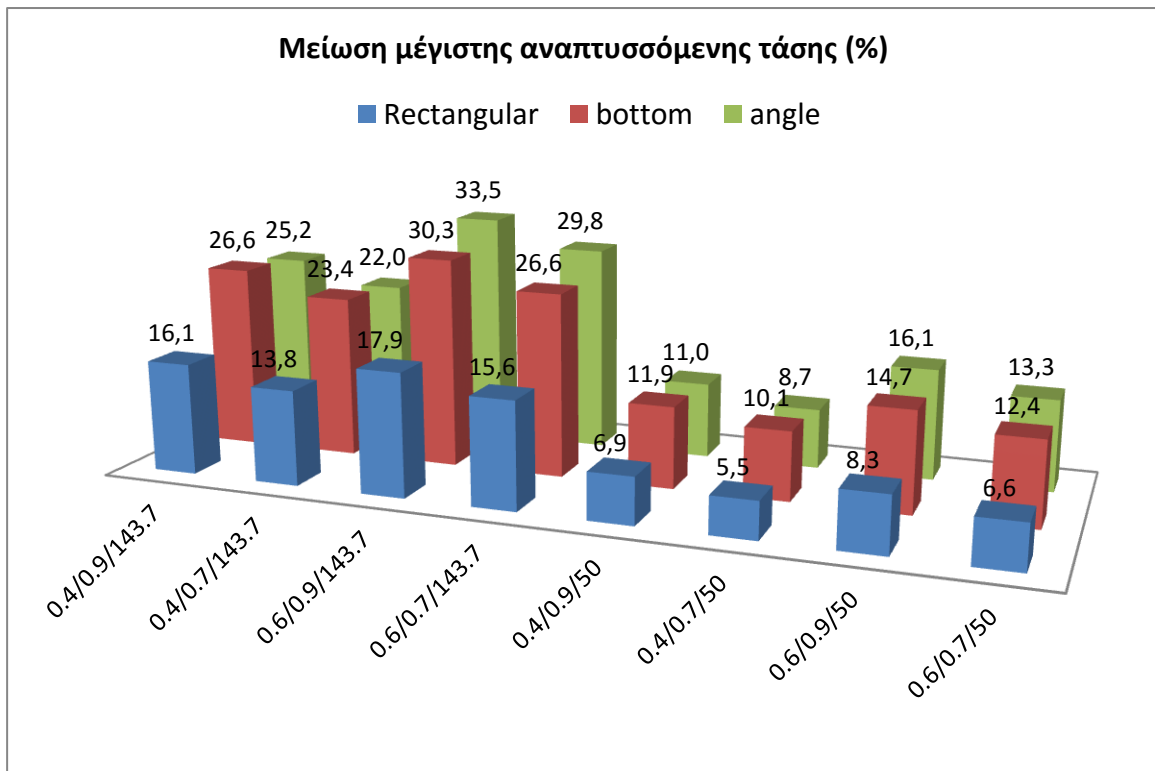
3.3.4 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης καταρτίζονται τα ραβδογράμματα των Σχημάτων 3.8 – 3.22. Στα ραβδογράμματα παρουσιάζονται για κάθε συνδυασμό παραμέτρων τα εξής μεγέθη :

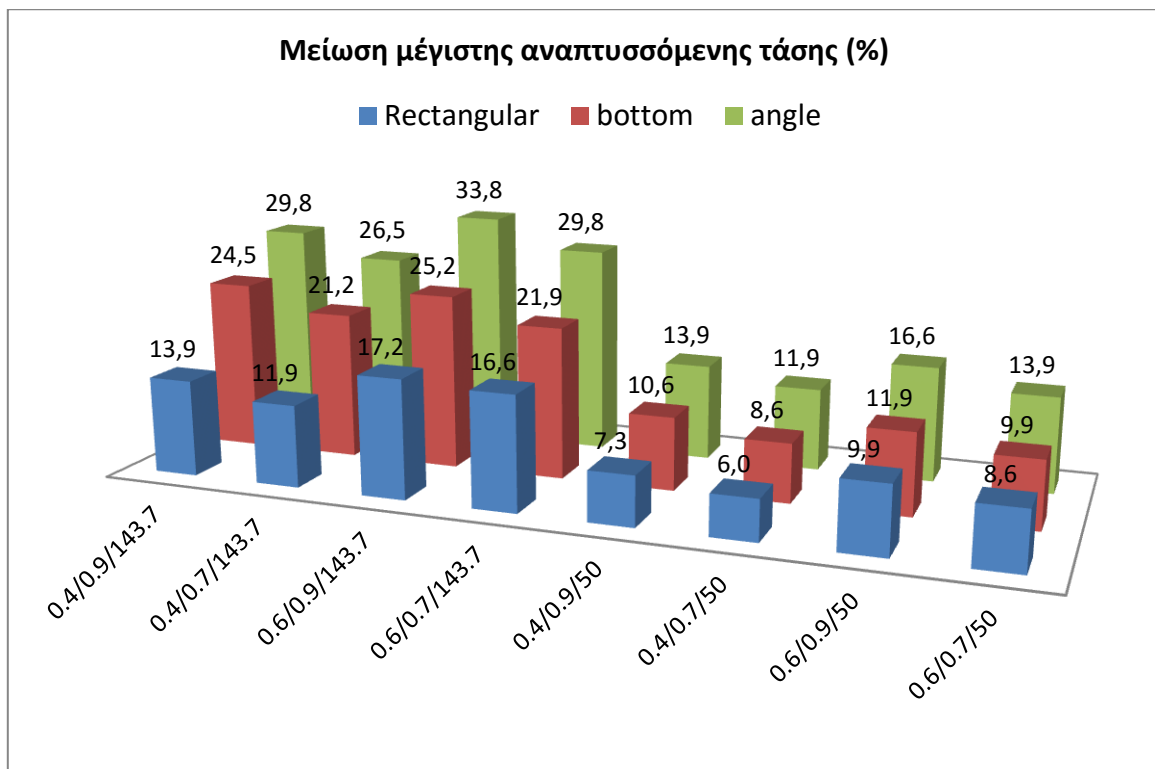
1. Η % μείωση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (σ_{\max}) συγκριτικά με το αντίστοιχο χαλύβδινο ενισχυτικό της ίδιας τιμής ροπής αδράνειας.
2. Η % μείωση της (σ_{\max}) διαιρεμένη διά της ποσοστιαίας % αύξησης στη μάζα της ενίσχυσης λόγω της προσθήκης του σύνθετου υλικού.
3. Η % μείωση του βέλους κάμψης (W_{\max}) συγκριτικά με το αντίστοιχο χαλύβδινο ενισχυτικό της ίδιας τιμής ροπής αδράνειας.
4. Η αναπτυσσόμενη τάση Von Mises στην εποξική ρητίνη (σ_{epoxy}).
5. Η αναπτυσσόμενη τάση στο σύνθετο κατά τη διεύθυνση των ινών του (σ_{FRP}).

Σημειώνεται σε κάθε περίπτωση η ροπή αδράνειας του ενισχυτικού. Το πρόσημο (-) παραλείπεται στις περιπτώσεις όπου το ραβδόγραμμα παριστά τη μείωση κάποιου μεγέθους, για λόγους καλύτερης εποπτίας των αποτελεσμάτων.

3.3.4.1. Υβριδικά ενισχυτικά τύπου L

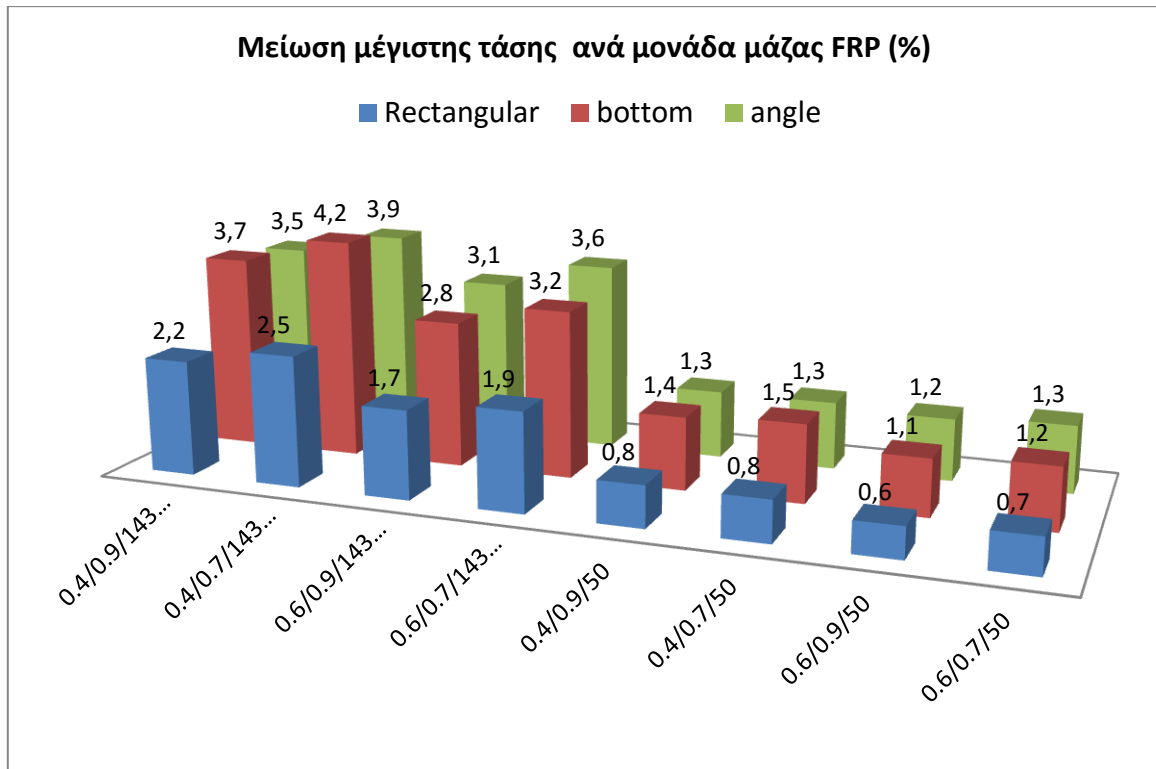


α.

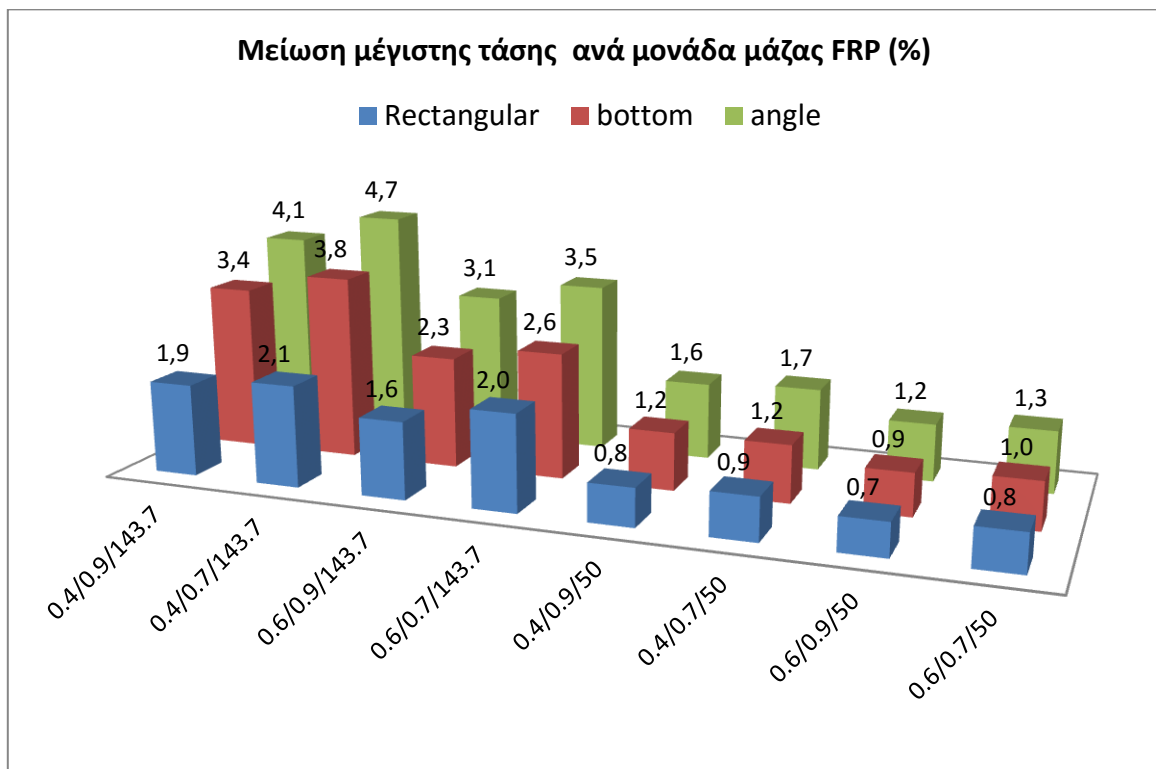


β.

Σχήμα 3.8: Μείωση % της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

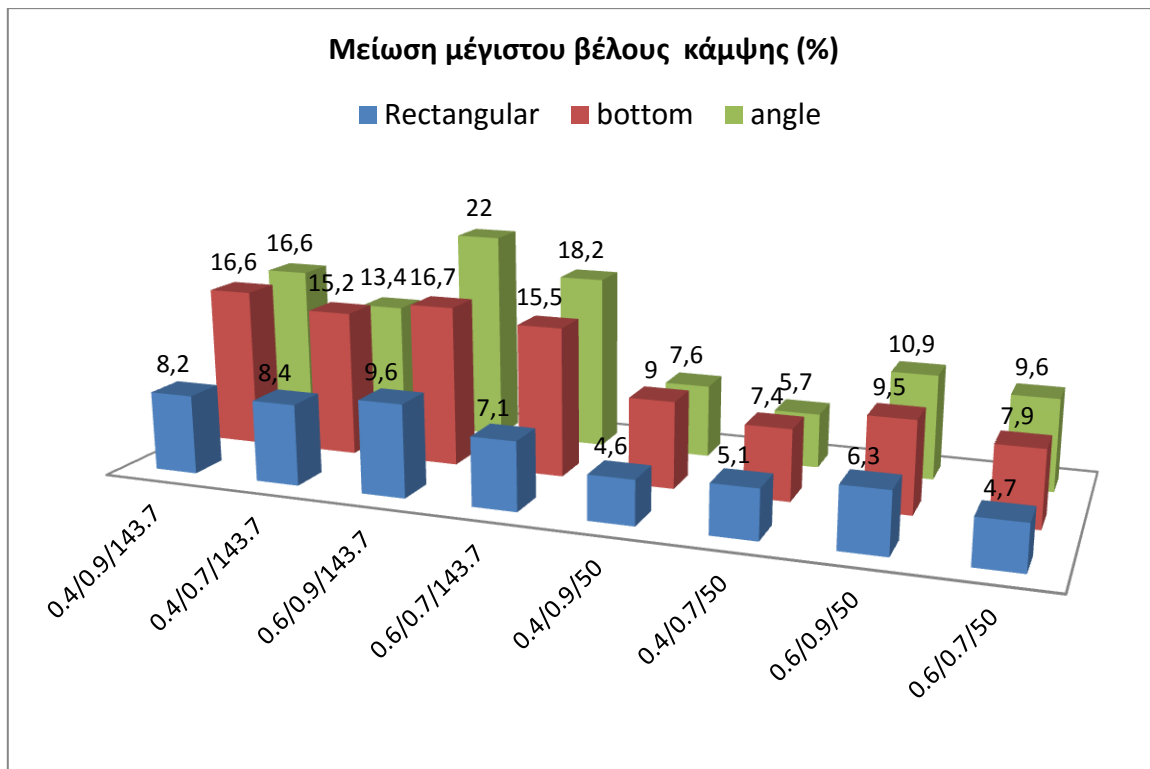


α.

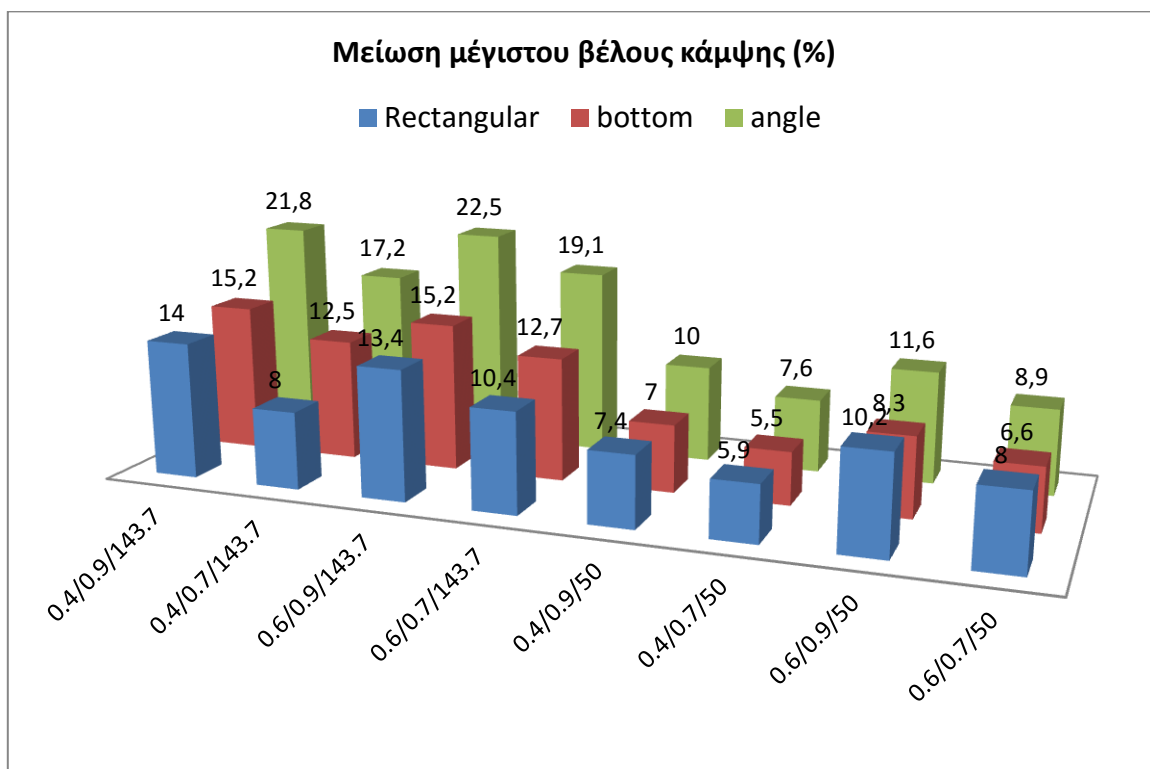


β.

Σχήμα 3.9: Μείωση % της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας λόγω προσθήκης FRP, α.για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

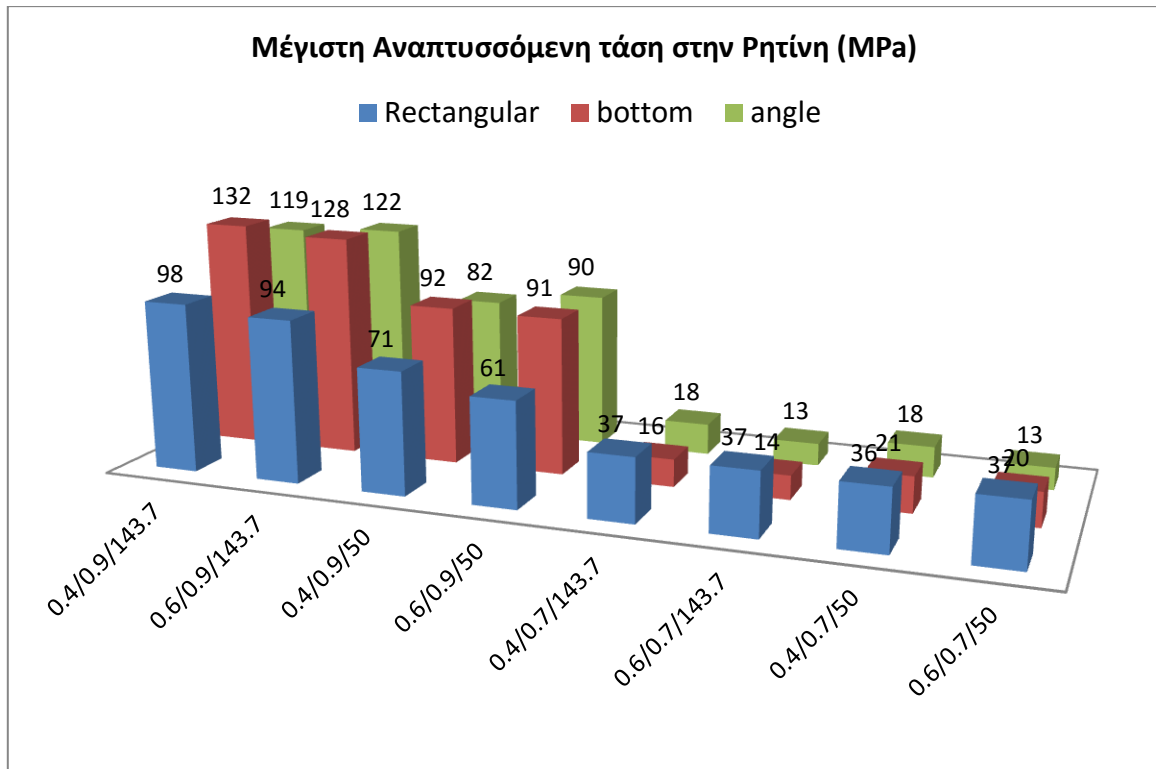


α.

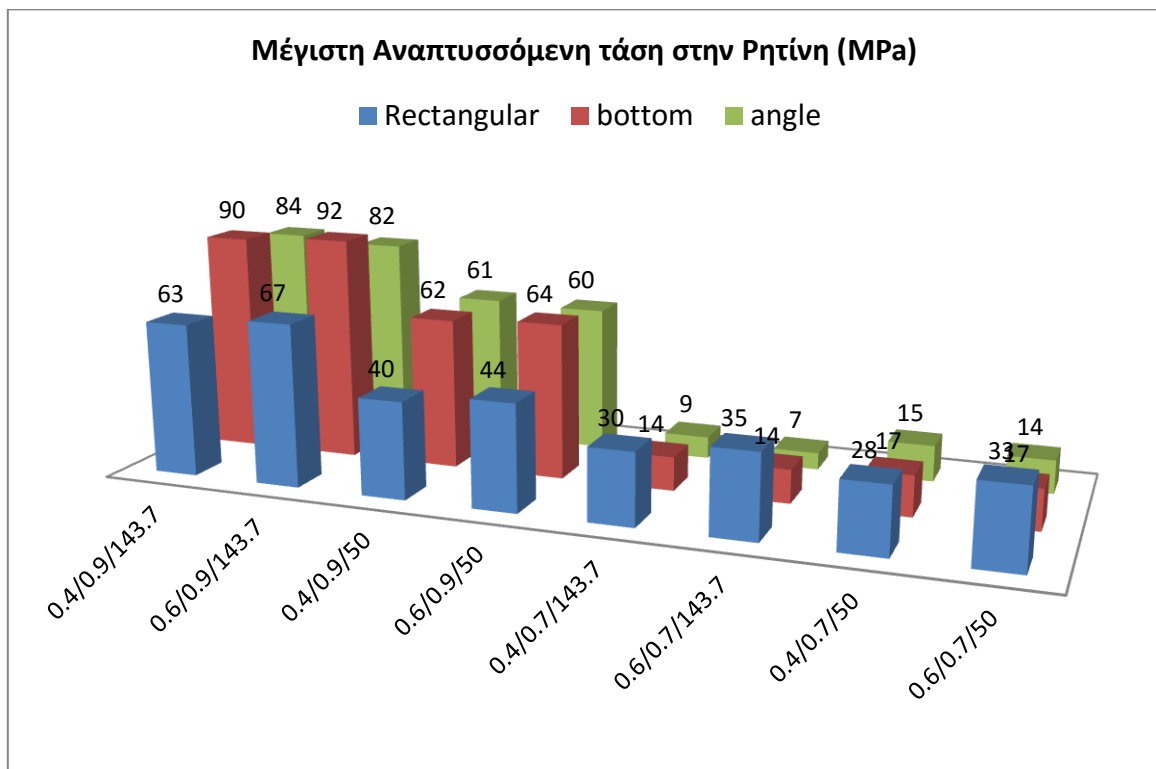


β.

Σχήμα 3.10: Μείωση % της τιμής του βέλους κάμψης, α.για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

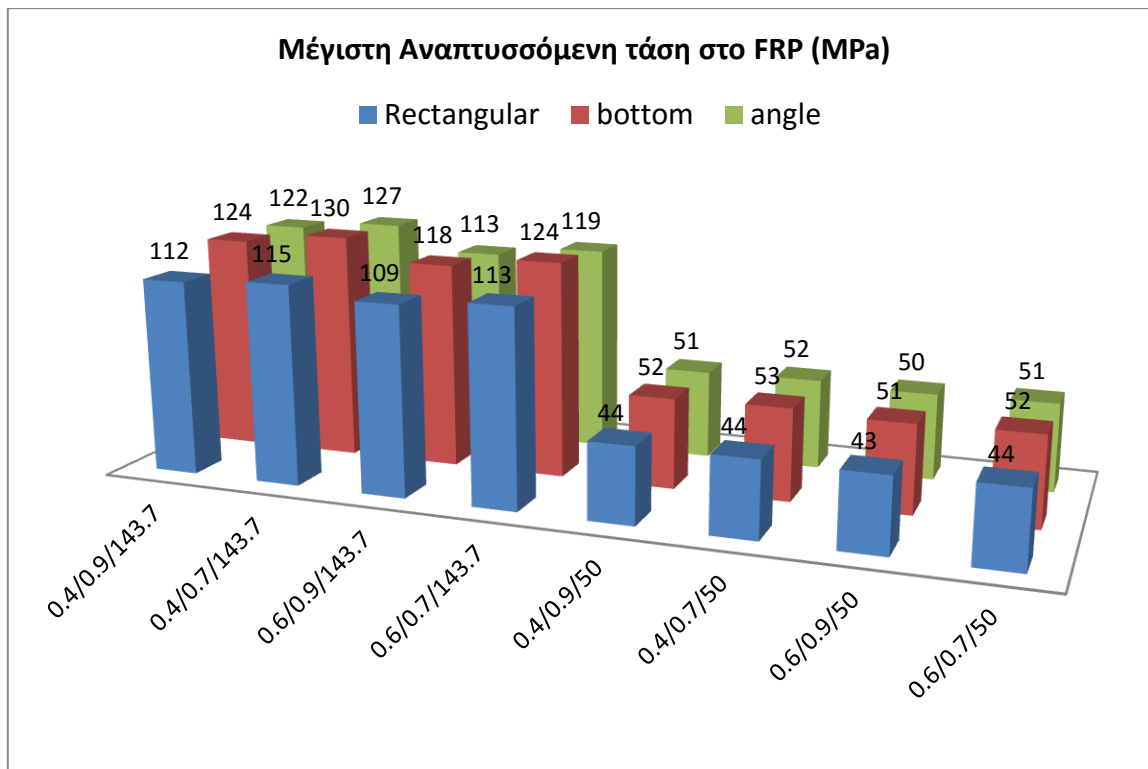


α.

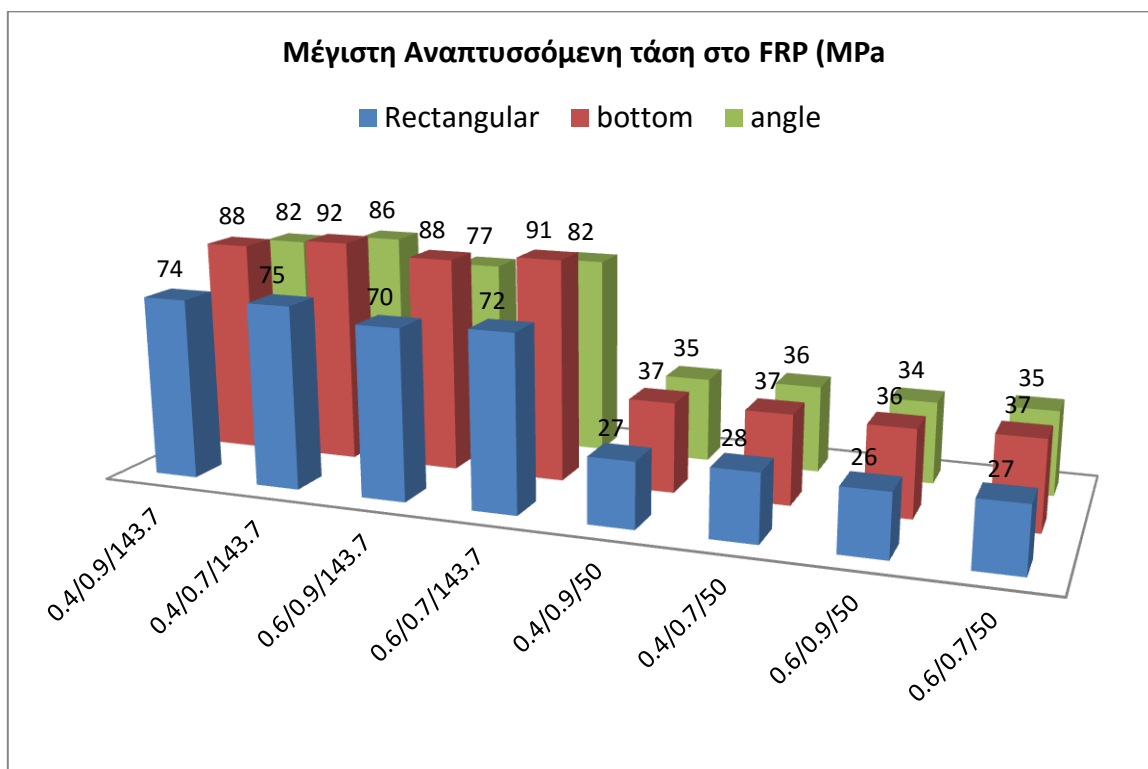


β.

Σχήμα 3.11: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης (MPa)
 α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.



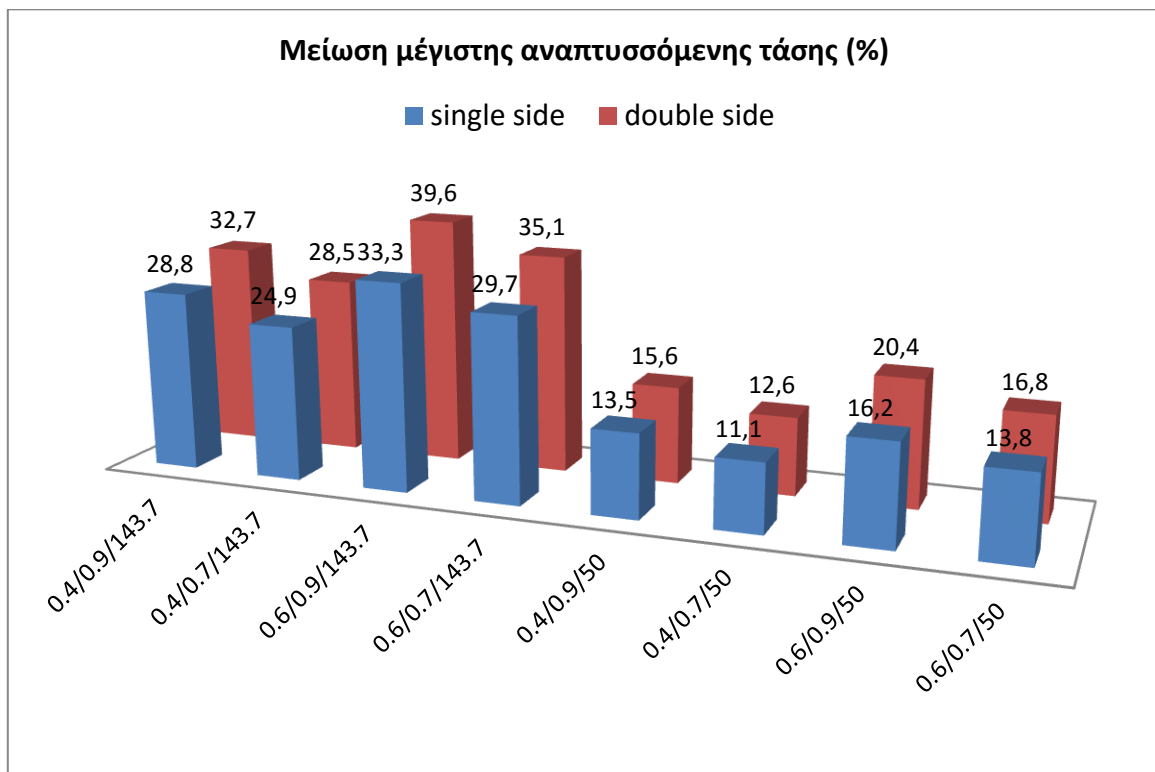
α.



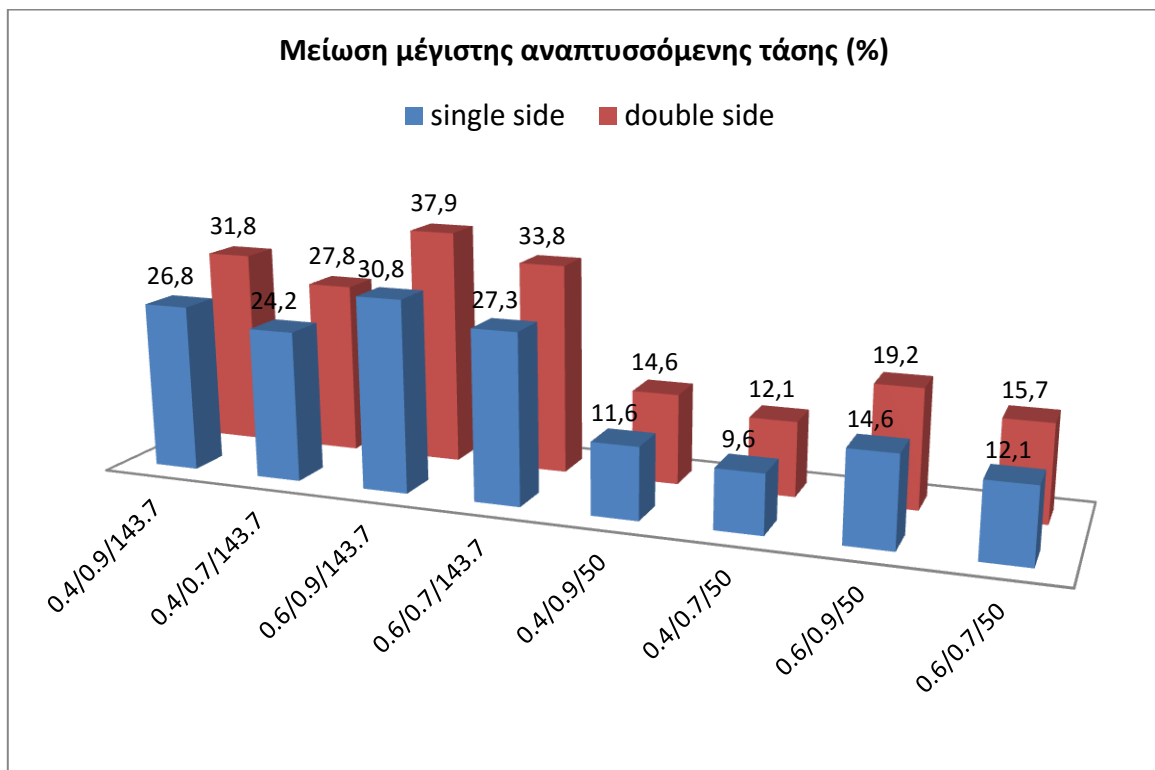
β.

Σχήμα 3.12 : Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση κατά τη διεύθυνση των ινών του FRP (MPa),
 α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$

3.3.4.2. Υβριδικά ενισχυτικά τύπου “flat bar”

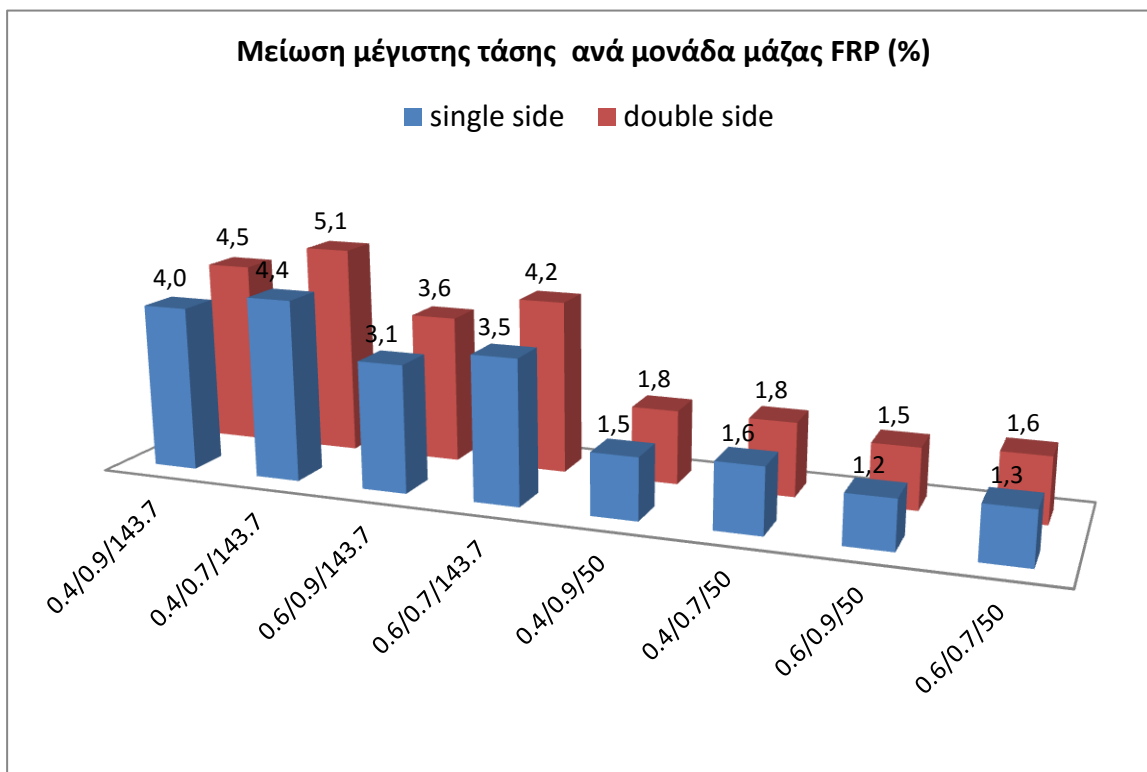


α.

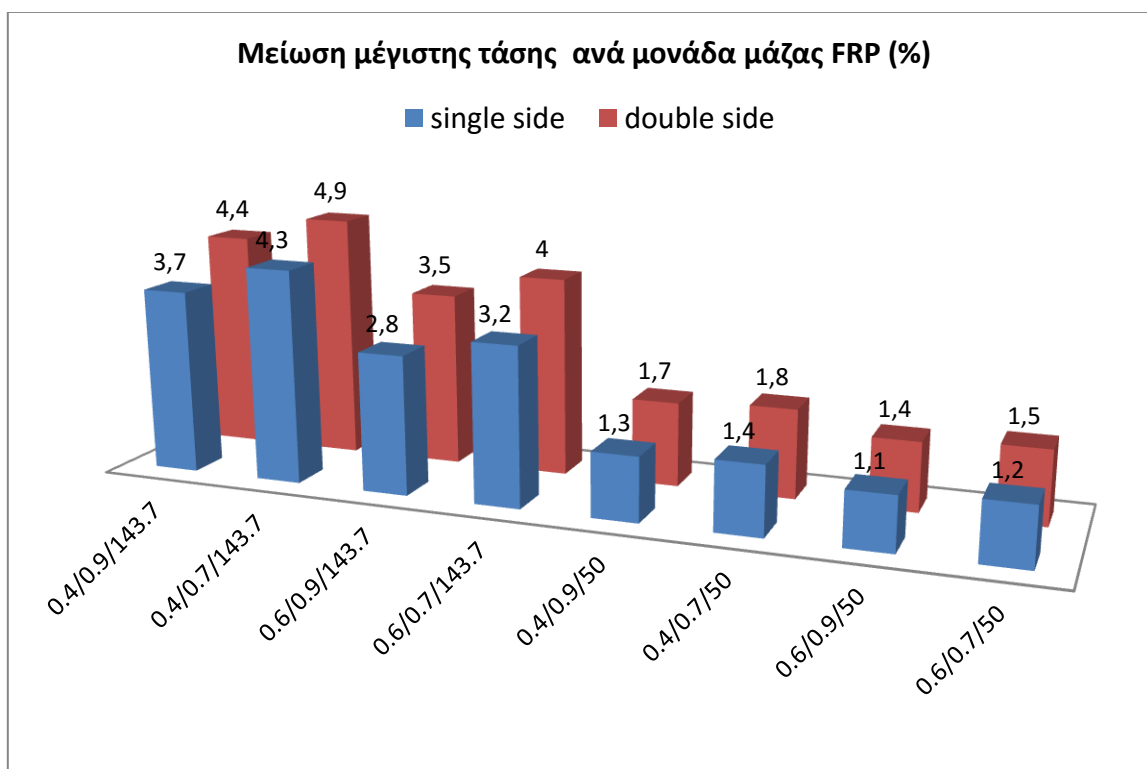


β.

Σχήμα 3.13: Μείωση % της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

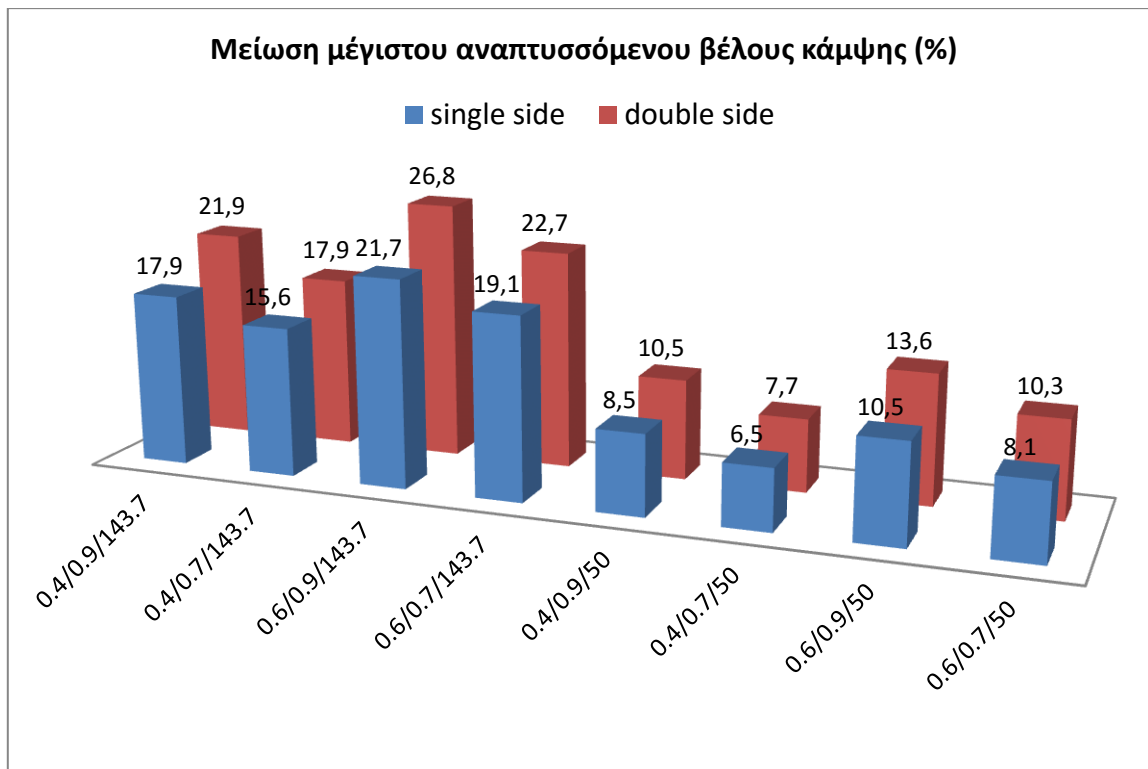


α.

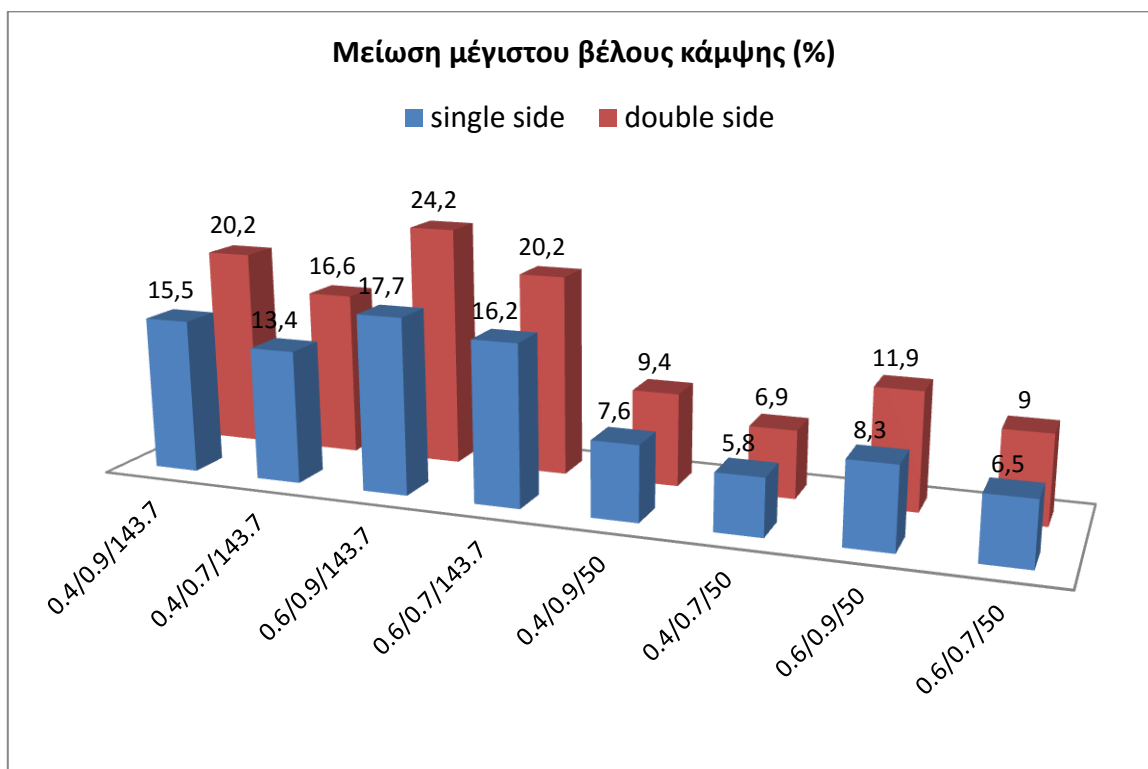


β.

Σχήμα 3.14: Μείωση % της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας λόγω προσθήκης FRP, α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

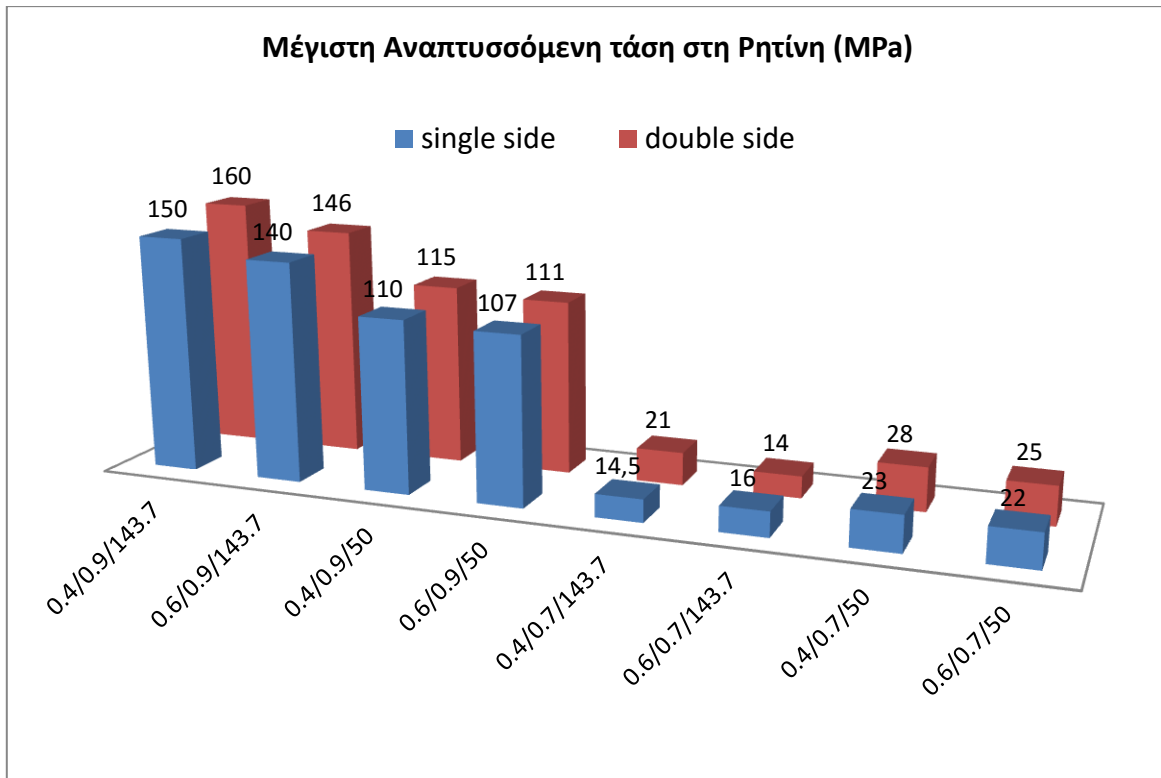


α.

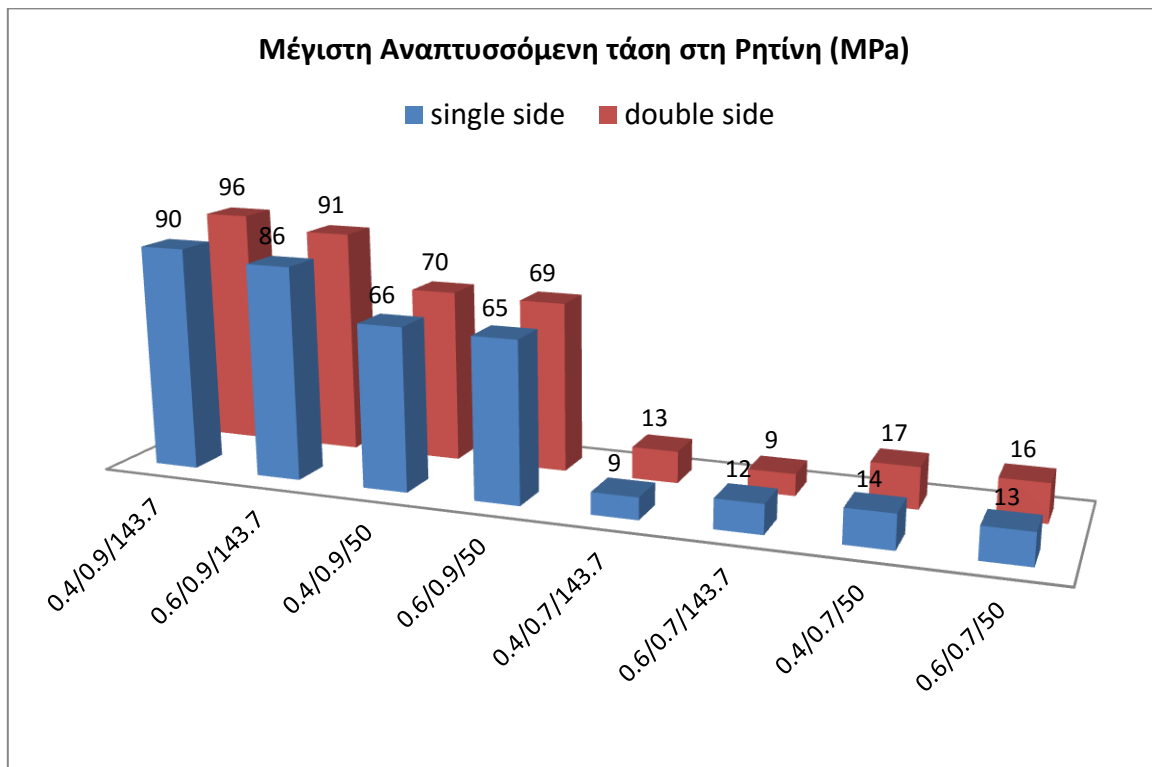


β.

Σχήμα 3.15: Μείωση % της τιμής του βέλους κάμψης, α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

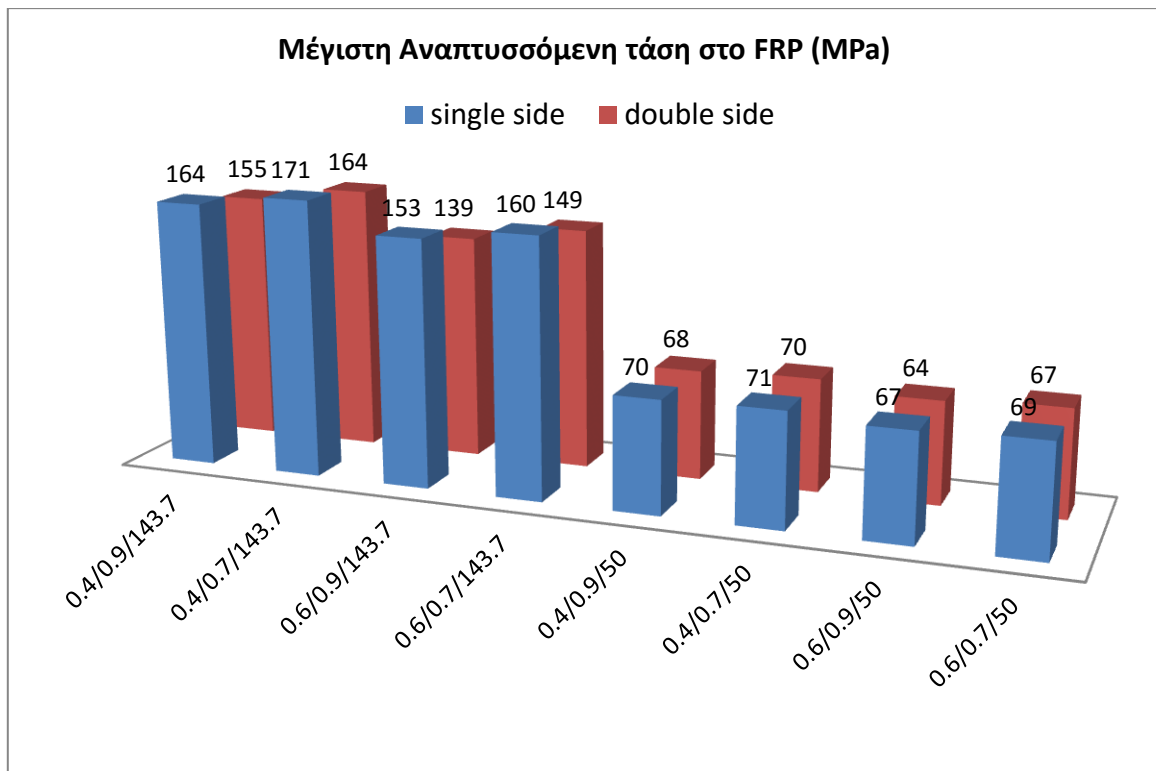


α.

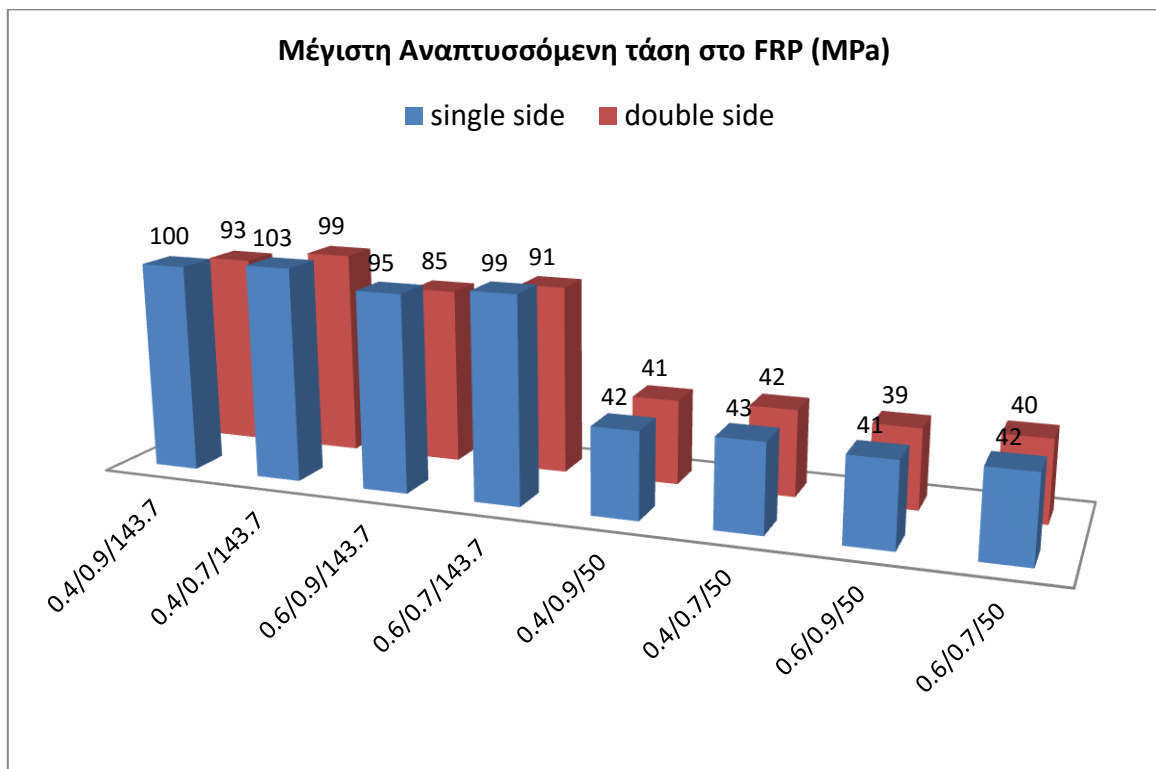


β.

Σχήμα 3.16: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης (MPa)
 α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460\text{cm}^4$.



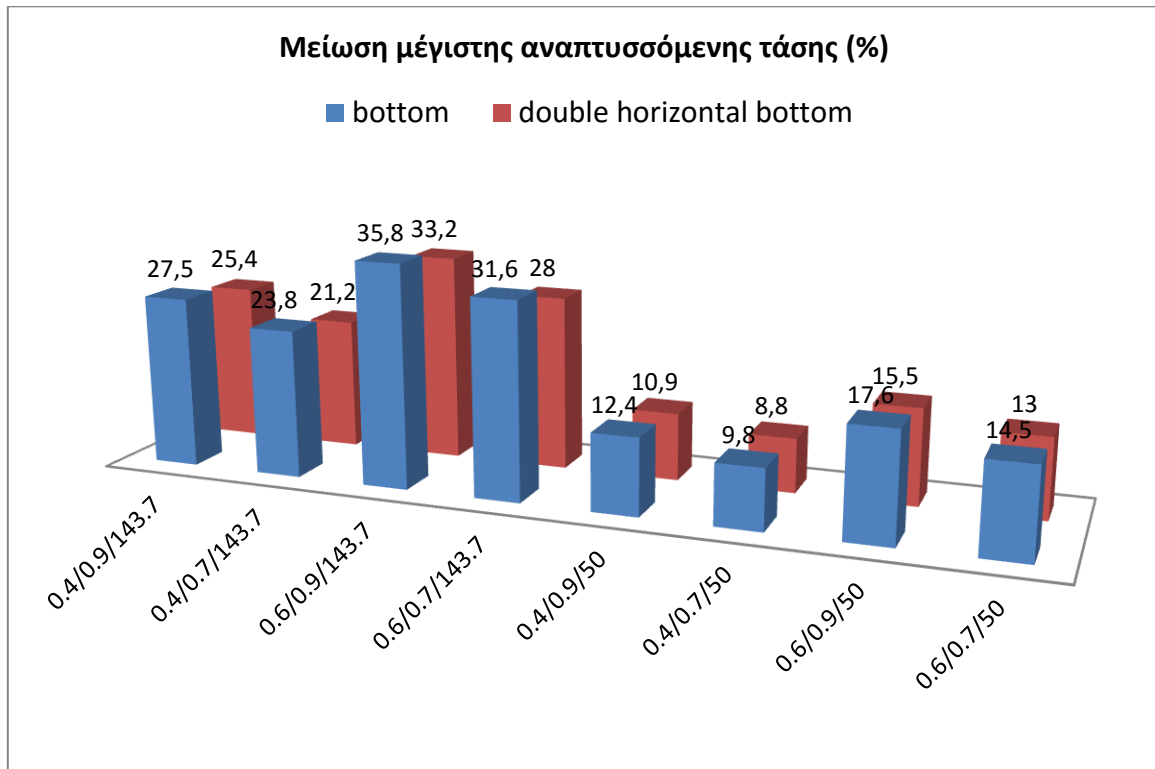
α.



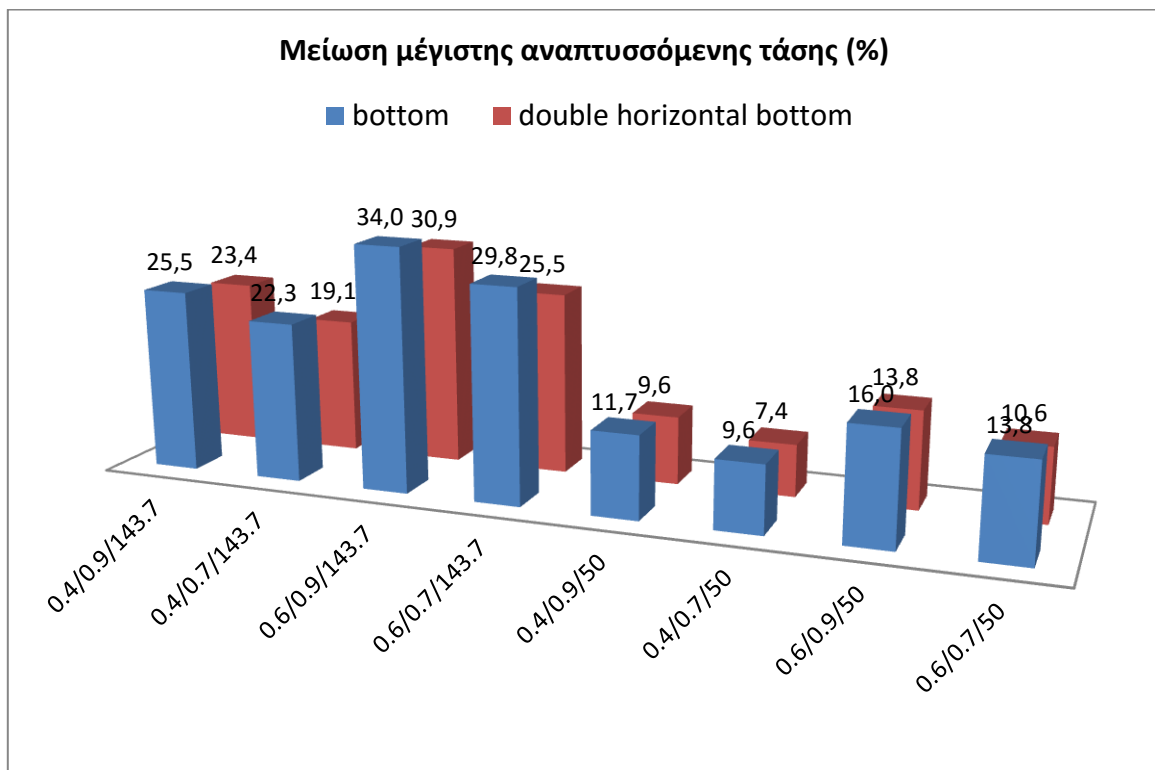
β.

Σχήμα 3.17: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στο σύνθετο κατά τη διεύθυνση των ινών (MPa),
 α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

3.3.4.3. Υβριδικά ενισχυτικά τύπου T

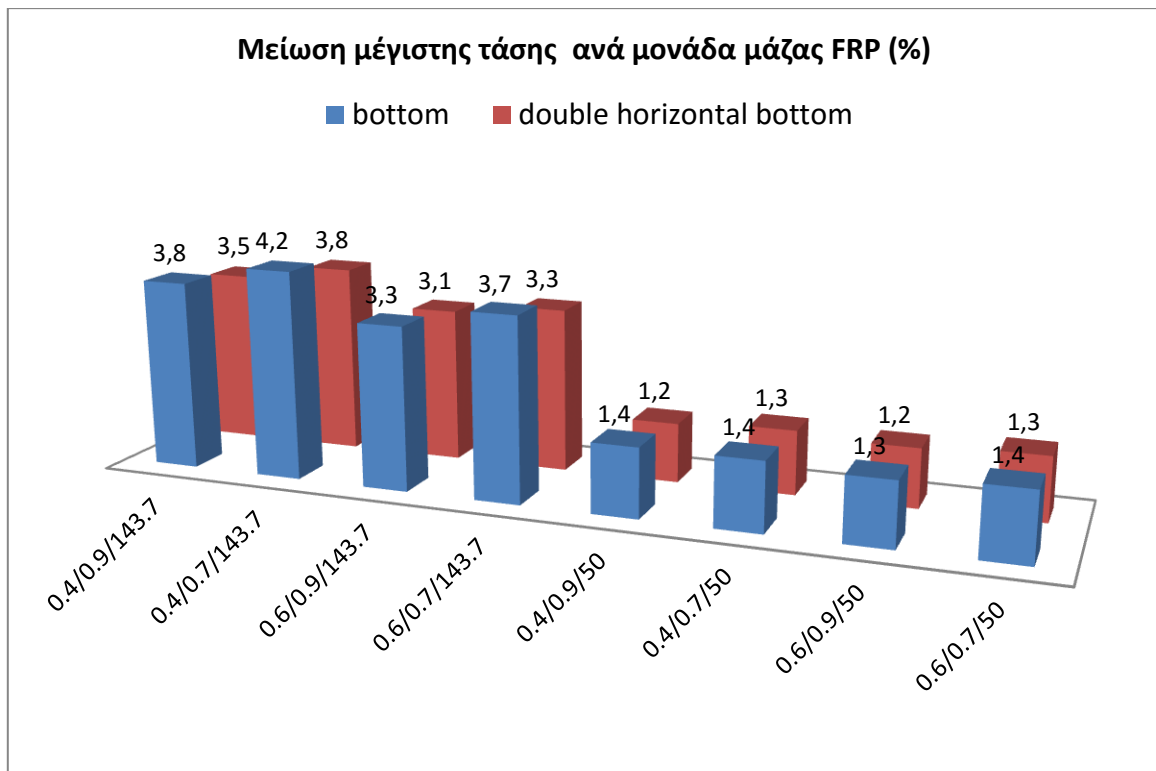


α.

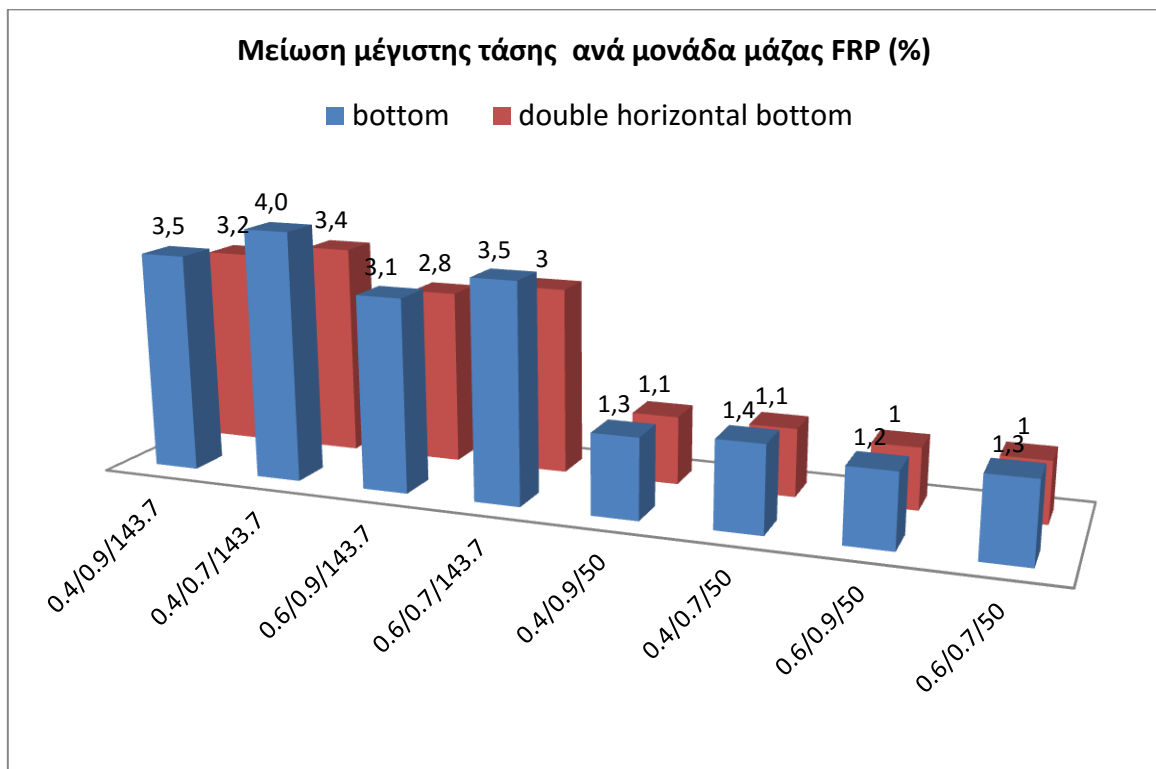


β.

Σχήμα 3.18: Μείωση % της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$

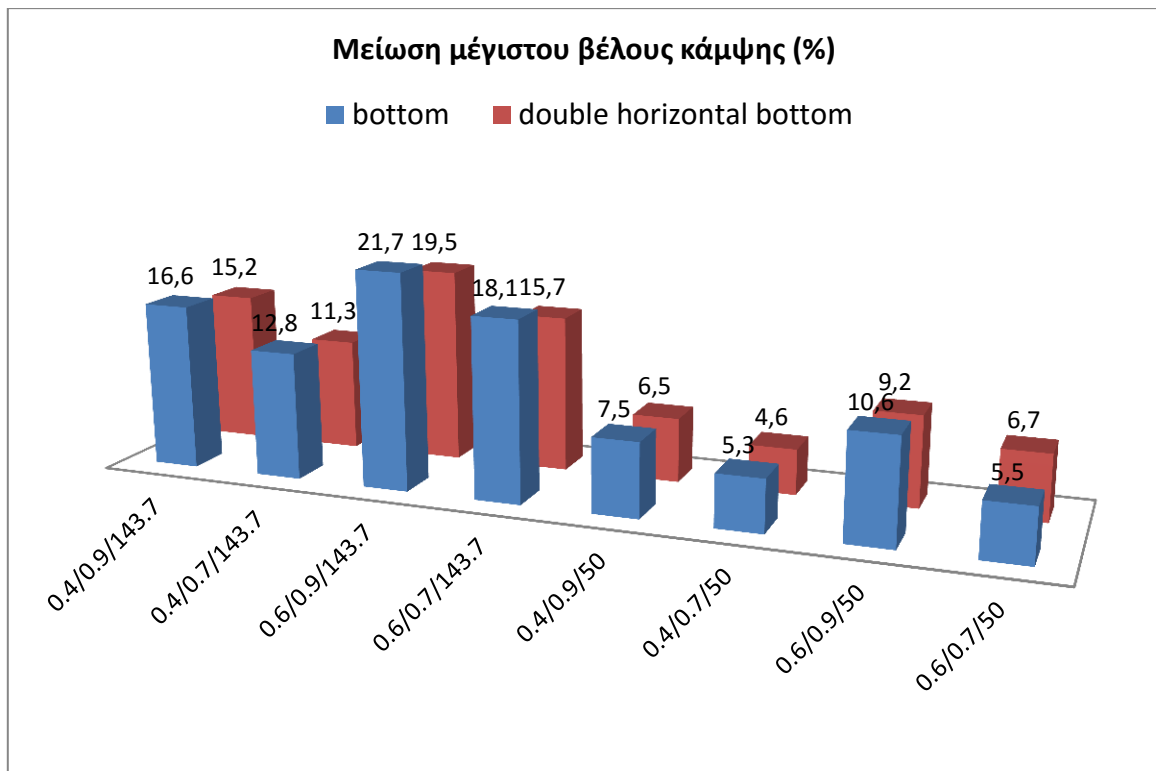


α.

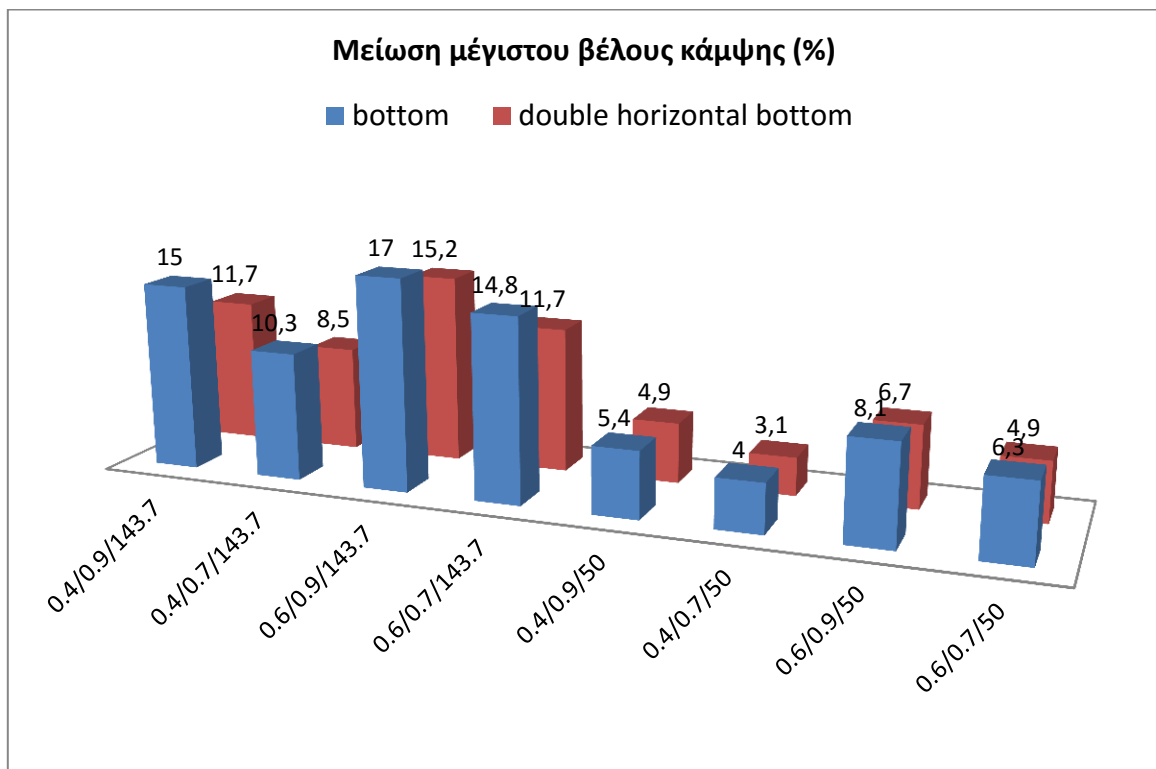


β.

Σχήμα 3.19: Μείωση % της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης ανά ποσοστιαία αύξηση μάζας λόγω προσθήκης FRP, α.για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460\text{cm}^4$.

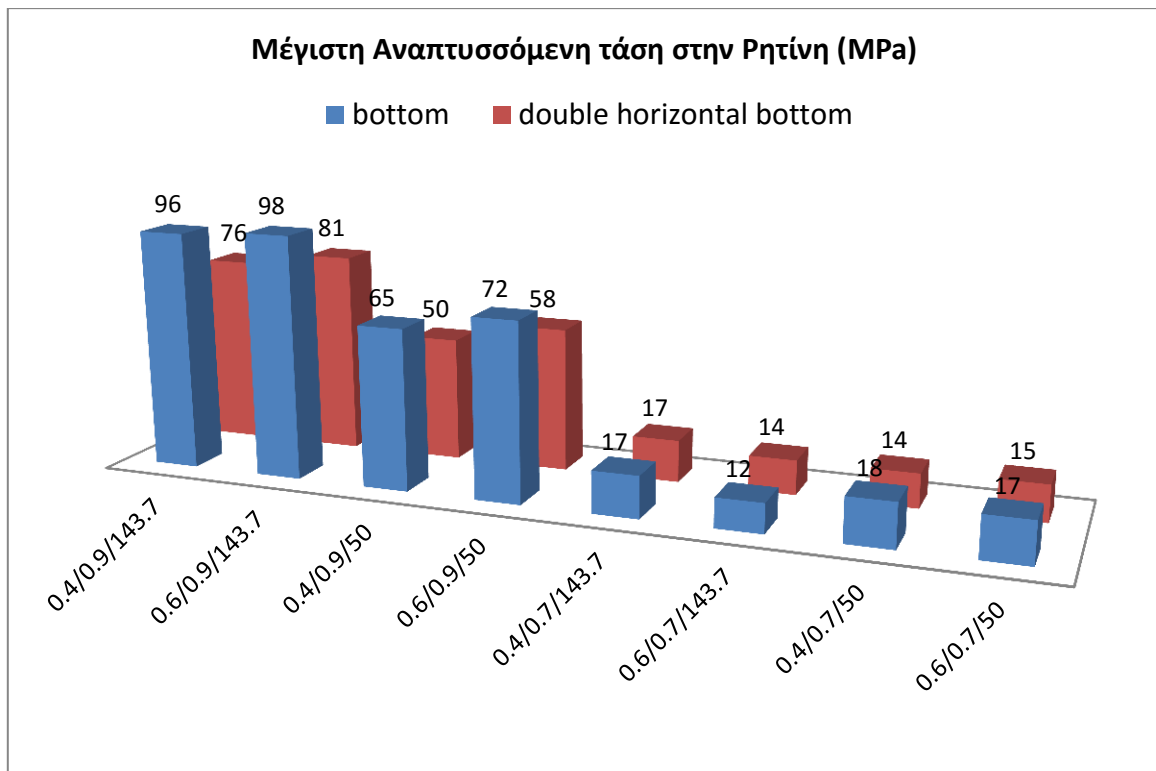


α.

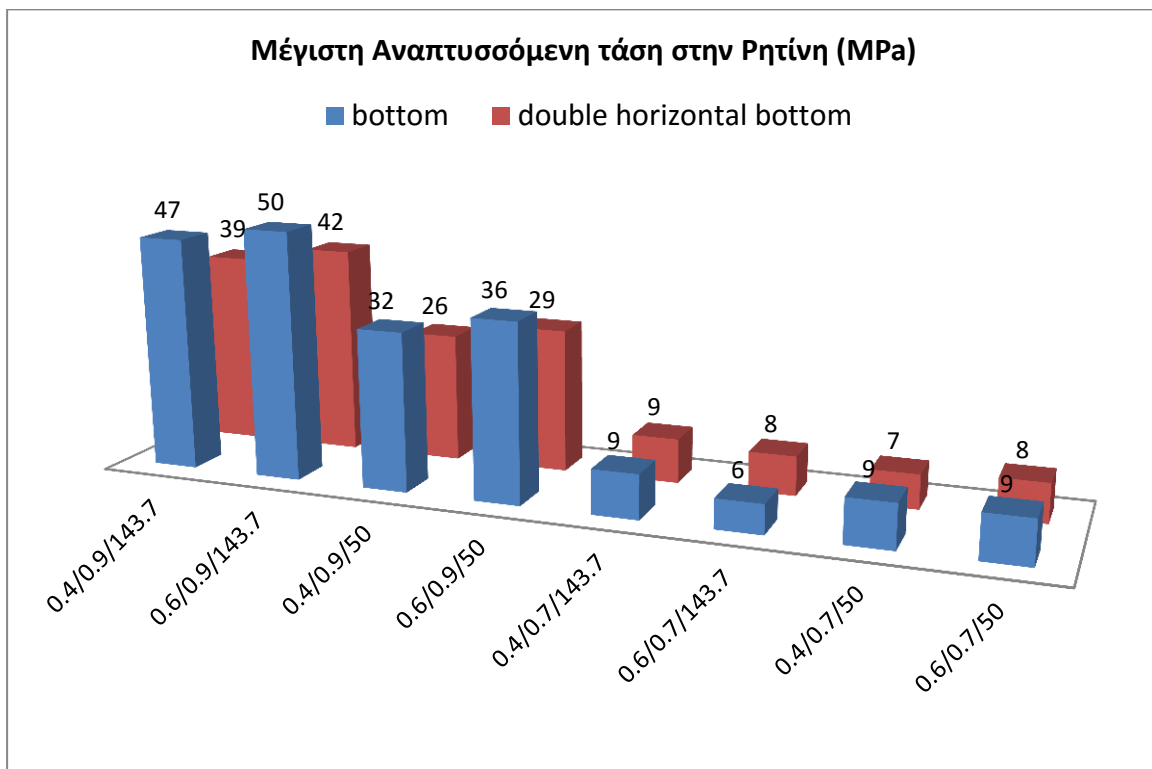


β.

Σχήμα 3.20: Μείωση % της τιμής του βέλους κάμψης,
α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

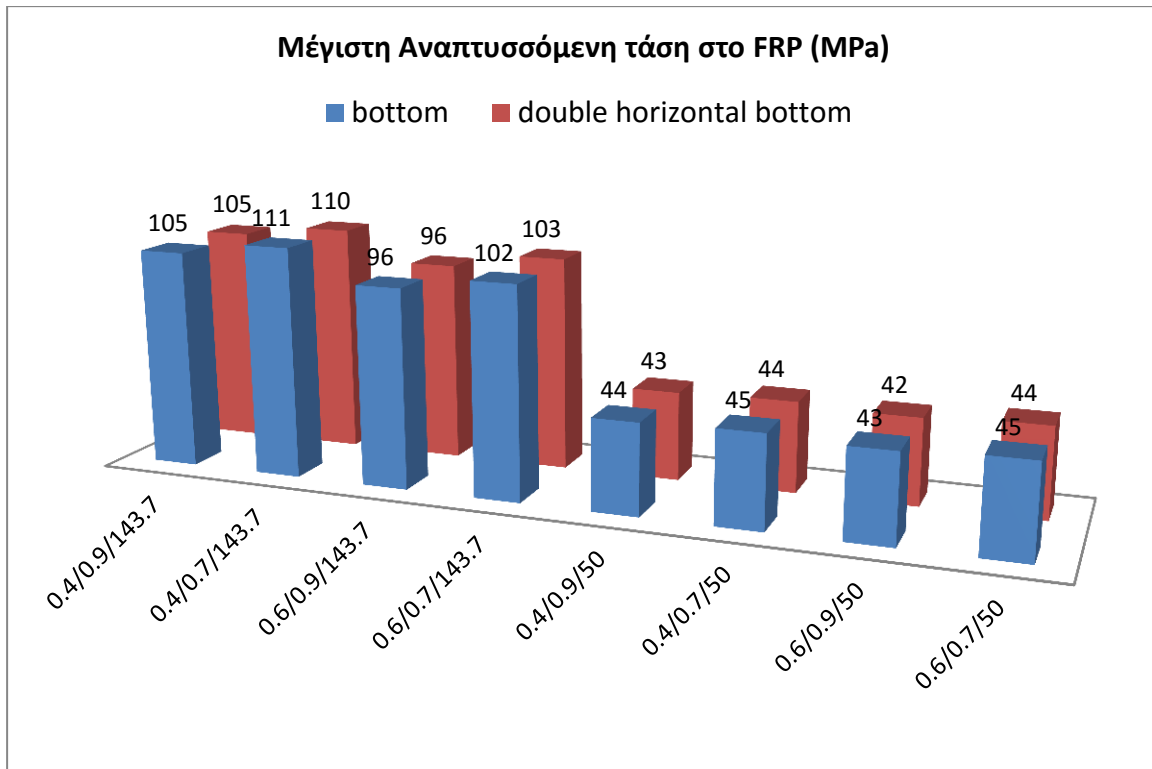


α.

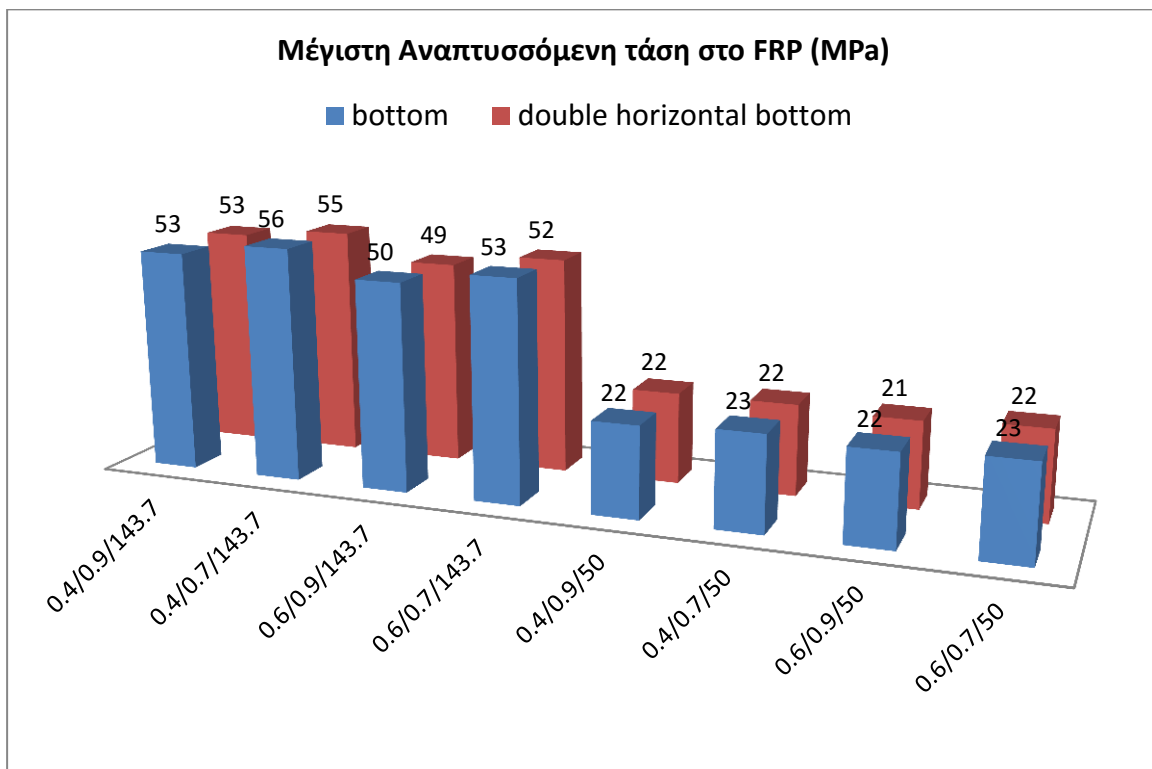


β.

Σχήμα 3.21: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης (MPa)
 α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.



α.



β.

Σχήμα 3.22: Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στο σύνθετο κατά τη διεύθυνση των ινών (MPa), α. για $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και β. για $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

3.3.5 Αξιολόγηση παραμέτρων.

Για την αξιολόγηση των παραμέτρων εξετάζονται τα εξής μεγέθη:

1. Η % μείωση στην μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στο μέσον ανοίγματος του χαλύβδινου ενισχυτικού. – σ_{\max}

2. Η % μείωση στην σ_{\max} ανά % αύξηση στην μάζα του υβριδικού ενισχυτικού λόγω εφαρμογής FRP - αποδοτικότητα

3. Η % μείωση στο μέγιστο αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος του χαλύβδινου ενισχυτικού - W_{\max}

4. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης - σ_{epoxy}

5. Η μέγιστη τάση στο FRP - σ_{FRP} .

Η αξιολόγηση θα γίνει την πρώτη φορά για το σύνολο των παραπάνω κριτηρίων και θα επαναληφθεί, αμελώντας το κριτήριο νο. 4, δηλαδή τη μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση von Mises στην ρητίνη. Αυτό συμβαίνει διότι αφενός μεν ενδέχεται να παραχθούν στο μέλλον ρητίνες με μεγαλύτερη αντοχή από αυτήν των 85 MPa, την οποία εξετάζουμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αφ' ετέρου διότι υπάρχει πάντα η δυνατότητα χρησιμοποίησης επικουρικών μηχανικών μέσων σύνδεσης του FRP με το χαλύβδινο ενισχυτικό.

Κάθε συνδυασμός παραμέτρων αξιολογείται με βάση τη μέση τιμή για κάθε κριτήριο. Οι μέσες τιμές για κάθε συνδυασμό παραμέτρων ανάλογα με το κριτήριο αξιολόγησης, την ροπή αδράνειας της διατομής και τον τύπο του υβριδικού ενισχυτικού, παρουσιάζονται στους πίνακες 3.45-3.48.

Πίνακας 3.45: Μείωση % μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης

Συνδυασμός παραμέτρων	I=228,4 cm ⁴							I=460 cm ⁴							Μέση τιμή	Συντελεστής Διακύμανσης
	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal		
0.4/0.9/143.7	16,1	26,6	25,2	28,8	32,7	27,5	25,4	13,9	24,5	29,8	26,8	31,8	25,5	23,4	25,6	0,20
0.4/0.7/143.7	13,8	23,4	22,0	24,9	28,5	23,8	21,2	11,9	21,2	26,5	24,2	27,8	22,3	19,1	22,2	0,21
0.6/0.9/143.7	17,9	30,3	33,5	33,3	39,6	35,8	33,2	17,2	25,2	33,8	30,8	37,9	34,0	30,9	31,4	0,21
0.6/0.7/143.7	15,6	26,6	29,8	29,7	35,1	31,6	28	16,6	21,9	29,8	27,3	33,8	29,8	25,5	27,2	0,21
0.4/0.9/50	6,9	11,9	11,0	13,5	15,6	12,4	10,9	7,3	10,6	13,9	11,6	14,6	11,7	9,6	11,5	0,22
0.4/0.7/50	5,5	10,1	8,7	11,1	12,6	9,8	8,8	6,0	8,6	11,9	9,6	12,1	9,6	7,4	9,4	0,23
0.6/0.9/50	8,3	14,7	16,1	16,2	20,4	17,6	15,5	9,9	11,9	16,6	14,6	19,2	16,0	13,8	15,1	0,22
0.6/0.7/50	6,6	12,4	13,3	13,8	16,8	14,5	13	8,6	9,9	13,9	12,1	15,7	13,8	10,6	12,5	0,22

Πίνακας 3.46: Μείωση % ανά μονάδα μάζας FRP

Συνδυασμός παραμέτρων	I=228,4 cm ⁴							I=460 cm ⁴							Μέση τιμή	Συντελεστής Διακύμανσης
	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal		
0.4/0.9/143.7	2,2	3,7	3,5	4,0	4,5	3,8	3,5	1,9	3,4	4,1	3,7	4,4	3,5	3,2	3,5	0,21
0.4/0.7/143.7	2,5	4,2	3,9	4,4	5,1	4,2	3,8	2,1	3,8	4,7	4,3	4,9	4,0	3,4	4,0	0,21
0.6/0.9/143.7	1,7	2,8	3,1	3,1	3,6	3,3	3,1	1,6	2,3	3,1	2,8	3,5	3,1	2,8	2,9	0,21
0.6/0.7/143.7	1,9	3,2	3,6	3,5	4,2	3,7	3,3	2,0	2,6	3,5	3,2	4	3,5	3	3,2	0,21
0.4/0.9/50	0,8	1,4	1,3	1,5	1,8	1,4	1,2	0,8	1,2	1,6	1,3	1,7	1,3	1,1	1,3	0,22
0.4/0.7/50	0,8	1,5	1,3	1,6	1,8	1,4	1,3	0,9	1,2	1,7	1,4	1,8	1,4	1,1	1,4	0,22
0.6/0.9/50	0,6	1,1	1,2	1,2	1,5	1,3	1,2	0,7	0,9	1,2	1,1	1,4	1,2	1	1,1	0,23
0.6/0.7/50	0,7	1,2	1,3	1,3	1,6	1,4	1,3	0,8	1,0	1,3	1,2	1,5	1,3	1	1,2	0,21

Πίνακας 3.47: Μείωση % μέγιστου βέλους κάμψης

Συνδυασμός παραμέτρων	I=228,4 cm ⁴							I=460 cm ⁴							Μέση τιμή	Συντελεστής Διακύμανσης
	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal		
0.4/0.9/143.7	8,2	16,6	16,6	17,9	21,9	16,6	15,2	14	15,2	21,8	15,5	20,2	15	11,7	16,2	0,23
0.4/0.7/143.7	8,4	15,2	13,4	15,6	17,9	12,8	11,3	8	12,5	17,2	13,4	16,6	10,3	8,5	12,9	0,26
0.6/0.9/143.7	9,6	16,7	22	21,7	26,8	21,7	19,5	13,4	15,2	22,5	17,7	24,2	17	15,2	18,8	0,25
0.6/0.7/143.7	7,1	15,5	18,2	19,1	22,7	18,1	15,7	10,4	12,7	19,1	16,2	20,2	14,8	11,7	15,8	0,27
0.4/0.9/50	4,6	9	7,6	8,5	10,5	7,5	6,5	7,4	7	10	7,6	9,4	5,4	4,9	7,6	0,24
0.4/0.7/50	5,1	7,4	5,7	6,5	7,7	5,3	4,6	5,9	5,5	7,6	5,8	6,9	4	3,1	5,8	0,23
0.6/0.9/50	6,3	9,5	10,9	10,5	13,6	10,6	9,2	10,2	8,3	11,6	8,3	11,9	8,1	6,7	9,7	0,21
0.6/0.7/50	4,7	7,9	9,6	8,1	10,3	5,5	6,7	8	6,6	8,9	6,5	9	6,3	4,9	7,4	0,24

Πίνακας 3.48: Αναπτυσσόμενη τάση στο FRP (MPa)

Συνδυασμός παραμέτρων	I=228,4 cm ⁴							I=460 cm ⁴							Μέση τιμή	Συντελεστής Διακύμανσης
	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal		
0.4/0.9/143.7	112	124	122	164	155	105	105	74	88	82	100	93	53	53	102,1	0,32
0.4/0.7/143.7	115	130	127	171	164	111	110	75	92	86	103	99	56	55	106,7	0,32
0.6/0.9/143.7	109	118	113	153	139	96	96	70	88	77	95	85	50	49	95,6	0,31
0.6/0.7/143.7	113	124	119	160	149	102	103	72	91	82	99	91	53	52	100,7	0,31
0.4/0.9/50	44	52	51	70	68	44	43	27	37	35	42	41	22	22	42,7	0,34
0.4/0.7/50	44	53	52	71	70	45	44	28	37	36	43	42	23	22	43,6	0,34
0.6/0.9/50	43	51	50	67	64	43	42	26	36	34	41	39	22	21	41,8	0,33
0.6/0.7/50	44	52	51	69	67	45	44	27	37	35	42	40	23	22	42,7	0,33

Η κλίμακα βαθμολόγησης ακολουθεί την παρακάτω μέθοδο:

* Άριστα : 5. Το λαμβάνει για κάθε μέγεθος, ο συνδυασμός παραμέτρων που εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή.

* Κακώς : 1. Το λαμβάνει για κάθε μέγεθος, ο συνδυασμός παραμέτρων που εμφανίζει τη μικρότερη τιμή.

* Για την βαθμολογία των ενδιάμεσων τιμών, χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής

* Για την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο FRP, παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις υβριδικής ενίσχυσης με Carbon/epoxy η μέση τιμή των αναπτυσσόμενων τάσεων, ανάλογα με το συνδυασμό παραμέτρων, κυμαίνεται από 96 MPa έως 106 MPa δηλαδή ίση περίπου με το 1/5 του μέγιστου γορτίου που μπορεί να φέρει το Carbon/epoxy (507 MPa). Αντίστοιχα στις περιπτώσεις υβριδικού ενισχυτικού με Glass/epoxy, η μέση τιμή των αναπτυσσόμενων τάσεων, ανάλογα με το συνδυασμό παραμέτρων, κυμαίνεται από 41,8 MPa έως 43,6 MPa δηλαδή ίση περίπου με το 1/5 του μέγιστου γορτίου που μπορεί να φέρει το Glass/epoxy (185 MPa). Για το λόγο αυτό, το κριτήριο αυτό παραλείπεται.

* Όπως προέκυψε από την παραμετρική μελέτη, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης. Η χαμηλότερη τιμή που παρουσιάστηκε ήταν μόλις 6 MPa, ενώ η μεγαλύτερη ήταν 160 MPa, ανάλογα με την γεωμετρία υβριδικού ενισχυτικού, αλλά κυρίως ανάλογα με το συνδυασμό παραμέτρων. Για το λόγο αυτό η αξιολόγηση του μεγέθους αυτού γίνεται με την παρακάτω μέθοδο βαθμολόγησης:

V. Mises (MPa)	Βαθμός
1÷45	5
46÷55	4
56÷65	3
66÷75	2
76÷85	1
86÷95	-1
96÷105	-2
106÷115	-3
116÷125	-4
125÷160	-5

Η βαθμολόγηση της αναπτυσσόμενης τάσης von Mises της εποξικής ρητίνης για κάθε συνδυασμό παραμέτρων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.49:

Πίνακας 3.49: Βαθμολόγηση για την αναπτυσσόμενη τάση στην εποξική ρητίνη

Συνδυασμός παραμέτρων	I=228,4 cm ⁴							I=460 cm ⁴							Μέση τιμή
	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal	L_Rectangular	L_bottom	L_angle	flat_single side	flat_double side	T_bottom	T_double horizontal	
0.4/0.9/143.7	-2	-5	-4	-5	-5	-2	1	3	-1	1	-1	-2	4	5	-0,9
0.4/0.7/143.7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5,0
0.6/0.9/143.7	-1	-5	-4	-5	-5	-2	1	2	-1	1	-1	-1	4	5	-0,9
0.6/0.7/143.7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5,0
0.4/0.9/50	2	-1	1	-3	-3	2	4	5	3	3	2	2	5	5	1,9
0.4/0.7/50	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5,0
0.6/0.9/50	3	-1	-1	-3	-3	2	3	4	3	3	2	2	5	5	1,7
0.6/0.7/50	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5,0

Τα κριτήρια, η κλίμακα βαθμολόγησης και ο Σ.Β. κάθε κριτηρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.50

Πίνακας 3.50 . Κριτήρια, κλίμακα βαθμολόγησης και Σ.Β.

Κριτήριο	Κλίμακα βαθμολόγησης	Σ.Β.
σ_{\max}	1÷5	1,5
W_{\max}	1÷5	1
αποδοτικότητα	1÷5	1,75
σ εποxy	-5÷5	1,5

Τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.51

Πίνακας 3.51: Αξιολόγηση συνδυασμού παραμέτρων

Συνδυασμός Παραμέτρων	σ_{\max}	W_{\max}	ποδοτικότητα	σ εποxy	Συμπεριλαμβάνοντας την		Αγνοώντας την εποξική ρητίνη	
	(x1,5)	(x1,0)	(x1,75)	(x1,5)	Σύνολο	Κατάταξη	Σύνολο	Κατάταξη
0.4/0.9/143.7	3,9	4,3	4,3	-0,9	16,5	4	17,9	2
0.4/0.7/143.7	3,3	3,6	5,0	5,0	24,9	2	17,4	4
0.6/0.9/143.7	5,0	4,9	3,4	-0,9	17,1	3	18,4	1
0.6/0.7/143.7	4,2	4,3	3,9	5,0	25,0	1	17,5	3
0.4/0.9/50	1,4	2,4	1,3	1,9	9,7	7	6,8	5
0.4/0.7/50	1,0	2,0	1,4	5,0	13,4	6	5,9	7
0.6/0.9/50	2,0	2,9	1,0	1,7	10,3	8	7,7	8
0.6/0.7/50	1,6	2,4	1,1	5,0	14,2	5	6,7	6

3.3.6 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων 2^{ου} Σταδίου

Η διερεύνηση των συνδυασμών των παραμέτρων οδηγεί στα εξής συμπεράσματα.

1. Ο πιο αποδοτικός συνδυασμός παραμέτρων είναι ο 0.4/0.7/143.7 για κάθε τύπο υβριδικού ενισχυτικού και για κάθε ροπή αδράνειας, οδηγώντας σε 4% μείωση στην αναπτυσσόμενη τάση για κάθε μονάδα επιπλέον μάζας ενισχυτικού.

2. Την μεγαλύτερη μείωση στην τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης παράγει ο συνδυασμός 0.6/0.9/143.7, καθώς διαθέτει και την μεγαλύτερη ποσότητα προστιθέμενης ενίσχυσης από FRP. Η μείωση φτάνει έως και 39,6% σε σύγκριση με την αναπτυσσόμενη τάση στην αμιγώς χαλύβδινη ενίσχυση.

3. Η μείωση του μήκους ενίσχυσης από 0.9 σε 0.7 του συνολικού μήκους οδηγεί έως και σε υποδεκαπλασιασμό στην αναπτυσσόμενη τάση von Mises της εποξικής ρητίνης σύνδεσης.

4. Η μεταβολή μόνον της γεωμετρίας του υβριδικού ενισχυτικού με διατήρηση των υπολοίπων παραμέτρων σταθερών οδηγεί σε μια μέση μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης ίσης με 3% στις περιπτώσεις των υβριδικών ενισχυτικών τύπου flat bar και τύπου T. Για τον τύπο ενισχυτικών τύπου L, η εν λόγω μείωση φτάνει έως και 15%.

5. Η αύξηση του λόγου A_{comp}/A_{steel} από 0,4 σε 0,6 οδηγεί σε μια μέση μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης ίσης με 5%.

6. Η αύξηση του λόγου L_{comp}/L_{steel} από 0,7 σε 0,9 οδηγεί σε μια μέση μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης ίσης με 3%.

7. Τα αποτελέσματα δεν μεταβάλλονται με την μεταβολή της ροπής αδράνειας από $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ σε $I_{yy}=460 \text{ cm}^4$.

8. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στο σύνθετο παραμένει για κάθε συνδυασμό παραμέτρων πολύ χαμηλότερη της αντοχής του, είτε για Carbon/epoxy είτε για Glass/epoxy.

9. Η χρήση Carbon/epoxy είναι σαφώς αποδοτικότερη από την χρήση Glass/epoxy, καθώς διαθέτει τριπλάσιο μέτρο ελαστικότητας παράλληλα στις ίνες (Carbon/epoxy: $E_1=143,7\text{GPa}$, ενώ Glass/epoxy: $E_1=50\text{GPa}$) και ταυτόχρονα μικρότερη πυκνότητα (Carbon/epoxy: $\gamma=1570 \text{ kg/m}^3$, ενώ Glass/epoxy: $\gamma=1920 \text{ kg/m}^3$)

3.4 Διερεύνηση εξοικονόμησης βάρους.

Στο εδάφιο 3.4 τίθεται ως σκοπός ο σχεδιασμός υβριδικού ενίσχυτικού ισοδύναμου με ένα αμιγώς χαλύβδινο, όσο το δυνατόν μικρότερων διαστάσεων, ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή εξοικονόμηση βάρους.

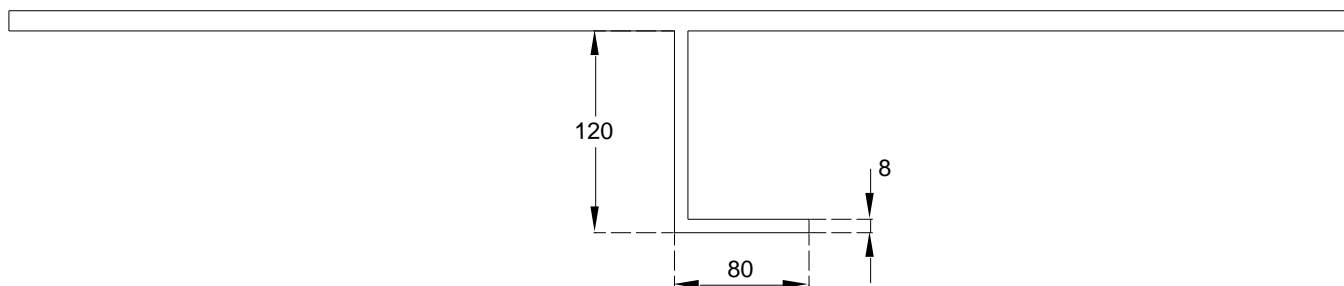
Για τον χαρακτηρισμό ενός υβριδικού ενίσχυτικού ως ισοδύναμου με ένα αμιγώς χαλύβδινο τίθενται τα παρακάτω κριτήρια.

1. Να εμφανίζει ίδια τιμή μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονικής τάσης (σ_{\max}) στο μέσον ανοίγματος.
2. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση παράλληλα στις ίνες του σύνθετου (σ FRP) να μην ξεπερνά την αντοχή του.
3. Η τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης (σ epoxy) να μην ξεπερνάει την αντοχή της.

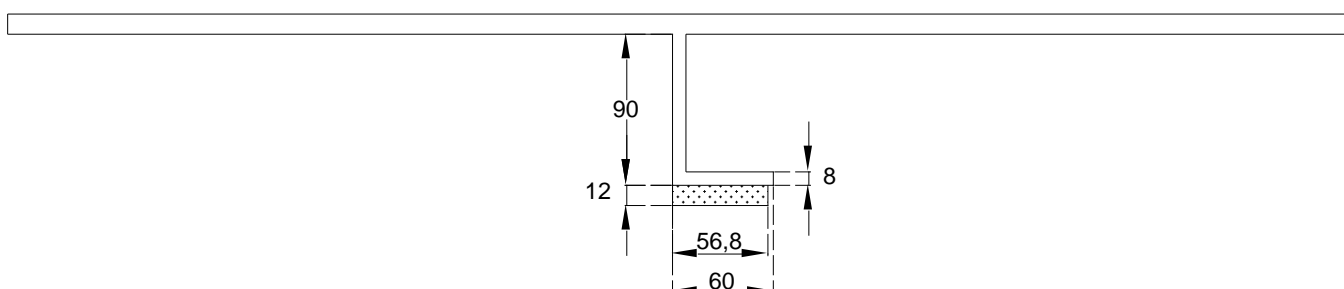
Τα κριτήρια 1 και 2 πρέπει να ικανοποιούνται σε κάθε περίπτωση, το κριτήριο 3 όμως τίθεται μεν υπ'όψη, αλλά είμαστε ελαστικότεροι στην ικανοποίησή του, καθώς αφ'ενός μεν η επιστημονική έρευνα δεν αποκλείεται να οδηγήσει σε παραγωγή ρητινών με μεγαλύτερες αντοχές και αφ'ετέρου υπάρχει δυνατότητα «δέσιμου» του σύνθετου με μηχανικά μέσα στην περιοχή στην οποία υπερβαίνεται η αντοχή της εποξικής ρητίνης σύνδεσης. Ως εκ τούτου ενισχύσεις οι οποίες οδηγούν σε σημαντική εξοικονόμηση βάρους όμως ταυτόχρονα οδηγούν σε υπέρβαση της αντοχής της ρητίνης θα τίθενται υπ'όψη.

3.4.1 Επιλογή χρήσης γραμμικής ή μη γραμμικής ανάλυσης

Εξετάζουμε καταρχήν την δυνατότητα εκτέλεσης γραμμικών αναλύσεων, συγκρίνοντας αν ένα υβριδικό ενίσχυτικό το οποίο προκύπτει ισοδύναμο με ένα αμιγώς χαλύβδινο στην περίπτωση μη γραμμικής ανάλυσης, προκύπτει επίσης ισοδύναμο και στην περίπτωση γραμμικής ανάλυσης. Αναζητούμε για το λόγο αυτό, ένα ισοδύναμο υβριδικό ενίσχυτικό για το αμιγώς χαλύβδινο ενίσχυτικό τύπου L_steel, χρησιμοποιώντας κατ'αρχήν μη γραμμική ανάλυση. Στο Σχήμα 3.23 παρουσιάζεται ο φορέας με χρήση αμιγώς χαλύβδινου ενίσχυτικού και στο Σχήμα 3.24 με χρήση του ισοδύναμου υβριδικού ενίσχυτικού με πρόσθετη ενίσχυση Carbon/epoxy και σημειώνονται οι διαστάσεις τους. Στους πίνακες 3.52 και 3.53 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη φόρτιση των δύο φορέων για πίεση στην άνω επιφάνεια του φορέα ίση με $P=100\text{kPa}$ και χρήση μη γραμμικής και γραμμικής ανάλυσης αντίστοιχα. Ο φορέας με χρήση αμιγώς χαλύβδινου ενίσχυτικού αναφέρεται ως L_steel, συνοδευόμενος από τις διαστάσεις του ενίσχυτικού, ενώ ο φορέας με χρήση ισοδύναμου υβριδικού ενίσχυτικού, αναφέρεται ως Hybrid, συνοδευόμενος από τον τύπο γεωμετρίας υβριδικού ενίσχυτικού -“bottom” στην περίπτωση αυτή - από τις διαστάσεις του χαλύβδινου μέρους του υβριδικού ενίσχυτικού και από το συνδυασμό $\frac{A_{comp}}{A_{steel}} / \frac{L_{comp}}{L_{steel}} / E_I$, που καθορίζει τις διαστάσεις του σύνθετου μέρους του υβριδικού ενίσχυτικού.



Σχήμα 3.23: Φορέας με αμιγώς χαλύβδινο ενισχυτικό τύπου L_steel



Σχήμα 3.24: Φορέας με υβριδικό ενισχυτικό hybrid_bottom, ισοδύναμο ως προς το L_steel

Πίνακας 3.52: Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης, για P=100kPa

Τύπος	σ_{\max} (MPa)	σ FRP (MPa)	σ epoxy (MPa)	W_{\max} (mm)
L_steel_120x80x8	236	-	-	7,14
Hybrid_BOTTOM_90x60x8_06/07/143.7	239	262	53	10,9

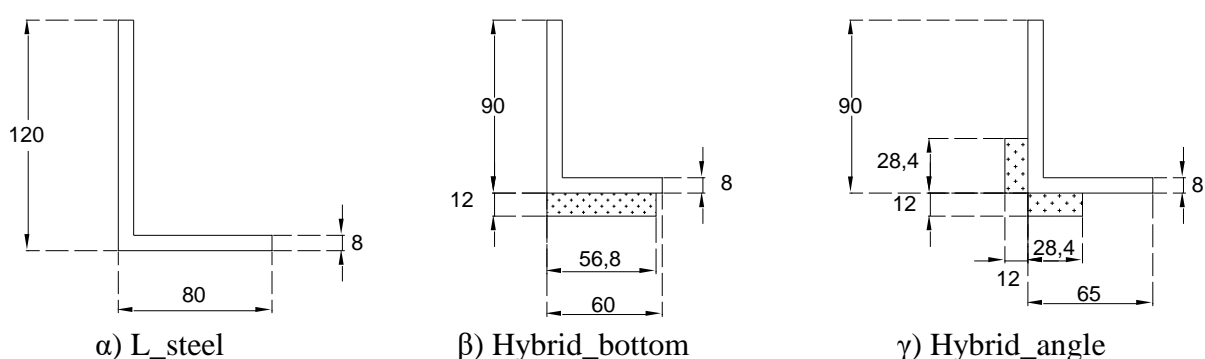
Πίνακας 3.53 : Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης, για P=100kPa

Τύπος	σ_{\max} (MPa)	σ FRP (MPa)	σ epoxy (MPa)	W_{\max} (mm)
L_steel_120x80x8	220	-	-	6,33
Hybrid_BOTTOM_90x60x8_06/07/143.7	239	190	19	7,94

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους ανωτέρω πίνακες, ενώ στην περίπτωση μη γραμμικής ανάλυσης, τα δύο ενισχυτικά μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμα, στην περίπτωση της γραμμικής ανάλυσης αυτό δεν ισχύει. Μάλιστα, κάνοντας χρήση γραμμικής ανάλυσης παρατηρούμε, ότι θα απαιτούνταν υβριδικό ενισχυτικό με μεγαλύτερες διαστάσεις χαλύβδινης διατομής, ώστε η τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονικής τάσης, σ_{\max} , να μειωθεί μέχρι την τιμή $\sigma_{\max}=220$ MPa. Για το λόγο αυτό, η διερεύνηση του εφδαφίου με σκοπό την μέγιστη εξοικονόμηση βάρους από την αντικατάσταση αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών από ισοδύναμα υβριδικά ενισχυτικά όσο το δυνατόν μικρότερων διαστάσεων, θα πραγματοποιηθεί με χρήση μη γραμμικών αναλύσεων.

3.4.2 Αποτελέσματα διερεύνησης εξοικονόμησης μάζας

Διερευνάται κατ'αρχήν η αντικατάσταση του αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού τύπου L_steel. Η διερεύνηση περιορίζεται στην αντικατάσταση του L_steel από υβριδικές γεωμετρίες τύπου “Bottom” και “Outer Angle”, με πρόσθετη ενίσχυση Carbon/epoxy όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί στο εδάφιο , καθώς όπως έχει προκύψει από τα αποτελέσματα του 1^{ου} σταδίου της εργασίας, αυτές οδηγούν στη μεγαλύτερη μείωση της τιμής της σ_{max} . Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζονται οι διαστάσεις του L_steel και τα ισοδύναμα υβριδικά ενισχυτικά τύπου “Bottom” και “Outer Angle”, με τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις, όπως προέκυψαν από την διερεύνηση.



Σχήμα 3.25 : Διαστάσεις α) L_steel, και ισοδύναμων υβριδικών ενισχυτικών τύπου β) Hybrid_bottom και γ) Hybrid_angle.

Στον Πίνακα 3.54 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη φόρτιση του φορέα με πίεση P=100 kPa στην επιφάνειά του, από όπου προκύπτει και η ισοδυναμία των υβριδικών ενισχυτικών. Στον Πίνακα 3.55 παρουσιάζεται η μάζα κάθε ενισχυτικού και σημειώνεται η % μείωση στο βάρος η οποία προκύπτει από την αντικατάσταση του αμιγώς χαλύβδινου από το αντίστοιχο υβριδικό ενισχυτικό.

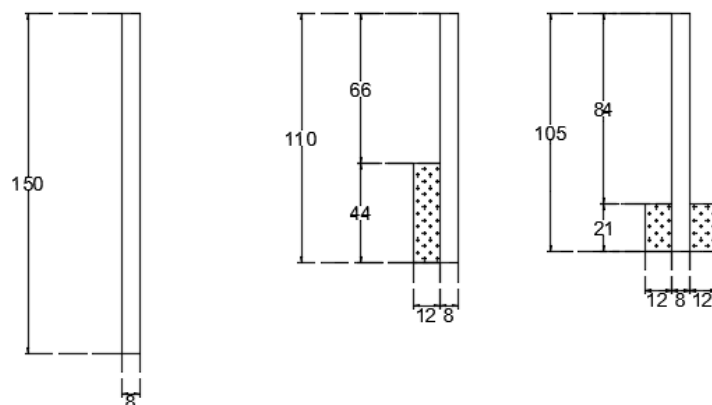
Πίνακας 3.54: Αποτελέσματα φόρτισης του φορέα, για P=100kPa

Τύπος ενισχυτικού	σ_{max} (MPa)	σ FRP (MPa)	σ epoxy (MPa)	W_{max} (mm)
L_steel_120x80x8	236	-	-	7,1
Hybrid_BOTTOM_90x60x8_06/07/143.7	239	262	53	10,9
Hybrid_ANGLE_90x65x8_06/07/143.7	235	188	25	6,9

Πίνακας 3.55: Συνολικό βάρος ενισχυτικών ανά μέτρο μήκους και % μείωση

	L_steel 120x80x8	Hybrid_bottom 90x60x8	Hybrid_angle 90x65x8
Βάρος ανά μέτρο (kg/m)	11,98	9,696	10,04
Μείωση %	-	19,1	16,2

Διερευνάται στη συνέχεια η αντικατάσταση του αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού τύπου flat_bar. Η διερεύνηση περιορίζεται στην αντικατάσταση του flat_bar από υβριδικές γεωμετρίες τύπου “single side” και “double side”, με πρόσθετη ενίσχυση Carbon/epoxy όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί στο εδάφιο. Στο Σχήμα 3.26 παρουσιάζονται οι διαστάσεις του flat_bar και τα ισοδύναμα υβριδικά ενισχυτικά τύπου “single side” και “double side”, με τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις, όπως προέκυψαν από την διερεύνηση.



α) flat_bar β) Hybrid_single γ) Hybrid_double

Σχήμα 3.26: Διαστάσεις α) flat_bar, και ισοδύναμων υβριδικών ενισχυτικών τύπου β) Hybrid_single και γ) Hybrid_double.

Στον Πίνακα 3.56 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη φόρτιση του φορέα με πίεση $P=100$ kPa στην επιφάνειά του, από όπου προκύπτει και η ισοδυναμία των υβριδικών ενισχυτικών. Στον Πίνακα 3.57 παρουσιάζεται το βάρος κάθε ενισχυτικού και σημειώνεται η % μείωση στο βάρος η οποία προκύπτει από την αντικατάσταση του αμιγώς χαλύβδινου από το αντίστοιχο υβριδικό ενισχυτικό.

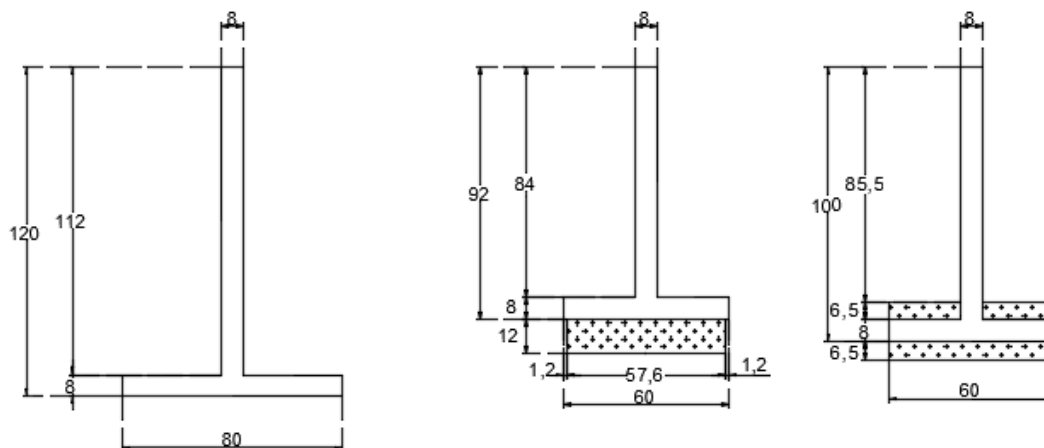
Πίνακας 3.56: Αποτελέσματα φόρτισης του φορέα για $P= 100$ kPa

Τύπος	σ_{\max} (MPa)	σ FRP (MPa)	σ epoxy (MPa)	W_{\max} (mm)
flat_bar	265	-	-	12,8
Hybrid_single_110x8_06/07/143.7	249	486	91	15,7
Hybrid_double_105x8_06/07/143.7	247	470	90	16,2

Πίνακας 3.57: Συνολικό βάρος ενισχυτικών ανά μέτρο μήκους και % μείωση

	flat_bar 150x8	Hybrid_single 110x8	Hybrid_double 105x8
Βάρος ανά μέτρο (kg/m)	9,36	7,48	7,16
Μείωση (%)	-	19,8	23,4

Διερευνάται τέλος η αντικατάσταση του αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού τύπου T_steel. Η διερεύνηση περιορίζεται στην αντικατάσταση του flat_bar από υβριδικές γεωμετρίες τύπου “Hybrid_bottom” και “Hybrid_double_horizontal”, με πρόσθετη ενίσχυση Carbon/epoxy όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί στο εδάφιο. Στο Σχήμα 3.27 παρουσιάζονται οι διαστάσεις του T_steel και τα ισοδύναμα υβριδικά ενισχυτικά τύπου “Hybrid_bottom” και “Hybrid_double_horizontal”, με τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις, όπως προέκυψαν από την διερεύνηση.



α) T_steel

β) Hybrid_bottom

γ) Hybrid_double_horizontal

Σχήμα 3.27: Διαστάσεις α) T_steel, και ισοδύναμων υβριδικών ενισχυτικών τύπου β) Hybrid_bottom και γ) Hybrid_double_horizontal.

Στον Πίνακα 3.58 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη φόρτιση του φορέα με πίεση $P=100$ kPa στην επιφάνειά του, από όπου προκύπτει και η ισοδυναμία των υβριδικών ενισχυτικών. Στον Πίνακα 3.59 παρουσιάζεται το βάρος κάθε ενισχυτικού και σημειώνεται η % μείωση στο βάρος η οποία προκύπτει από την αντικατάσταση του αμιγώς χαλύβδινου από το αντίστοιχο υβριδικό ενισχυτικό.

Πίνακας 3.58: Αποτελέσματα φόρτισης του φορέα για $P=100$ kPa

Τύπος	σ_{max} (MPa)	σ FRP (MPa)	σ epoxy (MPa)	W_{max} (mm)
T_steel_120x80x8	230	-	-	5,2
Hybrid BOTTOM_92x60x8_06/07/143.7	237	250	44	9,6
Hybrid_HORIZONTAL_100x60x8_06/07/143.7	237	216	21	8,2

Πίνακας 3.59: Συνολική μάζα ενισχυτικών, ανά μέτρο μήκους.

	T_steel 120x80x8	Hybrid_bottom 92x60x8	Hybrid_Horizontal 100x60x8
Βάρος ανά μέτρο (kg/m)	11,98	9,83	10,37
Μείωση (%)	-	17,9	13,4

Στον Πίνακα 3.60 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από την διερεύνηση εξοικονόμησης βάρους για κάθε τύπο ενισχυτικού.

Πίνακας 3.60: Εξοικονόμηση βάρους

Τύπος υβριδικού ενισχυτικού	Εξοικονόμηση βάρους (%) σε σχέση με το χαλύβδινο
Ενισχυτικά τύπου L	
Hybrid_BOTTOM_90x60x8	19,1
Hybrid_ANGLE_90x65x8	16,2
Ενισχυτικά τύπου flat bar	
Hybrid_SINGLE_110x8	19,8
Hybrid_DOUBLE_105x8	23,4
Ενισχυτικά τύπου T	
Hybrid_BOTTOM_92x60x8	17,9
Hybrid_HORIZONTAL_100x60x8	13,4

Από τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών με υβριδικά ενισχυτικά οδηγεί σε σημαντική μείωση το βάρους, με μικρή ή καθόλου αύξηση στη μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στο μέσον του ανοίγματος του ενισχυτικού. Συγκεκριμένα:

- Η αντικατάσταση αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού τύπου L_steel διαστάσεων 120x80x8 mm και βάρους 11,98 kg/m, από υβριδικό ενισχυτικό τύπου hybrid_bottom διαστάσεων 90x60x8 mm και συνολικού βάρους (χαλύβδινου μέρους και ενίσχυσης από CFRP) 9,69 kg/m, οδηγεί σε μείωση κατά 19,1% του βάρους. Περαιτέρω μείωση των διαστάσεων του ενισχυτικού, οδηγεί σε υπέρβαση της μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονικής τάσης λόγω κάμψης στο μέσον ανοίγματος του ενισχυτικού κατά ποσοστό μεγαλύτερο του 3%, όριο το οποίο έχει τεθεί για τη θεώρηση μιας υβριδικής διατομής ως ισοδύναμης.

- Η αντικατάσταση αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού τύπου flat_bar διαστάσεων 150x8 mm και βάρους 9,36 kg/m, από υβριδικό ενισχυτικό τύπου hybrid_double side διαστάσεων 105x8 mm και συνολικού βάρους 7,16 kg/m, οδηγεί σε μείωση κατά 23,4% του βάρους. Η περαιτέρω μείωση των διαστάσεων του ενισχυτικού οδηγεί σε υπέρβαση της αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises.

- Η αντικατάσταση αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού τύπου T_steel διαστάσεων 120x80x8 mm και βάρους 11,98 kg/m, από υβριδικό ενισχυτικό τύπου hybrid_bottom διαστάσεων 92x60x8 mm και συνολικού βάρους 9,83 kg/m, οδηγεί σε μείωση κατά 17,9% του βάρους. Περαιτέρω μείωση των διαστάσεων του ενισχυτικού, οδηγεί σε υπέρβαση της μέγιστης αναπτυσσόμενης αξονικής τάσης λόγω κάμψης στο μέσον ανοίγματος του ενισχυτικού κατά ποσοστό μεγαλύτερο του 3%.

Παρατηρούμε επίσης ότι η φόρτιση και των τριών τύπων αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών με τιμή πίεσης $P=100$ kPa οδηγεί σε διαφορετική τιμή της μέγιστης αξονικής τάσης λόγω

κάμψης στο μέσο ανοίγματος του φορέα, σ_{\max} , η οποία φαίνεται να επηρεάζει τελικά την εξοικονόμηση βάρους η οποία μπορεί να επιτευχθεί από την αντικατάσταση με υβριδικό ενισχυτικό. Συγκεκριμένα:

- Στο ενισχυτικό L_steel αναπτύσσεται $\sigma_{\max}=236$ MPa , ίση δηλαδή με το όριο διαρροής του χάλυβα. Η μέγιστη εξοικονόμηση βάρους που επιτυγχάνεται κατά τη διερεύνηση είναι 19,1%

- Στο ενισχυτικό flat_bar αναπτύσσεται $\sigma_{\max}=265$ MPa , μεγαλύτερη δηλαδή από το όριο διαρροής του χάλυβα. Η μέγιστη εξοικονόμηση βάρους που επιτυγχάνεται κατά τη διερεύνηση είναι 23,4%

- Στο ενισχυτικό T_steel αναπτύσσεται $\sigma_{\max}=230$ MPa , μικρότερη, αλλά πολύ κοντά στην τιμή του ορίου διαρροής του χάλυβα. Η μέγιστη εξοικονόμηση βάρους που επιτυγχάνεται κατά τη διερεύνηση είναι 17,1%.

Προχωράμε σε ενδεικτική διερεύνηση με βάση την τιμή της εφαρμοζόμενης πίεσης στην επιφάνεια του φορέα για το ενισχυτικό τύπου L_steel. Στους πίνακες 3.61-3.63 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φόρτισης του φορέα για πίεση 75, 100 και 125 kPa αντίστοιχα και σημειώνονται οι διαστάσεις του αντίστοιχου ισοδύναμου υβριδικού ενισχυτικού.

Πίνακας 3.61 : Αποτελέσματα φόρτισης για πίεση P=75 kPa

Τύπος	σ_{\max} (MPa)	σ FRP (MPa)	σ epoxy (MPa)	W_{\max} (mm)
L_steel_120x80x8	164	-	-	5,7
Hybrid_BOTTOM_85x80x8_06/07/143.7	166	134	14	6,58

Πίνακας 3.62: Αποτελέσματα φόρτισης για πίεση P=100 kPa

Τύπος	σ_{\max} (MPa)	σ FRP (MPa)	σ epoxy (MPa)	W_{\max} (mm)
L_steel_120x80x8	236	-	-	7,14
Hybrid_BOTTOM_90x60x8_06/07/143.7	239	262	53	10,9

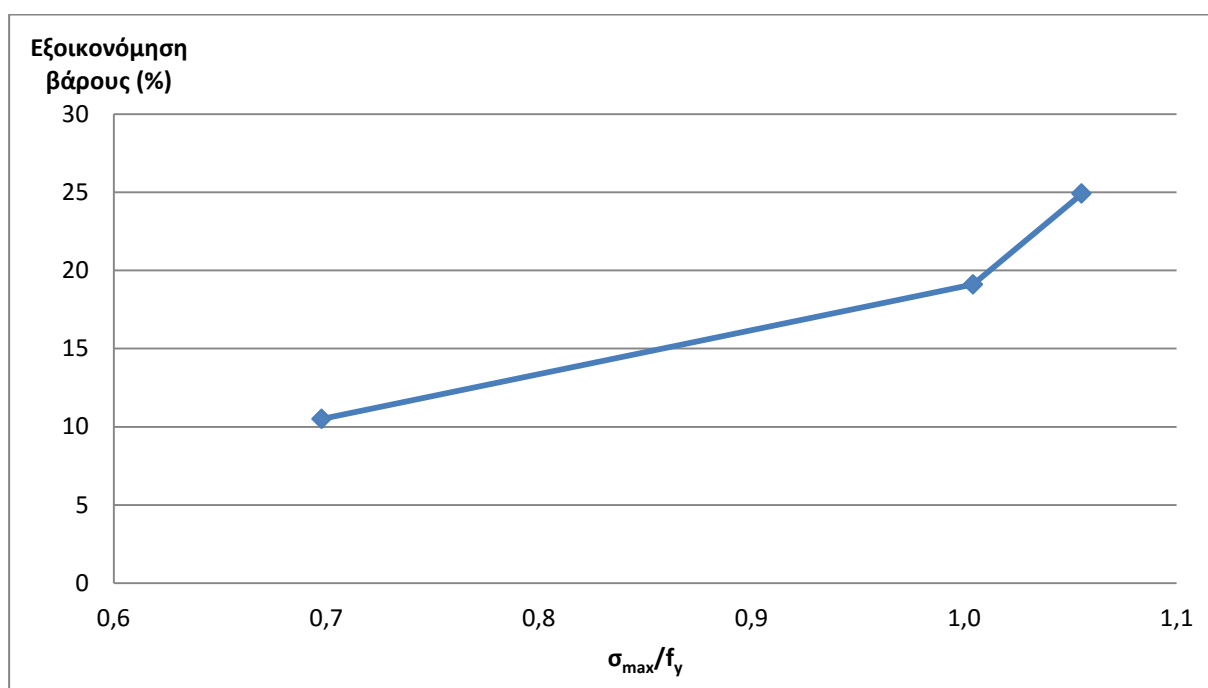
Πίνακας 3.63: Αποτελέσματα φόρτισης για πίεση P=125 kPa

Τύπος	σ_{\max} (MPa)	σ FRP (MPa)	σ epoxy (MPa)	W_{\max} (mm)
L_steel_120x80x8	248	-	-	13
Hybrid_bottom_80x60x8_06/07/143.7	247	448	100	18

Στον Πίνακα 3.64, παρουσιάζονται η σχέση σ_{\max}/f_y για κάθε περίπτωση φόρτισης και σημειώνονται το βάρος ανά μέτρο του αντίστοιχου ισοδύναμου υβριδικού και η ποσοστιαία % μείωση στο βάρος για κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 3.28 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του μεγέθους σ_{\max}/f_y με τη μέγιστη ποσοστιαία % εξοικονόμηση βάρους.

Πίνακας 3.64: Αναπτυσσόμενη σ_{\max}/f_y για κάθε περίπτωση φόρτισης και μείωση βάρους%

P (kPa)	σ_{\max} (MPa)	σ_{\max}/f_y	Διαστάσεις ισοδύναμου Υβριδικού (mm)	Βάρος (kg/m)	Μείωση Βάρους (%)
75	164	0,7	Hybrid bottom 85x80x8	10,72	10,5
100	236	1,0	Hybrid bottom 90x60x8	9,70	19,1
125	248	1,06	Hybrid bottom 80x60x8	9,00	24,9



Σχήμα 3.28 : Σχέση μεταξύ τιμής λόγου σ_{\max}/f_y και εξοικονόμησης βάρους

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της τιμής σ_{\max}/f_y από 0,7 σε 1,06 λόγω αύξησης της εφαρμοζόμενης πίεσης, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της εξοικονόμησης βάρους που μπορεί να επιτευχθεί.

Η εξίσωση της τιμής της αναπτυσσόμενης τάσης με την ονομαστική αντοχή μιας διατομής στο μέσον του ανοίγματος, απαγορεύεται από τους ισχύοντες κανονισμούς οι οποίοι διέπουν την κατασκευή έργων από χάλυβα. Τίθενται με αυτό τον τρόπο ουσιαστικοί περιορισμοί στην εξοικονόμηση βάρους που μπορεί να επιτευχθεί καθώς η σχεδίαση μιας διατομής οδηγεί σε αναπτυσσόμενη τάση στο μέσον του ανοίγματος ενός μέλους, σημαντικά μικρότερη της αντοχής του.

3.5 Συμπεράσματα Εργασίας

Στα πλαίσια της εργασίας, διερευνήθηκε καταρχήν η μείωση στην μέγιστη αναπτυσσόμενη αξονική τάση λόγω κάμψης (σ_{max}) στο μέσο ανοίγματος χαλύβδινων ενισχυτικών τριών τύπων (L, flat bar και T) λόγω της προσθήκης σύνθετων υλικών ινών άνθρακα/εποξικής ρητίνης (Carbon/epoxy). Εξετάστηκαν διάφοροι τύποι τέτοιων υβριδικών γεωμετριών ενίσχυσης για κάθε τύπο ενισχυτικού και προέκυψαν σημαντικές διαφορές στη μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης, συναρτήσει της γεωμετρίας υβριδικού ενισχυτικού, με χρήση ίσης ποσότητας υλικού σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα για τα ενισχυτικά τύπου L_steel, η χρήση διαφορετικών γεωμετριών υβριδικού ενισχυτικού οδήγησε σε τιμές μείωσης από 12% έως και 27%. Για τα ενισχυτικά τύπου T, η χρήση διαφορετικών γεωμετριών υβριδικού ενισχυτικού οδήγησε σε τιμές μείωσης από 17% έως και 30%. Εξαιρέση αποτέλεσαν τα ενισχυτικά τύπου flat bar στα οποία η τιμή της μείωσης ήταν 10-11% ανεξαρτήτως γεωμετρίας υβριδικού ενισχυτικού.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη θέτοντας ως παραμέτρους την τιμή της ροπής αδράνειας του ενισχυτικού (I_{yy}), την τιμή του λόγου εμβαδού διατομής FRP προς εμβαδό χαλύβδινης διατομής (A_{comp}/A_{steel}) την τιμή του λόγου μήκους εφαρμογής FRP προς μήκος χαλύβδινου ενισχυτικού (L_{comp}/L_{steel}) και την τιμή του μέτρου ελαστικότητας E_1 παράλληλα στις ίνες του FRP. Τέθηκαν προς εξέταση δύο τιμές ροπής αδράνειας $I_{yy}=228,4 \text{ cm}^4$ και 460 cm^4 , δύο τιμές λόγου $A_{comp}/A_{steel}=0,4$ και $0,6$, δύο τιμές λόγου $L_{comp}/L_{steel}=0,9$ και $0,7$ και δύο τιμές $E_1=143,7 \text{ GPa}$ (προσομοίωση υλικού Carbon/epoxy) και 50 GPa (προσομοίωση υλικού Glass/epoxy) και μελετήθηκε ο συνδυασμός όλων των παραπάνω τιμών παραμέτρων με χρήση των αποδοτικότερων υβριδικών γεωμετριών όπως αυτές προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο της εργασίας. Από τη διερεύνηση προέκυψε ότι ο αποδοτικότερος συνδυασμός παραμέτρων $\frac{A_{comp}}{A_{steel}} / \frac{L_{comp}}{L_{steel}} / E_1$ είναι ο $0,6/0,7/143,7$ ανεξαρτήτως γεωμετρίας υβριδικού ενισχυτικού και ροπής αδράνειας της διατομής. Ο συνδυασμός αυτός μάλιστα οδηγεί σε πολύ χαμηλές τιμές της αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης σε επίπεδα 14-17% της αντοχής της (85 MPa), γεγονός σημαντικό, καθώς η τάση αυτή αναμένεται να είναι ο κρίσιμος παράγοντας για την αντικατάσταση αμιγώς χαλύβδινων διατομών με υβριδικές και είναι σημαντικό η αναπτυσσόμενη τάση Von Mises να μην ξεπερνά την αντοχή της εποξικής ρητίνης σύνδεσης.

Τέλος διερευνήθηκε η εξοικονόμηση βάρους από την αντικατάσταση αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών από ισοδύναμα υβριδικά ενισχυτικά χάλυβα/FRP όσο το δυνατόν μικρότερων διαστάσεων. Τέθηκαν ως κριτήρια ισοδυναμίας η τιμή της σ_{max} στο μέσο ανοίγματος του υβριδικού ενισχυτικού να μην υπερβαίνει το 3% της σ_{max} του αμιγώς χαλύβδινου ενισχυτικού, η τιμή της μέγιστης αξονικής τάσης παράλληλα με τις ίνες του FRP (σ_{FRP}) να μην υπερβαίνει την αντοχή του και τέλος η τιμή της μέγιστης τάσης von Mises στην εποξική ρητίνη σύνδεσης (σ_{epoxy}) να παραμένει χαμηλότερη από την αντοχή της ή να διατηρείται σε επίπεδα κοντινά με αυτή. Διερευνήθηκαν και οι τρεις τύποι ενισχυτικών (L, flat bar και T) εφαρμόζοντας τις αποδοτικότερες γεωμετρίες υβριδικού ενισχυτικού και τον αποδοτικότερο συνδυασμό παραμέτρων, όπως προέκυψαν από τα προηγούμενα στάδια της εργασίας. Από τα

αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής, προέκυψε κατ' αρχήν ότι μια σημαντική μείωση βάρους της τάξεως του 17,1% - 23,4% είναι δυνατή, ανάλογα με τον τύπο του ενισχυτικού. Παρατηρήθηκε επίσης σχέση εξάρτησης μεταξύ του λόγου αναπτυσσόμενης τάσης σ_{\max} προς την τάση διαρροής του χάλυβα (σ_{\max}/f_y) και της μέγιστης δυνατής εξοικονόμησης βάρους. Πραγματοποιήθηκε ενδεικτική διερεύνηση της σχέσης αυτής χρησιμοποιώντας το ενισχυτικό τύπου L. Για τιμή $\sigma_{\max}/f_y=0,7$ η διερεύνηση κατέδειξε μέγιστη εξοικονόμηση βάρους ίση με 10,5% ενώ για τιμές $\sigma_{\max}/f_y=1$ και 1,06 η αντίστοιχη μέγιστη εξοικονόμηση βάρους προέκυψε ίση με 19,1% και 24,9% αντίστοιχα.

Συμπερασματικά η εργασία καταδεικνύει τόσο τα ωφέλη από την σωστή γεωμετρία εφαρμογής FRP σε χαλύβδινα ενισχυτικά σε περιπτώσεις που το ζητούμενο είναι η ενίσχυση ήδη υπάρχουσών κατασκευών όσο και την δυνατότητα εξ' ολοκλήρου αντικατάστασης αμιγώς χαλύβδινων ενισχυτικών από υβριδικά ενισχυτικά με εν δυνάμει σημαντικά ωφέλη εξοικονόμησης βάρους.

BIBΛIOΓPAΦIA

- A. F. Barbosa and G. O. Ribeiro, Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model, Computational Mechanics Journal, Spain, 1998.
- Ahmed O, Gemert DV, Vadewalle L. Improved model for plate-end shear of CFRP strengthened RC beams. Cement Concrete Compos 2001.
- Arduini M, Di Tommaso A, Nanni A. Brittle failure in FRP plate and sheet bonded beams. ACI Struct J 1997
- “ANSYS Mechanical APDL Element Reference”, edition 15.0, 2013
- Benachour, A., Benyoucef, S., Tounsi, A., and Adda bedia, E.A. "Interfacial stress analysis of steel beams reinforced with bonded prestressed FRP plate", Engineering Structures, 2008
- Bocciarelli, M., Colombi, P., Fava, G. and Poggi, C. “Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates.” Composite Structures, 87(4), 2009
- B. Täljsten,C.S.Hansen,J.W.Schmidt, “Strengthening of old metallic structures in fatigue with prestressed and non-prestressed CFRP laminates”, Constr.Build. Mater.23(4), 2009
- Buyukozturk O, Gunes O, Karaca E. “Debonding problems in seismic retrofitting of RC beams using FRP composites”, Proceedings of the 7th US National Conference on Earthquake Engineering. Boston: EERI (b), 2002
- Büyükoztürk O. et al., “Structural solution using molecular dynamics: fundamentals and a case study of epoxy-silica interface”, Int. J. Solids Struct., 2011
- C. Au, O. Büyükoztürk, “Peel and shear fracture characterization of debonding in FRP plated concrete affected by moisture”, J. Compos. Constr., 2006.
- Deng, J., Lee, M. and Moy, S. “Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate.” Composite Structures, 2004
- D. Kachlakev, T. Miller, S. Yim, K. Chansawat and T. Potisuk, Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Structures Strengthening with FRP Laminates, Special Report SP316,Oregon Department Of Transportation, USA, 2001
- D. Lau, Adhesion between organic and inorganic materials at nanoscale under the effect of moisture, in: 2012 IEEE 6th International Conference on Nano/Molecular Medicine and Engineering (NANOMED), IEEE, 2012.
- El-Tawil S, Ogunc C, Okeil A, Shahawy M. “Static and fatigue analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates”, J Compos Constr, 2001
- EN 13706
- Fawzia, S., Al-Mahaidi, R. and Zhao, X.L. “Experimental and Finite Element Analysis of a Double Strap Joint between Steel Plates and Normal Modulus CFRP.”Composite Structures,2006.
- Fiberline composites, 2003

- F. A. Fathelbab, M. S. Ramadan and A. Al-Tantawy, “Finite Element Modelling of Strengthened Simple Beams using FRP Technique - A parametric Study”, 2011
- Hidekuma Y., A. Kobayashi, T. Miyashita, M. Nagai, “Reinforcing effect of CFRP strand sheets on steel members”, *J. Phys. Sci. Appl.* 1, 2011
- Hidekuma Y., A. Kobayashi, Y. Okuyama, T. Miyashita, M. Nagai, “Experimental study on debonding behavior of CFRP for axial tensile reinforced steel plate by CFRP strand sheets”, *The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2012)*, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2012.
- H. Jiao, F.Mashiri, X.L.Zhao, “A comparative study on fatigue behavior of steel beams retrofitted with welding, pultruded CFRP plates and wet layup CFRP sheets”, *Thin-WalledStruct*, 2012
- Hollaway, L.C. and Cadei, J. “Progress in the Technique of Upgrading Metallic Structures with Advanced Polymer Composites.” *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2002.
- H. Jiao, H.B. Phan, X.L. Zhao, “Fatigue behaviour of steel elements strengthened with strand CFRP sheets”, *Adv. Struct. Eng.* 17 (12), 2014
- João Ramôa Correia, “The new frp materials for civil engineering structural applications”, *Instituto Superior Técnico / ICIST, Technical University of Lisbon, 57th Meeting of the European Council of Civil Engineers (ECCE) Ordem dos Engenheiros*, Lisboa, 2013
- Joint Research Centre, EUR 22864 EN – 2007
- Manoochehr Zoghi, “International handbook of FRP in civil Engineering”, CRC Press, 2014
- Kaiser HP. “Strengthening of Reinforced Concrete with Epoxy-Bonded Carbon Fibre Plastics”, *Doctoral Thesis. Diss. ETH Nr.8918*, ETH Zurich, Switzerland, 1989.
- Lenwari, A., Thepchatri, T., and Albrecht, P. “Debonding Strength of Steel Beams Strengthened with CFRP Plates.” *Journal of Composites for Construction*, 2006.
- Liu, H.B., Zhao, X.L. and Al-Mahaidi, R. (2005(a)). “The Effect of Fatigue Loading on Bond Strength of CFRP Bonded Steel Plate Joints.” In *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures* , BBFS, 2005
- Lenwari, A., Thepchatri, T. and Watanabe, E. “Flexural Response of Steel Beams Strengthened With Partial-length CFRP Plates.” *Journal of Composites for Construction*,2005
- Miller, T.C., Chajes, M.J., Mertz, D.R. and Hastings, J.N. “Strengthening of a Steel Bridge Girder using CFRP Plates.” *Journal of Bridge Engineering*, 2001
- Moy S.S.J. and Bloodworth, A.G. “Strengthening a steel bridge with CFRP composites.” *ICE Proceedings - Structures and Buildings*, 2007
- Nisal Abheetha Peiris, “Steel beams strengthened with ultra high modulus cfrp laminates” *University of Kentucky*, 2011

- Phares, B. M., Wipf T.J., Klaiber F.W., Abu-Hawash A., Lee Y-S. “Strengthening of Steel girder bridges using FRP.” Proceedings of the Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August, 2003
- Photiou, N.K., Hollaway, L.C. and Chryssanthopoulos, M.C. “Selection of CFRP systems for structural upgrading.” Journal of Materials in Civil Engineering, 18 (5), 2006
- Rahimi H, Hutchinson A. “Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates”, J Compos Constr., 2001
- Raof M, Hassanen MAH. “Peeling failure of reinforced concrete beams with fibre-reinforced plastic or steel plates glued to their soffits”, Proc. Institution Civ. Eng. Struct. Build., 2000
- Salar Tabrizi , Hamid Kazem , Sami Rizkalla , Akira Kobayashi, “New small-diameter CFRP material for flexural strengthening of steel bridge girders”, 2015
- Schnerch, D. and Rizkalla, S, “Flexural Strengthening of Steel Bridges with High Modulus CFRP Strips”, Journal of Bridge Engineering, 13(2), 2008
- “Structural Design of Polymer Composites” , EUROCOMP design code and handbook, 1996
- Swamy RN, Mukhopadhyaya P. “Debonding of carbon-fibrereinforced polymer plate from concrete beams”, P I Civil EngStr B, 1999
- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. “Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch.” Journal of Structural Engineering, 2003(a).
- Weber Schoeck Bauteile GmbH, “From national approval to an European Standard - Ways to a safer and wider application of FRP rebars” Baden-Baden, 2013
- Weitzenböck J.R., “Adhesives in marine engineering”, Woodhead Publishing Ltd., 2012
- Zhao X.L.,L.Zhang, “State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures”, Eng.Struct.29(8), 2007
- <http://www.iifc.org/publications/code-references/>
- <http://www.cnr.it/sitocnr/Englishversion/CNR/Activities/RegulationCertification.html>
- ΦΕΚ Β 42 - 20.01.2012
- Α.Ζ. Παπαδάκης, Ν.Γ. Τσούβαλης, «Σχεδιασμός, Κατασκευή και Πειραματική Δοκιμή Δοχείων Πίεσης από Σύνθετα Υλικά για Μεγάλα Θαλάσσια Βάθη (DEEP-CO-HOUS)-Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού», 2014
- Ν.Τσούβαλης, «Τεχνολογία και Μηχανική Σύνθετων Υλικών», Ε.Μ.Π., 1998
- Ι.Βάγιας, Ι.Ερμόπουλος, Γ.Ιωαννίδης, «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα», Κλειδάριθμος, 2008
- Ι. Βαρδουλάκης, «Τεχνική Μηχανική, τόμος ΙΙ», Συμμετρία, 1999
- Σ. Δρίτσος, «Διαστασιολόγηση Επεμβάσεων», Ημερίδα ΚΑΝ.ΕΠΕ., 2012
- ΠΕΤΕΠ, ΤΠ 1501-14-01-08-01,2009

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

ΛΙΒΕΡΕΤΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Δαρδανελλίων, 144
17123, Νέα Σμύρνη,
Αθήνα
Τηλέφωνο: 6984284463
e-mail: liveretos@hotmail.com

Linked in Profile: Giannis Liveretos

Προσωπικά Στοιχεία

Ημερομηνία γέννησης: 25-8-1987
Τόπος Γέννησης: Μαρούσι, Αθήνα

Οικογενειακή κατάσταση: Άγαμος

Εθνικότητα: Ελληνική

Στρατιωτική Θητεία

10/09/2012- 17/11/ 2013 Δόκιμος Έφεδρος Αξιωματικός. Εκτέλεσα τα καθήκοντα του Διμοιρίτη, του εκπαιδευτή και είχα πόστο στο γραφείο διοικητικής μέριμνας του στρατοπέδου. Απόλυση από το Στρατό Ξηράς με το βαθμό του Έφεδρου Ανθυπολοχαγού

Εκπαίδευση

2014- Σήμερα Μεταπτυχιακός Φοιτητής στο Δ.Π.Μ.Σ.: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών» της σχολής Χημικών Μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Θέμα μεταπτυχιακής εργασίας: «Αντικατάσταση χαλύβδινων διατομών από υβριδικές διατομές χάλυβα/FRP»

2005-2012 Δίπλωμα Πολιτικού Μηχανικού από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής.

Αντικείμενα: Στατική, Κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα, Κατασκευές από Χάλυβα, Αντισεισμικός Σχεδιασμός, Εδαφομηχανική, Θεμελιώσεις, Διαχείριση Τεχνικών Έργων, Οδοστρώματα.

Επαγγελματική Δραστηριότητα

Μέλος ΤΕΕ

Ελεύθερος Επαγγελματίας Επισκευή οικίας με βλάβες από σεισμό των

04/2014- 10/2014 Λιβερέτου Σπ. Και Λιβερέτου Π.

Προϋπολογισμός 7.500 €

Βοηθός Μηχανικού Σεισμοί Κεφαλονιάς 25/01/2014

01/2014-04/2014 Παρακολούθησα με την ευγενική άδεια του Τεχνικού Γραφείου του κ. Κωνσταντίνου Ρουχωτά την αποκατάσταση των βλαβών από το σεισμό σε κτήρια:

Ξενοδοχείο 2 αστέρων "La Cite"

Ξενοδοχείο 2 αστέρων "Palatino"

Διάφορα κτήρια στην Κεφαλονιά

Συμμετείχα βοηθητικά σε:

Εκτίμηση βλαβών σε κτήρια

Σύνταξη Μελετών Επισκευής-Ενίσχυσης κτηρίων με βλάβες από σεισμό σύμφωνα με τα ΦΕΚ 455/Β/25-02-2014 και ΦΕΚ 2661/Β/18-10-2013

Επίβλεψη εργασιών επισκευής-ενίσχυσης

Σύνταξη σχεδίων (κατόψεων, όψεων, τομών)

Σύνταξη τοπογραφικών σχεδίων με χρήση GPS

Σύνταξη προϋπολογισμών έργων

02/2013-11/2013 Κατά τη διάρκεια της στρατιωτικής θητείας συμμετείχα στη σύνταξη τεχνικοοικονομικών μελετών :

Μεταλλικών υπόστεγων οχημάτων, χώρων υγιεινής, τοίχου αντιστήριξης, μόνωσης μεταλλικής στέγης , γηπέδου 5x5, γηπέδου τένις, ράμπα πλύσεως οχημάτων από σκυρόδεμα, στεγανοποίηση αποθηκών υγειονομικού υλικού.

Ξένες Γλώσσες

Αγγλικά (Άριστα) Cambridge Certificate of Proficiency in English
Michigan Certificate of Proficiency in English

Γαλλικά (Καλά) Delf A3

Προγράμματα Η/Υ

Σχεδιαστικά – Στατικά: AUTOCAD, SAP 2000, FESPA, ANSYS

Κειμένου – Υπολογιστικά: Microsoft WORD, Microsoft EXCEL, MAPPLE, Matlab