



Πανεπιστήμιο
Κύπρου

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ MSc

*ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΥΠΟ ΘΛΙΨΗ*

Αντρέας Παρασκευάς

Επιβλέποντες Καθηγητές
Δρ. Νικόλας Χατζηπαντελής
Δρ. Δήμος Χαρμπής

Λευκωσία, Απρίλιος 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι λεπτότοιχες κοίλες διατομές με μεγάλη λυγηρότητα εμφανίζουν μια ξεκάθαρη ευαισθησία σε τοπικό λυγισμό όταν καταπονούνται από θλιπτικές τάσεις. Στην ευαισθησία αυτή διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο ο λόγος πλάτους προς πάχος των πλακοειδών στοιχείων της διατομής, καθώς και οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Με στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας και την ταυτόχρονη διατήρηση του εμβαδού διατομής σε χαμηλά επίπεδα των κοίλων τετραγωνικών βραχέων υποστυλωμάτων ανοξείδωτου χάλυβα, η παρούσα εργασία αξιοποιεί παραμετρική διαδικασία καθορισμού της γεωμετρίας με σκοπό την τοπική ενίσχυση (υπό τη μορφή πτυχώσεων) των ευάλωτων περιοχών τέτοιων διατομών. Η απόδοση των διατομών με την προσθήκη πτυχώσεων συγκρίνεται με την απόδοση αντίστοιχων συμβατικών κοίλων τετραγωνικών διατομών. Συγκεκριμένα, αναζητούνται τα κατάλληλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής, όπως είναι το πάχος συγκόλλησης, η θέση και το σχήμα των πτυχώσεων καθώς και το μήκος του κυματοειδούς τμήματος στην κεντρική περιοχή κάθε πλευράς. Πέραν από τη μοντελοποίηση του παραμετρικού σχεδιασμού της γεωμετρίας, εκτελούνται γεωμετρικά και υλικά μη γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων μοντελοποιώντας τη μηχανική απόκριση των υπό εξέταση υποστυλωμάτων. Για την κατασκευή πρωτοτύπου των εξεταζόμενων δοκιμίων, χρησιμοποιείται η τεχνική Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM), η οποία συνδυάζει τη χρήση ρομποτικού βραχίονα και συμβατικής μηχανής συγκόλλησης, επιτρέποντας την παραγωγή τρισδιάστατων μεταλλικών στοιχείων με πολύπλοκες γεωμετρίες, η κατασκευή των οποίων δεν είναι εφικτή με τη χρήση συμβατικών τεχνικών παραγωγής (π.χ. θερμή έλαση). Πειραματικά δεδομένα προηγούμενων εργασιών αξιοποιήθηκαν με στόχο την ακριβέστερη μοντελοποίηση της ανισότροπης μηχανικής απόκρισης του ανοξείδωτου χάλυβα WAAM. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία καταδεικνύουν πως η προσθήκη πτυχώσεων στις ευάλωτες περιοχές σε συνδυασμό με τη μέθοδο WAAM, μπορούν να οδηγήσουν στην ενίσχυση της αντίστασης κοίλων τετραγωνικών διατομών έναντι τοπικού λυγισμού και να μειώσουν αποτελεσματικά την ευαισθησία των διατομών σε αρχικές γεωμετρικές ατέλειες, με αποτέλεσμα, τη σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας τους συγκριτικά με αντίστοιχες συμβατικές διατομές. Ενδεικτικές τιμές αύξησης της φέρουσας ικανότητας των υπό εξέταση διατομών φθάνουν το 33.2% έως 48.7% με 3.1% έως 7.6% αύξηση εμβαδού αντίστοιχα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Στόχοι Έρευνας	10
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	12
2.1 Τεχνική Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο	12
2.1.1 Παραγωγή.....	13
2.1.2 Εφαρμογές Μεθόδου	14
2.1.3 Δοκιμές εφελκυσμού	16
2.1.4 Δοκιμές υποστυλωμάτων.....	18
2.1.5 Αρχικές γεωμετρικές ατέλειες	20
2.3 Τοπικός λυγισμός	23
2.3.1 Κατηγοριοποίηση διατομών σε κλάσεις.....	24
2.3.2 Κρίσιμη ελαστική τάση τοπικού λυγισμού σ_{cr}	24
2.3.3 Ενεργό πλάτος b_{eff}	25
2.4 Μέθοδος προσομοίωσης εξεταζόμενων μοντέλων	27
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	28
3.1 Ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων	28
3.1.1 Παραμετροποίηση γεωμετρίας πειραματικών υποστυλωμάτων	28
3.1.2 Ορισμός υλικού στο ABAQUS	31
3.1.2.1 Ιδιότητες υλικού μέσω δοκιμών εφελκυσμού	32
3.1.3 Τύπος πεπερασμένων στοιχείων.....	36
3.1.4 Οριακές συνθήκες.....	36
3.1.5 Ορισμός γεωμετρικών ατελειών	37
3.1.6 Πυκνότητα πεπερασμένων στοιχείων.....	38
3.1.7 Γραμμική και Μη γραμμική ανάλυση λυγισμού	38
3.2 Επικύρωση.....	39

4. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΙΛΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΤΥΧΩΣΕΩΝ	51
4.1 Παραμετροποίηση Γεωμετρίας Διατομής	51
4.1.1 Σχεδιαστικός χώρος	51
4.1.2 Μεθοδολογία παραμετροποίησης γεωμετρίας.....	52
4.2 Εξεταζόμενες γεωμετρίες	56
4.2.1 Μεταβολή πάχους διατομής t_w	57
4.2.2 Πλάτος b_{eff} , μήκος L_p και αριθμός n_p πτυχώσεων	57
4.2.3 Μέγεθος και γεωμετρία πτυχώσεων	60
4.3 Διαδικασία Αναλύσεων	63
4.3.1 CUFISM.....	63
4.3.2 ABAQUS	66
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	67
5.1 Σύγκριση μεταξύ συμβατικών κοίλων τετραγωνικών υποστυλωμάτων και με προσθήκη πτυχώσεων.....	67
5.1.2 Σύγκριση θλιπτικού φορτίου αντοχής N_{ult}	69
5.1.3 Συγκριτικά γραφήματα θλιπτικού φορτίου – βράχυνσης.....	71
5.1.2 Μορφή αστοχίας μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων	79
6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	82
7. ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	83
7.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου	83
7.2 Μέλη διαδικασίας εκτύπωσης.....	85
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	94

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Συμβατικό και με προσθήκη πτυχώσεων κοίλο τετραγωνικών υποστύλωμα.	11
Εικόνα 2: Απεικόνιση διαδικασίας παραγωγής προσθετικής κατασκευής με σύρμα και τόξο (McAndrew, et al., 2018).	13
Εικόνα 3: Σύστημα προσθετικής κατασκευής με σύρμα και τόξο (MX3D, 2024).	14
Εικόνα 4: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας (Αριστερά εικόνα) (Kyvelou, et al., 2022).	15
Εικόνα 5: Ολοκλήρωση εκτύπωσης της γέφυρας MX3D (Δεξιά εικόνα) (Gardner, et al., 2020).	15
Εικόνα 6: Μοντέλα τοπολογικά βελτιστοποιημένων γεωμετριών του μελετώμενου εξαρτήματος (Αριστερή Εικόνα) (MX3D, 2024).	15
Εικόνα 7: Εκτύπωση της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας (Δεξιά Εικόνα) (MX3D, 2024).	15
Εικόνα 8: Δοκίμια εφελκυσμού με και χωρίς κατεργασία (Kyvelou, et al., 2020).	17
Εικόνα 9: Προσανατολισμός δοκιμίων σε σχέση με την κατεύθυνση εκτύπωσης (Kyvelou, et al., 2020).	17
Εικόνα 10: Τρισδιάστατο μοντέλο CAD με τις επιφανειακές κυματώσεις (Kyvelou, et al., 2021).	18
Εικόνα 11: Πειραματική ρύθμιση για δοκιμές θλίψης. (Kyvelou, et al., 2021).	19
Εικόνα 12: Διάκριση μεταξύ επιφανειακών κυματισμών και τοπικών γεωμετρικών ατελειών.	20
Εικόνα 13: Σημεία καταγραφής ατελειών για κάθε πλευρά. (Kyvelou, et al., 2021).	21
Εικόνα 14: Συνδεσμολογία περιμετρικών κόμβων κάτω & άνω διατομής με άκαμπτους περιορισμούς.	36
Εικόνα 15: Ορισμός υλικού και γεωμετρίας διατομής στο CUFSM.	64
Εικόνα 16 : Υπό εκτύπωση γεωμετρία διατομής 150 x 150.	83
Εικόνα 17: Εισαγωγή γεωμετρίας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhino.	84
Εικόνα 18: Απαιτούμενα μηχανήματα για την τρισδιάστατη διαδικασία εκτύπωσης.	86
Εικόνα 19: Τελική μορφή εκτυπωμένου δοκιμίου.	87
Εικόνα 20: Μελλοντική ανασκόπηση WAAM (Rosli, et al., 2021).	89

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1: Στάδια προσθετικής κατασκευής (Kumar, et al., 2022).	14
Σχήμα 2: Φαινόμενο τοπικού λυγισμού σε λεπτότοιχο χαλύβδινο δομικό στοιχείο.	23
Σχήμα 3: Θλιβόμενη χαλύβδινη πλάκα.....	25
Σχήμα 4: Ανομοιόμορφη κατανομή των διαμηκών τάσεων – Έννοια του ενεργού πλάτους (Becque, 2008).....	26
Σχήμα 5: Γεωμετρικές παράμετροι διατομών πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021).	29
Σχήμα 6: Μοντελοποιημένη γεωμετρία στο λογισμικό Matlab.....	29
Σχήμα 7: Απομείωση εμβαδού διατομής.	35
Σχήμα 8: Καθορισμός πεδίου σχεδίασης και κεντρική γραμμή της διατομής.....	52
Σχήμα 9: Καθορισμός γεωμετρικών μεταβλητών ενισχυμένης διατομής.	53
Σχήμα 10: Καθορισμός σημείων εσωτερικής εφαπτομένης μεταξύ των κύκλων των πτυχώσεων διαμέτρου D_p	54
Σχήμα 11: Ορισμός διαστημάτων καμπύλου τμήματος της κορυφής των πτυχώσεων.	56
Σχήμα 12: Καθορισμός ενεργού πλάτους b_{eff} και σχεδιαστικού μήκους πτυχώσεων L_{z,y_corr}	58
Σχήμα 13: Απεικόνιση των υπό εξέταση διατομών του Πίνακα 10.	62
Σχήμα 14: Ορισμός μισού μήκους κύματος (Yang, et al., 2024).....	65
Σχήμα 15: Ελαστική τάση λυγισμού σ_{cr} και εμβαδόν A διατομών με εξωτερικές πλευρές 200x200.....	68
Σχήμα 16: Σύγκριση μέγιστου αξονικού φορτίου N_{ult} και εμβαδού A μεταξύ διατομών με εξωτερικές πλευρές 350x350.....	77
Σχήμα 17: Μορφές αστοχίας SHS και $Corr_H_p6$ και $Corr_H_p10$	81

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1: Εξομάλυνση ατελειών (Kyvelou, et al., 2021).	22
Διάγραμμα 2: Ενδεικτική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης από ανοξείδωτο χάλυβα και ανθρακούχο χάλυβα.	31
Διάγραμμα 3: Καμπύλη μηχανικών τάσεων – παραμορφώσεων.	34
Διάγραμμα 4: Καμπύλες πραγματικών και μηχανικών τάσεων – παραμορφώσεων.	35
Διάγραμμα 5: Απόκριση δοκιμίου στήλης (150×150×3.5-600-F) για κάθε μία από τις περιπτώσεις ύψους ατέλειας.	39
Διάγραμμα 6: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 60X60X3.5-240-F.	40
Διάγραμμα 7: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 60X60X3.5-240-FR.	40
Διάγραμμα 8: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 80X80X3.5-320-F.	41
Διάγραμμα 9: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 80X80X3.5-320-FR.	41
Διάγραμμα 10: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 100X100X3.5-400-F.	42
Διάγραμμα 11: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 100X100X3.5-400-FR.	42
Διάγραμμα 12: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 120X120X8-450-F.	43
Διάγραμμα 13: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 120X120X8-450-FR.	43

Διάγραμμα 14: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 130X130X3.5-500-R.	44
Διάγραμμα 15: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 130X130X3.5-500-FR.	44
Διάγραμμα 16: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 150X150X3.5-600-F.	45
Διάγραμμα 17: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 150X150X3.5-600-FR.	45
Διάγραμμα 18: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 180X180X3.5-720-F.	46
Διάγραμμα 19: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 180X180X3.5-720-FR.	46
Διάγραμμα 20: Καμπύλη από το CUFSM για τυπική εξεταζόμενη διατομή.	65
Διάγραμμα 21: Συγκριτική καμπύλη από CUFSM για συμβατική και με πτυχώσεις εξεταζόμενη διατομή.	66
Διάγραμμα 22: Σύγκριση μεταξύ συμβατικών (SHS) και με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm (Corr_Hp6) και 10mm διατομών (Corr_Hp10) μέσω καμπυλών λυγισμού.	69
Διάγραμμα 23: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 100x100.	71
Διάγραμμα 24: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 150x150.	72
Διάγραμμα 25: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 200x200.	72
Διάγραμμα 26: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 250x250.	73
Διάγραμμα 27: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 300x300.	73

Διάγραμμα 28: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 350x350.....	74
Διάγραμμα 29:Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 400x400.....	74
Διάγραμμα 30: Ποσοστό αύξησης $\Delta N_{ult} / N_{ult}$ και $\Delta A/A$ μεταξύ διατομών SHS και με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm και 10mm.	78
Διάγραμμα 31: Ποσοστό αύξησης $\Delta N_{ult} / N_{ult}$ και $\Delta A/A$ μεταξύ ενισχυμένων διατομών με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm και 10mm.	78

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πειραματικών δοκιμίων.	30
Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες κοίλων τετραγωνικών πειραματικών δοκιμίων.....	33
Πίνακας 3: Αθροιστικές τιμές συνάρτησης κατανομής για ύψος ατέλειας (Kyvelou, et al., 2021).	38
Πίνακας 4: Λόγοι $N_{u,FE} / N_{u,test}$ για κάθε περίπτωση ύψους ατέλειας.	48
Πίνακας 5: Λόγοι $Slope_{,FE} / Slope_{,test}$ για κάθε περίπτωση ύψους ατέλειας.....	49
Πίνακας 6: Λόγοι $\delta_{u,FE} / \delta_{u,test}$ για κάθε περίπτωση ύψους ατέλειας.	50
Πίνακας 7: Διαστάσεις εξεταζόμενων συμβατικών κοίλων τετραγωνικών διατομών.	57
Πίνακας 8: Υπολογισμός παραμέτρων καθορισμού των πτυχώσεων.....	59
Πίνακας 9: Υπολογισμός παραμέτρων καθορισμού των πτυχώσεων.....	59
Πίνακας 10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση διατομών και σύγκριση εμβαδών.	61
Πίνακας 11: Τιμές παραμέτρου απόδοσης (μ) και αύξησης εμβαδού $\Delta A/A$	68
Πίνακας 12: Υπολογισμός λυγηρότητας και κανονικοποιημένου μέγιστου θλιπτικού φορτίου αντοχής της διατομής.....	70
Πίνακας 13: Αξονικό φορτίο αντοχής N_{ult} εξεταζόμενων δοκιμίων.	75
Πίνακας 14: Ποσοστά αύξησης αξονικού φορτίου αντοχής N_{ult} μεταξύ συμβατικών (SHS) και με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm (Corr_Hp6) και 10mm διατομών (Corr_Hp10).....	76
Πίνακας 15: Τιμές απαιτούμενων παραμέτρων εκτύπωσης.	84
Πίνακας 16: Summary of the average machined properties of the stub columns specimens (Kyvelou et al., 2020).	94
Πίνακας 17: Average effective material properties of as-built coupons (Kyvelou et al., 2020).	94
Πίνακας 18: Summary of the average geometric properties of the stub columns specimens (Kyvelou et al., submitted).....	95

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχοι Έρευνας

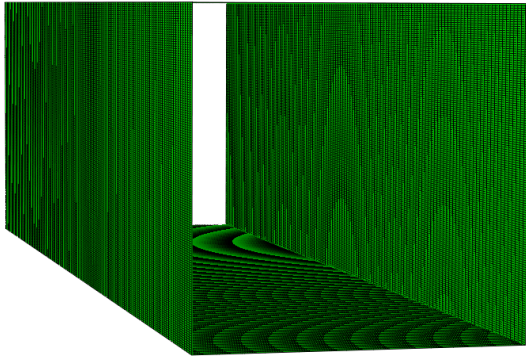
Στόχος αυτής της έρευνας είναι η δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο να προσομοιώνει αποτελεσματικά αξονικά θλιπτικά φορτισμένα δοκίμια λεπτότοιχων κοίλων τετραγωνικών υποστυλωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο στο λογισμικό υπολογιστικής μοντελοποίησης ABAQUS (Dassault Systèmes, 2016), χρησιμοποιώντας μία μη γραμμική ανάλυση λυγισμού, με επακόλουθο στόχο την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας αυτών μέσω κατάλληλης γεωμετρικής μεθόδου τοπικής ενίσχυσης.

Για την επίτευξη αυτού δημιουργείται αρχικά ένα αριθμητικό μοντέλο και έπειτα επικυρώνεται σε σχέση με υπάρχοντα δεδομένα αξονικών θλιπτικά φορτισμένων κοίλων τετραγωνικών υποστυλωμάτων (Kyvelou, et al., 2021). Χρησιμοποιούνται οι μηχανικές ιδιότητες που λαμβάνονται από δοκίμια εφελκυσμού (Kyvelou, et al., 2020) (Hadjipantelis, et al., 2022) και τα μέσα μετρούμενα πάχη των κοίλων τετραγωνικών υποστυλωμάτων (Kyvelou, et al., 2021). Η άγνωστη παράμετρος σε αυτήν την ενότητα της έρευνας είναι το ύψος της ατέλειας που απαιτείται για την ακριβή μοντελοποίηση της επίδρασης των αρχικών γεωμετρικών ατελειών στο τελικό φορτίο. Μια σειρά από εκκεντρότητες που μετρήθηκαν με σάρωση λέιζερ (Kyvelou, et al., 2021) εισάγονται στο παραμετροποιημένο μοντέλο με σκοπό τον προσδιορισμό του συντελεστή ύψους ατέλειας, δίνοντας την πιο αντιπροσωπευτική συμπεριφορά. Τα τελικά φορτία και η αντίστοιχη βράχυνση του άκρου που παράγονται από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμής για να προσδιοριστεί η ακρίβεια των μοντέλων. Με την επικύρωση του μοντέλου έναντι των διαθέσιμων δεδομένων δοκιμής η ανάπτυξη παραμετρικού σχεδιασμού της γεωμετρίας της διατομής έχει ως στόχο την ενίσχυση των λεπτότοιχων κοίλων τετραγωνικών υποστυλωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα έναντι τοπικού λυγισμού με την προσθήκη πτυχώσεων.

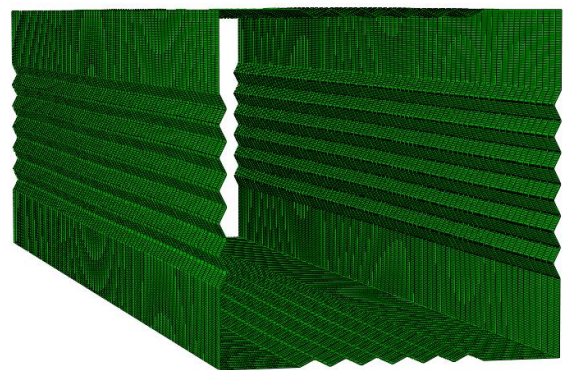
Στην συνέχεια ακολουθεί η μελέτη της μηχανικής απόκρισης των τροποποιημένων με προσθήκη πτυχώσεων κοίλων τετραγωνικών διατομών μέσω γεωμετρικών και υλικών μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων βασισμένη στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και τη γεωμετρία που προσφέρει η διαδικασία Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. Έπειτα γίνεται σύγκριση της απόδοσης των τροποποιημένων διατομών με εκείνη των συμβατικών καθώς και την ανάλυση επιρροής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (μέγεθος, αριθμός, σχήμα) των πτυχώσεων στις περιπτώσεις αύξησης της φέρουσας ικανότητας αντοχής.

Τέλος, πραγματοποιείται εφαρμογή της μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο για την κατασκευή δοκιμαστικού δείγματος, αναδεικνύοντας την δυνατότητα παραγωγής στοιχείων με πολύπλοκες γεωμετρίες οι οποίες δεν είναι εφικτές με τη χρήση συμβατικών μεθόδων παραγωγής.

Συμβατικό υποστύλωμα



Υποστύλωμα με πτυχώσεις



Εικόνα 1: Συμβατικό και με προσθήκη πτυχώσεων κούλο τετραγωνικών υποστύλωμα.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

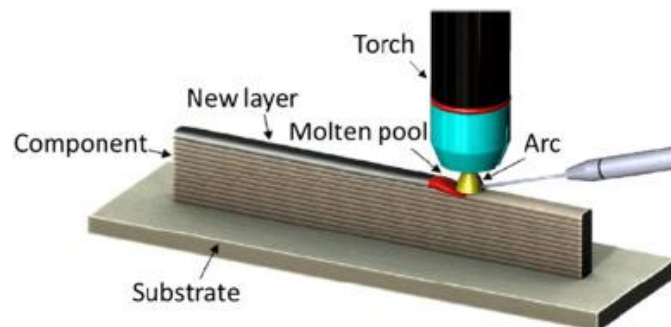
2.1 Τεχνική Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο

Στο σημερινό ανταγωνιστικό περιβάλλον της κατασκευαστικής βιομηχανίας, οι κατασκευαστές προσπαθούν να διατηρήσουν χαμηλά το κόστος παραγωγής, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα των προϊόντων και των διαδικασιών τους. Η τρισδιάστατη εκτύπωση που τεχνικά αναφέρεται ως προσθετική κατασκευή και συγκεκριμένα η μέθοδος κατασκευής με σύρμα και τόξο μεταμορφώνει τον κατασκευαστικό κλάδο (Srivastava, et al., 2019). Ως μια πολυεπίπεδη μέθοδος παραγωγής προσφέρει ευελιξία στο σχεδιασμό και την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων και λειτουργικά διαβαθμισμένων δομών με υψηλή ακρίβεια που δεν μπορεί να συγκριθεί με τις παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής. Πλεονεκτήματα όπως η ευελιξία σχεδιασμού, το χαμηλό κόστος, ο χαμηλός χρόνος παραγωγής, η αμελητέα σπατάλη υλικών, καθώς και η καταλληλότητα για εργασίες επισκευής απαρτίζουν την επαναστατική πτυχή της μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. (Douglas, 2016), (Srivastava & Rathee, 2022).

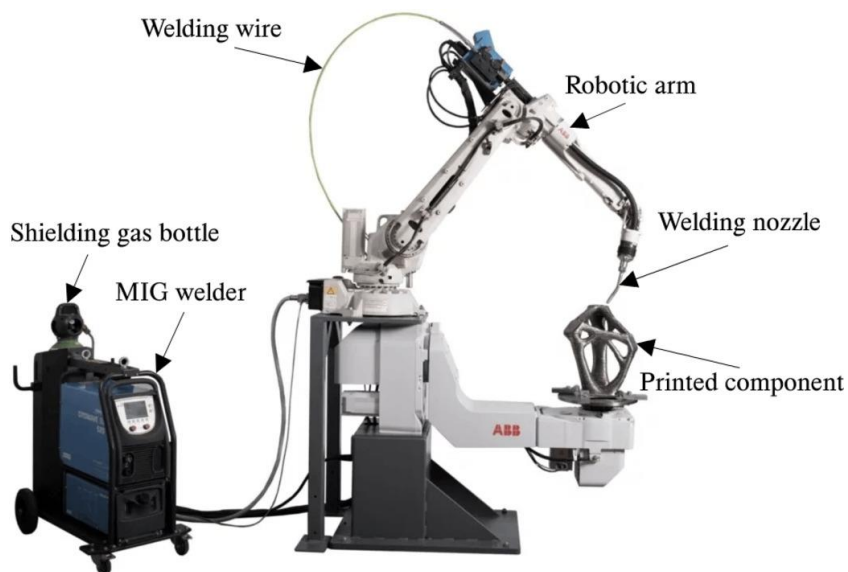
Με βάση την ανασκόπηση των διαφορετικών τεχνικών προσθετικής κατασκευής και της πιθανής χρήσης τους στον κατασκευαστικό κλάδο, οι μέθοδοι Σύντηξης σε Κλίνη Πούδρας (PBF) και Κατευθυνόμενης Εναπόθεσης Ενέργειας (DED) επιτρέπουν την ακριβή δόμηση αν και με περιορισμούς κόστους, χρόνου και μέγιστων διαστάσεων. Από την άλλη η τεχνική Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο είναι ταχύτερη και φθηνότερη με το μειονέκτημα στην ακρίβεια διαστάσεων και τελικού φινιρίσματος της τελικής επιφάνειας (Buchanan & Gardner, 2019). Η κύρια πρόκληση που αντιμετωπίζει η εν λόγω μέθοδος είναι ο κατακερματισμός των ερευνητικών επενδύσεων καθιστώντας δύσκολη την επανάληψη ή την επαναχρησιμοποίηση της έρευνας. Ωστόσο, απαιτείται εκτενέστερη έρευνα σχετικά με την αξιοπιστία, την επαναληψιμότητα, την ευρωστία και την απόδοση της εν λόγω τεχνικής υπό διαφορετικές συνθήκες (Gao, et al., 2015).

2.1.1 Παραγωγή

Όσον αφορά την διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο, *απαρτίζεται από μια αυτοματοποιημένη παραγωγή που περιλαμβάνει την εναπόθεση υλικού σε επάλληλες στρώσεις. Με την πρώτη στρώση να εναποτίθεται πάνω σε μεταλλική βάση, οι επόμενες εκτυπώνονται με διεύθυνση εναπόθεσης από κάτω προς τα πάνω μετατρέποντας τον τρισδιάστατο ψηφιακό σχεδιασμό του υπό μελέτη στοιχείου σε μια υλοποιημένη μορφή. Συγκεκριμένα, γίνεται χρήση σύρματος το οποίο λιώνει με τη βοήθεια ισχύος που τροφοδοτείται από το τόξο εναπόθεσης. Το υλικό του σύρματος μπορεί να είναι ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο, τιτάνιο και άλλα είδους μέταλλα. Η ευελιξία κινήσεων του τόξου εναπόθεσης οφείλεται σε σύγχρονο βιομηχανικό ρομποτικό βραχίονα καθοδηγώντας την προγραμματιζόμενη διαδρομή εναπόθεσης (Εικόνα 2, 3). Επιβάλλοντας συγκεκριμένους περιορισμούς, οι τεχνολογίες πρόσθετων παρέχουν στον σχεδιαστή τη δυνατότητα να τοποθετεί επιλεκτικά (πολλαπλό) υλικό ακριβώς εκεί που χρειάζεται για να επιτύχει τη σχεδιασμένη λειτουργικότητα. Αυτή η ικανότητα επιτρέπει την υλοποίηση δομών που έχουν βελτιστοποιηθεί τοπολογικά, με συνεπακόλουθο την μείωση χρήσης υλικού και τα επακόλουθα αυτού (Gao, et al., 2015).*



Εικόνα 2: Απεικόνιση διαδικασίας παραγωγής προσθετικής κατασκευής με σύρμα και τόξο (McAndrew, et al., 2018).



Εικόνα 3: Σύστημα προσθετικής κατασκευής με σύρμα και τόξο (MX3D, 2024).

Τα τρία κυρίως στάδια τα οποία εξηγούν την Πρόσθετη Κατασκευή με Σύρμα και Τόξο αναφέρονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Στάδια προσθετικής κατασκευής (Kumar, et al., 2022).

2.1.2 Εφαρμογές Μεθόδου

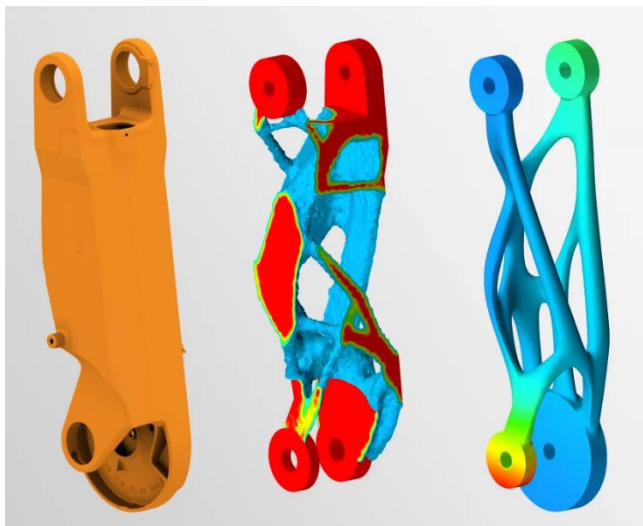
Πολλά άρθρα τα οποία καλύπτουν τις δυνατότητες της μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο αναφέρονται σε εφαρμογές στην βιοιατρική, αεροδιαστημική βιομηχανία, αυτοκινητοβιομηχανία και την ναυτιλία όπου διευρύνεται ως μια βιώσιμη μέθοδος κατασκευής (Buchanan & Gardner, 2019).

Ρεαλιστικά παραδείγματα των δυνατοτήτων της μεθόδου στον κατασκευαστικό κλάδο έχει αναδείξει η Ολλανδική εταιρεία MX3D (MX3D, 2024). Μερικές από τις εφαρμογές είναι η κατασκευή της πρώτης μεταλλικής τρισδιάστατης εκτυπωμένης γέφυρας στον κόσμο από ανοξείδωτο χάλυβα (Εικόνα 4, 5), καθώς και τοπολογικά βελτιστοποιημένα εξαρτήματα / ανταλλακτικά (Εικόνα 6, 7).



Εικόνα 4: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας (Αριστερά εικόνα) (Kyvelou, et al., 2022).

Εικόνα 5: Ολοκλήρωση εκτύπωσης της γέφυρας MX3D (Δεξιά εικόνα) (Gardner, et al., 2020).



α)



β)

Εικόνα 6: Μοντέλα τοπολογικά βελτιστοποιημένων γεωμετριών του μελετώμενου εξαρτήματος (Αριστερή Εικόνα) (MX3D, 2024).

Εικόνα 7: Εκτύπωση της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας (Δεξιά Εικόνα) (MX3D, 2024).

2.1.3 Δοκιμές εφελκυσμού

Με στόχο την εκβάθυνση στη μηχανική συμπεριφορά δοκιμίων εφελκυσμού κατασκευασμένα με τη διαδικασία Προσθητικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο καθώς και τη συσχέτιση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων και της μικροδομής τους, οι συγγραφείς (Kyvelou, et al., 2020) διεξήγαγαν δοκιμές εφελκυσμού σε ανοξείδωτο χάλυβα, τόσο σε ακατέργαστα (χωρίς οποιαδήποτε επεξεργασία της εξωτερικής τους επιφάνειας) όσο και σε κατεργασμένα δοκίμια (ομαλοποιώντας την εξωτερική τους επιφάνεια) (Εικόνα 8). Η σύγκριση μεταξύ των δύο τύπων δοκιμίων διερευνά την επίδραση της γεωμετρικής ανωμαλίας που είναι εγγενής στη διαδικασία Προσθητικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο και πως αυτό επηρεάζει τη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης. Οι μέσες ιδιότητες υλικού για τους δύο τύπους δοκιμίων παρουσιάζονται στους Πίνακες 16, 17 του Παραρτήματος.

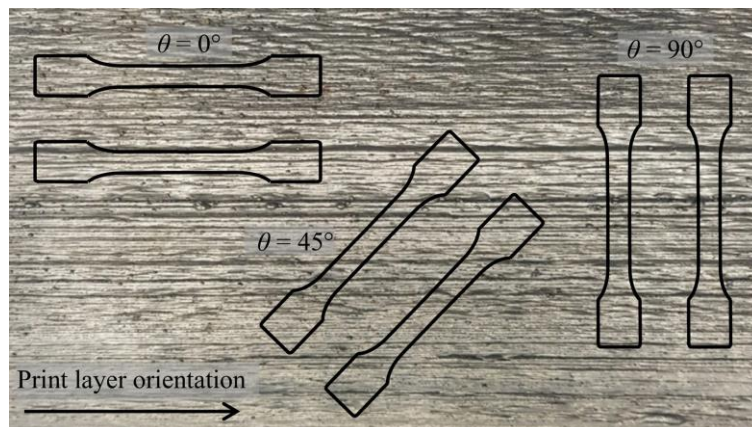
Η ανισοτροπία του υλικού μελετήθηκε λαμβάνοντας δοκίμια διαφορετικών γωνιών ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) ως προς τον προσανατολισμό της διεύθυνσης εκτύπωσης (Εικόνα 9). Τα αποτελέσματα παρουσίασαν σημαντική ανισοτροπία υλικού, με την κατεύθυνση φόρτισης σε σχέση με τον προσανατολισμό του στρώματος εκτύπωσης να έχει ισχυρή επίδραση στα χαρακτηριστικά τάσης-παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, υπό γωνία 45° παρουσιάστηκαν οι υψηλότερες τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής, ενώ τα δείγματα υπό γωνία 90° εμφάνισαν τις χαμηλότερες ιδιότητες. Οι εγγενής γεωμετρικές ατέλειες στην περίπτωση των ακατέργαστων δοκιμίων οδήγησαν στην επιδείνωση του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής συγκριτικά με τα αντίστοιχα κατεργασμένα δοκίμια εφελκυσμού. Κοινά συμπεράσματα και στη μελέτη του άρθρου (Laghi, et al., 2021) όπου διαπιστώνεται ότι η διαδικασία εκτύπωσης χαρακτηρίζεται από περιορισμένη ακρίβεια οδηγώντας σε μια μη αμελητέα τραχύτητα επιφάνειας δειγμάτων και συνεπώς σημαντικής μεταβλητότητας του πάχους των δοκιμίων. Κατά μήκος της εγκάρσιας κατεύθυνσης, οι γεωμετρικές ανωμαλίες επηρεάζουν αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων με 10% μείωση της τάσης διαρροής και 20% της επιμήκυνσης κατά τη θραύση των εξεταζόμενων δειγμάτων.

Όσον αφορά την μικροδομή του εκτυπωμένου υλικού βρέθηκε να παρουσιάζει ισχυρή κρυσταλλογραφική υφή δηλαδή την προτίμηση των κρυστάλλων να οργανωθούν σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στερεοποίησης, αποτέλεσμα το οποίο οφείλεται στη ταχεία στερεοποίηση κατά τη διαδικασία (ραγδαία ψύξη από μια υψηλή θερμοκρασία σε θερμοκρασία δωματίου). Συμπερασματικά, η διαδικασία Προσθητικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο οδηγεί σε ένα ειδικό μικροσκοπικό πρότυπο οργάνωσης των

κρυστάλλων στο υλικό που παράχθηκε, το οποίο διαφέρει σημαντικά από τη μικροδομή του μεταλλικού σύρματος από το οποίο προέρχεται το υλικό.



Εικόνα 8: Δοκίμια εφελκυσμού με και χωρίς κατεργασία (Kyvelou, et al., 2020).

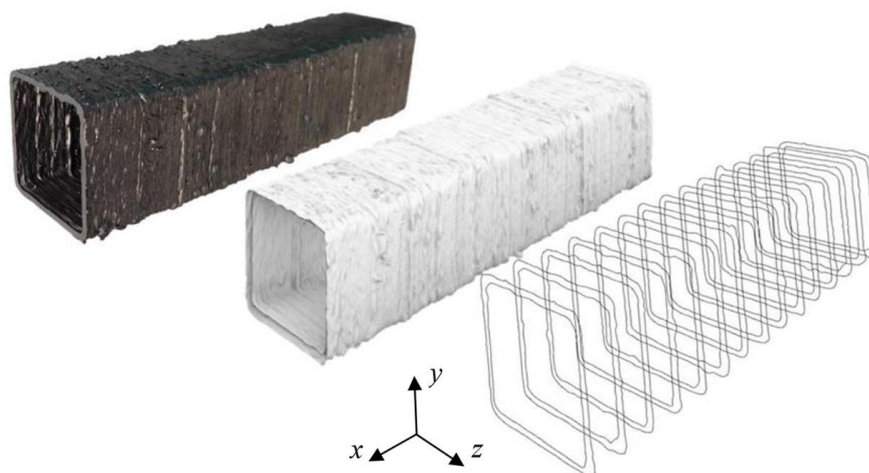


Εικόνα 9: Προσανατολισμός δοκιμίων σε σχέση με την κατεύθυνση εκτύπωσης (Kyvelou, et al., 2020).

Αρκετές πειραματικές μελέτες επικεντρώθηκαν στην πιθανή ανισότροπη συμπεριφορά των στοιχείων που παράγονται από την Προσθετική Κατασκευή με Σύρμα και Τόξο (Gordon, et al., 2018), (Ji, et al., 2017), (Haden, et al., 2017), (Laghi, et al., 2020). Πρώτον, η εναπόθεση διαδοχικών στρωμάτων οδηγεί σε μια ανομοιομορφη γεωμετρία και επιφάνεια, παρέχοντας έτσι μια εγγενή τραχύτητα επιφάνειας και μη αμελητέα απόκλιση του πραγματικού γεωμετρικού σχήματος με το ονομαστικό (Laghi, et al., 2021), (Laghi, et al., 2019). Επιπλέον, η μικροδομική ανάλυση απέδειξε ότι τα στρώματα εναπόθεσης προκαλούν μια ανισότροπη μικροδομή, βλ. π.χ. (Ge, et al., 2018). Αυτό επηρεάζει τη μηχανική απόκριση των μελών, έτσι ώστε η φαινομενική ακαμψία και η αντοχή να εξαρτώνται από την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου.

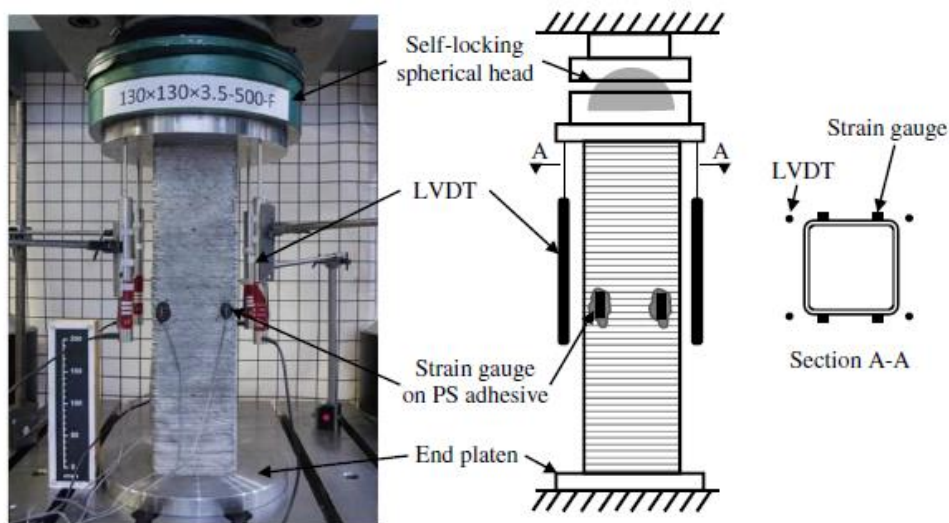
2.1.4 Δοκιμές υποστυλωμάτων

Για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας τετραγωνικών κοίλων υποστυλωμάτων Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο καθώς και τη γεφύρωση του χάσματος στα θεμελιώδη δεδομένα σχετικά με την απόδοση των δομικών στοιχείων που παράγονται χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο κατασκευής, μελετήθηκαν από τους (Kyvelou, et al., 2021) συνολικά 14 εκτυπωμένα υποστυλώματα (SHS). Τα συγκεκριμένα υποστυλώματα εκτυπώθηκαν με διαφορετικές διαστάσεις τόσο σε επίπεδο διατομής, όσο και καθ' ύψος, οδηγώντας σε διαφορετικές κλάσεις διατομών με βάση τον Ευρωκώδικα 3 (κλάσεις 1-4) και το πως αυτές επηρεάζουν την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στον Πίνακα 18 του Παραρτήματος αναγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων. Την κατασκευή τους ανέλαβε η εταιρεία MX3D χρησιμοποιώντας σύρμα ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα ποιότητας 308LSi, διαμέτρου 1mm με ρυθμό εναπόθεσης 4-8 m/mm και ρυθμό τροφοδοσίας σύρματος 0,5-5 kg/h. Τα εκτυπωμένα υποστυλώματα με το πέρας της διαδικασίας εκτύπωσης αφαιρέθηκαν από την πλάκα βάσης, χρησιμοποιώντας κόφτη τόξου πλάσματος και στη συνέχεια αφού κόπηκαν στα κατάλληλα ύψη, τρίφτηκαν τα άκρα τους έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη επαφή με τις πλάκες συμπίεσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το μοντέλο CAD στην Εικόνα 10 δείχνει εμφανώς τις επιφανειακές κυματώσεις που δημιουργούνται στα υποστυλώματα με την εν λόγω διαδικασία εκτύπωσης.



Εικόνα 10: Τρισδιάστατο μοντέλο CAD με τις επιφανειακές κυματώσεις (Kyvelou, et al., 2021).

Οι δοκιμές θλίψης διεξήχθησαν σε γωνία 90° προς τον προσανατολισμό εκτύπωσης του υλικού, χρησιμοποιώντας τέσσερις γραμμικούς ανιχνευτές μετατόπισης (LVDTs), καθώς και αισθητήρες επιφανειακής παραμόρφωσης - ωστόσο η ανακρίβεια των αποτελεσμάτων οδήγησε στη βάση των αποτελεσμάτων κυρίως στα δεδομένα που παρήχθησαν από τους LVDTs. Στην Εικόνα 11 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη /ρύθμιση για τις δοκιμές θλίψης.

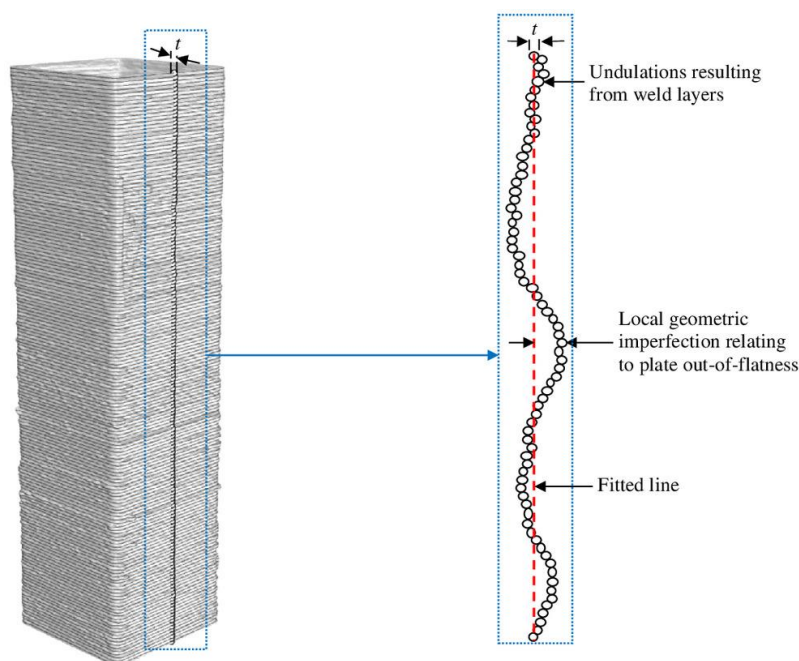


Εικόνα 11: Πειραματική ρύθμιση για δοκιμές θλίψης. (Kyvelou, et al., 2021).

Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι οι εξεταζόμενες στήλες είχαν ένα ευρύτερο φάσμα ικανότητας μεταφοράς θλιπτικού φορτίου, συγκριτικά με αντίστοιχες συμβατικά διαμορφωμένες στήλες. Κύρια αιτία για την εν λόγω διαφορά οφείλεται στις διακυμάνσεις των τοπικών γεωμετρικών ατελειών, οδηγώντας σε στήλες με ασθενέστερες περιοχές από άλλες και συνεπώς στη μεταβλητότητα της ικανότητας μεταφοράς φορτίου (Schafer & Peköz, 1998) μεταξύ διαφορετικών δειγμάτων. Για αυτόν το σκοπό απαιτούνται περαιτέρω δεδομένα δοκιμών και αναλύσεις αξιοπιστίας, με στόχο τον καθορισμό κατάλληλων συντελεστών ασφαλείας για το σχεδιασμό στοιχείων κατασκευασμένων με την διαδικασία Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο.

2.1.5 Αρχικές γεωμετρικές ατέλειες

Λόγω των κυματοειδών ατελειών που δημιουργούνται από τη διαδικασία εκτύπωσης, η απόκλιση του εκτυπωμένου υλικού από την επιπεδότητα κατά το διαμήκη άξονα του στοιχείου είναι αισθητή (Εικόνα 12). Όλα τα υποστυλώματα, ανεξάρτητα από τη διαδικασία κατασκευής που χρησιμοποιείται, περιέχουν κάποιου είδους τοπική ατέλεια λόγω αρχικών γεωμετρικών ατελειών ή εκκεντροτήτων φορτίου. Σε φάση σύγκρισης υπάρχει σε μεγάλο βαθμό εμφανής διαφορά καθιστώντας πιο δύσκολη την αντιπροσωπευτική μοντελοποίηση των εν λόγω στοιχείων (Meng & Gardner, 2020), (Schafer & Peköz, 1998).

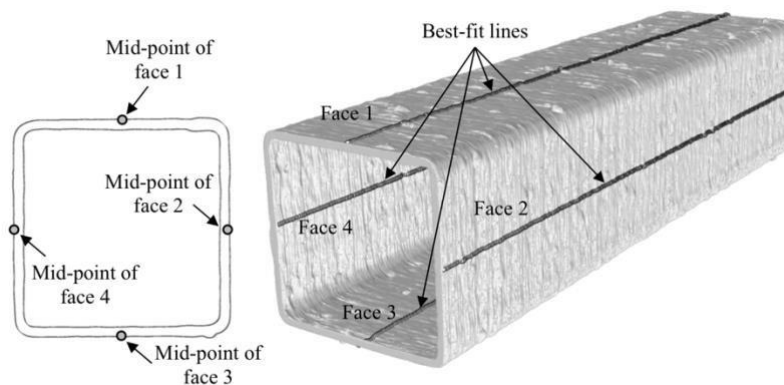


Εικόνα 12: Διάκριση μεταξύ επιφανειακών κυματισμών και τοπικών γεωμετρικών ατελειών.

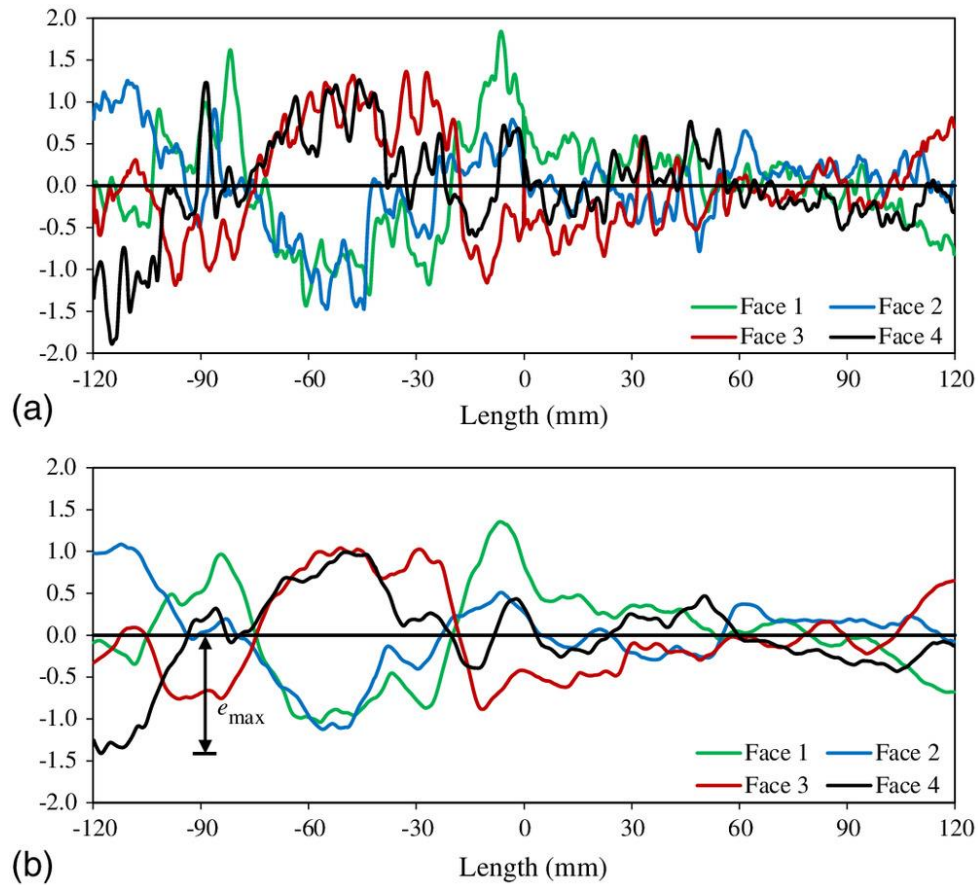
Αυτές οι ανωμαλίες επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες και τη δομική απόδοση του υποστυλώματος. Για τον καθορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των εκτυπωμένων δοκιμίων με βάση την έρευνα (Kyvelou, et al., 2021), χρησιμοποιήθηκαν ποικίλες τεχνικές όπως χειρωνακτικές μετρήσεις, τρισδιάστατη σάρωση λέιζερ, χύτευση σιλικόνης και χρήση της αρχής του Αρχιμήδη. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι οι μέσες επιφάνειες διατομής που προσδιορίστηκαν από τις μετρήσεις με τα χέρια διέφεραν από αυτές που υπολογίστηκαν με βάση την αρχή του Αρχιμήδη. Αυτό δείχνει ότι η χρήση μόνο μετρήσεων με το χέρι μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα στον προσδιορισμό των γεωμετρικών ιδιοτήτων των

δειγμάτων. Σύγκλιση παρατηρήθηκε μεταξύ των επιφανειών διατομής που υπολογίστηκαν με βάση την αρχή του Αρχιμήδη και την τρισδιάστατη σάρωση λέιζερ, με διαφορές σταθερά κάτω του 3%.

Προσέγγιση καθορισμού σχέσης που να εκφράζει το ύψος των ατελειών έχει δοκιμαστεί πειραματικά μέσα από τιμές που συνιστά ο Ευρωκώδικας 3 συγκριτικά με την διάσταση της διατομής όπως $\omega = c/200$ (Meng & Gardner, 2020), καθώς και μέσω πειραματικών μετρήσεων από την έρευνα (Kyvelou, et al., 2021), συλλέγοντας σημεία δεδομένων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής των εξωτερικών επίπεδων όψεων των δειγμάτων όπως παρουσιάζετε στην Εικόνα 13. Το ύψος της ατέλειας για κάθε πρόσωπο (πλευρά διατομής) ορίστηκε ως η μέγιστη απόκλιση των επιλεγμένων δεδομένων σημείων από μια ευθεία γραμμή προσαρμοσμένη στα δεδομένα χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων. Για την εξάλειψη της επίδρασης ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών, όπως κυματώσεις επιφανειών και έντονες χάντρες συγκόλλησης, οι κατανομές ατελειών εξομαλύνθηκαν (Διάγραμμα 1) σε μια καμπύλη κινούμενου μέσου όρου 10 mm και η μέγιστη απόκλιση των εξομαλυνόμενων καμπυλών από τη γραμμή αναφοράς μεταξύ των τεσσάρων επιφανειών λήφθηκε ως το τοπικό ύψος ατέλειας κάθε δοκιμίου. Να σημειωθεί πως, μέχρι στιγμής στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει επικυρωμένη σχέση που να εκφράζει το εύρος των ατελειών με τη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως για παράδειγμα συσχετίζοντας την με το πάχος ή πλάτος της διατομής.



Εικόνα 13: Σημεία καταγραφής ατελειών για κάθε πλευρά. (Kyvelou, et al., 2021).



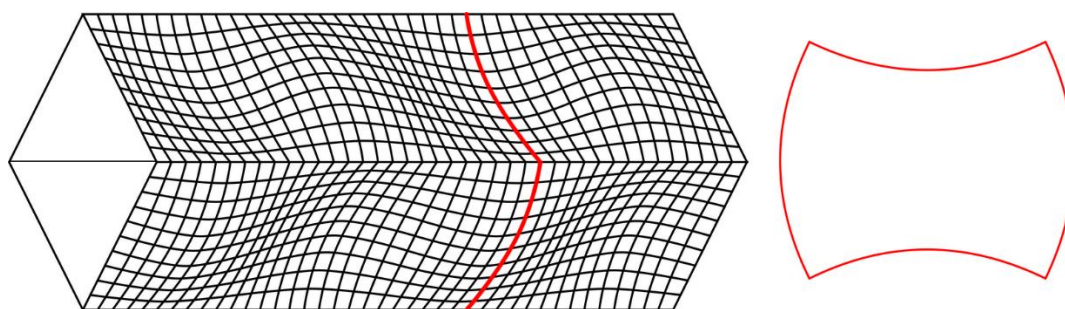
Διάγραμμα 1: Εξομάλυνση ατελειών (Kyvelou, et al., 2021).

Οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες ως ένα εγγενές χαρακτηριστικό των δομικών στοιχείων μπορούν να επηρεάσουν το σημείο έναρξης τοπικού λυγισμού, την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων και ως εκ τούτου τη φέρουσα ικανότητα αυτών. Συνεπώς, μια μη αντιπροσωπευτική τιμή του ύψους ατελειών μπορεί να οδηγήσει σε προβλέψεις υπεραντοχής του μέλους στην περίπτωση ορισμού μικρότερου μεγέθους ύψους ατελειών, καθώς και συντηρητικά αποτελέσματα στην αντίθετη περίπτωση ορισμού μεγαλύτερου μεγέθους συντελεστή, οδηγώντας σε αυξημένων διαστάσεων διατομές και κατά συνέπεια στην αύξηση κόστους και υλικού. Είναι επομένως απαραίτητο να ενσωματωθούν κατάλληλες γεωμετρικές ατέλειες στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.

2.3 Τοπικός λυγισμός

Το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού εμφανίζεται συχνά σε θλιβόμενες χαλύβδινες πλάκες λεπτού πάχους εντός του επιπέδου τους. Λαμβάνεται υπόψη εξετάζοντας μεμονωμένα τη σταθερότητα των πλακών που αποτελούν τη διατομή. Για να ληφθεί υπόψη ο τοπικός λυγισμός σε ολόκληρη τη διατομή, απαιτείται να εξεταστεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων της διατομής. Η αλληλεπίδραση των στοιχείων συνήθως οδηγεί σε αύξηση της τοπικής αντίστασης στο λυγισμό, καθώς κατά μήκος των άκρων της διατομής παρέχεται περιστροφική στήριξη που δεν λαμβάνεται υπόψη όταν οι πλάκες αναλύονται ως ξεχωριστά στοιχεία με απλές συνθήκες στήριξης. Ο (Lundquist, 1939) και (Lundquist, 1939) πραγματοποίησαν τις πρώτες μελέτες που εξετάζουν την τοπική σταθερότητα διαφόρων προφίλ διατομών, όπως τις διατομές τύπου I, Z, C και SHS/RHS (τετραγωνικές και ορθογώνικες κοίλες διατομές), που υποβάλλονται σε αξονική συμπίεση.

Το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού εμφανίζει παρόμοια φαινόμενα με αυτά του λυγισμού στο επίπεδο του μέλους (καθολικός λυγισμός), με τη διαφορά ότι στον τοπικό λυγισμό λυγίζουν ανεξάρτητα τμήματα της διατομής και όχι το σύνολο του δομικού στοιχείου (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Φαινόμενο τοπικού λυγισμού σε λεπτότοιχο χαλύβδινο δομικό στοιχείο.

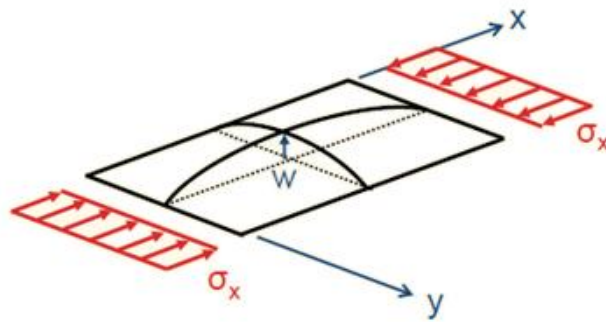
2.3.1 Κατηγοριοποίηση διατομών σε κλάσεις

Ο Ευρωκώδικας 3 (EN 1993-1-1, 2005) ακολουθεί την έννοια της ταξινόμησης των διατομών με σκοπό την αξιολόγηση της ευαισθησίας των δομικών προφίλ σε τοπικό λυγισμό. Η ταξινόμηση των πλακολωρίδων μιας διατομής πραγματοποιείται με βάση των συνθήκων στήριξης τους (διέρειστες, πρόβολοι, ειδικές μορφές), το είδος της φόρτισης (θλιπτική, καμπτική ή συνδυασμός τους), ο τρόπος κατασκευής της διατομής (ελατή ή συγκολλητή), την λυγηρότητα των πλακολωρίδων η οποία ορίζεται ως το πηλίκο του πλάτους προς το πάχος τους και με βάση την ποιότητα του χάλυβα (Μπανιωτόπουλος, 2017).

Ανάλογα με την προκύπτουσα κατηγορία διατομής, τίθενται κατάλληλοι περιορισμοί στην αντοχή της διατομής και στην ικανότητα περιστροφής έτσι ώστε να καθορίσει την κατάλληλη σχεδιαστική αντίσταση τους. Στην πραγματικότητα, τα επιμέρους στοιχεία πλάκας εντός των δομικών διατομών δεν συμπεριφέρονται μεμονωμένα, και μια ουσιαστικά ακριβέστερη αναπαράσταση της τοπικής απόδοσης λυγισμού των προφίλ πλήρους διατομής μπορεί να ληφθεί λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων. Οι διατομές οι οποίες έχουν την ικανότητα αντοχής να φτάσουν το φορτίο διαρροής χωρίς την εμφάνιση τοπικού λυγισμού ταξινομούνται ως διατομές κλάσης 1-3, ενώ κλάσης 4 οι διατομές αυτές που αστοχούν λόγω τοπικού λυγισμού προτού φθάσουν την τάση διαρροής.

2.3.2 Κρίσιμη ελαστική τάση τοπικού λυγισμού σ_{cr}

Η χαλύβδινη λεπτή πλάκα στο Σχήμα 3, η οποία θεωρείται απολύτως επίπεδη και αρθρωτά στηριγμένη στις τέσσερις πλευρές της, θλίβεται εντός του επιπέδου της κατά τον άξονα $x-x$ με θλιπτική τάση σ_x . Για μικρές τιμές σ_x αναπτύσσονται κάθετα στο επίπεδο της πλάκας παραμορφώσεις w . Με την αφαίρεση της τάσης σ_x η πλάκα επανέρχεται πλήρως στο αρχικό της σημείο χωρίς οποιαδήποτε μόνιμη παραμόρφωση. Στην περίπτωση τώρα που η θλιπτική τάση σ_x λάβει την τιμή της κρίσιμης τάσης σ_{cr} , τότε δημιουργούνται μόνιμες παραμορφώσεις και μετά τον μηδενισμό της κρίσιμης τάσης σ_{cr} . Η τάση σ_{cr} ονομάζεται κρίσιμη τάση τοπικού λυγισμού ή κρίσιμη τάση ελαστικής κύρτωσης της υπό εξέτασης λεπτής θλιβόμενης χαλύβδινης πλάκας. Εξαιτίας της παραμόρφωσης που υφίσταται η πλάκα, προκαλούνται μεμβρανικές τάσεις οι οποίες σταθεροποιούν την πλάκα και παρέχουν μεταλυγισμική αντοχή. Αυτό δίνει στις πλάκες τη δυνατότητα να παραλαμβάνουν φορτία μεγαλύτερα από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού τους (Μπανιωτόπουλος, 2017).



Σχήμα 3: Θλιβόμενη χαλύβδινη πλάκα.

Η ελαστική τάση λυγισμού σ_{cr} για μια ορθογώνια πλάκα με πλάτος b και πάχος t , από ελαστικό υλικό με συντελεστή μέτρου ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν , μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (1), όπου k είναι ο συντελεστής λυγισμού της πλάκας, ο οποίος εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: α) τον λόγο διαστάσεων της πλάκας, β) τις οριακές συνθήκες στα άκρα της πλάκας και γ) την κατανομή της τάσης που προκύπτει από τη φόρτιση. Συνήθως, οι πλάκες θεωρούνται μακριές, και η επίδραση του λόγου διαστάσεων στην τάση λυγισμού παραβλέπεται.

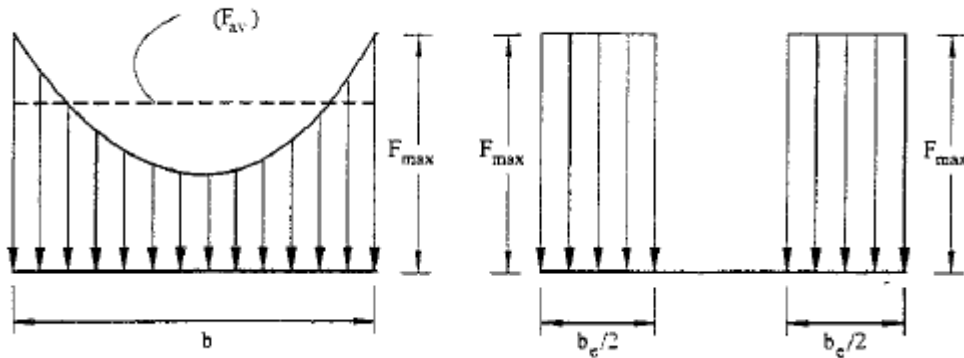
$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) b^2} \quad (1)$$

Η κατανομή της εφαρμοζόμενης τάσης κατά μήκος των φορτισμένων άκρων των πλακών τυπικά ποικίλλει από καθαρή θλίψη έως καθαρή κάμψη. Η ομοιόμορφη θλίψη είναι η πιο σοβαρή περίπτωση φόρτισης και έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη ελαστική τάση λυγισμού, ενώ η τάση λυγισμού αυξάνεται καθώς η κατανομή της εφαρμοζόμενης τάσης γίνεται ολοένα και πιο ανομοιόμορφη. (Gardner, et al., 2019)

2.3.3 Ενεργό πλάτος b_{eff}

Η αντοχή των πλακοειδών στοιχείων μετά τον λυγισμό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά πειραματικά το 1928 και η πρώτη θεωρία παρουσιάστηκε από τους von Karman, Sechler και Donnell το 1932 (Karman, et al., 1932). Εισηγάγαν την έννοια του ενεργού πλάτους με βάση την παρατήρηση ότι στην περίπτωση εμφάνισης λυγισμού της πλάκας ($\sigma > \sigma_{cr}$), η κατανομή

των διαμηκών τάσεων γίνεται ανομοιόμορφη με αποτέλεσμα να ανακατανέμεται μακριά από το κέντρο της πλάκας έχοντας υψηλότερες τιμές πλησίον των άκρων και μικρότερες στο μέσον. Συμπερασματικά οι διαμήκεις λωρίδες υλικού δίπλα στα διαμήκη στηρίγματα φέρουν το συνολικό φορτίο. Η εν λόγω κατανομή φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Ανομοιόμορφη κατανομή των διαμηκών τάσεων – Έννοια του ενεργού πλάτους (Becque, 2008).

Ο Winter (1970) πρότεινε την Εξίσωση (2) για τον υπολογισμό του ενεργού πλάτους. Η συγκεκριμένη εξίσωση λαμβάνει υπόψη την επίδραση της λυγηρότητας της πλάκας λ_p (3), η οποία είναι ένα μέτρο του λόγου πλάτους ως προς το πάχος της πλάκας.

$$\rho = \frac{b_e}{b} = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda_p}\right) \frac{1}{\lambda_p} \quad (2)$$

όπου η λυγηρότητα των πλακών δίνεται από:

$$\lambda_p = \left(\frac{1.052}{\sqrt{k}}\right) \left(\frac{b}{t}\right) \sqrt{\frac{F_{max}}{E}} \quad (3)$$

όπου b είναι το πλάτος της πλάκας, t το πάχος, E το μέτρο ελαστικότητας, k αδιάστατος συντελεστής τοπικού λυγισμού και F_{max} η μέγιστη τάση όπως παρουσιάζετε στο Σχήμα 4.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (EN 1993-1-5, 2006) ο μειωτικός συντελεστής για τον λυγισμό εσωτερικών πλακοειδών στοιχείων δίνεται από τις Εξισώσεις (4) και (5).

$$\rho = 1,0 \quad \text{για} \quad \lambda_p \leq 0.673 \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,055(3 + \psi)}{\lambda_p^2} \leq 1,0 \quad \text{για} \quad \lambda_p > 0.673, \text{ όπου } (3 + \psi) \geq 0 \quad (5)$$

Η αδιάστατη παράμετρος της σχετικής τοπικής λυγηρότητας λ χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό προσδιορισμό της λυγηρότητας ενός δομικού μέλους σε σχέση με τον τοπικό λυγισμό. Ορίζεται ως ο λόγος της τετραγωνικής ρίζας του αξονικού φορτίου διαρροής προς το ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Η εν λόγω παράμετρος βοηθά στην αξιολόγηση της ευστάθειας μελών υπό θλιπτικά φορτία. Η Εξίσωση (6) ακολουθήθηκε για τον καθορισμό της εν λόγω παραμέτρου, όπου A είναι το εμβαδόν της διατομή, f_y η τάση διαρροής και N_{cr} το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} \quad (6)$$

2.4 Μέθοδος προσομοίωσης εξεταζόμενων μοντέλων

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για την υπολογιστική προσομοίωση των δομικών στοιχείων που εξετάζονται έχουν πλήρη υποστήριξη από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες υπολογιστικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας το λογισμικό ABAQUS σε τετραγωνικές (SHS), ορθογωνικές (RHS) και κυκλικές (CHS) κοίλες διατομές, οι οποίες έχουν επικυρωθεί μέσω σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα (Gardner & Nethercot, 2004) (Theofanous & Gardner, 2009). Είναι σύνηθης πρακτική να υιοθετείται ότι η αρχική γεωμετρική ατέλεια του υπό εξέταση υποστυλώματος είναι παρόμοια με την πρώτη ιδιοτιμή, η οποία αντιστοιχεί στο χαμηλότερο επίπεδο λυγισμού. Αυτή η υπόθεση επιβεβαιώθηκε από μια μελέτη των (Gardner & Nethercot, 2004). Στην παρούσα εργασία, ακολουθήθηκε η εν λόγω πρακτική στο στάδιο της επικύρωσης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων όπου οι γεωμετρίες αποτελούνταν από κοίλες τετραγωνικές διατομές SHS χωρίς οποιαδήποτε περίπλοκη γεωμετρία. Κατά την ανάλυση των ενισχυμένων διατομών με την προσθήκη πτυχώσεων λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας που δημιουργείται, κρίθηκε ακριβέστερη μοντελοποίηση των αρχικών γεωμετρικών ατελειών με τη χρήση της μεθόδου που παρέχει το λογισμικό CUFMS, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί επίσης σε σχετική έρευνα (Meng, et al., 2023).

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

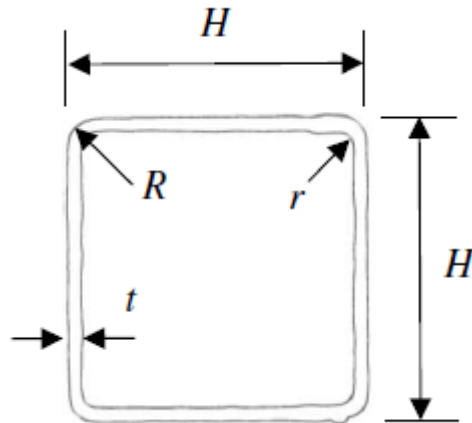
3.1 Ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία αρχικά ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) συμβατικής κοίλης τετραγωνικής διατομής (SHS) με σκοπό την διασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που προσφέρει και την αποφυγή ενός μοντέλου ως πηγή σφαλμάτων. Για την επικύρωση (validation) του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηριστικά ανοξείδωτου χάλυβα και γεωμετρίες δοκιμών υποστυλωμάτων, ακολουθώντας τα πειραματικά αποτελέσματα από τους (Kyvelou, et al., 2021). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα αντοχών που διενεργήθηκαν σε 14 τετραγωνικές κοίλες διατομές υποστυλωμάτων κατασκευασμένα με την τεχνική Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. Στόχος, η αναπαραγωγή των πλήρων σχέσεων φορτίου-παραμόρφωσης που παρατηρήθηκαν στην πειραματική μελέτη καθώς και ο καθορισμός μίας τιμής συντελεστή ύψους ατέλειας (ω) που να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια στα υπό μελέτη/ενίσχυση υποστυλώματα.

3.1.1 Παραμετροποίηση γεωμετρίας πειραματικών υποστυλωμάτων

Η διαδικασία επικύρωσης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πειραματικών δοκιμών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Τα αρχικά SHS των κοίλων τετραγωνικών διατομών με το γράμμα S για το τετράγωνο, ακολουθούμενα από τις διαστάσεις της διατομής τους (πλάτος \times βάθος \times πάχος) ακολουθούμενο από το μήκος της στήλης στελέχους σε mm, το γράμμα F για σταθερές συνθήκες και R για επαναλαμβανόμενα δείγματα. Η μεθοδολογία σχεδιασμού που ακολουθήθηκε βασίζεται στη συνδεσμολογία κόμβων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της διατομής. Χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα προγραμματισμού Matlab (Matlab Mathwork R2018b, 2022), πραγματοποιήθηκε η παραμετροποίηση της κεντρικής γραμμής της διατομής μέσω της δημιουργίας μιας σειράς συντεταγμένων. Τα σημεία αυτά διαμορφώνονται ανάλογα με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται με βάση την υπό εξέταση διατομή, δημιουργώντας έτσι την εξατομικευμένη γεωμετρία. Οι παράμετροι αυτοί αποκτήθηκαν μέσω σαρώσεων λέιζερ, όπου t το μέσο πάχος, A το μέσο εμβαδόν της διατομής, H το μέσο πλάτος της πλευράς της διατομής, και τα r και R αντιπροσωπεύουν τις ακτίνες της εσωτερικής και

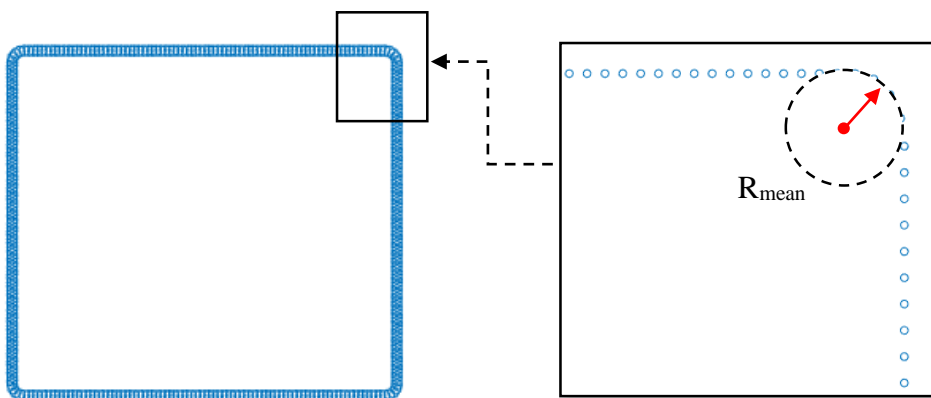
εξωτερικής γωνίας αντίστοιχα. Οι παραπάνω παράμετροι απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Γεωμετρικές παράμετροι διατομών πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021).

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η παραμετροποιημένη γεωμετρία της κεντρικής γραμμής της συγκεκριμένης διατομής. Δεδομένου ότι η εκτυπωμένη διατομή αποτελείται από ένα πάχος συγκόλλησης t , για το στάδιο της μοντελοποίησης και τη δημιουργία της κεντρικής γραμμής ακολουθείται η χρήση του μισού πάχους $t/2$ και του μέσου όρου (R_{mean}) (Εξίσωση 7) μεταξύ της εξωτερικής (R) και εσωτερικής (r) ακτίνας.

$$R_{\text{mean}} = (R + r) / 2 \quad (7)$$



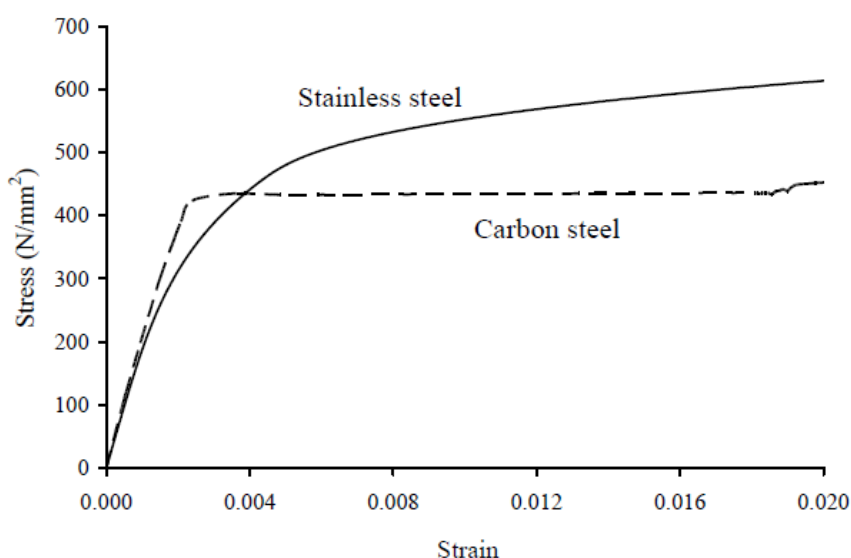
Σχήμα 6: Μοντελοποιημένη γεωμετρία στο λογισμικό Matlab.

Δοκίμιο	H (mm)	r (mm)	R (mm)	Rmean (mm)	t (mm)	A (mm²)
60×60× 3.5-240-F	60.0	4.48	7.15	5.82	4.11	915
60×60× 3.5-240-FR	60.0	4.76	7.19	5.98	3.85	844
80×80× 3.5-320-F	79.9	4.46	7.11	5.79	4.05	1,227
80×80× 3.5-320-FR	80.0	4.49	7.15	5.82	3.91	1,182
100×100×3.5-400-F	100.0	4.32	6.54	5.43	3.99	1,497
100×100×3.5-400-FR	99.9	4.29	6.79	5.54	3.99	1,520
120×120×8.0-450-F	118.0	5.60	8.11	6.86	6.53	2,894
120×120×8.0-450-FR	117.1	5.28	8.09	6.69	6.27	2,710
130×130×3.5-500-F	129.0	4.92	7.35	6.14	3.62	1,849
130×130×3.5-500-FR	128.8	4.96	7.73	6.35	3.64	1,824
150×150×3.5-600-F	149.8	4.37	6.67	5.52	4.05	2,324
150×150×3.5-600-FR	149.7	4.22	7.11	5.67	4.00	2,327
180×180×3.5-720-F	179.5	4.45	6.73	5.59	4.05	2,832
180×180×3.5-720-FR	179.0	4.65	6.87	5.76	4.06	2,874

Πίνακας 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πειραματικών δοκιμίων.

3.1.2 Ορισμός υλικού στο ABAQUS

Ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιείται ευρέως σε μια σειρά βιομηχανιών με βασικό πλεονέκτημα έναντι του συνηθισμένου ανθρακούχου χάλυβα να είναι η αντοχή του στη διάβρωση και καλύτερη απόδοση έναντι εφελκυσμού. Ενώ ο ανθρακούχος χάλυβας χαρακτηρίζεται με ακρίβεια από μια διγραμμική (ελαστική, τέλεια πλαστική) απόκριση τάσης-παραμόρφωσης, ο ανοξείδωτος χάλυβας παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά χωρίς σαφώς καθορισμένο σημείο διαρροής. (Διάγραμμα 2) (Gardner, 2005).



Διάγραμμα 2: Ενδεικτική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης από ανοξείδωτο χάλυβα και ανθρακούχο χάλυβα.

Αυτό οδήγησε στην ανάγκη χρήσης μοντέλων υλικών, τα οποία αναπαριστούν αναλυτικά την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που προτάθηκαν από τους Ramberg – Osgood (Ramberg & Osgood, 1943) και τροποποιήθηκαν από τον (Hill, 1944). Η έκφραση Ramberg - Osgood ορίζεται από την Εξίσωση (8) και περιλαμβάνει το μέτρο ελαστικότητας E , το συμβατικό όριο διαρροής ($\sigma_{0.2}$) και από τον εκθέτη σκλήρυνσης (n) για την ελαστική περιοχή (Εξίσωση 9).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (\sigma < \sigma_{0.2}) \quad (8)$$

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}}\right)} \quad (9)$$

Η Εξίσωση (10) περιγράφει τον ορισμό μιας δεύτερης καμπύλης ως προς το γενικό σύστημα (σ - ε). Αυτήν της πλαστικής περιοχής του υλικού η οποία εμφανίζεται για τιμές τάσεων που ξεπερνούν το συμβατικό όριο διαρροής ($\sigma_{0.2}$), με αποτέλεσμα το υλικό να μην είναι σε θέση να ανακτήσει εξολοκλήρου τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη φόρτιση του και εμφανίζοντας μόνιμες παραμορφώσεις. Απαιτήση για το δεύτερο τμήμα της καμπύλης είναι ο εκθέτης σκλήρυνσης παραμόρφωσης m και το συμβατικό μέτρο ελαστικότητας $E_{0.2}$ που ορίζεται ως η κλίση της εφαπτόμενης στο συμβατικό όριο διαρροής ($\sigma_{0.2}$) και δίνεται από την Εξίσωση (11).

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_u - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} \quad (\sigma > \sigma_{0.2}) \quad (10)$$

$$E_{0.2} = \frac{E}{1 + 0.002n \frac{E}{\sigma_{0.2}}} \quad (11)$$

3.1.2.1 Ιδιότητες υλικού μέσω δοκιμών εφελκυσμού

Οι μηχανικές ιδιότητες του Πίνακα 2 χρησιμοποιήθηκαν για την ακριβέστερη μοντελοποίηση των κοίλων τετραγωνικών πειραματικών δοκιμών. Οι εν λόγω τιμές εξάχθηκαν από τους Kyvelou et al πραγματοποιώντας δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια ανοξειδωτου χάλυβα κατασκευασμένα με τη μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο, έχοντας κύρια χαρακτηριστικά τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης εκτύπωσης και φόρτισης $\theta = 90^\circ$ καθώς και τη μη επεξεργασία της τελικής επιφάνειας των εκτυπωμένων στοιχείων (as-built) (Hadjipantelis, et al., 2022).

Οι τιμές των συντελεστών R_{11} , R_{22} , R_{33} , R_{12} , R_{13} , R_{23} είναι εξαρτημένες από τον προσανατολισμό του υλικού του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και την κατεύθυνση φόρτισης του. Οι δείκτες των συντελεστών περιγράφονται με την σύμβαση που ακολουθήθηκε από προηγούμενες σχετικές εργασίες (Kyvelou, et al., 2020), (Gardner, et al., 2020) η οποία σύμβαση περιγράφει τις κύριες κατευθύνσεις με τις γωνίες $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. Καθώς η διεύθυνση φόρτισης των κοίλων τετραγωνικών διατομών είναι κάθετη στη διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού $\theta = 90^\circ$, η διαμήκης κατεύθυνση των στοιχείων είναι η αρίθμηση 1 και για την

κατεύθυνση $\theta = 0^\circ$ η αρίθμηση 2. Οι εν λόγω συντελεστές ορίζονται στο Abaqus μέσω της υποκατηγορίας *PLASTIC with *POTENTIAL (Dassault Systèmes, 2016) ως ακολούθως:

$$R_{11} = \frac{\sigma_{0,11}}{\sigma_0}; \quad R_{22} = \frac{\sigma_{0,22}}{\sigma_0}; \quad R_{33} = \frac{\sigma_{0,33}}{\sigma_0}; \quad R_{12} = \frac{\tau_{0,13}}{\tau_0}; \quad R_{23} = \frac{\tau_{0,23}}{\tau_0}; \quad (12)$$

Καθώς το πάχος των εκτυπωμένων στοιχείων είναι αμελητέο συγκριτικά με τις άλλες δύο διαστάσεις ο συντελεστής R_{33} είναι ίσος με το συντελεστή που εκφράζει τη συμπεριφορά για γωνιά $\theta = 0^\circ$ και επομένως $R_{22} = R_{33}$. Ακολουθώντας την προσέγγιση του (Becque, 2008) για τον συντελεστή R_{12} , οι πιο πάνω σχέσεις μπορούν να εκφραστούν ως εξής :

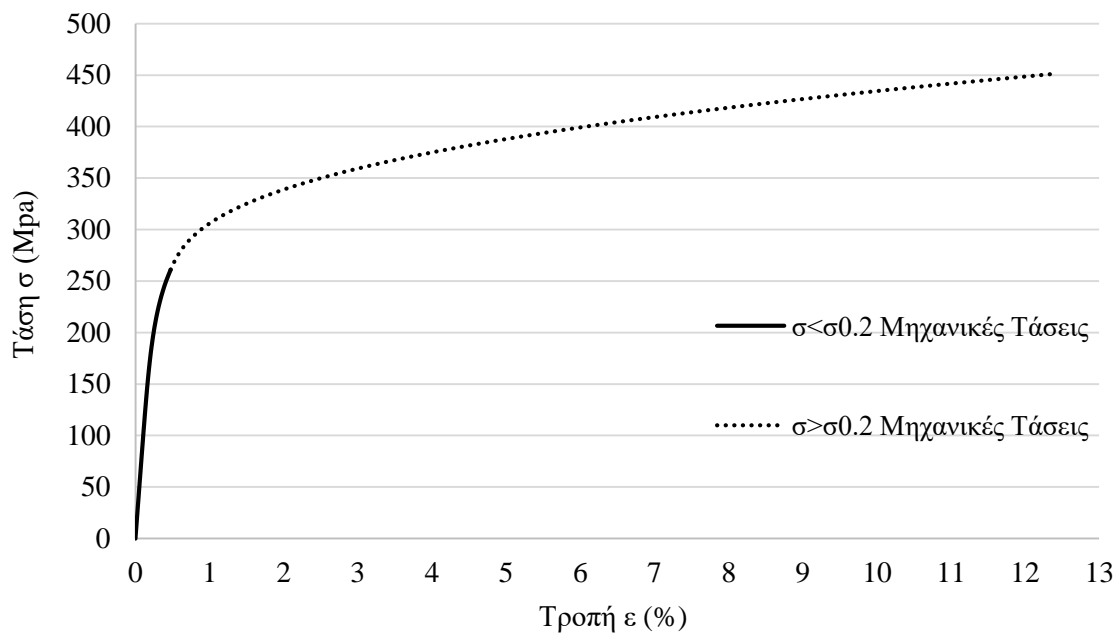
$$R_{11} = 1; \quad R_{22} = \frac{\sigma_{0^\circ}}{\sigma_{90^\circ}}; \quad R_{33} = \frac{\sigma_{0^\circ}}{\sigma_{90^\circ}}; \quad R_{12} = \frac{1}{\left[\frac{4}{3}\left(\frac{\sigma_{90^\circ}}{\sigma_{45^\circ}}\right)^2 - \frac{1}{3R_{33}^2}\right]^{1/2}}; \quad R_{13}=1; \quad R_{23}=1; \quad (13)$$

Τα μέτρα διάτμησης G_{xz} και G_{yz} λήφθηκαν ίσα με το G_{xy} . Αυτό προκύπτει καθώς στην πειραματική διαδικασία άμεσου εφελκυσμού το δοκίμιο είναι αρκετά λεπτό συγκριτικά με τις άλλες δύο διαστάσεις, πράγμα το οποίο οδηγεί στον ανούσιο καθορισμό μέτρου διάτμησης σε επιφάνεια όπου θα συμπεριλαμβάνετε το πάχος του δοκιμίου.

t_{nom} (mm)	θ °	$E_{x,eff}$ GPa	$E_{0.2}$ GPa	$G_{x,eff}$ GPa	$\sigma_{0.2,eff}$ MPa	σ_u MPa	$\epsilon_{0.2}$	$\nu_{xy,eff}$	ϵ_u	n	m
3.5	90	96.0	16.6	98.1	261	448	0.0047	0.32	0.119	6.5	2.6

Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες κοίλων τετραγωνικών πειραματικών δοκιμίων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του Πίνακα 2 και μέσα από τις εξισώσεις Ramberg-Osgood, κατασκευάστηκε το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης χωρισμένο σε δύο τμήματα. Πρώτο τμήμα αυτό για $\sigma < \sigma_{0.2}$, το οποίο αντιστοιχεί στην ελαστική συμπεριφορά του υλικού (Εξίσωση 8) και το δεύτερο μέρος για $\sigma > \sigma_{0.2}$ στην πλαστική συμπεριφορά (Εξίσωση 10).



Διάγραμμα 3: Καμπύλη μηχανικών τάσεων – παραμορφώσεων.

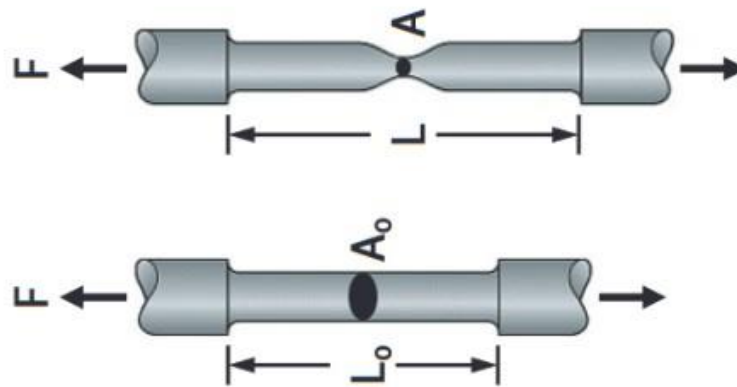
Η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης η οποία εξάχθηκε αποτελείται από τις μηχανικές (ονομαστικές) τιμές του υλικού. Στο Abaqus, όπως και στα περισσότερα λογισμικά ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, τα σχετικά δεδομένα τάσης-παραμόρφωσης εισάγονται ως δεδομένα πραγματικής τάσης και πραγματικής παραμόρφωσης (Dassault Systèmes, 2016). Για την μετατροπή αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες αναλυτικές Εξισώσεις (14) και (15) (Gere & Goodno, 2011):

$$\sigma_s = \sigma_e (1 + \varepsilon_e) \quad (14)$$

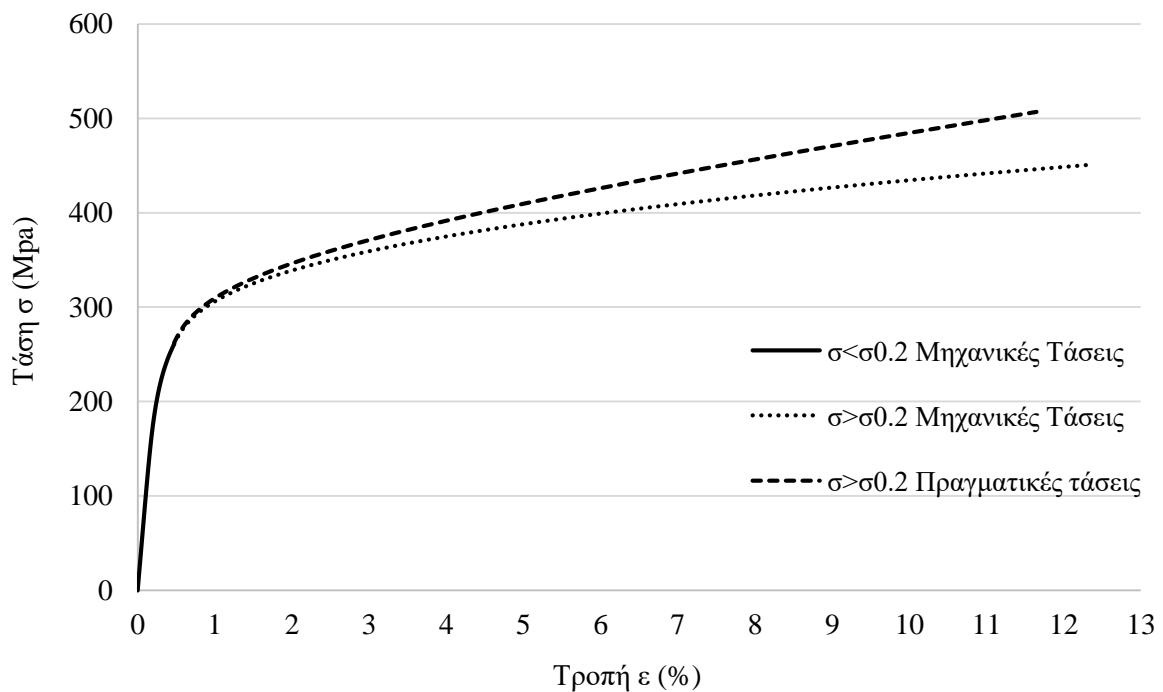
$$\varepsilon_{ip} = \ln(1 + \varepsilon_e) - \frac{\sigma_s}{E_0} \quad (15)$$

Όπου: σ_s οι πραγματικές τάσεις, σ_e οι μηχανικές τάσεις, ε_e οι μηχανικές παραμορφώσεις, ε_{ip} οι πραγματικές παραμορφώσεις και E_0 το μέτρο ελαστικότητας.

Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες πραγματικών και μηχανικών τάσεων – παραμορφώσεων, με εμφανείς την αύξηση των πραγματικών τάσεων πέραν του ορίου τάσης διαρροής ($\sigma > \sigma_{0.2}$) λόγω της απομείωσης του εμβαδού της διατομής (Σχήμα 7) μέσα στην πλαστική περιοχή και τις μόνιμες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται.



Σχήμα 7: Απομείωση εμβαδού διατομής.



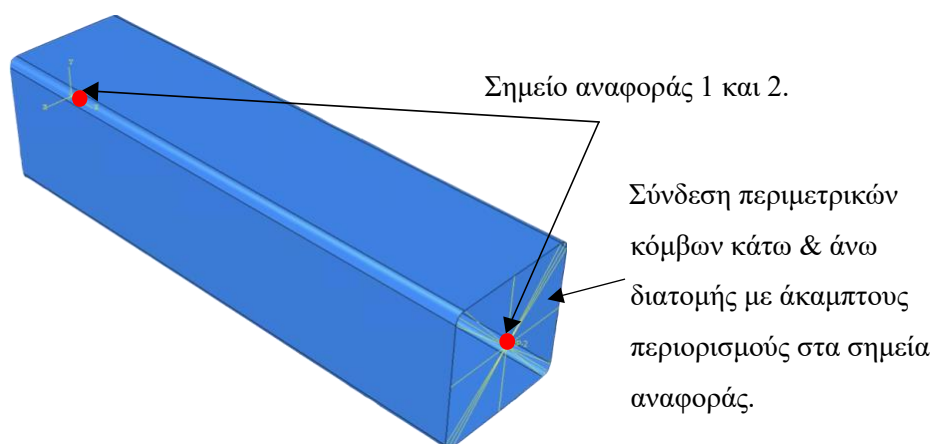
Διάγραμμα 4: Καμπύλες πραγματικών και μηχανικών τάσεων – παραμορφώσεων.

3.1.3 Τύπος πεπερασμένων στοιχείων

Υιοθετήθηκε το στοιχείο κελύφους τύπου S4R, το οποίο είναι ένα τετρακομβικό τρισδιάστατο τετράπλευρο στοιχείο που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μια σειρά προηγούμενων ερευνών με παρόμοιες εφαρμογές (Meng, et al., 2020), (Meng & Gardner, 2020), (He, et al., 2021), (Yun & Gardner, 2018). Το εν λόγω στοιχείο είναι επίσης κατάλληλο για μεγάλες παραμορφώσεις και μη γραμμική γεωμετρία, καθώς χρησιμοποιεί μειωμένα σημεία ολοκλήρωσης και έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (Becque & Rasmussen, 2009).

3.1.4 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες επιλέχθηκαν προσεκτικά με κύριο στόχο την καλύτερη προσομοίωση των πειραματικών συνθηκών. Οι κόμβοι της διατομής βάσης και η κορυφή του μοντέλου συνδέθηκαν με ένα ομόκεντρο σημείο αναφοράς μέσω άκαμπτων περιορισμών, έτσι ώστε οι βαθμοί ελευθερίας όλων των κόμβων σε κάθε άκρο να περιορίζονται στους βαθμούς ελευθερίας του αντίστοιχου σημείου αναφοράς. Στη συνέχεια, όλοι οι βαθμοί ελευθερίας δεσμεύτηκαν σε κάθε άκρο, εκτός από τη διαμήκη μετατόπιση στο άνω φορτισμένο άκρο για να επιτραπεί η κατακόρυφη μετατόπιση. Η ανάπτυξη τριβής μεταξύ της πάνω και κάτω πλάκας του μηχανήματος φόρτισης και του εξεταζόμενου δοκιμίου οδηγεί στην θεώρηση ύπαρξης συνθηκών πάκτωσης, όπου και προσομοιώνεται με βάση τις οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 14: Συνδεσμολογία περιμετρικών κόμβων κάτω & άνω διατομής με άκαμπτους περιορισμούς.

3.1.5 Ορισμός γεωμετρικών ατελειών

Ο ορισμός γεωμετρικών ατελειών στη μοντελοποίηση του κάθε φορά υπό εξέταση μοντέλου εισάγεται είτε με την εφαρμογή εγκάρσιων δυνάμεων είτε με την προσομοίωση κυματισμών εκτός του επιπέδου. Η μέθοδος που περιγράφεται σε αυτήν την εργασία περιλαμβάνει τη διεξαγωγή δύο αναλύσεων σε κάθε μοντέλο (υποκεφάλαιο 3.1.7). Η πρώτη ανάλυση αφορά τον καθορισμό ιδιοτιμών λυγισμού μέσω γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (LBA) σε μια ιδανική γεωμετρία υποστυλώματος, καθορίζοντας τις ιδιομορφές με τις οποίες πρόκειται να παραμορφωθεί εκτός του επιπέδου του. Η δεύτερη ανάλυση εμπεριέχει μια μη γραμμική ανάλυση μεταλυγισμικής φάσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Riks, στην οποία η πρώτη μορφή λυγισμού της προηγούμενης ανάλυσης περιλαμβάνεται στο μοντέλο και πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή ύψους ατέλειας (ω). Λόγω των επιφανειακών κυματισμών στα εκτυπωμένα στοιχεία με τη μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο, ο καθορισμός του απαιτούμενου συντελεστή ύψους ατέλειας γίνεται πιο περίπλοκος. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τιμές και μέθοδοι για τον προσδιορισμό του εν λόγω συντελεστή όπως αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 2.1.5.

Στον Πίνακα 3 παρέχονται οι τιμές της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής από τους Kyvelou et al όπου $P(e_{\max,r} < e_{\max,d})$ εκφράζεται ως η πιθανότητα η μέγιστη γεωμετρική ατέλεια σε ένα τυχαία επιλεγμένο δείγμα από εκτυπωμένα στοιχεία με τη μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο να είναι μικρότερη από μια συγκεκριμένη τιμή $e_{\max,d}$. Για παράδειγμα, η τιμή $P(e_{\max,r} < e_{\max,d}) = 0.95$ υποδεικνύει ότι η μέγιστη ατέλεια αναμένεται να είναι μικρότερη από 2.94 mm σε ένα τέτοιο μέλος κατά 95%. Ως ορισμό του συντελεστή ύψους των γεωμετρικών ατελειών (ω) επιλέχθηκαν οι περιπτώσεις e_{\max} του Πίνακα 3, συγκρίνοντας την συμπεριφορά φορτίου – παραμορφώσεις τόσο μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών δοκιμών, καθώς και μεταξύ των διαφορετικών τιμών ύψους ατέλειας.

$P (e_{\max, r} < e_{\max, d})$	$e_{\max} \text{ (mm)}$
0.25	0.73
0.50	1.28
0.75	1.50
0.90	2.05
0.95	2.94
0.99	3.80
Mean	1.29
Standard deviation	0.68

Πίνακας 3: Αθροιστικές τιμές συνάρτησης κατανομής για ύψος ατέλειας (Kyvelou, et al., 2021).

3.1.6 Πυκνότητα πεπερασμένων στοιχείων

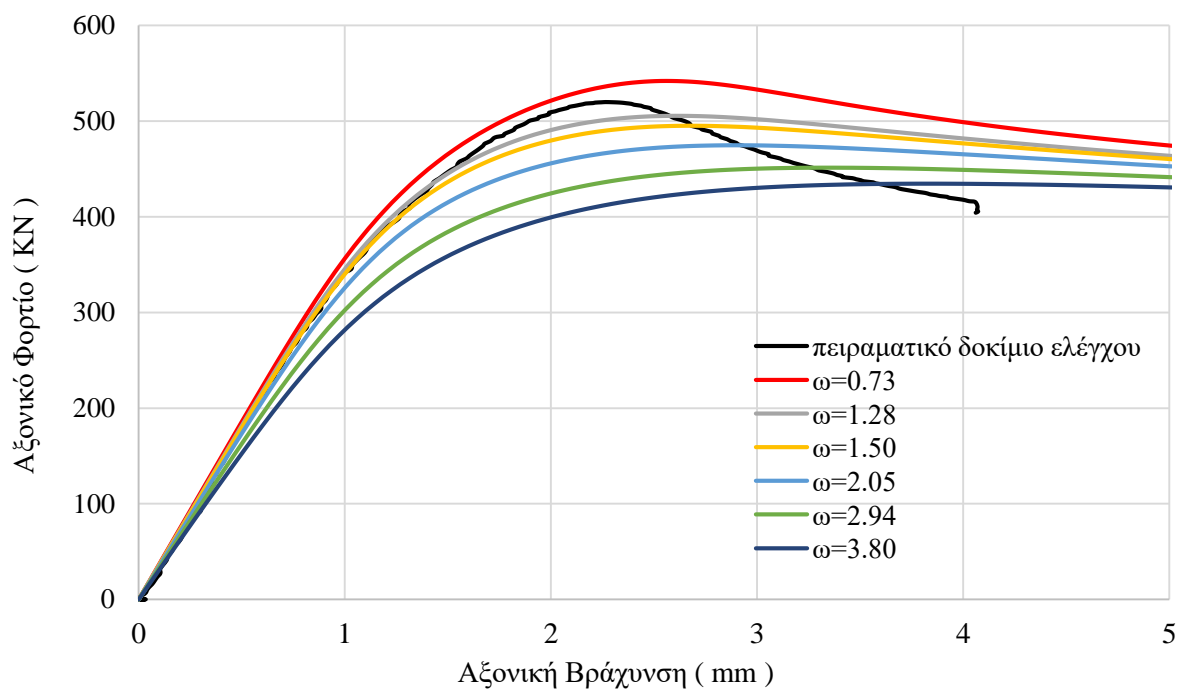
Το μέγεθος του πλέγματος επηρεάζει την ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται. Επομένως είναι επιθυμητή η χρήση τέτοιου μεγέθους πλέγματος έτσι ώστε να δίνει συγκλίνοντα αποτελέσματα, ιδιαίτερα για φορτία αστοχίας και των αντίστοιχων παραμορφώσεων, αλλά και που να εξακολουθεί να είναι υπολογιστικά αποδοτικό. Το μέγεθος πλέγματος το οποίο ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ίσο με το πάχος t των υπό εξέταση μοντέλων στη διεύθυνση εκτός του επιπέδου, ενώ $t/2$ στο επίπεδο της διατομής.

3.1.7 Γραμμική και Μη γραμμική ανάλυση λυγισμού

Η ανάλυση λυγισμού με ιδιοτιμές επιτρέπει την εκτίμηση των μορφών λυγισμού. Στο λογισμικό Abaqus, αυτό επιτυγχάνεται μέσω της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού (LBA). Ο αριθμός των ιδιοτιμών μπορεί να οριστεί από τον χρήστη, αλλά συνήθως επιλέγεται το σχήμα με τη χαμηλότερη ιδιοτιμή (πρώτη ιδιομορφή) ως η αρχική γεωμετρία του μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Στη δεύτερη ανάλυση (μη γραμμική ανάλυση) λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμική γεωμετρία και πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την ανάλυση Riks (Dassault Systèmes, 2016).

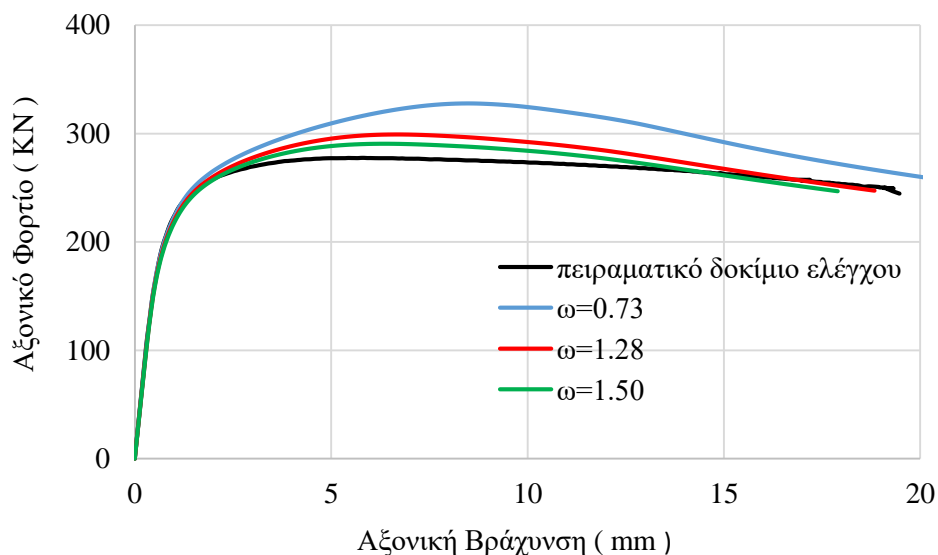
3.2 Επικύρωση

Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων των αντίστοιχων πειραματικών δοκιμίων που αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 3.1.1 επικυρώθηκαν αρχικά υπολογίζοντας το λόγο του μέγιστου φορτίου αντοχής που επιτυγχάνετε από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ως προς αυτά των πειραματικών δοκιμών ($N_{u,FE} / N_{u,test}$), το λόγο $Slope_{,FE} / Slope_{,test}$ μεταξύ των πεπερασμένων στοιχείων και των πειραματικών δοκιμών υπολογίζοντας την αρχική κλίση των καμπυλών καθώς και $\delta_{u,FE} / \delta_{u,test}$ ως ο λόγος των παραμορφώσεων στο μέγιστο φορτίο αντοχής. Χρησιμοποιώντας αρχικά και τις έξι τιμές μέγιστου ύψους ατέλειας του Πίνακα 3 (υποκεφάλαιο 3.1.5) στο πειραματικό δοκίμιο ελέγχου $150 \times 150 \times 3.5-600-F$, κρίθηκε σκόπιμο με βάση την απόκριση του Διαγράμματος 5 να ληφθούν υπόψη οι τρεις πρώτες τιμές μέγιστου ύψους ως οι πιο αντιπροσωπευτικές και πιθανότατα εμφανείς σε εκτυπωμένα στοιχεία με την μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. Επιπλέον, κατά τη χρήση της τιμής 1.28 mm, η οποία συμπεριλαμβάνετε στις τιμές ελέγχου που επιλέχθηκαν, ταυτόχρονα λαμβάνετε υπόψη και η μέση τιμή των ατελειών (1.28 mm \approx 1.29 mm). (Πίνακας 3)

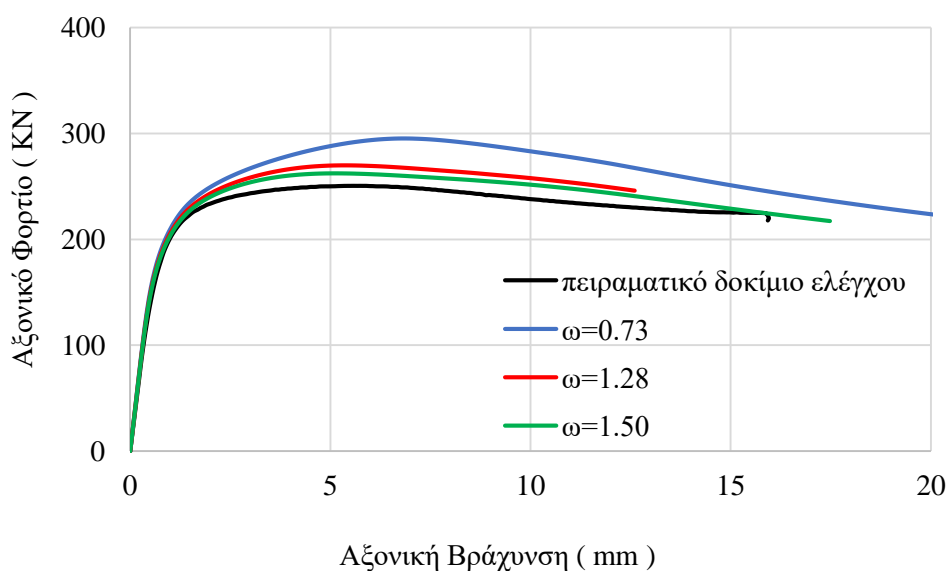


Διάγραμμα 5: Απόκριση δοκιμίου στήλης ($150 \times 150 \times 3.5-600-F$) για κάθε μία από τις περιπτώσεις ύψους ατέλειας.

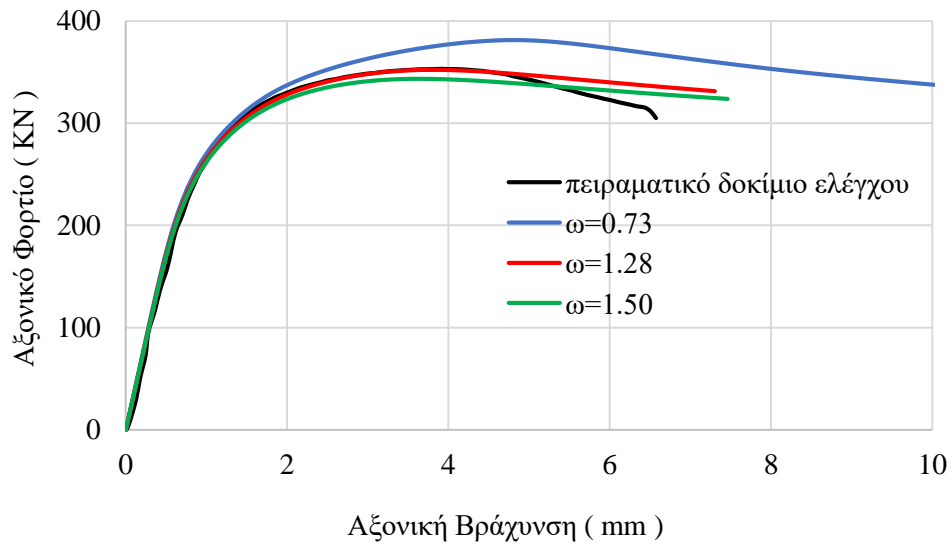
Οι καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης των πειραματικών δοκιμίων και των αντίστοιχων δοκιμίων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα επιλεγμένα πλάτη ατέλειας $\omega = 0.73, 1.28, 1.50$ παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 6 έως 19.



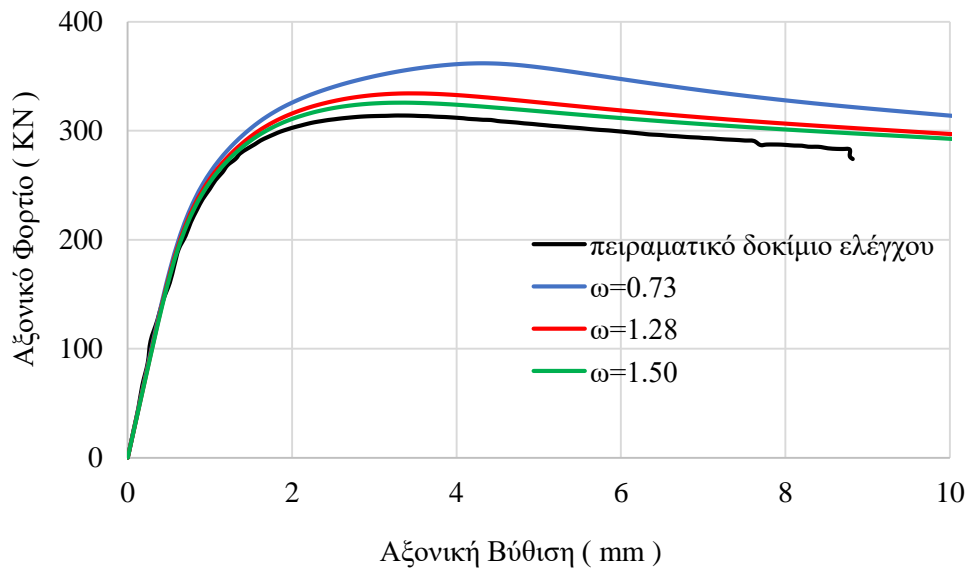
Διάγραμμα 6: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 60X60X3.5-240-F.



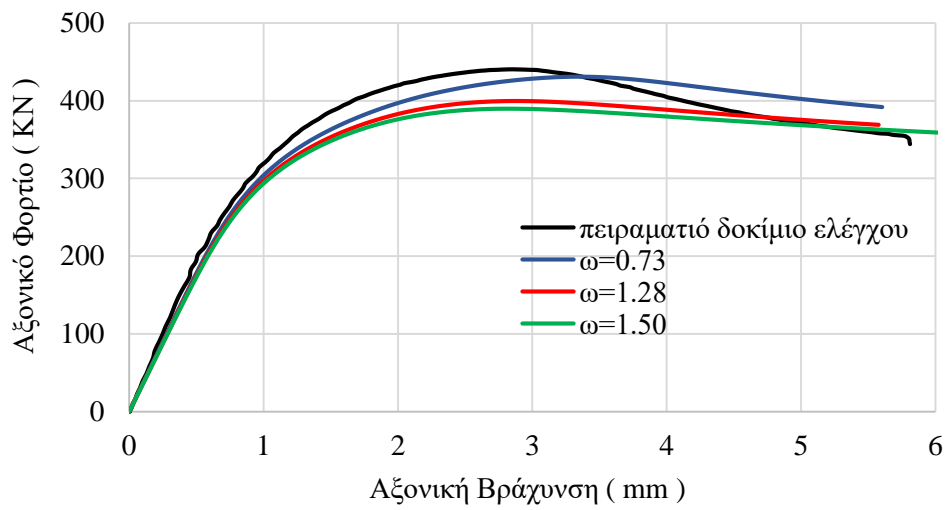
Διάγραμμα 7: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 60X60X3.5-240-FR.



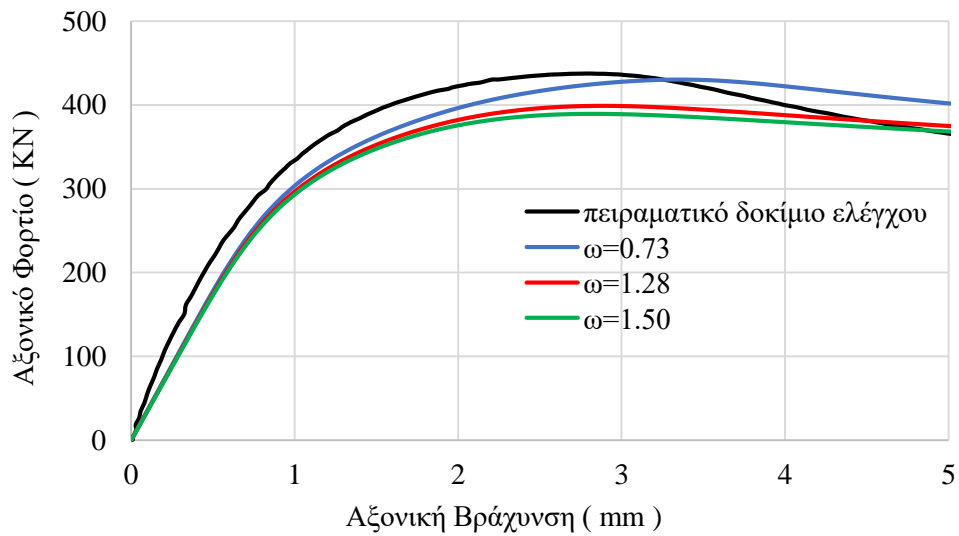
Διάγραμμα 8: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 80X80X3.5-320-F.



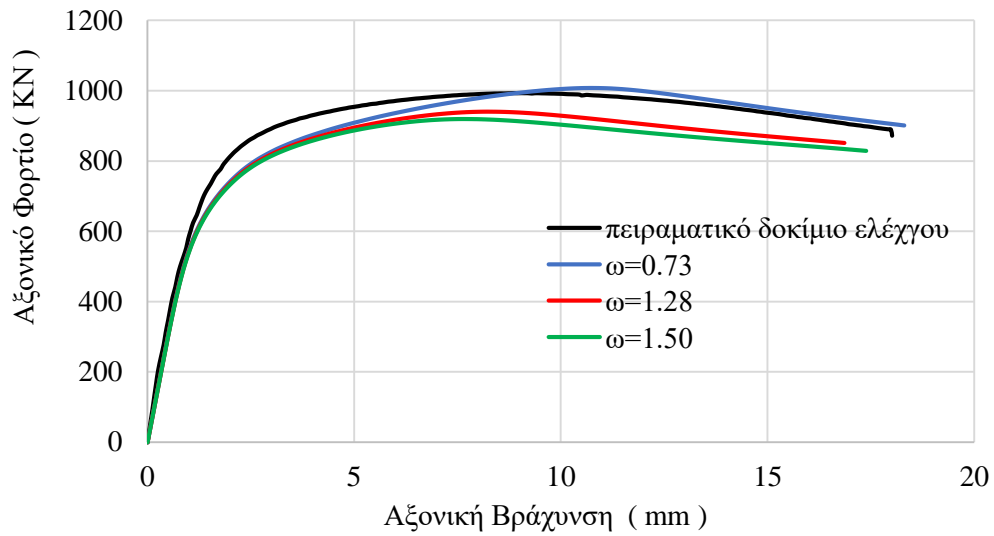
Διάγραμμα 9: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 80X80X3.5-320-FR.



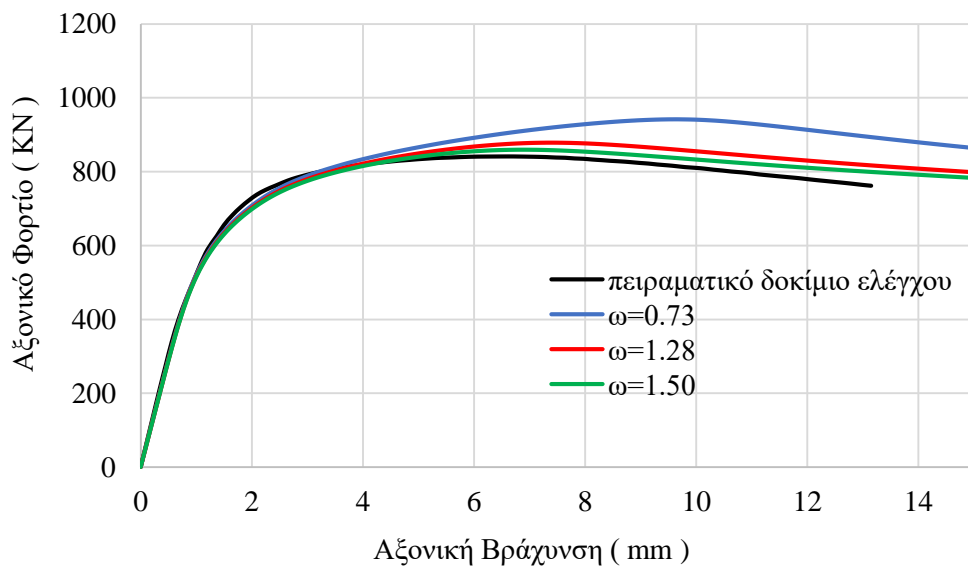
Διάγραμμα 10: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 100X100X3.5-400-F.



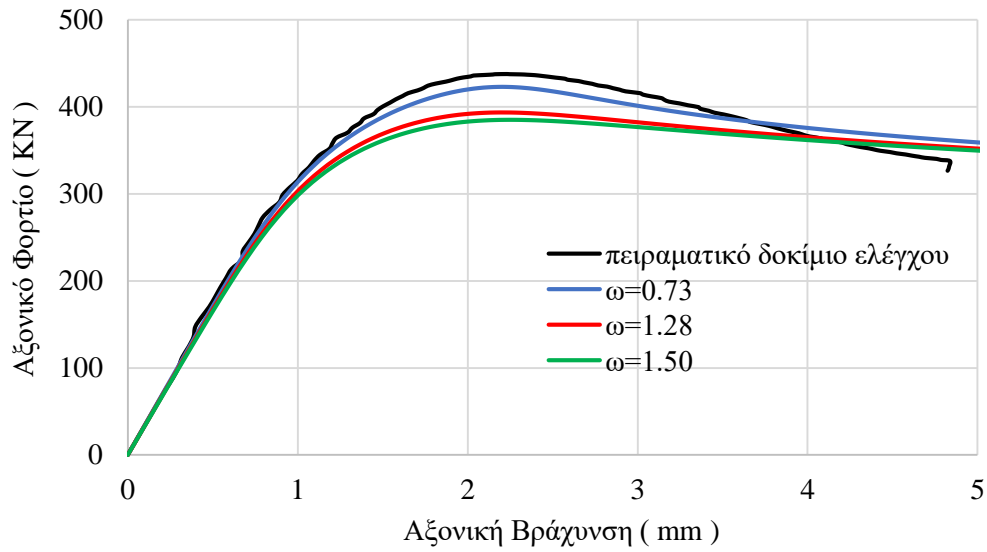
Διάγραμμα 11: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 100X100X3.5-400-FR.



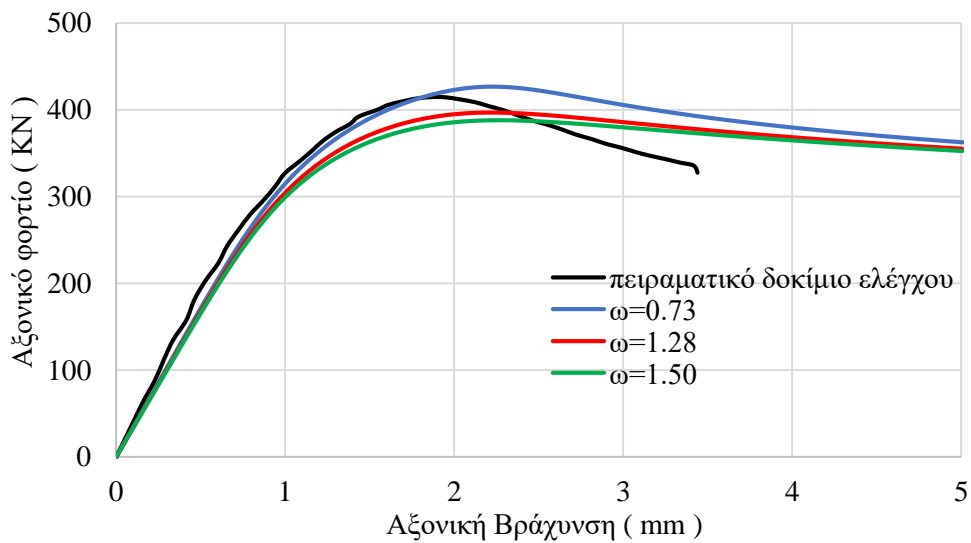
Διάγραμμα 12: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 120X120X8-450-F.



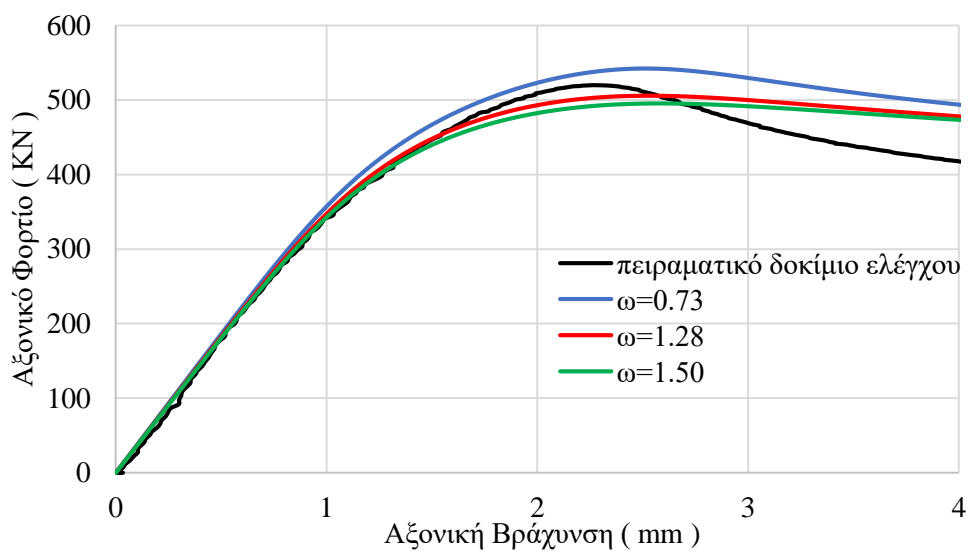
Διάγραμμα 13: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 120X120X8-450-FR.



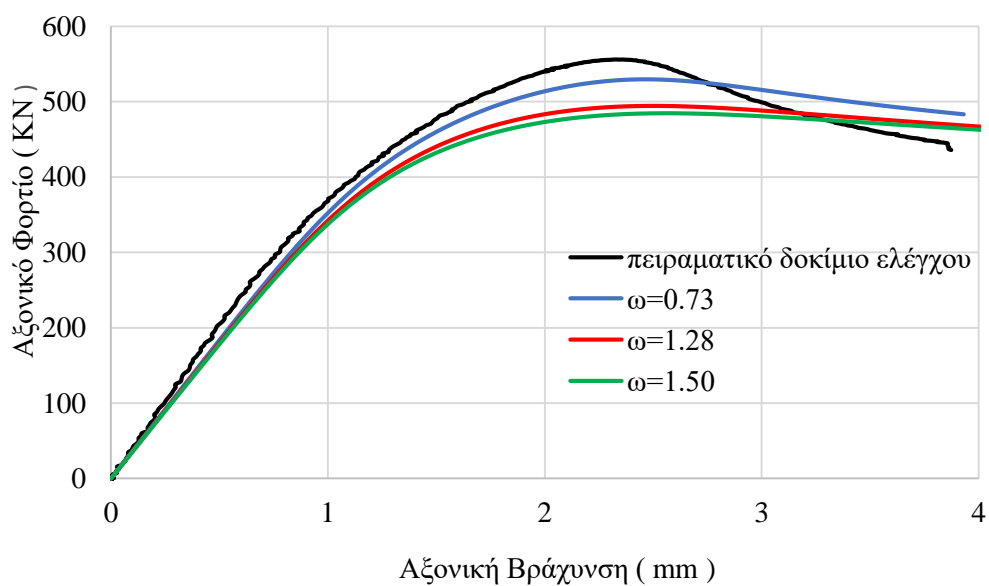
Διάγραμμα 14: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 130X130X3.5-500-R.



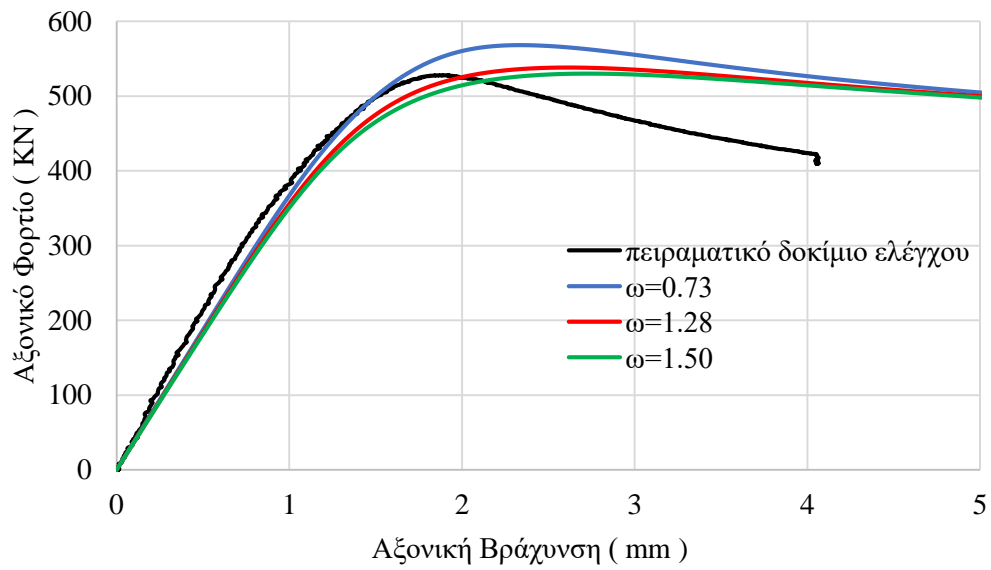
Διάγραμμα 15: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 130X130X3.5-500-FR.



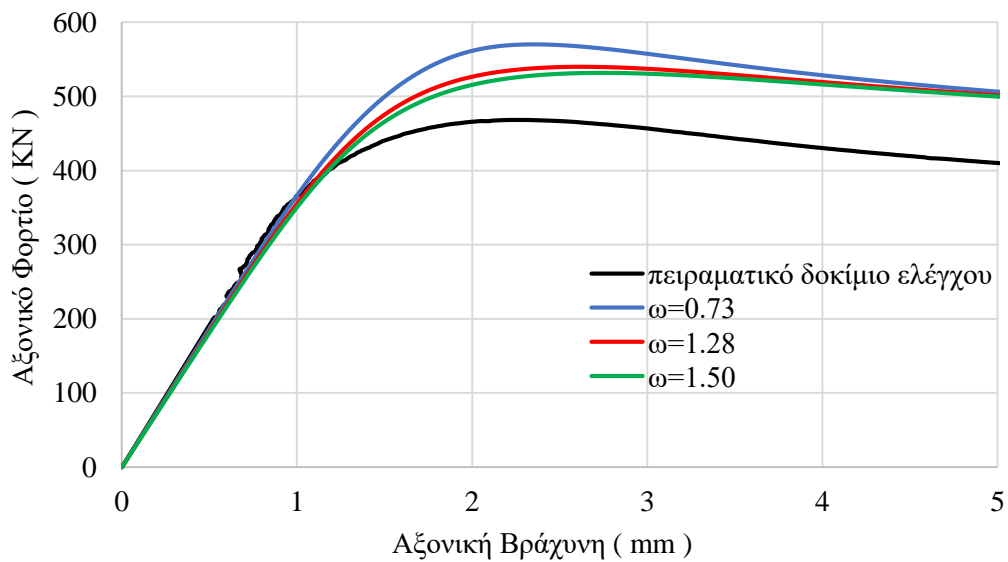
Διάγραμμα 16: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 150X150X3.5-600-F.



Διάγραμμα 17: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 150X150X3.5-600-FR.



Διάγραμμα 18: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 180X180X3.5-720-F.



Διάγραμμα 19: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης πειραματικών δοκιμίων (Kyvelou, et al., 2021) και αντίστοιχων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα πλάτη ατέλειας 180X180X3.5-720-FR.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι λόγοι του μέγιστου φορτίου αντοχής που επιτυγχάνετε από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ως προς αυτά των πειραματικών δοκιμών. Οι λόγοι αυτοί διαφοροποιούνται ανάλογα με το ύψος των ατελειών. Η ακρίβεια μεταξύ των τιμών $N_{u,FE}$ και $N_{u,test}$ μεγιστοποιείται με την τιμή της μονάδας.

$$\frac{N_{u,FE}}{N_{u,test}} = 1 \quad (16)$$

Ο συντελεστής διασποράς (COV) ο οποίος εκφράζει στην προκειμένη περίπτωση το μέτρο της σχετικής διασποράς των λόγων $N_{u,FE} / N_{u,test}$ είναι ίσος με την αναλογία μεταξύ της τυπικής απόκλισης και του μέσου όρου. Τα ποσοστά είναι κάτω του 10% για κάθε διαφορετική περίπτωση συντελεστή ατέλειας, ποσοστό το οποίο εκφράζει μια ικανοποιητική διαφορά μεταξύ των λόγων $N_{u,FE} / N_{u,test}$.

Ύψος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας			
	$\omega = 0.73$	$\omega = 1.28$	$\omega = 1.50$
Διαστάσεις Διατομής	$N_{u,FE} / N_{u,test}$	$N_{u,FE} / N_{u,test}$	$N_{u,FE} / N_{u,test}$
60x60x3.5 -240 F	1.18	1.08	1.05
60x60x3.5 -240 FR	1.18	1.08	1.05
80x80x3.5 -320 F	1.08	1.00	0.97
80x80x3.5 -320 FR	1.15	1.06	1.04
100x100x3.5 -400 F	0.98	0.91	0.88
100x100x3.5 -400 FR	0.98	0.91	0.89
120x120x8 -450 F	1.01	0.95	0.93
120x120x8 -450 FR	1.12	1.04	1.02
130x130x3.5 -500 F	0.97	0.90	0.88
130x130x3.5 -500 FR	1.03	0.96	0.94
150x150x3.5 -600 F	1.04	0.97	0.95
150x150x3.5 -600 FR	0.95	0.89	0.87
180x180x3.5 -720 F	1.08	1.02	1.00
180x180x3.5 -720 FR	1.22	1.15	1.14
Μέση τιμή	1.07	0.99	0.97
COV (%)	8.3	8.1	8.3

Πίνακας 4: Λόγοι $N_{u,FE} / N_{u,test}$ για κάθε περίπτωση ύψους ατέλειας.

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τους λόγους $Slope_{FE} / Slope_{test}$ μεταξύ των πεπερασμένων στοιχείων και των πειραματικών δοκιμών, υπολογίζοντας την αρχική κλίση των καμπυλών. Οι λόγοι $Slope_{FE} / Slope_{test}$ προσεγγίζουν τη μονάδα, ενώ ο συντελεστής διασποράς είναι κάτω του 10%, δηλώνοντας μια ικανοποιητική αντιστοιχία μεταξύ των αρχικών ελαστικών περιοχών των πειραματικών δοκιμών και των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Ύψος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας			
	$\omega = 0.73$	$\omega = 1.28$	$\omega = 1.50$
Διαστάσεις Διατομής	Slope_{,FE} / Slope_{,test}	Slope_{,FE} / Slope_{,test}	Slope_{,FE} / Slope_{,test}
60x60x3.5 -240 F	1.03	1.01	1.00
60x60x3.5 -240 FR	1.10	1.08	1.07
80x80x3.5 -320 F	0.89	0.88	0.87
80x80x3.5 -320 FR	0.90	0.88	0.87
100x100x3.5 -400 F	0.88	0.86	0.85
100x100x3.5 -400 FR	0.78	0.76	0.75
120x120x8 -450 F	0.85	0.84	0.84
120x120x8 -450 FR	0.95	0.94	0.93
130x130x3.5 -500 F	0.96	0.94	0.93
130x130x3.5 -500 FR	0.87	0.85	0.84
150x150x3.5 -600 F	0.95	0.93	0.92
150x150x3.5 -600 FR	0.89	0.87	0.86
180x180x3.5 -720 F	0.90	0.88	0.87
180x180x3.5 -720 FR	1.03	1.00	0.99
Μέση τιμή	0.93	0.91	0.90
COV (%)	9.0	9.0	9.0

Πίνακας 5: Λόγοι Slope_{,FE} / Slope_{,test} για κάθε περίπτωση ύψους ατέλειας.

Πέραν της σημασίας αντιστοιχίας της μέγιστης δύναμης αντοχής N_{ult} και της ελαστικής περιοχής, σημαντικό στοιχείο για την αξιοπιστία και επικύρωση των μοντέλων είναι η σύγκριση της βράχυνσης δ_u που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο αστοχίας N_{ult} . Για αυτόν το σκοπό, στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι λόγοι $\delta_{u,FE} / \delta_{u,test}$ για κάθε ύψος ατέλειας. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ύψος αρχικής γεωμετρικής ατέλειας			
	$\omega = 0.73$	$\omega = 1.28$	$\omega = 1.50$
Διαστάσεις Διατομής	$\delta_{u,FE} / \delta_{u,test}$	$\delta_{u,FE} / \delta_{u,test}$	$\delta_{u,FE} / \delta_{u,test}$
60x60x3.5 -240 F	1.45	1.14	1.09
60x60x3.5 -240 FR	1.19	0.93	0.89
80x80x3.5 -320 F	1.24	0.99	0.94
80x80x3.5 -320 FR	1.30	1.03	1.01
100x100x3.5 -400 F	1.17	1.01	1.00
100x100x3.5 -400 FR	1.19	1.03	1.01
120x120x8 -450 F	1.19	0.91	0.84
120x120x8 -450 FR	1.45	1.11	1.02
130x130x3.5 -500 F	0.98	0.99	1.00
130x130x3.5 -500 FR	1.20	1.19	1.22
150x150x3.5 -600 F	1.10	1.11	1.14
150x150x3.5 -600 FR	1.06	1.08	1.10
180x180x3.5 -720 F	1.24	1.39	1.44
180x180x3.5 -720 FR	1.04	1.17	1.21
Μέση τιμή	1.20	1.08	1.07
COV (%)	11.4	11.5	14.4

Πίνακας 6: Λόγοι $\delta_{u,FE} / \delta_{u,test}$ για κάθε περίπτωση ύψους ατέλειας.

Παρόλο που οι καμπύλες των αριθμητικών μοντέλων ταιριάζουν με αυτές των πειραματικών δοκιμών, στην περιοχή της κορυφής παρουσιάζουν μια πιο επίπεδη συμπεριφορά πέραν του μέγιστου φορτίου (η πειραματική καμπύλη φαίνεται να κατεβαίνει με πιο γρήγορο ρυθμό). Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το προφίλ των ατελειών δεν είναι ίδιο με αυτό που παρατηρείται στη μελέτη των (Kyvelou, et al., 2021). Αυτό θα μπορούσε να εξεταστεί περαιτέρω για να διαπιστωθεί εάν μια διαφορετική προσέγγιση μπορεί να αναπαράγει καλύτερα το προφίλ των ατελειών εκτυπωμένων στοιχείων.

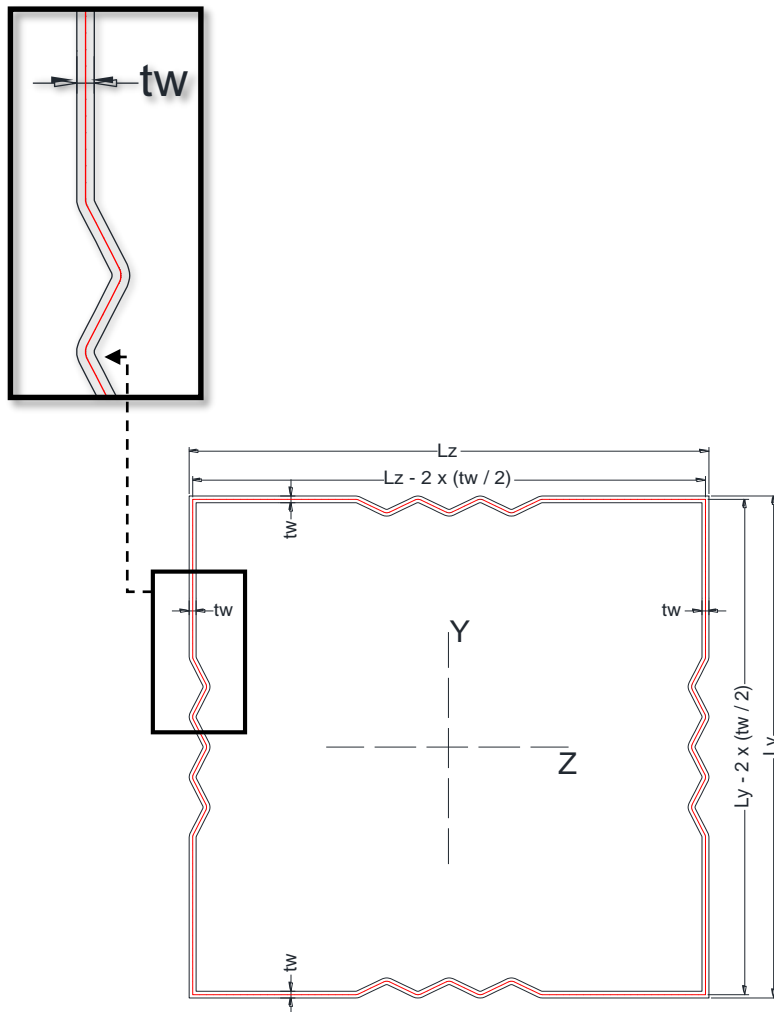
4. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΙΛΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΤΥΧΩΣΕΩΝ

Ο σχεδιασμός που εξετάζεται στο πλαίσιο αυτής της εργασίας στοχεύει στην αποτελεσματική αύξηση του τελικού αξονικού φορτίου N_{ult} , που μπορεί να μεταφερθεί από ένα συμβατικό σε γεωμετρία κοίλο τετραγωνικό υποστύλωμα. Η βασική πτυχή είναι η αναζήτηση μιας διατομής γεωμετρίας τέτοιας ώστε να προσφέρει αντίσταση έναντι τοπικού λυγισμού. Για τον σκοπό αυτό, υιοθετείται μια διαδικασία παραμετρικού σχεδιασμού που περιγράφεται λεπτομερώς στο υποκεφάλαιο 4.1. Η ενίσχυση αυτή, που επικεντρώνεται στην τροποποίηση της γεωμετρίας μέσω της προσθήκης πτυχώσεων των υπό εξέταση διατομών, αποτελεί αποδοτική στρατηγική για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας τους. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κρίσιμο κριτήριο για την επιτυχία της διαδικασίας ενίσχυσης είναι η διατήρηση της μεταβολής του εμβαδού διατομής σε χαμηλά επίπεδα ανάμεσα σε συμβατική και μη γεωμετρία διατομής. Επομένως, ο σχεδιασμός αποβλέπει στην επίτευξη υψηλών αξονικών αντοχών χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δυνατή αύξηση ποσότητας υλικού. Αυτό δημιουργεί μια στρατηγική σχεδιασμού που συνδυάζει αποδοτικότητα, βιώσιμη χρήση υλικού και οικονομία κόστους.

4.1 Παραμετροποίηση Γεωμετρίας Διατομής

4.1.1 Σχεδιαστικός χώρος

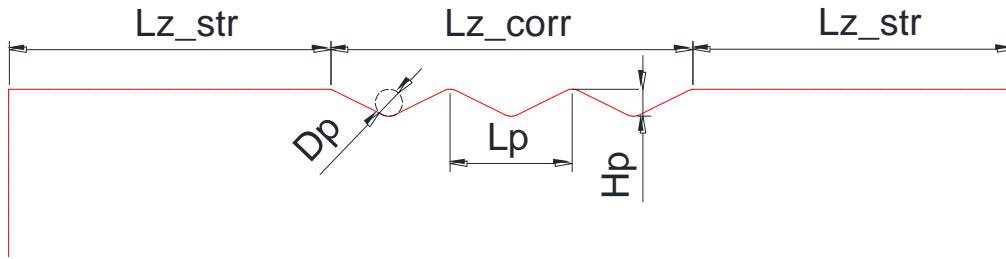
Η διαδικασία σχεδιασμού αφορά διατομή στο επίπεδο Y-Z συγκεκριμένων διαστάσεων εξωτερικών πλευρών για την κάθε περίπτωση. Το διαθέσιμο πεδίο σχεδίασης περικλείει ένα προκαθορισμένο τετράγωνο εμβαδού $L_y \times L_z$, όπου $L_y = L_z$. Καθώς η διατομή που θα σχεδιαστεί είναι λεπτότοιχη με σταθερό πάχος t_w , για την διευκόλυνση των απαιτούμενων υπολογισμών (υπολογισμός των στατικών ιδιοτήτων, ανάλυση FE με χρήση στοιχείων κελύφους) ακολουθείται η κεντρική γραμμή της διατομής. Η εν λόγω γραμμή εκτείνεται πλασματικά κατά μήκος του πάχους του τμήματος για $t_w/2$ σε κάθε πλευρά. Ως αποτέλεσμα, ο εναπομείναντας σχεδιαστικός χώρος της διατομής που περικλείετε από την κεντρική γραμμή μειώνεται σε ένα τετράγωνο εμβαδού $A_d = (L_y - t_w) \times (L_z - t_w)$. Η κεντρική γραμμή της διατομής παρουσιάζετε σχηματικά με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Καθορισμός πεδίου σχεδίασης και κεντρική γραμμή της διατομής.

4.1.2 Μεθοδολογία παραμετροποίησης γεωμετρίας

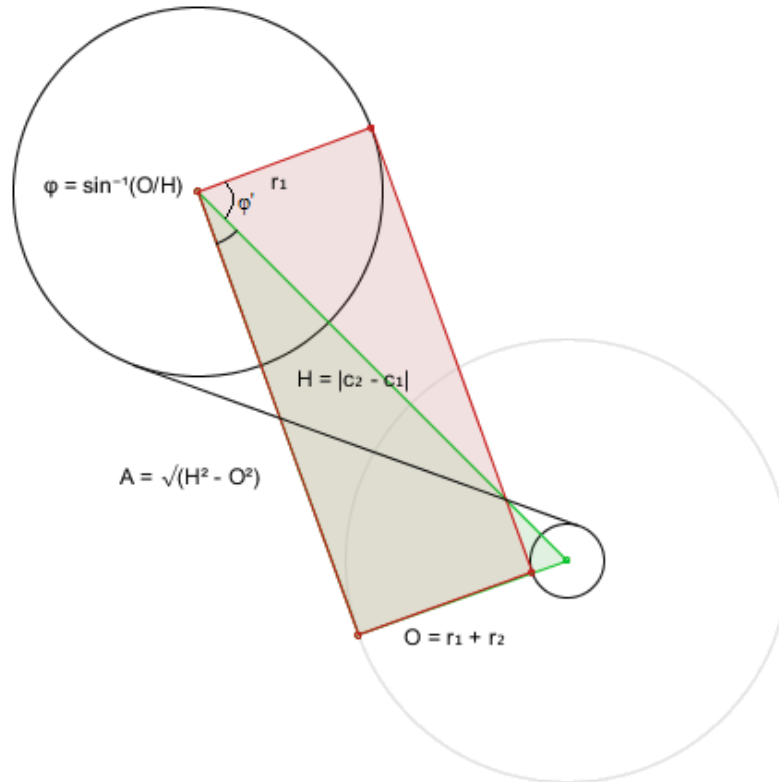
Η μεθοδολογία σχεδιασμού βασίζεται σε μια σειρά συνδεσμολογίας τμημάτων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της διατομής (κόκκινη γραμμή). Χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα προγραμματισμού Matlab (Matlab Mathwork R2018b, 2022), πραγματοποιήθηκε η παραμετροποίηση της κεντρικής γραμμής της διατομής μέσω της δημιουργίας μιας σειράς συντεταγμένων. Τα σημεία αυτά διαμορφώνονται ανάλογα με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται με βάση την υπό εξέταση διατομή, δημιουργώντας έτσι την εξατομικευμένη γεωμετρία. Η αυτοματοποιημένη διαδικασία αυξάνει την ευελιξία και την ακρίβεια του σχεδιασμού, επιτρέποντας την ταχεία προσαρμογή σε διάφορες απαιτήσεις γεωμετρίας. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται τα κύρια σημεία και μεταβλητές της γεωμετρίας.



Σχήμα 9: Καθορισμός γεωμετρικών μεταβλητών ενισχυμένης διατομής.

Όπου Lz_str το ευθύγραμμο κομμάτι της διατομής, Lz_corr το μήκος μέσα στο οποίο εφαρμόζονται οι πτυχώσεις, Hp το ύψος της κάθε πτύκωσης, Lp το πλάτος της κάθε πτύκωσης, Dp η διάμετρος του καμπύλου τμήματος της κορυφής της πτύκωσης. Αντίστοιχα στη διεύθυνση Y .

Αρχικά, καθορίζεται το μήκος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος (Lz_str) και στη συνέχεια της πρώτης πτύκωσης (Lp). Αφού ολοκληρωθεί η συνδεσμολογία των δύο, εφαρμόζεται επαναληπτική διαδικασία για την ολοκλήρωση της διατομής. Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων του καμπύλου τμήματος της κορυφής των πτυχώσεων χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις και τριγωνομετρικές σχέσεις (17 έως 23). Για τον καθορισμό των σημείων της εσωτερικής επαπτομένης μεταξύ των κύκλων των πτυχώσεων διαμέτρου Dp , ακολουθήθηκαν οι μεταβλητές του Σχήματος 10.



Σχήμα 10: Καθορισμός σημείων εσωτερικής εφαπτομένης μεταξύ των κύκλων των πτυχώσεων διαμέτρου D_p .

Αρχικά υπολογίζεται η απόσταση $H = |C_2 - C_1|$ (υποτείνουσα του τριγώνου με πράσινο χρώμα), όπου C_1, C_2 οι συντεταγμένες των κέντρων των δυο κύκλων. Στην συνέχεια εφαρμόζεται η Εξίσωση (17) υπολογίζοντας την γωνία φ .

$$\varphi = \arccos \left(\frac{r_1 + r_2}{H} \right) - \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

Ωστόσο, στα γραφικά υπολογιστών οι γωνίες συνήθως μετρούνται σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα του συστήματος συντεταγμένων, ενώ σχηματικά η γωνία φ είναι σχετική με την υποτείνουσα. Επομένως, θα χρειαστεί να προστεθεί στη γωνία φ η γωνία φ' (Εξίσωση 18) που δημιουργείτε από τον οριζόντιο άξονα και την υποτείνουσα.

$$\varphi' = \text{atan2}(C_{2,y} - C_{1,y}, C_{2,x} - C_{1,x}) \quad (18)$$

$$\varphi'' = \text{atan2}(C_{2,y} - C_{1,y}, C_{2,x} - C_{1,x}) + \arccos \left(\frac{r_1 + r_2}{H} \right) - \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

Αφού καθοριστεί η γωνιά φ'' (Εξίσωση 19), στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός των σημείων εφαπτομένης t_{1x} , t_{1y} για τον πρώτο κύκλο με συντεταγμένες κέντρου C_{1x} , C_{1y} και ακτίνα C_{1r} με βάση τις Εξισώσεις (20), (21).

$$t_{1x} = C_{1x} + C_{1r} \cos(\varphi'') \quad (20)$$

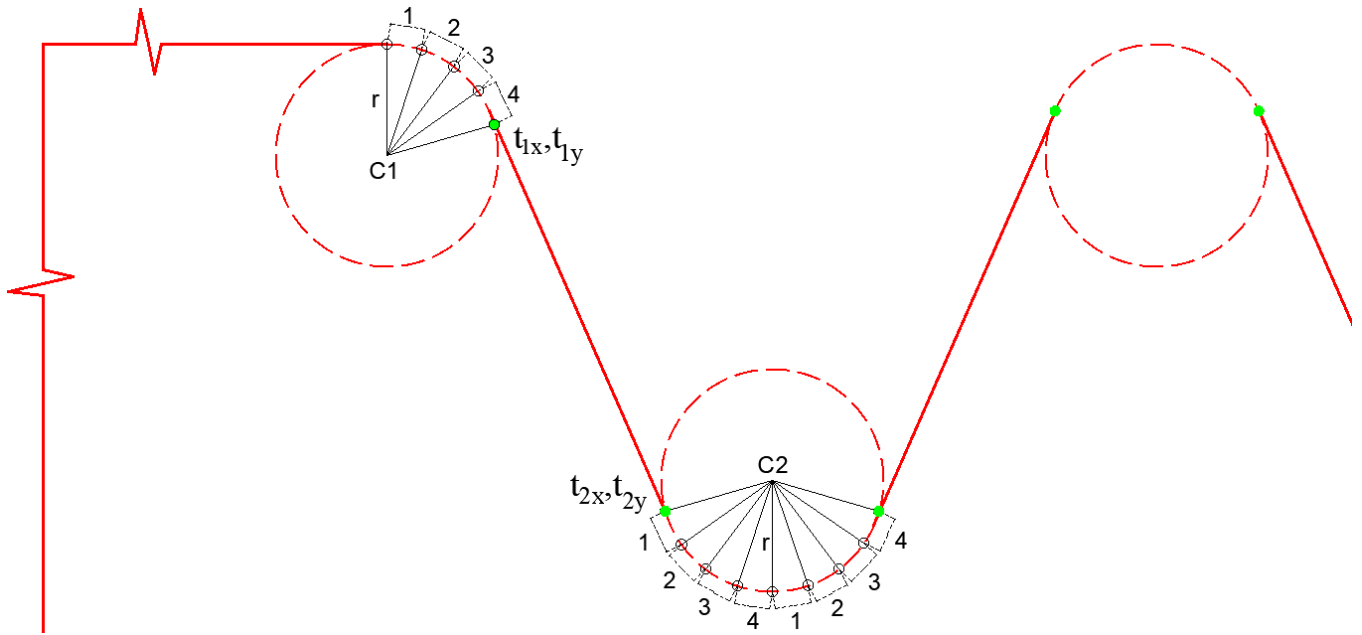
$$t_{1y} = C_{1y} + C_{1r} \sin(\varphi'') \quad (21)$$

Η εφαπτομένη στον δεύτερο κύκλο με συντεταγμένες κέντρου C_{2x} , C_{2y} και ακτίνα C_{2r} απαιτεί τη γωνία για την αντίθετη κατεύθυνση ή περιστρέφοντάς την κατά 180 μοίρες. Επομένως για τον καθορισμό του σημείου εφαπτομένης στο δεύτερο κύκλο υπολογίζετε με βάση τις Εξισώσεις (22), (23).

$$t_{2x} = C_{2x} + C_{2r} \cos(\varphi'' + \pi) \quad (22)$$

$$t_{2y} = C_{2y} + C_{2r} \sin(\varphi'' + \pi) \quad (23)$$

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται τα σημεία καθορισμού των εσωτερικών εφαπτομένων μεταξύ των διαδοχικών κύκλων οι οποίοι καθορίζουν τις κορυφές των πτυχώσεων. Επίσης εφαρμόζετε ο διαχωρισμός του μήκους τόξου που δημιουργείται από το τέλος του ευθύγραμμου τμήματος L_{z,y_str} έως το πρώτο σημείο εφαπτομένης (t_{1x} , t_{1y}), και διαδοχικά μεταξύ σημείων εφαπτομένης ($t_{1,2,\dots,n x}$, $t_{1,2,\dots,n y}$). Συγκεκριμένα, έγινε διαχωρισμός τεσσάρων ίσων διαστημάτων (5 σημεία) έχοντας μια ικανοποιητική πύκνωση πεπερασμένων στοιχείων στα εν λόγω σημεία.



Σχήμα 11: Ορισμός διαστημάτων καμπύλου τμήματος της κορυφής των πτυχώσεων.

4.2 Εξεταζόμενες γεωμετρίες

Οι σχεδιαστικές αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν για τον καθορισμό μιας διατομής του Σχήματος 9 (για δεδομένες διαστάσεις εξωτερικών πλευρών L_y, L_z) σχετίζονται ουσιαστικά με τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής και περιλαμβάνουν ειδικότερα:

1. το πάχος διατομής (t_w).
2. τα μήκη και τον αριθμό των πτυχώσεων σε κάθε πλευρά, (L_{corr}, n_{corr}).
3. το μέγεθος και τη γεωμετρία των πτυχώσεων του κυματοειδούς τμήματος στην κεντρική περιοχή κάθε πλευράς.

Στον Πίνακα 7 αναγράφονται οι διαστάσεις των εξεταζόμενων συμβατικών κοίλων τετραγωνικών διατομών, οι οποίες διατομές τροποποιούνται ανάλογα με την προσθήκη πτυχώσεων.

Διατομή (mm x mm)	Πλευρά $L_y = L_z$ (mm)
SHS 100 x 100	100
SHS 150 x 150	150
SHS 200 x 200	200
SHS 250 x 250	250
SHS 300 x 300	300
SHS 350 x 350	350
SHS 400 x 400	400

Πίνακας 7: Διαστάσεις εξεταζόμενων συμβατικών κοίλων τετραγωνικών διατομών.

4.2.1 Μεταβολή πάχους διατομής t_w

Η συνεισφορά του πάχους συγκόλλησης (t_w) στην αντοχή της διατομής αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς συσχετίζεται άμεσα με τον καθορισμό της ελαστικής τάση λυγισμού σ_{cr} της διατομής. Με βάση την Εξίσωση (1) η αύξηση του πάχους διατομής αυξάνει εκθετικά την ελαστική τάση λυγισμού, καθώς και την μείωση του συντελεστή τοπικού λυγισμού λ ακολουθώντας την Εξίσωση (6). Επομένως καθώς επιβεβαιώνετε η θετική σχέση μεταξύ του πάχους συγκόλλησης και της αυξημένης αντοχής, στην παρούσα εργασία για λόγους σύγκρισης λήφθηκε υπόψη ένα σταθερό πάχος συγκόλλησης στα 2 mm.

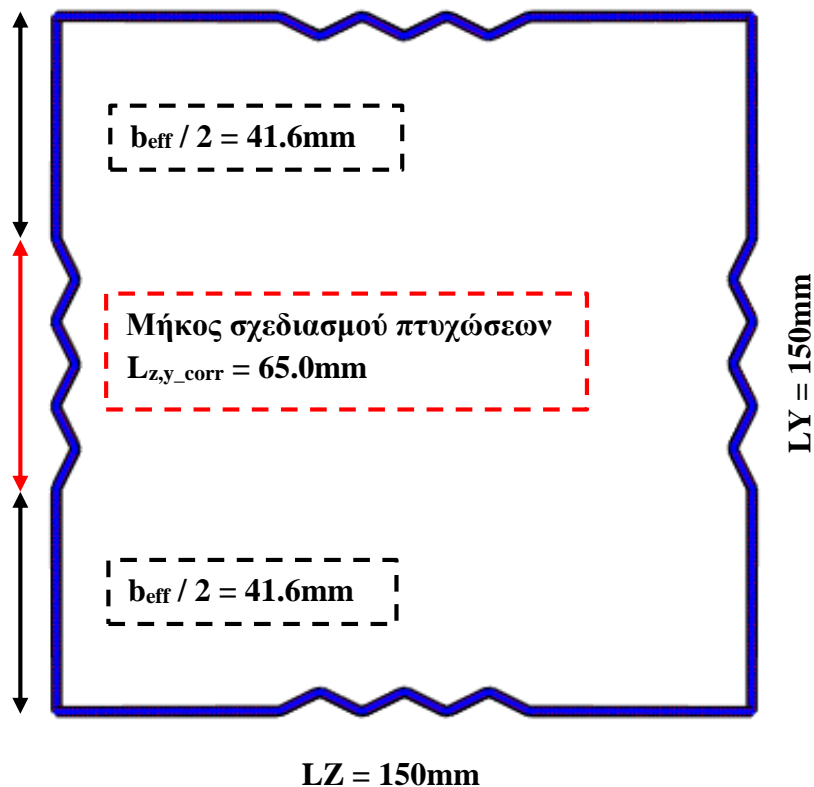
Ο παράγοντας πάχος συγκόλλησης διατηρείται σταθερός σε όλη τη διαδικασία σχεδιασμού, προσφέροντας μια σταθερή βάση για σύγκριση ανάμεσα στις διαφορετικές γεωμετρικές διατομής. Αυτή η επιλογή βοηθάει στον προσδιορισμό της πραγματικής επίδρασης των υπόλοιπων παραμέτρων γεωμετρίας στη συμπεριφορά της διατομής, αποτυπώνοντας πιο ευκρινώς τις διαφορές μεταξύ των διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών και επιτρέποντας την πιο ακριβή και αξιόπιστη αξιολόγηση της επίδρασης των υπολοίπων παραμέτρων.

4.2.2 Πλάτος b_{eff} , μήκος L_p και αριθμός n_p πτυχώσεων

Βασιζόμενοι στον Πίνακα 4.1 του Ευρωκώδικα 3-1-5 (EN 1993-1-5, 2006), παρουσιάζεται η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του ενεργού πλάτους b_{eff} (υποκεφάλαιο 2.3.3) σε στοιχεία των οποίων ασκούνται καθαρά θλιπτικές τάσεις και βρίσκονται εσωτερικά σε μια διατομή, όπως μια κοίλη διατομή. Με βάση τον υπολογισμό του ενεργού πλάτους της κάθε πλευράς

διατομής (Πίνακας 9), καθορίζεται αντίστοιχα το εναπομείναντα πλάτος, στο οποίο είναι ελεύθερο να σχεδιαστούν πτυχώσεις με σκοπό την ενίσχυση της ευάλωτης αυτής περιοχής. Κατά συνέπεια, ο αριθμός και το μήκος των πτυχώσεων εξαρτώνται από το περιθώριο που παραμένει, λαμβάνοντας υπόψη το ενεργό πλάτος b_{eff} της πλευράς της διατομής (Πίνακας 9). Το ελεύθερο αυτό μήκος αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τον σχεδιασμό, καθώς επηρεάζει τη δυνατότητα εφαρμογής πτυχώσεων προς ενίσχυση της υπό εξέταση διατομής. Τα ελαστικά κρίσιμα αξονικά φορτία N_{cr} (Πίνακας 9) υπολογίστηκαν με βάση τον κεντρικό άξονα της γεωμετρίας της διατομής χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων λωρίδων CUFSM (Li & Schafer, 2010).

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζετε η εφαρμογή της μεθοδολογίας καθορισμού του ελεύθερου μήκους σχεδιασμού πτυχώσεων βάση του ενεργού πλάτους (b_{eff}). Η διατομή είναι διαστάσεων $L_y, L_z = 150\text{mm}$ και σχεδιάζονται συνολικά 3 πτυχώσεις ανά πλευρά της διατομής και πλάτους 18mm.



Σχήμα 12: Καθορισμός ενεργού πλάτους b_{eff} και σχεδιαστικού μήκους πτυχώσεων L_{z,y_corr} .

L_z, L_y mm	$L_z - 2 \cdot (t_w/2)$	t_w mm	A mm ²	F_y MPa	v	ψ
100	98	2	784	261	0.32	1
150	148	2	1184	261	0.32	1
200	198	2	1584	261	0.32	1
250	248	2	1984	261	0.32	1
300	298	2	2384	261	0.32	1
350	348	2	2784	261	0.32	1
400	398	2	3184	261	0.32	1

Πίνακας 8: Υπολογισμός παραμέτρων καθορισμού των πτυχώσεων.

L_z, L_y mm	N_{cr} KN	λ	ρ	b_{eff} mm	Εφαρ. Πτυχ. σε mm	Αριθ. Πτυχ	L_p mm	L_{z,y_corr} mm	L_{z,y_str} mm
100	200.05	1.01	0.77	75.8	22	1	18	18	40
150	133.61	1.52	0.56	83.2	65	3	18	54	47
200	99.16	2.04	0.44	86.5	111	6	18	108	45
250	79.27	2.56	0.36	88.7	159	9	18	162	43
300	65.97	3.07	0.30	90.1	208	11	18	198	50
350	56.39	3.59	0.26	91.0	257	14	18	252	48
400	49.39	4.10	0.23	91.8	306	17	18	306	46

Πίνακας 9: Υπολογισμός παραμέτρων καθορισμού των πτυχώσεων.

4.2.3 Μέγεθος και γεωμετρία πτυχώσεων

Κύριος παράγοντας καθορισμού της γεωμετρίας και μεγέθους των πτυχώσεων στην περιοχή σχεδιασμού αναδείχθηκε η επίτευξη μιας μειωμένης αύξησης του εμβαδού σε σύγκριση με την αντίστοιχη συμβατική διατομή. Συγκεκριμένα, διατηρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις η διαφορά $\Delta A/A$ σε επίπεδα μικρότερα ή ίσα του 10% όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 10. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης των πτυχώσεων με πιο σαφή και συγκριτικό τρόπο, εξασφαλίζοντας παράλληλα την εφαρμογή στα πλαίσια των πρακτικών συνθηκών και απαιτήσεων.

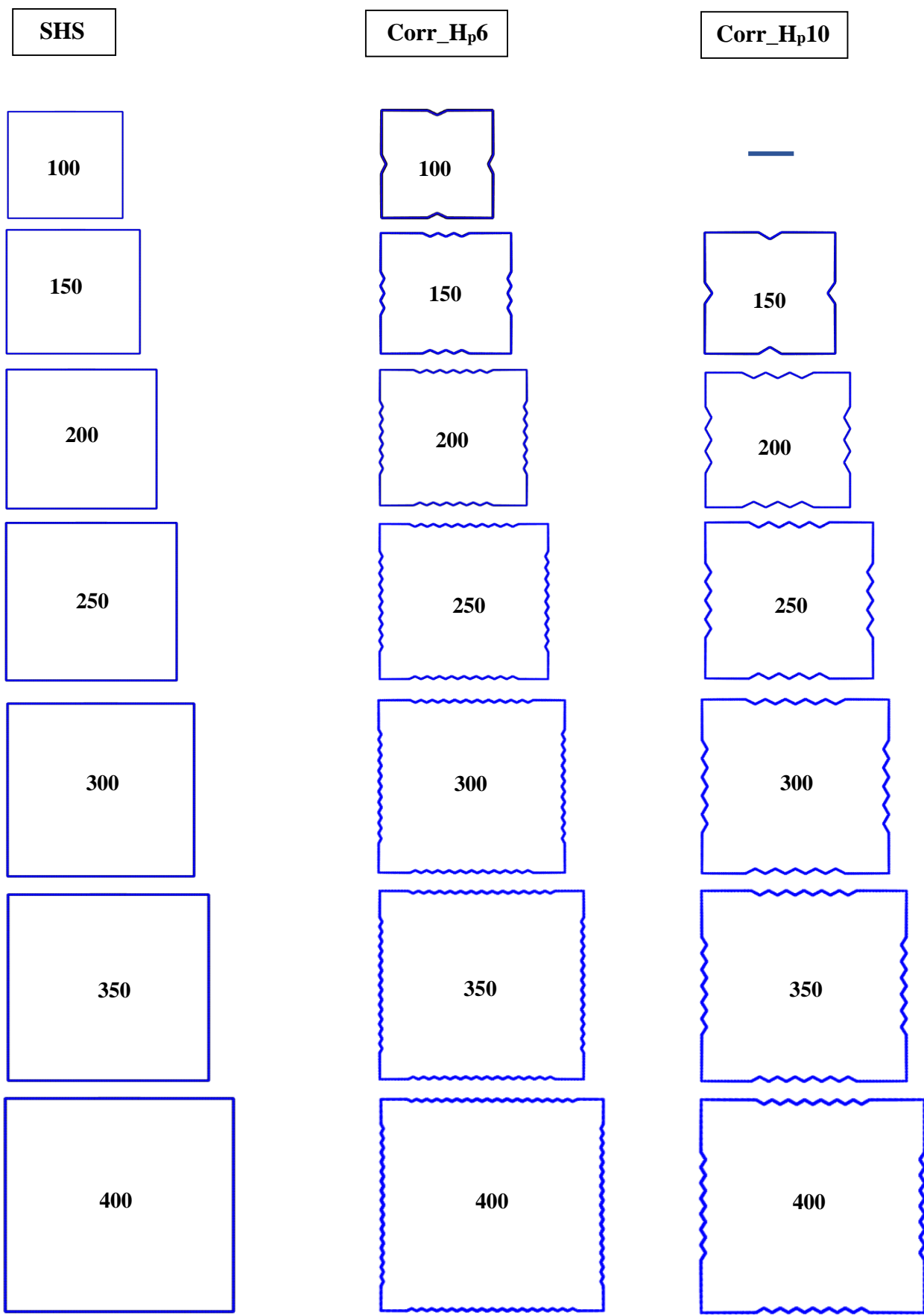
Αρχικά, το ύψος των πτυχώσεων (H_p) καθορίστηκε ως κοινό για όλες τις περιπτώσεις, στα 6mm. Ταυτόχρονα, επιλέχθηκε μια σταθερή διάμετρος καμπύλωσης (D_p) στην κορυφή των πτυχώσεων, της τάξης των 4mm. Αυτή η επιλογή συνετέλεσε στη δημιουργία ομαλών πτυχώσεων, αποφεύγοντας τον κίνδυνο του σχηματισμού οξείας γωνίας κορυφής, προσφέροντας βελτίωση της επίδοσης της διατομής, καθώς επίσης διασφαλίζοντας την ομαλή μετάβαση των τάσεων και αποφυγή τυχόν αδυναμιών που θα μπορούσαν να προκύψουν με αιχμηρές γωνίες. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια πρόσθετη σύγκριση ανάμεσα στις εξεταζόμενες διατομές με πτυχώσεις, εστιάζοντας στις διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία τους όσον αφορά το ύψος και το μήκος κάθε πτύχωσης. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε αύξηση του ύψους των πτυχώσεων (H_p) από 6mm σε 10mm, διατηρώντας σταθερή διάμετρο καμπύλωσης (D_p) αλλά μειώνοντας τον αριθμό των πτυχώσεων (n_p), και σε πολλές περιπτώσεις αυξάνοντας το πλάτος (L_p), διασφαλίζοντας τη διατήρηση της διαφοράς εμβαδών σε πολύ χαμηλά επίπεδα ($\Delta A/A \leq 1\%$). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι διαφοροποιήσεις έγιναν εντός του χώρου που καθορίζεται από το ενεργό πλάτος b_{eff} , ενισχύοντας έτσι την κατανόηση της επίδρασης των πτυχώσεων στη συμπεριφορά της διατομής. Επομένως, διατηρήθηκε κοινό το πλάτος b_{eff} σε κάθε διατομή ανεξαιρέτως των αλλαγών σε H_p , L_p , n_p και A , όπως αυτό υπολογίζεται με βάση την συμβατική γεωμετρία κάθε διατομή SHS (υποκεφάλαιο 4.2.2).

Σημείωση: Στη περίπτωση της διατομής Corr_100_ H_p 10 του Πίνακα 10 λόγω των περιορισμών που ακολουθήθηκαν ($\Delta A/A \leq 1\%$ και σχεδιασμός εντός ενεργού πλάτους b_{eff}) για το σχεδιασμό των πτυχώσεων ύψους 10mm δεν ήταν εφικτή η προσθήκη έστω μιας πτύχωσης με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός αναλύσεων.

Διατομή	L_z, L_y (mm)	t_w (mm)	L_p (mm)	H_p (mm)	D_p (mm)	n_p (mm)	A (mm ²)	$\Delta A/A$ (%) SHS & Corr_Hp6	$\Delta A/A$ (%) Corr_Hp6 & Corr_Hp10	$\Delta A/A$ (%) SHS & Corr_Hp10
SHS_100	100	2	-	-	4	-	784	1.84	-	-
Corr_100_Hp6	100	2	18	6	4	1	798			
Corr_100_Hp10	100	2	-	10	4	-	-			
SHS_150	150	2	-	-	4	-	1184	3.67	0.54	3.11
Corr_150_Hp6	150	2	18	6	4	3	1227			
Corr_150_Hp10	150	2	27	10	4	1	1221			
SHS_200	200	2	-	-	4	-	1584	5.47	0.28	5.76
Corr_200_Hp6	200	2	18	6	4	6	1671			
Corr_200_Hp10	200	2	33	10	4	3	1675			
SHS_250	250	2	-	-	4	-	1984	6.56	0.15	6.72
Corr_250_Hp6	250	2	18	6	4	9	2114			
Corr_250_Hp10	250	2	30	10	4	4	2117			
SHS_300	300	2	-	-	4	-	2384	6.67	0.09	6.57
Corr_300_Hp6	300	2	18	6	4	11	2543			
Corr_300_Hp10	300	2	32	10	4	5	2541			
SHS_350	350	2	-	-	4	-	2784	7.27	0.08	7.18
Corr_350_Hp6	350	2	18	6	4	14	2986			
Corr_350_Hp10	350	2	30	10	4	6	2984			
SHS_400	400	2	-	-	4	-	3184	7.72	0.14	7.57
Corr_400_Hp6	400	2	18	6	4	17	3430			
Corr_400_Hp10	400	2	29	10	4	7	3425			

Πίνακας 10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση διατομών και σύγκριση εμβαδών.

Στο Σχήμα 13, απεικονίζονται παραστατικά οι υποεξεταζόμενες διατομές (συμβατική SHS, ενισχυμένη με πτυχώσεις ύψους $H_p=6\text{mm}$ και $H_p=10\text{mm}$) στις γεωμετρίες $L_{y,z}$ 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 του Πίνακα 10.



Σχήμα 13: Απεικόνιση των υπό εξέταση διατομών του Πίνακα 10.

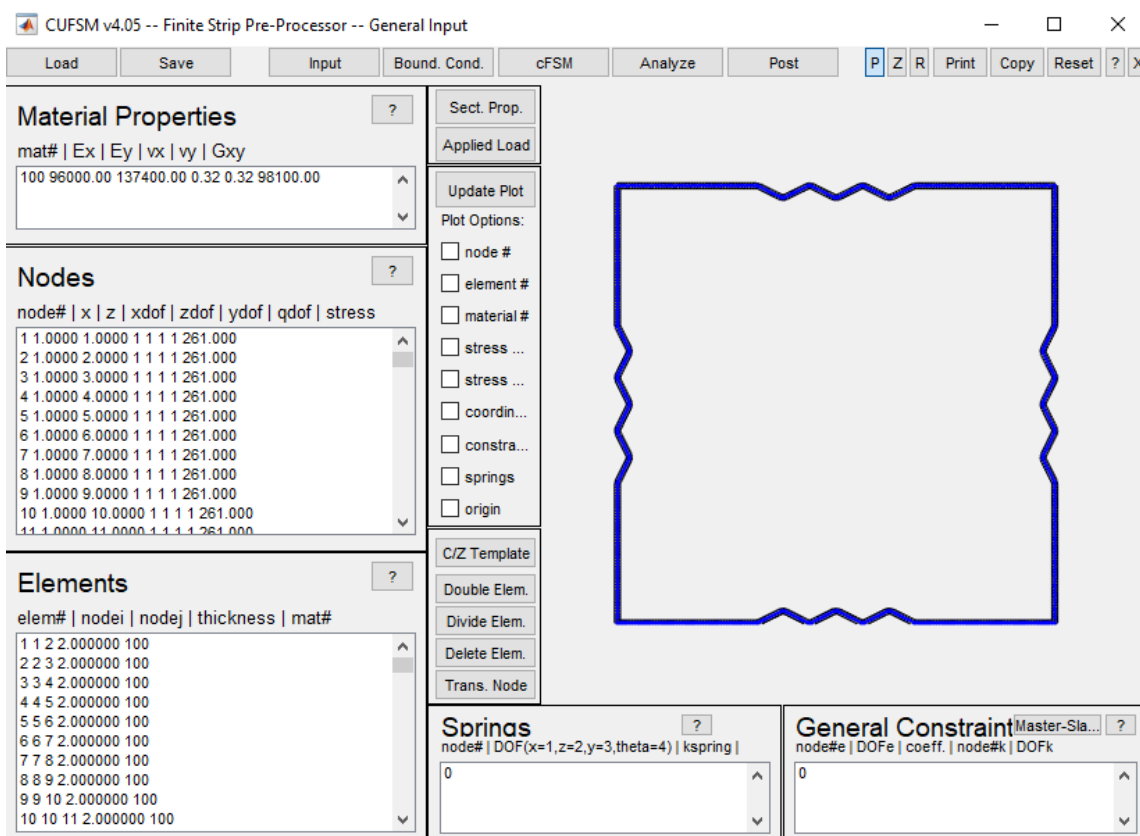
4.3 Διαδικασία Αναλύσεων

4.3.1 CUFSM

Όσον αφορά τη διαδικασία ανάλυσης των υπό εξέταση διατομών του Πίνακα 10 ακολουθήθηκε συνδυασμός αναλύσεων μεταξύ των προγραμμάτων CUFSM και ABAQUS 2023. Το CUFSM (Unconstrained Finite Strip Method) αποτελεί ένα πρόγραμμα που εφαρμόζει τη μέθοδο Finite Strip Method (FSM) για την ελαστική ανάλυση κατασκευών, κατάλληλο για την επίλυση προβλημάτων δομικής ευστάθειας. Πρόκειται για μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση δομικών μελών με λεπτά τοιχώματα, εστιάζοντας στον τοπικό λυγισμό όπου οι επιπτώσεις αυτού είναι τεράστιας σημασίας (Li & Schafer, 2010).

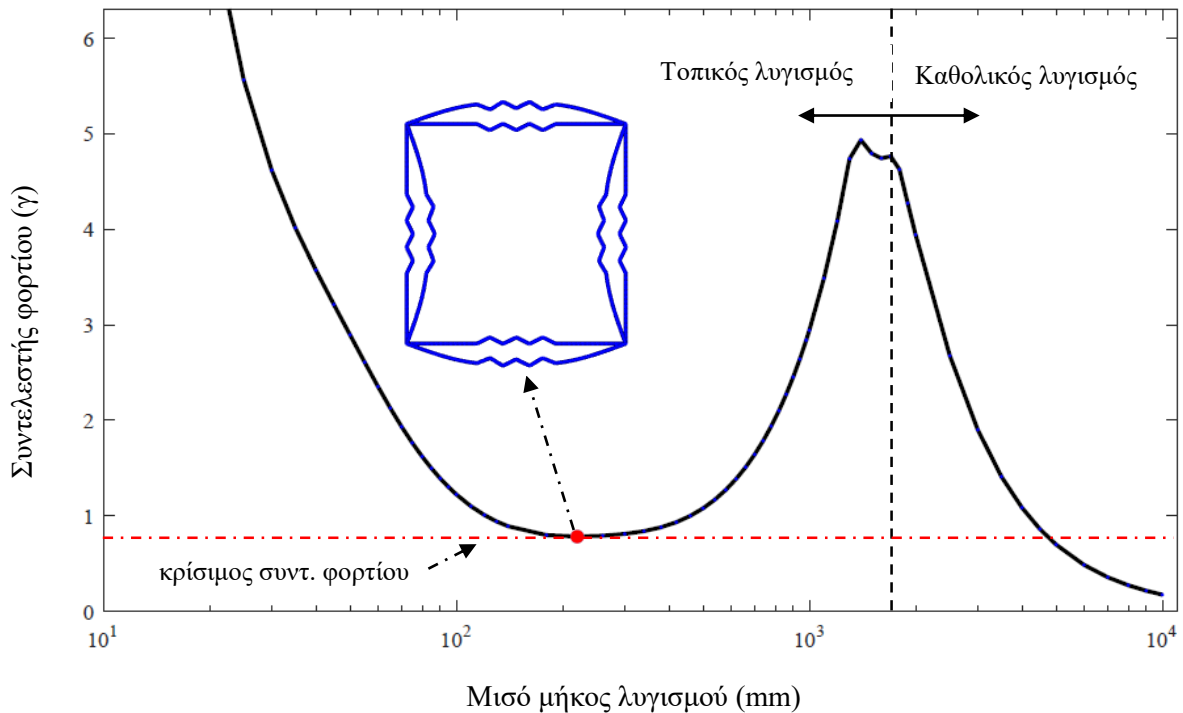
Έχοντας μεταφέρει τόσο τα γεωμετρικά όσο και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της υπό εξέτασης κάθε φορά διατομής στο περιβάλλον του CUFSM (Εικόνα 15), εκτελείτε ελαστική ανάλυση υπολογίζοντας την ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού (σ_{cr}) και τη μορφή λυγισμού της διατομής. Χρησιμοποιήθηκε η τάση διαρροής $f_y = 261 \text{ MPa}$ ($=\sigma_{0.2\text{eff}}$) ως τιμή αναφοράς (Πίνακας 2). Η κρίσιμη τοπική τάση λυγισμού στη κεντρική γραμμή της διατομής είναι επομένως ίση με το γινόμενο της εφαρμοζόμενης τάσης και του συντελεστή φορτίου γ (Εξίσωση 24) (ο συντελεστής φορτίου που απεικονίζεται στον κατακόρυφο άξονα του Διαγράμματος 20 είναι σχετικός με το φορτίο που απαιτείται για να προκαλέσει την πρώτη διαρροή της διατομής).

$$\sigma_{cr} = \gamma \times f_y \quad (24)$$



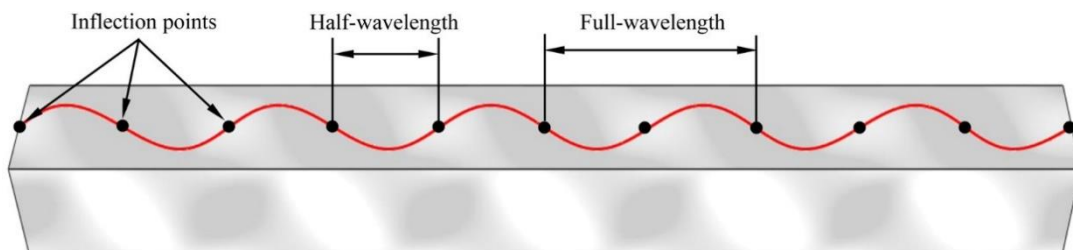
Εικόνα 15: Ορισμός υλικού και γεωμετρίας διατομής στο CUFSM.

Οι καμπύλες συντελεστή φορτίου γ – μισό μήκος λυγισμού που προκύπτουν από το CUFSM για την κάθε περίπτωση διατομής, περιγράφουν τη σχέση μεταξύ του κρίσιμου φορτίου λυγισμού (σ_{cr}) και του μισού μήκους κύματος λυγισμού των υπό εξέταση θλιπτικά φορτισμένων υποστυλωμάτων (Διάγραμμα 20). Οι καμπύλες αυτές αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση της συμπεριφοράς διαρροής του μέλους, παρέχοντας εκτενή εικόνα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του φορτίου και του μήκους κύματος κατά τη διαδικασία διαρροής εντοπίζοντας τα κρίσιμα σημεία. Η ανάλυση γραμμικού λυγισμού ή ανάλυση καθορισμού των ιδιοτιμών έχει ως στόχο την εκτίμηση των ιδιομορφών λυγισμού, δηλαδή τις μορφές με τις οποίες πρόκειται το δοκίμιο να παραμορφωθεί κάτω από μια γραμμική διαταραχή. Το σχήμα με την χαμηλότερη ιδιοτιμή (περίπτωση 1^{ης} ιδιομορφής) επιλέχθηκε ως η αρχική γεωμετρία του μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη της αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Η εν λόγω αρχική ατέλεια προσδιορίστηκε απευθείας στο ABAQUS για κάθε μια από τις διατομές.



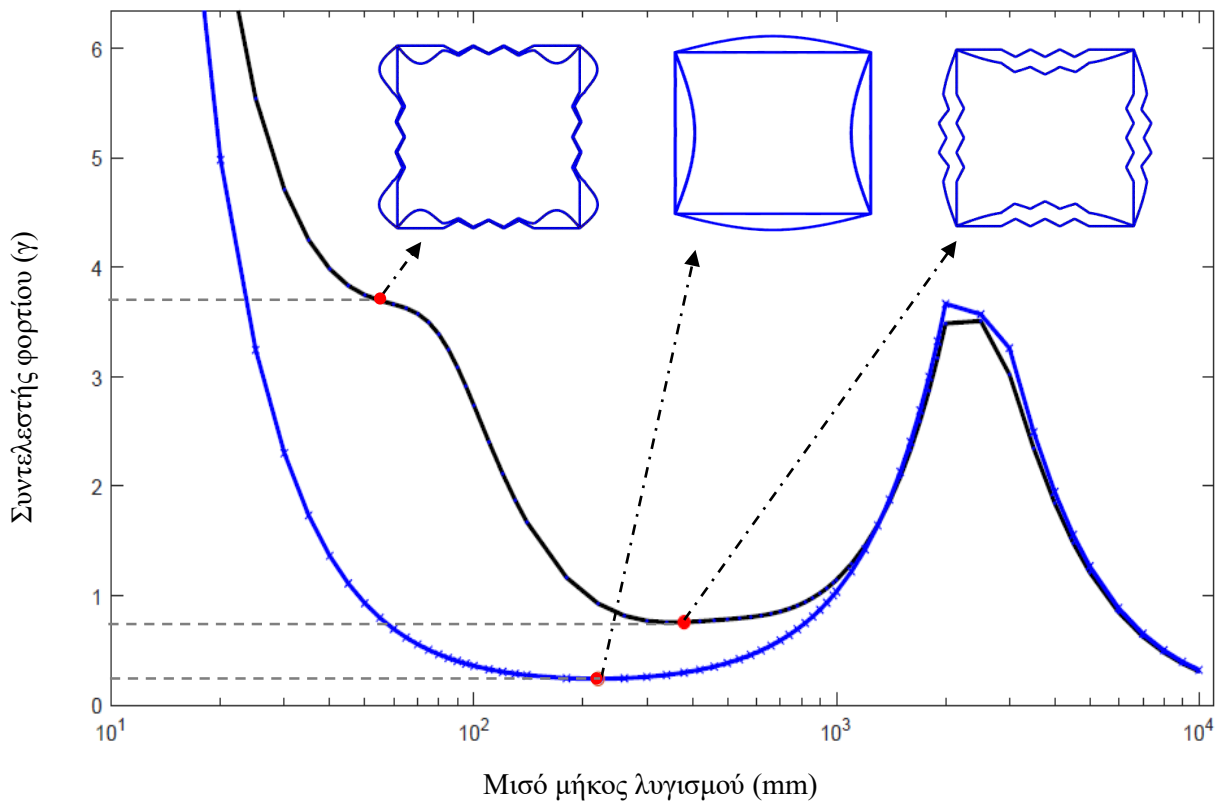
Διάγραμμα 20: Καμπύλη από το CUFSM για τυπική εξεταζόμενη διατομή.

Στο Σχήμα 14 απεικονίζει τον ορισμό του μισού μήκους κύματος λυγισμού.



Σχήμα 14: Ορισμός μισού μήκους κύματος (Yang, et al., 2024).

Παρατηρώντας το Διάγραμμα 21 και τις καμπύλες συντελεστή φορτίου - μισού μήκους λυγισμού ανάμεσα στις δύο διατομές (συμβατική και με πτυχώσεις, εξωτερικών διαστάσεων 200×200 mm) είναι εμφανής η αύξηση του συντελεστή φορτίου γ στη περίπτωση της προσθήκης πτυχώσεων. Ενδιαφέρον επίσης να σημειωθεί είναι το γεγονός ότι σε αντίθεση με την ξεκάθαρη απόκριση της συμβατικής διατομής μέχρι την εμφάνιση της 1^{ης} ιδιομορφής, στη περίπτωση της διατομής με πτυχώσεις προηγείται του τοπικού ελάχιστου σημείου ακόμα μια παραμόρφωση, με αποτέλεσμα την εξαγωγή του συμπεράσματος ότι η εν λόγω διατομές προσφέρουν αυξημένη δυσκαμψία.



Διάγραμμα 21: Συγκριτική καμπύλη από CUFSM για συμβατική και με πτυχώσεις εξεταζόμενη διατομή.

4.3.2 ABAQUS

Ολοκληρώνοντας την ελαστική ανάλυση λυγισμού στο CUFSM στη συνέχεια εφαρμόζετε μη γραμμική ανάλυση Riks στο λογισμικό ABAQUS, χρησιμοποιώντας γεωμετρία υποστυλώματος με τις αρχικές γεωμετρικές ατέλειες που προήλθαν από την ελαστική ανάλυση του CUFSM. Το ύψος (ω) που χρησιμοποιήθηκε για την κλιμάκωση των σχημάτων της παραμορφωμένης αρχικής γεωμετρίας ήταν η τιμή 1.28, η οποία κρίθηκε ως η πιο αντιπροσωπευτική με βάση των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.2.

Αυτή η συνδυασμένη προσέγγιση επιτρέπει μια πιο πλήρη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του υποστυλώματος, καθώς λαμβάνει υπόψη την ελαστική μορφή της διατομής από το CUFSM και εξερευνά τη μη γραμμική συμπεριφορά μέσω της Riks ανάλυσης στο ABAQUS.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

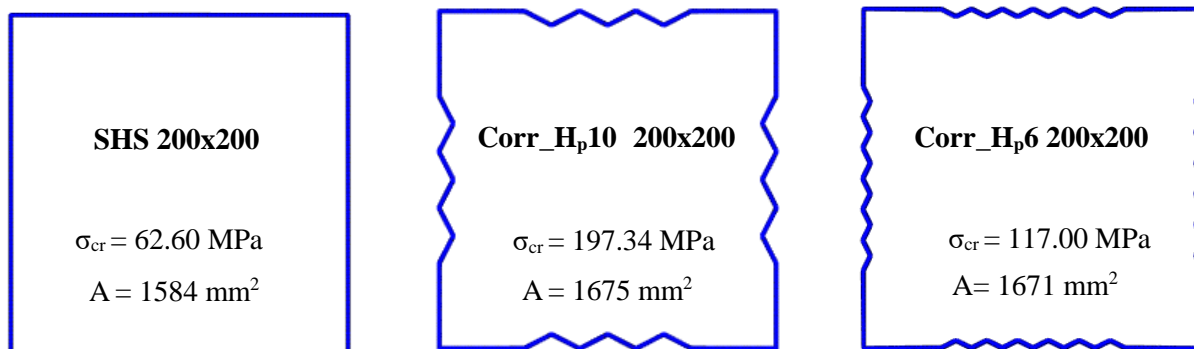
5.1 Σύγκριση μεταξύ συμβατικών κοίλων τετραγωνικών υποστυλωμάτων και με προσθήκη πτυχώσεων.

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύγκριση μεταξύ των συμβατικών κοίλων τετραγωνικών υποστυλωμάτων και των υποστυλωμάτων με προσθήκη πτυχώσεων. Για την ποσοτικοποίηση της δομικής αποδοτικότητας των ενισχυμένων τετραγωνικών υποστυλωμάτων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα γεωμετρικά συμβατικά υποστυλώματα, εισήχθη μια κανονικοποιημένη παράμετρος απόδοσης μ βασισμένη στην ελαστική τάση λυγισμού της διατομής, όπως δίνεται από την Εξίσωση (25) όπου σ_{cr} είναι η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού του ενισχυμένου υποστυλώματος, και $\sigma_{cr,eq}$ είναι η ελαστική κρίσιμη τάση του αντίστοιχου συμβατικού τετραγωνικού υποστυλώματος.

$$\mu = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr,eq}} \quad (25)$$

Οι λαμβανόμενες κανονικοποιημένες παράμετροι απόδοσης μ σχετίζονται με διαφορετικές διατάξεις ακαμψίας (αριθμός και μέγεθος πτυχώσεων) της γεωμετρίας της διατομής. Οι παράμετροι απόδοσης μ συνδέονται άμεσα με την ανάλογη αύξηση του εμβαδού διατομής $\Delta A/A$ (όπου A το εμβαδόν της συμβατικής SHS διατομής και ΔA η αύξηση του εμβαδού διατομής με πτυχώσεις σε σχέση με τη συμβατική διατομή). Συνολικά, οι εξεταζόμενες διατάξεις ακαμψίας οδήγησαν σε αυξημένη απόδοση.

Μεταξύ των γεωμετριών, η περίπτωση προσθήκης πτυχώσεων ύψους $H_p = 10\text{mm}$ (διατομή Corr_Hp10 200x200) οδήγησε στην υψηλότερη απόδοση $\mu = 3.15$ με συνολική αύξηση εμβαδού 5.76% έναντι της αντίστοιχης συμβατικής διατομής SHS 200x200. Η αντίστοιχη διατομή με πτυχώσεις ύψους 6mm (Corr_Hp6 200x200) οδήγησε σε συντελεστή απόδοσης $\mu = 1.87$ με αύξηση εμβαδού της τάξης του 5.47%. Είναι εμφανές λοιπόν ότι με μια αύξηση εμβαδού 0.28% μεταξύ των διατομών Corr_Hp6 200x200 και Corr_Hp10 200x200 προσφέρετε 68.45% αύξηση του συντελεστή απόδοσης. Στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται συγκριτικά οι γεωμετρίες των διατομών με εξωτερικές πλευρές 200x200 εστιάζοντας κυρίως στην διαφοροποίηση των πτυχώσεων (αριθμός n_p , πλάτος L_p , ύψος H_p) οδηγώντας στην αναφερθέντα αύξηση.



Σχήμα 15: Ελαστική τάση λυγισμού σ_{cr} και εμβαδόν A διατομών με εξωτερικές πλευρές 200x200.

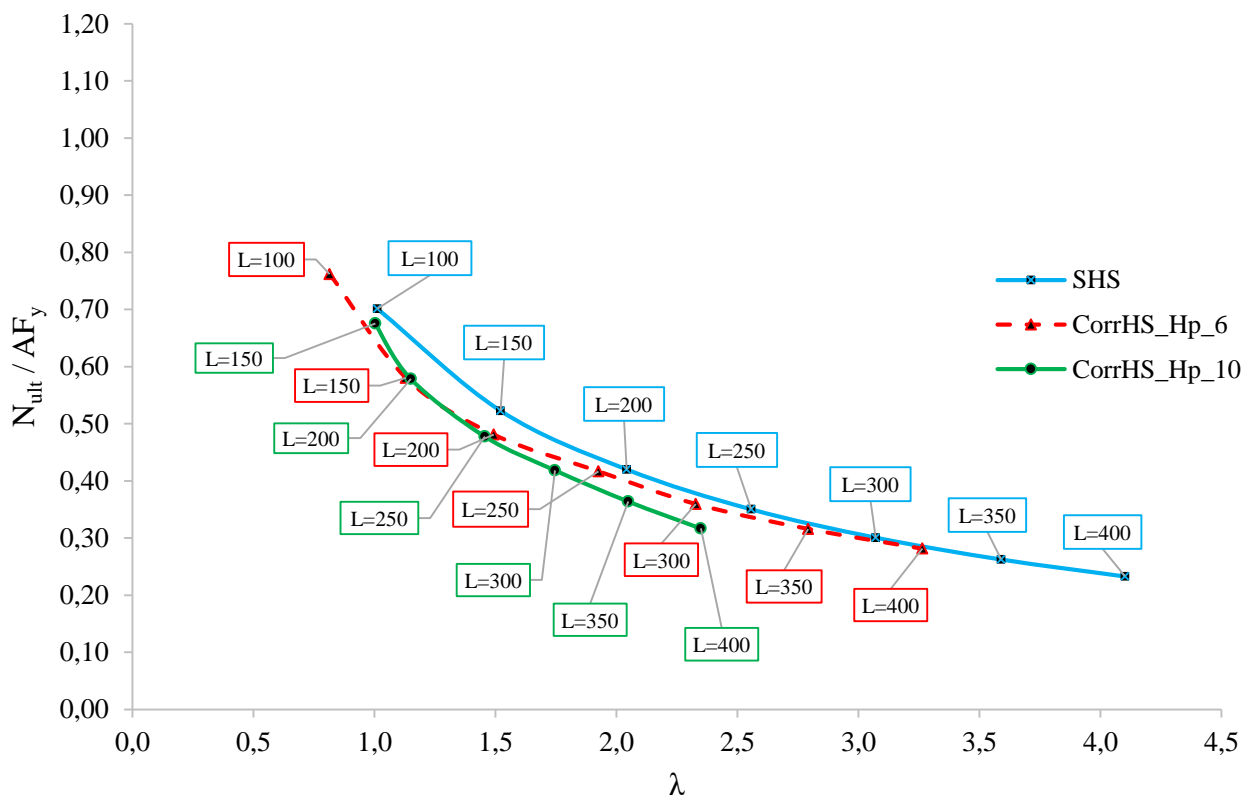
Στον Πίνακα 11 αναγράφονται οι συντελεστές μ και $\Delta A/A$ για διατομές διαστάσεων 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 μεταξύ της συμβατικής SHS και ενισχυμένης διατομής με $H_p=6\text{mm}$ Corr_Hp6, μεταξύ της συμβατικής διατομής SHS και ενισχυμένης διατομής με $H_p=10\text{mm}$ Corr_Hp10, καθώς και μεταξύ των δύο ενισχυμένων διατομών με $H_p=6\text{mm}$ και $H_p=10\text{mm}$, Corr_Hp6 και Corr_Hp10 αντίστοιχα.

Δοκίμιο	SHS vs Corr_Hp6		SHS vs Corr_Hp10		Corr_Hp6 vs Corr_Hp10	
	μ ($\sigma_{cr}/\sigma_{cr,req}$)	$\Delta A/A$ (%)	μ ($\sigma_{cr}/\sigma_{cr,req}$)	$\Delta A/A$ (%)	μ ($\sigma_{cr}/\sigma_{cr,req}$)	$\Delta A/A$ (%)
100 x 100	1.54	1.84	-	-	-	-
150 x 150	1.81	3.67	2.30	3.11	1.27	0.54
200 x 200	1.87	5.47	3.15	5.76	1.69	0.28
250 x 250	1.76	6.56	3.08	6.72	1.75	0.15
300 x 300	1.74	6.67	3.09	6.57	1.78	0.09
350 x 350	1.65	7.27	3.07	7.18	1.86	0.08
400 x 400	1.58	7.72	3.05	7.57	1.93	0.14

Πίνακας 11: Τιμές παραμέτρου απόδοσης (μ) και αύξησης εμβαδού $\Delta A/A$.

5.1.2 Σύγκριση θλιπτικού φορτίου αντοχής N_{ult}

Υπολογίζοντας την κανονικοποιημένη τιμή $N_{ult} / (AF_y)$ για τις υπό εξέταση συμβατικές και μη γεωμετρίες παρουσιάζετε το συγκριτικό Διάγραμμα 22. Με μπλε χρώμα καμπύλης απεικονίζεται η συμπεριφορά του λόγου $N_{ult} / (AF_y)$ συγκριτικά με την λυγηρότητα για διατομές διαστάσεων 100, 150, 200, 250, 300, 350 και 400. Αντιστοίχως η κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη απεικονίζει της ενισχυμένη διατομή με $H_p=6\text{mm}$ (Corr_Hp6) και με πράσινη καμπύλη την ενισχυμένη διατομή με $H_p=10\text{mm}$ (Corr_Hp10). Είναι εμφανής η αύξηση του λόγου $N_{ult} / (AF_y)$ στη περίπτωση της προσθήκης πτυχώσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής τους έναντι θλιπτικού αξονικού φορτίου και αντανακλώντας την σημαντικά μειωμένη ευαισθησία τους σε τοπικό λυγισμό.



Διάγραμμα 22: Σύγκριση μεταξύ συμβατικών (SHS) και με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm (Corr_Hp6) και 10mm διατομών (Corr_Hp10) μέσω καμπυλών λυγισμού.

Στον Πίνακα 12, αναγράφεται η λυγηρότητα λ καθώς και ο λόγος του μέγιστου θλιπτικού φορτίου αντοχής της διατομής κανονικοποιημένο ως προς το εμβαδόν της διατομής επί τη τάση διαρροής.

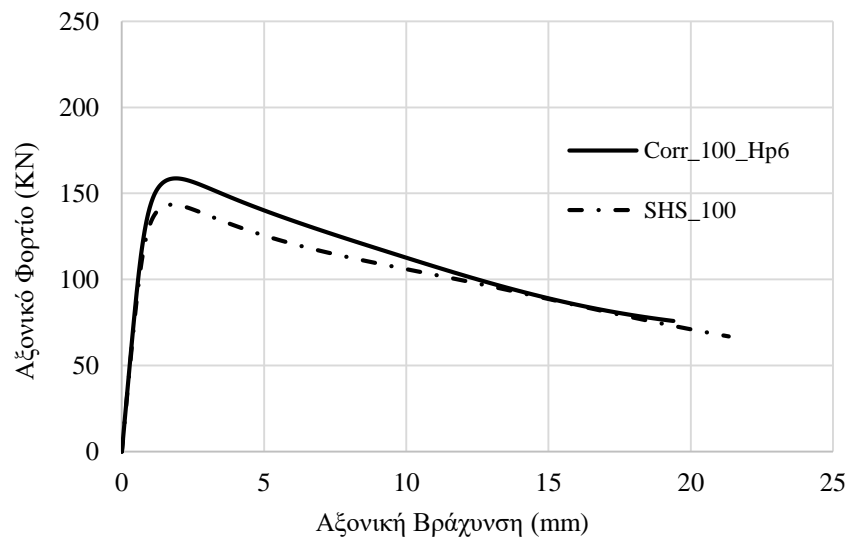
Δοκίμιο	SHS		Corr_Hp6		Corr_Hp10	
	λ	$N_{ult}/(AF_y)$	λ	$N_{ult}/(AF_y)$	λ	$N_{ult}/(AF_y)$
100 x 100	1.01	0.70	0.81	0.76	-	-
150 x 150	1.52	0.52	1.13	0.58	1.00	0.68
200 x 200	2.04	0.42	1.49	0.48	1.15	0.58
250 x 250	2.56	0.35	1.93	0.42	1.46	0.48
300 x 300	3.07	0.30	2.33	0.36	1.75	0.42
350 x 350	3.59	0.26	2.79	0.32	2.05	0.36
400 x 400	4.10	0.23	3.26	0.28	2.35	0.32

Πίνακας 12: Υπολογισμός λυγηρότητας και κανονικοποιημένου μέγιστου θλιπτικού φορτίου αντοχής της διατομής.

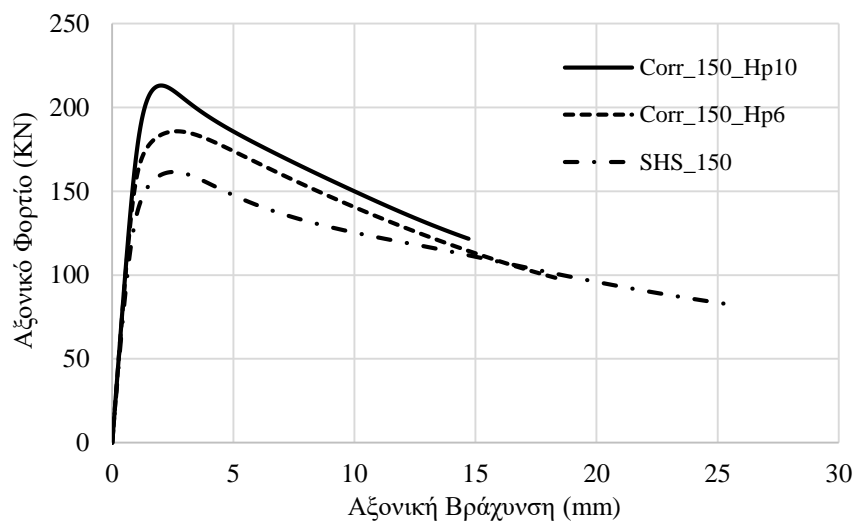
Η μείωση του συντελεστή λυγηρότητας λ μεταξύ των αντίστοιχων διαστάσεων συμβατικών και με προσθήκη πτυχώσεων διατομών, οδηγεί σε αυξημένη σταθερότητα του μέλους, ιδιαίτερα όσον αφορά την αντίσταση σε τοπικό λυγισμό. Οι χαμηλότεροι λόγοι λεπτότητας υποδεικνύουν ένα πιο άκαμπτο σχήμα, το οποίο μπορεί να αντισταθεί καλύτερα στον λυγισμό, επιτρέποντας στο μέλος να μεταφέρει υψηλότερα θλιπτικά φορτία πριν φτάσει στην οριακή του κατάσταση.

5.1.3 Συγκριτικά γραφήματα θλιπτικού φορτίου – βράχυνσης.

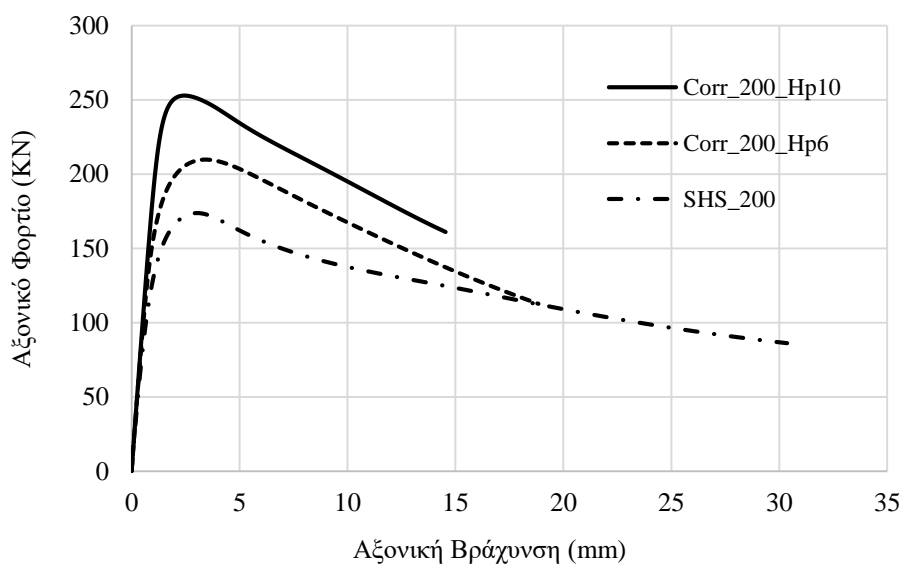
Σε αυτό το υποκεφάλαιο απεικονίζονται τα θεωρητικά Διαγράμματα (23 έως 29) αξονικού θλιπτικού φορτίου-βράχυνσης των εξεταζόμενων μοντέλων όπου εξάχθηκαν μέσω γραμμικής ανάλυσης στο CUFSM και μη γραμμικής ανάλυσης στο ABAQUS. Σε κάθε διάγραμμα διαφαίνεται η συμπεριφορά της συμβατικής διατομής SHS, και των ενισχυμένων διατομών με πτυχώσεις ύψους $H_p=6\text{mm}$ (Corr_Hp6) και $H_p=10\text{mm}$ (Corr_Hp10), ενώ στον Πίνακα 13, παρουσιάζονται οι τιμές της μέγιστης θλιπτικής αντοχής N_{ult} και της αντίστοιχης βράχυνσης δ_u για κάθε εξεταζόμενη διατομή για όλες τις γεωμετρίες.



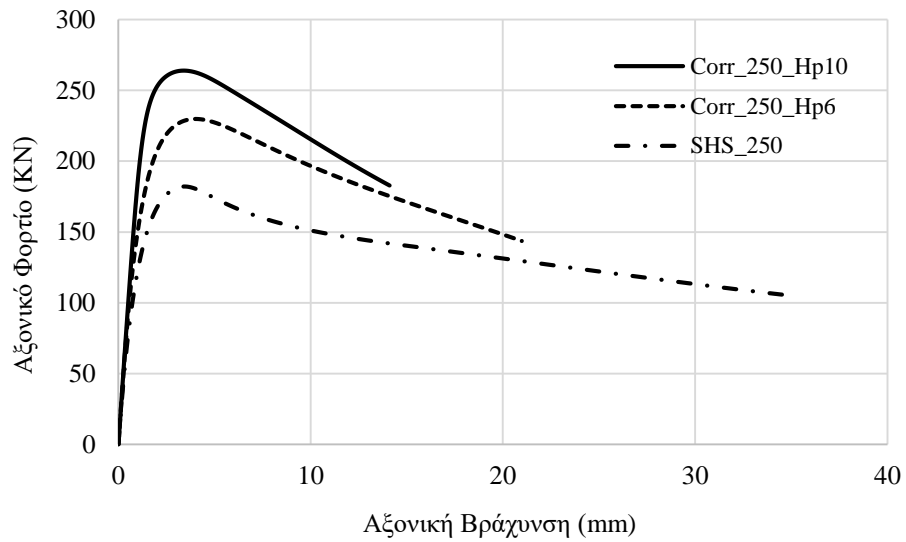
Διάγραμμα 23: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 100x100.



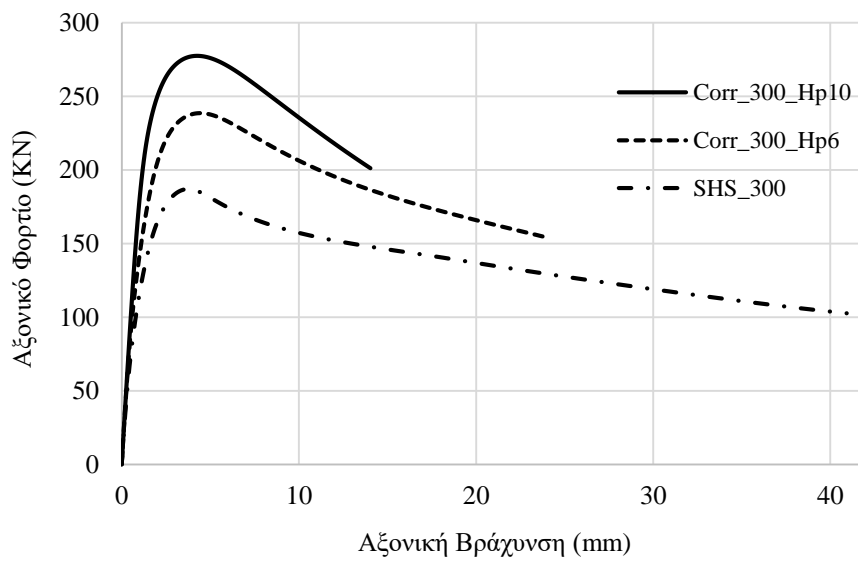
Διάγραμμα 24: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 150x150.



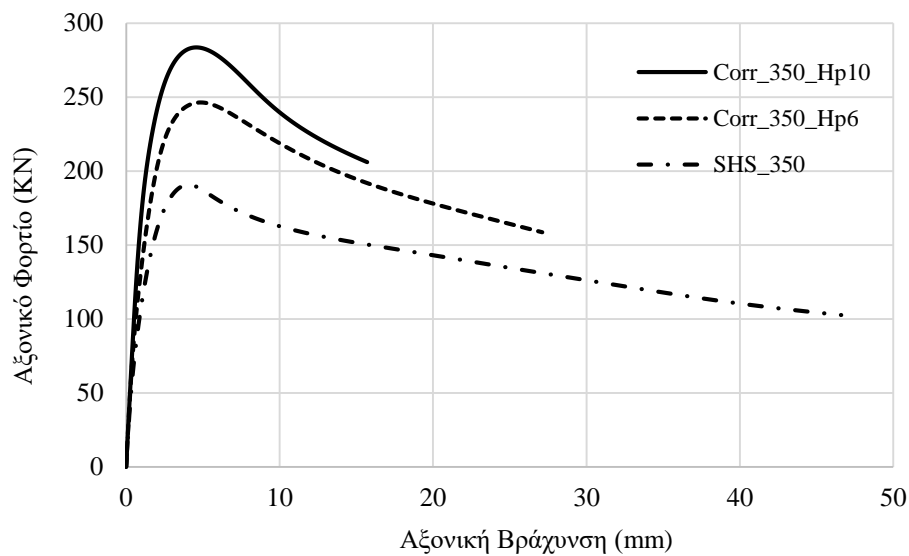
Διάγραμμα 25: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 200x200.



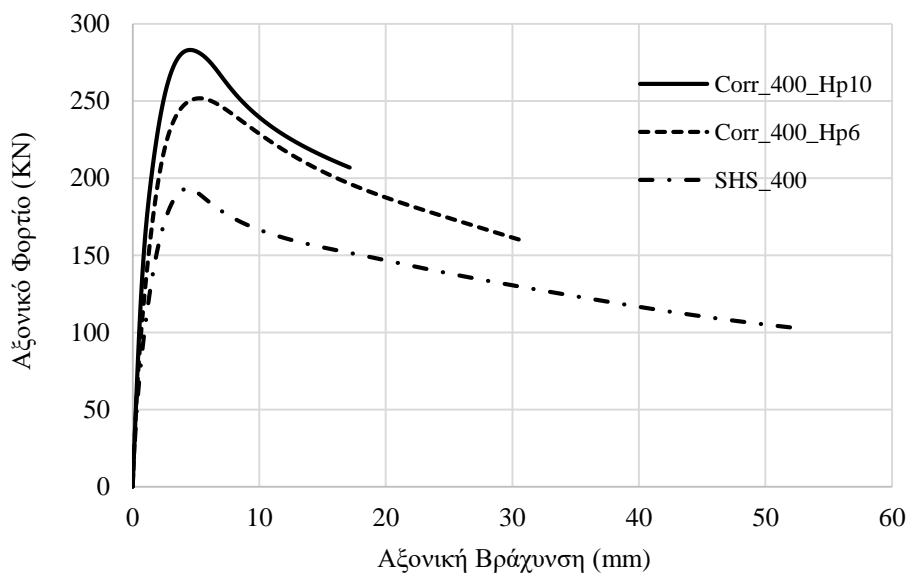
Διάγραμμα 26: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 250x250.



Διάγραμμα 27: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 300x300.



Διάγραμμα 28: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 350x350.



Διάγραμμα 29: Καμπύλες αξονικού φορτίου - αξονικής βράχυνσης εξεταζόμενων δοκιμίων διατομής 400x400.

Μια περίληψη των αποτελεσμάτων δίνεται στον Πίνακα 13, όπου N_{ult} το μέγιστο αξονικό φορτίο και δ_u η βράχυνση του άκρου υποστυλώματος στο N_{ult} , όπως υπολογίζεται από τη μη γραμμική ανάλυση.

Δοκίμιο	SHS		Corr_Hp6		Corr_Hp10	
	N _{ult} (KN)	δ _u (mm)	N _{ult} (KN)	δ _u (mm)	N _{ult} (KN)	δ _u (mm)
100 x 100	143.52	1.74	158.74	1.87	-	-
150 x 150	161.51	2.53	185.85	2.65	215.12	2.04
200 x 200	173.64	3.00	209.62	3.44	252.91	2.43
250 x 250	181.36	3.48	229.94	4.02	263.98	3.39
300 x 300	187.05	3.74	238.59	4.44	277.50	4.27
350 x 350	190.62	4.03	246.27	4.82	283.52	4.55
400 x 400	193.29	4.34	251.81	5.31	283.11	4.57

Πίνακας 13: Αξονικό φορτίο αντοχής N_{ult} εξεταζόμενων δοκιμίων.

Είναι εμφανές, ότι σε όλες τις εξεταζόμενες γεωμετρίες διατομών, οι ενισχυμένες διατομές με πτυχώσεις ύψους H_p=6mm και H_p=10mm οδηγούν σε μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή έναντι της συμβατικής διατομής SHS. Επίσης η ενισχυμένη διατομή με ύψος πτυχώσεων H_p=10mm έχει μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή έναντι της ενισχυμένης διατομής με ύψος πτυχώσεων H_p=6mm. Οι υπό εξέταση μη συμβατικές γεωμετρίες αποδείχθηκαν ικανές να οδηγήσουν τις τελικές θλιπτικές αντοχές N_{ult} μέχρι και 30% υψηλότερες και 7.7% αύξηση εμβαδού διατομής από αυτές του αντίστοιχου συμβατικού υποστυλώματος αντανακλώντας την σημαντικά μειωμένη ευαισθησία τους σε τοπικό λυγισμό. Γενικά παρατηρείται, μεγάλη διαφορά στις αντοχές μεταξύ συμβατικής και ενισχυμένης διατομής με πτυχώσεις ύψους H_p=10mm, καθώς ο λόγος των αντοχών και της αύξησης εμβαδού κυμαίνεται μεταξύ 33.2%-48.7% και 3.1%-7.6% αντίστοιχα. Η σύγκριση μεταξύ συμβατικής διατομής SHS και ενισχυμένης διατομής με ύψος πτυχώσεων H_p=6mm εμφανίζει μια διακύμανση στους λόγους αντοχής και αύξησης εμβαδού, από 10.6%-30.3% και 1.8%-7.7% αντίστοιχα. Ακόμη συγκρίνοντας τις δύο ενισχυμένες διατομές μεταξύ τους, παρατηρείται μια διακύμανση στους λόγους των φορτίων μεταξύ 12.4%-20.6%, ενώ χαρακτηριστική είναι η σχεδόν μηδενική διαφορά των εμβαδών όπου κυμαίνεται από 0.08%-0.54%. Μεταξύ των τριών ζευγών, η σύγκριση μεταξύ των δύο ενισχυμένων διατομών έχουν την μικρότερη απόκλιση, ενώ την μεγαλύτερη μεταξύ συμβατικής και ενισχυμένης διατομής με ύψος πτυχώσεων H_p=10mm.

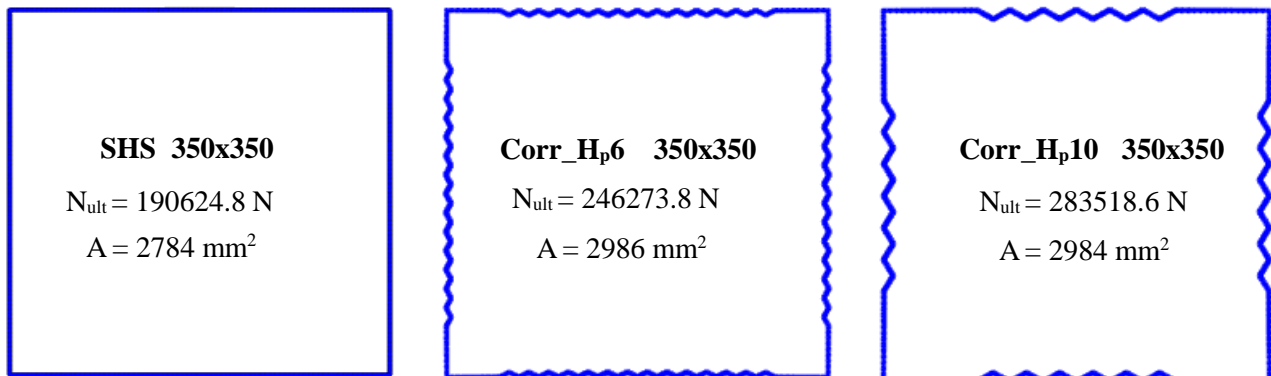
Τέτοιες αυξήσεις στην ικανότητα μεταφοράς φορτίου έχουν επίσης βρεθεί σε προηγούμενες πειραματικές έρευνες σε κυματοειδές κοχύλια (Combesure & Jullien, 2015), (Ning & Pellegrino, 2017) και αποδίδονται κυρίως στη μειωμένη τοπική ακτίνα καμπυλότητας και στην επίδραση ακαμψίας από την δημιουργία κυματισμών (Zhang, et al., 2022).

Όσον αφορά την βράχυνση, φαίνεται ότι σε όλες τις γεωμετρίες, η συμβατική διατομή παραλαμβάνει μεγαλύτερες παραμένουσες παραμορφώσεις από το σημείο της μέγιστης θλιπτικής αντοχής μέχρι το σημείο της πλήρους αστοχίας συγκριτικά των άλλων διατομών. Επιπλέον, η ενισχυμένη διατομή με ύψος $H_p=6\text{mm}$ παρουσιάζει μεγαλύτερη παραμόρφωση μέχρι την πλήρους αστοχίας σε σχέση με την ενισχυμένη διατομή με ύψος $H_p=10\text{mm}$. Οι τιμές των αξονικών βραχύνσεων δ_u που αντιστοιχούν στο μέγιστο φορτίο αντοχής N_{ult} των διατομών με ύψος πτυχώσεων $H_p=10\text{mm}$ παρατηρούνται να είναι μειωμένες συγκριτικά με τις διατομές με ύψος πτυχώσεων $H_p=6\text{mm}$ και τις συμβατικές SHS. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην αυξημένη ακαμψία που προσδίδουν οι πτυχώσεις με $H_p=10\text{mm}$ έναντι των $H_p=6\text{mm}$ και SHS διατομών.

Δοκίμιο	SHS vs Corr_Hp6		SHS vs Corr_Hp10		Corr_Hp6 vs Corr_Hp10	
	$\Delta N_{ult} / N_{ult}$ (%)	$\Delta A/A$ (%)	$\Delta N_{ult} / N_{ult}$ (%)	$\Delta A/A$ (%)	$\Delta N_{ult} / N_{ult}$ (%)	$\Delta A/A$ (%)
100 x 100	10.60%	1.84%	-	-	-	-
150 x 150	11.00%	3.67%	33.19%	3.11%	15.75%	0.54%
200 x 200	20.72%	5.47%	45.66%	5.76%	20.65%	0.28%
250 x 250	26.79%	6.56%	45.55%	6.72%	14.80%	0.15%
300 x 300	27.55%	6.67%	48.35%	6.57%	16.31%	0.09%
350 x 350	29.19%	7.27%	48.73%	7.18%	15.12%	0.08%
400 x 400	30.28%	7.72%	46.47%	7.57%	12.43%	0.14%

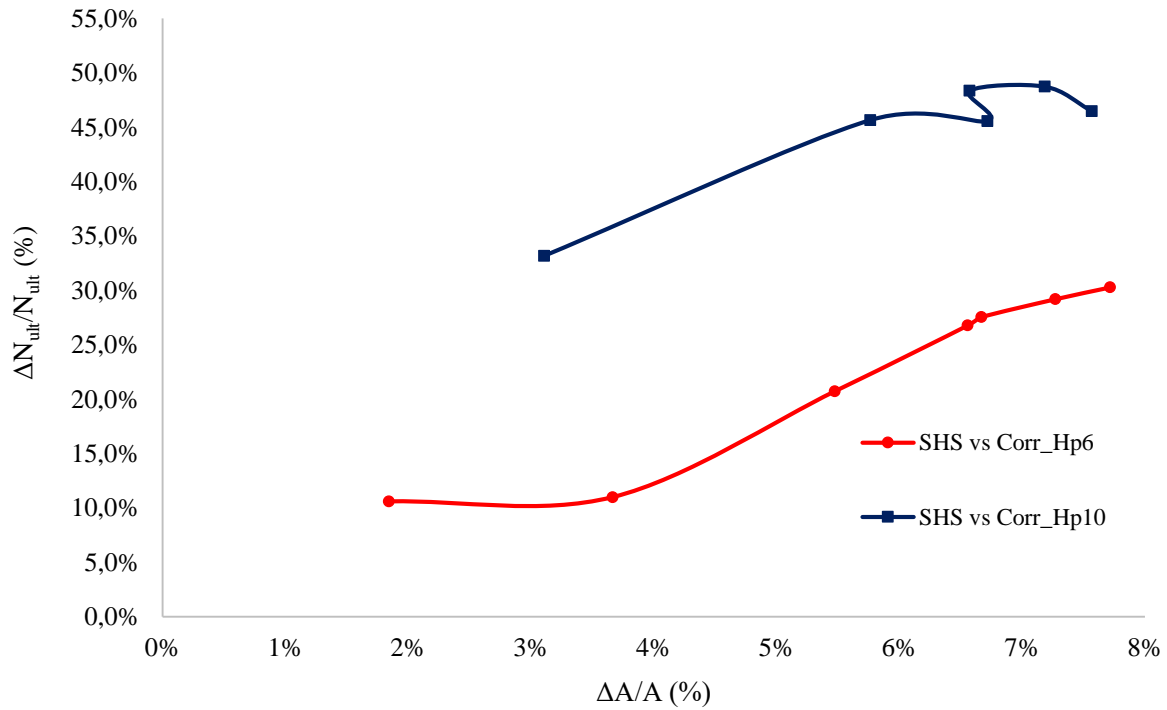
Πίνακας 14: Ποσοστά αύξησης αξονικού φορτίου αντοχής N_{ult} μεταξύ συμβατικών (SHS) και με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm (Corr_Hp6) και 10mm διατομών (Corr_Hp10).

Αναλύοντας τις τιμές του Πίνακα 14 είναι ξεκάθαρη η ποσοστιαία αύξηση η οποία προσφέρετε με την προσθήκη πτυχώσεων. Η μεγαλύτερη αύξηση του μέγιστου αξονικού φορτίου αντοχής N_{ult} εμφανίζεται στη περίπτωση προσθήκης πτυχώσεων ύψους 10mm (Corr_Hp10) της συμβατικής γεωμετρίας διατομής SHS 350x350. Η εν λόγω αύξηση της τάξης του 48.73% αντιστοιχεί σε αύξηση εμβαδού διατομής 7.18%. Η αντίστοιχη περίπτωση προσθήκης πτυχώσεων ύψους 6mm (Corr_Hp6) έδωσε αύξηση 29.19% με 7.27% αύξηση του εμβαδού διατομής. Επομένως, η τροποποίηση του ύψους των πτυχώσεων από 6mm σε 10mm (διασφαλίζοντας την διατήρηση της διαφοράς εμβαδού μικρότερη του 1%) έδωσε αύξηση 15.12% με 0.08% στη μεταξύ τους διαφορά εμβαδού. Στο Σχήμα 16 απεικονίζονται οι αναφερθέντες διατομές.

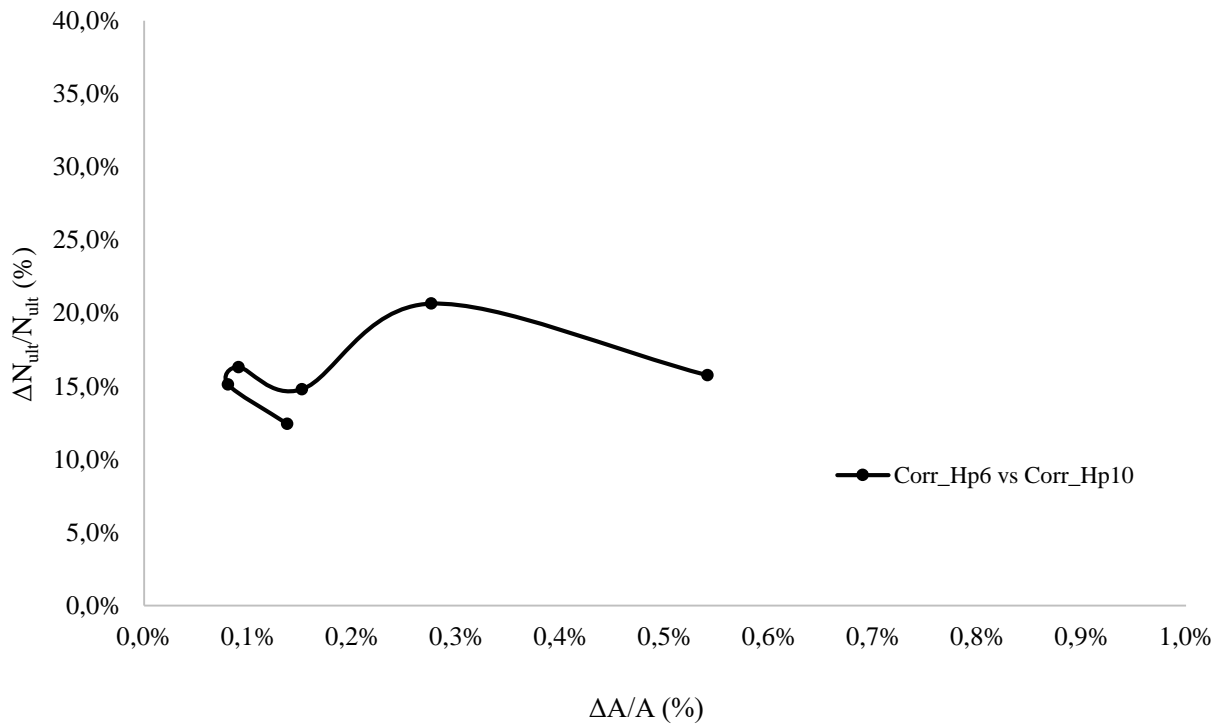


Σχήμα 16: Σύγκριση μέγιστου αξονικού φορτίου N_{ult} και εμβαδού A μεταξύ διατομών με εξωτερικές πλευρές 350x350.

Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τις υπόλοιπες διατομές. Στο Διάγραμμα 30 είναι εμφανές η αύξηση $\Delta N_{ult} / N_{ult}$ (ποσοστό αύξησης %) του μέγιστου αξονικού φορτίου αντοχής N_{ult} μεταξύ των δυο διαφορετικού ύψους πτυχώσεων, ενώ στο Διάγραμμα 31, απεικονίζεται το ποσοστό αύξησης $\Delta N_{ult} / N_{ult}$ και $\Delta A / A$ μεταξύ ενισχυμένων διατομών με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm και 10mm.



Διάγραμμα 30: Ποσοστό αύξησης $\Delta N_{ult} / N_{ult}$ και $\Delta A/A$ μεταξύ διατομών SHS και με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm και 10mm.



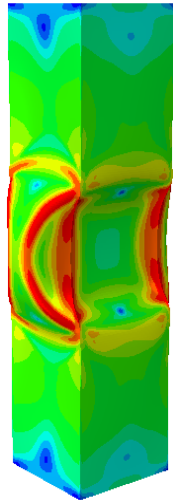
Διάγραμμα 31: Ποσοστό αύξησης $\Delta N_{ult} / N_{ult}$ και $\Delta A/A$ μεταξύ ενισχυμένων διατομών με προσθήκη πτυχώσεων ύψους 6mm και 10mm.

5.1.2 Μορφή αστοχίας μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων

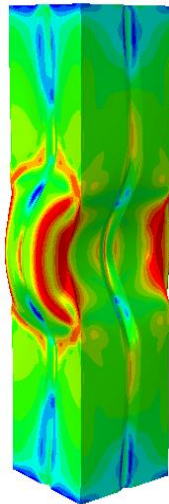
Η μορφή αστοχίας των υποστυλωμάτων αποτελεί σημαντική παράμετρο στην κατανόηση της απόδοσης των υπό εξέταση δοκιμίων. Αναλύοντας τις μορφές αστοχίας, είναι δυνατόν να αξιολογηθεί η επίδραση των παραμορφώσεων στην αντοχή και στην απόδοση του υλικού, καθώς και να εντοπιστούν πιθανά σημεία αδυναμίας. Οι ευάλωτες περιοχές μπορούν να αποτυπωθούν, επιτρέποντας την ακριβέστερη αξιολόγηση της δομικής απόδοσης. Επιπλέον, η ανάλυση αυτή μπορεί να δώσει σημαντικές ενδείξεις για την αποτελεσματικότητα των τροποποιήσεων στη γεωμετρία με την προσθήκη πτυχώσεων και να βοηθήσει στην επίτευξη βελτιωμένων αποτελεσμάτων στην πρακτική εφαρμογή.

Οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων του Σχήματος 17 επηρεάστηκαν σαφώς από τον ορισμό των αρχικών ατελειών και της προσθήκης πτυχώσεων. Οι παραμορφωμένες γεωμετρίες των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τόσο στις συμβατικές διατομές όσο και με πτυχώσεις, παρουσιάζουν μια εμφανής παραμόρφωση στα σημεία αλλαγής της γεωμετρίας και συγκεκριμένα στις τέσσερις γωνίες των διατομών. Επίσης, παρατηρείται μια συμμετρική αξονική παραμόρφωση κοινή με την μορφή κατά τον ορισμό των αρχικών γεωμετρικών ατελειών. Φαίνεται ότι σε όλες τις γεωμετρικές διατομών υποστυλωμάτων, η συμβατική διατομή παραλαμβάνει μεγαλύτερες θλιπτικές παραμορφώσεις μέχρι το σημείο της πλήρους αστοχίας συγκριτικά με των υπολοίπων υποστυλωμάτων.

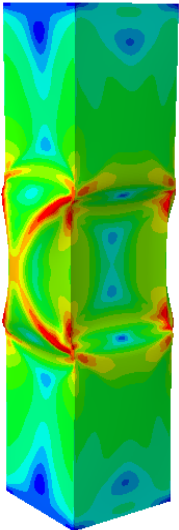
Με βάση την χρωματική απεικόνιση των τάσεων που αναπτύσσονται στα παραμορφωμένα υπό μελέτη υποστυλώματα, είναι εμφανές το γεγονός ότι κατά την μετάβαση σε προσθήκη πτυχώσεων αρχικά $H_p=6\text{mm}$ στην κεντρική περιοχή των πλακών οι τάσεις μεταφέρονται στις γωνιακές περιοχές των διατομών, φαινόμενο το οποίο γίνεται ακόμα πιο έντονο στις περιπτώσεις ύψους πτυχώσεων $H_p=10\text{mm}$. Κύριος παράγοντας για την συμπεριφορά αυτή είναι η αύξηση της ακαμψίας της κεντρικής ευάλωτης περιοχής των πλακών της διατομής, οδηγώντας πρώτα σε αστοχία τις γωνιακές περιοχές. Παρατηρώντας την χρωματική απεικόνιση των τάσεων στις περιπτώσεις των συμβατικών υποστυλωμάτων δημιουργείται μια χιαστί κατανομή τάσης, φαινόμενο το οποίο χάνετε με την αύξηση του ύψους των πτυχώσεων.



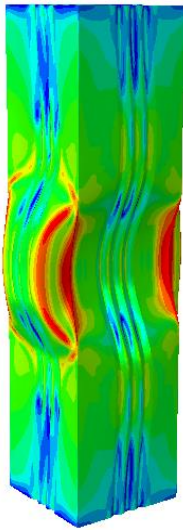
SHS_100



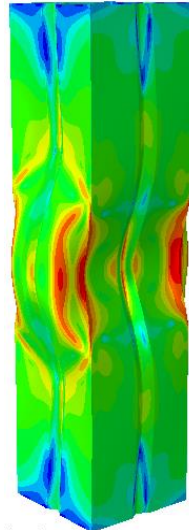
Corr_100_Hp6



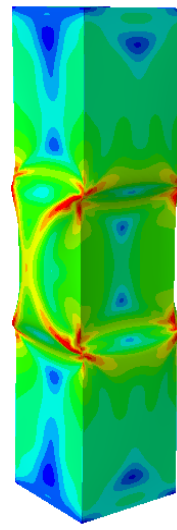
SHS_150



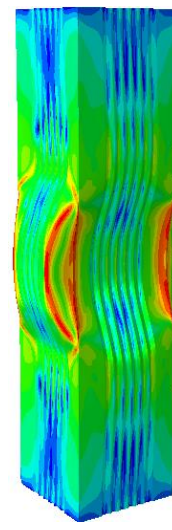
Corr_150_Hp6



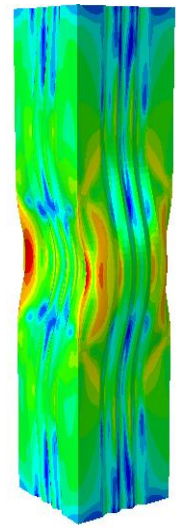
Corr_150_Hp10



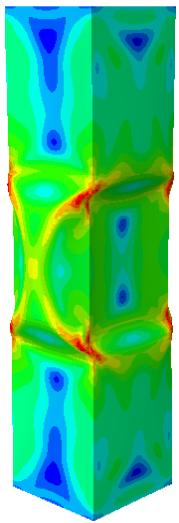
SHS_200



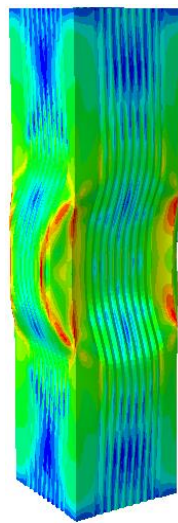
Corr_200_Hp6



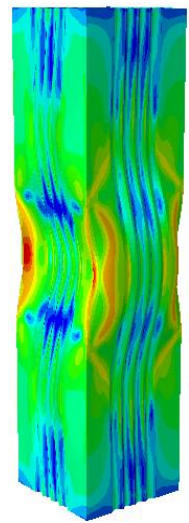
Corr_200_Hp10



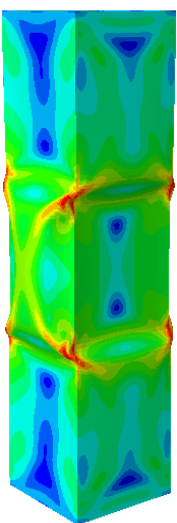
SHS_250



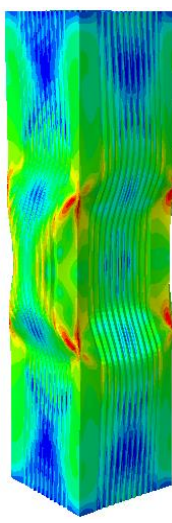
Corr_250_Hp6



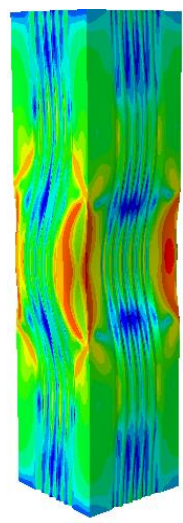
Corr_250_Hp10



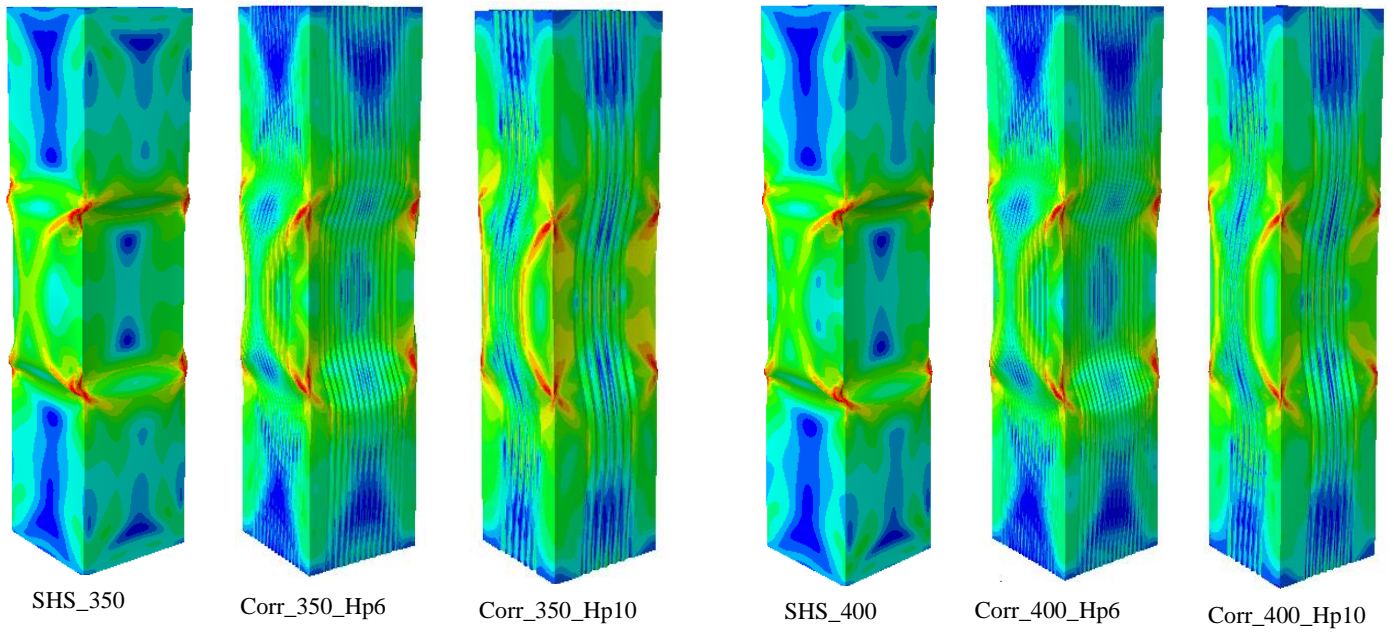
SHS_300



Corr_300_Hp6



Corr_300_Hp10



Σχήμα 17: Μορφές αστοχίας SHS και Corr_Hp6 και Corr_Hp10.

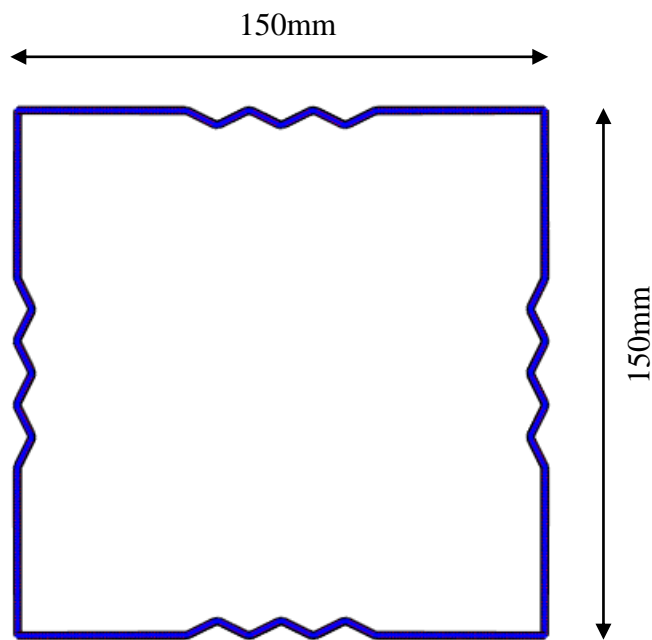
6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκύπτει σαφώς ότι η προσθήκη πτυχώσεων στα υποστυλώματα οδηγεί σε σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε σύγκριση με τα υποστυλώματα που χρησιμοποιούν την παραδοσιακή κοίλη τετραγωνική γεωμετρία. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αύξηση του εμβαδού της διατομής λόγω της προσθήκης πτυχώσεων στο κέντρο κάθε πλάκας παρέμεινε κάτω από το 10%. Αυτό σημαίνει ότι επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της αντοχής χωρίς την ανάγκη για υπερβολική χρήση υλικού, με αποτέλεσμα να προωθείται μια οικονομικότερη και πιο βιώσιμη διαδικασία κατασκευής. Κατά τη σύγκριση των διατομών με διαφορετικό ύψος πτυχώσεων, παρατηρείται σημαντική αύξηση στη φέρουσα ικανότητα των υποστυλωμάτων όταν το ύψος των πτυχώσεων αυξάνεται από 6mm σε 10mm. Παράλληλα, η διαφορά μεταξύ των διατομών παρέμεινε κάτω του 1% (κοινού εμβαδού), μειώνοντας τον αριθμό των πτυχώσεων. Αυτό υποδεικνύει ότι το ύψος των πτυχώσεων προσφέρει επιπλέον ακαμψία στη διατομή και μειώνει την ευαισθησία στην τοπική κάμψη. Μείωση της τοπικής λυγηρότητας της διατομής προσφέρει η χρήση πτυχώσεων έχοντας ως αποτέλεσμα την μειωμένη ευαισθησία σε ατέλειες και την βελτιωμένη ικανότητα μεταφοράς φορτίου.

Σε άρθρο των (Meng, et al., 2023) με στόχο την διερεύνηση της συμπεριφοράς τετραγωνικής κοίλης διατομής SHS 100x100x3.5 έναντι τοπικού λυγισμού από ανθρακούχο χάλυβα και παραγωγής με την μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο, οι αντίστοιχες με την παρούσα μελέτη κανονικοποιημένες παράμετροι απόδοσης μ παρουσιάστηκαν για διάφορες διατάξεις ακαμψίας, αποδεικνύοντας ότι οι κατάλληλα αναλογικές διατάξεις ακαμψίας είχαν θετική επίδραση στην απόδοση της υπό εξέταση συμβατικής κοίλης τετραγωνικής διατομής. Συγκεκριμένα, τα ενισχυτικά γωνίας φαίνεται να επιφέρουν αυξημένη απόδοση σε σύγκριση με τα ενδιάμεσα ενισχυτικά πλακών. Κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προσφέρονται από την προσθήκη πτυχώσεων στην παρούσα μελέτη, η αντίστοιχη περίπτωση της διατομής SHS 100x100 προσφέρει συντελεστή απόδοσης $\mu = 1.54$ και 1.84% αύξηση εμβαδού έναντι συντελεστή απόδοσης $\mu = 2.04$ και 26.5% αύξηση εμβαδού.

7. ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

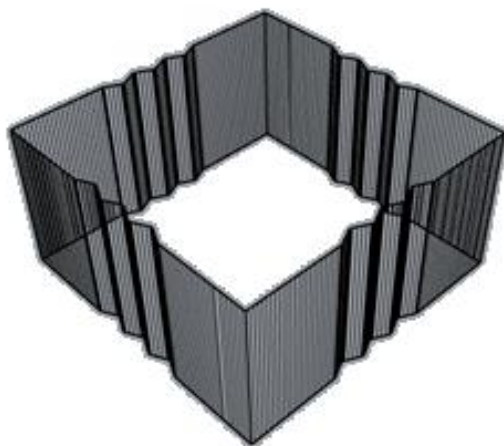
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζετε η διαδικασία και το αποτέλεσμα της εκτύπωσης πρωτότυπης διατομής με την μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. Αρχικά έγινε επιλογή από τις εξεταζόμενες με την προσθήκη πτυχώσεων διατομές η διατομή με γεωμετρία 150 x 150 (Εικόνα 16).



Εικόνα 16 : Υπό εκτύπωση γεωμετρία διατομής 150 x 150.

7.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου

Αρχικά γίνεται εισαγωγή της γεωμετρίας της διατομής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhino. Εκτελώντας την εντολή Extrude η διατομή από διδιάστατη μορφή (2D) μετατρέπεται σε κοίλο τετραγωνικό υποστύλωμα (3D) (Εικόνα 17).



Εικόνα 17: Εισαγωγή γεωμετρίας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhino.

Στην συνέχεια εφαρμόζετε διαχωρισμός του στοιχείου σε λωρίδες (meshing), καθώς απαιτείται για την κατανόηση της γεωμετρίας και τέλος γίνεται export του αρχείου Rhino σε μορφή αρχείου .sdl προκειμένου να εισαχθεί στο πρόγραμμα MetalXL της εταιρείας (MX3D, 2024). Μέσα από το πρόγραμμα αυτό δίνεται η δυνατότητα επιλογής της στρατηγικής εκτύπωσης που θα χρησιμοποιηθεί, καθορίζοντας τους παραμέτρους που απαιτούνται. Οι τιμές των εν λόγω παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση της διατομής αναφέρονται στον Πίνακα 15.

Παράμετρος	Τιμή
Ταχύτητα ρομποτικού βραχίονα (mm/s)	10
Ταχύτητα τροφοδοσίας υλικού (m/min)	2.5
Voltage (V)	15.4
Current (A)	82
Gas flow (l/hr)	16

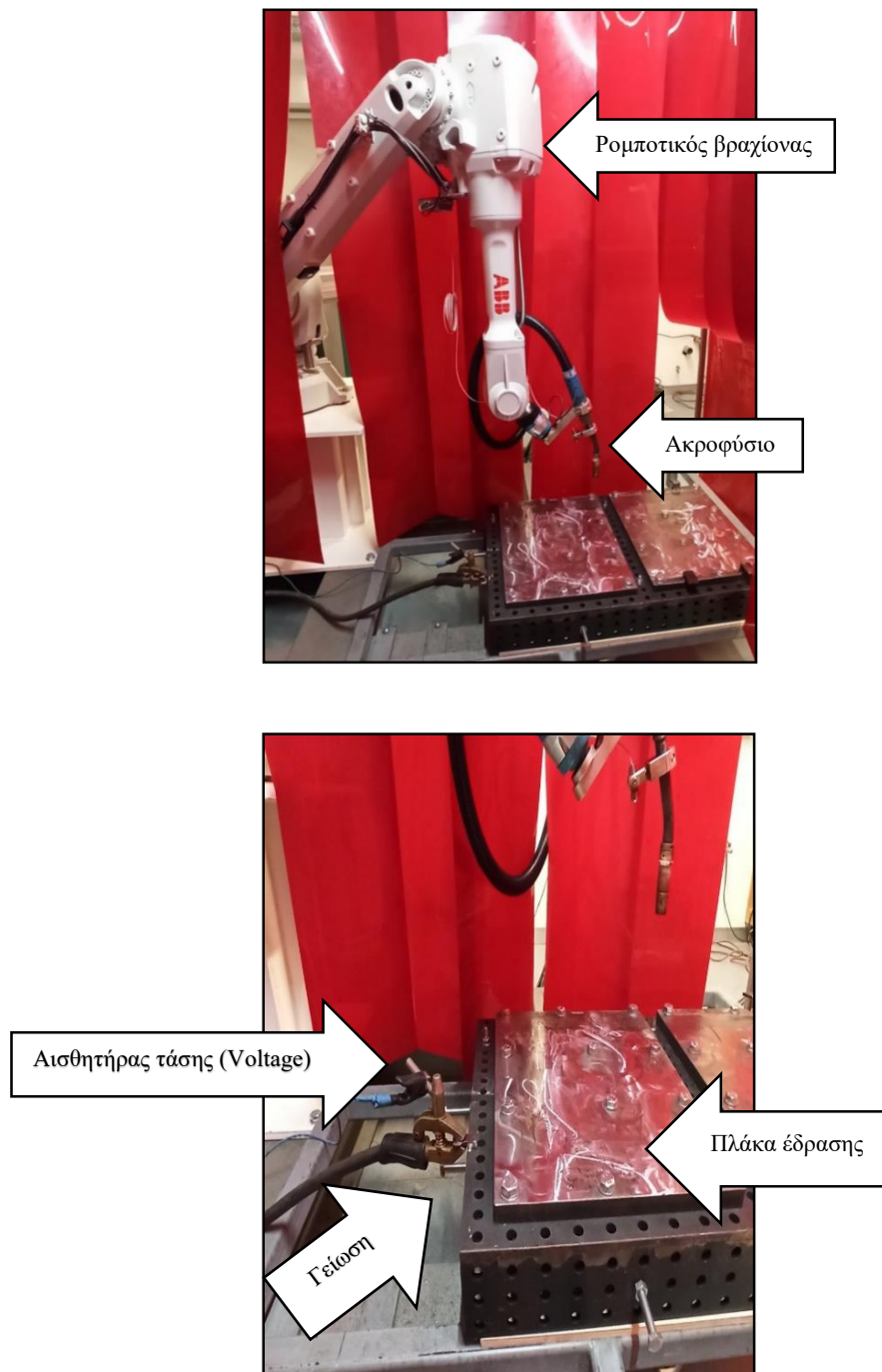
Πίνακας 15: Τιμές απαιτούμενων παραμέτρων εκτύπωσης.

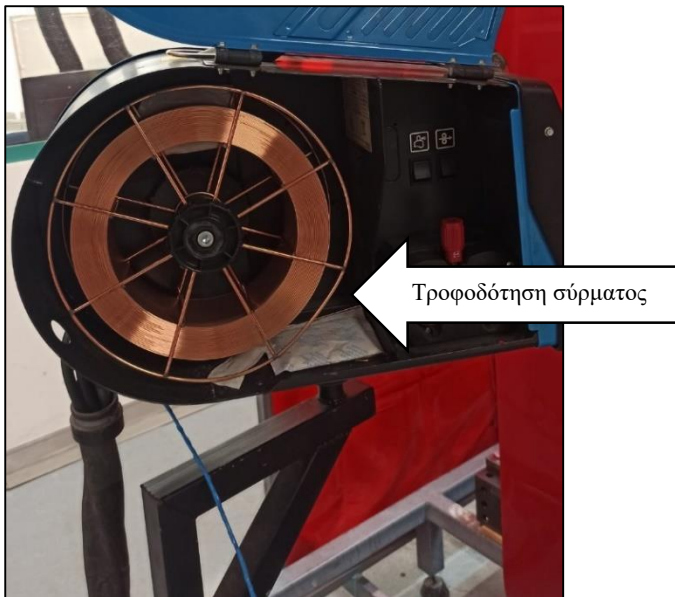
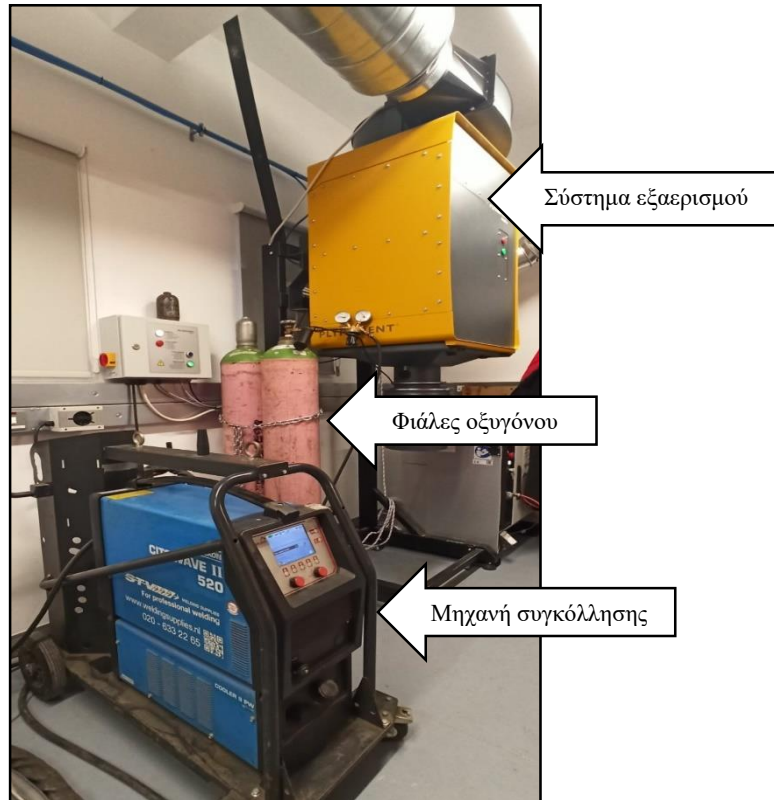
Αμέσως μετά γίνεται ο διαχωρισμός του υποστυλώματος σε layers καθώς και ο ορισμός της διαδρομής που θα ακολουθήσει ο ρομποτικός βραχίονας κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Τέλος μέσα από το πρόγραμμα MetalXL γίνεται εξαγωγή του αρχείου σε μορφή .mod και εισάγεται στο πρόγραμμα Robotstudio, το οποίο με την σειρά του δίνει τις οδηγίες στον ρομποτικό βραχίονα και στην τροφοδοσία του σύρματος για να ξεκινήσει η εκτύπωση. Σημαντικός κατά

τη διάρκεια εκτύπωσης είναι ο έλεγχος των τιμών των παραμέτρων Voltage (V) και Current (A), καθώς επηρεάζουν άμεσα το τελικό αποτέλεσμα.

7.2 Μέλη διαδικασίας εκτύπωσης

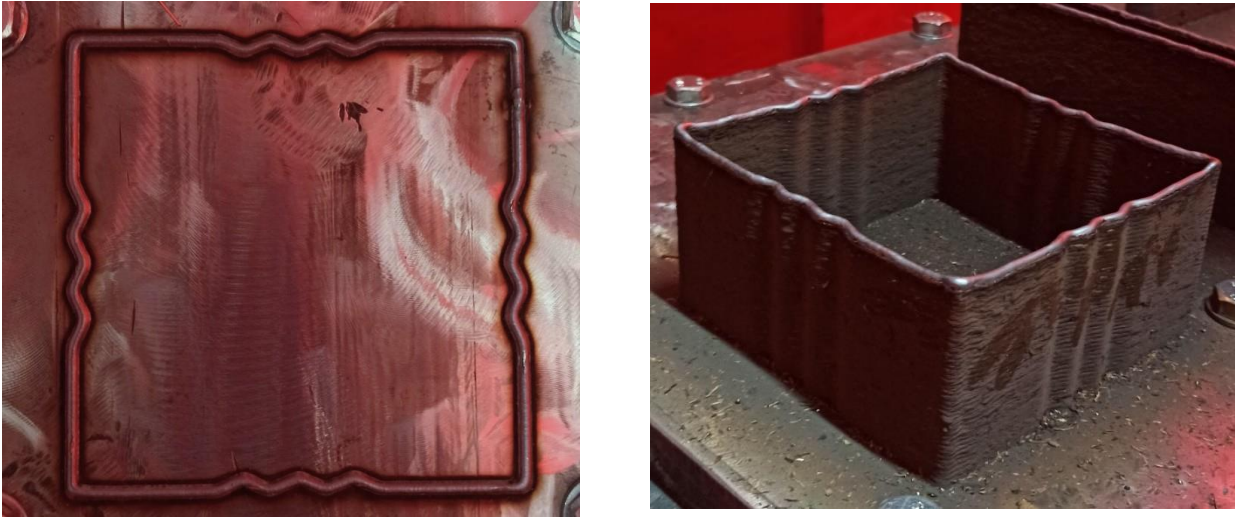
Η διαδικασία Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέλη:





Εικόνα 18: Απαιτούμενα μηχανήματα για την τρισδιάστατη διαδικασία εκτύπωσης.

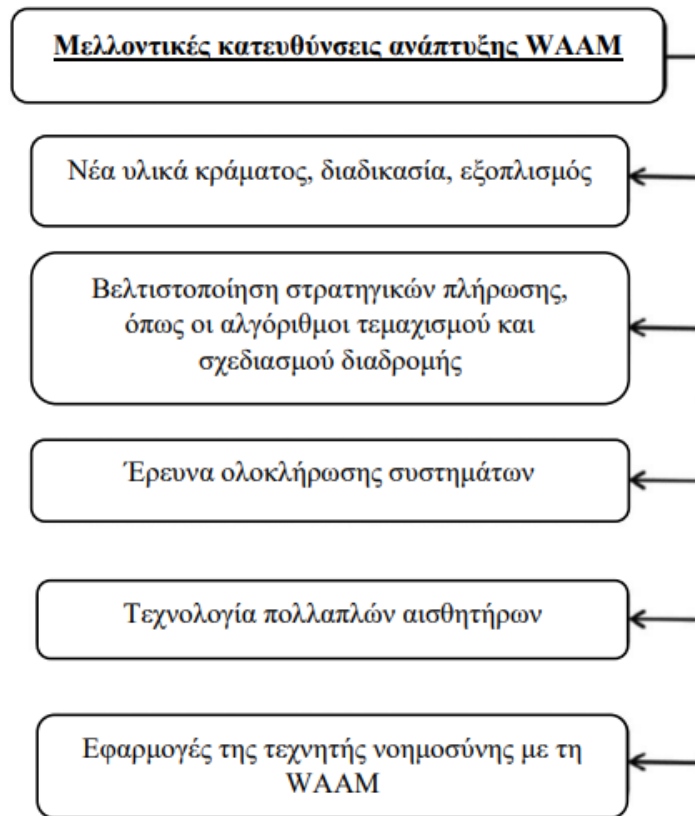
Στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται οι πρώτες στρώσεις του εκτυπωμένου δοκιμίου οι οποίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη γεωμετρία του, στην σταθερότητα αλλά και στην ομαλή διεξαγωγή της κατασκευής. Στη συνέχεια της εκτύπωσης δίνεται ύψος στο τρισδιάστατο εκτυπωμένο δοκίμιο, αποδεικνύοντας τη δυνατότητα υλοποίησης της μη συμβατικής γεωμετρίας και συγκεκριμένα της προσθήκης πτυχώσεων.



Εικόνα 19: Τελική μορφή εκτυπωμένου δοκιμίου.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συνολική ανάλυση αυτής της διατριβής, ο κύριος στόχος ήταν η αύξηση της φέρουσας ικανότητας και η ταυτόχρονη διατήρηση της μεταβολής του εμβαδού διατομής σε χαμηλά επίπεδα κοίλων τετραγωνικών βραχέων υποστυλωμάτων ανοξείδωτου χάλυβα με την μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής Σύρματος και Τόξου. Η προσθήκη πτυχώσεων με στόχο την ενίσχυση των υπό εξέταση υποστυλωμάτων αποδείχθηκε να προσφέρει σημαντικά βελτιωμένη ικανότητα μεταφοράς φορτίου και μειωμένες ευαισθησίες ατελειών, σε σύγκριση με τα γεωμετρικά συμβατικά υποστυλώματα. Η αύξηση της τελικής τάσης οφείλετε κυρίως στην ακαμψία που προσφέρετε από την κυματοποίηση μέρους κεντρικά της κάθε πλευράς της διατομής. Διερευνήθηκε επίσης η επίδραση του αριθμού και μεγέθους των πτυχώσεων στην τελική αντοχή των υποστυλωμάτων. Αυτό το οποίο συμπεραίνεται είναι ότι ο αριθμός των πτυχώσεων δεν είναι η κύρια μεταβλητή ενίσχυσης, αλλά το ύψος των πτυχώσεων όπου επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την αύξηση της αντίστασης έναντι τοπικού λυγισμού. Το ενισχυμένο υποστυλώμα διατομής Corr_350 με ύψος πτυχώσεων $H_p=10\text{mm}$ επέδειξε την υψηλότερη αύξηση ικανότητας μεταφοράς φορτίου της τάξης του 48.73% έναντι 7.18% αύξησης εμβαδού από την αντίστοιχη συμβατική διατομή αποκαλύπτοντας μεγάλες δυνατότητες για δομικές εφαρμογές. Αναμφίβολα μια διαδικασία βελτιστοποίησης σε μεταγενέστερη εργασία θα δώσει τη δυνατότητα καθορισμού των βελτιστοποιημένων παραμέτρων ενίσχυσης της συμβατικής διατομής με τη χρήση πτυχώσεων (Lz_{str} , Lz_{corr} , H_p , L_p , D_p , t_w) οδηγώντας στη βέλτιστη αύξηση της μέγιστης αξονικής αντοχής και της αντίστασης έναντι τοπικού λυγισμού με την ελάχιστη αύξηση του εμβαδού, εξοικονομώντας χρόνο και χρήση υλικών. Επίσης, κατασκευάζοντας τα μοντελοποιημένα προφίλ με την μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής Σύρματος και Τόξου και δοκιμάζοντας τα φυσικά για την επαλήθευση της μεθόδου και των λύσεων βελτιστοποίησης θα δοθεί μια αντιπροσωπευτική εικόνα για τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ενίσχυσης που ακολουθήθηκε. Γενικά, η τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής Σύρματος και Τόξου έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες παρόμοιες αυτής και βρίσκεται ακόμα σε αρχικά στάδια υλοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι οι θεωρητικές και πειραματικές έρευνες πάνω στη τεχνική ολοένα και αυξάνονται με αποτέλεσμα να διευρύνεται το πεδίο εφαρμογών της και να εξελίσσεται συνεχώς. Στην Εικόνα 20 γίνεται μια μελλοντική ανασκόπηση της συγκεκριμένης τεχνικής.



Εικόνα 20: Μελλοντική ανασκόπηση WAAM (Rosli, et al., 2021).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Becque, J., 2008. *The Interaction of Local and Overall Buckling of Cold-Formed Stainless Steel Columns*, Sydney: The University of Sydney.
- Becque, J. & Rasmussen, K. J., 2009. A numerical investigation of local–overall interaction buckling of stainless steel lipped channel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(8-9), pp. 1685-1693.
- Bogue, R., 2013. 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing?. *Assembly Automation*, September, 33(4), pp. 307-311.
- Buchanan, C. & Gardner, L., 2019. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, February, pp. 332-348.
- Combescure, A. & Jullien, J.-F., 2015. ASTER Shell: a simple concept to significantly increase the plastic buckling strength of short cylinders subjected to combined external pressure and axial compression. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, Volume 2.
- Dassault Systèmes, 2016. *ABAQUS/CAE User's Manual*, s.l.: s.n.
- Douglas, T., 2016. Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 85, pp. 1857-1876.
- EN 1993-1-1 , 2005. (English): *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, s.l.: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
- EN 1993-1-5, 2006. (English): *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: General rules - Plated structural elements.*, s.l.: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
- Gao, W. και συν., 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, Τόμος 69, pp. 65-89.
- Gardner, L., 2005. The use of stainless steel in structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), pp. 45-55.
- Gardner, L., Fieber, A. & Macorini, L., 2019. Formulae for Calculating Elastic Local Buckling Stresses of Full Structural Cross-sections. *Structures*, Τόμος 17, pp. 2-20.
- Gardner, L., Kyvelou, P., Herbert, G. & Buchanan, C., 2020. Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, September. Τόμος 172.

Gardner, L. & Nethercot, D., 2004. Numerical Modeling of Stainless Steel Structural Components—A Consistent Approach. *Journal of Structural Engineering*, 130(10).

Ge, J. και συν., 2018. Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties. *Journal of Alloys and Compounds*, Τόμος 748, pp. 911-921.

Gere, J. M. & Goodno, B. J., 2011. *Mechanics of Materials*. Brief ed. s.l.:Global Engineering: Christopher M. Shortt.

Gordon, J. και συν., 2018. Fatigue crack growth anisotropy, texture and residual stress in austenitic steel made by wire and arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, Τόμος 724, pp. 431-438.

Haden, C. και συν., 2017. Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. *Additive Manufacturing*, Τόμος 16, pp. 115-123.

Hadjipantelis, N., Weber, B., Buchanan, C. & Gardner, L., 2022. Description of anisotropic material response of wire and arc additively manufactured thin-walled stainless steel elements. *Thin-Walled Structures*, February. Τόμος 171.

He, A., Sun, Y., Wu, N. & Zhao, O., 2021. Testing, simulation and design of eccentrically loaded austenitic stainless steel CHS stub columns after exposure to elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, Volume 164.

Hill, H. N., 1944. *Determination of stress-strain relations from "Offset" yield stress values*, Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.

Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J. & Donmez, A., 2015. Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* , 137(1).

Ji, L. et al., 2017. *Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc*. Beijing, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing.

Karman, T. v., Edwin, E., Sechler & Donnell, L. H., 1932. *The Strength of Thin Plates in Compression*, New York: The American Society of Mechanical Engineers.

Kumar, N. και συν., 2022. Wire Arc Additive Manufacturing – A revolutionary method in additive manufacturing. *Materials Chemistry and Physics*, 1 June. Τόμος 285.

Kumar, P., Jain, N. K. & Sawant, M. S., 2020. Modeling of dimensions and investigations on geometrical deviations of metallic components manufactured by μ -plasma transferred arc additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 107, pp. 3155-3168.

Kyvelou, P., Buchanan, C. & Gardner, L., 2022. Numerical simulation and evaluation of the world's first metal additively manufactured bridge. *Structures*, Τόμος 42, pp. 405-416.

Kyvelou, P., Huang, C., Gardner, L. & Buchanan, C., 2021. Structural Testing and Design of Wire Arc Additively Manufactured Square Hollow Sections. *Journal of Structural Engineering*, 147(12).

Kyvelou, P. et al., 2020. Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material. *Materials & Design*, Volume 192.

Laghi, V. et al., 2019. Geometrical Characterization of Wire-and-Arc Additive Manufactured Steel Elements. *Advanced Materials Letters*, 10(10), pp. 659-699.

Laghi, V. και συν., 2020. Experimental results for structural design of Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, Τόμος 167.

Laghi, V. και συν., 2021. On the influence of the geometrical irregularities in the mechanical response of Wire-and-Arc Additively Manufactured planar elements. *Journal of Constructional Steel Research*, Τόμος 178.

Li, Z. & Schafer, B. W., 2010. *Buckling Analysis of Cold-formed Steel Members with General Boundary Conditions Using CUFEM Conventional and Constrained Finite Strip Methods*. St. Louis Missouri, Missouri University of Science and Technology.

Lundquist, E. E., 1939. *Local instability of centrally loaded columns of channel section and Z-section*, Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.

Lundquist, E. E., 1939. *Local Instability of Symmetrical Rectangular tubes under Axial Compression*, Washington: National Advisory committee for Aeronautics.

Matlab Mathwork R2018b, 2022. s.l.: s.n.

McAndrew, A. R. et al., 2018. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, Volume 21, pp. 340-349.

Meng, X. & Gardner, L., 2020. Behavior and Design of Normal- and High-Strength Steel SHS and RHS Columns. *Journal of Structural Engineering*, 146(11).

Meng, X. & Gardner, L., 2020. Simulation and design of semi-compact elliptical hollow sections. *Engineering Structures*, Volume 202.

Meng, X., Gardner, L., Sadowski, A. J. & Rotter, J. M., 2020. Elasto-plastic behaviour and design of semi-compact circular hollow sections. *Thin-Walled Structures*, Τόμος 148.

Meng, X. & Leroy, G., 2020. Testing of hot-finished high strength steel SHS and RHS under combined compression and bending. *Thin-Walled Structures*, Volume 148.

Meng, X., Weber, B., Nitawaki, M. & Gardner, L., 2023. Optimisation and testing of wire arc additively manufactured steel stub columns. *Thin-Walled Structures*, Volume 189.

MX3D, n.d. *Robot arm*, s.l.: s.n.

Ning, X. & Pellegrino, S., 2017. Experiments on imperfection insensitive axially loaded cylindrical shells. *International Journal of Solids and Structures*, Τόμος 115-116, pp. 73-86.

Ramberg, W. & Osgood, W. R., 1943. *Description of Stress-strain curves by three parameters*, Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.

Reitinger, R., Bletzinger, K. U. & Ramm, E., 1994. Shape optimization of buckling sensitive structures. *Computing Systems in Engineering*, 5(1), pp. 65-75.

Reitinger, R. & Ramm, E., 1995. Buckling and imperfection sensitivity in the optimization of shell structures. *Thin-Walled Structures*, 23(1-4), pp. 159-177.

Rosli, N. A. et al., 2021. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 11, pp. 2127-2145.

Schafer, B. & Peköz, T., 1998. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, 47(3), pp. 193-210.

Srivastava, M. & Rathee, S., 2022. Additive manufacturing: recent trends, applications and future outlooks. *Progress in Additive Manufacturing*, Τόμος 7, pp. 261-287.

Srivastava, M., Rathee, S., Maheshwari, S. & Kundra, T., 2019. *Additive Manufacturing: Fundamentals and Advancements*. s.l.:CRC Press.

Theofanous, M. & Gardner, L., 2009. Testing and numerical modelling of lean duplex stainless steel hollow section columns. *Engineering Structures*, 31(12), pp. 3047-3058.

Yang, Z., Meng, X., Walport, F. & Gardner, L., 2024. Flexural capacity and local buckling half-wavelength of high strength steel tubular beams under moment gradients: An experimental study. *Thin-Walled Structures*, Τόμος 195.

Yun, X. & Gardner, L., 2018. Numerical modelling and design of hot-rolled and cold-formed steel continuous beams with tubular cross-sections. *Thin-Walled Structures*, Volume 132, pp. 574-584.

Zhang, R., Meng, X. & Gardner, L., 2022. Shape optimisation of stainless steel corrugated cylindrical shells for additive manufacturing. *Engineering Structures*, Volume 270.

Μπανιωτόπουλος, Χ. Κ., 2017. Τοπικός, Στρεπτικός και Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός. Στο: *Κατασκευές από Χάλυβα*. 2 επιμ. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ, p. 225.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

θ ($^{\circ}$)	E (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{1.0}$ (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (-)	n (-)	m _{1.0} (-)	m _u (-)
0	143,300	356	382	575	0.307	15.8	1.7	2.40
45	219,500	406	437	626	0.364	13.6	2.0	2.36
90	139,600	338	381	554	0.297	6.8	2.3	2.68

Πίνακας 16: Summary of the average machined properties of the stub columns specimens (Kyvelou et al., 2020).

t _{nom} (mm)	θ ($^{\circ}$)	E _{eff} (MPa)	$\sigma_{0.2, eff}$ (MPa)	$\sigma_{1.0, eff}$ (MPa)	$\sigma_{u, eff}$ (MPa)	$\epsilon_{u, eff}$ (-)	n _{eff} (-)	m _{1.0, eff} (m)	m _{u, eff} (-)
3.5	0	135,9	333	362	553	0.273	15.5	1.8	2.2
	45	192,6	344	391	570	0.255	9.4	2.4	2.3
	90	90,2	261	319	448	0.119	6.5	2.5	2.6
8	0	137,1	325	349	535	0.325	22.9	1.8	2.4
	45	201,2	351	391	559	0.255	11.5	2.3	2.3
	90	109,1	271	326	423	0.103	5.5	2.6	2.5

Πίνακας 17: Average effective material properties of as-built coupons (Kyvelou et al., 2020).

Specimen ID	Hh (mm)	R (mm)	r (mm)	Lh (mm)	t _{avg} (mm ²)	A (mm)	e _{max} (mm)
60×60×3.5-240-F	60.0	7.15	4.48	240.1	4.11	914.8	1.41
60×60×3.5-240-FR	60.0	7.19	4.76	240.3	3.85	843.6	1.39
80×80×3.5-320-F	79.9	7.11	4.46	320.4	4.05	1227.4	1.65
80×80×3.5-320-FR	80.0	7.15	4.49	320.0	3.91	1182.2	2.05
100×100×3.5-400-F	100.0	6.54	4.32	400.4	3.99	1496.7	0.89
100×100×3.5-400-FR	99.9	6.79	4.29	309.3	3.99	1520.2	0.72

120×120×8.0-450-F	118.0	8.11	5.6	475.4	6.53	2894.2	1.78
120×120×8.0-450-FR	117.1	8.09	5.28	450.9	6.27	2709.9	2.69
130×130×3.5-500-F	129.0	7.35	4.92	501.6	3.62	1848.8	1.53
130×130×3.5-500-FR	128.8	7.73	4.96	487.5	3.64	1824.2	1.41
150×150×3.5-600-F	149.8	6.67	4.37	600.0	4.05	2324.1	1.14
150×150×3.5-600-FR	149.7	7.11	4.22	599.5	4.00	2327.1	0.71
180×180×3.5-720-F	179.5	6.73	4.45	720.0	4.05	2832.3	1.13
180×180×3.5-720-FR	179.0	6.87	4.65	720.3	4.06	2874.1	3.8

Πίνακας 18: Summary of the average geometric properties of the stub columns specimens (Kyvelou et al., submitted).