



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



---

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ:  
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ  
ΑΠΛΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

---

Μεταπτυχιακή Εργασία  
**Χριστίνας Παπαδημητρίου**

EMK ME 2023 11

Επιβλέπων: Χαράλαμπος Γαντές Καθηγητής  
Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Παναγιωτόπουλος ΥΔ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



---

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ:  
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ  
ΑΠΛΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

---

Μεταπτυχιακή Εργασία  
**Χριστίνας Παπαδημητρίου**

EMK ME 2023 11

Επιβλέπων: Χαράλαμπος Γαντές Καθηγητής  
Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Παναγιωτόπουλος ΥΔ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



Copyright © Χριστίνα Παπαδημητρίου, 2023  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Christina Papadimitriou, 2023  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this master thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this master thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Χριστίνα Παπαδημητρίου (2023)  
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ: ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ  
ΑΠΛΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ  
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2023 11  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Christina Papadimitriou (2023)  
3D PRINTED STEEL: MECHANICAL PROPERTIES AND RESPONSE  
OF SIMPLE STRUCTURAL COMPONENTS  
Master Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2023 11  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

The research was supported by the Hellenic Foundation for Research and Innovation (H.F.R.I.) under the "2nd Call for H.F.R.I. Research Projects to support Faculty Members and Researchers," AMOSS project: "Additively Manufactured Optimized 3D Printed Steel Structures," (Project Number: 02779).





## Ευχαριστίες

Με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο ΔΠΜΣ Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πριν από την ανάπτυξη του θέματος επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κο Χαράλαμπο Γαντέ για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη έρευνα και φυσικά για την πολύτιμη καθοδήγησή του και το αμείωτο ενδιαφέρον του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον συνεπιβλέποντα υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Παναγιωτόπουλο, που με τις εξειδικευμένες γνώσεις του στο αντικείμενο και τη συνεχή του στήριξη συνέβαλε στην προσπάθεια αυτή.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον κο Νικόλαο Χατζηπαντελή, λέκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Επιθυμώ ακόμη να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της μεταπτυχιακής εργασίας, στους καθηγητές κο Νικόλαο Λαγαρό και κο Σάββα Τριανταφύλλου.

Όσον αφορά στις σπουδές μου στο ΔΠΜΣ, αναγνωρίζω τον σημαντικό ρόλο που συνετέλεσε προσφέροντάς μου μέσα σε αυτά τα δύο χρόνια πιο σφαιρική και ολοκληρωμένη γνώση ως στατικό μηχανικό. Ευχαριστώ λοιπόν όλους τους καθηγητές για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν με τόσο ενδιαφέρον μέσα από τα μαθήματά τους καθ' όλη τη διάρκεια.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που συμβάλλουν με τη συνεχή τους στήριξη στην εκπλήρωση των στόχων μου και αισθάνομαι τυχερή που τους έχω συνοδοιπόρους.



Αφιερώνεται στην οικογένειά μου





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΜΕ 2023 11

**Τρισδιάστατα εκτυπωμένος χάλυβας:  
Μηχανικές ιδιότητες και απόκριση απλών δομικών στοιχείων**

**Χριστίνα Παπαδημητρίου**

Επιβλέπων: Χαράλαμπος Γαντές Καθηγητής

Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Παναγιωτόπουλος ΥΔ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποκτάει γρήγορα αποδοχή και στον κατασκευαστικό τομέα, με το σκυρόδεμα να εφαρμόζεται ήδη σε μεγάλη κλίμακα και τις κατασκευές από χάλυβα να κάνουν την εμφάνισή τους. Αποτελεσματικότερη μέθοδος για την τρισδιάστατη εκτύπωση δομικών στοιχείων χάλυβα είναι η Προσθετική Κατασκευή με Σύρμα και Τόξο. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την κατασκευή δομικών στοιχείων προσφέροντας ευελιξία εφαρμογής πολύπλοκης γεωμετρίας, ακόμη και σε στοιχεία που προκύπτουν από βελτιστοποίηση, είτε για λόγους στατικής αποτελεσματικότητας, είτε για αρχιτεκτονικούς λόγους. Επιπρόσθετα, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται και για επιδιορθώσεις βλαβών σε δομικά στοιχεία. Σημαντική είναι η δυνατότητα που παρέχει και για την παραγωγή φορέων μεγάλης κλίμακας είτε αυτοί εκτυπώνονται απευθείας στο σύνολό τους είτε προέρχονται από μεμονωμένα εκτυπωμένα τμήματα. Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση της Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο οφείλεται στα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει έναντι του συμβατικού τρόπου παραγωγής μεταλλικών φορέων, αλλά και των άλλων τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης με πρώτη ύλη το μέταλλο. Μεταξύ άλλων παρέχει υψηλή ταχύτητα και χαμηλό κόστος κατασκευής, αποδοτικότητα εκτύπωσης και δυνατότητα χρήσης πλήθους κραμάτων από τα οποία μπορούν να προκύψουν στοιχεία με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Δεδομένου ότι οι μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά του εκτυπωμένου δομικού στοιχείου εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, κρίνεται σκόπιμη η περεταίρω διερεύνησή τους με σκοπό να καταστεί στο μέλλον εφικτή η πρόβλεψή τους στο στάδιο του σχεδιασμού της εκτύπωσης. Αντικείμενο της μελέτης αποτέλεσε η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της της απόκρισης απλών τρισδιάστατα εκτυπωμένων δομικών στοιχείων χάλυβα με τη χρήση της Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε υλικό ανοξειδωτού ωστενιτικού χάλυβα για στοιχεία δοκών υπό κάμψη και υποστυλωμάτων υπό θλίψη τα οποία συγκρίθηκαν με συμβατικό χάλυβα για αντίστοιχους φορείς. Με τις αναλύσεις των δοκών στόχος ήταν η μελέτη της απόκρισης των στοιχείων σε κάμψη θεωρώντας πλευρική εξασφάλιση και λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού. Για τα στοιχεία στύλων υπό θλίψη λήφθηκε υπόψη η μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας σε τέλειους φορείς και σε φορείς με ατέλεια, ενώ εξετάστηκε η

επιρροή διαφορετικών υψών. Βασικό αντικείμενο διερεύνησης αποτέλεσε και η διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού στα δομικά στοιχεία για γωνίες εναπόθεσης με τον διαμήκη άξονα των στοιχείων ίσες με  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=90^\circ$ . Σύμφωνα με την αναλυτική διερεύνηση η επιρροή της ανισοτροπίας των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού είναι εμφανής στην απόκριση των στοιχείων, με αυτήν να προκύπτει καλύτερη για γωνία εναπόθεσης υλικού  $\theta=45^\circ$ , έπειτα για  $\theta=0^\circ$  και τέλος για  $\theta=90^\circ$ . Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο η μη γραμμικότητα του υλικού τα στοιχεία τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα εμφανίζουν μεγαλύτερες αντοχές για τα υλικά που επιλέχθηκαν, ενώ για μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας σε φορείς με ατέλεια καλύτερη συμπεριφορά έχουν τα στοιχεία συμβατικού χάλυβα, χωρίς όμως η διαφορά να είναι μεγάλη.

**Λέξεις κλειδιά:** προσθετική κατασκευή με σύρμα και τόξο, τρισδιάστατη εκτύπωση, ανοξειδωτος χάλυβας, μηχανικές ιδιότητες, απόκριση, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, εφαρμογές πολιτικού μηχανικού



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



MASTER THESIS  
EMK ME 2023 11

## **3D printed steel: Mechanical properties and response of simple structural components**

**Christina Papadimitriou**

Supervisor: Charalambos Gantes Professor  
Co-supervisor: Vasilios Panagiotopoulos PhD(c)

### **ABSTRACT**

3D printing is rapidly gaining acceptance from the construction sector, with concrete already being applied on a large scale and steel structures starting to appear. The most efficient method for 3D printing steel structural components is Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). This technology is used for the construction of structural components with the flexibility to apply complex geometry, even for components resulting from optimization procedure, either for reasons of static efficiency or for architectural reasons. In addition, this method is also applied for damage repair of structural components. The possibility that it provides to produce large-scale structures, whether they are directly printed entirely or printed as individual parts and then combined, is significant. The increasing use of Wire Arc Additive Manufacturing happens due to the significant advantages that this technology offers over the conventional way of producing metal components, but also compared to the other 3D printing techniques with metal used as feedstock. Among others, it provides high speed and low manufacturing costs, printing efficiency and the possibility of using a multitude of alloys from which components with improved mechanical properties can be obtained. Given that the mechanical properties and the behavior of the printed structural component depend on many factors, further investigation of them is considered appropriate to make their prediction at the printing design stage possible. The object of the study was to investigate the mechanical properties and the response of simple 3D printed structural components made of steel using WAAM. Specifically, stainless austenitic steel material was selected for beams under bending and columns under compression which were compared with conventional steel for same components. The aim of the beams' analyses was to study the response of the bending components when they are laterally restrained and material non-linearity is considered. For columns subjected to axial compression, material and geometry non-linearity, in perfect components and columns with imperfection, were considered in cases of different heights. The main objective was the investigation of the material deposition direction in the structural components for deposition angles with the longitudinal axis of the components equal to  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$ . According to the analytical investigation, the influence of the anisotropy of the mechanical properties of the material is evident in the

response of the components. The components response is better for material deposition angle equal to  $45^\circ$ , then for  $0^\circ$  and then for  $90^\circ$ . In addition, in the case that only the non-linearity of the material is considered, the components of 3D printed steel show greater strength for the materials chosen, while for non-linearity of material and geometry in components with imperfection, conventional steel appears better response, but with the difference being small.

**Keywords:** wire arc additive manufacturing, 3D printing, stainless steel, mechanical properties, response, finite elements analysis, civil engineering applications



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1	Τρισδιάστατη εκτύπωση και τεχνικές .....	1
1.2	Αντικείμενο – στόχοι .....	2
1.3	Δομή και οργάνωση.....	3
<b>2</b>	<b>ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΡΜΑ ΚΑΙ ΤΟΞΟ.....</b>	<b>5</b>
2.1	Ορισμός.....	5
2.2	Ιστορική αναδρομή .....	5
2.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνολογίας WAAM .....	7
2.4	Εφαρμογές στον τομέα των κατασκευών .....	11
2.5	Βήματα κατασκευής φορέα .....	12
2.6	Υλικά ως πρώτη ύλη.....	14
2.7	Τύποι συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου .....	15
2.8	Έλεγχος γεωμετρίας - πορεία εκτύπωσης .....	17
2.9	Παράμετροι εκτύπωσης και επιρροή στον παραγόμενο φορέα .....	18
<b>3</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΜΦΙΕΡΙΣΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΥΠΟ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....</b>	<b>21</b>
3.1	Γενική περιγραφή.....	21
3.2	Αναλύσεις δοκών συμβατικού χάλυβα με επιρροή μη γραμμικότητας υλικού.....	24
3.3	Αναλύσεις δοκών τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα με επιρροή μη γραμμικότητας υλικού	24
3.4	Αποτελέσματα αναλύσεων δοκών .....	30
<b>4</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΜΦΙΕΡΙΣΤΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.....</b>	<b>35</b>
4.1	Γενική περιγραφή.....	35
4.2	Αναλύσεις στύλων συμβατικού χάλυβα με επιρροή μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας .....	41
4.3	Αναλύσεις στύλων τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα με επιρροή μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας.....	41
4.4	Αποτελέσματα αναλύσεων στύλων .....	44
4.4.1	Σύγκριση αναλύσεων στύλων συμβατικού χάλυβα με πεπερασμένα στοιχεία όγκου και κελύφους .....	44
4.4.2	Σύγκριση αναλύσεων στύλων τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα .....	49
4.4.3	Σύγκριση αναλύσεων στύλων συμβατικού χάλυβα και τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα .....	53
<b>5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ .....</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>59</b>

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΥΠΟ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ  
ΦΟΡΤΙΣΗ..... 63**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ..... 65**

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ταυτόχρονου φινιρίσματος κατά την κατασκευή στοιχείου με τη μέθοδο WAAM [2].....	6
Σχήμα 2-2: Παραδείγματα στοιχείων κατασκευασμένων με την μέθοδο WAAM που προέκυψαν από βελτιστοποίηση (α) στοιχείο δικτυώματος [13], (β) στοιχείο συνδέσμου Takenaka conector (MX3D) [15], (γ) αντικατάσταση στοιχείου ρομποτικού βραχίονα με φορέα από διαδικασία βελτιστοποίησης [15] .....	8
Σχήμα 2-3: Προϊόν χάλυβα SS400, κατασκευασμένο με τη μέθοδο WAAM, πριν και μετά την επεξεργασία φινιρίσματος [8] .....	10
Σχήμα 2-4: Εφαρμογές της τεχνολογίας WAAM στις κατασκευές (α) MX3D εκτυπωτής με ρομποτικό βραχίονα, (β) MX3D πεζογέφυρα ανοίγματος 12 m, Άμστερνταμ, 2021, (γ) στύλος κατασκευασμένος με τη μέθοδο WAAM από το Πανεπιστήμιο της Μπολόνια [22] .	12
Σχήμα 2-5: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας WAAM [8] .....	13
Σχήμα 2-6: Σύστημα εκτύπωσης WAAM με ρομποτικό βραχίονα (MX3D) [15] .....	14
Σχήμα 2-7: Τύποι συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου (α) GMAW, (β) GTAW, (γ) PAW [8]...	17
Σχήμα 2-8: (α) Τυπική πορεία εκτύπωσης με χρήση συστήματος κίνησης 5 αξόνων, (β) Χωρισμός εκτύπωσης σε τμήματα , (γ) Πορείες εκτύπωσης για στοιχεία μεγαλύτερου πάχους [3].....	18
Σχήμα 3-1: Χαρακτηριστικά διατομής IPE200 [29] .....	22
Σχήμα 3-2: Στοιχείο δοκού: (α) ορισμός επιπέδους κελύφους, (β) διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4R .....	22
Σχήμα 3-3: Ορισμός άκαμπτου σώματος στις διατομές των άκρων της δοκού .....	23
Σχήμα 3-4: Ορισμός δεσμεύσεων μετακινήσεων και στροφών (α) στην αρχή (άρθρωση) και (β) στο πέρας (κύλιση) της δοκού .....	23
Σχήμα 3-5: Ομοιόμορφα κατανεμημένη καμπτική φόρτιση της δοκού.....	23
Σχήμα 3-6: Διγραμμική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων συμβατικού χάλυβα S355..	24
Σχήμα 3-7: Προσανατολισμός τοπικών αξόνων στους οποίους ορίζεται το υλικό σε σχέση με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου .....	26
Σχήμα 3-8: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου $t=5.6$ mm έως παραμόρφωση ίση με 0.015 .....	28
Σχήμα 3-9: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου $t=8$ mm έως παραμόρφωση ίση με 0.015.....	29
Σχήμα 3-10: Διευθύνσεις εναπόθεσης του υλικού στον κορμό (W0 για $\theta=0^\circ$ , W45 για $\theta=45^\circ$ , W90 για $\theta=90^\circ$ ) και στα πέλματα (F0 για $\theta=0^\circ$ , F45 για $\theta=45^\circ$ , F90 για $\theta=90^\circ$ ) των δοκών .....	30
Σχήμα 3-11: Διαγράμματα ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο των δοκών μήκους $L=8$ m για υλικό συμβατικού χάλυβα S355 και τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα 308LSi .....	31
Σχήμα 3-12: Φθίνουσα σειρά δοκών με βάση την καμπτική τους αντοχή .....	31

Σχήμα 3-13: Διαγράμματα ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο των δοκών μήκους $L=8$ m για υλικό συμβατικού χάλυβα S355 και τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα 308LSi με σταθερή γωνία εναπόθεσης υλικού κορμού (α) $\theta=0^\circ$ , (β) $\theta=45^\circ$ και (γ) $\theta=90^\circ$ .....	33
Σχήμα 3-14: Διαγράμματα ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο των δοκών μήκους $L=8$ m για υλικό συμβατικού χάλυβα S355 και τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα 308LSi με σταθερή γωνία εναπόθεσης υλικού πελμάτων (α) $\theta=0^\circ$ , (β) $\theta=45^\circ$ και (γ) $\theta=90^\circ$ .....	34
Σχήμα 4-1: Χαρακτηριστικά διατομής CHS101.6x4 [29] .....	36
Σχήμα 4-2: Στοιχείο στύλου: (α) διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία όγκου C3D8R, (β) ορισμός επιπέδους κελύφους, (γ) διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4R .....	39
Σχήμα 4-3: Ορισμός άκαμπτου σώματος στις διατομές των άκρων του στύλου .....	39
Σχήμα 4-4: Ορισμός δεσμεύσεων μετακινήσεων και στροφών (α) στο κάτω άκρο (άρθρωση) και (β) στο άνω άκρο (κύλιση) του στύλου .....	40
Σχήμα 4-5: Αξονικό θλιπτικό φορτίο στην κορυφή του στύλου.....	40
Σχήμα 4-6: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου $t=4$ mm έως παραμόρφωση ίση με 0.015.....	43
Σχήμα 4-7: Διευθύνσεις εναπόθεσης του υλικού στους στύλους (0 για $\theta=0^\circ$ , 45 για $\theta=45^\circ$ , 90 για $\theta=90^\circ$ ) .....	44
Σχήμα 4-8: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη (α) $H=8$ m, (β) $H=5$ m και (γ) $H=2$ m.....	46
Σχήμα 4-9: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη (α) $H=8$ m, (β) $H=5$ m και (γ) $H=2$ m .....	47
Σχήμα 4-10: Διαγράμματα (α) αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής και (β) αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων όγκου και κελύφους συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη $H=8$ m, $H=5$ m και $H=2$ m (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια) .....	49
Σχήμα 4-11: Διαγράμματα (α) αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής και (β) αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο στύλων υλικού χάλυβα 308LSi και ύψους για διαφορετικά μεγέθη ατελειών (γωνία εναπόθεσης υλικού $\theta=45^\circ$ ).....	50
Σχήμα 4-12: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα 308LSi και ύψη (α) $H=8$ m, (β) $H=5$ m και (γ) $H=2$ m .....	52
Σχήμα 4-13: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα S355 και 308LSi για ύψη (α) $H=8$ m, (β) $H=5$ m και (γ) $H=2$ m (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού) .....	54

Σχήμα 4-14: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα S355 και 308LSi για ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια).....55

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1: Χημική σύσταση σύρματος ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα 308LSi (τιμές %), σύμφωνα με τον κατασκευαστή [31] .....	25
Πίνακας 3-2: Μηχανικές ιδιότητες σύρματος ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα 308LSi (τιμές %), σύμφωνα με τον κατασκευαστή [31] .....	25
Πίνακας 3-3: Παράμετροι περιγραφής ελαστικής και ανελαστικής απόκρισης ανισότροπου υλικού για στοιχεία κατασκευασμένα με την τεχνολογία WAAM χωρίς επεξεργασία φινιρίσματος με διεύθυνση αναφοράς τη διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού [14] .....	25
Πίνακας 3-4: Παράμετροι Ramberg - Osgood για στοιχεία κατασκευασμένα με την τεχνολογία WAAM χωρίς επεξεργασία φινιρίσματος με διεύθυνση αναφοράς τη διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού [14] .....	25
Πίνακας 3-5: Πίνακας τιμών ελαστικής απόκρισης ορθότροπου υλικού 308LSi για την προσομοίωση δοκών στο πρόγραμμα ABAQUS .....	26
Πίνακας 3-6: Πίνακας παραμέτρων Ramberg – Osgood υλικού 308LSi για την προσομοίωση δοκών στο πρόγραμμα ABAQUS .....	27
Πίνακας 3-7: Πίνακας τιμών πλαστικής απόκρισης ορθότροπου υλικού 308LSi για την προσομοίωση δοκών στο πρόγραμμα ABAQUS .....	29
Πίνακας 3-8: Πίνακας συνδυασμών διευθύνσεων υλικού κορμού και πελμάτων των δοκών .....	29
Πίνακας 3-9: Πίνακας αναλύσεων αμφιέριστων δοκών υπό ομοιόμορφη καμπτική φόρτιση .....	30
Πίνακας 4-1: Πίνακας αναλύσεων αμφιέριστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο .....	36
Πίνακας 4-2: Πίνακας τιμών ελαστικής απόκρισης ορθότροπου υλικού 308LSi για την προσομοίωση στύλων στο πρόγραμμα ABAQUS .....	41
Πίνακας 4-3: Πίνακας παραμέτρων Ramberg – Osgood υλικού 308LSi για την προσομοίωση στύλων στο πρόγραμμα ABAQUS .....	42
Πίνακας 4-4: Πίνακας τιμών πλαστικής απόκρισης ορθότροπου υλικού 308LSi για την προσομοίωση στύλων στο πρόγραμμα ABAQUS .....	43
Πίνακας 4-5: Πίνακας αναλύσεων αμφιέριστων στύλων πεπερασμένων στοιχείων κελύφους υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα S355 .....	45
Πίνακας 4-6: Πίνακας ελαστικών φορτίων λυγισμού αμφιέριστων στύλων πεπερασμένων στοιχείων όγκου και κελύφους υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα S355 .....	45
Πίνακας 4-7: Πίνακας αναλύσεων αμφιέριστων στύλων πεπερασμένων στοιχείων όγκου και κελύφους υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα S355 (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια) .....	48
Πίνακας 4-8: Πίνακας αναλύσεων αμφιέριστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα 308LSi για διαφορετικά μεγέθη ατελειών .....	50
Πίνακας 4-9: Πίνακας αναλύσεων αμφιέριστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα S355 και 308LSi (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια) .....	51

Πίνακας 4-10: Πίνακας ελαστικών φορτίων λυγισμού αμφιέριστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα 308LSi .....51

## ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ ΟΡΩΝ

Τρισδιάστατη Εκτύπωση	3D Printing
Προσθετική Κατασκευή - ΠΚ	Additive Manufacturing - AM
Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών	American Society for Testing and Materials - ASTM
Φωτοπολυμερισμός σε κάδο	Vat Photopolymerization
Ψεκασμός Υλικού	Material Jetting
Ψεκασμός Συγκολλητικής Ουσίας	Binder Jetting
Εξώθηση Υλικού	Material Extrusion
Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη	Powder Bed Fusion
Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων	Sheet Lamination
Κατευθυνόμενη Ενεργειακή Εναπόθεση	Directed Energy Deposition
Προσθετική Κατασκευή με Σύρμα και Τόξο	Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM
Υλικά Διαβαθμισμένων Ιδιοτήτων	Functionally Graded Materials - FGM
Σύστημα ελέγχου ψηφιακά ελεγχόμενο από υπολογιστή	Computer Numerical Controlled - CNC
Ηλεκτρικό τόξο αναλισκόμενου ηλεκτροδίου	Gas Metal Arc Welding – GMAW
Μεταλλικό αδρανές αέριο	Metal Inert Gas - MIG
Μεταλλικό ενεργό αέριο	Metal Active Gas - MAG
Ηλεκτρικό τόξο μη αναλισκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου	Gas Tungsten Arc Welding - GTAW
Ηλεκτρικό τόξο συγκόλλησης με πλάσμα μη αναλισκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου	Plasma Arc Welding - PAW
Ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος	Wire Feed Speed
Ταχύτητα κίνησης κεφαλής	Torch Travel Speed
Ταχύτητα συγκόλλησης	Welding Speed
Πηγή θερμότητας	Heat Input
Θερμοκρασία υποστρώματος	Substrate Temperature
Θερμοκρασία ενδιάμεσης στρώσης	Interlayer Temperature
Μήκος τόξου	Arc Length



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση και τεχνικές

Οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης εφαρμόζονται πλέον σε πληθώρα κλάδων, όπως, μεταξύ άλλων στην ναυτιλία, στην αεροδιαστημική και στη βιοϊατρική και πιο πρόσφατα στις κατασκευές. Οι τρισδιάστατες τεχνολογίες εκτύπωσης που εφαρμόζονται στον κλάδο των κατασκευών, έχουν εφαρμογή σε κατασκευές από σκυρόδεμα, πολυμερή και μέταλλα. Στις μεταλλικές κατασκευές, η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την κατασκευή δομικών στοιχείων μεγάλης κλίμακας είναι η μέθοδος Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM). Η μέθοδος WAAM είναι μια τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων η οποία χρησιμοποιεί έναν ρομποτικό βραχίονα και μία μηχανή συγκόλλησης, όπου το σύρμα τροφοδοσίας εναποτίθεται με την χρήση ηλεκτρικού τόξου, κατασκευάζοντας τρισδιάστατα αντικείμενα με την προσθήκη διαδοχικών στρώσεων υλικού. Σημαντικά πλεονεκτήματα που αιτιολογούν τη συνεχώς αυξανόμενη χρήση της προσθετικής κατασκευής είναι ο μικρός χρόνος παραγωγής και η δυνατότητα εκτύπωσης αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας με ακρίβεια.

Για την πραγματοποίηση τρισδιάστατης εκτύπωσης αναπτύχθηκε πλήθος τεχνολογιών οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε με βάση την πρώτη ύλη (στερεά, ρευστή, κονιοποιημένη, σε φύλλα) είτε με βάση τη διαδικασία που ακολουθείται. Με βάση το δεύτερο κριτήριο από το 2010 Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials - ASTM) ταξινομεί την τρισδιάστατη εκτύπωση στις παρακάτω τεχνικές:

1. Φωτοπολυμερισμός σε κάδο (Vat Photopolymerization): Το μοντέλο κατασκευάζεται σε στρώσεις από υγρή φωτοπολυμερή ρητίνη που τοποθετείται σε δοχείο του εκτυπωτή. [1]
2. Ψεκασμός Υλικού (Material Jetting): Το υλικό εκτοξεύεται είτε με συνεχή προσέγγιση είτε όποτε απαιτείται. [1]
3. Ψεκασμός Συγκολλητικής Ουσίας (Binder Jetting): Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί δύο υλικά εκ των οποίων το ένα έχει ως βάση τη σκόνη και το άλλο είναι το συνδετικό υλικό. Το υλικό κατασκευής είναι σε μορφή σκόνης, ενώ το συνδετικό είναι συνήθως σε υγρή μορφή. Κατά την εκτύπωση η κεφαλή κινείται οριζόντια κατά τους άξονες x

και γ και εναποθέτονται εναλλάξ στρώματα του υλικού κατασκευής και του συνδετικού του. [1]

4. Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion): Το υλικό εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου, θερμαίνεται και εναποτίθεται στρώμα-στρώμα. Το ακροφύσιο έχει την ικανότητα να κινείται οριζόντια ενώ η πλατφόρμα πάνω στην οποία γίνεται η εκτύπωση κινείται κάθετα έπειτα από την απόθεση κάθε στρώσης. [1]
5. Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη (Powder Bed Fusion): Οι τεχνικές εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται είναι οι Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electron Beam Melting (EBM), Selective Heat Sintering (SHS), Selective Laser Melting (SLM) and Selective Laser Sintering (SLS). Με τη χρήση μια θερμικής πηγής ενέργειας, λέιζερ σάρωσης ή δέσμης ηλεκτρονίων, γίνεται επιλεκτική σύντηξη μεταξύ σωματιδίων σκόνης για τη δημιουργία στερεού σώματος. [1]
6. Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Sheet Lamination): Αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει τις διαδικασίες Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) και Laminated Object Manufacturing (LOM). Κατά την πρώτη χρησιμοποιείται ως υλικό το μέταλλο σε φύλλα ή ταινίες τα οποία συγκολλούνται μεταξύ τους με υπερήχους. [1]
7. Κατευθυνόμενη Ενεργειακή Εναπόθεση (Directed Energy Deposition): Είναι παρόμοια τεχνολογία με την εξώθηση υλικού με τη διαφορά ότι το ακροφύσιο έχει τη δυνατότητα να κινηθεί σε πολλαπλές κατευθύνσεις. [2] Το υλικό εξωθείται υπό οποιαδήποτε γωνία, καθώς υπάρχουν τέσσερις και πέντε άξονες στο μηχάνημα. Κατά την απόθεση τήκεται με δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων ή τόξο ηλεκτρονίων και στη συνέχεια στερεοποιείται. [2, 3] Στην τεχνολογία αυτή ως υλικά χρησιμοποιούνται πολυμερή, κεραμικά, αλλά κυρίως μέταλλα με μορφή σκόνης ή σύρματος. [1]

Σύμφωνα με το "F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies", 2012 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό το μέταλλο στις εξής εκ των ανωτέρω κατηγοριών: Ψεκασμός Συγκολλητικής Ουσίας (Binder Jetting), Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη (Powder Bed Fusion), Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Sheet Lamination) και Κατευθυνόμενη Ενεργειακή Εναπόθεση (Directed Energy Deposition).

## 1.2 Αντικείμενο – στόχοι

Η μελέτη ξεκίνησε με μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στο αντικείμενο της τρισδιάστατης εκτύπωσης με εκτενή αναφορά στην τεχνική της Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο, η οποία αποτέλεσε και το αντικείμενό της για μεταλλικές κατασκευές. Δόθηκε προτεραιότητα στην κατανόηση της διαδικασίας που ακολουθείται για την τρισδιάστατη εκτύπωση στοιχείων με τη μέθοδο αυτή, στα μέσα που χρησιμοποιούνται και στους παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια του τελικού προϊόντος. Στη συνέχεια, διενεργήθηκε μια σειρά αναλύσεων με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS για τη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της απόκρισης τρισδιάστατα εκτυπωμένων απλών δομικών στοιχείων χάλυβα με τη χρήση της τεχνολογίας WAAM. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε υλικό ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα, 308LSi, για στοιχεία δοκών υπό κάμψη και υποστυλωμάτων υπό θλίψη τα οποία συγκρίθηκαν με συμβατικό χάλυβα S355 για αντίστοιχους φορείς. Με τις αναλύσεις των δοκών στόχος ήταν η μελέτη της απόκρισης των στοιχείων σε κάμψη θεωρώντας πλευρική εξασφάλιση και λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού. Για τα στοιχεία στύλων υπό θλίψη λήφθηκε υπόψη η μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας σε τέλειους φορείς και σε φορείς με ατέλεια, ενώ εξετάστηκε η επιρροή διαφορετικών υψών. Βασικό

αντικείμενο διερεύνησης αποτέλεσε και η διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού 308LSi στα στοιχεία δοκών και υποστυλωμάτων.

### 1.3 Δομή και οργάνωση

Το κείμενο διαρθρώνεται σε δύο κύρια μέρη. Το πρώτο συμπεριλαμβάνει τα κεφάλαια 1 και 2. Σε αυτά γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με την τρισδιάστατη εκτύπωση και την τεχνική WAAM. Το δεύτερο μέρος είναι το αναλυτικό και αποτελείται από τα κεφάλαια 3-5, ενώ ακολουθούν η βιβλιογραφία στο κεφάλαιο 6 και τα παραρτήματα Α και Β. Παρακάτω περιγράφεται το περιεχόμενο του κάθε κεφαλαίου:

Το *πρώτο* κεφάλαιο αποτέλεσε την εισαγωγή και περιλάμβανε την περιγραφή της τρισδιάστατης εκτύπωσης και την ταξινόμησή της σε διάφορες τεχνικές. Αναφορά έγινε και στο αντικείμενο και τους στόχους της μελέτης.

Το *δεύτερο* κεφάλαιο αναφέρεται στην τεχνική της Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει το ορισμό και μια ιστορική αναδρομή αυτής. Παρουσιάζονται ακόμη τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου και εφαρμογές της στον τομέα των κατασκευών. Περιγράφονται τα βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή, καθώς και τα υλικά και οι τύποι συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου που χρησιμοποιούνται. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι παράγοντες που καθορίζουν την ακρίβεια της τελικής γεωμετρίας και διαφορετικές επιλογές για την πορεία της εκτύπωσης. Στο τέλος του κεφαλαίου αναλύονται οι παράμετροι της εκτύπωσης και η επιρροή τους στον τελικού φορέα.

Στο  *τρίτο* κεφάλαιο ακολουθεί το αναλυτικό μέρος για τους φορείς των δοκών σε κάμψη. Αρχικά περιγράφονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και οι λεπτομέρειες του φορέα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και οι παράμετροι με τις οποίες προσομοιώθηκαν. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Το *τέταρτο* κεφάλαιο περιλαμβάνει το αναλυτικό μέρος για τους φορείς των στύλων υπό θλίψη και διαρθρώνεται κατά τον ίδιο τρόπο με το τρίτο κεφάλαιο.

Στο *πέμπτο* κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από το σύνολο των αναλύσεων και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.



## 2 ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΡΜΑ ΚΑΙ ΤΟΞΟ

### 2.1 Ορισμός

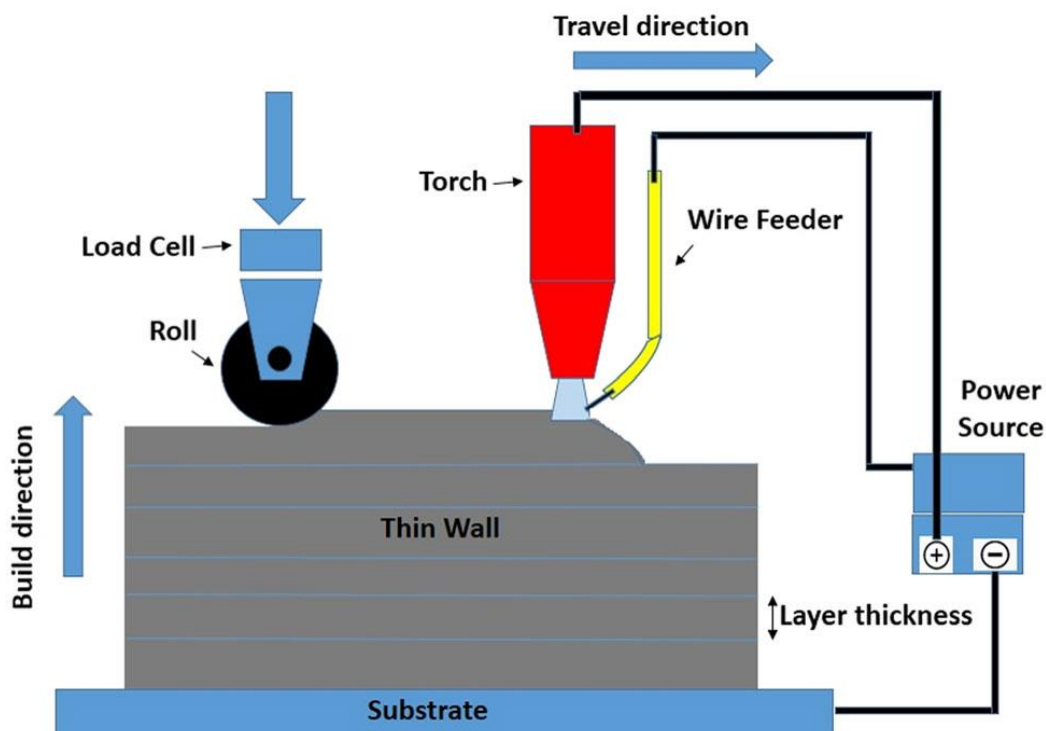
Σύμφωνα με το ISO/ASTM 52900, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), ή αλλιώς γνωστό ως Wire Arc Direct Energy Deposition (WADED), είναι ένας τύπος Κατευθυνόμενης Ενεργειακής Εναπόθεσης στην οποία η πρώτη ύλη, με τη μορφή σύρματος μετάλλου, τροφοδοτείται με ελεγχόμενο ρυθμό στο τόξο συγκόλλησης όπου το μεταλλικό σύρμα είναι τελείως λιωμένο και η προηγούμενος εναποτιθέμενη στρώση είναι μερικώς τηγμένη. [3, 2] Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή απολύτως πυκνού αντικειμένου με ακρίβεια διαστάσεων  $\pm 0.2$  mm. Ανεξάρτητα με την τεχνολογία συγκόλλησης που χρησιμοποιείται επιτυγχάνονται ακόμη υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης υλικού. Ο ρυθμός εναπόθεσης Ti6Al4V με σύντηξη κλίνης σκόνης λείζερ κυμαίνεται στα 0.1-0.18 kg/h και με σύντηξη κλίνης σκόνης δέσμης ηλεκτρονίων, στα 0.26-0.36 kg/h, ενώ ο ρυθμός εναπόθεσης με το WAAM 0.5-4 kg/h ανά ρομποτικό βραχίονα. [2] Ανάμεσα στις υπόλοιπες τεχνικές AM για κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων, το WAAM θεωρείται αυτή με τον μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης υλικού, χαμηλό κόστος και δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων μεγάλων διαστάσεων. [3] Η απόδοση χρήσης υλικού του WAAM μπορεί να φτάσει έως και 90-100% αν και ενδέχεται να απαιτείται κατεργασία για καλύτερο φινιρίσμα του τελικού προϊόντος η οποία μειώνει το ποσοστό αυτό. Συγκριτικά, η απόδοση χρήσης υλικού για την τεχνολογία Σύντηξης Σκόνης σε Κλίνη είναι περίπου 50%. [2]

### 2.2 Ιστορική αναδρομή

Ως αρχή του WAAM μπορεί να θεωρηθεί η δημιουργία του τοιχώματος ενός δοχείου από τον Baker το 1925 με την εναπόθεση μετάλλου μέσω της ελικοειδούς κίνησης ενός ηλεκτροδίου. [2] Την ίδια χρονιά ο Eschholz κατάφερε να δημιουργήσει σχήματα, χαρακτήρες και διακοσμητικά με τη χρήση ηλεκτρικού τόξου για την εναπόθεση μετάλλου. Χρησιμοποίησε μία μόνο στρώση ενώ προσδιόρισε και σημαντικές παραμέτρους όπως το ρεύμα τόξου, η ταχύτητα διαδρομής, το βάθος διείσδυσης, το υλικό υποστρώματος, και το πλάτος και το ύψος του σφαιριδίου συγκόλλησης. [2] Αργότερα, το 1930 ο H. Shoskey επιδιόρθωσε φθαρμένο τύμπανο φρένου με τη χρήση στρωμάτων λιωμένου μετάλλου στο αρχικό προϊόν,

ενώ το 1971 ο Akira Ujiie ανακάλυψε μια μέθοδο κατασκευής δοχείου πίεσης κυκλικής διατομής με σταδιακή εναπόθεση μετάλλου συγκόλλησης. Το 1993, οι Prinz κ.α. τροποποιώντας την υπάρχουσα ψηφιακή διαδικασία ελέγχου από υπολογιστή, κατασκεύασαν αντικείμενο στρώμα-στρώμα από μέταλλο. [2] Σημαντικό επίτευγμα ήταν και αυτό των Almeida et al., οι οποίοι το 2010 κατασκεύασαν μια πλήρως πυκνή δομή μήκους 1 μέτρου από Ti6Al4V με υψηλό ρυθμό εναπόθεσης 3 Kg/hr πετυχαίνοντας απόδοση εναπόθεσης πάνω από 80%. Για αυτό χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία συγκόλλησης ψυχρής μεταφοράς μετάλλου. [2]

Μάλιστα αξιοσημείωτη είναι η κυκλοφορία σύγχρονων εμπορικών συστημάτων WAAM. Αυτά περιλαμβάνουν πλέον ενσωματωμένο σύστημα φινιρίσματος, χωρίς δηλαδή να απαιτείται δευτερεύουσα επεξεργασία του προϊόντος για καλύτερο φινιρίσμα της επιφάνειάς του. [2] Στο Σχήμα 2-1 απεικονίζεται ένα τέτοιο σύστημα ταυτόχρονου φινιρίσματος κατά την κατασκευή στοιχείου με τη μέθοδο WAAM. Επιπρόσθετα, με ηλεκτρικό τόξο αναλισκόμενου ηλεκτροδίου με χρήση αδρανούς μεταλλικού αερίου και βαθμούς ελευθερίας 3 ή 5 αξόνων υπάρχει η δυνατότητα εναπόθεσης μεγάλης ποικιλίας μετάλλων και κραμάτων. Με την ενσωμάτωση μάλιστα ρομποτικού ελέγχου ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο η διαδικασία της εκτύπωσης για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της. [2] Επιτυχάνεται ακόμη ταχεία εναπόθεση σύρματος τιτανίου σε περιβάλλον αργού με ρυθμό 10 kg/h με τη χρήση πηγής πλάσματος. [2]



Σχήμα 2-1: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ταυτόχρονου φινιρίσματος κατά την κατασκευή στοιχείου με τη μέθοδο WAAM [2]

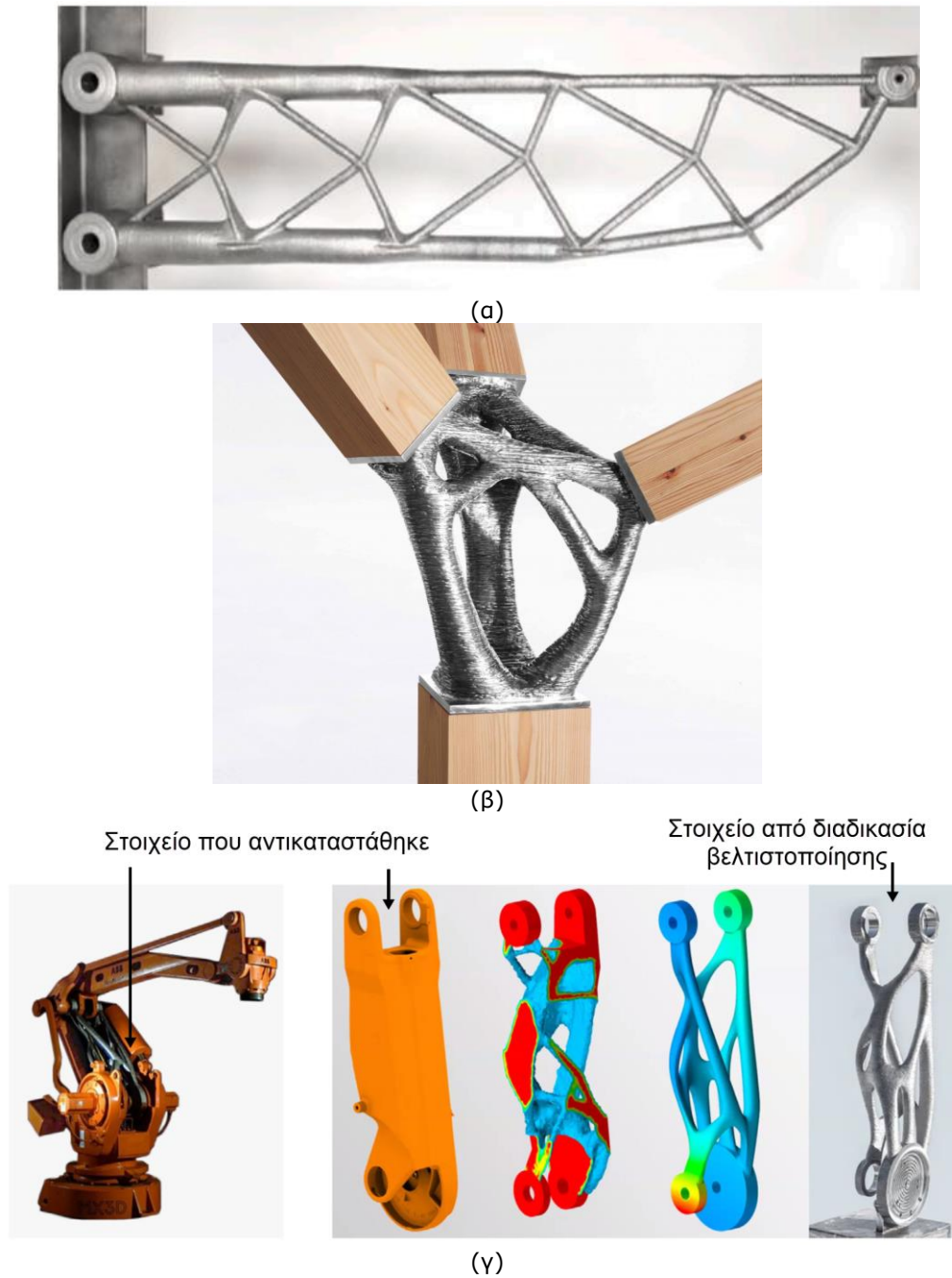
Η διαδικασία WAAM έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διαφορετικούς τομείς όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, οι κατασκευές κ.λπ. με δυνατότητα χρήσης ποικιλίας υλικών όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο, κράμα μνήμης σχήματος, κράματα χάλυβα, κράματα αλουμινίου κ.λπ. με πολύ ταχύτερο ρυθμό από άλλες τεχνολογίες. Διάφορα στοιχεία κατασκευάζονται με χρήση WAAM σε διάφορους τομείς και έχουν καλή απόδοση, όπως εξαρτήματα αεροδιαστημικής, γέφυρες, μοντέλα αεροσήραγγας, αλλά και πολύπλοκα

χαρακτηριστικά που είναι δύσκολο να κατασκευαστούν με τις συμβατικές διαδικασίες όπως χύτευση, μηχανική κατεργασία κ.λπ.. [2]

### 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνολογίας WAAM

Η τεχνολογία WAAM συγκριτικά με τους μεταλλικούς φορείς από συμβατικό χάλυβα παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Το WAAM παρέχει το πλεονέκτημα της ταχύτερης κατασκευής αντικειμένων σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής μεταλλικών στοιχείων, καθώς με τη χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου και τη ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης είναι δυνατό να ξεκινήσει η παραγωγή. [4, 5, 6, 7] Όπως προαναφέρθηκε ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού με την τεχνολογία WAAM έχει φτάσει σε υψηλά επίπεδα, οπότε ακόμη και σε περιπτώσεις που χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία φινιρίσματος ο χρόνος κατασκευής συνεχίζει να υπερτερεί έναντι αυτού της συμβατικής κατασκευής. [3, 8]
- Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι το χαμηλό κόστος δημιουργίας μεταλλικών φορέων με τη χρήση WAAM. [9, 10, 4] Συγκεκριμένα, παρά την κατανάλωση ρεύματος βιομηχανικής χρήσης που είναι υψηλή, το γεγονός ότι η παραγωγή αντικειμένων στην τελική τους μορφή γίνεται σε ένα μόνο στάδιο παραγωγής επιφέρει σημαντική μείωση του κόστους. [11, 3] Σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στη μείωση του κόστους είναι η ελάττωση του κόστους εργατωρών λόγω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας παραγωγής. Περιορισμό του κόστους επιφέρει και η μείωση της ποσότητας του υλικού που απαιτείται στις μεθόδους προσθετικής κατασκευής σε σχέση με τις αφαιρετικές. [3, 12] Μάλιστα, η δυνατότητα εκτύπωσης αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας με ακρίβεια που προσφέρει η διαδικασία WAAM, καθιστά εύκολη την παραγωγή φορέων γεωμετρίας που έχει προκύψει από βελτιστοποίηση. [13, 14] Το 52% του παγκόσμιου χάλυβα χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό κλάδο ως ράβδοι οπλισμού, πλάκες και δομικά προφίλ που παράγονται παραδοσιακά με έλαση ή συγκόλληση σε τυποποιημένες διατομές. Ως γνωστόν, η καμπτική και διατμητική ένταση δεν είναι σταθερές σε όλο το μήκος αυτών των φορέων με αποτέλεσμα να μην αξιοποιείται όλο το ποσοστό του υλικού παρά μόνο το 50% αυτού κατά μέσο όρο. [3] Επομένως, εξοικονόμηση υλικού άρα και μείωση κόστους παραγωγής μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία δομικά περισσότερο αποδοτικών φορέων με την απαραίτητη μόνο γεωμετρία μέσω της χρήσης της τεχνολογίας WAAM. Ένα παράδειγμα τέτοια εφαρμογής είναι η παραγωγή δικτυώματος με βελτιστοποιημένες διατομές και σχηματικές μορφές κόμβων πετυχαίνοντας διπλάσια απόδοση σχεδιασμού (λόγος φέρουσας ικανότητας προς μάζα) σε σχέση με τον συμβατικό σχεδιασμό δικτυώματος. Τέτοια παραδείγματα αποδεικνύουν τη δυνατότητα της τεχνολογίας WAAM για παραγωγή φορέων με τέτοια αποδοτικότητα σχεδιασμού που είναι αδύνατον να παραχθούν με τις συμβατικές κατασκευαστικές μεθόδους (Σχήμα 2-3). [3]



Σχήμα 2-2: Παραδείγματα στοιχείων κατασκευασμένων με την μέθοδο WAAM που προέκυψαν από βελτιστοποίηση (α) στοιχείο δικτυώματος [13], (β) στοιχείο συνδέσμου Takenaka connector (MX3D) [15], (γ) αντικατάσταση στοιχείου ρομποτικού βραχίονα με φορέα από διαδικασία βελτιστοποίησης [15]

- Σε σύνδεση με τα παραπάνω, η ελευθερία στο σχεδιασμό που προσφέρει αυτή η τεχνολογία καθιστά εφικτή τη δημιουργία φορέων πολύπλοκων γεωμετριών τόσο για σκοπούς δομικής αποδοτικότητας όσο και για αισθητικούς σκοπούς ικανοποιώντας μεγαλύτερο εύρος αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. [3, 16, 17, 14] Μάλιστα η πολυπλοκότητα αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί και για την πολυλειτουργικότητα των κατασκευών. Στον κατασκευαστικό τομέα συχνά χρησιμοποιούνται φορείς λεπτών τοιχωμάτων, καθώς με τη χρήση μικρής ποσότητας υλικού διαθέτουν μεγάλη φέρουσα ικανότητα. Ωστόσο, αυτό ενδέχεται να οδηγήσει σε αστάθειες, οι οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν με την τεχνολογία WAAM μέσω της δημιουργίας



ευνοϊκών ατελειών στους φορείς, αυξάνοντας για παράδειγμα την αντίσταση πλάκας σε λυγισμό. Αξιοσημείωτη είναι και η δυνατότητα δημιουργίας φορέων με διπλή καμπυλότητα, οι οποίοι αποτελούν καλή λύση παραλαβής φορτίων για διάφορες κατασκευές. [3]

- Ένα άλλο αποτέλεσμα της εξοικονόμησης του υλικού που προαναφέρθηκε ως πλεονέκτημα της μείωσης του κόστους, είναι και το θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχει. Αρχικά, μειώνονται τα απόβλητα που προκύπτουν από την κατασκευή εφόσον δε χρησιμοποιείται ξυλότυπος. Παράλληλα δεδομένου ότι οι εκπομπές άνθρακα κατά την παραγωγή του χάλυβα είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον, η μείωση της ποσότητας χρήσης του υλικού συμβάλλει προς την κατεύθυνση της αειφορίας και της βιωσιμότητας.
- Ταυτόχρονα σε πολλές περιπτώσεις με τη χρήση της αυτοματοποιημένης διαδικασίας WAAM δεν υπάρχει αναγκαιότητα εργασίας σε επικίνδυνες θέσεις όπως μεγάλα ύψη. Έτσι μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα εργατικών ατυχημάτων. Μάλιστα, ακόμη και σε ιδιαίτερα επικίνδυνα περιβάλλοντα που χρίζουν αμεσότητας κατασκευών όπως εμπόλεμες ζώνες και περιοχές που έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές το WAAM μπορεί να προσφέρει ταχείς λύσεις.
- Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας υψηλής τεχνολογίας.
- Κατά την παραγωγή ενός φορέα, εκτυπώνεται με ακρίβεια η γεωμετρία του τρισδιάστατου μοντέλου που έχει σχεδιαστεί. Έτσι μειώνεται η πιθανότητα λάθους που έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου και την αποφυγή πρόσθετου κόστους που θα απαιτούνταν σε περίπτωση σφάλματος, αλλά και την επίτευξη υψηλότερου επιπέδου ασφάλειας. [2, 3]
- Η τεχνολογία WAAM παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας πλήθους κραμάτων. Έτσι με διάφορους συνδυασμούς μπορούν να δημιουργηθούν υλικά διαβαθμισμένων ιδιοτήτων (Functionally Graded Materials-FGM) και να προκύψουν φορείς με μεταβλητές μικροδομές μέσω των ελεγχόμενου ρυθμού ψύξης, οδηγώντας σε καλύτερες ιδιότητες υλικού. [18, 2]

Η τεχνολογία WAAM παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές AM:

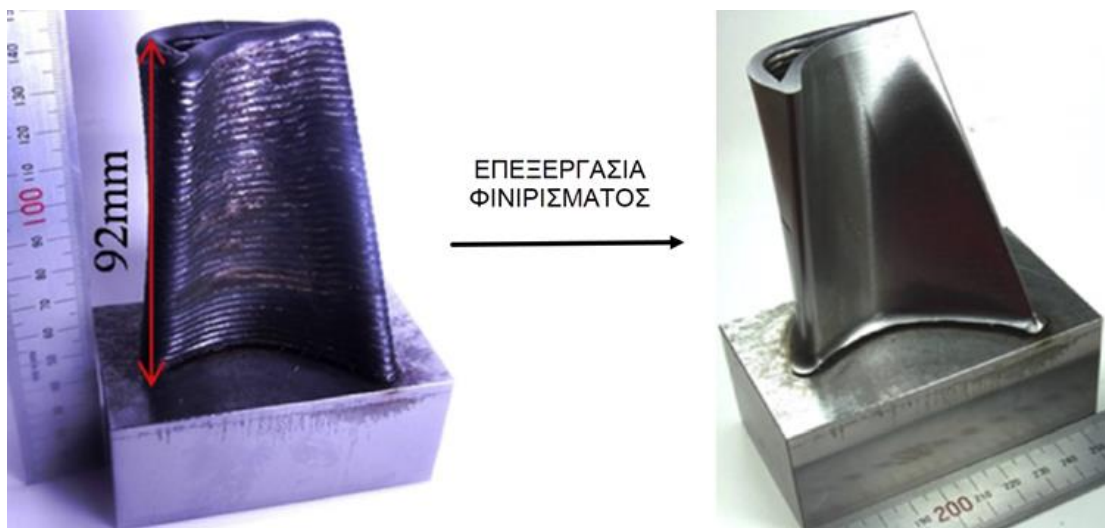
- Η μέθοδος WAAM μέσω της χρήσης ρομποτικών συστημάτων για τον έλεγχο της κίνησης δίνει τη δυνατότητα παραγωγής φορέων μεγάλων διαστάσεων. Επομένως, είναι κατάλληλη για χρήση στον κατασκευαστικό τομέα. Για παράδειγμα, με τη μέθοδο σύντηξης σκόνης (Power Bed Fusion) οι μέγιστες διαστάσεις του αντικειμένου που μπορεί να παραχθεί εξαρτώνται από το μέγεθος της κλίνης, η οποία είναι συνήθως 250x250x250mm<sup>3</sup>. [3]
- Η μέθοδος WAAM είναι πιο φθηνή σε σχέση με άλλες λόγω της άμεσης διαθεσιμότητας του εξοπλισμού ο οποίος υπάρχει στην αγορά και δε χρειάζεται ιδιαίτερη παραγγελία αλλά και το φθινό κόστος της πρώτης ύλης. [3] Συγκεκριμένα, το κόστος του μεταλλικού σύρματος είναι ίσο με το 10% του κόστους της σκόνης. [3]
- Επιπρόσθετα, το σύρμα σε σχέση με τη σκόνη είναι πιο ευνοϊκή πρώτη ύλη λόγω ευκολίας στην αποθήκευση και χρήση, καθώς είναι λιγότερο επικίνδυνο για το περιβάλλον, την υγεία και την ασφάλεια. Στη μέθοδο DED χρησιμοποιείται κάποιο προστατευτικό αέριο, όπως το αργό, για την αποφυγή την οξειδωσης. Αυτό είναι

σημαντικό ως προς την ασφάλεια, καθώς η οξειδωση σε κάποιο σημείο του φορέα μπορεί να λειτουργήσει ψαθυρά και να αποτελέσει σημείο έναρξης ρηγματώσης. Μάλιστα, στο σύρμα είναι λιγότερο πιθανή η εμφάνιση οξειδωσης, καθώς η επιφάνεια ανά χιλιόγραμμο είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη σκόνη. [3, 19, 6]

- Ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού με τη χρήση WAAM είναι ταχύτερος σε σχέση με άλλες μεθόδους. Όσον αφορά στις μεταλλικές κατασκευές, ο ρυθμός εναπόθεσης με τη μέθοδο WAAM κυμαίνεται στα 4-9 kg/hr, ενώ με την PBF στα 0.05 kg/hr. [3]
- Η αποδοτικότητα της εναπόθεσης του υλικού είναι καλύτερη στην περίπτωση της τεχνολογίας WAAM, καθώς με την τεχνολογία PBF η σύντηξη επιτυγχάνεται για ένα μικρό μόνο ποσοστό της σκόνης. Επομένως, με την πρώτη μέθοδο περιορίζεται το ποσοστό σπατάλης υλικού. [2, 20]

Η τεχνολογία WAAM παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- Ένα από αυτά σχετίζεται με την μικρή ανομοιομορφία στη γεωμετρία του τελικού προϊόντος, καθώς οι διαστάσεις μπορεί να έχουν απόκλιση  $\pm 0.2$  mm. [2] Για τον λόγο αυτό συχνά απαιτείται επιπρόσθετη διαδικασία φινιρίσματος που μεταφράζεται σε παραπάνω χρόνο και κόστος. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, και σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος WAAM συνεχίζει να πλεονεκτεί έναντι ταχύτητας και κόστους. Μάλιστα, λόγω της μεγάλης κλίμακας των εφαρμογών στον κατασκευαστικό τομέα, αυτό το μέγεθος της ακρίβειας διαστάσεων μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο σε κάποιες περιπτώσεις και επομένως να αποφευχθεί η διαδικασία φινιρίσματος. Ακόμη, στις κατασκευές οι φορείς επιβάλλονται κυρίως σε στατικές και άλλες προβλέψιμες φορτίσεις. Με αυτά τα δεδομένα οι γεωμετρικές απαιτήσεις καλύπτονται με αυτής της τάξεως ακρίβεια διαστάσεων. Εάν όμως το φινιρίσμα είναι απαραίτητο, η χρήση καινοτόμου μηχανήματος με ενσωματωμένη λειτουργία φινιρίσματος, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί μια καλή επιλογή για την και την αποφυγή δεύτερης φάσης μετα-επεξεργασίας και πραγματοποίηση της κατασκευής σε ένα βήμα. [3] Παράδειγμα τέτοιας επεξεργασίας φαίνεται στο Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-3: Προϊόν χάλυβα SS400, κατασκευασμένο με τη μέθοδο WAAM, πριν και μετά την επεξεργασία φινιρίσματος [8]

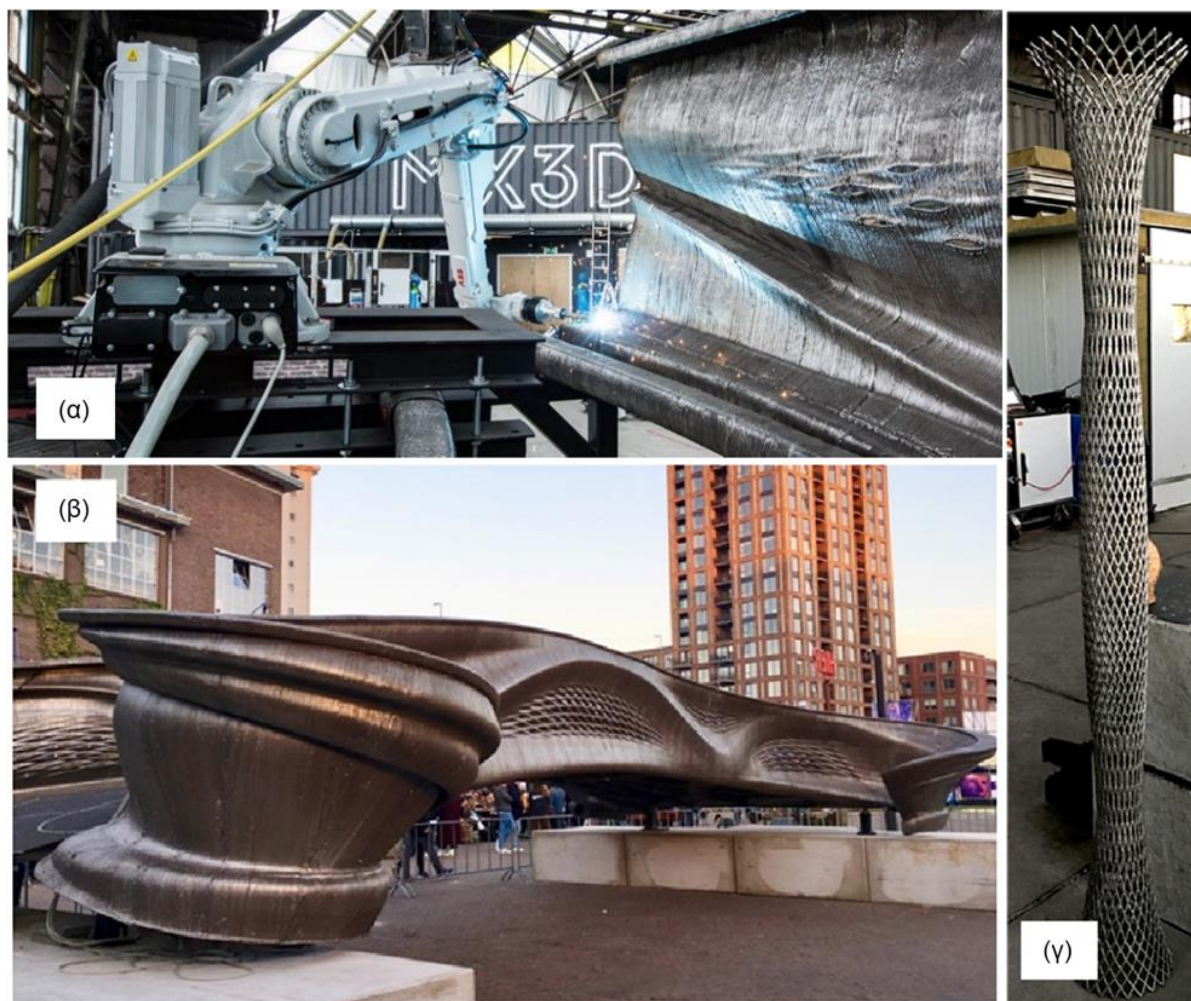
- Ένα ακόμη χαρακτηριστικό αποτελεί και η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων στις κατασκευές που παράγονται με AM, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε γεωμετρικές ανακρίβειες και σε σημαντικές παραμορφώσεις. [10, 5, 8, 3] Το ζήτημα αυτό γίνεται

ακόμη πιο σοβαρό στην περίπτωση κατασκευής φορέων μεγάλων διαστάσεων, διότι οι παραμένουσες τάσεις και οι παραμορφώσεις συσσωρεύονται στο σύνολο του φορέα και γίνονται πιο έντονες. [10, 5, 8, 3] Αυτά τα φαινόμενα προκύπτουν από την υπερβολική εισροή θερμότητας και τον υψηλό ρυθμό εναπόθεσης του υλικού και οφείλουν να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό. [3]

- Η αυτοματοποιημένη διαδικασία παραγωγής με τη χρήση WAAM έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των θέσεων εργασίας που σχετίζονται με τον συμβατικό τρόπο παραγωγής μεταλλικών στοιχείων, αλλά και εφαρμογής τους στις κατασκευές. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε δημιουργείται με τον τρόπο αυτό μια άλλη σειρά θέσεων εργασίας που απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις σχεδιασμού, εφαρμογής των τεχνολογιών και χειρισμού των μηχανημάτων που περιλαμβάνει η διαδικασία παραγωγής κατασκευών με τη χρήση WAAM.

## 2.4 Εφαρμογές στον τομέα των κατασκευών

Η τεχνολογία της Προσθετικής με Τόξο και Σύρμα έχει πολλές εφαρμογές στο τομέα των κατασκευών. (Σχήμα 2-4) Με τη χρήση μεταλλικού σύρματος ως πρώτη ύλη κατασκευάζονται δομικά στοιχεία όπως δοκοί, στύλοι και σύνδεσμοι. Ταυτόχρονα, δίνεται η δυνατότητα παραγωγής στοιχείων πολύπλοκης γεωμετρίας. Αυτή ενδέχεται να είναι και αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία WAAM χρησιμοποιείται για την επιδιόρθωση βλαβών που έχουν υποστεί κατασκευές. [8] Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου όπως προαναφέρθηκε είναι η δυνατότητα χρήσης της για την παραγωγή κατασκευών μεγάλων διαστάσεων με πρώτη εφαρμογή τέτοιας κλίμακας την MW3D πεζογέφυρα ανοίγματος 12 m που κατασκευάστηκε το 2021 στο Άμστερνταμ. [21, 14] Τέτοιου είδους κατασκευές μπορούν να εκτυπωθούν είτε σε μεμονωμένα τμήματα και στη συνέχεια να συναρμολογηθούν όπως συνέβη στο παράδειγμα της πεζογέφυρας, είτε ο φορέας να εκτυπωθεί ολόκληρος απευθείας. Επισημαίνεται ακόμη πως τα δομικά στοιχεία που προκύπτουν διαθέτουν βελτιωμένες ιδιότητες λόγω της ποικιλίας των υλικών και των διάφορων κραμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.



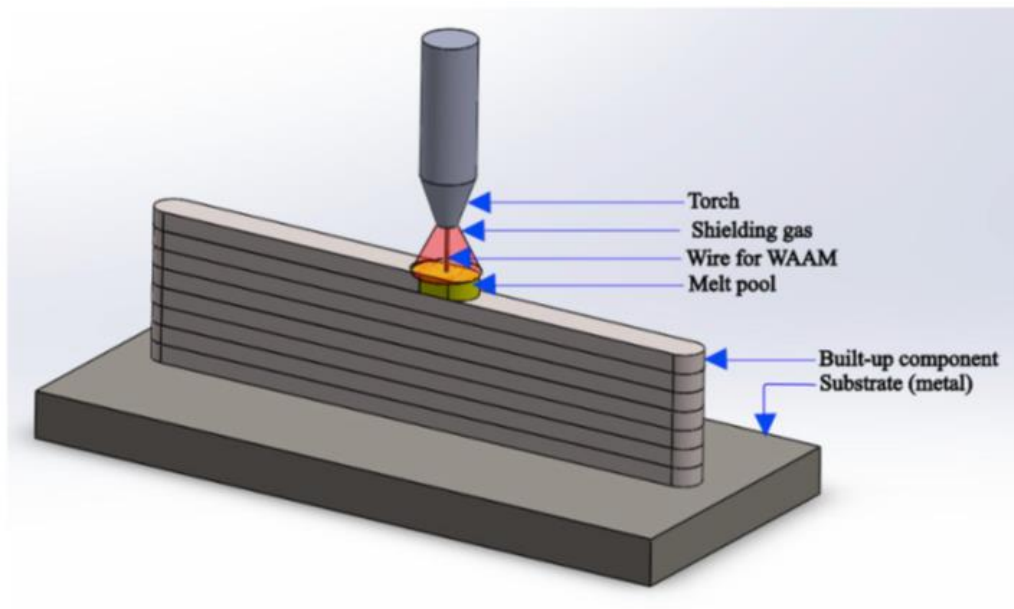
Σχήμα 2-4: Εφαρμογές της τεχνολογίας WAAM στις κατασκευές (α) MX3D εκτυπωτής με ρομποτικό βραχίονα, (β) MX3D πεζογέφυρα ανοίγματος 12 m, Άμστερνταμ, 2021, (γ) στύλος κατασκευασμένος με τη μέθοδο WAAM από το Πανεπιστήμιο της Μπολόνια [22]

## 2.5 Βήματα κατασκευής φορέα

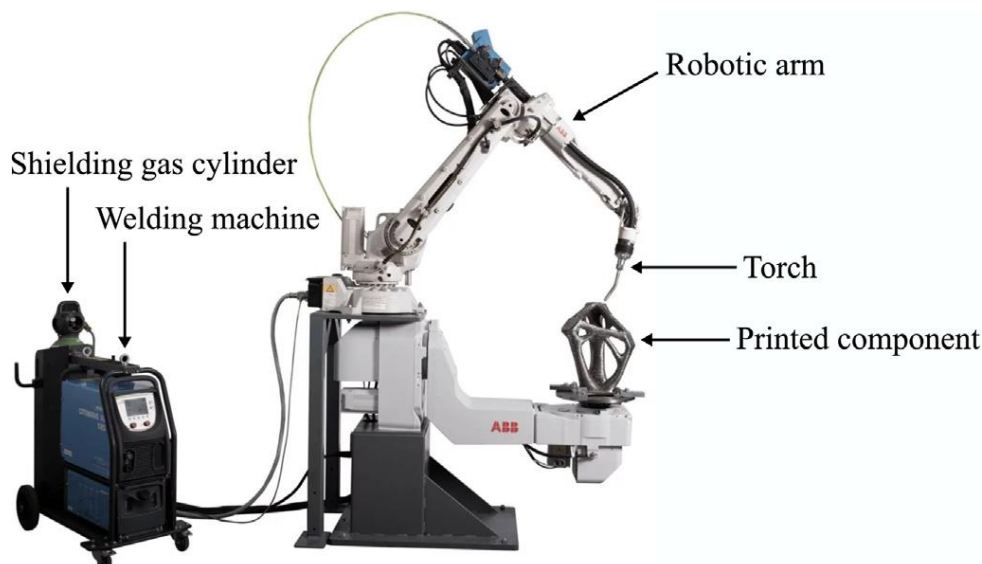
Η διαδικασία κατασκευής στοιχείων με την τεχνολογία WAAM παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με άλλες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Θα μπορούσε να χωριστεί σε τρία στάδια τα οποία αναλύονται παρακάτω, τον σχεδιασμό, την εκτύπωση και την μετα-επεξεργασία φινιρίσματος:

- Στο στάδιο του σχεδιασμού δημιουργείται ένα CAD μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την ανάπτυξη εντολών κινήσεων που θα δοθούν στον controller. Η πορεία εκτύπωσης (path) καθορίζεται χωρίζοντας το μοντέλο σε τμήματα με τη βοήθεια 3D Slicers προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δε θα υπάρξει σύγκρουση κατά την εκτύπωση. Στο στάδιο αυτό σχεδιάζεται και το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση (επιλογή υλικού και διαστάσεων) και αφαιρείται στο τέλος αυτής. [2]
- Το στάδιο εναπόθεσης υλικού περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποσυστήματα:
  - a. Το ακροφύσιο (torch) που εναποθέτει το υλικό μέσω της μεταφοράς της εισροής ενέργειας

- b. Ένα σύστημα κίνησης (positioning system) μέσω του οποίου η κεφαλή ακολουθεί την πορεία εκτύπωσης που έχει καθοριστεί. Αυτό το σύστημα κίνησης μπορεί να είναι είτε σύστημα ρομποτικού βραχίονα είτε ψηφιακά ελεγχόμενο από υπολογιστή (Computer Numerical Controlled - CNC). Το Robotic WAAM προτιμάται στην περίπτωση που το μέλος που πρόκειται να κατασκευαστεί έχει πολύ μεγάλο μήκος και εμφανίζει καμπυλότητα, αλλά και για την επίτευξη υψηλού ρυθμού εναπόθεσης. Το σύστημα σκελετού CNC είναι πιο άκαμπτη κατασκευή και χρησιμοποιείται όταν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια γεωμετρίας του μέλους.
- c. Ένα σύστημα για τον έλεγχο του συστήματος κίνησης (ρομπότ ή CNC)
- d. Ένα τροφοδοτικό του σύρματος για τον έλεγχο της εναπόθεσης του υλικού
- e. Βοηθητικός εξοπλισμός όπως για την εκροή προστατευτικού αερίου
- f. Για την καλύτερη παρακολούθηση και τον έλεγχο της διαδικασίας εκτύπωσης μπορούν να τοποθετηθούν διάφοροι αισθητήρες για τη μέτρηση της γεωμετρίας του σφαιριδίου (bead), της θερμοκρασίας που έχει το υλικό κατά τη διέλευση και του ρυθμού μεταφοράς του υλικού, αλλά και τον έλεγχο της συγκόλλησης. [2]



Σχήμα 2-5: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας WAAM [8]



Σχήμα 2-6: Σύστημα εκτύπωσης WAAM με ρομποτικό βραχίονα (MX3D) [15]

- Στο στάδιο της μετα-επεξεργασίας που συχνά συμπεριλαμβάνεται στην κατασκευή μελών με τη χρήση WAAM μπορεί να περιλαμβάνεται μια διαδικασία φινιρίσματος (machining) της επιφάνειας του μέλους για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας με ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια. Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται και θερμική επεξεργασία για την εξασφάλιση των επιθυμητών ιδιοτήτων. [2]

## 2.6 Υλικά ως πρώτη ύλη

Στην τεχνολογία WAAM μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγάλη ποικιλία υλικών και κραμάτων ως πρώτη ύλη. Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από την εφαρμογή. Συγκεκριμένα, πιθανές επιλογές είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός, το τιτάνιο, διάφορα κράματα χάλυβας, κράματα νικελίου, αλουμινίου, χαλκού και τιτανίου, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί και πειραματικές έρευνες με συνδυασμούς αυτών οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα ακόμη καλύτερες μηχανικές ιδιότητες το παραγόμενου μέλους. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται η παραγωγή φορέων από χάλυβας. Οι τύποι χάλυβας που χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας (stainless steel), ο ανθρακούχος χάλυβας (carbon steel) και το ινβάρ (invar). [2]

Στον ανοξείδωτο χάλυβας ανήκουν διάφοροι τύποι υλικών, όπως το ER110S-S, με χαρακτηριστικό την αντοχή τους στην οξείδωση. Αυτή οφείλεται στην προστασία που προσφέρει η εξωτερική στρώση οξειδίου του χλωρίου. Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται και ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας, ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλή ολκιμότητα και σκληρότητα. Παραδείγματα ωστενιτικού χάλυβας αποτελούν τα υλικά 308LSi, ER316L και ER625.

Αντίθετα με τον ανοξείδωτο, ο ανθρακούχος χάλυβας είναι ευαίσθητος στην οξείδωση και για αυτό τον λόγο εφαρμόζονται σε αυτόν προστατευτικές στρώσεις. Ανάλογα με το ποσοστό άνθρακα που περιέχει χωρίζεται σε χαμηλής, μέσης, υψηλής και πολύ υψηλής περιεκτικότητας. Στους ανθρακούχους χάλυβες ανήκουν οι ER70S-6, 3dprint AM80 και Union K 40.

Η τρίτη κατηγορία που αναφέρθηκε, το ινβάρ, είναι γνωστό και ως FeNi 36. Πρόκειται για κράμα χάλυβας και νικελίου, το οποίο περιέχει 36% νικέλιο και βασικό του χαρακτηριστικό

είναι ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής. Ένα παράδειγμα αυτού του υλικού είναι το UTP A 8036 S.

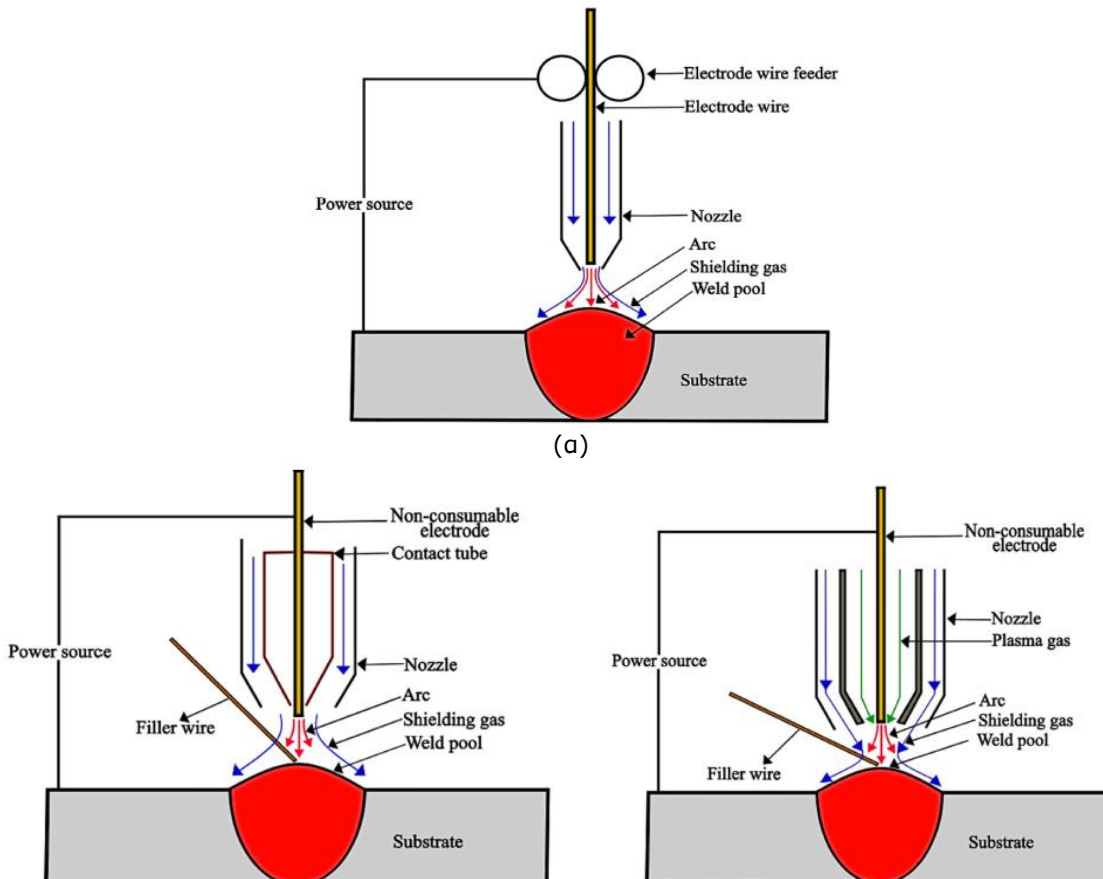
## 2.7 Τύποι συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου

Κατά την παραγωγή φορέων με την τεχνολογία WAAM το σύρμα που τροφοδοτείται τήκεται με συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου για τη δημιουργία του μέλους ή της κατασκευής. Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, η οποία συμβαίνει σε αυξημένες θερμοκρασίες, η επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα έχει ως αποτέλεσμα ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις με το οξυγόνο και το άζωτο. Για την προστασία της συγκόλλησης και την αποφυγή αυτών των χημικών αντιδράσεων, κατά τη διάρκεια αυτής πραγματοποιείται ταυτόχρονη ροή ειδικού προστατευτικού αερίου. [8] Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρικού τόξου (Σχήμα 2-7) και η επιλογή τους εξαρτάται από τον τύπο του υλικού και τις εφαρμογές για τις οποίες χρησιμοποιείται. [2] Ακολουθούν τρεις βασικοί τύποι συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου [2, 8]:

1. Ηλεκτρικό τόξο αναλισκόμενου ηλεκτροδίου (Gas Metal Arc Welding – GMAW): Η GMAW είναι η πιο συχνή επιλογή διαδικασίας, διότι το ίδιο το σύρμα είναι το αναλισκόμενο ηλεκτρόδιο, άρα είναι στον ίδιο άξονα με το ακροφύσιο συγκόλλησης. Αυτό οδηγεί σε μια πιο απλή πορεία εκτύπωσης. Το υλικό μεταφέρεται από το αναλισκόμενο ηλεκτρόδιο μέσω του τόξου στο δοχείο τήξης. Κατά τη μεταφορά αυτή εκτινάσσονται κάποια λιωμένα σταγονίδια υλικού είτε από το τόξο είτε από το δοχείο, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρών σφαιριδίων στην επιφάνεια του προϊόντος. [2] Στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιείται είτε μεταλλικό αδρανές αέριο (Metal Inert Gas - MIG) είτε μεταλλικό ενεργό αέριο (Metal Active Gas - MAG). Ως μεταλλικά αδρανή αέρια, τα οποία προτιμώνται για μέταλλα χωρίς σίδηρο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν το αργό και το ήλιο, ενώ ως ενεργά μεταλλικά αέρια χρησιμοποιούνται διοξείδιο του άνθρακα ή μίγμα ενεργών αερίων (π.χ.  $Ar + CO_2 + O_2$ ) και προτιμώνται σε περίπτωση μετάλλων που περιέχουν σίδηρο. [8]  
Στο GMAW η μεταφορά μετάλλων γίνεται με βραχυκύκλωμα (short-circuiting), υπό μορφή σταγόνων (globular), με ψεκασμό (spray) και με παλμικό ψεκασμό (pulsed spray). Τα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου καθορίζονται από την ένταση της συγκόλλησης, τον εξοπλισμό και τον τύπο ηλεκτροδίου. Στη συμβατική διαδικασία κατά την οποία η μεταφορά του μετάλλου με βραχυκύκλωμα, όταν το ηλεκτρόδιο συγκόλλησης έρχεται σε επαφή με τη «λίμνη του λιωμένου υλικού» (molten pool) εμφανίζεται βραχυκύκλωμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απότομη τήξη του σύρματος ηλεκτροδίου. Έτσι μεταφέρονται σταγονίδια μέσω της επιφανειακής τάσης, το τόξο αναφλέγεται ξανά και η διαδικασία συνεχίζεται. [8]
2. Ηλεκτρικό τόξο μη αναλισκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW): Κατά τις διαδικασίες με GTAW, το ηλεκτρόδιο βολφραμίου είναι μη αναλισκόμενο και ένα εξωτερικό σύρμα τροφοδοτείται στο δοχείο τήξης. Ανάμεσα και στο υπάρχον στρώμα υλικού δημιουργείται ένα ηλεκτρικό τόξο μέσω της θερμότητας του οποίου τήκεται το σύρμα τροφοδοσίας και εναποτίθεται στην επιφάνεια της υπάρχουσας στρώσης ώστε να λάβει την προβλεπόμενη γεωμετρία (ύψος, πλάτος) και μηχανικές ιδιότητες. [2, 8] Σε αυτή την περίπτωση, ο προγραμματισμός της διαδικασίας είναι πιο περίπλοκος, διότι το ακροφύσιο είναι ανάγκη να περιστρέφεται κατάλληλα έτσι ώστε κάθε στιγμή το υλικό να τροφοδοτείται από την ίδια κατεύθυνση για την εξασφάλιση της συνεχούς εναπόθεσης. [2]
3. Ηλεκτρικό τόξο συγκόλλησης με πλάσμα μη αναλισκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου (Plasma Arc Welding - PAW): Η διαδικασία συγκόλλησης με πλάσμα

PAW μοιάζει αρκετά με την GTAW, καθώς και σε αυτή το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιείται είναι μη αναλίσκόμενο. Ωστόσο, είναι πιο αποτελεσματική μέθοδος λόγω της συστολής του τόξου πλάσματος στο ακροφύσιο. Κατά τη συγκόλληση με PAW δημιουργείται ένα τόξο μεταξύ του ηλεκτροδίου βολφραμίου και του υδρόψυκτου ακροφυσίου. Το αδρανές αέριο που ρέει στο ακροφύσιο μέσω της ζώνης τόξου, ιονίζεται, δηλαδή το αέριο μετατρέπεται σε πλάσμα το οποίο μεταπηδάει στην επιφάνεια του υποστρώματος και μέσω της θερμότητας που παράγεται τήκεται το σύρμα τροφοδοσίας. Η ταυτόχρονη εκροή αερίου προστατεύει τη διαδικασία αποτρέποντας την επαφή της συγκόλλησης με την ατμόσφαιρα. Παρά τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου έναντι των άλλων, ανασταλτικός παράγοντας για την επιλογή της είναι το υψηλότερο κόστος της. [8]

Τη βέλτιστη επιλογή ηλεκτρικού τόξου κατά τη χρήση WAAM σε κατασκευαστικές εφαρμογές επηρεάζουν διάφοροι παράγοντες. Ένας βασικός παράγοντας είναι το μεγάλο μέγεθος των μελών που παράγονται στον κατασκευαστικό τομέα, οι οποίοι απαιτούν και υψηλό ρυθμό εναπόθεσης για την επίτευξη ικανοποιητικού χρόνου παραγωγής. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, την καλύτερη επιλογή αποτελεί το GMAW. [3] Επιπρόσθετα, το GMAW έχει 2-3 φορές πιο γρήγορο ρυθμό εναπόθεσης υλικού σε σχέση με τις μεθόδους GTAW και PA [2], αλλά και μεγαλύτερο ποσοστό χρήσης υλικού. [8] Ωστόσο, φέρει κάποιους περιορισμούς σχετικά με τη σταθερότητα τόξου και την εμφάνιση σφαιριδίων στην τελική επιφάνεια. [8] Σε άλλη περίπτωση όπου βασικός παράγοντας για κάποια εφαρμογή είναι η ακρίβεια γεωμετρίας και εάν απαιτείται φινιρίσμα της επιφάνειας τότε επιλέγεται το GTAW, ενώ για εναπόθεση υλικού με τελική γεωμετρία μεγαλύτερου πλάτους το PAW. [3] Ακόμη, το PAW προσφέρει υψηλής ποιότητας συγκολλήσεις με πολύ λιγότερη παραμόρφωση και υψηλή ταχύτητα και παρέχει τόξο υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει σημαντικά μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. [8]





(β)

(γ)

Σχήμα 2-7: Τύποι συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου (α) GMAW, (β) GTAW, (γ) PAW [8]

## 2.8 Έλεγχος γεωμετρίας - πορεία εκτύπωσης

Ο έλεγχος της γεωμετρίας και η ακριβής πρόβλεψη αυτής στο τελικό προϊόν είναι μια από τις προκλήσεις τις μεθόδου WAAM. Συγκεκριμένα, την έρευνα έχει απασχολήσει σε σημαντικό βαθμό μέχρι στιγμής, η πρόβλεψη του ύψους και του πάχους της κάθε στρώσης για πλήθος υλικών χάλυβα, και όχι μόνο. Η γεωμετρία και η αποδοτικότητα της εκτύπωσης μονής διαδρομής του συστήματος κίνησης εξαρτάται από το πάχος του σύρματος και παραμέτρους όπως η πηγή θερμότητας (heat input), η ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος (wire-feeding speed) και η ταχύτητα εναπόθεσης (travel/scanning speed). Συγκεκριμένα, για τον κατασκευαστικό τομέα όταν ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται ανοξείδωτος ή ανθρακούχος χάλυβας, τότε συνήθως επιλέγεται πάχος σύρματος 0.8 mm – 1.2 mm, με το οποίο προκύπτει τοίχος μονής εναπόθεσης υλικού με πάχος 3.5 mm – 8 mm. [3]

Η ακρίβεια της γεωμετρίας καθορίζεται από τη σωστή πρόβλεψη των διαστάσεων κάθε στρώσης. Αυτή εξαρτάται από τον συνδυασμό πολλών παραμέτρων που ορίζονται κατά τον σχεδιασμό της διαδικασίας της εκτύπωσης. [3] Προκειμένου οι παράμετροι να οριστούν σωστά, ο Ding κ.α. πρότειναν ένα από τα πρώτα ψηφιακά μοντέλα. Συγκεκριμένα, πραγματοποίησαν μία αποτελεσματική προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων της θερμομηχανικής συμπεριφοράς πολυστρωματικού τοίχου κατά τη διάρκεια της παραγωγής του με την τεχνολογία WAAM και προσδιόρισαν τις απομένουσες τάσεις και παραμορφώσεις αυτού. [23] Αξιοσημείωτη είναι και η προσέγγιση των Xiong κ.α. οι οποίοι εφάρμοσαν τη μοντελοποίηση νευρωνικών δικτύων ως αλγόριθμο πρόβλεψης γεωμετρίας εναπόθεσης και ένα σύστημα επανάληψης κλειστού βρόχου για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της εκτύπωσης. [24]

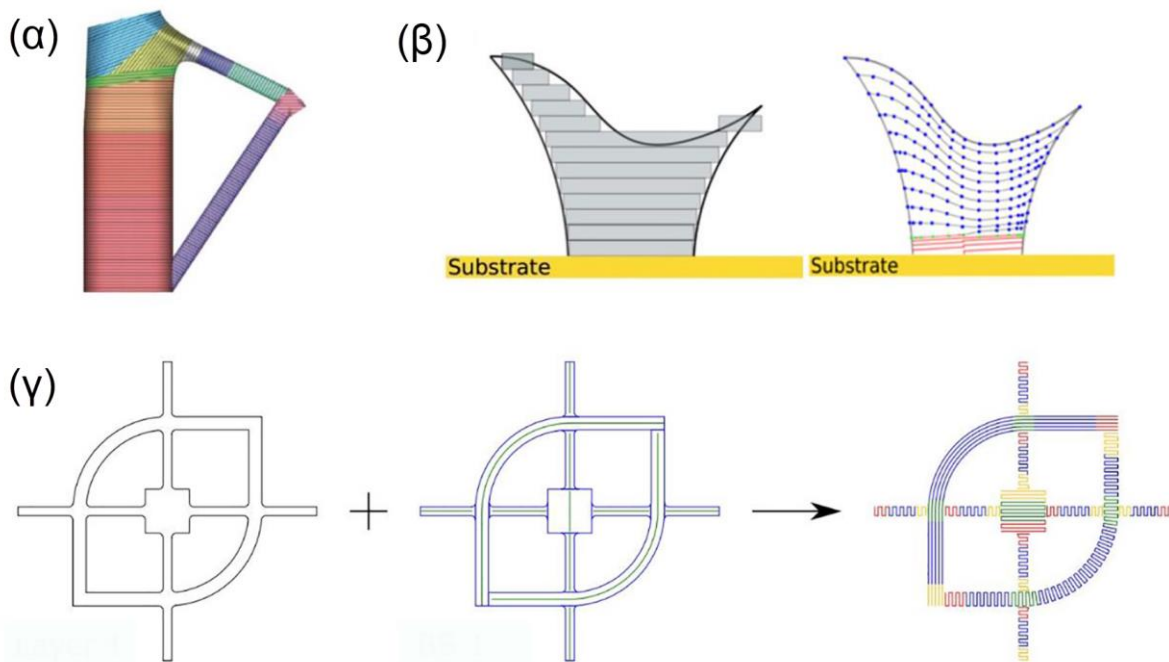
Μάλιστα η ακρίβεια καθορισμού της τελικής γεωμετρίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τον έλεγχο της διαδικασίας εκτύπωσης και της ανάλογης τροποποίησης των παραγόντων της ανάλογα με την εξέλιξή της. Η επιρροή των παραμέτρων της συγκόλλησης στη γεωμετρία του αντικειμένου αναλύεται περισσότερο στην επόμενη ενότητα, ενώ ωφέλιμος είναι ο έλεγχος των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως η συσσώρευση θερμότητας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται διάταξη υπολογιστικής τομογραφίας ακτίνων-Χ (X-ray Computed Tomography-CT), ακουστικό, θερμικό και οπτικό σήμα. [3]

Η τελική γεωμετρία του παραγόμενου φορέα, όπως και η απόκριση αυτού στην εκάστοτε φορτιστική κατάσταση, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πορεία εκτύπωσής του. Η παραγωγή φορέων με την τεχνολογία WAAM προσφέρει μεγάλη ελευθερία στον καθορισμό της πορείας εκτύπωσης, στην οποία ευθύνεται και σε μεγάλο βαθμό η ελευθερία στη γεωμετρία των μελών/φορέων που μπορούν να εκτυπωθούν.

Ο σχεδιασμός της πορείας αυτής πραγματοποιείται με βάση τη σκοπιμότητα της κατασκευής, την εξασφάλιση κατά το δυνατόν μίας συνεχούς εκτύπωσης χωρίς πολλές εκκινήσεις-διακοπές της πηγής ενέργειας, αποφεύγοντας την επαφή του ακροφυσίου με το παραγόμενο μέλος/φορέα, ελαχιστοποιώντας τη γωνία των προεξοχών και αποφεύγοντας διασταυρώσεις σχήματος T και X. [3]

Στην εικόνα φαίνονται κάποια παραδείγματα των συνηθέστερων μοτίβων της πορείας εκτύπωσης που μπορεί να ακολουθήσει το σύστημα κίνησης για την εναπόθεση του υλικού. Η πορεία αυτή ενδέχεται να είναι μονόδρομη ή αμφίδρομη με δυνατότητα διακοπής της λειτουργίας του ακροφυσίου έως ότου λάβει τη σωστή θέση για την εναπόθεση της επόμενης

στρώσης υλικού. Κατά τη μονόδρομη στρατηγική, το υλικό εναποτίθεται μόνο από την αρχή μέχρι την τελική θέση εναπόθεσης. Αντίθετα, κατά την στρατηγική της αμφίδρομης εναπόθεσης υλικού, το στρώμα υλικού εναποτίθεται όταν το ακροφύσιο κινείται προς κάθε κατεύθυνση. Έπειτα από σύγκριση των δύο στρατηγικών σε παραγόμενους τοίχους, κατά τη μονόδρομη πορεία εκτύπωσης παρατηρήθηκε συσσώρευση του υλικού στην πλευρά της αρχής εναπόθεσης και μειωμένη ποσότητα υλικού στην πλευρά του τέλους της πορείας εναπόθεσης, κάτι που σε συνέβη κατά την αμφίδρομη στρατηγική. [8] Στην περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερο πάχος τοίχου από αυτό που προκύπτει από την ευθύγραμμη πορεία του ακροφυσίου με τη χρήση του σύρματος επιλεγμένου πάχους, τότε η εναπόθεση του υλικού σε κάθε στρώση μπορεί να ακολουθήσει παράλληλες πορείες στις οποίες χρειάζεται προσοχή στην αλληλοεπικάλυψή τους (overlapping), ζιγκ ζαγκ (oscillating) ή πορείες που προκύπτουν από το περίγραμμα (contours). [3]



Σχήμα 2-8: (α) Τυπική πορεία εκτύπωσης με χρήση συστήματος κίνησης 5 αξόνων, (β) Χωρισμός εκτύπωσης σε τμήματα, (γ) Πορείες εκτύπωσης για στοιχεία μεγαλύτερου πάχους [3]

## 2.9 Παράμετροι εκτύπωσης και επιρροή στον παραγόμενο φορέα

Οι παράμετροι που ορίζονται για την εκτύπωση ενός αντικειμένου ποικίλλουν και εξαρτώνται από τον τύπο του WAAM και το υλικό του σύρματος που χρησιμοποιείται. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το παραγόμενο στοιχείο είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την εκτύπωση, η οποία αυξάνεται όσο περισσότερα στρώματα προστίθενται λόγω συσσώρευσης θερμότητας. Στις παραμέτρους που είναι καθοριστικές για τις μηχανικές ιδιότητες και την αποδοτικότητα του τελικού προϊόντος περιλαμβάνονται οι εξής:

- Ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος (Wire Feed Speed):

Σύμφωνα με μελέτη για την επιρροή της ταχύτητας τροφοδοσίας στη γεωμετρία και τις μηχανικές ιδιότητες του σφαιριδίου συγκόλλησης, η παράμετρος αυτή είναι κρίσιμη για τον έλεγχο της πηγής θερμότητας. Μάλιστα, η εισροή θερμότητας συσχετίζεται γραμμικά με τη χαρακτηριστική γεωμετρία των σφαιριδίων συγκόλλησης. [25]

- Ταχύτητα κίνησης κεφαλής (Torch Travel Speed) ή Ταχύτητα συγκόλλησης (Welding Speed):

Με βάση έρευνα που διενεργήθηκε σχετικά με την επίδραση της ταχύτητας της κεφαλής στην μικροδομή και τη γεωμετρία του σφαιριδίου συγκόλλησης, αποκαλύφθηκε ότι επηρεάζονται σημαντικά από αυτήν την παράμετρο. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής είναι αντιστρόφως ανάλογη με την εισροή θερμότητας στη μέθοδο WAAM και εφόσον η μικροδομή του σφαιριδίου εξαρτάται από την πηγή θερμότητας άρα επηρεάζεται και από την ταχύτητα της κεφαλής. Μάλιστα, το πλάτος του σφαιριδίου συγκόλλησης επηρεάζεται περισσότερο από το ύψος του, επειδή η ταχύτητα της κεφαλής καθορίζει και τη γωνία επαφής. [26]

- Πηγή θερμότητας (Heat Input), Ένταση (Current), Τάση (Voltage):

Πρόκειται για πολύ κρίσιμες παραμέτρους στη διαδικασία WAAM. Κατά τους πολλαπλούς κύκλους σύντηξης και στερεοποίησης συμβαίνει ακανόνιστη διάδοση θερμότητας στο στοιχείο που κατασκευάζεται. [8] Αυτή καθορίζει τη γεωμετρία του στοιχείου, τις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή του. Η αύξηση στην εισροή θερμότητας επηρεάζει τους ρυθμούς ψύξης άρα και τη μικροδομή του στοιχείου που κατασκευάζεται. Από αυτή εξαρτώνται και οι μηχανικές του ιδιότητες. [8] Αξιοσημείωτη είναι η δημιουργία παραμενουσών τάσεων εξαιτίας αυξημένης εισροής θερμότητας, οι οποίες οδηγούν με τη σειρά τους σε παραμορφώσεις. [8] Έτσι ένα φαινόμενο που μπορεί να παρατηρηθεί είναι ο θερμικός λυγισμός του υποστρώματος, ο οποίος σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε είναι δυνατό να αποφεύγεται παρέχοντας ρεύμα υψηλής έντασης στα κάτω στρώματα και ρεύμα χαμηλής έντασης στα ανώτερα στρώματα. [27]

Σημειώνεται ακόμη, πως η συρρίκνωση και η παραμόρφωση είναι εφικτό να μετριαστούν με τη μείωση της εισροής θερμότητας. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί, σύμφωνα με τη σχέση (2-1) που προέκυψε από σχετική μελέτη, με τη μείωση της τάσης και/ή της έντασης του ρεύματος και/ή με την αύξηση της ταχύτητας κίνησης της κεφαλής. [28]

$$\text{Θερμότητα} = \text{Τάση} * \text{Ρεύμα} / \text{Ταχύτητα κίνησης κεφαλής} \quad (2-1)$$

- Θερμοκρασία υποστρώματος (Substrate Temperature):

Το σχήμα του εναποτιθέμενου υλικού καθορίζεται από τη θερμοκρασία προθέρμανσης του υποστρώματος. Όσο υψηλότερη είναι αυτή, τόσο μεγαλύτερο είναι το πάχος και μικρότερο το ύψος της εναποτιθέμενης στρώσης. [8]

- Θερμοκρασία ενδιάμεσης στρώσης (Interlayer Temperature):

Στην περίπτωση εκτύπωσης στοιχείων πολλών στρώσεων, η θερμοκρασία μεταξύ των αυτών είναι καθοριστικής σημασίας για την εξασφάλιση της επιθυμητής γεωμετρίας.

Μόνο με την κατάλληλη θερμοκρασία ενδιάμεσης στρώσης είναι εφικτό να προκύψει λεία και σταθερή επιφάνεια. Με τον περιορισμό της ανισοτροπίας στη γεωμετρία της επιφάνειας προκύπτουν ταυτόχρονα μειωμένες τιμές υπολειπόμενων τάσεων και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Η επίτευξη της κατάλληλης θερμοκρασίας ενδιάμεσου στρώματος εξαρτάται από τον χρόνο ψύξης των ενδιάμεσων στρωμάτων, ο οποίος οφείλει να είναι επαρκής. Ωστόσο, για την επιλογή του χρόνου αυτού λαμβάνονται υπόψη και οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος και ο χρόνος παραγωγής. [8]

- Μήκος τόξου (Arc Length):

Ως μήκος τόξου ορίζεται η απόσταση μεταξύ του άκρου του σύρματος συγκόλλησης και του υποστρώματος. Με κατάλληλο έλεγχο του μήκους τόξου καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης, είναι εφικτή η μείωση της τραχύτητας του τελικού προϊόντος. [8]



## 3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΥΠΟ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

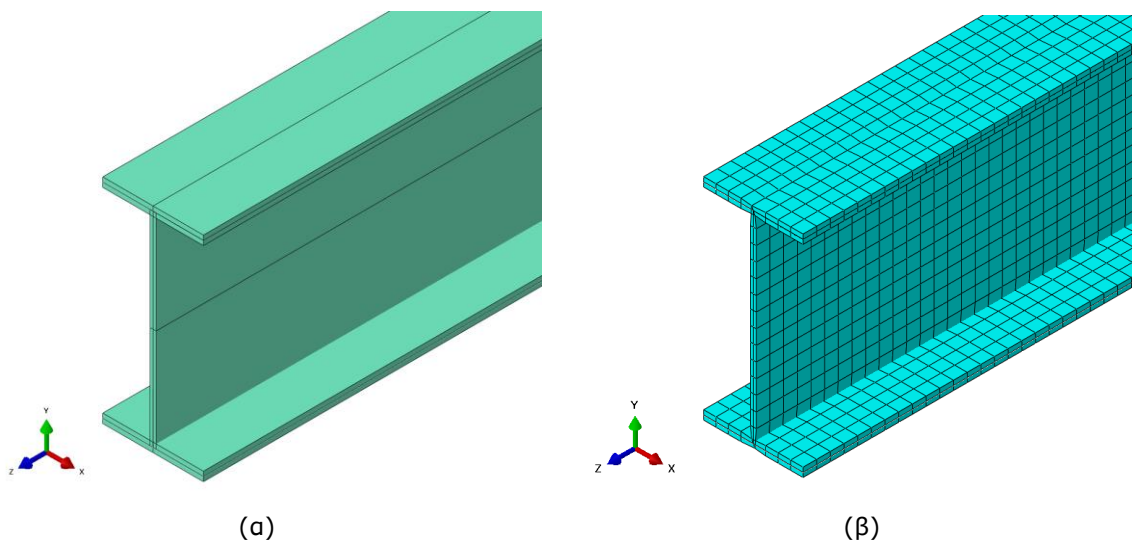
### 3.1 Γενική περιγραφή

Τη συνεχώς αυξανόμενη χρήση της τεχνικής WAAM σε εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα ευνοεί η έρευνα που πραγματοποιείται για τον ακριβή προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των φορέων που κατασκευάζονται. Προς αυτή την κατεύθυνση διερευνήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες και η απόκριση αμφιέρειστης δοκού ανοξείδωτου χάλυβα υπό ομοιόμορφη καμπτική φόρτιση. Η δοκός θεωρήθηκε πλευρικά εξασφαλισμένη, ενώ λήφθηκε υπόψη η επιρροή της μη γραμμικότητας του υλικού. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν 10 αναλύσεις με χρήση του προγράμματος ABAQUS, εκ των οποίων η πρώτη ήταν για συμβατικό χάλυβα S355 δοκού διατομής διπλού ταυ IPE200 και μήκους  $L=8$  m, προκειμένου να είναι δυνατή και η σύγκριση με τις τρισδιάστατα εκτυπωμένες δοκούς υλικού ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα 308LSi. Με τις 9 αναλύσεις των εκτυπωμένων με την τεχνολογία WAAM δοκών, ερευνήθηκε η επιρροή της κατεύθυνσης εναπόθεσης του υλικού στην απόκριση του στοιχείου. Οι αναλύσεις αυτές προέκυψαν από συνδυασμούς διαφορετικών γωνιών κατεύθυνσης υλικού  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=90^\circ$  για τον κορμό και τα πέλματα της δοκού, αντίστοιχα.

Τα χαρακτηριστικά της διατομής IPE200 θερμής έλασης που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στο Σχήμα 3-1. Για τον καθορισμό της γεωμετρίας του στοιχείου σε όλα τα μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν 18480 πεπερασμένα στοιχεία κελύφους 4 κόμβων τετράπλευρα με μειωμένη ολοκλήρωση και έλεγχο της «κλεψύδρας» (4-noded quadrilateral shell elements with reduced integration and hourglass control), S4R. Το επίπεδο των στοιχείων κελύφους ορίστηκε στο μέσο του πάχους τους (middle surface shell offset) (Σχήμα 3-2: (α))., ενώ τα στοιχεία διέθεταν 3 σημεία ολοκλήρωσης (3 integrated points) στο πάχος τους. Η διακριτοποίηση (meshing) έγινε με τον ορισμό μέγιστου μήκους πλευράς 13 mm (Σχήμα 3-2: (β)).

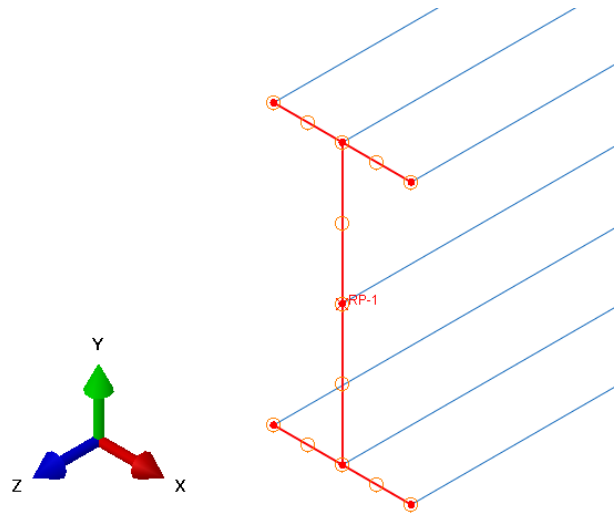
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΙΡΕ200	
$h = 200 \text{ mm}$	
$b = 100 \text{ mm}$	
$t_f = 8.5 \text{ mm}$	
$t_w = 5.6 \text{ mm}$	
$r_1 = 12 \text{ mm}$	
$y_s = 50 \text{ mm}$	
$d = 159 \text{ mm}$	
$A = 2850 \text{ mm}^2$	
$A_L = 0.77 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	

Σχήμα 3-1: Χαρακτηριστικά διατομής ΙΡΕ200 [29]

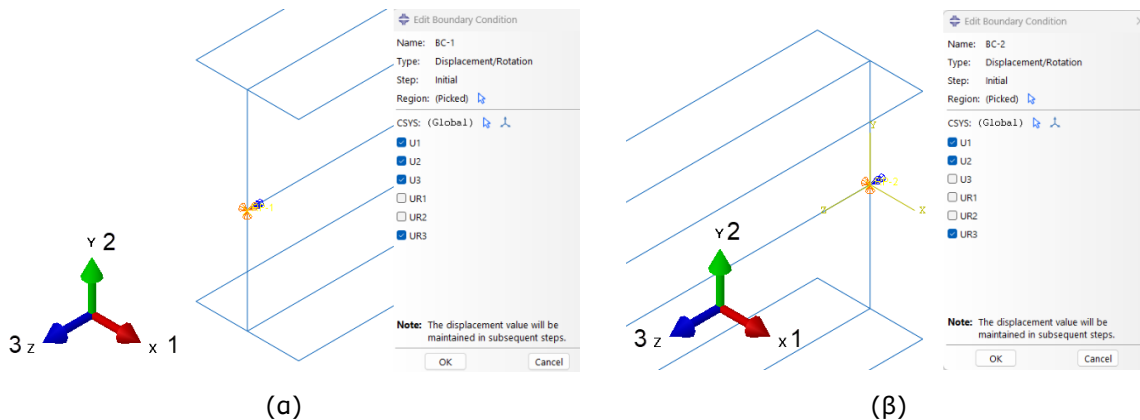


Σχήμα 3-2: Στοιχείο δοκού: (α) ορισμός επιπέδους κελύφους, (β) διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4R

Για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών εφαρμόστηκαν δεσμεύσεις άκαμπτου σώματος (rigid body constraints - pin) στις διατομές στα δύο άκρα με σημεία αναφοράς στο μέσο τους (Σχήμα 3-3). Για τον ορισμό της στήριξης άρθρωσης στην αρχή της δοκού δεσμεύτηκαν όλες οι μετακινήσεις ( $U1$ ,  $U2$ ,  $U3$ ) και η στροφή γύρω από τον διαμήκη άξονα ( $UR3$ ), ενώ για τη στήριξη κύλισης στο πέρας δεσμεύτηκαν η εγκάρσια και η κατακόρυφη μετακίνηση ( $U1$ ,  $U2$ ) και η στροφή γύρω από τον διαμήκη άξονα ( $UR3$ ) (Σχήμα 3-4).

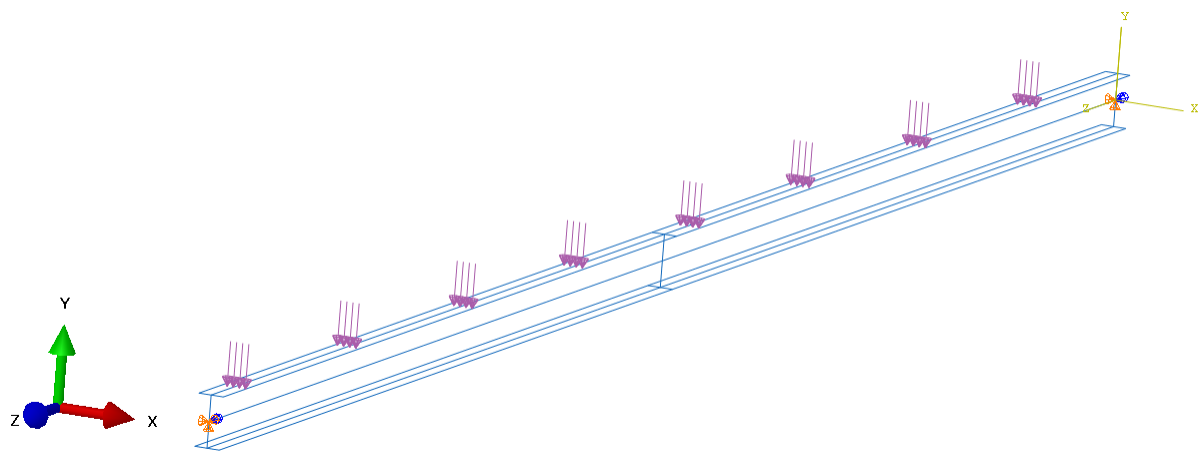


Σχήμα 3-3: Ορισμός άκαμπτου σώματος στις διατομές των άκρων της δοκού



Σχήμα 3-4: Ορισμός δεσμεύσεων μετακινήσεων και στροφών (α) στην αρχή (άρθρωση) και (β) στο πέρας (κύλιση) της δοκού

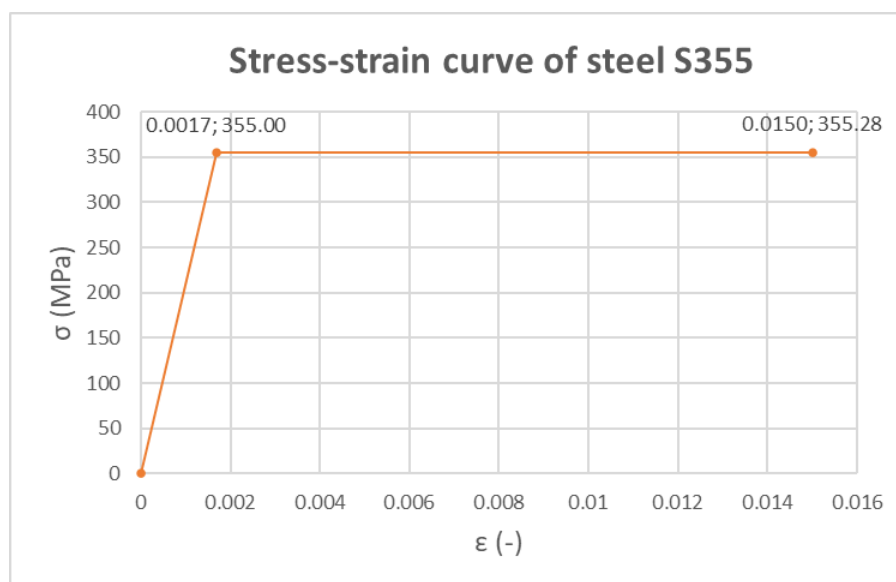
Στη δοκό εφαρμόστηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση στο άνω πέλμα. Αυτή εφαρμόστηκε με σταδιακά αυξανόμενη τιμή.



Σχήμα 3-5: Ομοιόμορφα κατανεμημένη καμπτική φόρτιση της δοκού

### 3.2 Αναλύσεις δοκών συμβατικού χάλυβα με επιρροή μη γραμμικότητας υλικού

Όσον αφορά στο μοντέλο προσομοίωσης της δοκού συμβατικού χάλυβα, για τον προσδιορισμό του υλικού έγινε μετατροπή της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα S355 σε διγραμμική μορφή. Η επιλογή του υλικού συμβατικού χάλυβα έγινε με βάση τις μηχανικές ιδιότητες του τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα 308LSi που χρησιμοποιήθηκε στις υπόλοιπες αναλύσεις, έτσι ώστε αυτές να είναι συγκρίσιμες. Η τιμές για τη μετατροπή αυτή ορίστηκαν με βάση τη νέα έκδοση του ευρωκώδικα 3 (καμπύλη b της παραγράφου §5.3.2, prEN 1993-1-14) [30]. Συγκεκριμένα, ορίστηκε γραμμικό ελαστικό – τέλεια πλαστικό μοντέλο υλικού για διατομές χάλυβα θερμής έλασης με κλίση του πλατό ίση με  $E/10000$  για αριθμητική ευστάθεια. Σημειώνεται πως τα αποτελέσματα στα γραφήματα όλων των αναλύσεων εξήχθησαν έως το σημείο που η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης είναι ίση με 0.015. Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του υλικού φαίνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6: Διγραμμική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων συμβατικού χάλυβα S355

Πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα του υλικού. Έτσι στο πρόγραμμα ορίστηκε STEP Static, General.

### 3.3 Αναλύσεις δοκών τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα με επιρροή μη γραμμικότητας υλικού

Για τα μοντέλα τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα με τη μέθοδο WAAM χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες ανοξείδωτου ωστενιτικού χάλυβα 308LSi. Πρόκειται για ορθότροπο υλικό, σε αντίθεση με τον ανθρακούχο συμβατικό χάλυβα που είναι ισότροπο. Τα δεδομένα προήλθαν από την πειραματική έρευνα των Hatjipantelis κ.α., 2022, κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν πειράματα εφελκυσμού σε dog bone δοκίμια με γωνίες εναπόθεσης υλικού 308LSi  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=90^\circ$  [14]. Οι γωνίες ορίστηκαν στο επίπεδο των dog bone δοκιμίων με βάση τη γωνία που σχηματίζει η κατεύθυνση εναπόθεσης του υλικού σε σχέση με τον διαμήκη άξονά τους (άξονας φόρτισης) [14]. Έτσι,  $\theta=0^\circ$  είναι όταν η κατεύθυνση



εναπόθεσης υλικού είναι παράλληλη με τον άξονα φόρτισης και  $\theta=90^\circ$  όταν είναι κάθετη με αυτή [14]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή εμφάνισαν τα δοκίμια γωνίας  $\theta=45^\circ$ , έπειτα ακολούθησαν τα δοκίμια γωνίας  $\theta=0^\circ$  και τη μικρότερη εφελκυστική αντοχή εμφάνισαν τα δοκίμια γωνίας  $\theta=90^\circ$  [14]. Τη χημική σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε σε μορφή σύρματος για την τροφοδοσία του εκτυπωτή παρουσιάζουν ο Πίνακας 3-1 και ο Πίνακας 3-2, αντίστοιχα [31].

Πίνακας 3-1: Χημική σύσταση σύρματος ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα 308LSi (τιμές %), σύμφωνα με τον κατασκευαστή [31]

C	Mn	Si	Mo	P	S	Cr	Ni	Ferrite
0.02	1.80	0.85	0.20	$\leq 0.025$	$\leq 0.020$	20	10	5–10

Πίνακας 3-2: Μηχανικές ιδιότητες σύρματος ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα 308LSi (τιμές %), σύμφωνα με τον κατασκευαστή [31]

Heat treatment	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation A5 (%)	Impact energy ISO – V (J) 20 °C
As-welded	$\geq 350$	$\geq 520$	$\geq 35$	$\geq 47$

Έπειτα από αριθμητική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας στη μελέτη των Hatjirantelis κ.α., 2022, προτείνεται ο ορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων με βάση τις παραμέτρους που παρουσιάζουν ο Πίνακας 3-3 και ο Πίνακας 3-4 για στοιχείο που δεν έχει υποστεί επεξεργασία φινιρίσματος πάχους 3.5 mm και 8 mm [14]. Η μελέτη περιλαμβάνει αντίστοιχες τιμές για την προσομοίωση στοιχείων τα οποία έχουν υποστεί επεξεργασία φινιρίσματος [14]. Η διεύθυνση αναφοράς για τις τιμές αυτές είναι η διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού  $x$  ή αλλιώς 1 [14].

Πίνακας 3-3: Παράμετροι περιγραφής ελαστικής και ανελαστικής απόκρισης ανισότροπου υλικού για στοιχεία κατασκευασμένα με την τεχνολογία WAAM χωρίς επεξεργασία φινιρίσματος με διεύθυνση αναφοράς τη διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού [14]

	Elastic response				Inelastic response			
	$\bar{E}_{x,eff}$ (GPa)	$\bar{E}_{y,eff}$ (GPa)	$\bar{\nu}_{xy,eff}$ ( )	$\bar{G}_{xy,eff}$ (GPa)	$R_{11}$ ( )	$R_{22}$ ( )	$R_{33}$ ( )	$R_{12}$ ( )
As-built 3.5 mm	137.4	96.0	0.458	98.1	1	0.784	1	1.045
As-built 8.0 mm	142.8	110.4	0.443	95.0	1	0.834	1	1.111

Πίνακας 3-4: Παράμετροι Ramberg - Osgood για στοιχεία κατασκευασμένα με την τεχνολογία WAAM χωρίς επεξεργασία φινιρίσματος με διεύθυνση αναφοράς τη διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού [14]

	Ramberg–Osgood parameters				
	$\sigma_{0.2,eff}$ (MPa)	$\sigma_{u,eff}$ (MPa)	$\epsilon_{u,eff}$ (%)	$n_{eff}$ ( )	$m_{u,eff}$ ( )
As-built 3.5 mm	333	553	27.3	15.5	2.2
As-built 8.0 mm	325	535	32.5	22.9	2.4

Η διατομή IPE200 έχει πάχος πελμάτων (flanges)  $t_f=5.6$  mm και πάχος κορμού (web)  $t_w=8.5$  mm. Ορίστηκαν δύο υλικά χάλυβα 308LSi, ένα για τα πέλματα και ένα για τον κορμό. Οι ιδιότητες του υλικού των πελμάτων προέκυψαν από τη γραμμική παρεμβολή των τιμών που παραθέτει ο Πίνακας 3-3, ενώ για τον κορμό χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές για πάχος ίσο με 8mm. Οι αναλύσεις όπως προαναφέρθηκε αφορούν σε ανοξειδωτο χάλυβα θεωρώντας πως δεν έχει εφαρμοστεί στα στοιχεία επεξεργασία φινιρίσματος. Η απόκριση τέτοιων στοιχείων επηρεάζεται από την ανομοιομορφία που προκύπτει στη γεωμετρία τους λόγω της

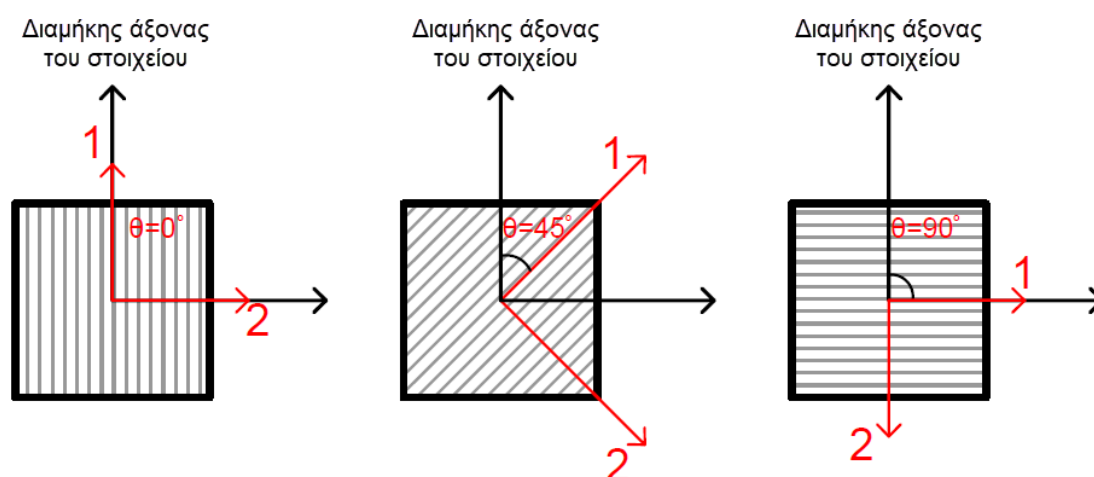
διαδικασίας εκτύπωσης. Συγκεκριμένα οι γεωμετρικοί κυματισμοί της επιφάνειας, παρόλο που είναι μικροί, επηρεάζουν το μέτρο ελαστικότητας, τον λόγο Poisson και το μέτρο διάτμησης [14]. Έτσι η απόκριση των στοιχείων δεν είναι απολύτως ορθότροπη αλλά ανισότροπη [14]. Αντιθέτως, η απόκριση στοιχείων που έχουν υποστεί επεξεργασία φινιρίσματος είναι ορθότροπη λόγω εξαφάνισης των γεωμετρικών ατελειών. Προκειμένου να είναι εφικτή η θεώρηση ορθότροπης συμπεριφοράς και στα στοιχεία χωρίς φινιρίσμα, στην μελέτη των Hatjirantelis κ.α., 2022 εφαρμόστηκε μια διαδικασία βελτιστοποίησης με την οποία προέκυψαν οι μειωμένες τιμές που παραθέτει ο Πίνακας 3-3 και ο Πίνακας 3-4. [14].

Η ελαστική απόκριση του υλικού προσομοιώθηκε με μοντέλο επίπεδης έντασης ορθότροπου υλικού (elastic, orthotropic, LAMINA). Τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζει ο Πίνακας 3-5. Το υλικό ορίζεται στους τοπικούς άξονες του στοιχείου. Το επίπεδο του κελύφους είναι κάθετο στον άξονα 3 και ορίζεται από τους άξονες 1 και 2. Η διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού συμπίπτει με τον άξονα 1 όπως φαίνεται στο παράδειγμα στο Σχήμα 3-7, ενώ η γωνία  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζει ο τοπικός άξονας 1 με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου.

Πίνακας 3-5: Πίνακας τιμών ελαστικής απόκρισης ορθότροπου υλικού 308LSi για την προσομοίωση δοκών στο πρόγραμμα ABAQUS

<b>t</b> <b>(mm)</b>	<b>E1</b> <b>(MPa)</b>	<b>E2</b> <b>(MPa)</b>	<b>v12</b> <b>(-)</b>	<b>G12</b> <b>(MPa)</b>	<b>G13</b> <b>(MPa)</b>	<b>G23</b> <b>(MPa)</b>
<b>3.5</b>	137400	96000	0.458	98100	98100	98100
<b>5.6</b>	139920	102720	0.451	96653	96653	96653
<b>8</b>	142800	110400	0.443	95000	95000	95000

\*Με πλάγια γραφή εμφανίζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη γραμμική παρεμβολή, αλλά όχι για το αριθμητικό προσομοίωμα



Σχήμα 3-7: Προσανατολισμός τοπικών αξόνων στους οποίους ορίζεται το υλικό σε σχέση με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου

Για την ανελαστική απόκριση του υλικού εφαρμόστηκε το κριτήριο Hill στην αριθμητική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων των Hatjirantelis κ.α., 2022 [14]. Ο πλαστικός κλάδος του υλικού μπορεί να προσομοιωθεί στο πρόγραμμα με διεύθυνση αναφοράς αυτήν της εναπόθεσης του υλικού μέσω του μοντέλου Ramberg – Osgood. Τις τιμές αυτού παρουσιάζει ο Πίνακας 3-6. Σημειώνεται πως οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας που χρησιμοποιούνται στην καμπύλη Ramberg – Osgood είναι οι τιμές που

μετρήθηκαν στα πειράματα εφελκυσμού και όχι αυτές που προέκυψαν έπειτα από τη βελτιστοποίηση [31, 21]. Το μέτρο ελαστικότητας για πάχος  $t=3.5$  mm είναι ίσο με  $E_{eff}=135.9$  GPa, αενώ για πάχος  $t=8$  mm είναι ίσο με  $E_{eff}=137.1$  GPa [31, 21].

Πίνακας 3-6: Πίνακας παραμέτρων Ramberg – Osgood υλικού 308LSi για την προσομοίωση δοκών στο πρόγραμμα ABAQUS

<b>t</b> <b>(mm)</b>	<b>E<sub>eff</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>σ<sub>0.2,eff</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>σ<sub>u,eff</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>ε<sub>u,eff</sub></b> <b>(%)</b>	<b>n<sub>eff</sub></b> <b>(-)</b>	<b>m<sub>u,eff</sub></b> <b>(-)</b>
<b>3.5</b>	135900	333	553	27.3	15.5	2.2
<b>5.6</b>	136460	329	545	29.7	19	2
<b>8</b>	137100	325	535	32.5	22.9	2.4

\*Με πλάγια γραφή εμφανίζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη γραμμική παρεμβολή, αλλά όχι για το αριθμητικό προσομοίωμα

Το μοντέλο Ramberg – Osgood περιγράφεται από τις σχέσεις (4-1), (4-2) και (4.3):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, \text{ for } \sigma \leq \sigma_{0.2} \quad (3-1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left( \varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_u - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^{m_u} + \varepsilon_{0.2}, \text{ for } \sigma_{0.2} < \sigma \leq \sigma_u \quad (3-2)$$

$$E_{0.2} = \frac{E}{1 + 0.002n \frac{E}{\sigma_{0.2}}} \quad (3-3)$$

όπου

- σ η μηχανική τάση
- ε η μηχανική παραμόρφωση
- E το μέτρο ελαστικότητας
- σ<sub>u</sub> η τάση αστοχίας
- σ<sub>0.2</sub> το τεχνικό όριο διαρροής
- E<sub>0.2</sub> το επαπτομενικό μέτρο της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων στο σ<sub>0.2</sub>
- ε<sub>u</sub> η συνολική παραμόρφωση στην τάση αστοχίας
- ε<sub>0.2</sub> η συνολική παραμόρφωση στο τεχνικό όριο διαρροής
- n, εκθέτες κράτυνσης που ορίζουν τον βαθμό καμπύλωσης της καμπύλης τάσεων
- m<sub>u</sub> παραμορφώσεων

[31].

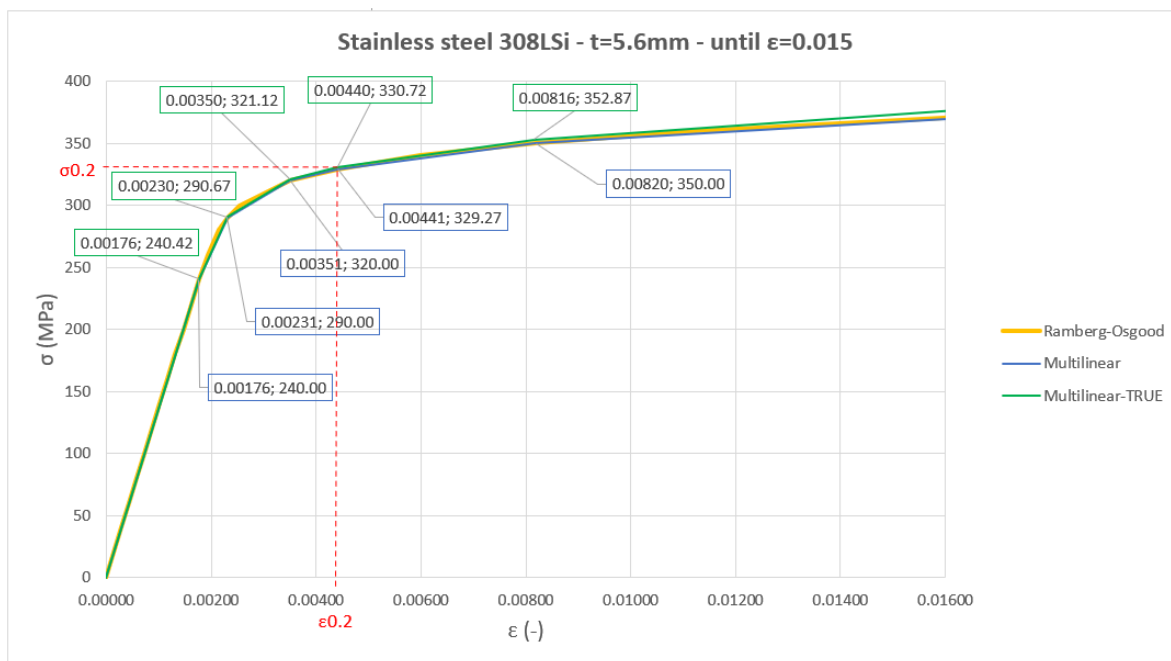
Για τον προσδιορισμό των τιμών που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ABAQUS αρχικά έγινε μετατροπή της καμπύλης Ramberg – Osgood σε πολυγραμμική μορφή (Multilinear) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8 και στο Σχήμα 3-9, για πάχη 5.6 mm και 8 mm, αντίστοιχα. Στη συνέχεια η καμπύλη αυτή μετατράπηκε από μηχανικές σε πραγματικές τιμές τάσεων – παραμορφώσεων (from engineering stress – strain curve to true stress – strain curve). Η μετατροπή αυτή έγινε με βάση τις σχέσεις (4-4), (4-5) και (4-6). Έτσι η τελική καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα είναι η «Multilinear-TRUE» που φαίνεται στο Σχήμα 3-8 και στο Σχήμα 3-9. Μέχρι τιμή παραμόρφωσης ίση με 0.015 η καμπύλη των πραγματικών τιμών είναι πολύ κοντά με αυτή των μηχανικών τιμών τάσεων – παραμορφώσεων, άρα η

επιλογή αυτή δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκριση των φορέων. Οι καμπύλες έως τις τιμές αστοχίας συμπεριλαμβάνονται στο Παράρτημα Α: Αναλύσεις αμφιέριστων δοκών υπό ομοιόμορφη καμπτική φόρτιση.

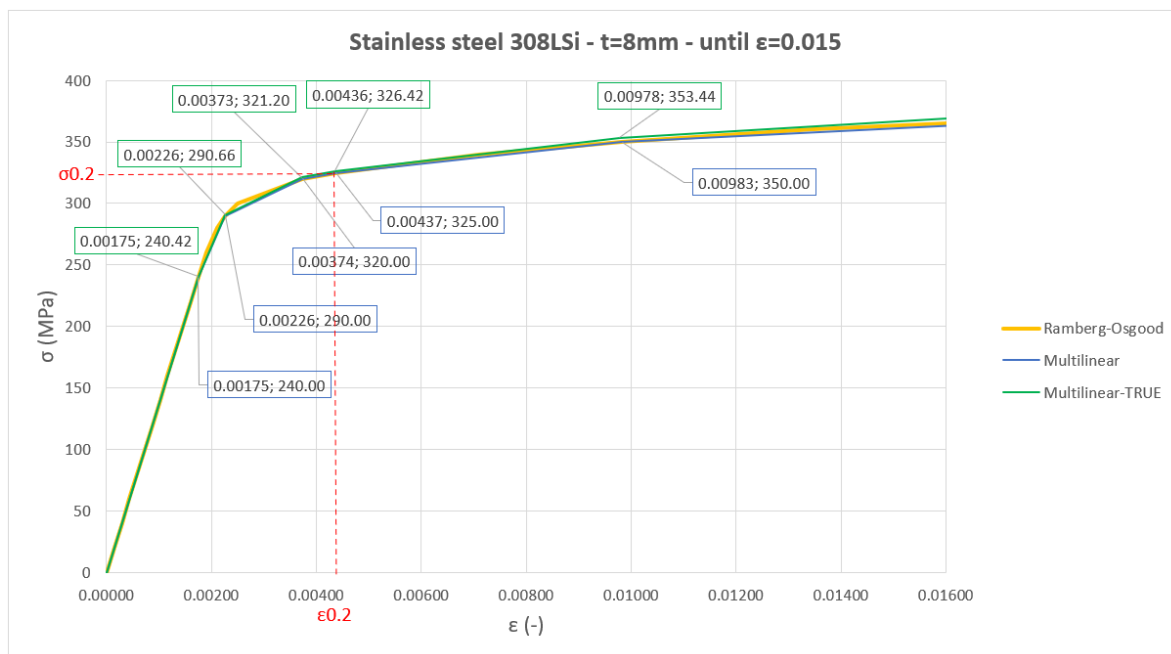
$$\sigma_{true} = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (3-4)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3-5)$$

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (3-6)$$



Σχήμα 3-8: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου  $t=5.6$  mm έως παραμόρφωση ίση με 0.015



Σχήμα 3-9: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου  $t=8$  mm έως παραμόρφωση ίση με 0.015

Στην προσομοίωση του υλικού 308LSi, εισήχθησαν οι τιμές R (plastic, POTENTIAL στο ABAQUS) έτσι ώστε να προσαρμοστούν οι τιμές των τάσεων που ορίστηκαν και να ληφθεί υπόψη η ανισοτροπία του υλικού (Πίνακας 3-7).

Πίνακας 3-7: Πίνακας τιμών πλαστικής απόκρισης ορθότροπου υλικού 308LSi για την προσομοίωση δοκών στο πρόγραμμα ABAQUS

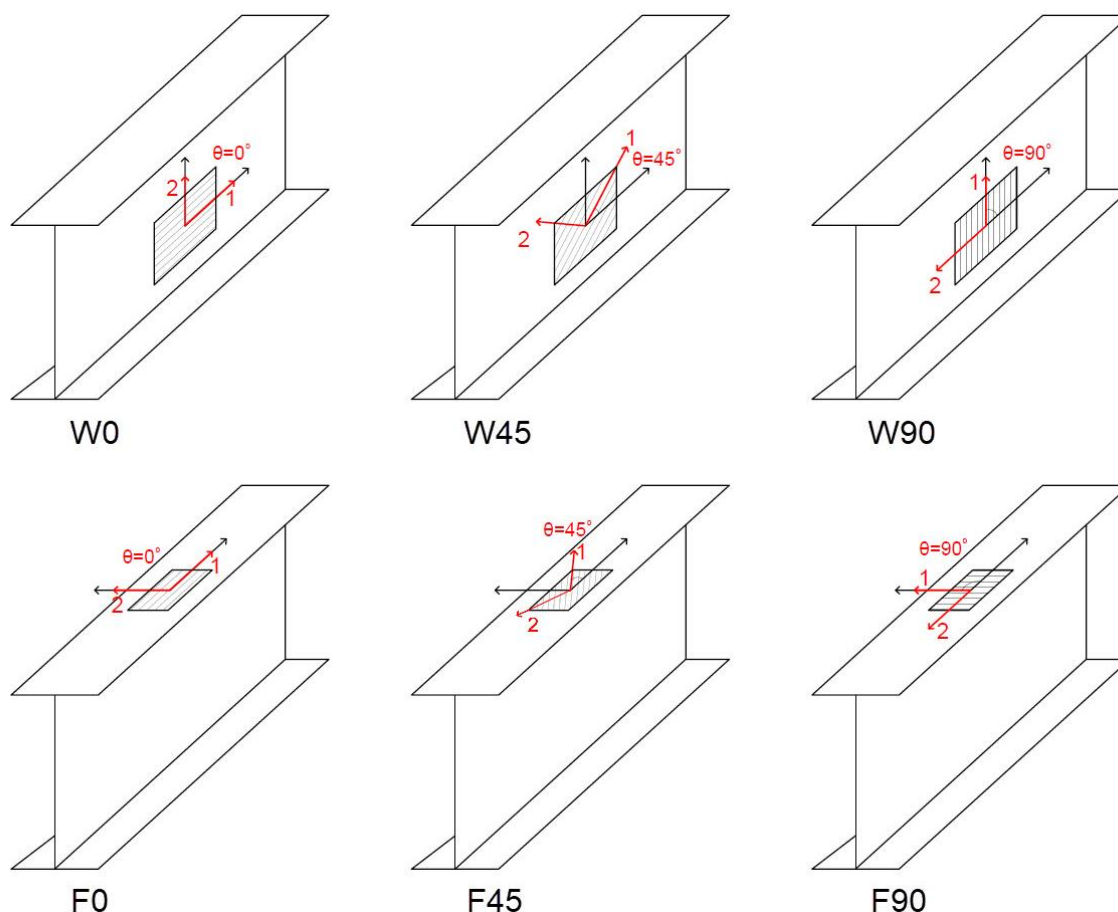
<b>t</b>	<b>R11</b>	<b>R22</b>	<b>R33</b>	<b>R12</b>	<b>R13</b>	<b>R23</b>
<b>(mm)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(-)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>3.5</b>	1	0.784	1	1.045	1	1
<b>5.6</b>	1	0.807	1	1.076	1	1
<b>8</b>	1	0.834	1	1.111	1	1

\*Με πλάγια γραφή εμφανίζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη γραμμική παρεμβολή, αλλά όχι για το αριθμητικό προσομοίωμα

Όπως προαναφέρθηκε, οι αναλύσεις για τις τρισδιάστατα εκτυπωμένες δοκούς με την τεχνολογία WAAM πραγματοποιήθηκαν για συνδυασμούς διαφορετικών γωνιών κατεύθυνσης εναπόθεσης υλικού  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=90^\circ$  για τον κορμό και τα πέλματα της δοκού. Η κατεύθυνση του υλικού ορίστηκε στα μοντέλα με την κατάλληλο ορισμό των αξόνων του υλικού (material orientation). Έτσι, προέκυψαν οι 9 συνδυασμοί διευθύνσεων υλικού κορμού (W0 για  $\theta=0^\circ$ , W45 για  $\theta=45^\circ$  και W90 για  $\theta=90^\circ$ ) και πελμάτων (F0 για  $\theta=0^\circ$ , F45 για  $\theta=45^\circ$  και F90 για  $\theta=90^\circ$ ), όπως παρουσιάζονται στον Πίνακας 3-8. Οι διαφορετικές διευθύνσεις εναπόθεσης του υλικού στον κορμό και στα πέλματα φαίνονται στο Σχήμα 3-10.

Πίνακας 3-8: Πίνακας συνδυασμών διευθύνσεων υλικού κορμού και πελμάτων των δοκών

<b>Όνομα συνδυασμού διευθύνσεων υλικού</b>	<b>Περιγραφή</b>
<b>W0-F0</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=0^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=0^\circ$
<b>W0-F45</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=0^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=45^\circ$
<b>W0-F90</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=0^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=90^\circ$
<b>W45-F0</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=45^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=0^\circ$
<b>W45-F45</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=45^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=45^\circ$
<b>W45-F90</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=45^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=90^\circ$
<b>W90-F0</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=90^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=0^\circ$
<b>W90-F45</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=90^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=45^\circ$
<b>W90-F90</b>	Γωνία διεύθυνσης υλικού κορμού $\theta=90^\circ$ - Γωνία διεύθυνσης υλικού πελμάτων $\theta=90^\circ$













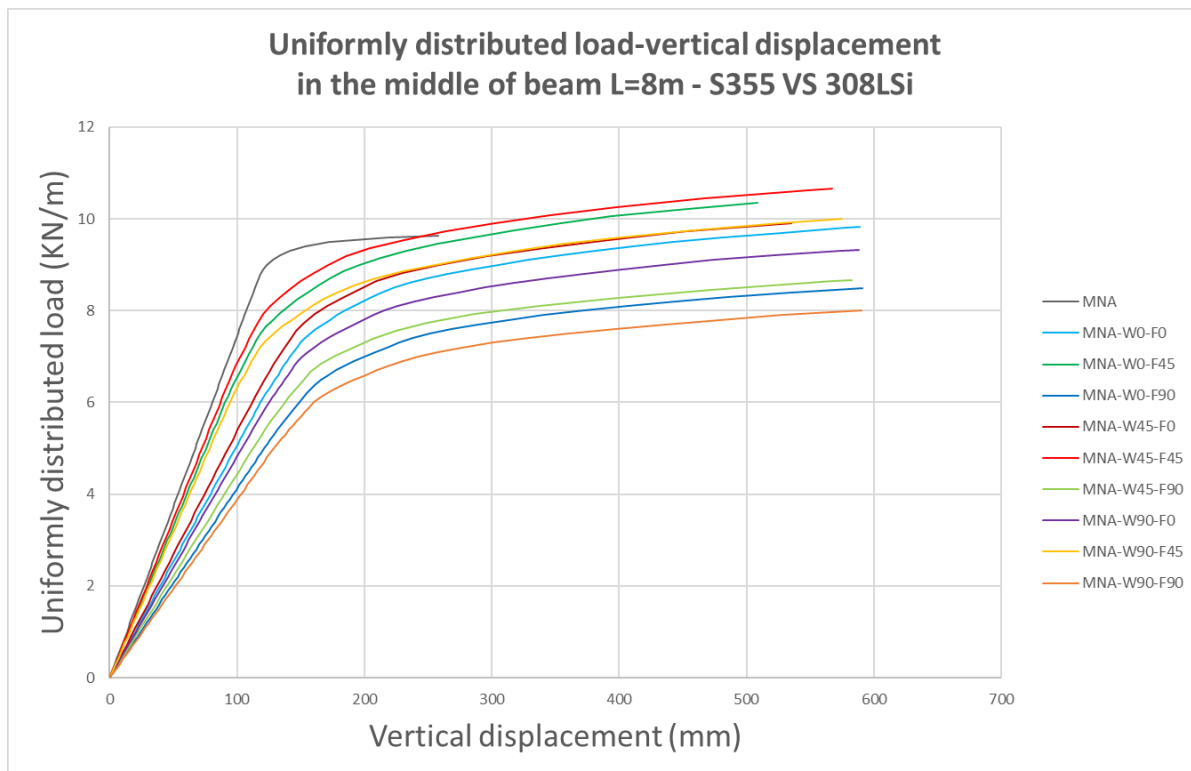
Σχήμα 3-10: Διευθύνσεις εναπόθεσης του υλικού στον κορμό (W0 για  $\theta=0^\circ$ , W45 για  $\theta=45^\circ$ , W90 για  $\theta=90^\circ$ ) και στα πέλματα (F0 για  $\theta=0^\circ$ , F45 για  $\theta=45^\circ$ , F90 για  $\theta=90^\circ$ ) των δοκών

### 3.4 Αποτελέσματα αναλύσεων δοκών

Από τις αναλύσεις των μοντέλων των δοκών που παρουσιάζει ο Πίνακας 3-9, προέκυψαν οι καμπύλες ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο των δοκών μήκους  $L=8$  m (Σχήμα 3-11). Σημειώνεται πως οι καμπύλες φτάνουν μέχρι παραμορφώσεις ίσες με 0.015, όπως προαναφέρθηκε.

Πίνακας 3-9: Πίνακας αναλύσεων αμφιέρειστων δοκών υπό ομοιόμορφη καμπτική φόρτιση

Model name	Color	Model description	Material	Type
<b>MNA</b>		Material Nonlinear Analysis	S355	Shell
<b>MNA-W0-F0</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=0^\circ$ - Flange $\theta=0^\circ$	308LSi	Shell
<b>MNA-W0-F45</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=0^\circ$ - Flange $\theta=45^\circ$	308LSi	Shell
<b>MNA-W0-F90</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=0^\circ$ - Flange $\theta=90^\circ$	308LSi	Shell
<b>MNA-W45-F0</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=45^\circ$ - Flange $\theta=0^\circ$	308LSi	Shell
<b>MNA-W45-F45</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=45^\circ$ - Flange $\theta=45^\circ$	308LSi	Shell
<b>MNA-W45-F90</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=45^\circ$ - Flange $\theta=90^\circ$	308LSi	Shell
<b>MNA-W90-F0</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=90^\circ$ - Flange $\theta=0^\circ$	308LSi	Shell
<b>MNA-W90-F45</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=90^\circ$ - Flange $\theta=45^\circ$	308LSi	Shell
<b>MNA-W90-F90</b>		Material Nonlinear Analysis – Web $\theta=90^\circ$ - Flange $\theta=90^\circ$	308LSi	Shell



Σχήμα 3-11: Διαγράμματα ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο των δοκών μήκους L=8 m για υλικό συμβατικού χάλυβα S355 και τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα 308LSi

Παρατηρώντας το Σχήμα 3-11 και τις αντοχές κάθε δοκού προκύπτει η φθίνουσα σειρά με βάση την καμπτική τους αντοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-12.

MNA-W45-F45	Red
MNA-W0-F45	Green
MNA-W90-F45	Yellow
MNA-W45-F0	Dark Red
MNA-W0-F0	Light Blue
MNA	Grey
MNA-W90-F0	Purple
MNA-W45-F90	Light Green
MNA-W0-F90	Dark Blue
MNA-W90-F90	Brown

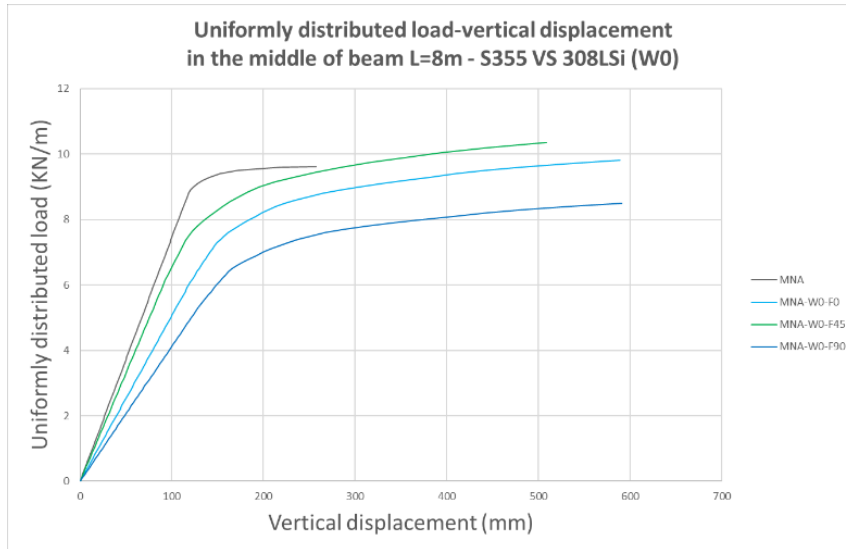
Σχήμα 3-12: Φθίνουσα σειρά δοκών με βάση την καμπτική τους αντοχή

Η αντοχή σε κάμψη της δοκού συμβατικού χάλυβα βρίσκεται κάπου στη μέση σε σχέση με τα μοντέλα των κατασκευασμένων με την τεχνολογία WAAM δοκών. Στα τελευταία παρατηρείται πως μεγαλύτερη αντοχή παρουσιάζουν τα μοντέλα με διεύθυνση υλικού πελμάτων γωνίας  $\theta=45^\circ$ , έπειτα ακολουθούν αυτά με γωνία  $\theta=0^\circ$  στα πέλματα και τελευταία αυτά με  $\theta=90^\circ$ . Επομένως, καθοριστικό ρόλο στην απόκριση των δοκών σε κάμψη έχει ο προσανατολισμός εναπόθεσης του υλικού στα πέλματα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς η συνεισφορά των πελμάτων στην καμπτική ικανότητας, στη ροπή αδράνειας και στη ροπή αντίστασης είναι περίπου 85%, ενώ η συνεισφορά του κορμού είναι περίπου 15%. Την απόκριση των δοκών σε κάμψη επηρεάζει και η διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού στο

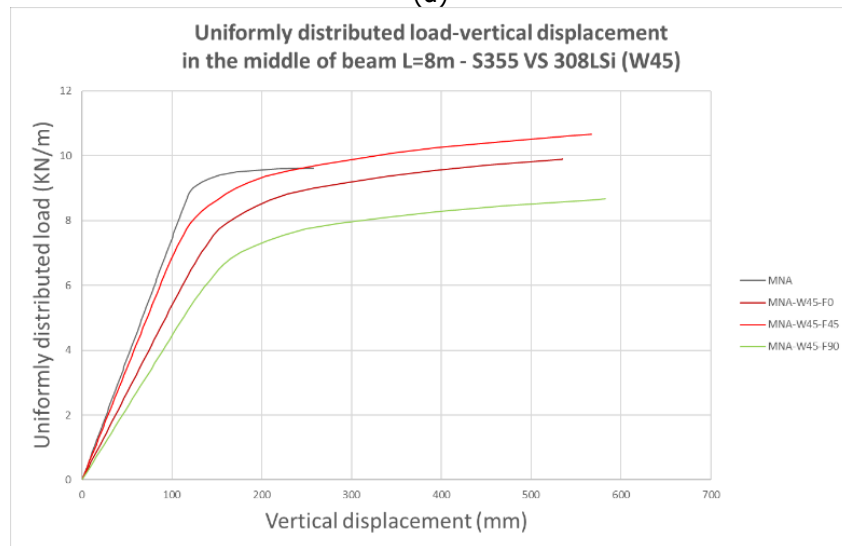
κορμό, με τη γωνία  $\theta=45^\circ$  να προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή από τη γωνία  $\theta=0^\circ$  και τη μικρότερη αντοχή να προκύπτει από γωνία ίση με  $\theta=90^\circ$ .

Στη συνέχεια απομονώθηκαν τα οι καμπύλες με σταθερές της τρεις γωνίες εναπόθεσης υλικού στον κορμό στο Σχήμα 3-13 και στα πέλματα στο Σχήμα 3-14. Παρατηρώντας τα δύο σχήματα συμπεραίνεται πως για σταθερές διευθύνσεις του υλικού κορμού οι αποκλίσεις των καμπτικών αντοχών είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις περιπτώσεις σταθερών διευθύνσεων υλικού πελμάτων. Επιπρόσθετα, για ίδια γωνία εναπόθεσης υλικού των πελμάτων, όταν οι γωνίες στον κορμό είναι ίσες με  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=0^\circ$  τότε οι τιμές των καμπτικών αντοχών είναι πιο κοντά μεταξύ τους σε σχέση με την μικρότερη τιμή για  $\theta=0^\circ$  η οποία απέχει περισσότερο από αυτές Σχήμα 3-14.

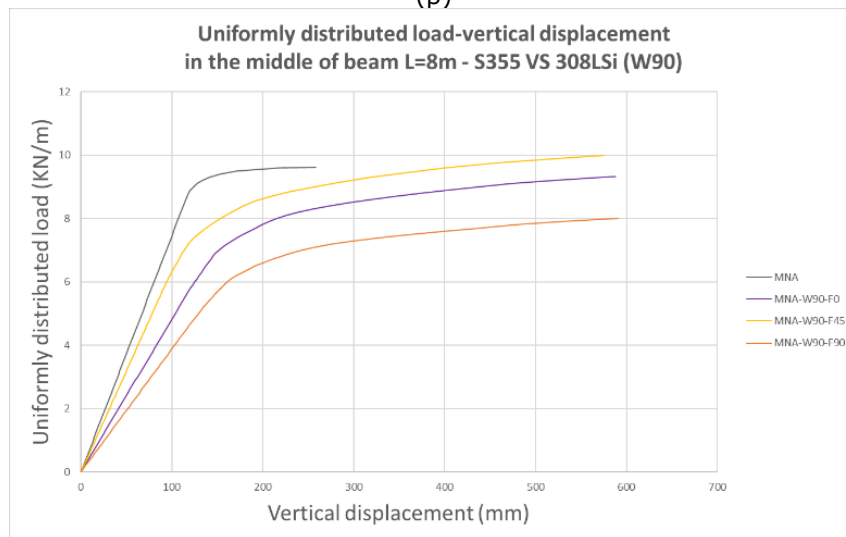




(α)

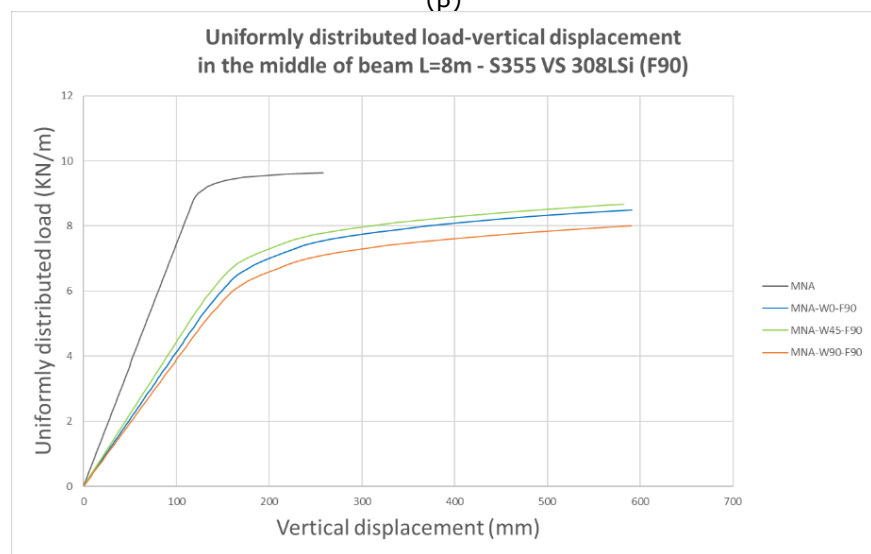
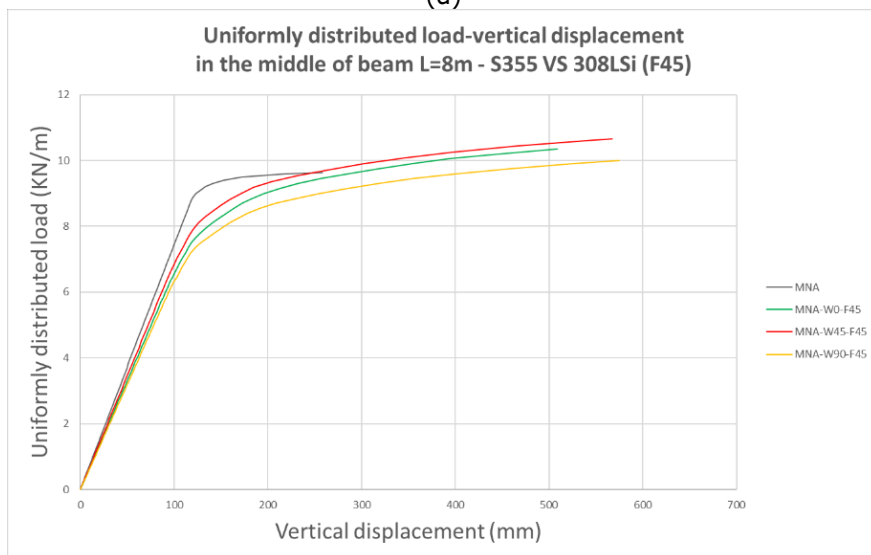
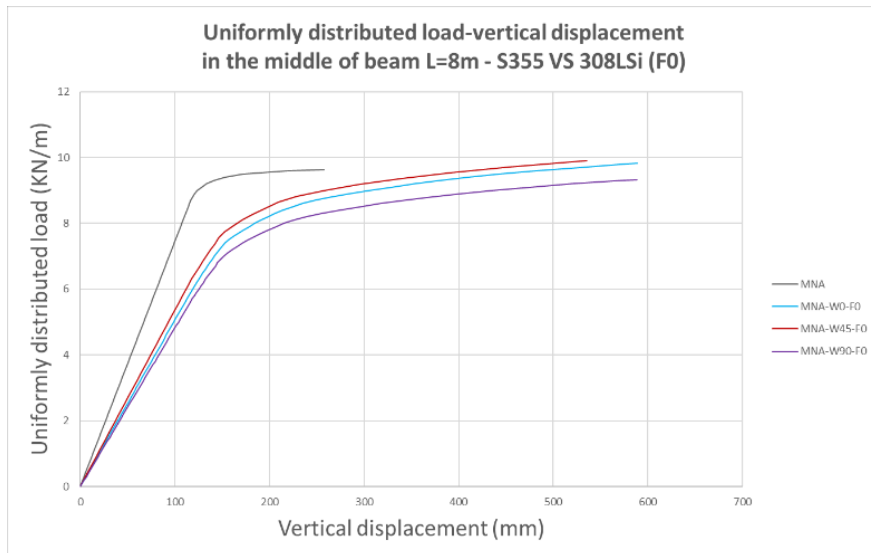


(β)



(γ)

Σχήμα 3-13: Διαγράμματα ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο των δοκών μήκους  $L=8$  m για υλικό συμβατικού χάλυβα S355 και τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα 308LSi με σταθερή γωνία εναπόθεσης υλικού κορμού (α)  $\theta=0^\circ$ , (β)  $\theta=45^\circ$  και (γ)  $\theta=90^\circ$



Σχήμα 3-14: Διαγράμματα ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο των δοκών μήκους  $L=8$  m για υλικό συμβατικού χάλυβα S355 και τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα 308LSi με σταθερή γωνία εναπόθεσης υλικού πελμάτων (α)  $\theta=0^\circ$ , (β)  $\theta=45^\circ$  και (γ)  $\theta=90^\circ$

## 4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

### 4.1 Γενική περιγραφή

Εκτός από την απόκριση στοιχείων σε κάμψη, διερευνήθηκε και η απόκριση σε θλίψη. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν μοντέλα αμφιέρειστων υποστυλωμάτων στα οποία ασκήθηκε αξονικό θλιπτικό φορτίο στην κορυφή τους. Ερευνήθηκε η επιρροή της μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας σε τέλειους και ατελείς φορείς συμβατικού χάλυβα S355 και τρισδιάστατα εκτυπωμένου ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα 308LSi για τρία διαφορετικά ύψη υποστυλωμάτων. Η διατομή αυτών ήταν κοίλη κυκλική CHS101.6x4 και τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-1. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 65 αναλύσεις με τη χρήση του προγράμματος ABAQUS. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν 18 αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων στερεού σώματος συμβατικού χάλυβα S355 με συνδυασμούς μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας σε τέλειους φορείς και σε φορείς με ατέλεια. Οι 6 από αυτές τις αναλύσεις αφορούσαν σε στύλους ύψους  $H=8$  m, οι 6 σε στύλους ύψους  $H=5$  m και οι υπόλοιπες 6 σε στύλους ύψους  $H=2$  m. Άλλα 18 όμοια μοντέλα δημιουργήθηκαν με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους. Για τη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της απόκρισης υποστυλωμάτων τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα με την τεχνολογία WAAM υπό θλίψη πραγματοποιήθηκαν 27 αναλύσεις (9 για κάθε ύψος στύλων  $H=8$  m,  $H=5$  m και  $H=2$  m για γωνίες διεύθυνσης εναπόθεσης υλικού  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=90^\circ$ ). Εξετάστηκε η επιρροή της μη γραμμικότητας του υλικού σε τέλειους φορείς και η επιρροή του συνδυασμού μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας σε φορείς με ατέλεια ίση με αυτή που ορίζει ο ευρωκώδικας 3 και χρησιμοποιήθηκε και στα μοντέλα συμβατικού χάλυβα. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν άλλες δύο αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με μικρότερες τιμές ατέλεια για στύλους ύψους  $H=8$  m. Το σύνολο των αναλύσεων αμφιέρειστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο παρουσιάζει ο Πίνακας 4-1.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ CHS101.6x4	
D = 101.6 mm	
T = 4 mm	
A = 1230 mm <sup>2</sup>	
A <sub>L</sub> = 0.319 m <sup>2</sup> .m <sup>-1</sup>	
G = 9.63 kg.m <sup>-1</sup>	

Σχήμα 4-1: Χαρακτηριστικά διατομής CHS101.6x4 [29]

Πίνακας 4-1: Πίνακας αναλύσεων αμφιέρειστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο

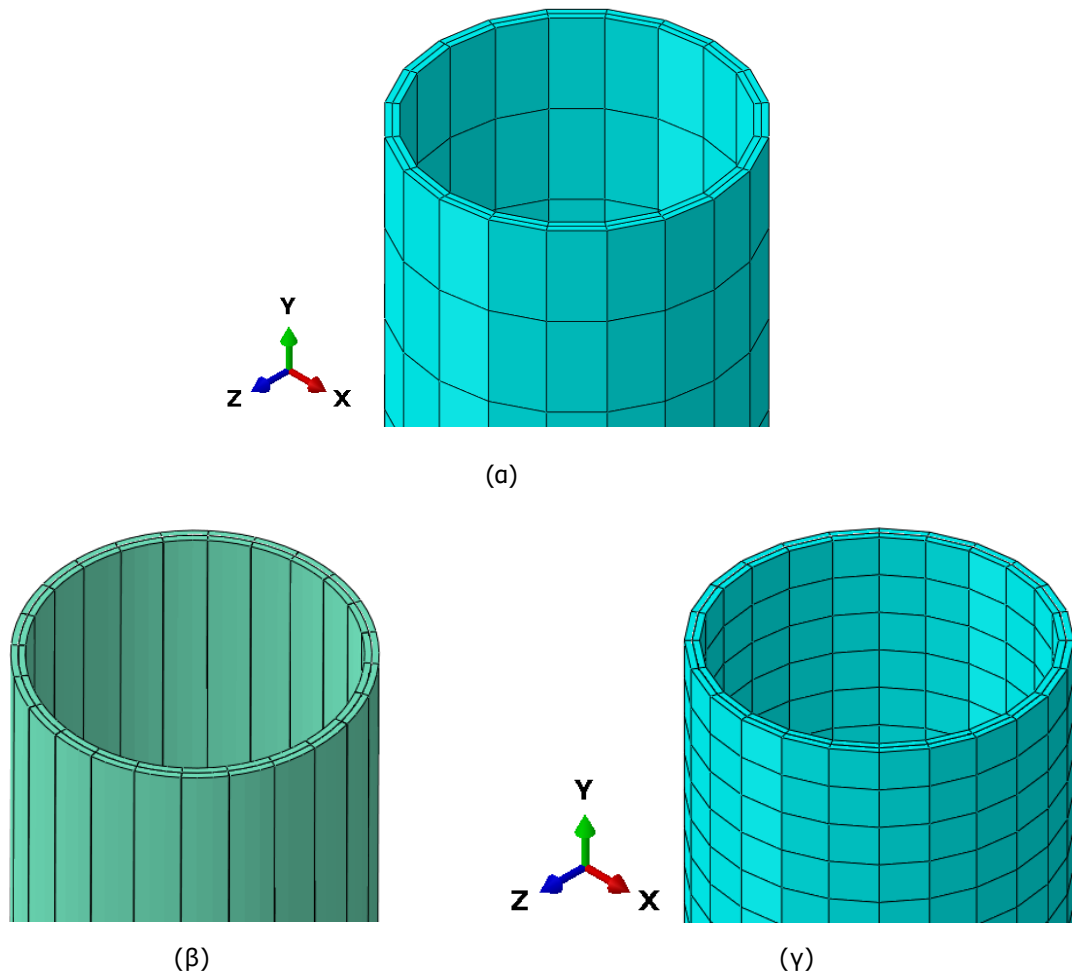
Model name	Model description	H (m)	Material	Type
<b>MNA-H8-SO</b>	Material Nonlinear Analysis	8	S355	Solid
<b>GNA-H8-SO</b>	Geometric Nonlinear Analysis	8	S355	Solid
<b>GMNA-H8-SO</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis	8	S355	Solid
<b>GNIA-H8-SO</b>	Geometric Nonlinear Analysis with Imperfection 30.4 mm	8	S355	Solid
<b>GMNIA-H8-SO</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 30.4 mm	8	S355	Solid
<b>LBA-H8-SO</b>	Linear Buckling Analysis	8	S355	Solid
<b>MNA-H5-SO</b>	Material Nonlinear Analysis	5	S355	Solid
<b>GNA-H5-SO</b>	Geometric Nonlinear Analysis	5	S355	Solid
<b>GMNA-H5-SO</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis	5	S355	Solid
<b>GNIA-H5-SO</b>	Geometric Nonlinear Analysis with Imperfection 19.0 mm	5	S355	Solid
<b>GMNIA-H5-SO</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 19.0 mm	5	S355	Solid
<b>LBA-H5-SO</b>	Linear Buckling Analysis	5	S355	Solid
<b>MNA-H2-SO</b>	Material Nonlinear Analysis	2	S355	Solid
<b>GNA-H2-SO</b>	Geometric Nonlinear Analysis	2	S355	Solid
<b>GMNA-H2-SO</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis	2	S355	Solid
<b>GNIA-H2-SO</b>	Geometric Nonlinear Analysis with Imperfection 7.6 mm	2	S355	Solid
<b>GMNIA-H2-SO</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 7.6 mm	2	S355	Solid
<b>LBA-H2-SO</b>	Linear Buckling Analysis	2	S355	Solid
<b>MNA-H8-SH</b>	Material Nonlinear Analysis	8	S355	Shell
<b>GNA-H8-SH</b>	Geometric Nonlinear Analysis	8	S355	Shell
<b>GMNA-H8-SH</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis	8	S355	Shell
<b>GNIA-H8-SH</b>	Geometric Nonlinear Analysis with Imperfection 30.4 mm	8	S355	Shell
<b>GMNIA-H8-SH</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 30.4 mm	8	S355	Shell
<b>LBA-H8-SH</b>	Linear Buckling Analysis	8	S355	Shell

<b>Model name</b>	<b>Model description</b>	<b>H (m)</b>	<b>Material</b>	<b>Type</b>
<b>MNA-H5-SH</b>	Material Nonlinear Analysis	5	S355	Shell
<b>GNA-H5-SH</b>	Geometric Nonlinear Analysis	5	S355	Shell
<b>GMNA-H5-SH</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis	5	S355	Shell
<b>GNIA-H5-SH</b>	Geometric Nonlinear Analysis with Imperfection 19.0 mm	5	S355	Shell
<b>GMNIA-H5-SH</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 19.0 mm	5	S355	Shell
<b>LBA-H5-SH</b>	Linear Buckling Analysis	5	S355	Shell
<b>MNA-H2-SH</b>	Material Nonlinear Analysis	2	S355	Shell
<b>GNA-H2-SH</b>	Geometric Nonlinear Analysis	2	S355	Shell
<b>GMNA-H2-SH</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis	2	S355	Shell
<b>GNIA-H2-SH</b>	Geometric Nonlinear Analysis with Imperfection 7.6 mm	2	S355	Shell
<b>GMNIA-H2-SH</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 7.6 mm	2	S355	Shell
<b>LBA-H2-SH</b>	Linear Buckling Analysis	2	S355	Shell
<b>MNA-0-H8</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=0^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-0-H8</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 30.4 mm - $\theta=0^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>MNA-45-H8</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=45^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-45-H8</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 30.4 mm - $\theta=45^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>MNA-90-H8</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=90^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-90-H8</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 30.4 mm - $\theta=90^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>LBA-0-H8</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=0^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>LBA-45-H8</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=45^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>LBA-90-H8</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=90^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>MNA-0-H5</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=0^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-0-H5</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 19.0 mm - $\theta=0^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>MNA-45-H5</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=45^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-45-H5</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 19.0 mm - $\theta=45^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>MNA-90-H5</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=90^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-90-H5</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 19.0 mm - $\theta=90^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>LBA-0-H5</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=0^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>LBA-45-H5</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=45^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>LBA-90-H5</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=90^\circ$	5	S308LSi	Shell
<b>MNA-0-H2</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=0^\circ$	2	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-0-H2</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 7.6 mm - $\theta=0^\circ$	2	S308LSi	Shell
<b>MNA-45-H2</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=45^\circ$	2	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-45-H2</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 7.6 mm - $\theta=45^\circ$	2	S308LSi	Shell
<b>MNA-90-H2</b>	Material Nonlinear Analysis - $\theta=90^\circ$	2	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-90-H2</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 7.6 mm - $\theta=90^\circ$	2	S308LSi	Shell

Model name	Model description	H (m)	Material	Type
<b>LBA-0-H2</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=0^\circ$	2	S308LSi	Shell
<b>LBA-45-H2</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=45^\circ$	2	S308LSi	Shell
<b>LBA-90-H2</b>	Linear Buckling Analysis - $\theta=90^\circ$	2	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-45-H8_4</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 4 mm - $\theta=45^\circ$	8	S308LSi	Shell
<b>GMNIA-45-H8_0.4</b>	Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection 0.4 mm - $\theta=45^\circ$	8	S308LSi	Shell

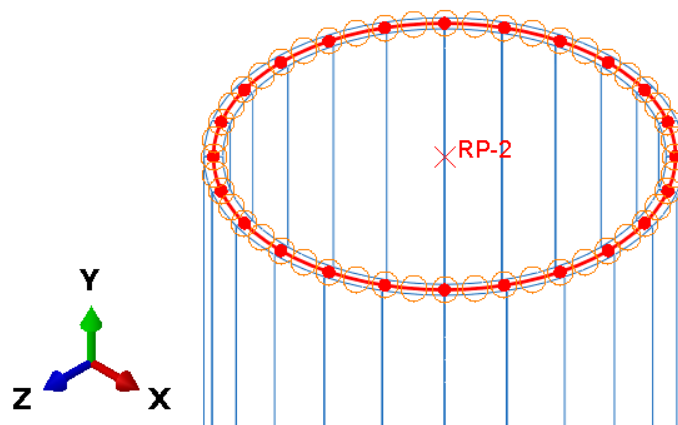
Στα μοντέλα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία όγκου (χάλυβας S355) χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία όγκου 8 κόμβων τριών διαστάσεων με μειωμένη ολοκλήρωση και έλεγχο της «κλεψύδρας» (8-noded linear brick solid elements with reduced integration and hourglass control), C3D8R. Η διακριτοποίηση (meshing) έγινε με τον ορισμό μέγιστου μήκους πλευράς 15 mm, ενώ η στύλοι διακριτοποιήθηκαν στο πάχος τους σε δύο τμήματα (Σχήμα 4-2: (α)). Οι στύλοι ύψους H=8 m προσομοιώθηκαν με 21280 πεπερασμένα στοιχεία όγκου, για το ύψος των 5 m χρησιμοποιήθηκαν 6880 στοιχεία, ενώ για το ύψος των 2 m χρησιμοποιήθηκαν 2800 στοιχεία.

Στα μοντέλα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (χάλυβας S355 και 308LSi) χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους 4 κόμβων τετράπλευρα με μειωμένη ολοκλήρωση και έλεγχο της «κλεψύδρας» (4-noded quadrilateral shell elements with reduced integration and hourglass control), S4R. Το επίπεδο των στοιχείων κελύφους ορίστηκε στο μέσο του πάχους τους (middle surface shell offset) (Σχήμα 4-2: (β)), ενώ τα στοιχεία διέθεταν 3 σημεία ολοκλήρωσης (3 integrated points) στο πάχος τους. Η διακριτοποίηση (meshing) έγινε με τον ορισμό μέγιστου μήκους πλευράς 13 mm, ενώ η κυκλική διατομή διακριτοποιήθηκε σε 24 τμήματα (Σχήμα 4-2: (γ)). Τα υποστυλώματα ύψους H=8 m προσομοιώθηκαν με 16032 πεπερασμένα στοιχεία όγκου, για το ύψος των 5 m χρησιμοποιήθηκαν 9984 στοιχεία, ενώ για το ύψος των 2 m χρησιμοποιήθηκαν 3884 στοιχεία.

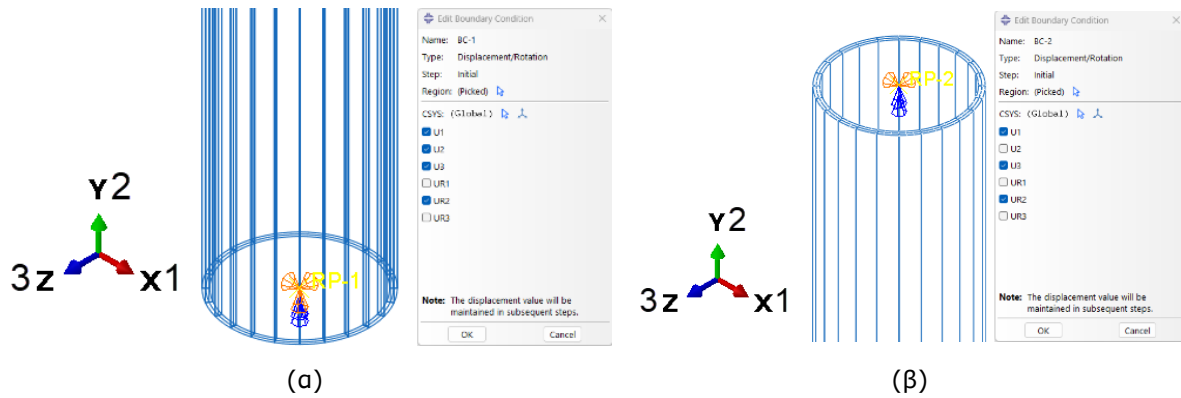


Σχήμα 4-2: Στοιχείο στύλου: (α) διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία όγκου C3D8R, (β) ορισμός επιπέδους κελύφους, (γ) διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους S4R

Για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών εφαρμόστηκαν δεσμεύσεις άκαμπτου σώματος (rigid body constraints - pin) στις διατομές στα δύο άκρα με σημεία αναφοράς το κέντρο της κυκλικής διατομής (Σχήμα 4-3). Για τον ορισμό της στήριξης άρθρωσης κάτω άκρο του στύλου δεσμεύτηκαν όλες οι μετακινήσεις ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ) και η στροφή γύρω από τον διαμήκη άξονα ( $UR_2$ ), ενώ για τη στήριξη κύλισης στο άνω άκρο δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις στην ακτινική διεύθυνση και στη διεύθυνση της τροχιάς ( $U_1$ ,  $U_3$ ) και η στροφή γύρω από τον διαμήκη άξονα ( $UR_2$ ) (Σχήμα 4-4).

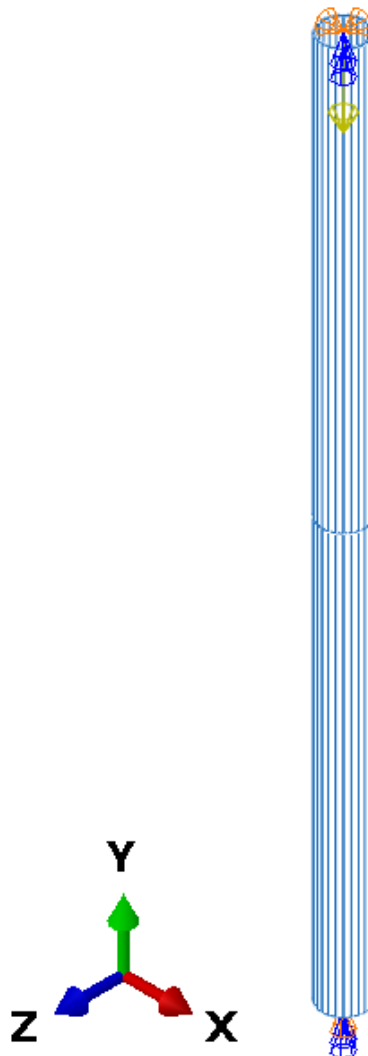


Σχήμα 4-3: Ορισμός άκαμπτου σώματος στις διατομές των άκρων του στύλου



Σχήμα 4-4: Ορισμός δεσμεύσεων μετακινήσεων και στροφών (α) στο κάτω άκρο (άρθρωση) και (β) στο άνω άκρο (κύλιση) του στύλου

Στο υποστύλωμα εφαρμόστηκε θλιπτική δύναμη στην κορυφή. Αυτή εφαρμόστηκε με σταδιακά αυξανόμενη τιμή.



Σχήμα 4-5: Αξονικό θλιπτικό φορτίο στην κορυφή του στύλου

Τα διαφορετικά ήδη των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν ορίστηκαν με τον ανάλογο τρόπο στο πρόγραμμα ABAQUS. Για τις στατικές αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού (MNA),



μη γραμμικότητας γεωμετρίας (GNA) και συνδυασμού μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας (GMNA) τέλειου φορέα ορίστηκε STEP Static, General. Για τις γραμμικές ιδιομορφικές αναλύσεις λυγισμού (LBA) ορίστηκε STEP Buckle. Από αυτές προέκυψαν τα ελαστικά φορτία λυγισμού των υποστυλωμάτων, ενώ η παραμορφωσιακή κατάσταση της πρώτης ιδιομορφής εφαρμόστηκε στις αρχικές συνθήκες των αναλύσεων φορέων με ατέλεια (σε ανάλογη κλίμακα για τον ορισμό του μεγέθους της ατέλειας) με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNIA) και με συνδυασμό μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας (GMNIA).

#### 4.2 Αναλύσεις στύλων συμβατικού χάλυβα με επιρροή μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας

Όσον αφορά στο μοντέλο προσομοίωσης των στύλων συμβατικού χάλυβα, για τον προσδιορισμό του υλικού έγινε μετατροπή της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα S355 σε διγραμμική μορφή όπως φαίνεται στο διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων στο Σχήμα 3-6. Η επιλογή του υλικού συμβατικού χάλυβα έγινε με βάση τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού 308LSi που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα, έτσι ώστε αυτές να είναι συγκρίσιμες. Σημειώνεται πως τα αποτελέσματα στα γραφήματα όλων των αναλύσεων εξήχθησαν έως το σημείο που η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης είναι ίση με 0.015.

Οι ατέλειες στις αναλύσεις GNIA και GMNIA για τα διαφορετικά ύψη των υποστυλωμάτων ορίστηκαν με βάση τον νέο ευρωκώδικα 3 [32]. Έτσι για καμπτικό λυγισμό περί τον άξονα z-z της διατομής θερμής έλασης CHS101.6x4, χάλυβα S355 (καμπύλη λυγισμού a) προέκυψαν οι εξής ατέλειες:

- 30.37 mm για υποστύλωμα ύψους H=8 mm
- 18.98 mm για υποστύλωμα ύψους H=5 mm και
- 7.59 mm για υποστύλωμα ύψους H=2 mm

#### 4.3 Αναλύσεις στύλων τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα με επιρροή μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας

Οι ιδιότητες του υλικού του τρισδιάστατα εκτυπωμένου ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα 308LSi προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην §3.3. Η ελαστική απόκριση του υλικού προσομοιώθηκε με μοντέλο επίπεδης έντασης ορθότροπου υλικού (elastic, orthotropic, LAMINA). Τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στους στύλους πεπερασμένων στοιχείων κελύφους πάχους (επίπεδης έντασης)  $t=4$  mm παρουσιάζει ο Πίνακας 4-2. Αυτές προέκυψαν από τη γραμμική παρεμβολή των τιμών που παρουσιάζει ο Πίνακας 3-3 για πάχη  $t=3.5$  mm και  $t=8$  mm. Το υλικό ορίζεται στους τοπικούς άξονες του στοιχείου. Το επίπεδο του κελύφους είναι κάθετο στον άξονα 3 και ορίζεται από τους άξονες 1 και 2. Η διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού συμπίπτει με τον άξονα 1 όπως φαίνεται στο παράδειγμα στο Σχήμα 3-7, ενώ η γωνία  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζει ο τοπικός άξονας 1 με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου.

Πίνακας 4-2: Πίνακας τιμών ελαστικής απόκρισης ορθότροπου υλικού 308LSi για την προσομοίωση στύλων στο πρόγραμμα ABAQUS

t	E1	E2	v12	G12	G13	G23
(mm)	(MPa)	(MPa)	(-)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
3.5	137400	96000	0.458	98100	98100	98100
4	138000	97600	0.456	97756	97756	97756

<b>t</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>v12</b>	<b>G12</b>	<b>G13</b>	<b>G23</b>
<b>(mm)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(-)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
<b>8</b>	142800	110400	0.443	95000	95000	95000

\*Με πλάγια γραφή εμφανίζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη γραμμική παρεμβολή, αλλά όχι για το αριθμητικό προσομοίωμα

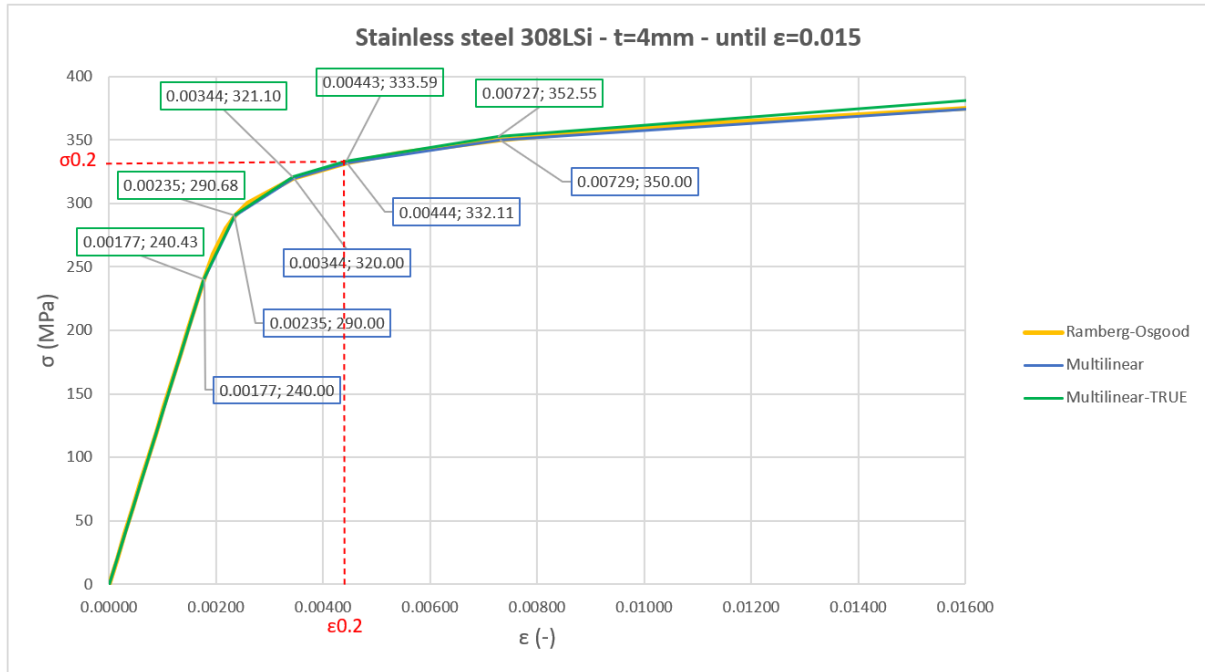
Για την προσομοίωση της ανελαστικής απόκρισης του υλικού στο πρόγραμμα ABAQUS με διεύθυνση αναφοράς αυτήν της εναπόθεσης του υλικού μέσω του μοντέλου Ramberg – Osgood χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-3.

Πίνακας 4-3: Πίνακας παραμέτρων Ramberg – Osgood υλικού 308LSi για την προσομοίωση στύλων στο πρόγραμμα ABAQUS

<b>t</b>	<b>E<sub>eff</sub></b>	<b>σ<sub>0.2,eff</sub></b>	<b>σ<sub>u,eff</sub></b>	<b>ε<sub>u,eff</sub></b>	<b>n<sub>eff</sub></b>	<b>m<sub>u,eff</sub></b>
<b>(mm)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(%)</b>	<b>(-)</b>	<b>(-)</b>
<b>3.5</b>	135900	333	553	27.3	15.5	2.2
<b>4</b>	136033	332	551	27.9	16	2
<b>8</b>	137100	325	535	32.5	22.9	2.4

\*Με πλάγια γραφή εμφανίζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη γραμμική παρεμβολή, αλλά όχι για το αριθμητικό προσομοίωμα

Για τον προσδιορισμό των τιμών που εισήχθησαν στο πρόγραμμα ABAQUS αρχικά έγινε μετατροπή της καμπύλης Ramberg – Osgood σε πολυγραμμική μορφή (Multilinear) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6 για πάχος  $t=4$  m. Στη συνέχεια η καμπύλη αυτή μετατράπηκε από μηχανικές σε πραγματικές τιμές τάσεων – παραμορφώσεων (from engineering stress – strain curve to true stress – strain curve). Η μετατροπή αυτή έγινε με βάση τις σχέσεις (4-4), (4-5) και (4-6). Έτσι η τελική καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα είναι η «Multilinear-TRUE» που φαίνεται στο Σχήμα 4-6. Μέχρι τιμή παραμόρφωσης ίση με 0.015 η καμπύλη των πραγματικών τιμών είναι πολύ κοντά με αυτή των μηχανικών τιμών τάσεων – παραμορφώσεων, άρα η επιλογή αυτή δεν επηρεάζει σημαντικά την απόκριση των φορέων. Οι καμπύλες έως τις τιμές αστοχίας συμπεριλαμβάνονται στο Παράρτημα Β: Αναλύσεις αμφιέριστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο.



Σχήμα 4-6: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου t=4 mm έως παραμόρφωση ίση με 0.015

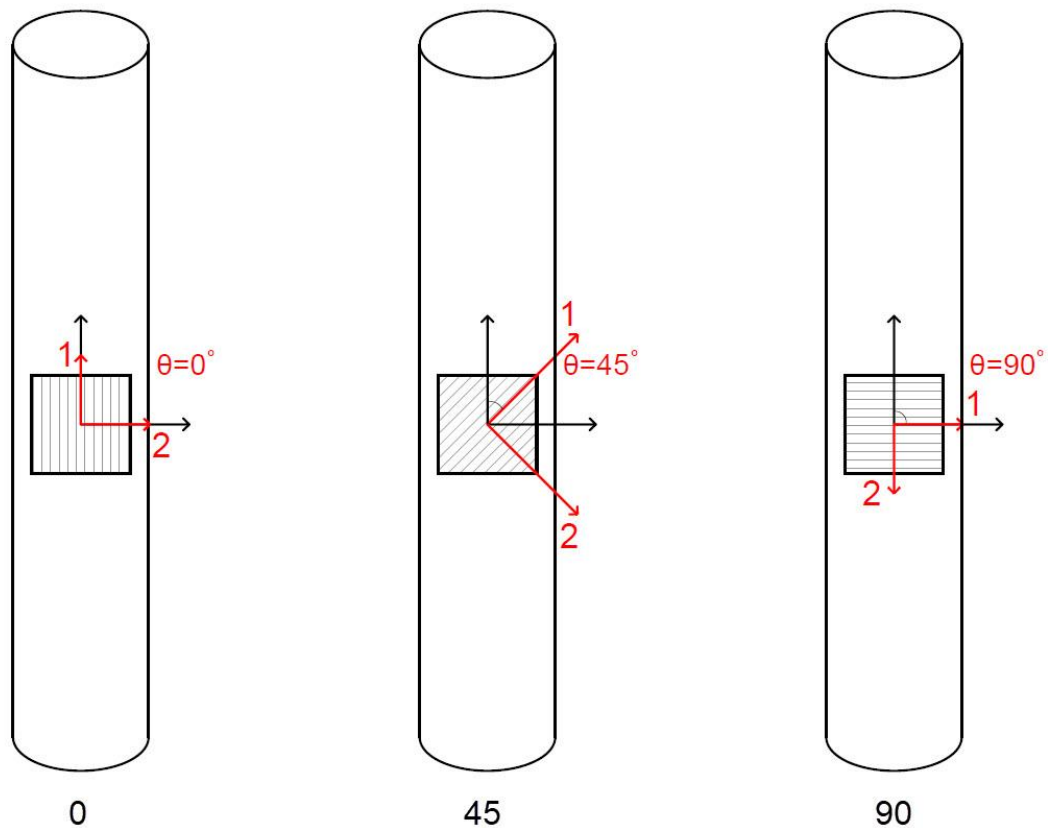
Στην προσομοίωση του υλικού 308LSi, εισήχθησαν οι τιμές R (plastic, POTENTIAL στο ABAQUS) έτσι ώστε να προσαρμοστούν οι τιμές των τάσεων που ορίστηκαν και να ληφθεί υπόψη η ανισοτροπία του υλικού (Πίνακας 4-4).

Πίνακας 4-4: Πίνακας τιμών πλαστικής απόκρισης ορθότροπου υλικού 308LSi για την προσομοίωση στύλων στο πρόγραμμα ABAQUS

t (mm)	R11 (MPa)	R22 (MPa)	R33 (-)	R12 (MPa)	R13 (MPa)	R23 (MPa)
3.5	1	0.784	1	1.045	1	1
4	1	0.790	1	1.052	1	1
8	1	0.834	1	1.111	1	1

\*Με πλάγια γραφή εμφανίζονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη γραμμική παρεμβολή, αλλά όχι για το αριθμητικό προσομοίωμα

Στις αναλύσεις για τις τρισδιάστατα εκτυπωμένες στύλους με την τεχνολογία WAAM διερευνήθηκε η επιρροή της διεύθυνσης εναπόθεσης του υλικού. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση η διεύθυνση εναπόθεσης του υλικού να είναι παράλληλη με τον διαμήκη άξονα του υλικού (0 για  $\theta=0^\circ$ ), να είναι κάθετη με αυτόν (90 για  $\theta=90^\circ$ ) και να σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  (45 για  $\theta=45^\circ$ ). Οι τρεις διαφορετικές περιπτώσεις φαίνονται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7: Διευθύνσεις εναπόθεσης του υλικού στους στύλους (0 για  $\theta=0^\circ$ , 45 για  $\theta=45^\circ$ , 90 για  $\theta=90^\circ$ )

Για τα διαφορετικά ύψη των υποστυλωμάτων, οι ατέλειες στις αναλύσεις GNIA και GMNIA ορίστηκαν όπως και στα μοντέλα συμβατικού χάλυβα με τις εξής τιμές:

- 30.37 mm για υποστύλωμα ύψους  $H=8$  mm
- 18.98 mm για υποστύλωμα ύψους  $H=5$  mm και
- 7.59 mm για υποστύλωμα ύψους  $H=2$  mm

Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η επιρροή του μεγέθους των ατελειών για αναλύσεις συνδυασμού μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας για ύψος στύλου ίσο με  $H=8$  m και γωνία εναπόθεσης του υλικού ίση με  $\theta=45^\circ$ . Οι τιμές ατελειών που ορίστηκαν ήταν οι εξής:

- 4 mm ίση με το πάχος της κυκλικής διατομής (GMNIA-45-H8\_4)
- 0.4 mm ίση με το 1/10 του πάχους της κυκλικής διατομής (GMNIA-45-H8\_0.4)

#### 4.4 Αποτελέσματα αναλύσεων στύλων

##### 4.4.1 Σύγκριση αναλύσεων στύλων συμβατικού χάλυβα με πεπερασμένα στοιχεία όγκου και κελύφους

Από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων κελύφους των στύλων που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-5, προέκυψαν οι καμπύλες θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής (Σχήμα 4-8). Το γράφημα (α) περιλαμβάνει τις καμπύλες για ύψος  $H=8$  m, το (β) για ύψος  $H=5$  m και το (γ) για ύψος  $H=2$  m.






Σημειώνεται πως στα διαγράμματα της ενότητας 4.4 εφαρμόστηκε η κατάλληλη κλίματα για να είναι δυνατή η σύγκριση των αναλύσεων μεταξύ τους, ενώ οι καμπύλες στο σύνολό τους φτάνουν μέχρι παραμορφώσεις ίσες με 0.015 και όσες δεν παρουσιάζονται στην ενότητα 4.4 περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Β.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα προκύπτουν τα εξής:

- Για διαφορετικά ύψη οι καμπύλες των αναλύσεων δε μεταβάλλονται σημαντικά. Ενώ η θλιπτική αντοχή παραμένει στο ίδιο μέγεθος, όσο αυξάνεται το ύψος του στύλου μειώνεται κλίση του πρώτου κλάδου, δηλαδή για ίδιο φορτίο παρατηρείται μεγαλύτερη κατακόρυφη βύθιση.
- Για τους φορείς με ατέλεια, αυτή επηρεάζει τη συμπεριφορά του στύλου όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του, προκαλώντας αστοχία σε σημαντικά μικρότερο φορτίο. Το μέγιστο φορτίο στο οποίο φτάνουν οι στύλοι των 5 και 8 m είναι πολύ κοντά στα ελαστικά φορτία λυγισμού που προέκυψαν από γραμμική ιδιομορφική ανάλυση λυγισμού (linear buckling analysis). Τις τιμές των ελαστικών φορτίων λυγισμού για τα τρία ύψη περιλαμβάνει ο Πίνακας 4-6.
- Για τον μικρότερο στύλο ύψους 2 m επικρατεί η επιρροή της μη γραμμικότητας του υλικού. Έτσι στην παραμορφωμένη του κατάσταση δεν παρατηρείται λυγισμός, άρα και οι κατακόρυφες βυθίσεις του άνω άκρου είναι μικρότερες.
- Επίσης, στον στύλο ύψους 2 m, σε αντίθεση με τους άλλους είναι εμφανής η εντονότερη επιρροή της μη γραμμικότητας του υλικού, καθώς οι καμπύλες GMNIA και GNIA διαφέρουν σημαντικά. Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη και η μη γραμμικότητα υλικού η θλιπτική αντοχή μειώνεται σημαντικά. Αυτό δε συμβαίνει στους στύλους ύψους 5 και 8 m λόγω της επικράτησης της μη γραμμικότητας γεωμετρίας.

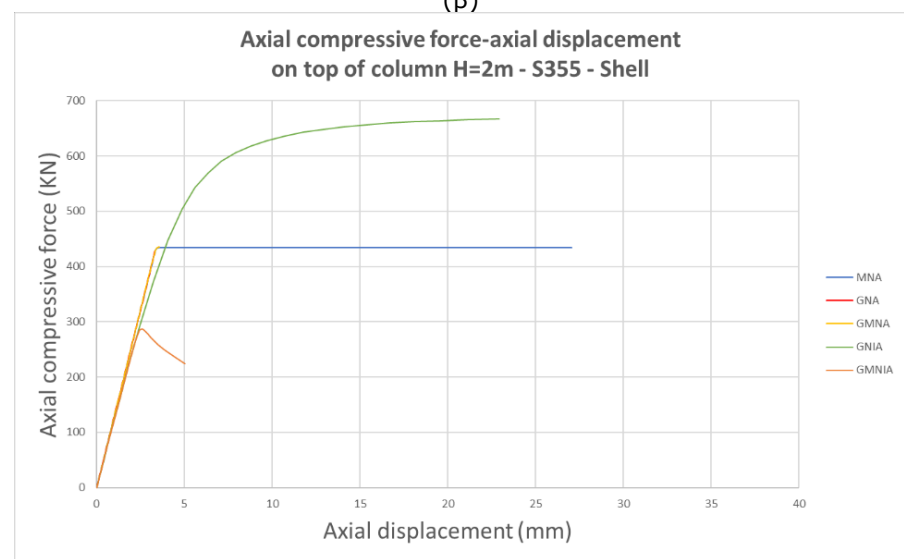
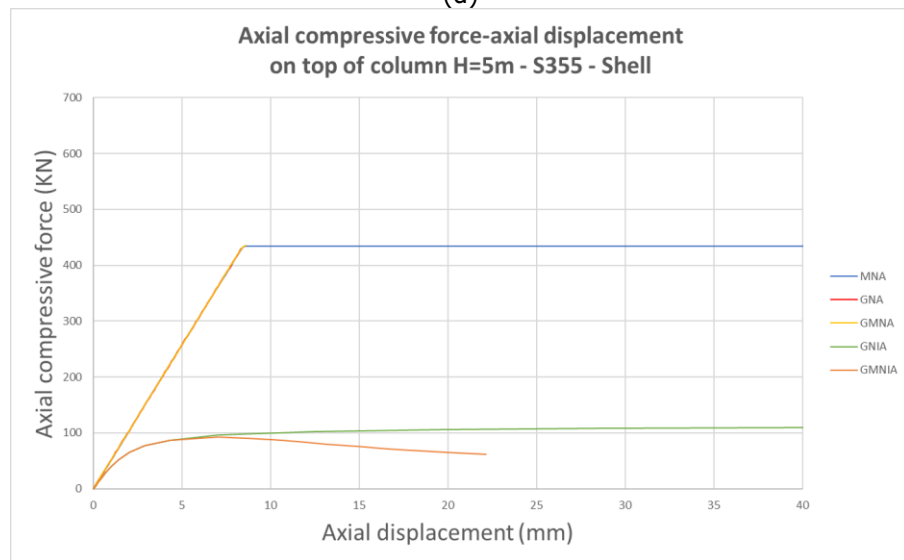
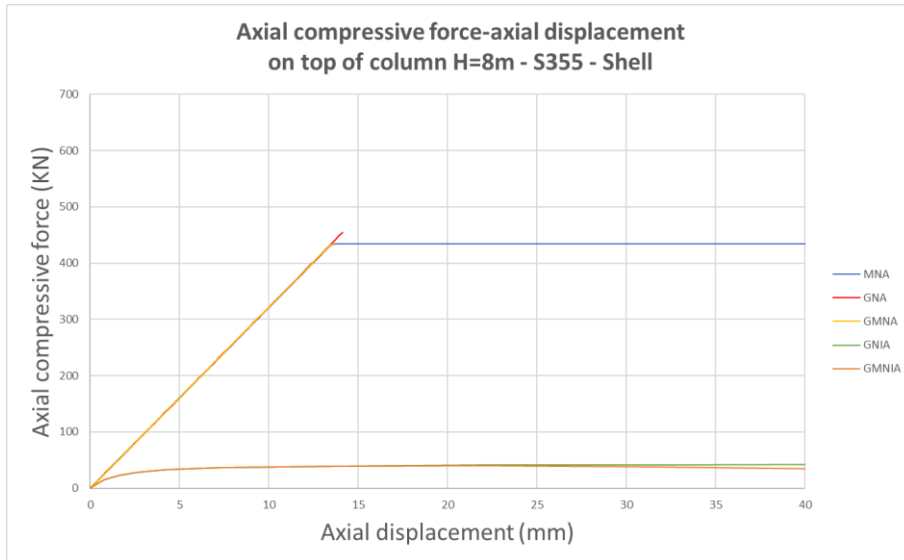
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4-9 παρουσιάζονται οι καμπύλες θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m. Όπως είναι αναμενόμενο, οι τέλει φορείς (GNA, MNA, GMNA) που δεν παρουσιάζουν λυγισμό έχουν μόνο κατακόρυφη βύθιση και όχι οριζόντια μετατόπιση. Για τους φορείς με ατέλεια (GNIA, GMNIA) όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος τους τόσο πιο ευαίσθητοι είναι σε λυγισμό, άρα και εμφανίζουν μεγαλύτερες εγκάρσιες μετακινήσεις στο μέσο τους.

Πίνακας 4-5: Πίνακας αναλύσεων αμφιέρειστων στύλων πεπερασμένων στοιχείων κελύφους υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα S355

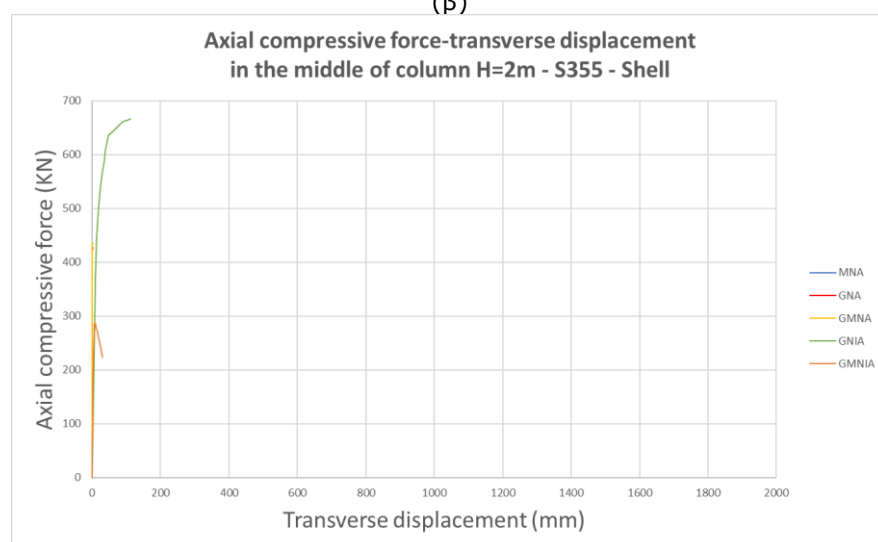
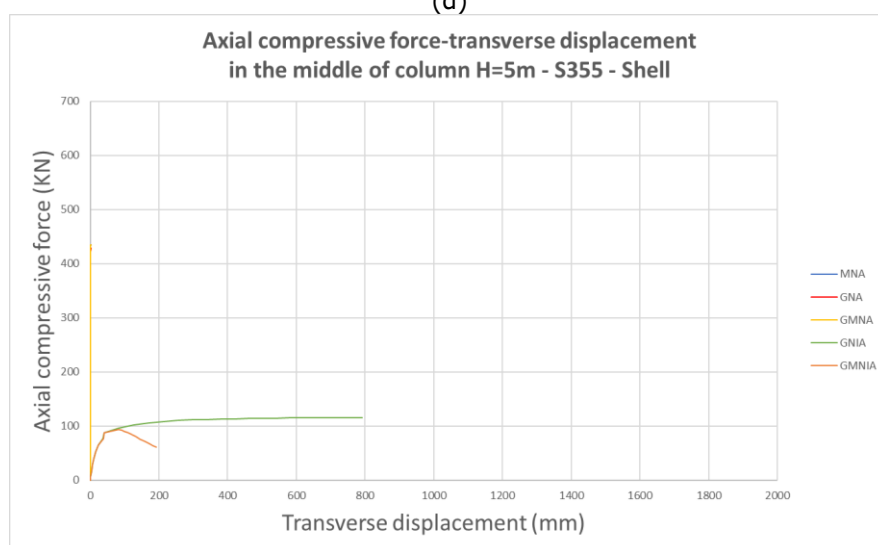
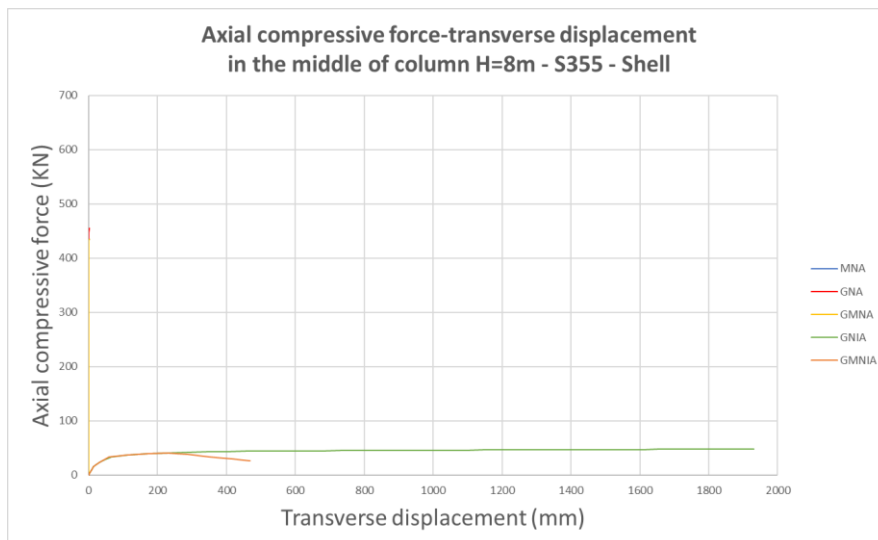
Model name	Color	Model description	Material	Type
<b>MNA</b>		Material Nonlinear Analysis	S355	Shell
<b>GNA</b>		Geometric Nonlinear Analysis	S355	Shell
<b>GMNA</b>		Geometric & Material Nonlinear Analysis	S355	Shell
<b>GNIA</b>		Geometric Nonlinear Analysis with Imperfection	S355	Shell
<b>GMNIA</b>		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection	S355	Shell

Πίνακας 4-6: Πίνακας ελαστικών φορτίων λυγισμού αμφιέρειστων στύλων πεπερασμένων στοιχείων όγκου και κελύφους υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα S355

	H=8 m	H=5 m	H=2 m
<b>Buckling Load (KN) from LBA (Type: Solid)</b>	45.43	116.18	720.11
<b>Buckling Load (KN) from LBA (Type: Shell)</b>	46.36	118.56	734.62









Σχήμα 4-8: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m



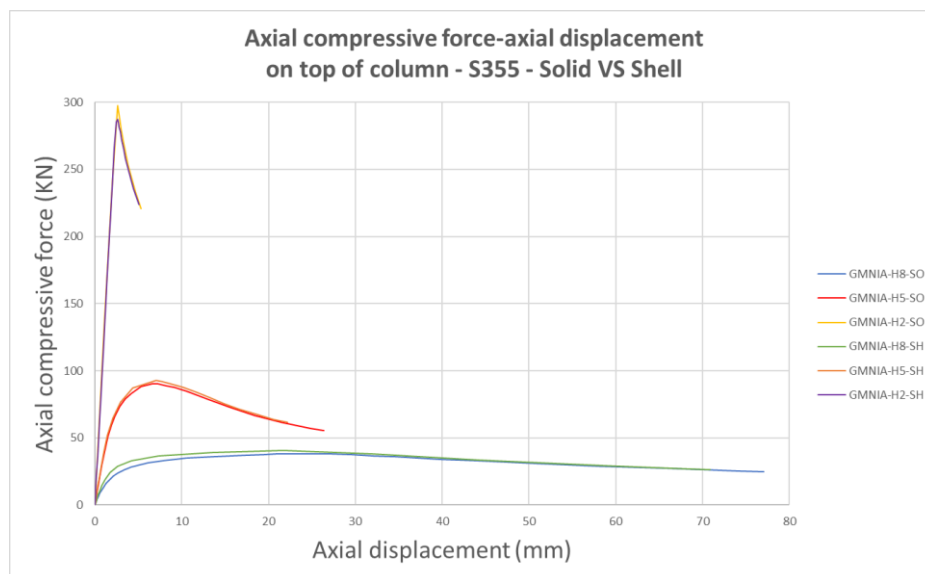
Σχήμα 4-9: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη (α) H=8 m, (β) H=5 m και (γ) H=2 m

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα (αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής και αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο) των αναλύσεων μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια (Σχήμα 4-10) η απόκριση των στύλων πεπερασμένων στοιχείων όγκου δε διαφέρει από αυτές των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους. Μάλιστα οι ελάχιστες διαφορές που παρατηρούνται οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη διαφορετική διακριτοποίηση που εφαρμόστηκε. Τις αναλύσεις περιγράφει ο Πίνακας 4-7. Παρόμοιες είναι οι τιμές θλιπτικής αντοχής και για τις υπόλοιπες αναλύσεις για στοιχεία όγκου και κελύφους όπως φαίνεται στα διαγράμματα στο Παράρτημα Β.

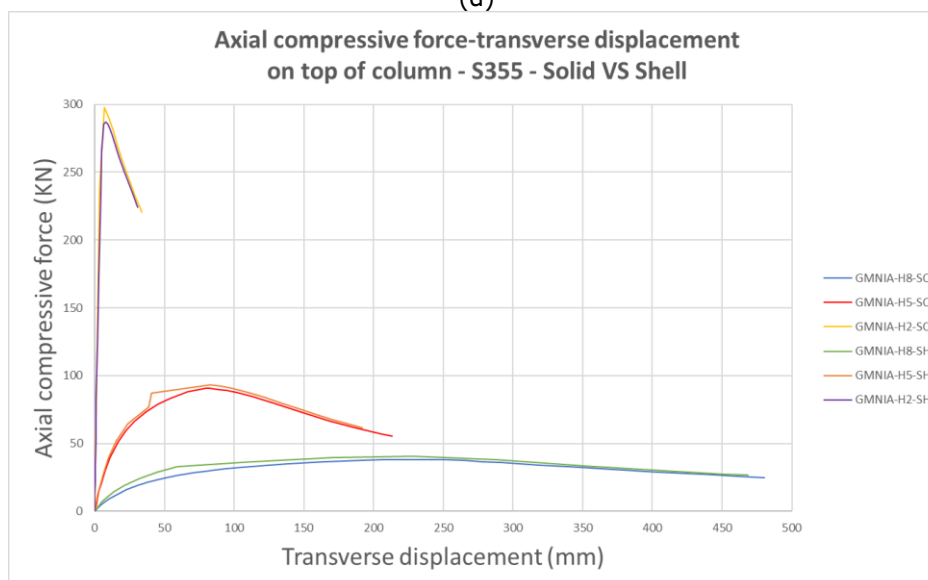
Πίνακας 4-7: Πίνακας αναλύσεων αμφιέρειστων στύλων πεπερασμένων στοιχείων όγκου και κελύφους υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα S355 (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια)

Model name	Color	Model description	H (m)	Material	Type
<b>GMNIA-H8-SO</b>		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection	8	S355	Solid
<b>GMNIA-H5-SO</b>		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection	5	S355	Solid
<b>GMNIA-H2-SO</b>		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection	2	S355	Solid
<b>GMNIA-H8-SH</b>		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection	8	S355	Shell
<b>GMNIA-H5-SH</b>		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection	5	S355	Shell
<b>GMNIA-H2-SH</b>		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection	2	S355	Shell





(α)






(β)

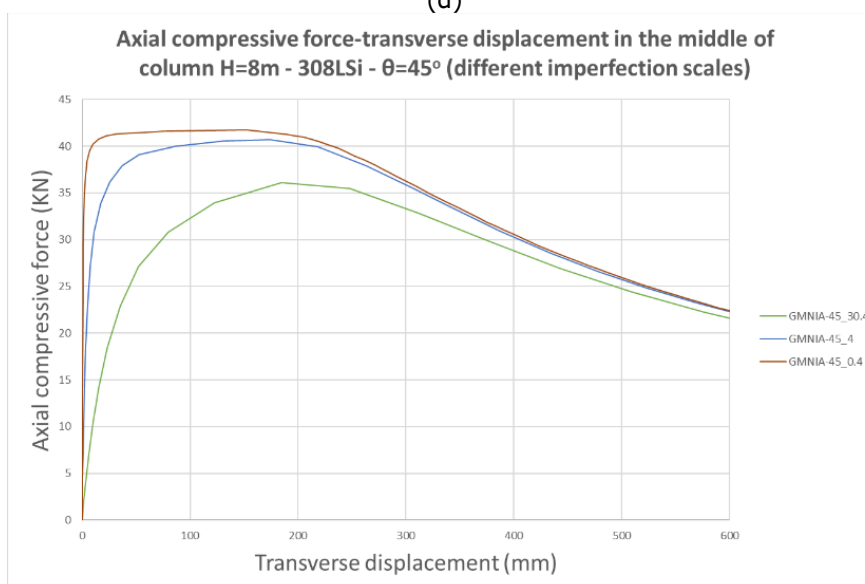
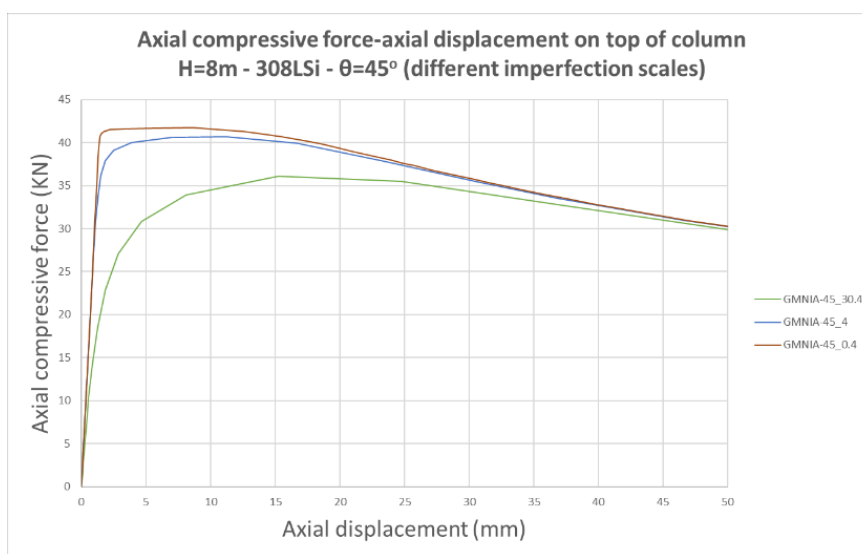
Σχήμα 4-10: Διαγράμματα (α) αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής και (β) αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων όγκου και κελύφους συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη  $H=8$  m,  $H=5$  m και  $H=2$  m (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια)

#### 4.4.2 Σύγκριση αναλύσεων στύλων τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα

Όσον αφορά στις αναλύσεις τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα για τη σύγκριση απόκρισης στύλων με διαφορετικά μεγέθη ατέλειας, αυτές πραγματοποιήθηκαν για στύλου ύψους  $H=8$  m και για γωνία εναπόθεσης υλικού  $\theta=45^\circ$ , όπως προαναφέρθηκε. Η ατέλεια που προκύπτει σύμφωνα με τον νέο ευρωκώδικα 3 είναι ίση με 30.37 mm και εφαρμόστηκε σε όλες τις αναλύσεις για το ύψος 8 m. Ο Πίνακας 4-8 περιγράφει τις αναλύσεις, και στο Σχήμα 4-11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής και αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο για μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας. Παρατηρείται σημαντική επιδείνωση της απόκρισης των φορέων όσο αυξάνεται το μέγεθος της ατέλειας. Συγκεκριμένα για τους στύλους μικρότερων ατελειών προέκυψε περίπου 12.5% και 17% μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή για ατέλειες 4 mm και 0.4 mm, αντίστοιχα, συγκριτικά με την περίπτωση ατέλειας 30,37 mm.

Πίνακας 4-8: Πίνακας αναλύσεων αμφιέριστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα 308LSi για διαφορετικά μεγέθη ατελειών

Model name	Color	Model description	Imperfection (mm)	Material	Type
GMNIA-45_30.4		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection - $\theta=45^\circ$ - H=8m	30.37	308LSi	Shell
GMNIA-45_4		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection - $\theta=45^\circ$ - H=8m	4	308LSi	Shell
GMNIA-45_0.4		Geometric & Material Nonlinear Analysis with Imperfection - $\theta=45^\circ$ - H=8m	0.4	308LSi	Shell



Σχήμα 4-11: Διαγράμματα (α) αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής και (β) αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο στύλων υλικού χάλυβα 308LSi και ύψους για διαφορετικά μεγέθη ατελειών (γωνία εναπόθεσης υλικού  $\theta=45^\circ$ )

Ο Πίνακας 4-9 παρουσιάζει τις αναλύσεις χάλυβα 308LSi που πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού σε τέλειους φορείς και λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας σε φορείς με ατέλειες ίσες με αυτές που υπολογίστηκαν για τον συμβατικό χάλυβα. Στο Σχήμα 4-12 φαίνονται τα διαγράμματα








αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m. Οι παρατηρήσεις αυτών των αναλύσεων όσον αφορά στα διαφορετικά ύψη υποστυλωμάτων είναι παρόμοιες με αυτές του συμβατικού χάλυβα:

- Η απόκριση των υποστυλωμάτων σε θλίψη για μη γραμμικότητα υλικού (MNA) δε μεταβάλλεται σημαντικά για διαφορετικά ύψη. Η κλίση του πρώτου κλάδου είναι λιγότερο απότομη όσο αυξάνεται το ύψος του στύλου, δηλαδή για ίδιο φορτίο παρατηρείται μεγαλύτερη κατακόρυφη βύθιση.
- Για τους φορείς με ατέλεια, αυτή επηρεάζει τη συμπεριφορά του στύλου όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του, προκαλώντας αστοχία σε σημαντικά μικρότερο φορτίο. Το μέγιστο θλιπτικό φορτίο στο οποίο φτάνουν οι στύλοι των 5 και 8 m είναι μικρότερο από τα ελαστικά φορτία λυγισμού που προέκυψαν από τη γραμμική ιδιομορφική ανάλυση λυγισμού, σε αντίθεση με τον συμβατικό χάλυβα στον οποίο οι τιμές αυτές ήταν πολύ κοντά. Η θλιπτική αντοχή των στύλων ύψους  $H=8$ m είναι περίπου κατά 15% μικρότερη από το ελαστικό φορτίο λυγισμού, ενώ για ύψος  $H=5$ m είναι περίπου 20-23% μικρότερη.
- Για τον στύλο ύψους 2 m επικρατεί η επιρροή της μη γραμμικότητας του υλικού όπως και στο συμβατικό χάλυβα. Έτσι στην παραμορφωμένη του κατάσταση δεν παρατηρείται λυγισμός, άρα και οι κατακόρυφες βυθίσεις του άνω άκρου είναι μικρότερες.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των υποστυλωμάτων περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Β.

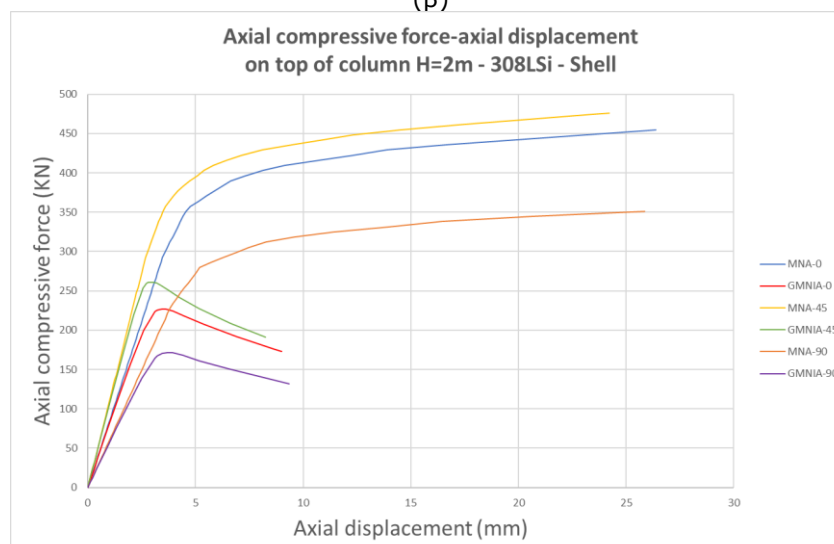
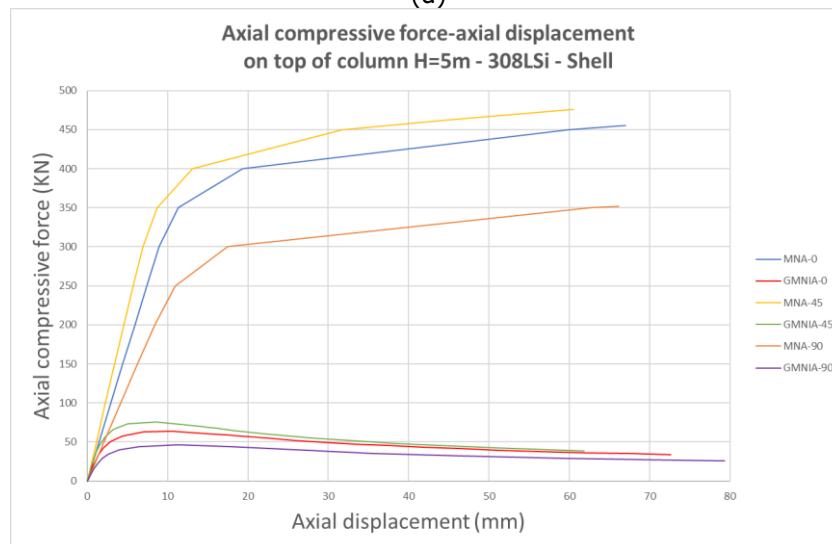
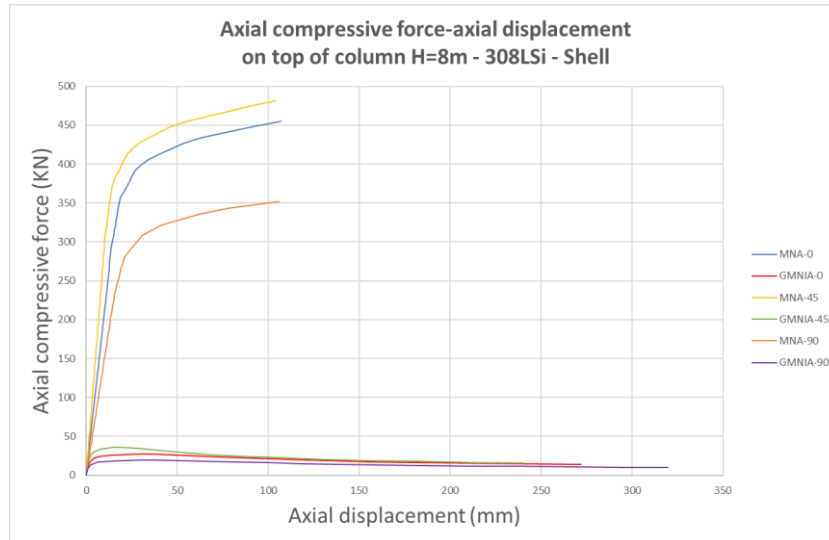
Γενικό συμπέρασμα για όλες τις αναλύσεις υποστυλωμάτων τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα υπό θλίψη είναι η μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή που εμφάνισαν οι στύλοι στους οποίους η γωνία εναπόθεσης του υλικού είναι ίση με  $\theta=45^\circ$  συγκριτικά με τον διαμήκη άξονά τους. Μικρότερες τιμές θλιπτικής αντοχής παρουσίασαν οι στύλοι με γωνία υλικού  $\theta=0^\circ$  και ακόμη μικρότερες για  $\theta=90^\circ$ , δηλαδή με διεύθυνση εναπόθεσης παράλληλη και κάθετη, αντίστοιχα, συγκριτικά με τον διαμήκη άξονα.

Πίνακας 4-9: Πίνακας αναλύσεων αμφιέρειστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα S355 και 308LSi (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια)

Model name	Color	Model description	Material	Type
<b>MNA</b>		<b>Material Nonlinear Analysis</b>	S355	Shell
<b>MNA-0</b>		<b>Material Nonlinear Analysis - <math>\theta=0^\circ</math></b>	308LSi	Shell
<b>GMNIA-0</b>		<b>Geometric &amp; Material Nonlinear Analysis with Imperfection - <math>\theta=0^\circ</math></b>	308LSi	Shell
<b>MNA-45</b>		<b>Material Nonlinear Analysis - <math>\theta=45^\circ</math></b>	308LSi	Shell
<b>GMNIA-45</b>		<b>Geometric &amp; Material Nonlinear Analysis with Imperfection - <math>\theta=45^\circ</math></b>	308LSi	Shell
<b>MNA-90</b>		<b>Material Nonlinear Analysis - <math>\theta=90^\circ</math></b>	308LSi	Shell
<b>GMNIA-90</b>		<b>Geometric &amp; Material Nonlinear Analysis with Imperfection - <math>\theta=90^\circ</math></b>	308LSi	Shell

Πίνακας 4-10: Πίνακας ελαστικών φορτίων λυγισμού αμφιέρειστων στύλων υπό θλιπτικό φορτίο για υλικό χάλυβα 308LSi

	H=8 m	H=5 m	H=2 m
<b>Buckling Load (KN) from LBA-0 (Type: Shell)</b>	30.48	78.02	486.52
<b>Buckling Load (KN) from LBA-45 (Type: Shell)</b>	41.79	94.30	580.66
<b>Buckling Load (KN) from LBA-90 (Type: Shell)</b>	21.56	55.20	344.69



Σχήμα 4-12: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα 308LSi και ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m

#### 4.4.3 Σύγκριση αναλύσεων στύλων συμβατικού χάλυβα και τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα

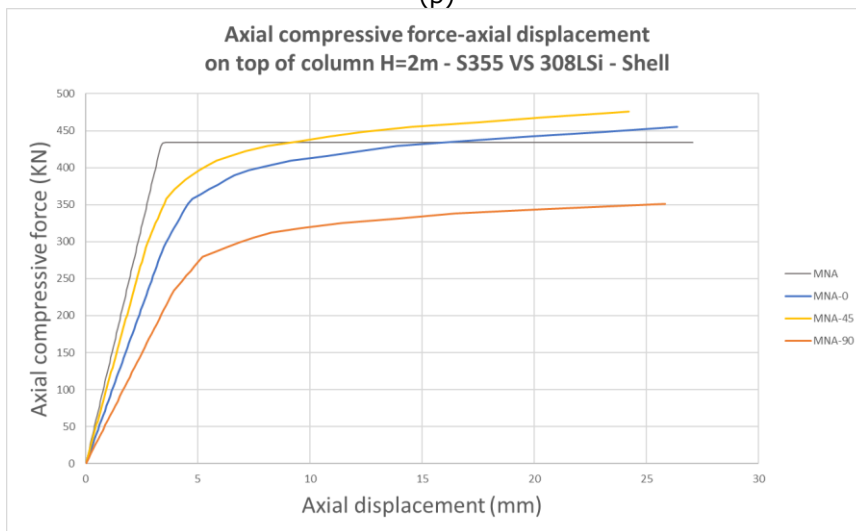
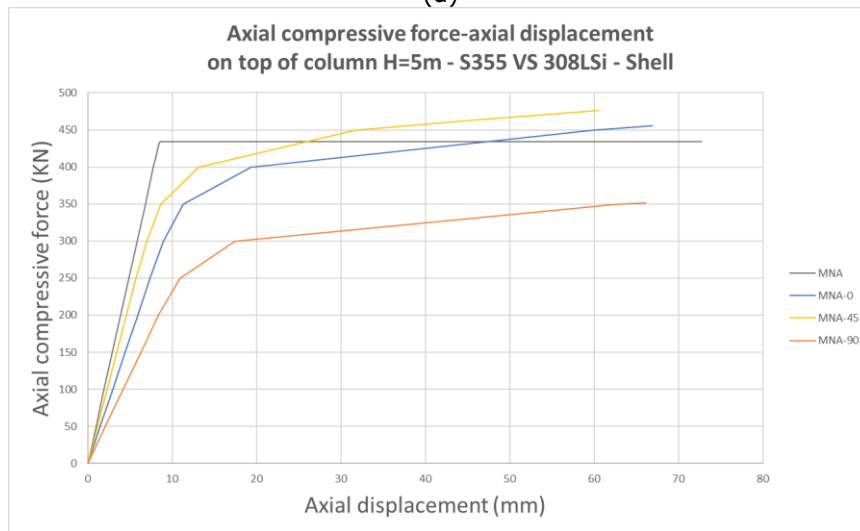
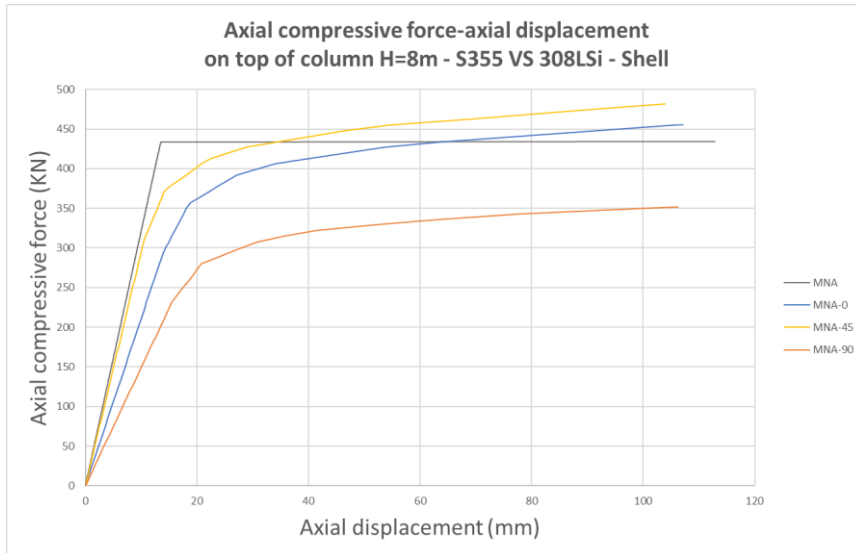
Στο Σχήμα 4-13 παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m. Συγκεκριμένα συγκρίνεται η απόκριση των στύλων τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα συγκριτικά με τον συμβατικό για αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού (Πίνακας 4-9). Από αυτές προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Για όλα τα ύψη, οι στύλοι χάλυβα 308LSi εμφάνισαν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή συγκριτικά με τους στύλους συμβατικού χάλυβα για γωνίες εναπόθεσης υλικού  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=0^\circ$  περίπου κατά 10% και 3.5%, αντίστοιχα.
- Παρατηρήθηκε ακόμη πως οι χαμηλότερες τιμές αντοχής για γωνία εναπόθεσης υλικού  $\theta=90^\circ$  απέχουν περισσότερο από ό,τι οι δύο προηγούμενες μεταξύ τους (για  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=0^\circ$ ).

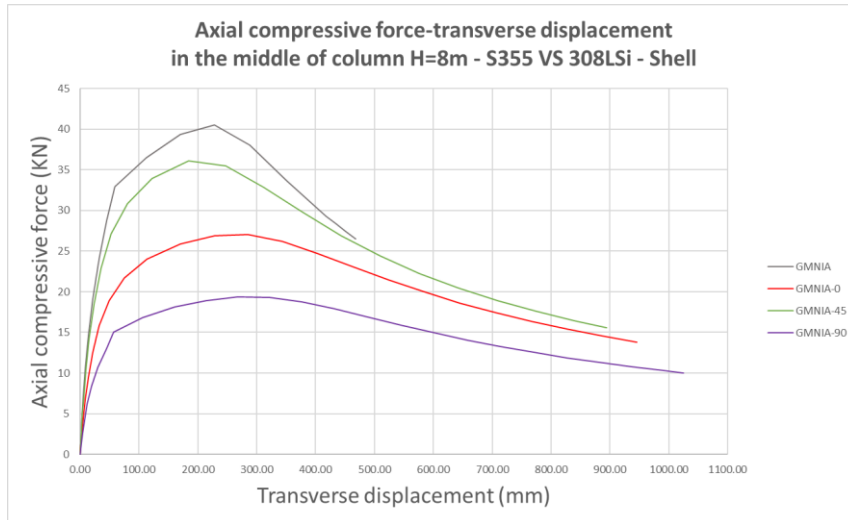
Για τις αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας στύλων με ατέλεια στο Σχήμα 4-14 παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής για ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m. Τις αναλύσεις για τρισδιάστατα εκτυπωμένο χάλυβα και για συμβατικό χάλυβα παρουσιάζει ο Πίνακας 4-9. Από αυτές προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Για ατέλεια φορέα ο στύλος συμβατικού χάλυβα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με αυτόν του 308LSi. Συγκεκριμένα, σε σχέση με τον στύλο υλικού S355, η θλιπτική αντοχή του  $\theta=45^\circ$  είναι περίπου 10% μικρότερη, η θλιπτική αντοχή του  $\theta=0^\circ$  είναι περίπου 33% μικρότερη και αυτή του  $\theta=90^\circ$  είναι περίπου 52% μικρότερη για ύψος  $H=8$  m. Για ύψος  $H=5$  m, η θλιπτική αντοχή για  $\theta=45^\circ$  είναι περίπου 18% μικρότερη συγκριτικά με αυτή του στύλου συμβατικού χάλυβα, η θλιπτική αντοχή του  $\theta=0^\circ$  είναι περίπου 32% μικρότερη και αυτή του  $\theta=90^\circ$  είναι περίπου 50% μικρότερη. Για στύλο ύψους  $H=2$  m, η θλιπτική αντοχή για  $\theta=45^\circ$  είναι περίπου 8% μικρότερη από αυτή του υποστυλώματος χάλυβα S355, η θλιπτική αντοχή του  $\theta=0^\circ$  είναι περίπου 21% μικρότερη και αυτή του  $\theta=90^\circ$  είναι περίπου 41% μικρότερη.
- Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα οι αντοχές που προκύπτουν για τις τρεις διαφορετικές τιμές  $\theta$  απέχουν σχεδόν το ίδιο μεταξύ τους από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη.

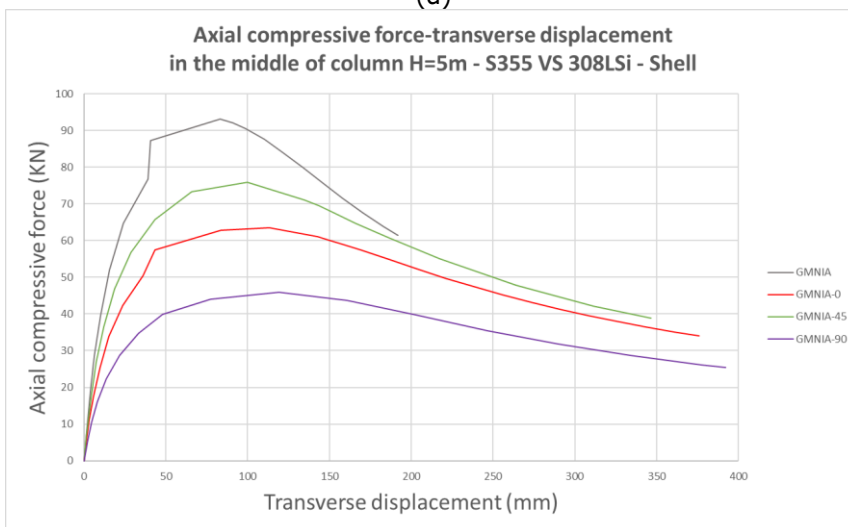
Σημειώνεται η διαφορά που υπάρχει στην τάση διαρροής του συμβατικού χάλυβα σε σχέση με αυτή του χάλυβα που χρησιμοποιείται στην κατασκευή στοιχείων με την τεχνολογία WAAM. Ο συμβατικός χάλυβας που επιλέχθηκε έχει τάση διαρροής 355 MPa, ενώ ο χάλυβας 308LSi έχει μικρότερη τάση διαρροής ίση με 332 MPa. Επομένως, η καλύτερη απόκριση του συμβατικού χάλυβα στους φορείς υποστυλωμάτων με ατέλεια υπό θλίψη οφείλεται και σε αυτή τη διαφορά.



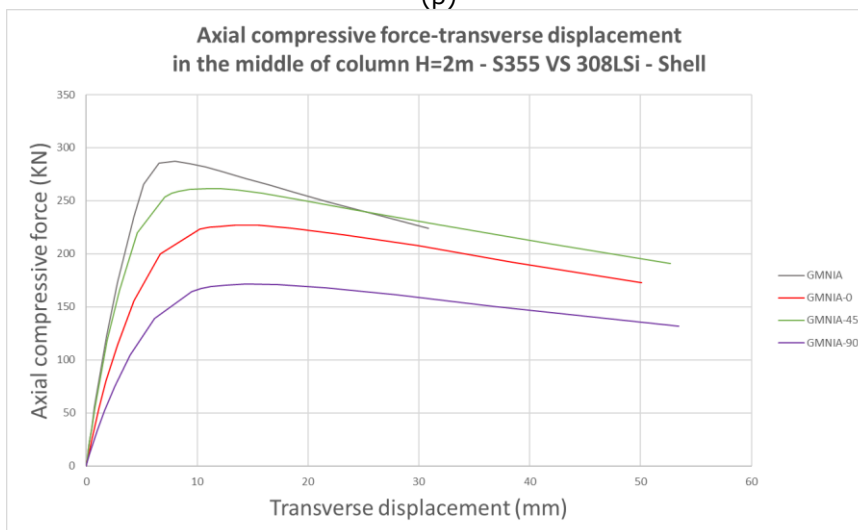
Σχήμα 4-13: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα S355 και 308LSi για ύψη (α) H=8 m, (β) H=5 m και (γ) H=2 m (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού)



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4-14: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα S355 και 308LSi για ύψη (α) H=8 m, (β) H=5 m και (γ) H=2 m (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια)





## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

Έπειτα από όσα αναλύθηκαν στις παραπάνω παραγράφους, γενικό συμπέρασμα για τις μηχανικές ιδιότητες του τρισδιάστατα εκτυπωμένου ανοξείδωτου χάλυβα με την τεχνολογία WAAM, είναι η ανισοτροπία που παρουσιάζει το υλικό. Σημαντικός παράγοντας που την καθορίζει είναι η γεωμετρία της τελικής επιφάνειας του στοιχείου, η οποία στην περίπτωση που μελετήθηκε, δηλαδή χωρίς εφαρμογή επεξεργασίας φινιρίσματος, εμφανίζει αποκλίσεις  $\pm 0.2$  mm. Ενώ σημασία για τις ιδιότητες του υλικού έχει και η διαδικασία της συγκόλλησης. Όσον αφορά στην απόκριση των δομικών στοιχείων τρισδιάστατα εκτυπωμένου ανοξείδωτου χάλυβα, καθοριστική είναι η γωνία εναπόθεσης του υλικού.

Από τη διερεύνηση της απόκρισης των δομικών στοιχείων που υποβλήθηκαν σε κάμψη και θλίψη, συμπεραίνεται η παρακάτω φθίνουσα σειρά αντοχής ανάλογα με τη γωνία εναπόθεσης του υλικού:

1. Γωνία διεύθυνσης εναπόθεσης υλικού με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου  $\theta=45^\circ$
2.  $>>$   $\theta=0^\circ$
3.  $>>$   $\theta=90^\circ$

Συνοψίζοντας, για στοιχεία δοκού, πλευρικά εξασφαλισμένης, διατομής διπλού ταυ σε κάμψη και λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα του υλικού συμπεραίνονται τα εξής:

- Η επιρροή της αλλαγής διεύθυνσης του υλικού στα πέλματα ήταν μεγαλύτερη συγκριτικά με τον κορμό στην καμπτική αντοχή του στοιχείου. Αυτό είναι λογικό καθώς τα πέλματα συνεισφέρουν σε μεγαλύτερο ποσοστό από τον κορμό στην καμπτική αντίσταση.
- Οι αποκλίσεις της καμπτικής αντοχής για σταθερή γωνία εναπόθεσης υλικού κορμού προέκυψαν μεγαλύτερες από αυτές για σταθερή γωνία εναπόθεσης υλικού πελμάτων.
- Παρατηρήθηκε μεγαλύτερη καμπτική αντοχή συγκριτικά με τον συμβατικό χάλυβα για του εξής συνδυασμούς γωνιών εναπόθεσης υλικού στον κορμό και στα πέλματα, με φθίνουσα σειρά:
  - ❖  $\theta=45^\circ$  στον κορμό και  $\theta=45^\circ$  στα πέλματα (MNA-W45-F45)
  - ❖  $\theta=0^\circ$  στον κορμό και  $\theta=45^\circ$  στα πέλματα (MNA-W0-F45)
  - ❖  $\theta=90^\circ$  στον κορμό και  $\theta=45^\circ$  στα πέλματα (MNA-W90-F45)
  - ❖  $\theta=45^\circ$  στον κορμό και  $\theta=0^\circ$  στα πέλματα (MNA-W45-F0)

❖  $\theta=0^\circ$  στον κορμό και  $\theta=0^\circ$  στα πέλματα (MNA-W0-F0)

Συνοψίζοντας, για στοιχεία υποστυλώματος κυκλικής κοίλης διατομής σε θλίψη και λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα του υλικού και γεωμετρίας (τέλειοι και ατέλει φορείς) συμπεραίνονται τα εξής:

- Για μικρότερο ύψος στύλων επικράτησε η επιρροή της μη γραμμικότητας του υλικού έναντι της μη γραμμικότητας γεωμετρίας, όπως συμβαίνει και στον συμβατικό χάλυβα.
- Η επιρροή της επιλογής μεγέθους ατέλειας ήταν σημαντική για την απόκριση στοιχείων μεγάλου μήκους.
- Στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα υλικού μόνο, για γωνίες εναπόθεσης υλικού από τον διαμήκη άξονα των υποστυλωμάτων  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=0^\circ$  παρατηρήθηκε μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από τον συμβατικό χάλυβα.
- Για μη γραμμικότητα υλικού μόνο, οι τιμές των αντοχών σε θλίψη για γωνίες υλικού  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=0^\circ$  ήταν πιο κοντά μεταξύ τους σε σχέση με τις τιμές για  $\theta=0^\circ$  και  $\theta=90^\circ$ .
- Λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας σε στύλους με ατέλεια, μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη παρουσίασε ο συμβατικός χάλυβας έναντι του τρισδιάστατα εκτυπωμένου. Ωστόσο, αυτή η διαφορά δεν ήταν μεγάλη και οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην επιλογή των υλικών, καθώς η τάση διαρροής του συμβατικού χάλυβα που επιλέχθηκε είναι μεγαλύτερη από αυτή του τρισδιάστατα εκτυπωμένου χάλυβα. Επίσης, για αυτής της τάξεως τη διαφορά αντοχής, τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης έναντι του συμβατικού τρόπου κατασκευής, την καθιστούν δελεαστική επιλογή.
- Λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας σε υποστυλώματα με ατέλεια, οι αποκλίσεις της θλιπτικής αντοχής για αλλαγή διεύθυνσης εναπόθεσης υλικού προέκυψαν σχεδόν ίσες μεταξύ  $\theta=45^\circ$  και  $\theta=0^\circ$  και μεταξύ  $\theta=0^\circ$  και  $\theta=90^\circ$ .

Η πολυπλοκότητα και η συμμετοχή πολλών παραγόντων στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων της απόκρισης τρισδιάστατα εκτυπωμένων στοιχείων χάλυβα είναι εμφανής. Ωστόσο, χάρη στην πληθώρα πλεονεκτημάτων που προσφέρει η τεχνολογία WAAM, αξίζει η περαιτέρω διερεύνηση αυτών με σκοπό τη δυνατότητα ακριβούς πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων κατά τον σχεδιασμό της κατασκευής τους με την μέθοδο της Προσθετικής Κατασκευής με Σύρμα και Τόξο. Συγκεκριμένα, κρίνεται ωφέλιμη για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων η μελέτη επιρροής των διάφορων παραγόντων που επιλέγονται για τη διαδικασία εκτύπωσης. Επιπρόσθετα, θα ήταν σκόπιμη η διερεύνηση της απόκρισης και άλλων γωνιών εναπόθεσης υλικού πέραν αυτών που μελετήθηκαν, αλλά και διαφορετικών διατομών. Ακόμη με τη μελέτη της απόκρισης διαφορετικών υλικών για διαφορετικά πάχη δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού των παραμέτρων. Έτσι, θα είναι εφικτή η πραγματοποίηση αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων και με βάση αυτές ο σχεδιασμός της εκτύπωσης δομικών στοιχείων για πλήθος μηχανικών ιδιοτήτων διαφορετικών υλικών. Θα ήταν σκόπιμο να μελετηθεί και η περίπτωση ταυτόχρονης κάμψης και θλίψης στοιχείων. Τέλος, με δεδομένη τη σημασία της πορείας που ακολουθείται κατά την εκτύπωση, θα ήταν καλό να διερευνηθεί η επιρροή διαφορετικών σχεδιασμών πορείας εκτύπωσης στις μηχανικές ιδιότητες και στην αντοχή των στοιχείων.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

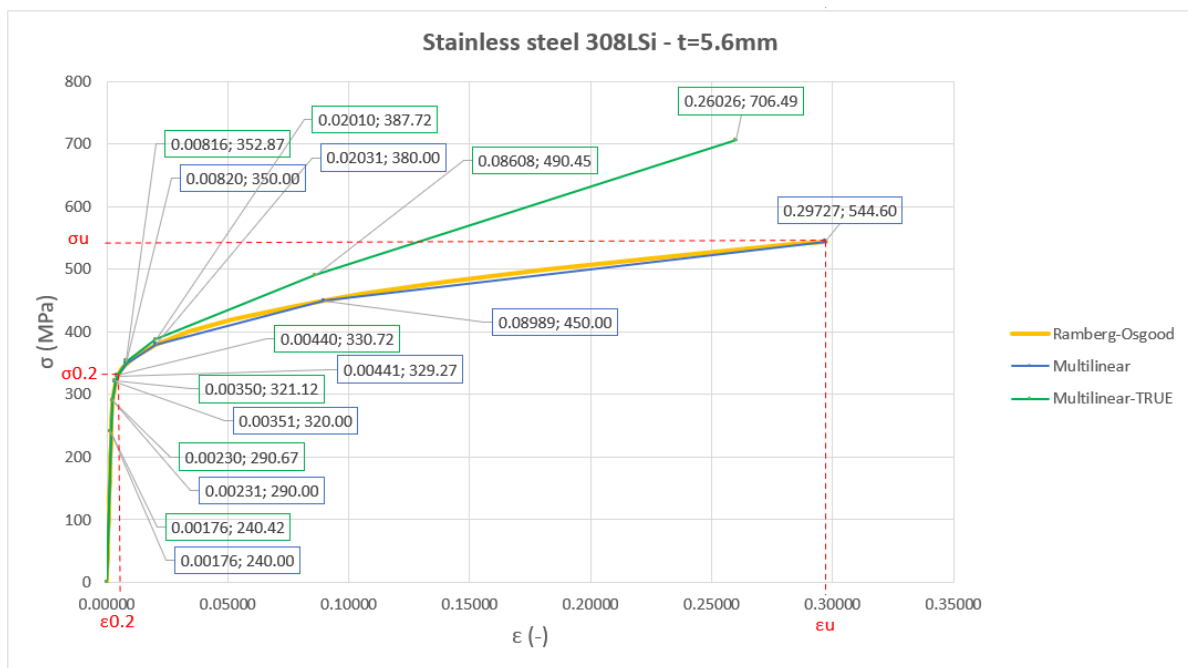
- [1] «Loughborough University, Additive Manufacturing Research Group, The seven categories of Additive Manufacturing,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>. [Πρόσβαση Νοέμβριος 2023].
- [2] L. Raut και R. Taiwade, «Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions,» *Journal of Materials Engineering and Performance*, τόμ. 30, p. 4768–4791, 2021.
- [3] S. Evans, J. Wang, J. Qin, Y. He, P. Shepherd και J. Ding, «A review of WAAM for steel construction – Manufacturing, material and,» *Structures*, τόμ. 44, p. 1506–1522, 2022.
- [4] F. Velga, A. Suárez, T. Artaza και E. Aldalur, «Effect of the Heat Input on Wire-Arc Additive Manufacturing of Invar,» *Welding in the World*, τόμ. 66, p. 1081–1091, 2022.
- [5] J. Müller, J. Hensel και K. Dilger, «Mechanical properties of wire and arc additively manufactured,» *Welding in the World*, τόμ. 66, p. 395–407, 2022.
- [6] C. Huang, P. Kyvelou, R. Zhang, T. Britton B. και L. Gardner, «Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively,» *Materials & Design*, τόμ. 216, p. άρθρο 110544, 2022.
- [7] P. Kyvelou, C. Buchanan και L. Gardner, «Numerical simulation and evaluation of the world’s first metal additively manufactured bridge,» *Structures*, τόμ. 42, pp. 405-416, 2022.
- [8] A. Shah, R. Aliyev, H. Zeidler και S. Krinke, «A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process,» *MDPI, Journal of Manufacturing and Materials Processing*, τόμ. 7, αρ. 3, p. 97, 2023.

- [9] V. Laghi, M. Palermo, L. Tonelli, G. Gasparini, L. Geschini και T. Trombetti, «Tensile properties and microstructural features of 304L austenitic,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 106, p. 3693–3705, 2020.
- [10] W. Huang, Q. Wang, N. Ma και H. Kitano, «Distribution characteristics of residual stresses in typical wall and pipe components built by wire arc additive manufacturing,» *Journal of Manufacturing Processes*, τόμ. 82, pp. 434-447, 2022.
- [11] V. Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, M. Veljkovic και T. Trombetti, «Assessment of design mechanical parameters and partial safety factors for,» *Engineering Structures*, τόμ. 225, p. άρθρο 111314, 2020.
- [12] Y. Zhang, S. Wu και F. Cheng, «A duplex stainless steel (DSS) with striking tensile strength and corrosion,» *Materials Letters*, τόμ. 313, p. άρθρο 131760, 2022.
- [13] J. Ye, P. Kyvelou, F. Gilardi, H. Lu, M. Gilbert και L. Gardner, «An End-to-End Framework for the Additive Manufacture of Optimized Tubular Structures,» *IEEE Access*, τόμ. 9, pp. 165476-89, 2021.
- [14] N. Hadjipantelis, B. Weber, C. Buchanan και L. Gardner, «Description of anisotropic material response of wire and arc additively,» *Thin-Walled Structures*, τόμ. 171, p. άρθρο 108634, 2022.
- [15] «MX3D,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://mx3d.com/>. [Πρόσβαση Οκτώβριος 2023].
- [16] Z. Al-Nabulsi, J. Mottram, M. Gillie, N. Kourra και M. Williams, «Mechanical and X ray computed tomography characterisation of a,» *Construction and Building Materials*, τόμ. 274, p. άρθρο 121700, 2021.
- [17] T. Tankova, D. Andrade, R. Branco, Z. C., D. Rodrigues και L. Simões da Silva, «Characterization of robotized CMT-WAAM carbon steel,» *Journal of Constructional Steel Research*, τόμ. 199, p. άρθρο 107624, 2022.
- [18] Y. Ayan και N. Kahraman, «Fabrication and characterization of functionally graded material (FGM),» *Materials Today Communications*, τόμ. 33, p. άρθρο 104457, 2022.
- [19] E. Aldalur, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao και A. Lamikiz, «High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies,» *Journal of Manufacturing Processes*, τόμ. 58, p. 615–626, 2020.
- [20] R. Sasikumar, A. Rajesh Kannan, S. Mohan Kumar, R. Pramod, N. Pravin Kumar, N. Siva Shanmugam, Y. Palguna και S. Sivankalai, «Wire arc additive manufacturing of functionally graded material with SS 316L and IN625: Microstructural and mechanical perspectives,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, τόμ. 38, pp. 230-242, 2022.
- [21] L. Gardner, P. Kyvelou, G. Herbert και C. Buchanan, «Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge,» *Journal of Constructional Steel Research*, τόμ. 172, p. άρθρο 106233, 2020.
- [22] A. Puzatova, P. Shakor, V. Laghi και M. Dmitrieva, «Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review,» *Buildings*, τόμ. 12, p. 2023, 2022.

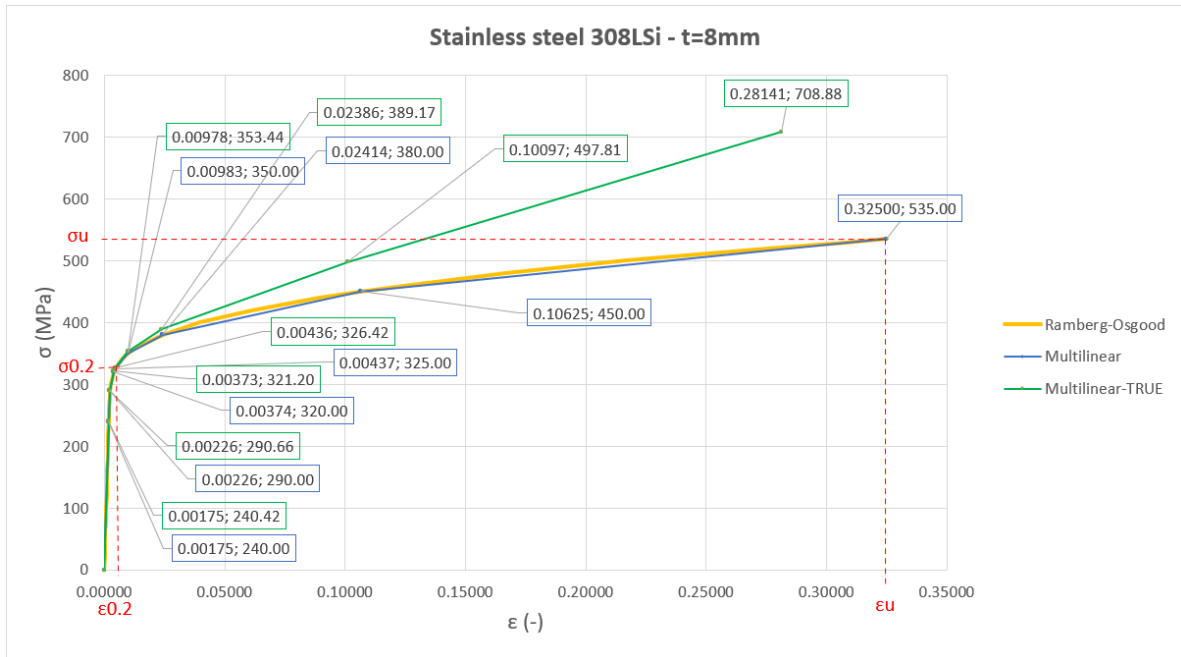
- [23] J. Ding, P. Colegrove, J. Mehnert, S. Ganguly, P. Sequeira Almeida, F. Wang και S. Williams, «Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts,» *Computational Materials Science*, τόμ. 50, pp. 3315-3322, 2011.
- [24] J. Xiong, G. Zhang, J. Hu και Y. Li, «Forecasting process parameters for GMAW-based rapid manufacturing using closed-loop iteration based on neural network,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 69, pp. 743-751, 2013.
- [25] A. Yildiz, K. Davut, B. Koc και O. Yilmaz, «Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 108, pp. 3391-3404, 2020.
- [26] M. Dinovitzer, X. Chen, J. Laliberte, X. Huang και H. Frei, «Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure,» *Additive Manufacturing*, τόμ. 26, pp. 138-146, 2019.
- [27] W. Wu, J. Xue, L. Wang, Z. Zhang, Y. Hu και C. Dong, «Forming Process, Microstructure, and Mechanical Properties of Thin-Walled 316L Stainless Steel Using Speed-Cold-Welding Additive Manufacturing,» *Metals*, τόμ. 9, αρ. 1, p. 101, 2019.
- [28] A. Wu, D. Brown, M. Kumar, G. Gallegos και W. King, «An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel,» *Metallurgical and Materials Transactions A*, τόμ. 45, p. 6260-6270, 2014.
- [29] «staticstools,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.staticstools.eu/en>. [Πρόσβαση Οκτώβριος 2023].
- [30] *prEN 1993-1-14, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-14: Design assisted by finite element analysis.*
- [31] P. Kyvelou, H. Slack, D. Daskalaki Mountanou, M. A. Wadee, T. Britton, C. Buchanan και L. Gardner, «Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material,» *Materials and Design*, τόμ. 192, p. 108675, 2020.
- [32] *FprEN 1993-1-1:2022, Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings.*



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΥΠΟ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ



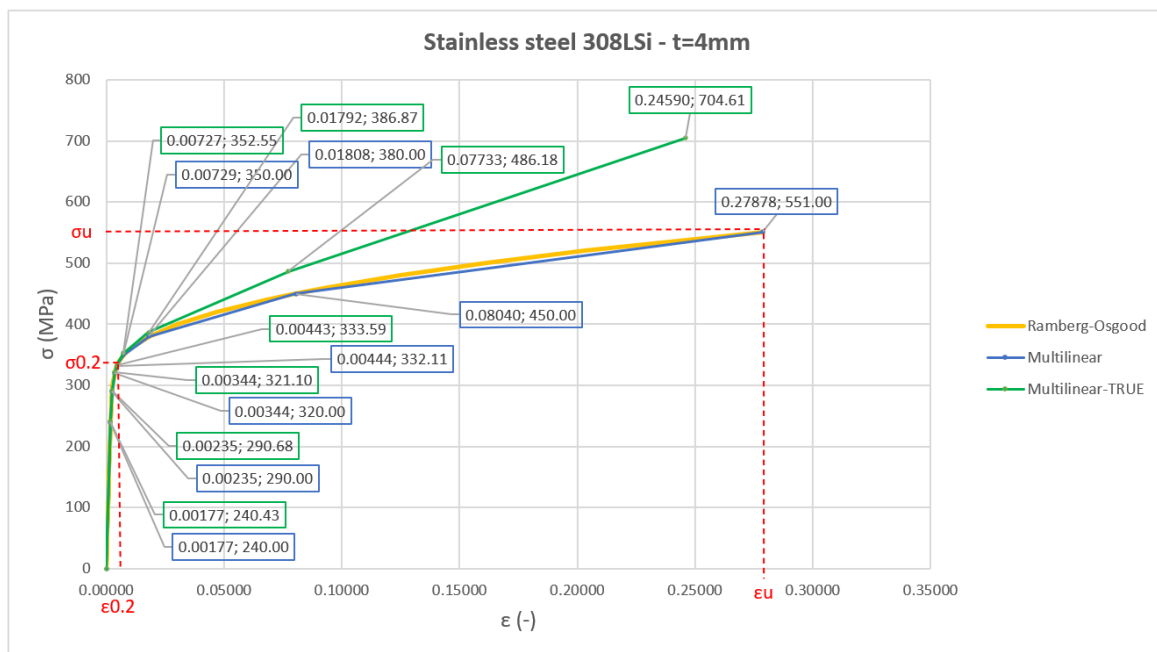
Σχήμα Α-1: Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου t=5.6 mm



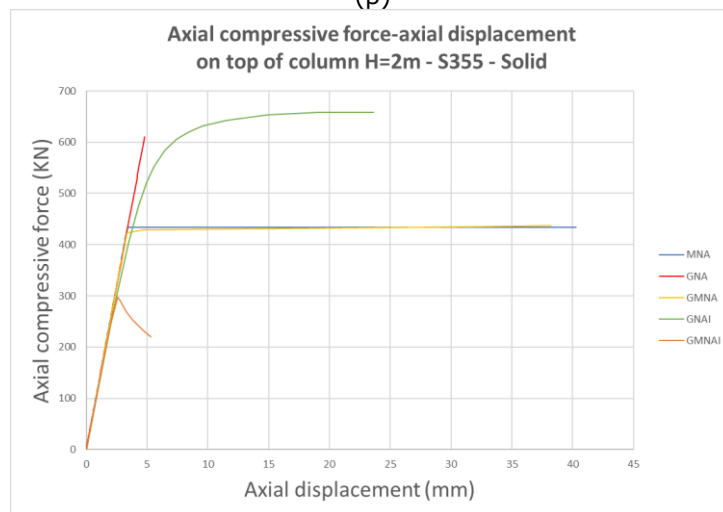
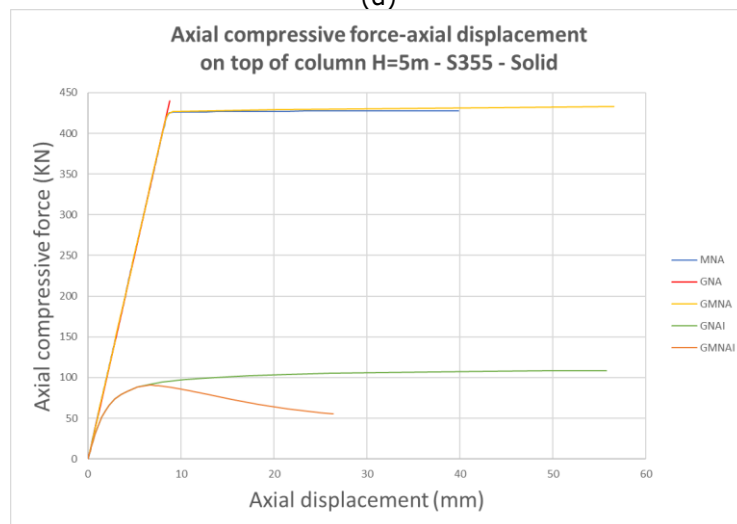
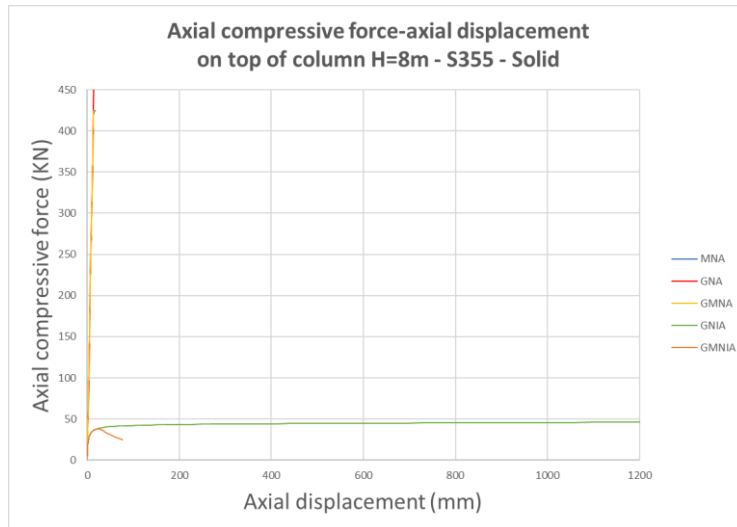
Σχήμα Α-2: Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου t=8 mm



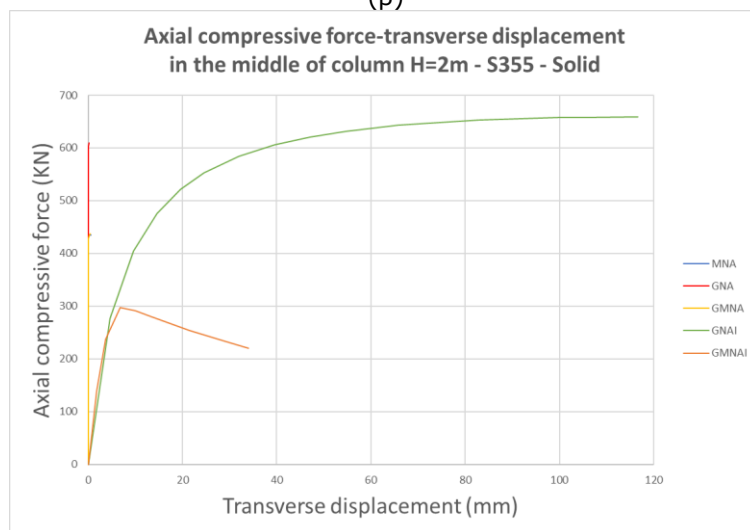
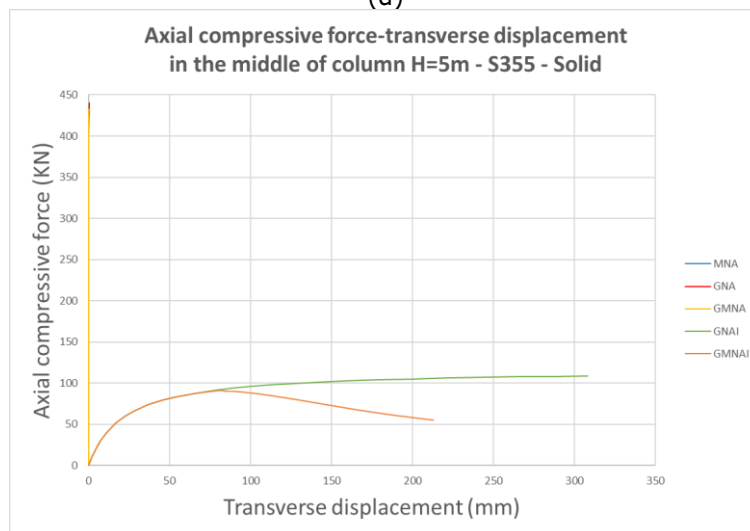
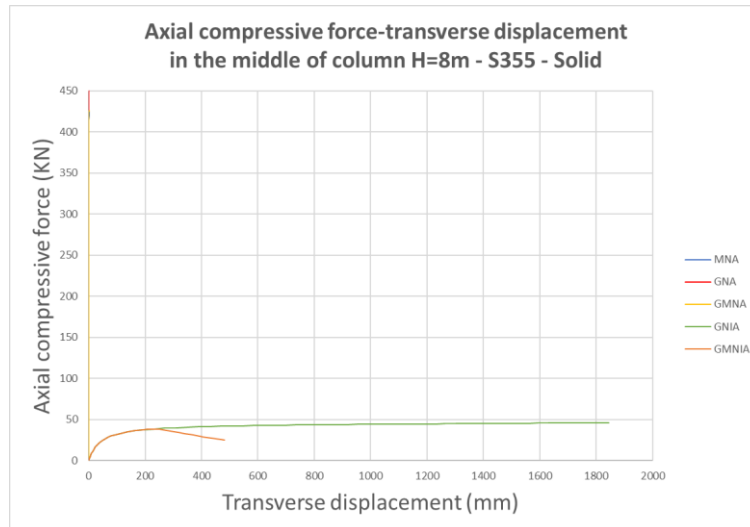
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ



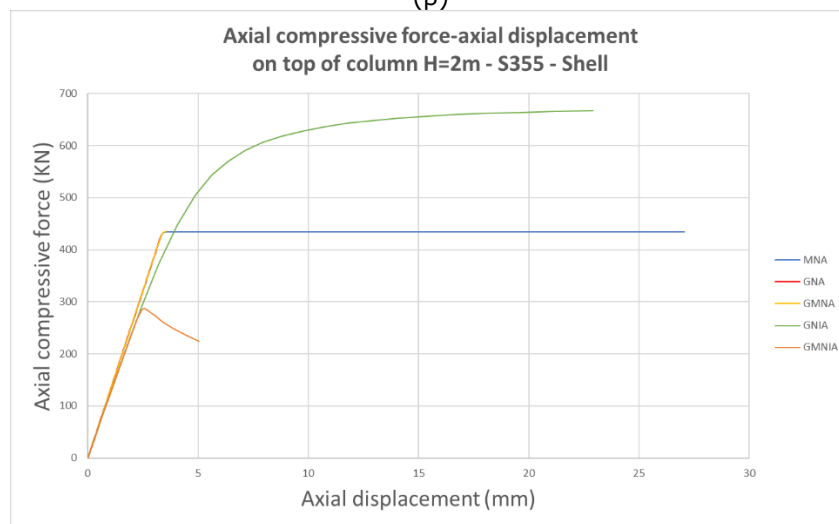
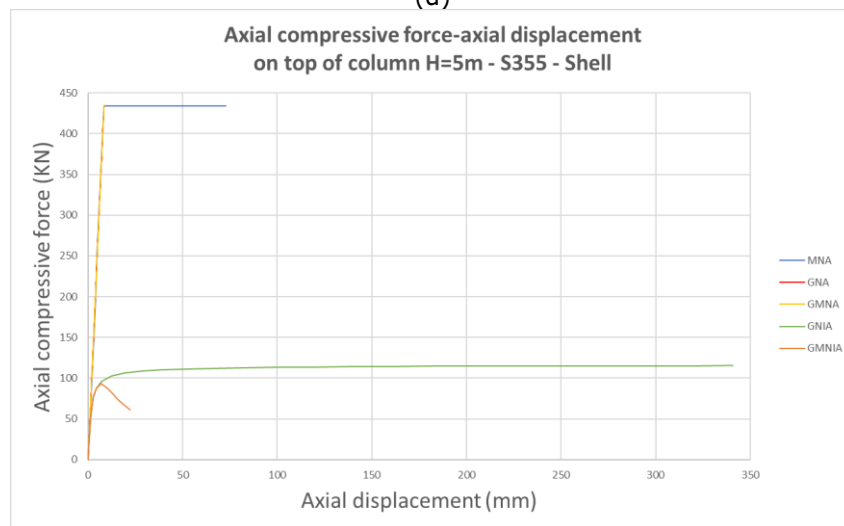
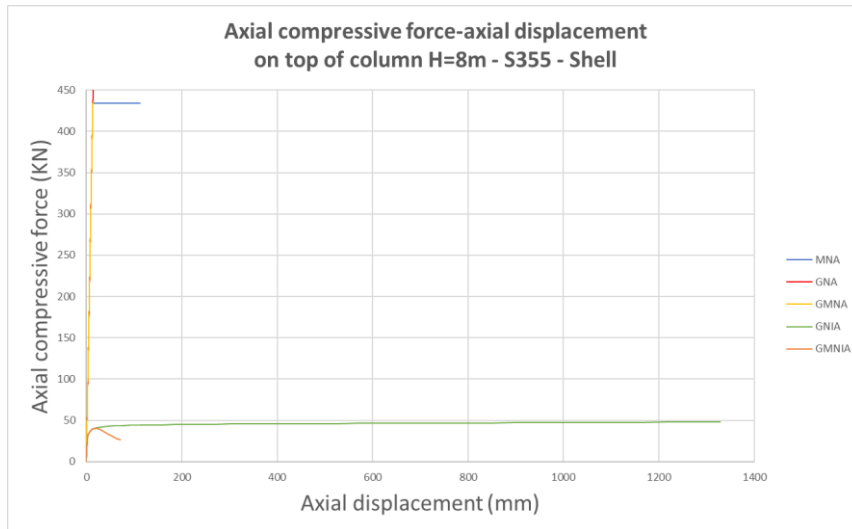
Σχήμα Β-1: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων υλικού 308LSi για πάχος στοιχείου t=4 mm



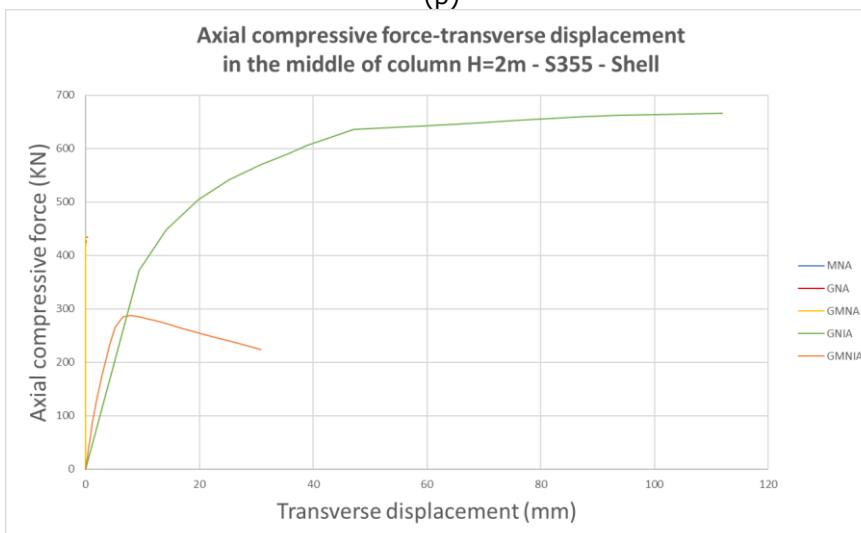
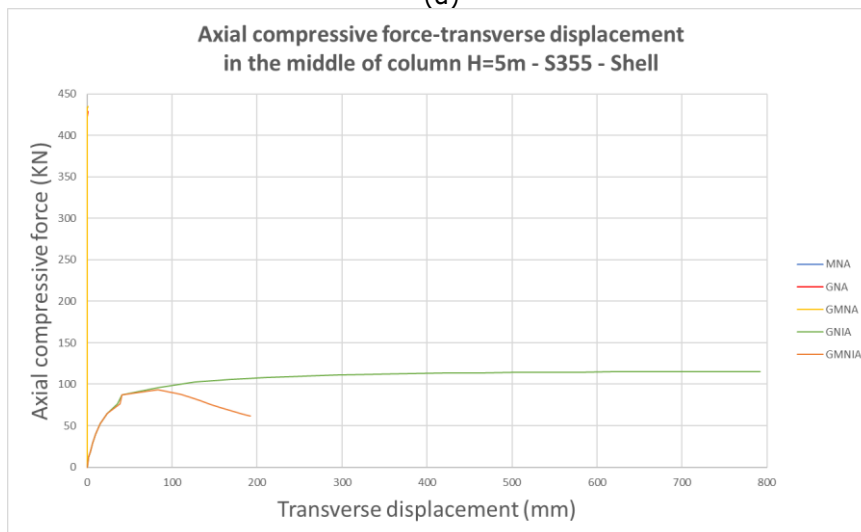
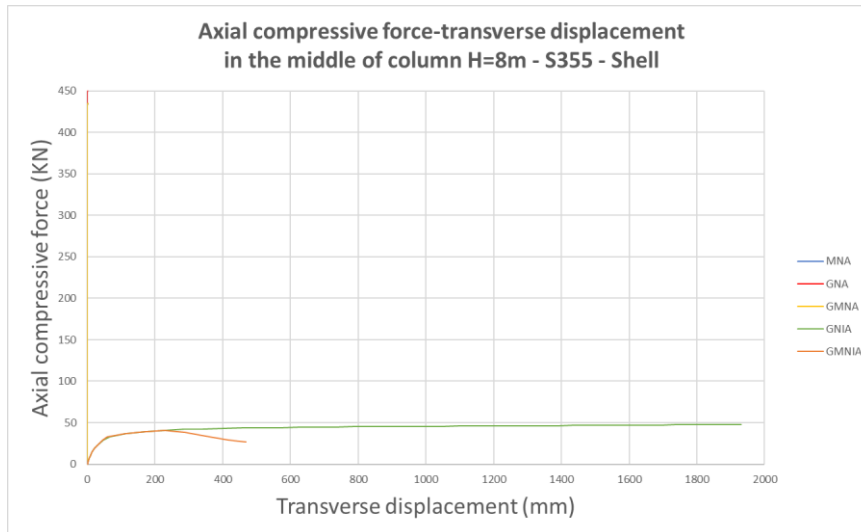
Σχήμα Β-2: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων όγκου συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m



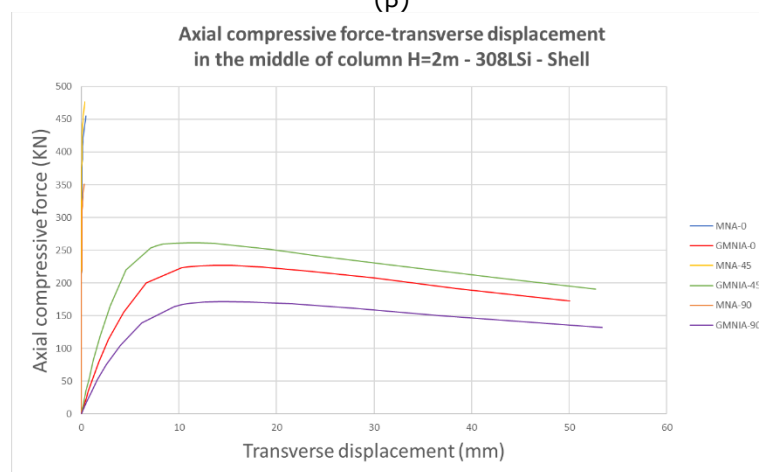
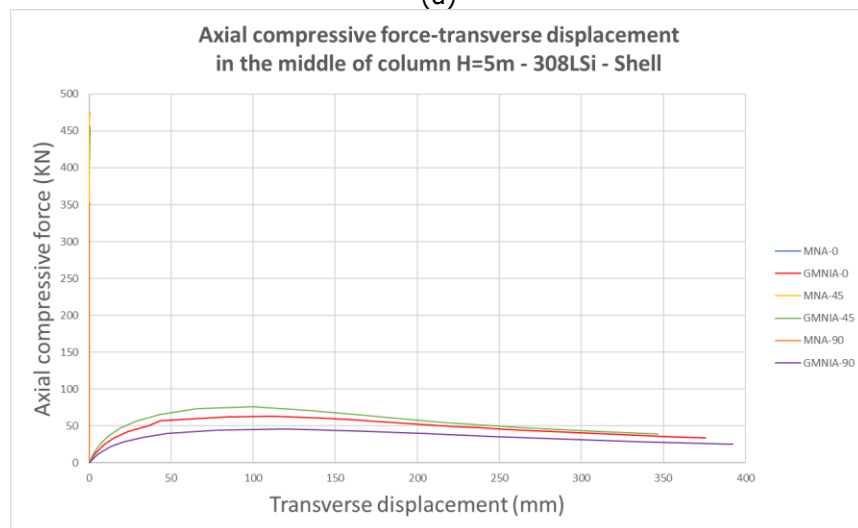
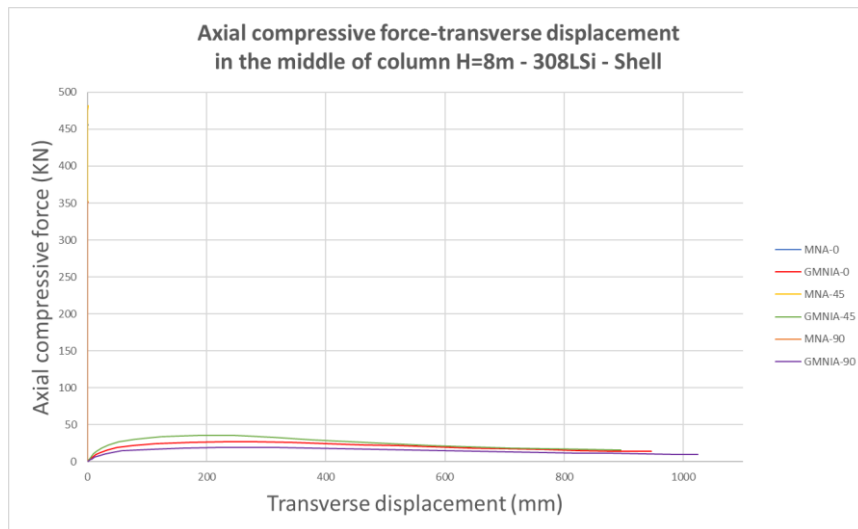
Σχήμα Β-3: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων όγκου συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m



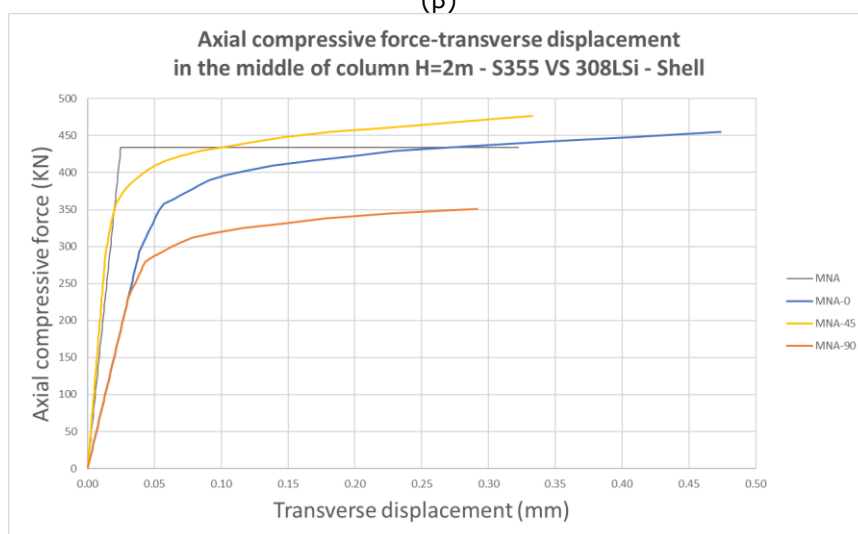
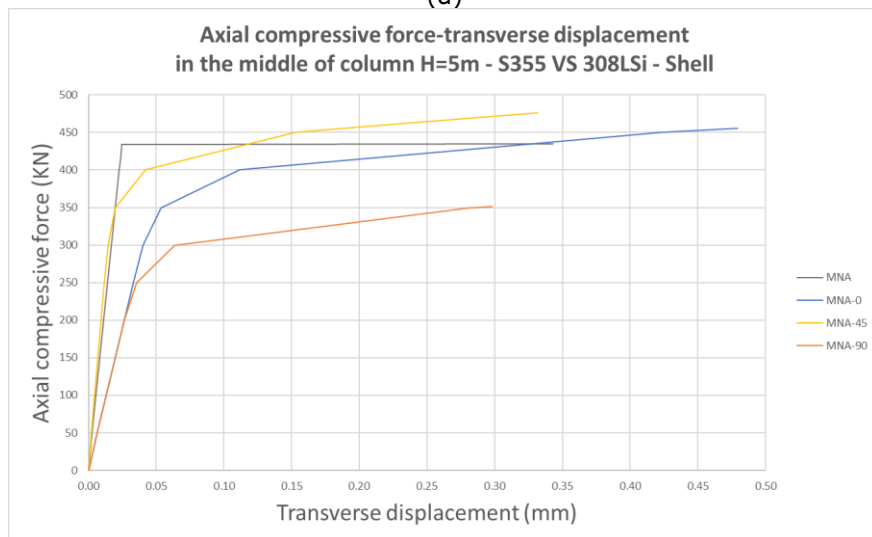
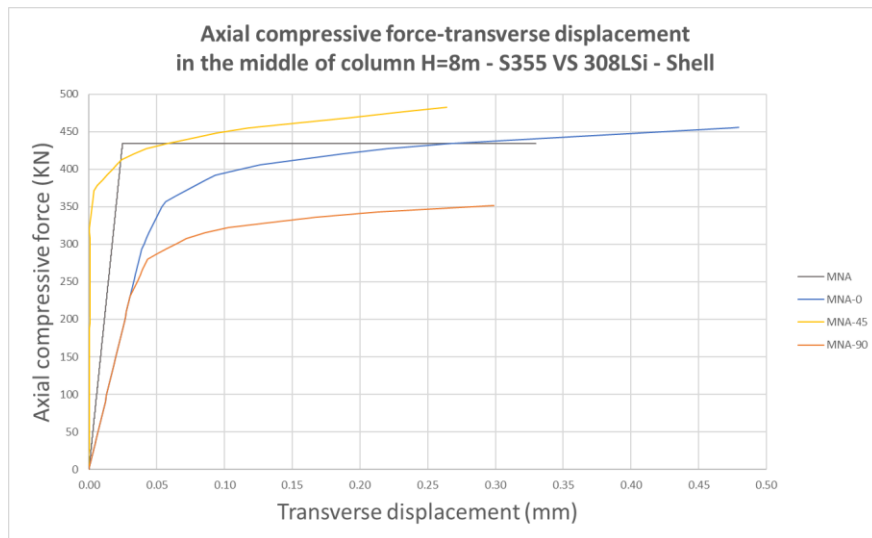
Σχήμα Β-4: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου - κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη (α) H=8 m, (β) H=5 m και (γ) H=2 m



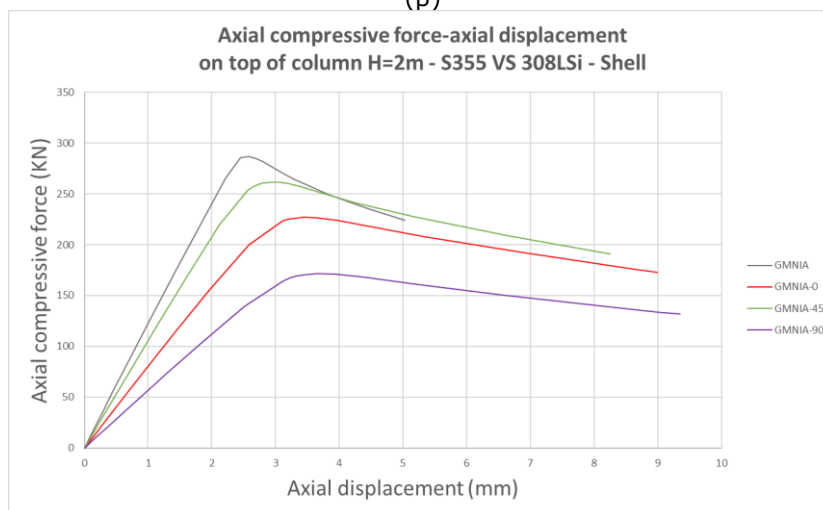
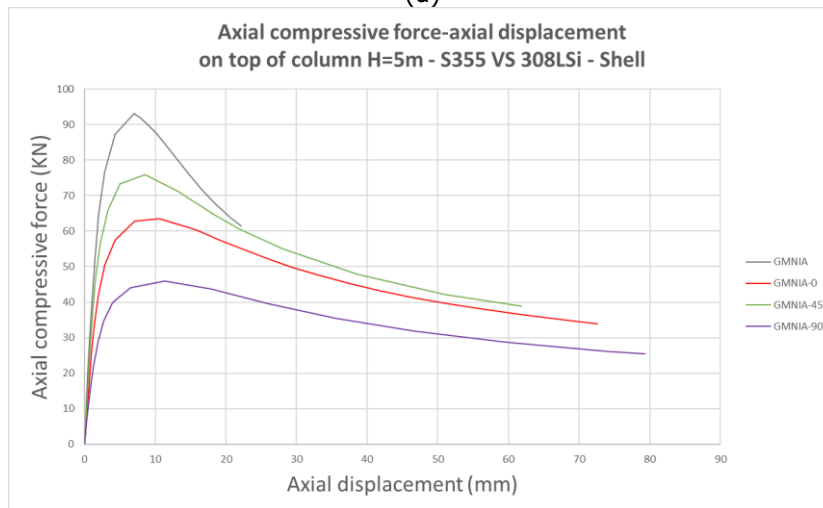
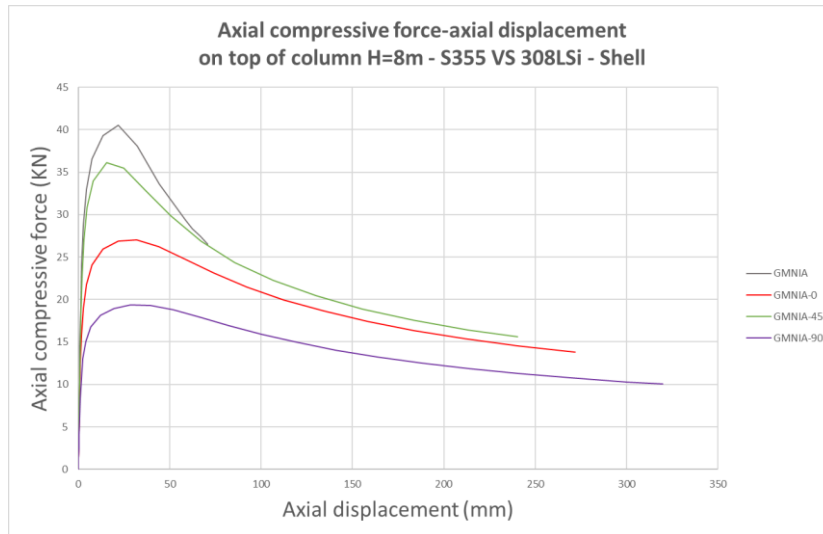
Σχήμα Β-5: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους συμβατικού χάλυβα S355 και ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m



Σχήμα Β-6: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα 308LSi και ύψη (α)  $H=8$  m, (β)  $H=5$  m και (γ)  $H=2$  m



Σχήμα Β-7: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης στο μέσο των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα S355 και 308LSi για ύψη (α) H=8 m, (β) H=5 m και (γ) H=2 m (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού)



Σχήμα Β-8: Διαγράμματα αξονικού θλιπτικού φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης της κορυφής των στύλων για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων κελύφους χάλυβα S355 και 308LSi για ύψη (α) H=8 m, (β) H=5 m και (γ) H=2 m (αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας με ατέλεια)