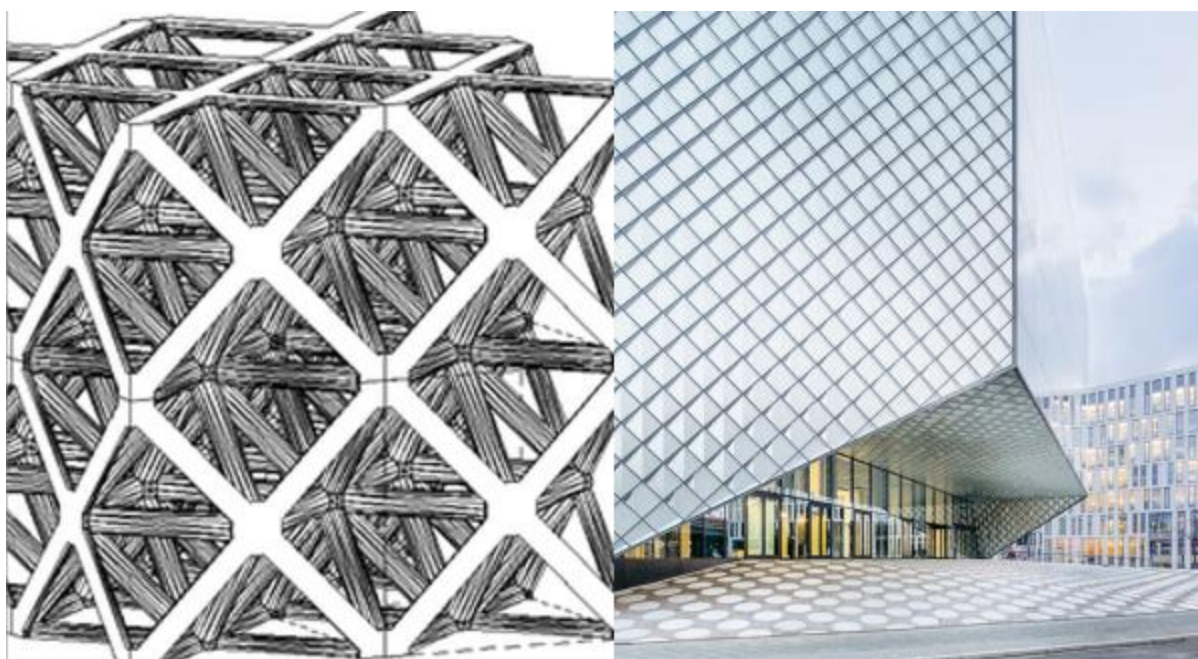




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



## ΜΕΤΑ-ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΑ ΚΤΙΡΙΑ



Διπλωματική Εργασία  
**Έρικα Αθανασία Λιάρου**

EMK ΔΕ 2023 20

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

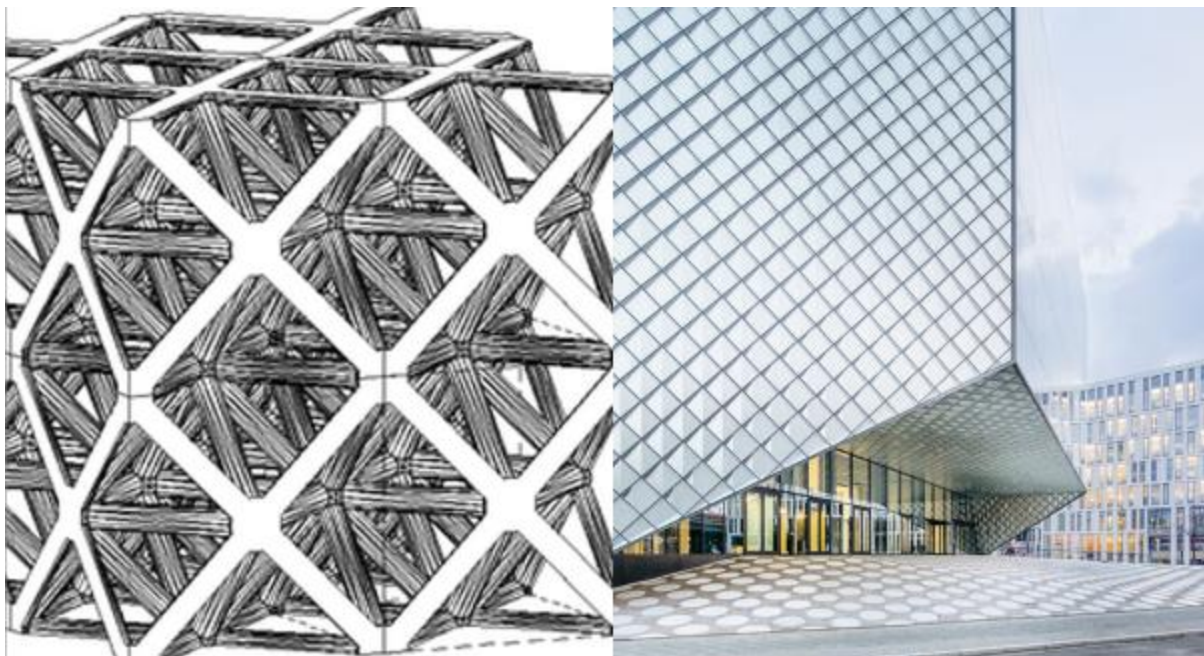




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



## ΜΕΤΑ-ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΑ ΚΤΙΡΙΑ



Διπλωματική Εργασία  
**Έρικα Αθανασία Λιάρου**

EMK ΔΕ 2023 20

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



Copyright © Έρικα Αθανασία Λιάρου, 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 διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Erika Athanasia Liarou, 2023  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma 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 diploma 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).

Έρικα Αθανασία Λιάρου (2023)  
Μετα-Υλικά και Έξυπνα Κτίρια  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΕΜΚ ΔΕ 2023 20  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Erika Athanasia Liarou  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2023 20  
Metamaterials and Smart Buildings  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, ολοκληρώνεται και το ακαδημαϊκό μου ταξίδι στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Πρωτίστως ευχαριστώ τον Καθηγητή μου Χάρη Γαντέ που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τελείως καινούργιο για εμένα πεδίο μελέτης καθώς και για την άψογη καθοδήγησή του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Εργασίας. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη στήριξή της στην πορεία των σπουδών μου, καθώς και τα αγαπημένα μου άτομα, που ήταν δίπλα μου και με εμπύχωναν σε όλη τη διάρκειά τους.





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).





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2023 20

## Μετα-Υλικά και Έξυπνα Κτίρια

Έρिका Αθανασία Λιάρου

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται μια νέα τεχνολογία υλικών, των Μετα-Υλικών, που ως κύριο στόχο έχει την εξοικονόμηση βάρους σε κατασκευές. Το συγκεκριμένο αντικείμενο μελετάται ερευνητικά από ιδρύματα του εξωτερικού, που έχουν επιβεβαιώσει μέσω πειραμάτων ορισμένες πλεονεκτικές ιδιότητες των εν λόγω δομών. Η εφαρμογή τους δεν είναι ακόμη οικονομικά προσιτή σε κλίμακα τεχνικών έργων, ωστόσο αναμένεται ότι με την πρόοδο της τεχνολογίας, αυτό θα γίνει εφικτό. Στο κύριο μέρος της εργασίας γίνονται αναφορές στις πιο σημαντικές εφαρμογές των Μετα-Υλικών και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Επιπλέον παρουσιάζεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα των Μη Γραμμικών Αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, με σκοπό την διερεύνηση της γενικότερης συμπεριφοράς τους αλλά και την επαλήθευση των όσων έχουν ήδη προταθεί από τη Βιβλιογραφία. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, εξετάζεται μια ειδική κατηγορία «έξυπνων κτιρίων» που μέσω κινητών τμημάτων και υλικών τελευταίας τεχνολογίας, στοχεύουν στην κατά το δυνατόν εξοικονόμηση αλλά και παραγωγή ενέργειας. Τέτοιου είδους κτίρια προσπαθούν να απαντήσουν στα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται από τις εκπομπές των συμβατικών κτιρίων, τόσο κατά την κατασκευή όσο και στην χρήση τους. Σε μια εποχή ενεργειακής και περιβαλλοντικής κρίσης, η βιωσιμότητα και η στροφή σε πιο καθαρές και φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις, αποτελούν πλέον Ευρωπαϊκά αλλά και παγκόσμια ορισμένους στόχους μέχρι το τέλος της δεκαετίας. Στην εργασία αναφέρονται μερικοί από τους τρόπους που επιτρέπουν στα κτίρια να πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις.





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



DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2023 20

**Metamaterials and Smart Buildings**

**Erika Athanasia Liarou**

Supervisor: Charis Gantes

**ABSTRACT**

In this thesis, a new material technology, Metamaterials, is investigated, the main goal of which is to save weight in constructions. The specific object is being researched by institutions abroad, which have confirmed through experiments certain advantageous properties of the structures in question. Their application is not yet affordable on the scale of technical projects, however it is expected that with the advancement of technology, this will become possible. In the main part of the thesis, references are made to the most important applications of Metamaterials and their special characteristics. In addition, the process and results of the Non-Linear Analyses carried out in the context of this thesis are presented, with the aim of investigating their general behavior but also verifying what has already been proposed by the Bibliography. In the second part of the thesis, a special category of "smart buildings" is examined which, through mobile parts and materials of the latest technology, aim to save as much energy as possible, as well as produce energy. Such buildings try to respond to the environmental problems created by the emissions of conventional buildings, both in their construction and in their use. In an era of energy and environmental crisis, sustainability and the shift to cleaner and more environmentally friendly solutions are now European and global goals until the end of the decade. The Paper outlines some of the ways in which buildings can meet these requirements.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Μετα-Υλικά και Έξυπνα Κτίρια .....	1
1.3 Δομή Εργασίας.....	2
<b>2. ΜΕΤΑ-ΥΛΙΚΑ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Πλέγματα – Ράβδοι.....	5
2.2.1 Πλέγμα Οκτάδας.....	5
2.2.2 Σύγκριση πλέγματος οκτάδας με άλλες κυτταρικές δομές.....	7
2.2.3 Ατελή Πλέγματα .....	8
2.2.4 Αυξητικά Πλέγματα .....	11
2.3 Πλέγματα - Πλάκες.....	13
<b>3. ΕΞΥΠΝΑ ΚΤΙΡΙΑ .....</b>	<b>17</b>
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή.....	17
3.3 Προσόψεις Έξυπνων Κτιρίων .....	18
3.3.1 Προσόψεις Παθητικής Ηλιακής Σκίασης .....	19
3.3.2 Ενεργητικές Προσόψεις Παραγωγής Ενέργειας .....	23
<b>4. ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΠΛΕΓΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>25</b>
4.1 Μη Γραμμική Ανάλυση Πλέγματος Οκτάδας.....	25
4.2 Μη Γραμμική Ανάλυση Πλέγματος Ρομβοκυβοκτάεδρου .....	35
4.2.1 Πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου - Ανάλυση Α .....	38
4.2.2 Πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου - Ανάλυση Β .....	41
4.3 Συμπεράσματα και σχόλια .....	43
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>45</b>
5.1 Μικροπλέγματα .....	45
5.2 Έξυπνα Κτίρια .....	46
5.3 Μη Γραμμικές Αναλύσεις Μικροπλεγμάτων .....	46
5.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	46
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>49</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Διάγραμμα πυκνότητας - αντοχής εμπορικά διαθέσιμων υλικών (από Schaedler et al 2017)	3
Σχήμα 2-2: από Schaedler et al, 2017	4
Σχήμα 2-3: από Schaedler et al, 2017	4
Σχήμα 2-4: Γεωμετρίες διαφορετικών μικροπλεγμάτων	5
Σχήμα 2-5: Octet truss (α) Γεωμετρία μονάδας (β) Πλέγμα οκτάδας (από Ling, Tancogne et al)	5
Σχήμα 2-6: Μορφές αστοχίας πλέγματος οκτάδας (από Tancogne et al, 2016)	5
Σχήμα 2-7: Διαγράμματα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για πλέγματα οκτάδας διαφόρων πυκνοτήτων (από Tancogne et al, 2016)	6
Σχήμα 2-8: Μακροσκοπική απόκριση πλεγμάτων οκτάδας διαφόρων πυκνοτήτων για δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (από Tancogne et al, 2016)	6
Σχήμα 2-9: Παράμετρος α (α) Γεωμετρία μεμονωμένης ράβδου (β) Σχέση α με απορρόφηση ενέργειας (από Tancogne et al, 2016)	7
Σχήμα 2-10: Γεωμετρίες κηρήθρας και πλέγματος οκτάδας (από Schaedler, Deshpande et al)	7
Σχήμα 2-11: Γεωμετρίες μεταλλικού αφρού και πλέγματος οκτάδας (από Schaedler et al, 2017)	8
Σχήμα 2-12: Σύγκριση της δυσκαμψίας και της αντοχής μεταξύ του πλέγματος οκτάδας, των μεταλλικών αφρών και των θεωρητικών άνω ορίων για κυτταρικά υλικά (από Deshpande et al, 2001)	8
Σχήμα 2-13: Γεωμετρία μονάδας και πλέγματα οκτάδας και ρομβοκυβοκτάεδρου (από L. Liu et al, 2017)	9
Σχήμα 2-14: Εικόνες SEM ατελειών στα πλέγματα ρομβοκυβοκτάεδρου και οκτάδας (από L. Liu et al, 2017)	9
Σχήμα 2-15: Στατιστική κατανομή ατελειών σε μία μονάδα οκτάδας (από L. Liu et al, 2017)	9
Σχήμα 2-16: Λειτουργία συμβατικών και αυξητικών υλικών	11
Σχήμα 2-17: Γεωμετρία αυξητικού πλέγματος (από Tzortzinis et al, 2022)	12
Σχήμα 2-18: Υποστύλωμα Ο/Σ (α) συμβατικά οπλισμένο και (β) με εφαρμογή αυξητικού πλέγματος (από Tzortzinis et al, 2022)	12
Σχήμα 2-19: Διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης και αναλογίας διαστολής – ανηγμένης παραμόρφωσης για αυξητικά οπλισμένο και άοπλο σκυρόδεμα (από Tzortzinis et al, 2022)	12
Σχήμα 2-20: Πειραματική διάταξη δοκιμής μονοαξονικής συμπίεσης για άοπλο και αυξητικά οπλισμένο σκυρόδεμα (από Tzortzinis et al, 2022)	13
Σχήμα 2-21: (α) Πλέγμα αυξητικού οπλισμού (β) Σύγκριση άοπλου, αυξητικά οπλισμένου και συμβατικά οπλισμένου σκυροδέματος (c) Πλέγμα συμβατικού οπλισμού (από Tzortzinis et al, 2022)	13
Σχήμα 2-22: Συνήθεις γεωμετρίες πλεγμάτων πλακών (από F. Derveni et al, 2022)	14
Σχήμα 2-23: Επιρροή ατελειών σε πλέγματα με λίγες και με πολλές ενώσεις (από F. Derveni et al, 2022)	15
Σχήμα 2-24: Διαγράμματα σχετικής πυκνότητας – λόγου Poisson για διάφορες γεωμετρίες πλεγμάτων πλακών (από F. Derveni et al, 2022)	15
Σχήμα 2-25: Καμπύλες τάσεις – παραμόρφωσης για διάφορες πυκνότητες και πλήθος ενώσεων (από F. Derveni et al, 2022)	16
Σχήμα 2-26: Επιρροή ατελειών σε πυκνότητα και πλήθος ενώσεων πλέγματος πλάκας	16
Σχήμα 3-1: Villa Girasole (από <a href="http://www.iconichouses.org">www.iconichouses.org</a> )	18
Σχήμα 3-2: Κάτοψη και τομή Villa Girasole (από <a href="http://www.skolnick.com">www.skolnick.com</a> )	18



Σχήμα 3-3: Συμβατικές δυναμικές προσόψεις 1 (από Li et al, 2021) .....	19
Σχήμα 3-4: Συμβατικές δυναμικές προσόψεις 1 (από Li et al, 2021) .....	20
Σχήμα 3-5: Καμπύλωση λεπτού φύλλου μέσω της κάμψης ενός στιβαρού σπονδύλου (από Li et al, 2021) .....	20
Σχήμα 3-6: Εφαρμογή βιο-μιμητικών προσόψεων (από Li et al, 2021).....	21
Σχήμα 3-7: Εφαρμογή βιο-μιμητικών προσόψεων με απόκριση στην υγρασία (από Li et al, 2021).....	21
Σχήμα 3-8: Εφαρμογές δομών origami/kirigami για την ελεγχόμενη διέλευση φωτός (από Li et al, 2021) .....	22
Σχήμα 3-9: Εφαρμογή δομών kirigami στους Πύργους Al Bahar (από Li et al, 2021) .....	22
Σχήμα 3-10: Λειτουργία wrinkle based έξυπνων παραθύρων (από Li et al, 2021) .....	22
Σχήμα 3-11: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας πιλοτικού κτιρίου με χρήση συμβατικών και έξυπνων παραθύρων (από Li et al, 2021) .....	23
Σχήμα 3-12: Ενσωμάτωση ηλιακών πάνελ σε δυναμικές προσόψεις.....	23
Σχήμα 3-13: Συνδυασμός δομών kirigami με CPVs .....	24
Σχήμα 4-1: Γεωμετρία μονάδας οκτάδας (α) Μοντέλο CAD (β) από V.S. Deshpande et al (2001) .....	26
Σχήμα 4-2: Πλέγμα οκτάδας 3x3x3 στο λογισμικό ADINA.....	26
Σχήμα 4-3: Συνοριακές συνθήκες στήριξης πλέγματος οκτάδας, όπως σχεδιάστηκε στο λογισμικό ADINA .....	27
Σχήμα 4-4: Εικόνα αστοχίας GMNA πλέγματος οκτάδας.....	27
Σχήμα 4-5: 1 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος οκτάδας.....	28
Σχήμα 4-6: 2 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος οκτάδας.....	28
Σχήμα 4-7: 3 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος οκτάδας.....	28
Σχήμα 4-8: Παραμορφωμένη εικόνα προσομοιώματος πλέγματος οκτάδας και τάσεις που αναπτύσσονται .....	30
Σχήμα 4-9: Παραμορφωμένη εικόνα προσομοιώματος πλέγματος οκτάδας με μεγεθυντικό συντελεστή .....	30
Σχήμα 4-10: Ανηγμένες παραμορφώσεις προσομοιώματος πλέγματος οκτάδας .....	31
Σχήμα 4-11: Εικόνα αστοχίας πλέγματος οκτάδας από FEM (από Liu et al) .....	31
Σχήμα 4-12: Κόμβοι 234 και 1404 πλέγματος οκτάδας .....	31
Σχήμα 4-13: Δρόμος ισορροπίας άνω και δεξιά κόμβου κατά Χ .....	32
Σχήμα 4-14: Δρόμος ισορροπίας άνω και δεξιά κόμβου (234) κατά Υ .....	32
Σχήμα 4-15: Δρόμος ισορροπίας άνω και δεξιά κόμβου (234) κατά Ζ .....	32
Σχήμα 4-16: Δρόμος ισορροπίας άνω και αριστερά κόμβου (1404) κατά Χ.....	33
Σχήμα 4-17: Δρόμος ισορροπίας άνω και αριστερά κόμβου (1404) κατά Υ.....	33
Σχήμα 4-18: Δρόμος ισορροπίας άνω και αριστερά κόμβου (1404) κατά Ζ.....	33
Σχήμα 4-19: Ιδιομορφή πλέγματος οκτάδας μικρής πυκνότητας – “twist mode”.....	34
Σχήμα 4-20: Μηχανισμός αστοχίας πλέγματος οκτάδας μικρής πυκνότητας – “twist mode”.....	34
Σχήμα 4-21: Γεωμετρία Ρομβοκυβοκτάεδρου (α) από Meral Şadiye Cakmak, 2014 (β) Μοντέλο Auto-CAD.....	35
Σχήμα 4-22: Πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου στο λογισμικό ADINA.....	35
Σχήμα 4-23: Συνοριακές συνθήκες πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου .....	36
Σχήμα 4-24: 1 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου, άξονες Ζ-Χ και Ζ-Υ.....	36

Σχήμα 4-25: 2 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου, άξονες Z-X και Z-Y.....	36
Σχήμα 4-26: 3 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου.....	37
Σχήμα 4-27: 4 <sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου.....	37
Σχήμα 4-28: Κόμβοι που εισήχθησαν οι ατέλειες - μοντέλο πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου.....	38
Σχήμα 4-29: Αναπτυσσόμενες τάσεις πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου - Ανάλυση A.....	39
Σχήμα 4-30: Παραμορφωμένη εικόνα – Ανάλυση A.....	39
Σχήμα 4-31: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά X – Ανάλυση A.....	40
Σχήμα 4-32: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά Y – Ανάλυση A.....	40
Σχήμα 4-33: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά Z – Ανάλυση A.....	40
Σχήμα 4-34: Αναπτυσσόμενες τάσεις πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου - Ανάλυση B.....	41
Σχήμα 4-35: Παραμορφωμένη εικόνα – Ανάλυση B.....	42
Σχήμα 4-36: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά X – Ανάλυση B.....	42
Σχήμα 4-37: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά Y – Ανάλυση B.....	43
Σχήμα 4-38: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά Z – Ανάλυση B.....	43

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Διαφορές μεταξύ octet truss lattice και rhombicubooctahedron lattice .....	10
Πίνακας 4-1: Φορτία αντοχής μεμονωμένης ράβδου $L = 2.2 \text{ mm}$ και $D = 0.5 \text{ mm}$ .....	29
Πίνακας 4-2: Ατέλειες A ανάλυσης (από ADINA) .....	39
Πίνακας 4-3: Ατέλειες B ανάλυσης (από ADINA) .....	41



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Στον κλάδο του μηχανικού είναι επιβεβλημένη η συνεχής μελέτη και προσαρμογή στην εξελισσόμενη τεχνολογία. Καθώς οι βασικές αρχές της επιστήμης και της μηχανικής που αφορούν τον τομέα του Πολιτικού Μηχανικού θεωρούνται σχετικά παγιωμένες, η προσοχή στρέφεται στις νέες μεθόδους και τα υλικά που εισέρχονται στην βιομηχανία. Με την πάροδο του χρόνου, ο μηχανικός οφείλει να ενημερώνεται και να βελτιώνει τις μεθόδους επίλυσης των προβλημάτων που προκύπτουν, δεδομένου ότι γίνονται διαθέσιμα νέα εργαλεία και επιλογές που συχνά προσφέρουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα τόσο στην ίδια τη δουλειά του μηχανικού, όσο και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Με γνώμονα τα παραπάνω, σε αυτήν την εργασία μελετώνται δύο νέες τεχνολογίες που έχουν αναδυθεί στον κλάδο των κατασκευών, τα Μετα-Υλικά και τα Έξυπνα Κτίρια. Οι δύο τεχνολογίες εξελίσσονται ανεξάρτητα και αναμένεται να δώσουν νέες προοπτικές στον χώρο των ελαφρών κατασκευών και των ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων.

## 1.2 Μετα-Υλικά και Έξυπνα Κτίρια

Τα Μετα-Υλικά, ένας όρος που εισήχθη για πρώτη φορά στις αρχές του 21ου αιώνα, αντιπροσωπεύουν υλικά σχεδιασμένα να έχουν ιδιότητες που δεν απαντώνται στη φύση. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά χρησιμοποιούμενα υλικά, αντλούν τα μοναδικά τους χαρακτηριστικά από δομές μικρο- και νανοκλίμακας, αποτελούμενες από προσεκτικά σχεδιασμένα μοτίβα. Τα μικροπλέγματα, ένα υποσύνολο των Μετα-Υλικών, διαθέτουν μια δομή που μοιάζει με πλέγμα, η οποία αποτελείται από διασυνδεδεμένες ράβδους ή πλάκες. Αυτός ο περίπλοκος σχεδιασμός προσδίδει στα μικροδικτυώματα εξέχουσες ιδιότητες, όπως εξαιρετική ελαφρότητα, αξιοσημείωτη αντοχή και εντυπωσιακές ικανότητες απορρόφησης ενέργειας. Οι τεχνικές προσθετικής κατασκευής – ή αλλιώς 3D-printing – κάνουν πλέον εφικτή την κατασκευή δομών όπως τα μικροπλέγματα, τηρώντας την απαραίτητη προσοχή στην λεπτομέρεια, ανεξαρτήτως κλίμακας.

Το δεύτερο σημείο που πραγματεύεται η εργασία είναι οι ανταποκρινόμενες προσόψεις Έξυπνων Κτιρίων. Στην παρούσα εποχή που χαρακτηρίζεται από την επιταχυνόμενη αστικοποίηση και την εστίαση στη βιωσιμότητα, υπάρχει επιτακτική ανάγκη να διερευνηθούν καινοτόμες λύσεις που συνδυάζουν την αισθητική με την περιβαλλοντική ευθύνη. Οι έξυπνες προσόψεις κτιρίων αντιμετωπίζουν τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ενεργειακά αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον κατασκευές. Χρησιμοποιούν ως η ζωτική διασύνδεση μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος ενός κτιρίου, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση της θερμότητας, στην εξοικονόμηση ενέργειας και στη

συνολική απόδοση του κτιρίου. Με την εγκατάσταση τέτοιου είδους δομών ως εξωτερικά κελύφη στα κτίρια, δίνεται η δυνατότητα για εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση της αισθητικής του εσωτερικού χώρου. Παράλληλα, ενισχύοντας τις προσόψεις με συστήματα παραγωγής ενέργειας, όπως για παράδειγμα φωτοβολταϊκά πάνελ, ανοίγεται ένας νέος δρόμος στην υλοποίηση ενεργειακά αυτόνομων κτιρίων, αλλά ακόμη και ενεργειακά θετικών κτιρίων όταν η παραγόμενη ενέργεια υπερβεί την ζήτηση του κτιρίου. Η ανάγκη εξέλιξης των Έξυπνων Κτιρίων γίνεται σαφής αν κανείς αναλογιστεί ότι το 40% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οφείλεται μόνο στη βιομηχανία των κατασκευών.

Στόχος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη των δύο παραπάνω καινοτόμων τεχνολογιών καθώς και η καλύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων και των χρήσεών τους. Παράλληλα, στο πλαίσιο εμβάθυνσης στα Μετα-Υλικά και συγκεκριμένα στην μηχανική των μικροπλεγμάτων, πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA, εξερευνώντας τη συμπεριφορά δύο ραβδωτών μικροπλεγμάτων κατασκευασμένων από χάλυβα, υπό μονοαξονική θλίψη.

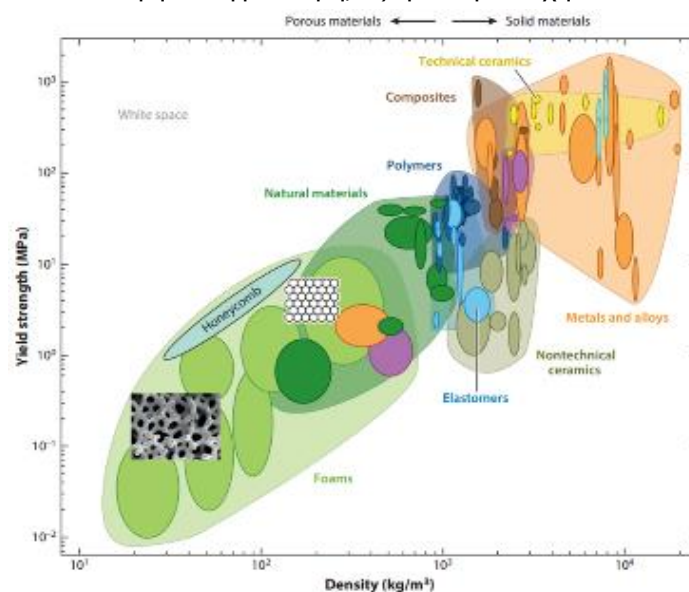
### 1.3 Δομή Εργασίας

Ως τώρα, έγινε μια σύντομη εισαγωγή στα αντικείμενα που απασχόλησαν τη συγγραφή της Εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των μικροπλεγμάτων, αποτελούμενων από ράβδους και πλάκες. Παρουσιάζονται με λεπτομέρεια οι ξεχωριστές ιδιότητές τους αλλά και η μηχανική που κρύβεται πίσω από αυτές. Δίνεται επίσης έμφαση στην σημασία της γεωμετρίας, του πάχους των συστατικών τους μερών, τα υλικά κατασκευής, καθώς και στην κρισιμότητα των ατελειών που προκύπτουν αναπόφευκτα μέσα από τη διαδικασία κατασκευής τους. Στο τρίτο κεφάλαιο εξερευνώνται οι διάφοροι τύποι έξυπνων προσόψεων που συμβάλλουν στην εξοικονόμηση και την παραγωγή ενέργειας. Αναλύονται οι τρόποι με τους οποίους αυτές οι προσόψεις μπορούν να κινηθούν, να αλλάξουν σχήμα ή να ρυθμίσουν την διαφάνειά τους, προκειμένου να ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες, με σκοπό να ελέγχουν την ποσότητα του ηλιακού φωτός που εισέρχεται στο εσωτερικό του κτιρίου. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στις ενεργητικές προσόψεις, που συνδυάζουν τις προσόψεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια προσπάθεια αναπαραγωγής των όσων έχουν βρεθεί στη βιβλιογραφία, αναφορικά με δύο τύπους μικροπλεγμάτων. Για το πλέγμα οκτάδας και το πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Εξηγούνται οι παράμετροι που θεωρήθηκαν και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εκτέλεση των αναλύσεων, καθώς και τα αποτελέσματά τους σε σύγκριση με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Τέλος, το πέμπτο κεφάλαιο περιέχει γενικά συμπεράσματα που αφορούν την χρήση και την λειτουργία των δύο παραπάνω καινοτόμων τεχνολογιών, όπως επίσης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## 2. ΜΕΤΑ-ΥΛΙΚΑ

### 2.1 Εισαγωγή

Στον τομέα της επιστήμης και της μηχανικής των υλικών, έχει αναδυθεί μια πρωτοποριακή κατηγορία υλικών, που υπόσχονται να φέρουν επανάσταση σε πολυάριθμες βιομηχανίες και να ανοίξουν το δρόμο για άνευ προηγουμένου τεχνολογικές εξελίξεις. Αυτά τα υλικά, γνωστά ως Μετα-Υλικά, είναι κατασκευασμένα ώστε να διαθέτουν ιδιότητες και συμπεριφορές που αφηφούν τους συμβατικούς περιορισμούς των φυσικών ουσιών. Τα Μετα-Υλικά οφείλουν τις εξαιρετικές τους ιδιότητες στις περίπλοκες και με ακρίβεια σχεδιασμένες μικροδομές τους. Στο συνεχώς εξελισσόμενο τοπίο των πολιτικών μηχανικών, η εμφάνιση των Μετα-Υλικών υπόσχεται να αποτελέσει μια μεταμορφωτική δύναμη, προσφέροντας καινοτόμες λύσεις σε μακροχρόνιες προκλήσεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή. Πρόκειται για κυτταρικά υλικά που ανταποκρίνονται σε απαιτητικές συνθήκες φόρτισης, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δυνατή ποσότητα υλικού. Τα υλικά με μεγάλο όγκο κενών στο εσωτερικό τους, δεν κάνουν εμφάνιση για πρώτη φορά. Στο διάγραμμα του Σχήματος 2-1 τοποθετούνται τα ήδη γνωστά υλικά συναρτήσει της πυκνότητας και της αντοχής τους. Τα Μετα-Υλικά αποσκοπούν στο να «συμπληρώσουν» αυτό το διάγραμμα, λαμβάνοντας μια θέση στον λευκό χώρο που βρίσκεται πάνω και αριστερά. Τα ζητούμενα είναι σαφή: ελαφριά δομή, εξαιρετική αντοχή.



Σχήμα 2-1: Διάγραμμα πυκνότητας - αντοχής εμπορικά διαθέσιμων υλικών (από Schaedler et al 2017)

Η κεντρική ιδέα των Μετα-Υλικών αποτελεί μίμηση της φύσης. Ειδικότερα, η μορφή και η λειτουργία τους θυμίζουν το εσωτερικό μελών ζωντανών οργανισμών όπως το ράμφος και τα οστά πτηνών, που είναι από τη φύση τους ελαφριά αλλά ανθεκτικά (Σχήματα 2-2 και 2-3). Η πολύ μικρή πυκνότητα σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή δημιούργησαν την ανάγκη να κατασκευαστούν δομές με μεγάλο όγκο κενών. Στην ίδια φιλοσοφία, υλικά όπως οι αφροί (foams) και οι κηρήθρες (honeycombs), χρησιμοποιούνται κατά κόρον με εφαρμογή κυρίως στον χώρο της αεροναυπηγικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ωστόσο, εμφανίζουν ιδιότητες όπως η συγκέντρωση της αστοχίας στους συνδέσμους ή η καλή απόκριση μόνο σε μία διεύθυνση φόρτισης, που δεν επιτρέπουν τη χρήση τους σε έργα Πολιτικού Μηχανικού. Τα μικροπλέγματα (microlattices) είναι πλέγματα αποτελούμενα από επαναλαμβανόμενες μονάδες ιδιαίτερης γεωμετρίας, της κλίμακας των μερικών χιλιοστών και κατασκευάζονται από διάφορα υλικά βάσης (μεταλλικά, πολυμερή, κεραμικά κ.α). Η διαδικασία κατασκευής των μεταλλικών πλεγμάτων είναι, μεταξύ άλλων, το 3D-Printing, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ακριβή, ειδικά αν πρόκειται για κλίμακα - ακόμη και πολύ μικρού - τεχνικού έργου.

Οι μηχανικές ιδιότητες των πλεγμάτων εξαρτώνται κυρίως από το υλικό βάσης και από την γεωμετρική διάταξη των συστατικών που τα αποτελούν (ράβδοι/πλάκες). Τα μεταλλικά μικροπλέγματα έχουν συνήθως ως υλικό βάσης τον χάλυβα ή κράματα αλουμινίου και τιτανίου. Η γεωμετρία των μικροπλεγμάτων ποικίλει, ενώ έχουν δοκιμαστεί διάφορες γεωμετρικές δομές (ως επαναλαμβανόμενη μονάδα) που παρουσιάζουν πλεονεκτικές ιδιότητες ανά περίπτωση. Πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και «αφαιρετικής αρχιτεκτονικής», με τελικό αποτέλεσμα ένα πλέγμα με τέτοια δομή που θα ανταποκρίνεται με τον καλύτερο τρόπο σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης.



Σχήμα 2-2: από Schaedler et al, 2017

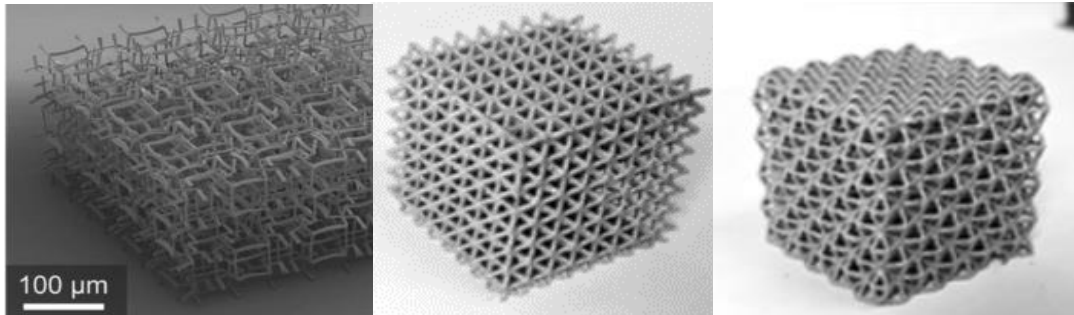


Σχήμα 2-3: από Schaedler et al, 2017



## 2.2 Πλέγματα – Ράβδοι

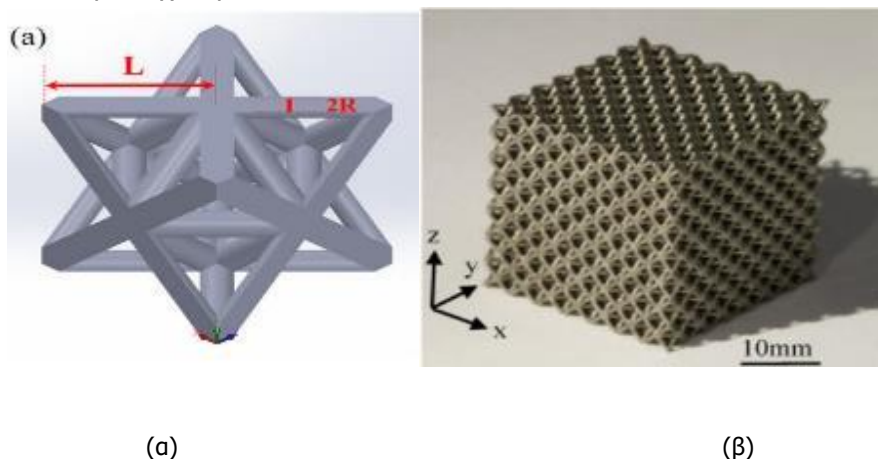
Η πρώτη μεγάλη κατηγορία πλεγμάτων αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μονάδες ραβδωτών δικτυωμάτων. Έχουν μελετηθεί αρκετές δομές αλλά στην συγκεκριμένη εργασία θα δοθεί έμφαση στις δομές octet truss και rhombicuboctahedron.



Σχήμα 2-4: Γεωμετρίες διαφορετικών μικροπλεγμάτων

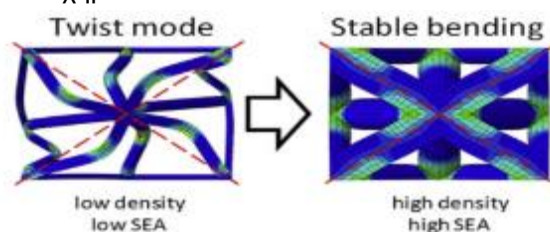
### 2.2.1 Πλέγμα Οκτάδας

Στη βιβλιογραφία έχει αναλυθεί εκτενώς η δομή octet truss lattice (πλέγμα οκτάδας). Στους κόμβους της συντρέχουν 12 μέλη, γεγονός που καθιστά το πλέγμα οκτάδας έναν σταθερό σχηματισμό. Επίσης, η συγκεκριμένη δομή κυριαρχείται από εφελκυσμό, χαρακτηριστικό που προσδίδει ολκιμότητα και γενικά ευνοεί τις κατασκευές από χάλυβα.

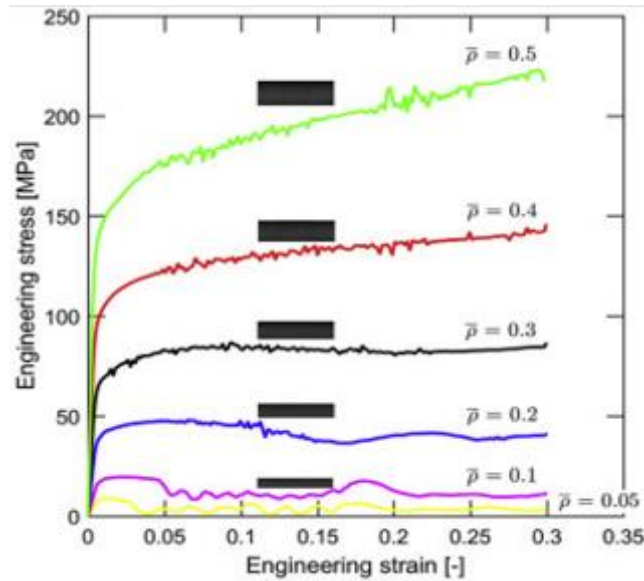


Σχήμα 2-5: Octet truss (α) Γεωμετρία μονάδας (β) Πλέγμα οκτάδας (από Ling, Tancogne et al)

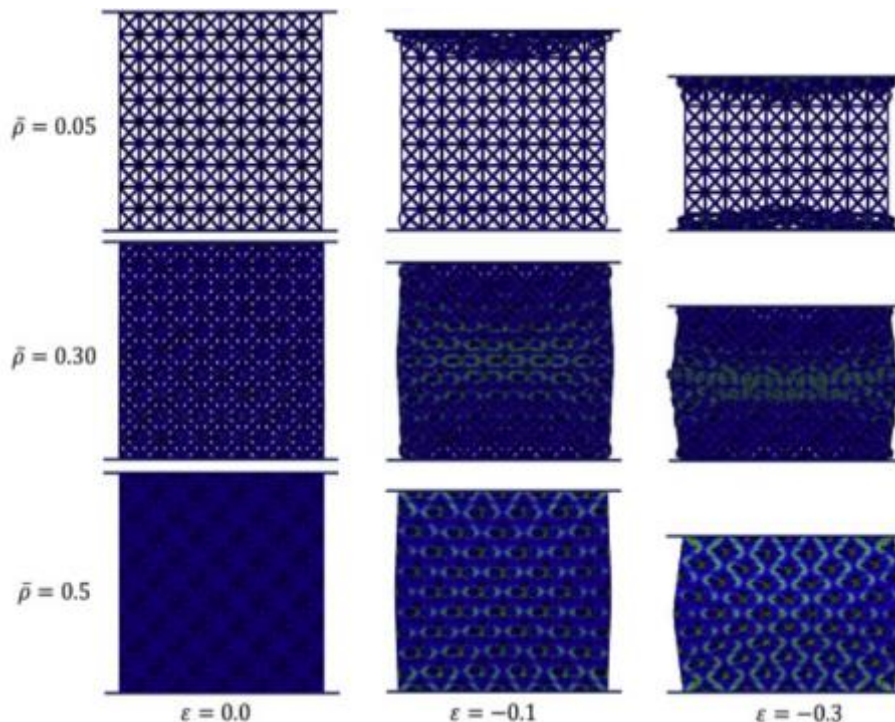
Γίνεται αναφορά στην εργασία των Tancogne et al, ώστε να φανούν εποπτικά οι σημαντικότερες ιδιότητες αυτού του μικροπλέγματος. Η κατασκευή του πραγματοποιείται μέσω 3D-Printing, με χρήση της μεθόδου Selective Laser Melting (SLM). Σκοπός της κατασκευής του είναι η υψηλή απορρόφηση ενέργειας και έχει διαπιστωθεί από πειράματα ότι ο μηχανισμός αστοχίας του εξαρτάται από τη σχετική του πυκνότητα (πάχος ραβδών), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6. Η μετάβαση από τον μηχανισμό «twist mode» στον μηχανισμό «stable bending» πραγματοποιείται για πυκνότητα πλέγματος περίπου 30%. Αυτό διαπιστώνεται και από τα Σχήματα 2-7 και 2-8.



Σχήμα 2-6: Μορφές αστοχίας πλέγματος οκτάδας (από Tancogne et al, 2016)

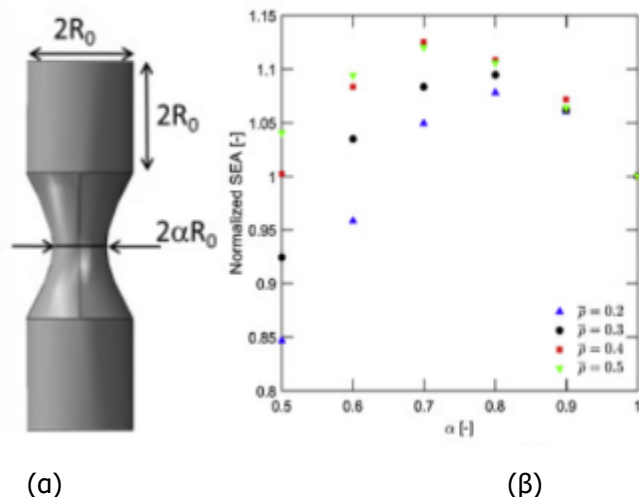


Σχήμα 2-7: Διαγράμματα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για πλέγματα οκτάδας διαφόρων πυκνοτήτων (από Tancogne et al, 2016)



Σχήμα 2-8: Μακροσκοπική απόκριση πλεγμάτων οκτάδας διαφόρων πυκνοτήτων για δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (από Tancogne et al, 2016)

Στο Σχήμα 2-7 παρατίθενται διαγράμματα με τη σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορες πυκνότητες πλέγματος. Για πυκνότητες άνω του 30% προκύπτουν διαγράμματα με σταθερό και κρατυνόμενο πλατό, που είναι επιθυμητό για την καλή απόκριση των μεταλλικών κατασκευών. Στο Σχήμα 2-8 φαίνονται πλέγματα διαφόρων πυκνοτήτων σε επιλεγμένες φάσεις μιας δοκιμής μονοαξονικής συμπίεσης. Παρατηρείται ότι για μικρές σχετικές πυκνότητες, η αστοχία ξεκινά από τα εξωτερικά στρώματα μέσω τοπικών αστοχιών των ράβδων ενώ για μεγαλύτερες πυκνότητες η αστοχία μεταφέρεται προς τα εσωτερικά στρώματα με μία τάση πλευρικής διαστολής στο σώμα του πλέγματος. Όπως είναι αναμενόμενο, η σχετική πυκνότητα του πλέγματος – ή διαφορετικά το πάχος των ράβδων – είναι καθοριστικής σημασίας για την αντοχή του.



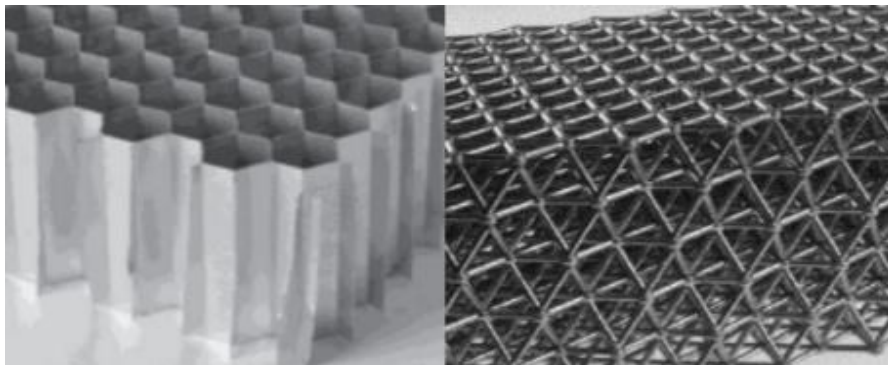
Σχήμα 2-9: Παράμετρος  $\alpha$  (α) Γεωμετρία μεμονωμένης ράβδου (β) Σχέση  $\alpha$  με απορρόφηση ενέργειας (από Tancogne et al, 2016)

Έγινε διερεύνηση και σχετικά με το σχήμα των μελών. Το Σχήμα 2-9 είναι ποιοτικό ως προς την παράμετρο " $\alpha$ ", η οποία αποδείχθηκε ότι επηρεάζει ως κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα. Δεξιά φαίνεται ότι για τιμές του  $\alpha$  περίπου ίσες με 0.7-0.8, επιτυγχάνεται η μέγιστη απορρόφηση ενέργειας, που είναι άλλωστε και ένας από τους κύριους κατασκευαστικούς στόχους των μικροπλεγμάτων.

## 2.2.2 Σύγκριση πλέγματος οκτάδας με άλλες κυτταρικές δομές

### A. Κηρήθρες

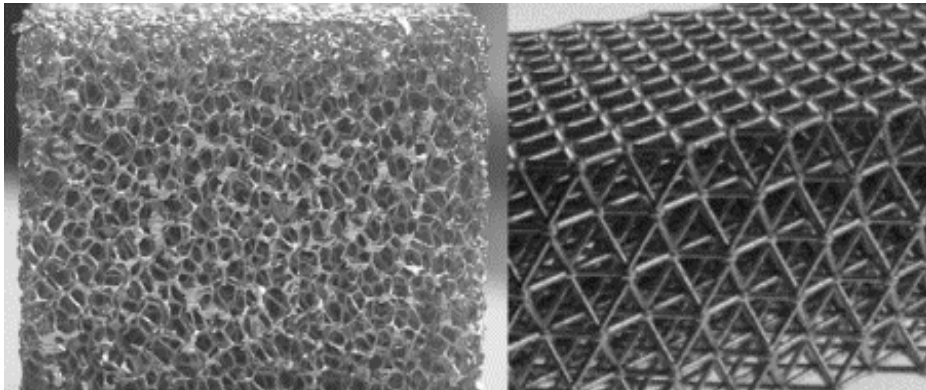
Οι κηρήθρες είναι ένα υλικό που έχει εισαχθεί εδώ και πολλά χρόνια στη βιομηχανία. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ανάλογα με αυτά των μικροπλεγμάτων, με ορισμένες διαφορές που δεν τις επιτρέπουν να αναλάβουν το ρόλο δομικού υλικού. Κυριότερη διαφορά είναι ότι οι κηρήθρες αποτελούν ένα «δισδιάστατο» υλικό που συμπεριφέρεται καλά σε μία διεύθυνση φόρτισης, εκείνη δηλαδή που είναι κάθετη στο χαρακτηριστικό εξαγωνικό σχήμα. Αντίθετα, το πλέγμα οκτάδας, αποτελείται από μονάδες γεωμετρίας που ορίζονται στον χώρο και όχι στο επίπεδο. Έτσι, χαρακτηρίζεται ως ένα «τριδιάστατο» υλικό που είναι κατασκευασμένο ώστε να έχει καλή απόκριση για οποιαδήποτε διεύθυνση φόρτισης. Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι για ίδιο υλικό βάσης και ίδια πυκνότητα, μεταξύ των δύο δομών, οι κηρήθρες παρουσιάζουν υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας. Ωστόσο, στο εμπόριο κυκλοφορούν κηρήθρες με πυκνότητα έως 5%, οι οποίες είναι σαφώς υποδεέστερες ενός πλέγματος οκτάδας πυκνότητας 30%, μια τυπική τιμή για πλέγμα οκτάδας με ικανοποιητική δομική συμπεριφορά. Πάντως, το πλέγμα οκτάδας κρίνεται καταλληλότερο για εφαρμογές όπου η απαίτηση για χαμηλό βάρος είναι υψηλής προτεραιότητας. Συμπερασματικά, και οι δύο αυτοί τύποι υλικών έχουν χρησιμότητα σε ποικίλες εφαρμογές, αλλά η επιλογή μεταξύ των δύο εξαρτάται από τις παραμέτρους και απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος.



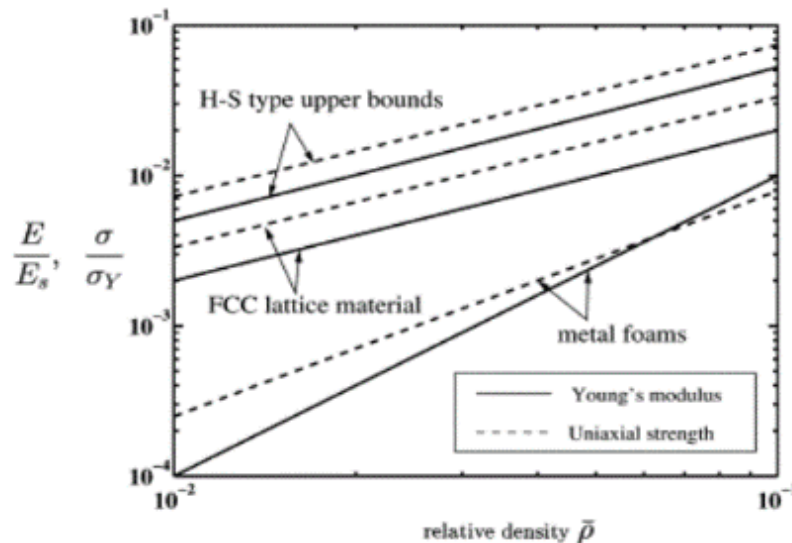
Σχήμα 2-10: Γεωμετρίες κηρήθρας και πλέγματος οκτάδας (από Schaedler, Deshpande et al)

## B. Μεταλλικοί Αφροί

Οι μεταλλικοί αφροί είναι δομές στοχαστικής γεωμετρίας και απαντούν επίσης σε προβλήματα που η μείωση του βάρους είναι σημαντική. Όπως και οι κηρήθρες, ούτε αυτοί μπορούν να λειτουργήσουν ως δομικά αποτελεσματικό υλικό. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η αντοχή στην κρούση ή η απόσβεση ήχου και δονήσεων είναι σημαντικές. Από την άλλη, δεν είναι αποτελεσματικοί για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη φέρουσα ικανότητα, όπως το πλέγμα οκτάδας. Σαφώς όμως, η κατασκευή των αφρών είναι αρκετά πιο εύκολη και οικονομική από το 3D-Printing που χρησιμοποιείται για τα μικροπλέγματα. Το πλέγμα οκτάδας έχει 3-10 φορές μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία από τους αφρούς, σύμφωνα με το Σχήμα 2-12. Μια ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι ότι μικροπλέγματα όπως το οκταδικό, πλησιάζουν το 1/2 των θεωρητικών άνω ορίων, όπως ορίστηκαν από τους Hashin-Shtrikman για κυτταρικά υλικά (Σχήμα 2-12).



Σχήμα 2-11: Γεωμετρίες μεταλλικού αφρού και πλέγματος οκτάδας (από Schaedler et al, 2017)



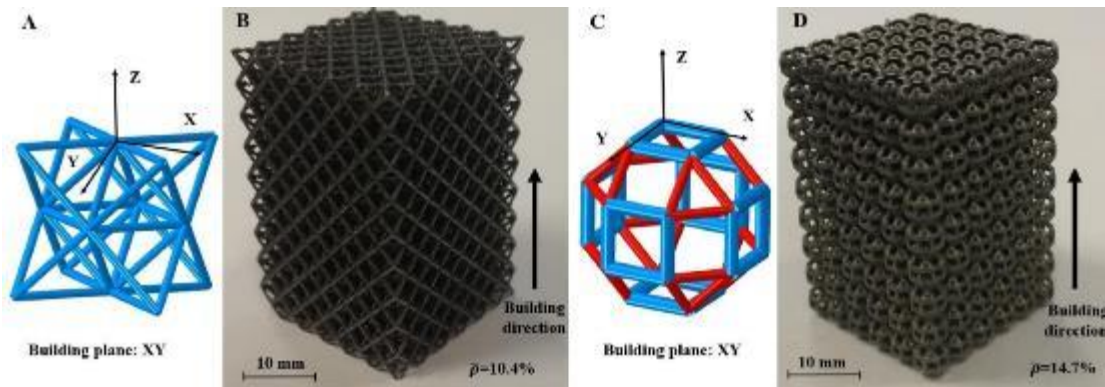
Σχήμα 2-12: Σύγκριση της δυσκαμψίας και της αντοχής μεταξύ του πλέγματος οκτάδας, των μεταλλικών αφρών και των θεωρητικών άνω ορίων για κυτταρικά υλικά (από Deshpande et al, 2001)

### 2.2.3 Ατελή Πλέγματα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην σημαντική επίδραση που έχουν οι ατέλειες στις μηχανικές ιδιότητες των κυτταρικών πλεγμάτων. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή κατά την κατασκευή μέσω διαδικασιών Additive Manufacturing, υπεισέρχονται στα δοκίμια ατέλειες που δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Πέραν από το πλέγμα οκτάδας, παρακάτω παρουσιάζεται και ένα πλέγμα διαφορετικής γεωμετρίας μονάδας, το ρομβοκυβοκτάεδρο (rhombicubooctahedron). Πρόκειται για ένα από τα στερεά του Αρχιμήδη, με κατάλληλη τροποποίηση στα πάχη των μελών του. Στη βιβλιογραφία, γίνεται λόγος για το ρομβοκυβοκτάεδρο που το πάχος των μπλε αντηρίδων είναι διπλάσιο από αυτό των



κόκκινων (Σχήμα 2-13). Αντίθετα από το πλέγμα οκτάδας, αυτή η δομή κυριαρχείται από κάμψη. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στις διαφορές μεταξύ των δυο αυτών πλεγμάτων και στους τρόπους που επηρεάζονται από τις κατασκευαστικές ατέλειες.

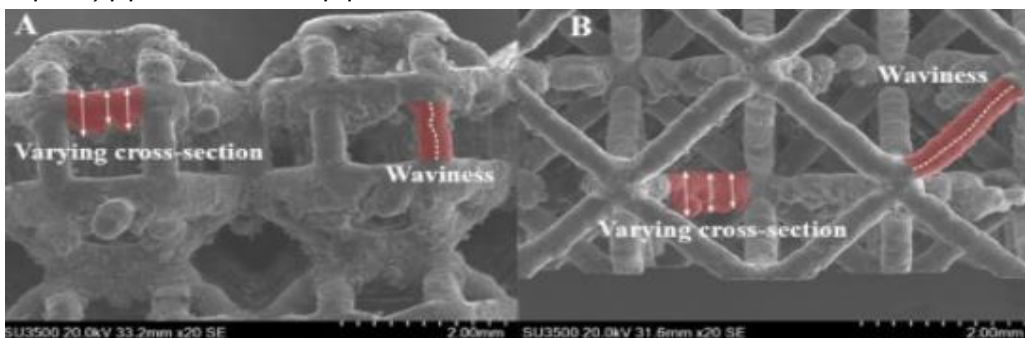


Σχήμα 2-13: Γεωμετρία μονάδας και πλέγματα οκτάδας και ρομβοκυβοκτάεδρου (από L. Liu et al, 2017)

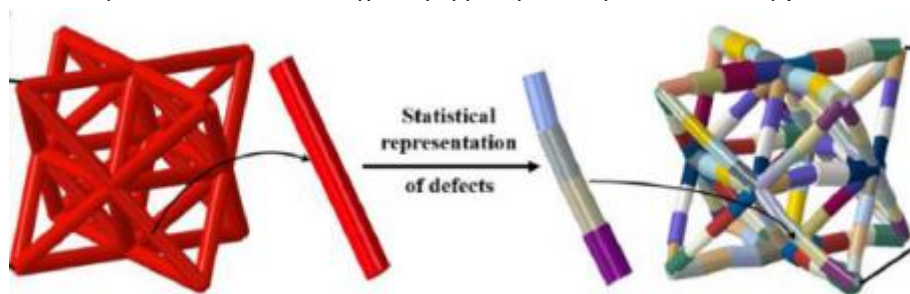
Παρουσιάζονται και εξηγούνται τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας των Liu et al. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι κράμα αλουμινίου AlSi10Mg και στις αναλύσεις προσομοιώθηκε ως ελαστικό-απολύτως πλαστικό υλικό. Οι ράβδοι και στα δύο πλέγματα προσομοιώθηκαν ως απλές κυλινδρικές, χωρίς την ειδική διαμόρφωση που αναφέρθηκε παραπάνω (Σχήμα 2-9). Τα πλέγματα υποβάλλονται σε δοκιμές στατικής συμπίεσης. Οι ατέλειες που κρίθηκαν κρισιμότερες και εισήχθησαν στη συνέχεια και στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, αφορούν στο επίπεδο των ράβδων και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

1. Κυματισμός της ράβδου (strut waviness).
2. Διαφοροποίηση πάχους κατά μήκος της ράβδου (strut thickness variation).
3. Διαφοροποίηση πάχους των ράβδων ανά διεύθυνση. Οι οριζόντιες ράβδοι κατασκευάζονται παχύτερες εξαιτίας της μεθόδου SLM (strut oversizing).

Στην εργασία, αυτοί οι τρεις τύποι ατελειών μετρούνται από τα δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί μέσω 3D-Printing και εισάγονται ως αρχικές ατέλειες στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, έπειτα από στατιστική επεξεργασία και κατανομή.



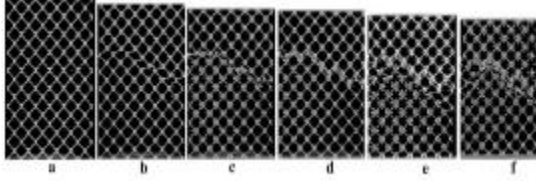
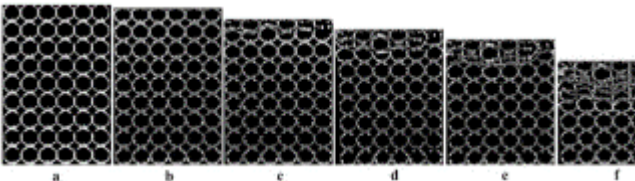
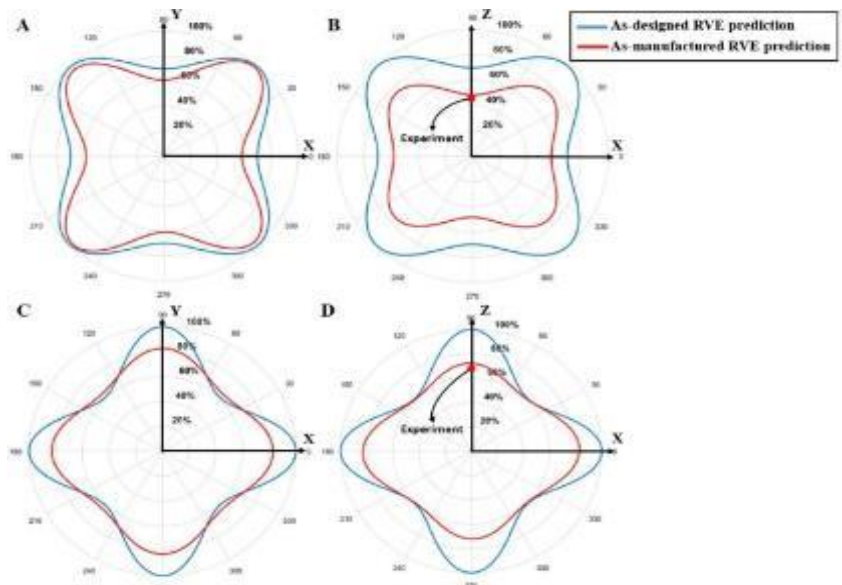
Σχήμα 2-14 Εικόνες SEM ατελειών στα πλέγματα ρομβοκυβοκτάεδρου και οκτάδας (από L. Liu et al, 2017)



Σχήμα 2-15: Στατιστική κατανομή ατελειών σε μία μονάδα οκτάδας (από L. Liu et al, 2017)

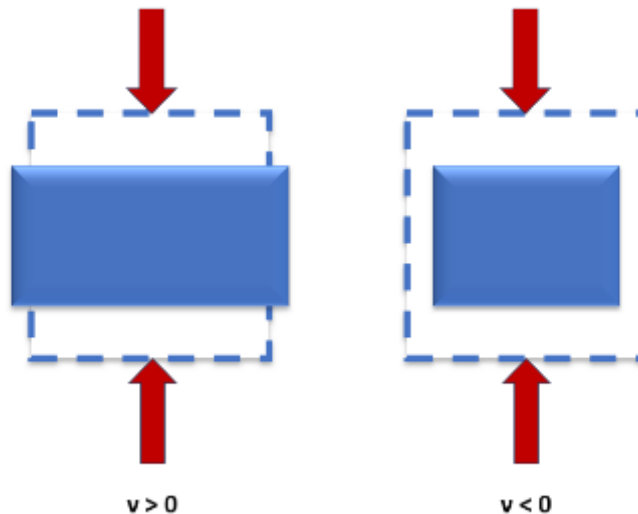
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις μέγιστες τάσεις πλησίασαν πολύ αλλά ήταν ελαφρώς υψηλότερα από αυτά των πειραμάτων. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ελήφθησαν υπόψιν μόνο αυτά τα τρία είδη ατελειών, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχουν και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων, όπως για παράδειγμα η συσσώρευση υλικού στους κόμβους του πλέγματος. Στον Πίνακα 2-1 διαμορφώνονται συνοπτικά οι βασικές διαφορές μεταξύ των υπό διερεύνηση πλεγμάτων.

Πίνακας 2-1: Διαφορές μεταξύ octet truss lattice και rhombicubooctahedron lattice

<b>ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ OCTET TRUSS LATTICE ΚΑΙ RHOMBICUBOOCTAHEDRON LATTICE</b>	
<p>Η αστοχία ξεκινά από τα εσωτερικά στρώματα και εξαπλώνεται στα γειτονικά</p> 	<p>Η αστοχία ξεκινά από το ανώτερο στρώμα, τοπική αστάθεια γειτονικών αντηρίδων</p> 
Αστοχία μέσω κεκλιμένου επιπέδου διάτμησης	Λυγισμός αντηρίδων
Σχεδόν ισότροπο	Ορθότροπο
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ</b>	
Πανκατευθυντική επιδείνωση ιδιοτήτων	Μείωση ιδιοτήτων κατά μήκος των κυρίων αξόνων
E - ανάλογα με κυματισμό αντηρίδας f <sub>y</sub> - ανάλογα με παρέκκλιση πάχους	Λιγότερο ευαίσθητο σε ελαττώματα
<b>Συντελεστής Young (E)</b>	
	

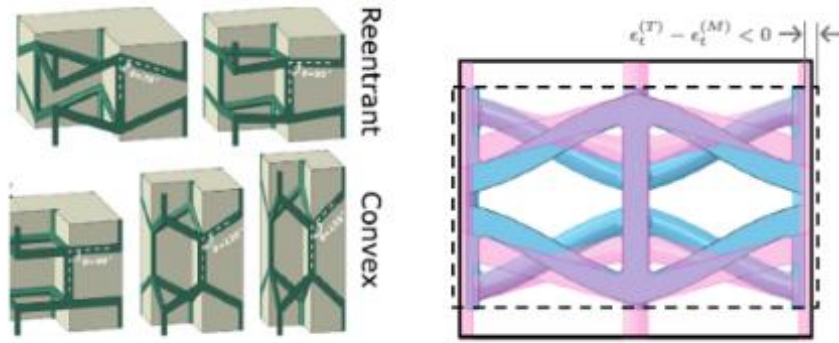
### 2.2.4 Αυξητικά Πλέγματα

Μια άλλη κατηγορία πλεγμάτων είναι τα αυξητικά πλέγματα (auxetic lattices). Αυτά τα πλέγματα έχουν ένα ιδιαίτερο και πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό, το οποίο είναι ο αρνητικός λόγος Poisson ( $\nu$ ). Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι για αρνητική ανηγμένη παραμόρφωση του πλέγματος σε μία από τις τρεις διευθύνσεις (μονοαξονική θλίψη), η παραμόρφωση κατά τις άλλες δύο τείνει να γίνει επίσης αρνητική (πλευρική συστολή). Σχηματικά αυτή η ιδιότητα φαίνεται στο Σχήμα 2-16.

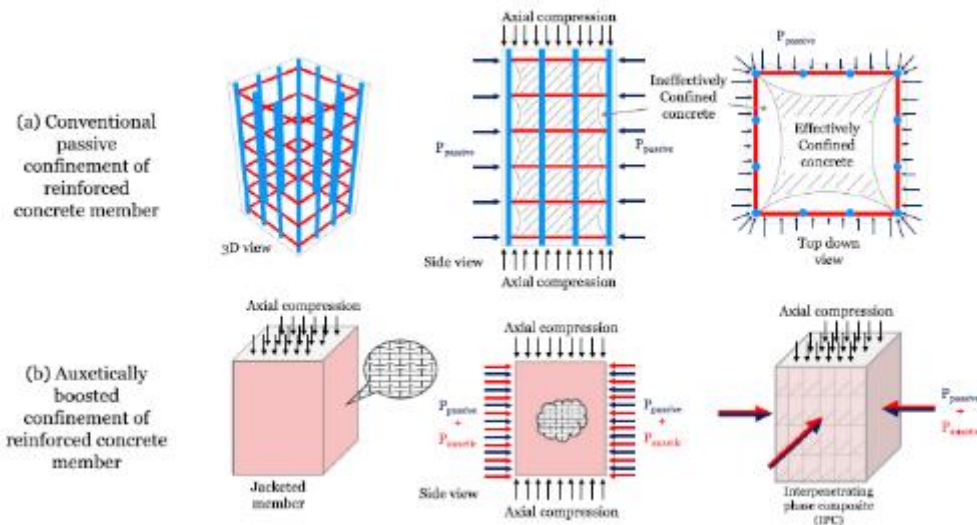


Σχήμα 2-16: Λειτουργία συμβατικών και αυξητικών υλικών

Τέτοια πλέγματα ποικίλουν σε γεωμετρίες, ενώ κάποιες από αυτές φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 2-17). Η ιδιότητά τους να συστέλλονται καθολικά μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη σε εφαρμογές οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς το σκυρόδεμα έχει θετικό λόγο Poisson. Όπως είναι γνωστό, μέλη οπλισμένου σκυροδέματος που καταπονούνται με θλιπτική αξονική δύναμη, έχουν την τάση να διαστέλλονται πλευρικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρωγμές, που συχνά γίνεται και το έναυσμα για μια ψαθυρή αστοχία. Στα έργα Πολιτικού Μηχανικού, οι ψαθυρές αστοχίες μπορούν να αποβούν μοιραίες για μια κατασκευή, οπότε λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα έτσι ώστε κάθε μέλος να έχει κατά το δυνατόν πλαστική συμπεριφορά. Με αυτόν τον τρόπο, προτού επέλθει η κατάρρευση, εμφανίζονται αρκετά μεγάλες παραμορφώσεις που προειδοποιούν τους χρήστες να επισκευάσουν ή να εγκαταλείψουν την κατασκευή. Για παράδειγμα τα υποστυλώματα, που παραλαμβάνουν κατά κανόνα θλιπτικές τάσεις, ενισχύονται με οπλισμό περίσφιγξης, με σκοπό την καθυστέρηση αυτού του φαινομένου και την αύξηση της πλαστιμότητας των μελών συνολικά. Ο οπλισμός αυτός αποτελείται από εγκάρσιες ράβδους σε όλο το μήκος του μέλους, που το αποτρέπουν από το να διαστέλλεται ενώ παράλληλα αποτελούν ένα είδος πλευρικής εξασφάλισης για τις διαμήκεις ράβδους. Αυτός είναι ο συνηθής τρόπος όπλισης και χαρακτηρίζεται ως παθητικός, αφού δρα μόνο όταν το σκυρόδεμα φτάσει στο σημείο να διασταλεί πλευρικά και επομένως να βρει αντίσταση πάνω στον οπλισμό. Ένα αυξητικό πλέγμα μπορεί να λειτουργήσει ως ενεργητικός οπλισμός, συμπιέζοντας το σκυρόδεμα πλευρικά, έπειτα από την ανάπτυξη μιας θλιπτικής τάσης κατά την διαμήκη διεύθυνση του μέλους. Στην εικόνα που ακολουθεί εξηγείται πώς λειτουργεί ο παθητικός οπλισμός περίσφιγξης, (κόκκινες εγκάρσιοι ράβδοι) σε αντίθεση με τον ενεργητικό οπλισμό που συνδυάζει συμβατικό οπλισμό και σύνθετα IPC (Interpenetrating Phase Composites). Φυσικά, η χρήση των αυξητικών πλεγμάτων είναι ευεργετική μόνο σε περιοχές του σκυροδέματος που αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις.

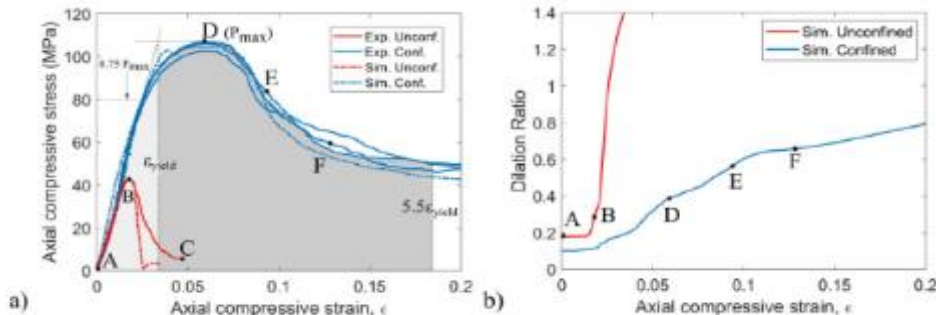


Σχήμα 2-17: Γεωμετρία αυξητικού πλέγματος (από Tzortzinis et al, 2022)



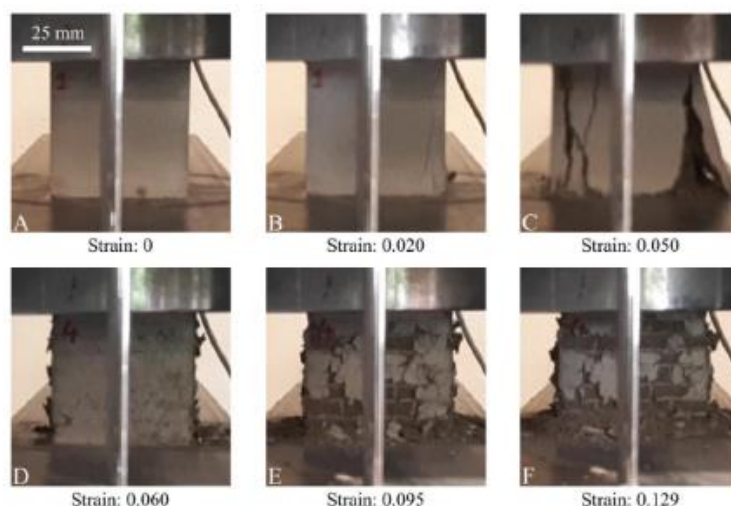
Σχήμα 2-18: Υποσύστημα Ο/Σ (α) συμβατικά οπλισμένο και (β) με εφαρμογή αυξητικού πλέγματος (από Tzortzinis et al, 2022)

Στην εργασία των Tzortzinis et al πραγματοποιήθηκαν πειράματα και Μη Γραμμικές Αναλύσεις μονοαξονικής συμπίεσης που απέδειξαν την χρησιμότητα των αυξητικών πλεγμάτων σε δοκίμια σκυροδέματος. Ενδεικτικά, παρατίθενται τα παρακάτω αποτελέσματα. Σε αυτά, μπορεί να τονισθεί η εξαιρετική ικανότητα των ενεργητικά οπλισμένων δοκιμίων να αναπτύσσουν μεγάλες ανηγμένες παραμορφώσεις και πλαστιμότητα, καθώς και το σημαντικά αυξημένο οριακό φορτίο που αναλαμβάνουν. Η πυκνότητα του πλέγματος που εντάχθηκε στα δοκίμια σκυροδέματος ήταν περίπου 5%, όση είναι δηλαδή και η συνήθης πυκνότητα που συναντάμε σε συμβατικά οπλισμένα μέλη σκυροδέματος.



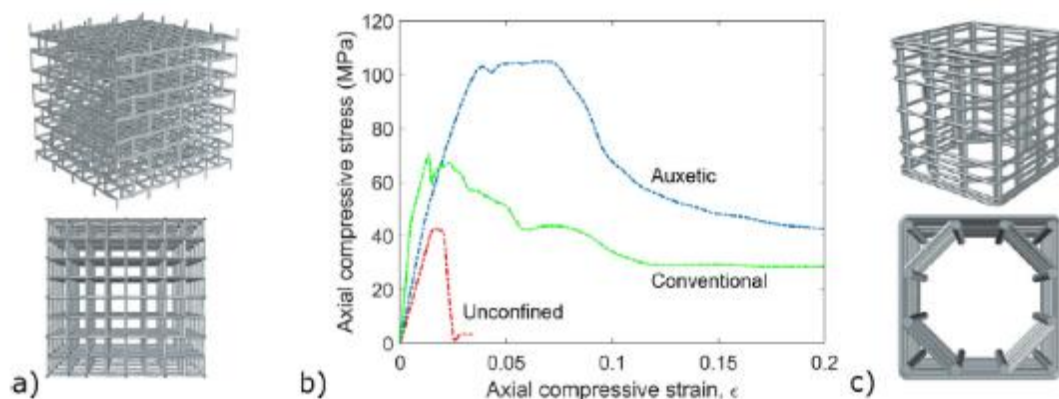
Σχήμα 2-19: Διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης και αναλογίας διαστολής – ανηγμένης παραμόρφωσης για αυξητικά οπλισμένο και άοπλο σκυρόδεμα (από Tzortzinis et al, 2022)





Σχήμα 2-20: Πειραματική διάταξη δοκιμής μονοαξονικής συμπίεσης για άοπλο και αυξητικά οπλισμένο σκυροδέμα (από Tzortzinis et al, 2022)

Παρόλα αυτά, μιας και στην πράξη δεν συναντάμε συχνά μη οπλισμένα μέλη σκυροδέματος, στην εργασία αυτή έγιναν και Μη Γραμμικές Αναλύσεις Πεπερασμένων Στοιχείων προκειμένου να συγκριθούν οι μηχανικές ιδιότητες των ενεργητικά οπλισμένων μελών με αυτές των συμβατικά οπλισμένων. Στο παρακάτω διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης (Σχήμα 2-21 b), γίνεται αντιληπτό ότι το αυξητικό πλέγμα προσέφερε στο δοκίμιο περίπου 40% μεγαλύτερη αντοχή από αυτήν του συμβατικά οπλισμένου δοκιμίου, καθώς και μεγαλύτερη πλαστιμότητα, χαρακτηριστικό πολύ επιθυμητό για τις κατασκευές που σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν σε σεισμικά και άλλα ακραία φορτία. Ο παθητικός οπλισμός, που χρησιμοποιείται κατά κανόνα, αστοχεί με ψαθυρό τρόπο, μέσω λυγισμού των διαμήκων ράβδων ή της θραύσης των εγκαρσίων. Αντίθετα, το αυξητικό πλέγμα κυριαρχείται από εφελκυσμό, που του προσφέρει τις πλεονεκτικές ιδιότητες που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη εργασία. Σε κάθε περίπτωση, αυτός ο καινοτόμος τύπος όπλισης θα πρέπει να διερευνηθεί και σε μεγαλύτερες κλίμακες προτού θεωρηθεί αξιόπιστος για την εφαρμογή του σε τεχνικά έργα.

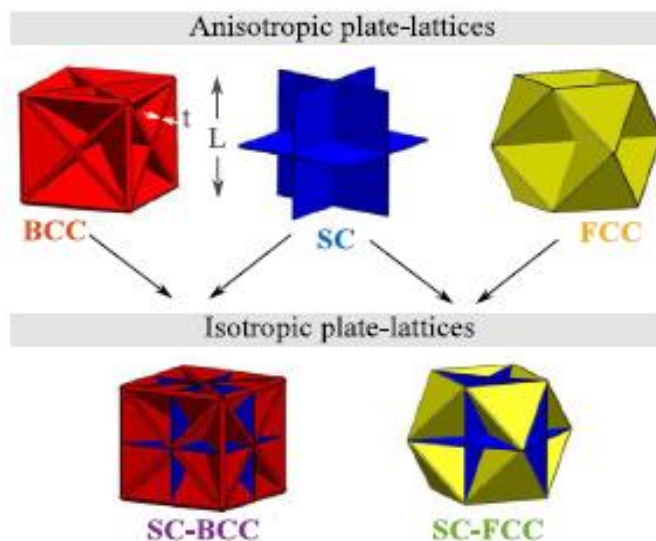


Σχήμα 2-21: (α) Πλέγμα αυξητικού οπλισμού (β) Σύγκριση άοπλου, αυξητικά οπλισμένου και συμβατικά οπλισμένου σκυροδέματος (γ) Πλέγμα συμβατικού οπλισμού (από Tzortzinis et al, 2022)

## 2.3 Πλέγματα - Πλάκες

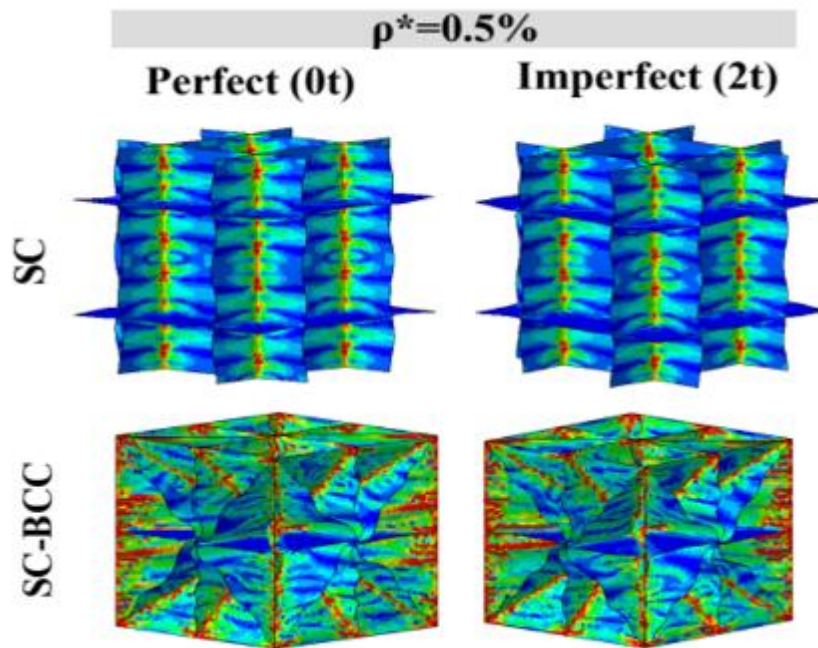
Τα πλέγματα πλακών, ένα υποσύνολο Μετα-Υλικών, είναι η δεύτερη μεγάλη κατηγορία πλεγμάτων που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία. Αποτελώντας διασυνδεδεμένα στοιχεία πλακών διατεταγμένα σε προσεκτικά σχεδιασμένα μοτίβα, αυτά τα πλέγματα προσφέρουν ένα αξιοσημείωτο μείγμα ελαφριάς κατασκευής και εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών. Έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν ώστε να παρουσιάζουν χρήσιμες ιδιότητες, όπως αρνητικό λόγο Poisson (αυξητική συμπεριφορά),

επιτρέποντας τη δημιουργία προηγμένων δομικών στοιχείων που ενισχύουν τη δομική ακεραιότητα, την ανθεκτικότητα σε σεισμικά φαινόμενα και την απορρόφηση ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό βάρος κατασκευής.

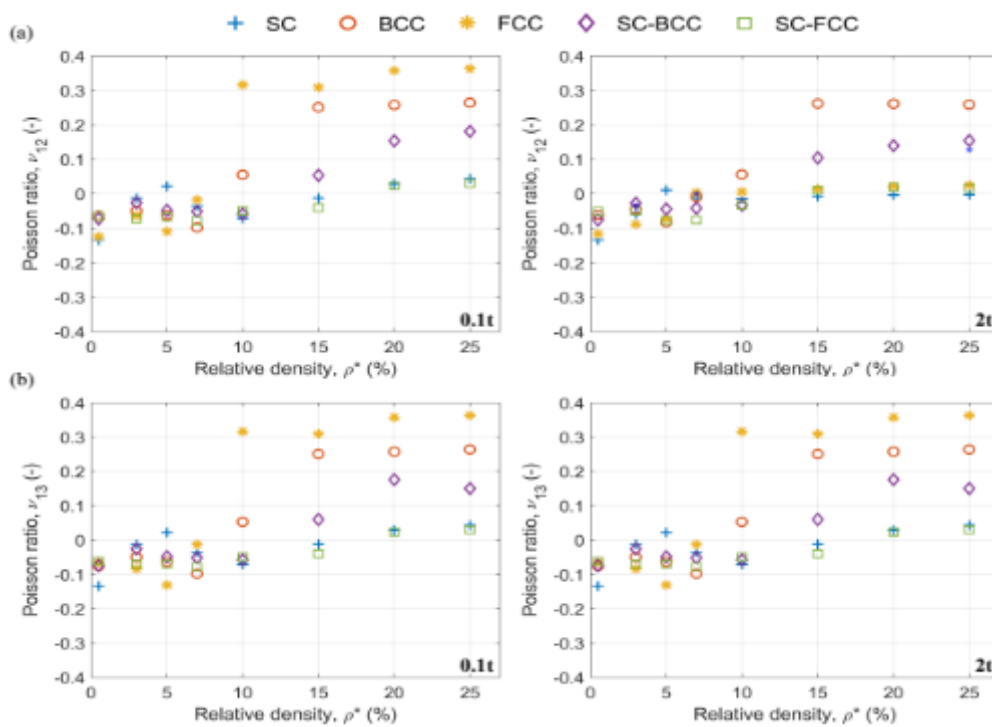


Σχήμα 2-22: Συνήθεις γεωμετρίες πλεγμάτων πλακών (από F. Derveni et al, 2022)

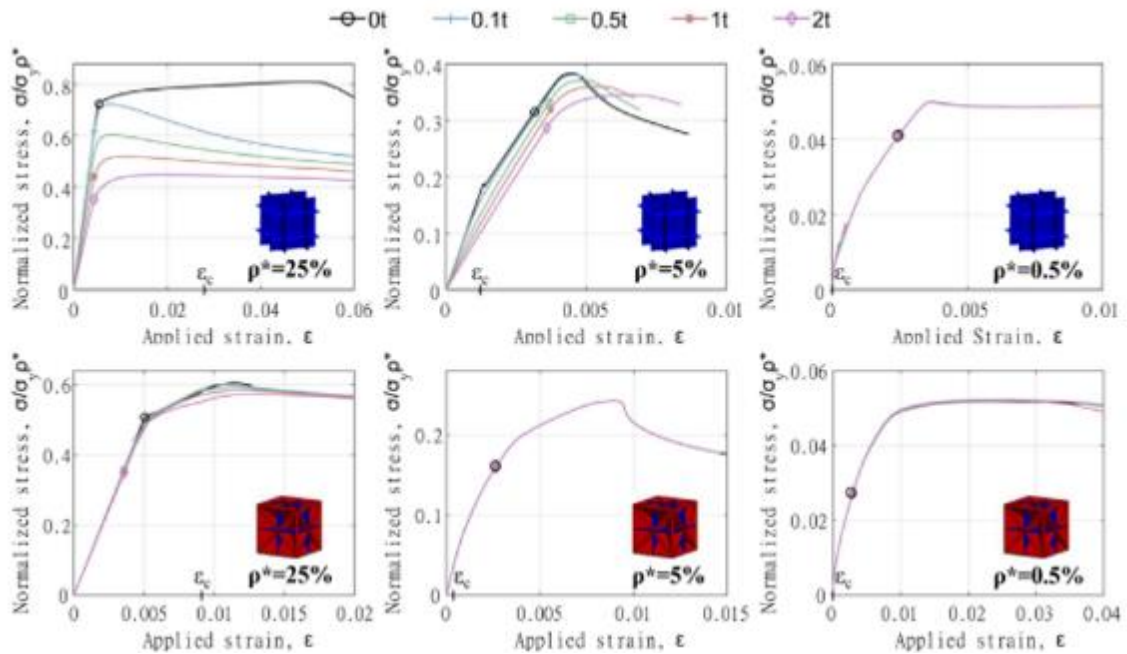
Μερικά παραδείγματα τέτοιων πλεγμάτων φαίνονται στο Σχήμα 2-22, όπως διερευνώνται και στην εργασία των Derveni et al. Στην εργασία περιγράφεται πώς αυτές οι δομές τείνουν να λυγίζουν ή να αποτυγχάνουν όταν συμπιέζονται. Αυτό συμβαίνει πριν φτάσουν σε αυτό που υπολογίζεται ως το θεωρητικό φορτίο λυγισμού. Λυγισμός είναι όταν μια κατασκευή χάνει τη σταθερότητά της και καταρρέει υπό πίεση. Το ακριβές σημείο στο οποίο συμβαίνει ο λυγισμός εξαρτάται από το πόσο κοντά είναι η τάση που ασκείται στη δομή στο όριο διαρροής του υλικού. Είναι ενδιαφέρον ότι οι πλάκες μπορούν να αναλάβουν περισσότερο φορτίο από το αναμενόμενο πριν λυγίσουν, εάν πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις. Μερικές από αυτές αφορούν τις συνοριακές συνθήκες, τον λόγο μήκους προς το πάχος ( $P/t$ ), τα ομαλά άκρα και τελειώματα (αποφυγή υψηλών συγκεντρώσεων τάσης) κ.ά, ενώ η κυριότερη είναι το πόσο απέχει η κρίσιμη τάση λυγισμού από την τάση διαρροής. Επιπλέον, από αυτήν την ιδιότητα επηρεάζεται και η ευαισθησία των πλεγμάτων πλακών στις ατέλειες. Όπως έχει διαπιστωθεί, όσο περισσότερο πλησιάζουν αυτές οι δύο τιμές, τόσο πιο ευάλωτο γίνεται το πλέγμα σε ατέλειες και μειώνεται η ικανότητα παραλαβής φορτίου. Αυτό το μοναδικό χαρακτηριστικό των πλακών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για τον σχεδιασμό υλικών με ευνοϊκή συμπεριφορά λυγισμού. Οι σημαντικότερες παρατηρήσεις που προέκυψαν από τις εκτεταμένες αναλύσεις των Derveni et al εξηγούνται εν συντομία στην συνέχεια. Αρχικά, για πλέγματα με  $\epsilon_c \ll \epsilon_y$  (δηλαδή με υψηλό λόγο  $P/t$ ), δεν υπάρχει ιδιαίτερη ευαισθησία στις ατέλειες. Τέτοια είναι τα πλέγματα που συνίστανται από λεπτές πλάκες και επομένως η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού απέχει πολύ από την ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής. Παρόλα αυτά, για πλέγματα με περισσότερες ενώσεις, πχ SC-BCC σε σύγκριση με SC, αυτή η «ανοσία» στις ατέλειες παρατηρείται και σε πλέγματα από παχύτερες πλάκες. Επίσης, για τα πλέγματα με μικρότερη πυκνότητα (υψηλό  $P/t$ ) παρατηρείται ότι η πλαστικοποίηση συγκεντρώνεται στις ενώσεις (Σχήμα 2-23). Μία ακόμη ιδιαιτερότητα που έχουν τα πλέγματα πλακών είναι ότι στις μικρές πυκνότητες εμφανίζουν αυξητικό χαρακτήρα (Σχήμα 2-24), τα πλεονεκτήματα του οποίου έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Γενικά, τα πλέγματα πλακών χαρακτηρίζονται από μια σταθερή μεταλυγισμική συμπεριφορά. Με τις παρακάτω εικόνες τεκμηριώνονται και αναλύονται ποσοτικά ορισμένα από τα παραπάνω ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που αφορούν την μηχανική συμπεριφορά των πλεγμάτων πλακών.



Σχήμα 2-23: Επιρροή ατελειών σε πλέγματα με λίγες και με πολλές ενώσεις (από F. Derveni et al, 2022)

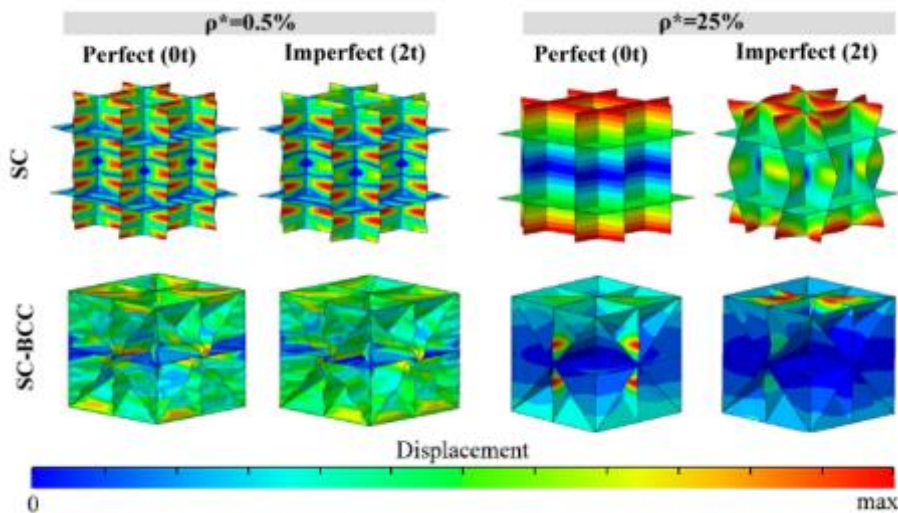


Σχήμα 2-24: Διαγράμματα σχετικής πυκνότητας – λόγου Poisson για διάφορες γεωμετρίες πλεγμάτων πλακών (από F. Derveni et al, 2022)



Σχήμα 2-25: Καμπύλες τάσεις – παραμόρφωσης για διάφορες πυκνότητες και πλήθος ενώσεων (από F. Derveni et al, 2022)

Στο Σχήμα 2-25 δίνεται έμφαση σε δυο από τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν και παραπάνω, δηλαδή στο ότι η μεγαλύτερη ευαισθησία σε ατέλειες συναντάται σε πυκνά πλέγματα και σε πλέγματα με λιγότερες ενώσεις. Παρατηρείται, πρώτον, ότι για τα πλέγματα μικρής πυκνότητας,  $\rho^*=0.5\%$ , οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε μηδενικές ή σημαντικές ατέλειες ταυτίζονται. Δεύτερον, παρατηρείται για το SC, που διαθέτει μικρό αριθμό ενώσεων, ότι η μείωση του μέγιστου φορτίου ήταν περίπου 45% με την εισαγωγή σημαντικών ατελειών, ενώ για το SC-BCC που έχει σημαντικά μεγαλύτερο πλήθος ενώσεων, η μείωση ήταν μόλις 5%.



Σχήμα 2-26: Επιρροή ατελειών σε πυκνότητα και πλήθος ενώσεων πλέγματος πλάκας

## 3. ΕΞΥΠΝΑ ΚΤΙΡΙΑ

### 3.1 Εισαγωγή

Μέχρι τώρα έχει γίνει αναφορά στις μηχανικές ιδιότητες ορισμένων Μετα-Υλικών. Στο δεύτερο μέρος της Διπλωματικής Εργασίας εξετάζεται μία από τις πιθανές εφαρμογές τους και συγκεκριμένα η χρήση τους στα Έξυπνα Κτίρια. Τα έξυπνα κτίρια αξιοποιούν τεχνολογίες αιχμής και συστήματα που βασίζονται σε δεδομένα για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα, τη βιωσιμότητα, την ασφάλεια και την άνεση. Είναι εξοπλισμένα με ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων αισθητήρων και πλατφορμών λογισμικού που συλλέγουν και αναλύουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να προσαρμόζονται και να βελτιστοποιούν συνεχώς τις λειτουργίες τους. Είτε πρόκειται για προσαρμογή του φωτισμού και του κλιματισμού, είτε για τη διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τα έξυπνα κτίρια έχουν την ικανότητα να μαθαίνουν και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις. Γενικά, ο όρος «Έξυπνα Κτίρια» έχει αρκετές διαφορετικές ερμηνείες, ωστόσο σε αυτήν την εργασία αναφέρεται σε ενεργειακά αποδοτικά κτίρια που χρησιμοποιούν υλικά και τεχνολογίες για την εξοικονόμηση ή ακόμη και την παραγωγή ενέργειας μέσω των προσώψεών τους.

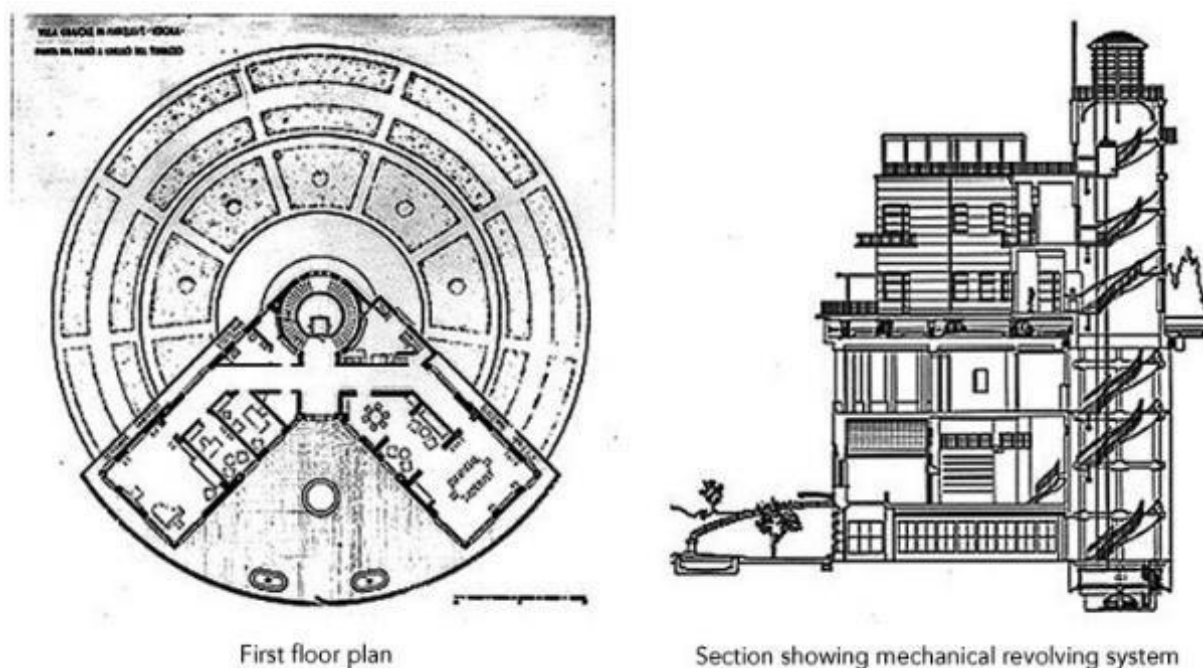
### 3.2 Σύνοψη Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη απόπειρα κατασκευής ενός Έξυπνου Κτιρίου τοποθετείται χρονικά στη δεκαετία του 1930. Ο πρωτοπόρος Ιταλός αρχιτέκτονας Angelo Invernizzi φαντάστηκε ένα κτίριο που θα λειτουργούσε όπως ένα ηλιοτρόπιο. Από εκεί πήρε και το όνομά της η Villa Girasole (sunflower). Το κτίριο αυτό είναι γνωστό για την ικανότητά του να περιστρέφεται, ακολουθώντας το μονοπάτι του ήλιου όλη την ημέρα για να μεγιστοποιήσει το φυσικό φως και τη ζεστασιά μέσα στο σπίτι. Η βίλα είναι χτισμένη σε κυκλική βάση και υποστηρίζεται από έναν κεντρικό άξονα που της επιτρέπει να περιστρέφεται πλήρως 360 μοίρες. Αυτή η περιστροφή ελέγχεται χειροκίνητα χρησιμοποιώντας μανιβέλα χειρός. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει στο σπίτι να συλλαμβάνει το φως του ήλιου από την ανατολή έως τη δύση του, βελτιστοποιώντας τον φυσικό φωτισμό και την παθητική ηλιακή θέρμανση. Ο καινοτόμος σχεδιασμός της ήταν μπροστά από την εποχή του όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση και τη βιωσιμότητα. Ελαχιστοποιεί την ανάγκη για τεχνητό φωτισμό και θέρμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας. Η Villa Girasole θεωρείται σημαντικό αρχιτεκτονικό επίτευγμα και αναγνωρίζεται ως ένα από τα πρώτα παραδείγματα σχεδιασμού με περιβαλλοντική συνείδηση. Χρησιμοποιήθηκε ως έμπνευση για μεταγενέστερα βιώσιμα σχέδια σπιτιών.





Σχήμα 3-1: Villa Girasole (από [www.iconichouses.org](http://www.iconichouses.org))



Σχήμα 3-2: Κάτοψη και τομή Villa Girasole (από [www.skolnick.com](http://www.skolnick.com))

### 3.3 Προσόψεις Έξυπνων Κτιρίων

Τα τελευταία χρόνια έχει αναδειχθεί η σημασία της βιωσιμότητας στα κτίρια. Στην προσπάθεια ανταπόκρισης στα νέα Ευρωπαϊκά Περιβαλλοντικά Πρότυπα, έχει παρουσιαστεί η ανάγκη κατασκευής ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων. Σε ό,τι αφορά τον ρόλο του Πολιτικού Μηχανικού, οι Έξυπνες Προσόψεις στα κτίρια αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για την εξοικονόμηση αλλά και την παραγωγή ενέργειας. Αυτές οι προσόψεις αποτελούν βασικό συστατικό του βιώσιμου σχεδιασμού κτιρίων, συμβάλλοντας στην ενεργειακή απόδοση και στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα ενός κτιρίου. Αυτό

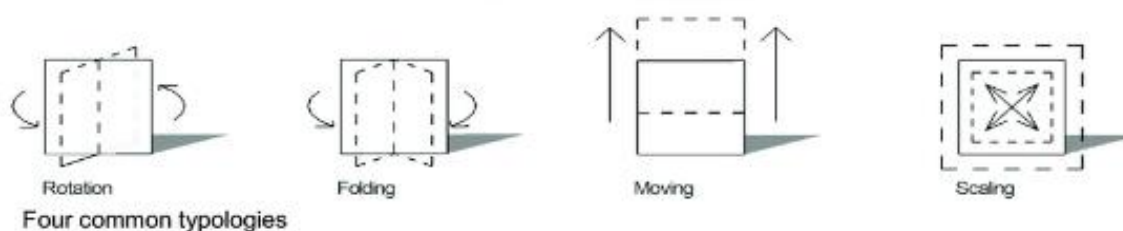
επιτυγχάνεται μέσω τμημάτων που έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν ή να αλλάζουν σχήμα, ανταποκρινόμενα στις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ένας διαχωρισμός των έξυπνων προσώπων μπορεί να γίνει με βάση το εάν μπορούν μόνο να εξοικονομούν ενέργεια ή εάν είναι σε θέση και να παράγουν. Έτσι μπορούν να οριστούν δυο μεγάλες κατηγορίες προσώπων, οι παθητικές και οι ενεργητικές. Στην περίπτωση των ενεργητικών προσώπων, ένα ενεργειακά αποδοτικό κτίριο είναι ικανό να μετατραπεί σε ενεργειακά θετικό, αν παράγει περισσότερη ενέργεια από όση καταναλώνει (Positive Energy Building)

### 3.3.1 Προσώψεις Παθητικής Ηλιακής Σκίασης

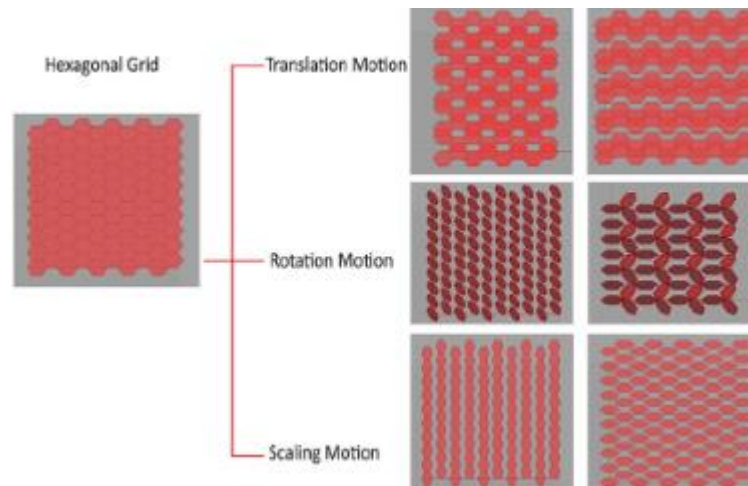
Οι Προσώψεις Παθητικής Ηλιακής Σκίασης είναι αρχιτεκτονικά στοιχεία που ενσωματώνονται στα κτίρια για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του φυσικού ηλιακού φωτός και της θερμότητας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την υπερβολική ηλιακή έκθεση. Αυτές οι προσώψεις έχουν σχεδιαστεί για να ελέγχουν παθητικά την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμότητας που εισέρχεται σε ένα κτίριο, βελτιώνοντας τις θερμοκρασιακές και οπτικές συνθήκες, αλλά κυρίως την ενεργειακή απόδοση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ελεγχόμενης έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ανάγκη χρήσης κλιματιστικών, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια και κόστος. Η κατηγοριοποίηση που ακολουθεί αφορά κυρίως στο σχήμα αυτών των προσώπων και τον τρόπο λειτουργίας τους.

#### ι. Συμβατικές Δυναμικές Προσώψεις

Αυτές οι προσώψεις αποτελούνται από μέλη που έχουν τη δυνατότητα απλών μετατοπίσεων, όπως περιστροφή, ολίσθηση, διόγκωση κ.ά. Στο Σχήμα 3-3 βρίσκονται παραδείγματα αυτών των κινήσεων με ορισμένες εφαρμογές τους.



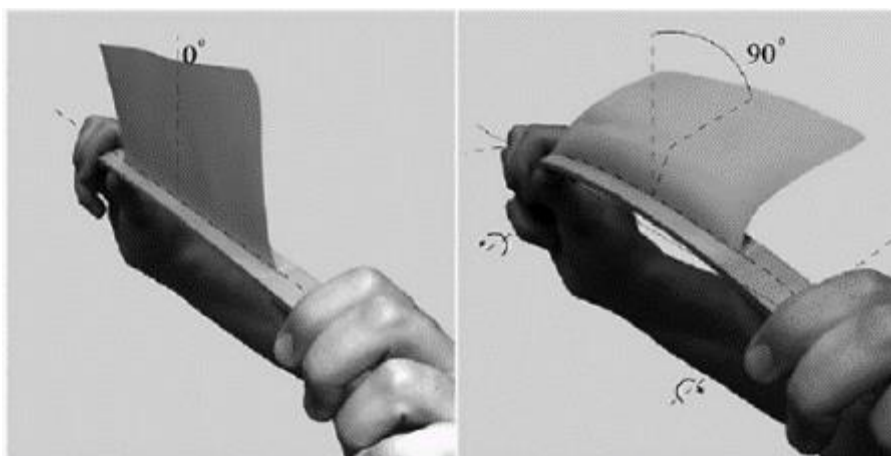
Σχήμα 3-3: Συμβατικές δυναμικές προσώψεις 1 (από Li et al, 2021)



Σχήμα 3-4: Συμβατικές δυναμικές προσόψεις 1 (από Li et al, 2021)

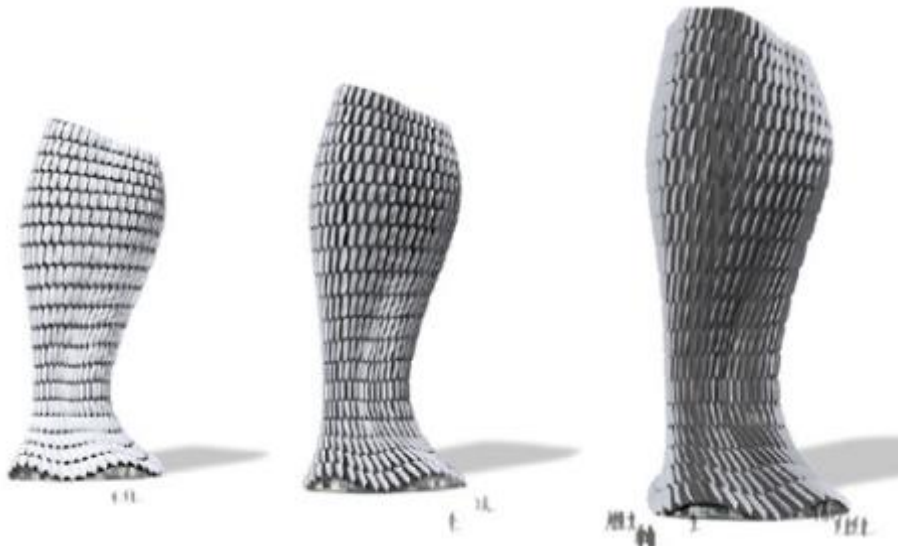
## ii. Βιο-εμπνευσμένες Δυναμικές Προσόψεις

Πρόκειται για ελαφριές δομές, αποτελούμενες από λεπτά φύλλα πτερυγίων που έχουν τη δυνατότητα απόκρισης σε μεταβαλλόμενη υγρασία και φως. Στη φύση, ορισμένα φυτά έχουν την εντυπωσιακή ικανότητα να αλλάζουν το σχήμα τους για να προσαρμοστούν στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Αυτός ο φυσικός μηχανισμός ενέπνευσε τον σχεδιασμό βιο-μημητικών προσόψεων που προσαρμόζονται αυτόματα στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η ελαστική πρόσωση χωρίς συνδέσμους με μηχανισμό ανοίγματος και κλεισίματος είναι εμπνευσμένη από τον τρόπο που λειτουργεί ο μηχανισμός αναπαραγωγής του λουλουδιού "bird-of-paradise". Τα πέταλα αυτού του λουλουδιού ανοίγουν ή κλείνουν όταν τα πουλιά προσγειώνονται ή αναχωρούν από αυτά, με σκοπό τη μεταφορά του σπόρου τους. Για να αναπαραστήσουν αυτήν την ελαστική κίνηση, οι Schleicher et al δημιούργησαν ένα απλό φυσικό μοντέλο που περιλαμβάνει στιβαρά και ελαστικά μέρη. Με την κάμψη των στιβαρών σπονδύλων, το λεπτό φύλλο μπορεί να καμπυλωθεί με μεγάλη γωνία (Σχήμα 3-5). Συνδυάζοντας αυτό το μοντέλο με το κτίριο, οι Lienhard et al δημιούργησαν ένα σύστημα προσόψεων που λειτουργεί χωρίς συνδέσμους. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι η ελαφρότητα της κατασκευής λόγω των λεπτών ελαστικών μερών και η απουσία παραδοσιακών, δυσμετακίνητων μηχανικών συστημάτων. Προτείνονται επίσης βιομιμητικές προσόψεις με ρυθμιζόμενη αυξομείωση του μεγέθους των κενών τους, μιμούμενες τα στόματα των φύλλων που ανταποκρίνονται στην ατμοσφαιρική υγρασία.



Σχήμα 3-5: Καμπύλωση λεπτού φύλλου μέσω της κάμψης ενός στιβαρού σπονδύλου (από Li et al, 2021)





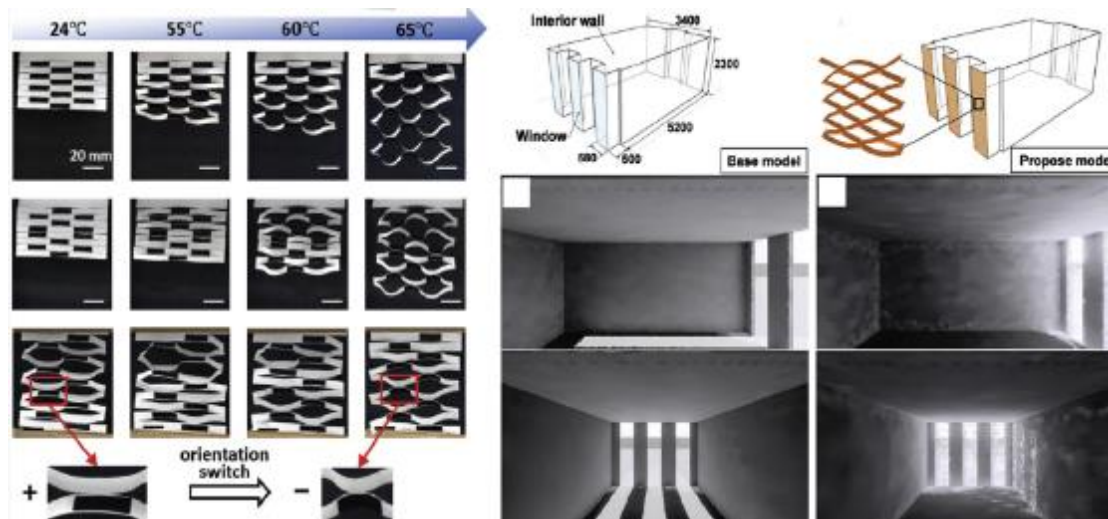
Σχήμα 3-6: Εφαρμογή βιο-μιμητικών προσώψεων (από Li et al, 2021)



Σχήμα 3-7: Εφαρμογή βιο-μιμητικών προσώψεων με απόκριση στην υγρασία (από Li et al, 2021)

### iii. Δυναμικές προσόψεις βασισμένες σε μοτίβα Origami/Kirigami

Το origami είναι μια τέχνη βασισμένη στο δίπλωμα του χαρτιού σε διάφορα γεωμετρικά σχήματα χωρίς να κόβεται ή να κολλάται. Το kirigami είναι μια προέκταση αυτού, περιλαμβάνοντας όμως και το κόψιμο του χαρτιού με σκοπό την δημιουργία πιο περίπλοκων σχημάτων. Με βάση αυτές τις αρχές, οι προσόψεις origami/kirigami χρησιμοποιούν ευέλικτα στοιχεία από ύφασμα, μέταλλο ή σύνθετα υλικά, σχεδιασμένα με συγκεκριμένα γεωμετρικά μοτίβα και κοπές, με σκοπό την ελεγχόμενη είσοδο ηλιακού φωτός στο εσωτερικό των κτιρίων. Ένας ακόμη τρόπος λειτουργίας αυτών των προσώψεων είναι με την ενσωμάτωση υλικών που ανταποκρίνονται στη θερμοκρασία. Μία από τις μελέτες που διεξήχθη από τους Yi et al, έδειξε ότι με τη χρήση kirigami δομών επιτεύχθηκε εξοικονόμηση ενέργειας έως και 26% σε σχέση με ένα συμβατικό κτίριο, μειώνοντας το φορτίο ψύξης αέρα το καλοκαίρι πάνω από 47%. Μία από τις πιο εντυπωσιακές εφαρμογές αυτών των προσώψεων είναι οι Πύργοι Al Bahar στο Abu Dhabi.



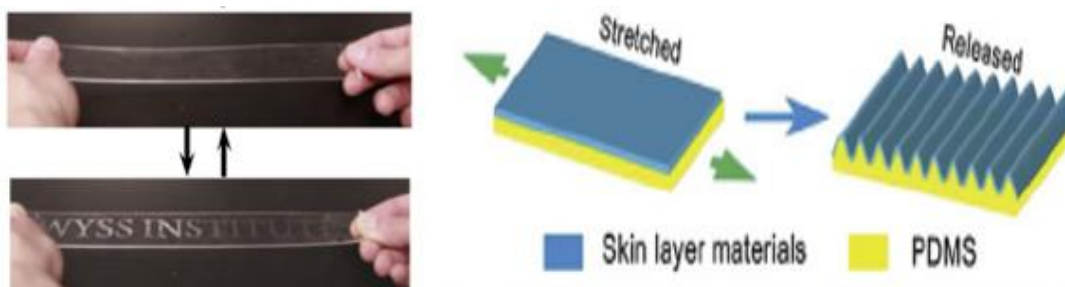
Σχήμα 3-8: Εφαρμογές δομών origami/kirigami για την ελεγχόμενη διέλευση φωτός (από Li et al, 2021)



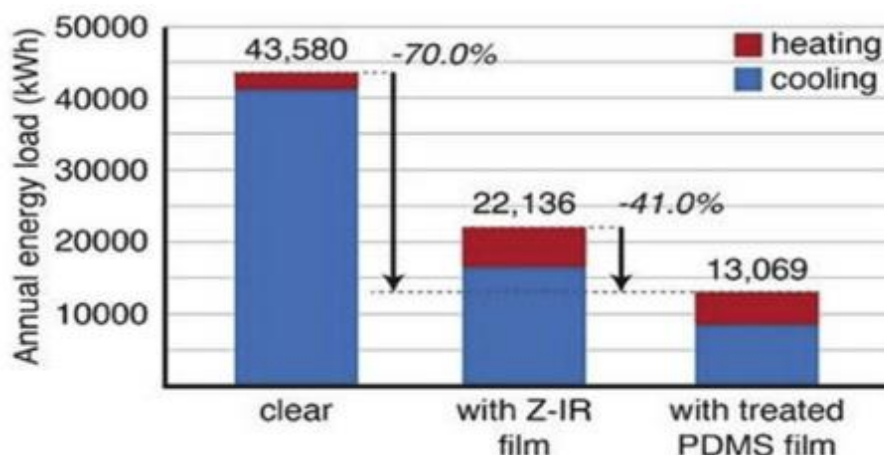
Σχήμα 3-9: Εφαρμογή δομών kirigami στους Πύργους Al Bahar (από Li et al, 2021)

#### iv. Smart windows

Τα έξυπνα παράθυρα αποτελούνται από οπτικά υλικά με ρυθμιζόμενη οπτική μετάδοση. Η δυνατότητά τους να μετατρέπονται από διαφανή σε αδιαφανή μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Σε αντίθεση με τις κινητές προσόψεις που συζητήθηκαν παραπάνω, τα έξυπνα παράθυρα παραμένουν στατικά, χωρίς να περιλαμβάνουν κινητά εξαρτήματα. Συνίστανται από χρωμογόνα υλικά, όπως ηλεκτροχρωμικά, φωτοχρωμικά και θερμοχρωμικά υλικά, ανταποκρινόμενα σε ηλεκτρικά πεδία, φως και θερμοκρασία, αντίστοιχα. Μία νεότερη κατηγορία έξυπνων παραθύρων βασίζεται στην ρυτίδωση του συστατικού υλικού σε μικροκλίμακα που επιτρέπει ή μπλοκάρει την διέλευση του φωτός. Με απλή τάνυση στο επίπεδο του παραθύρου, επιτυγχάνεται άμεση και αναστρέψιμη διαφάνεια. Αυτή η ικανότητα εξηγείται καλύτερα μέσα από τις ακόλουθες εικόνες. Η εργασία των Tomholt et al έδειξε ότι με την ενσωμάτωση μιας τέτοιας τεχνολογίας στο περίβλημα του κτιρίου (παράθυρα, οροφή) μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας έως και 70% σε σύγκριση με ένα συμβατικό κτίριο.



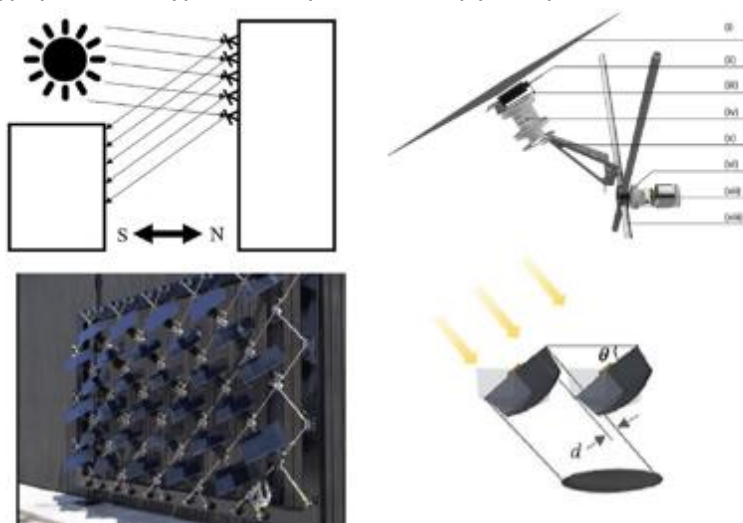
Σχήμα 3-10: Λειτουργία wrinkle based έξυπνων παραθύρων (από Li et al, 2021)



Σχήμα 3-11: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας πιλοτικού κτιρίου με χρήση συμβατικών και έξυπνων παραθύρων (από Li et al, 2021)

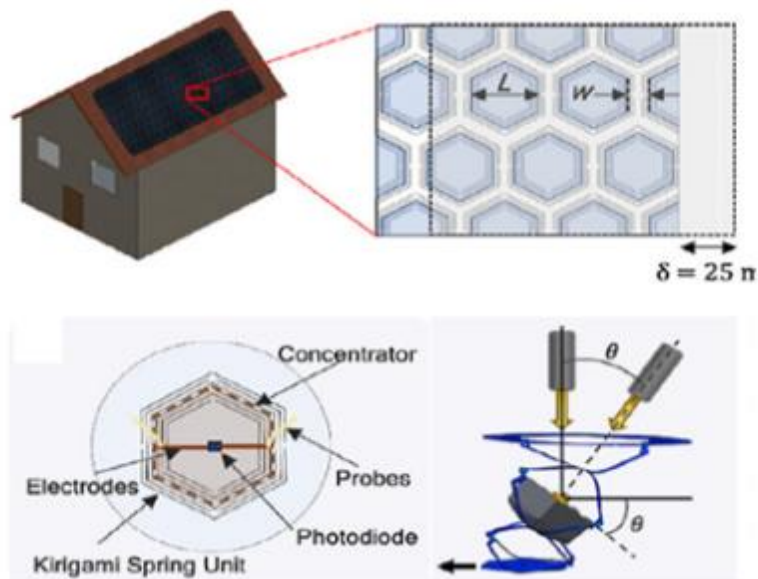
### 3.3.2 Ενεργητικές Προσώσεις Παραγωγής Ενέργειας

Σε επέκταση των Παθητικών Προσώσεων, οι Ενεργητικές Προσώσεις που παράγουν ενέργεια είναι καινοτόμα αρχιτεκτονικά στοιχεία που σχεδιάζονται για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική. Η θεμελιώδης αρχή πίσω από τη λειτουργία τους είναι η ενσωμάτωση ηλιακών συλλεκτών ή φωτοβολταϊκών πάνελ στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου, όπως τοίχους, παράθυρα ή υλικά επένδυσης. Σε αντίθεση με τα σταθερά ηλιακά πάνελ, η αποδοτικότητα εξοικονόμησης ενέργειας αυτής της δυναμικής πρόσοψης μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας κατά περισσότερο από 20 έως 50%. Αυτή η βελτίωση επιτυγχάνεται με τη χρήση δυναμικών ιχνηλατών που προσαρμόζουν τον προσανατολισμό τους, για τη βελτιστοποίηση των γωνιών έκθεσης στον ήλιο. Σε χώρους γραφείων που βρίσκονται σε εύκρατα κλίματα, αυτό το σύστημα έχει τη δυνατότητα να υπερβεί το 115% της καθαρής ενεργειακής ζήτησης (Li et al, 2021). Είναι αξιοσημείωτο ότι η ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία του συστήματος ανέρχεται μόνο στο 3% (περίπου) της ενέργειας που παράγει. Επιπλέον, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται κατά τις ηλιόλουστες περιόδους μπορεί να αποθηκευτεί σε μπαταρίες για χρήση κατά τις συννεφιασμένες ή νυχτερινές ώρες, εξασφαλίζοντας συνεχή και αξιόπιστη τροφοδοσία ρεύματος για το κτίριο. Παρά τα υποσχόμενα νούμερα, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης και του όγκου των ενεργοποιητικών συσκευών.



Σχήμα 3-12: Ενσωμάτωση ηλιακών πάνελ σε δυναμικές προσώσεις

Ως απάντηση στον όγκο και το αυξημένο βάρος αυτών των συσκευών, η εργασία των Lamouereux et al έδειξε ότι η χρήση ηλιακών πάνελ μορφής kirigami εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Επιπλέον, ο συνδυασμός αυτών με CPVs (Concentrated Photovoltaic Systems) μπορεί να αυξήσει ακόμη περισσότερο την ενεργειακή τους απόδοση. Τα CPVs επιτυγχάνουν αυτήν την αύξηση, χρησιμοποιώντας οπτικά εξαρτήματα όπως φακούς ή καθρέφτες για να συγκεντρώνουν το ηλιακό φως σε μια μικρότερη περιοχή ηλιακών συλλεκτών. Ωστόσο, τα CPVs είναι ευαίσθητα στη γωνία προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Τα σχέδια kirigami μπορούν να βελτιώσουν την ικανότητα του συστήματος να συλλαμβάνει το φως σε διαφορετικές γωνίες. Παραμένουν προκλήσεις ακόμα και στη συνδυασμένη χρήση kirigami δομών με CPVs, οι οποίες αφορούν στην πολυπλοκότητα της κατασκευής και στην συντήρησή τους. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο πεδίο βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο, επομένως θα χρειαστεί χρόνος έως ότου αυτές οι δομές γίνουν εμπορικά διαθέσιμες. Ο στόχος είναι να γίνουν επαρκώς αποδοτικές και οικονομικά προσιτές.



Σχήμα 3-13: Συνδυασμός δομών kirigami με CPVs

## 4. ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΠΛΕΓΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια επαλήθευσης των μηχανικών ιδιοτήτων των πλεγμάτων Μετα-Υλικών μέσω μη γραμμικών αναλύσεων. Έγινε μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για τα δύο πλέγματα-ράβδων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.2.3, το πλέγμα οκτάδας και το πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ADINA με τις παραμέτρους που εξηγούνται παρακάτω.

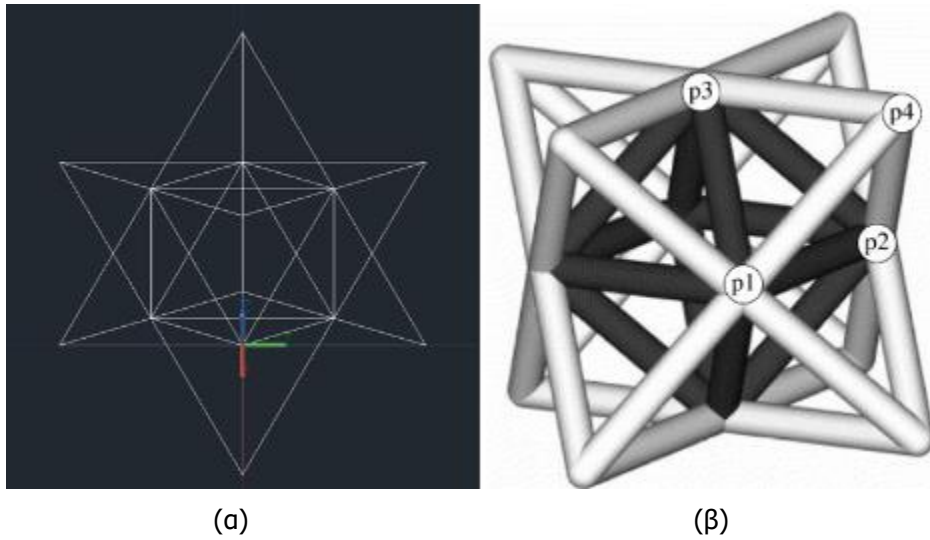
- Ελαστικό - απολύτως πλαστικό υλικό, χάλυβας S355
- Στοιχεία δοκού (beam elements)
- Συνοριακές συνθήκες στη βάση που επιτρέπουν πλευρική παραμόρφωση, χωρίς στροφές (αρθρώσεις και κυλίσεις)
- Φόρτιση με επιβαλλόμενη δύναμη ή μετατόπιση όλων των άνω κόμβων
- Εισαγωγή ατελειών με χρήση των σχημάτων ιδιομορφών που εξήχθησαν από το πρόγραμμα
- Θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων (large displacements)
- Εκκίνηση μη γραμμικής ανάλυσης με αρχική διέγερση σε άνω κόμβο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (διεύθυνση φόρτισης)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται λεπτομερέστερα οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τα δύο μοντέλα.

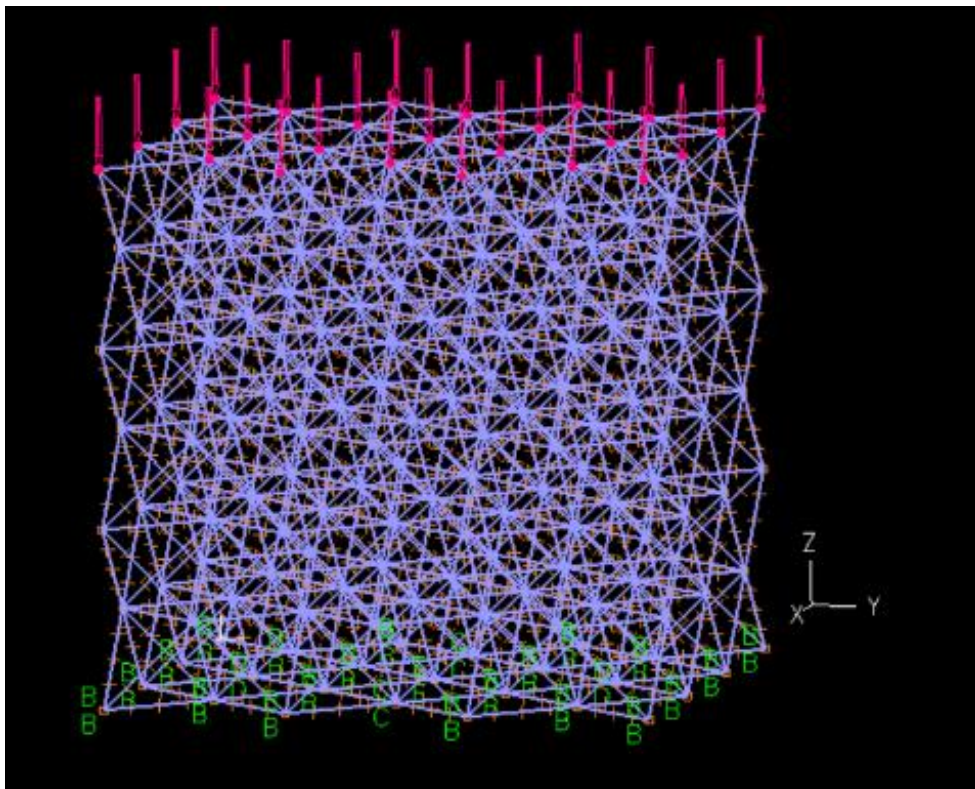
### 4.1 Μη Γραμμική Ανάλυση Πλέγματος Οκτάδας

Όπως έχει ήδη φανεί και παραπάνω, η γεωμετρία του πλέγματος οκτάδας αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μονάδες οκτάδας με τη γεωμετρία του Σχήματος 4-1. Στο Σχήμα 4-1 (α) φαίνεται η μία μονάδα οκτάδας, όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον CAD. Η μονάδα αποτελείται από 36 ράβδους ίσου μήκους 2.2 mm και διάμετρο 0.5 mm. Οι συγκεκριμένες τιμές ελήφθησαν από την εργασία των Tancogne-Dejean et al, έτσι ώστε να υπάρχει μέτρο σύγκρισης με ήδη δοκιμασμένα πλέγματα οκτάδας. Κάθε μονάδα συνδέεται με τις διπλανές της στις 6 έδρες που δημιουργούνται (Σχήμα 4-1 β), θεωρώντας συνέχεια του υλικού, χωρίς δηλαδή εσωτερικές ελευθερώσεις. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας είναι μεγέθους 3x3x3. Έγινε διακριτοποίηση (mesh) των ράβδων σε 4 επιμέρους στοιχεία έτσι ώστε να επιτρέπεται η εμφάνιση παραμορφώσεων εικόνας λυγισμού. Οι συνοριακές συνθήκες στη βάση του πλέγματος φαίνονται στο Σχήμα 4-3, όπου με – συμβολίζονται οι δεσμευμένοι βαθμοί ελευθερίας, ενώ με το σύμβολο ν φαίνονται οι ελεύθεροι. Τέθηκαν έτσι ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις που αναφέρονται στην αρχή του κεφαλαίου.

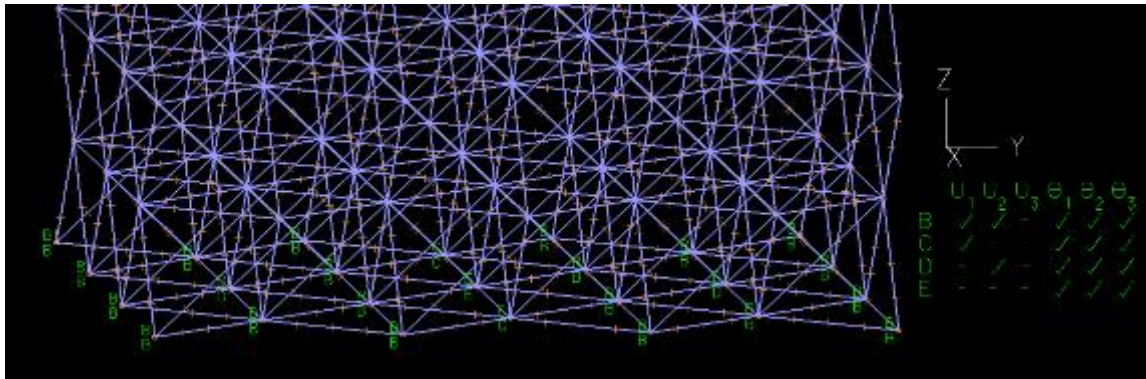




Σχήμα 4-1: Γεωμετρία μονάδας οκτάδας (α) Μοντέλο CAD (β) από V.S. Deshpande et al (2001)

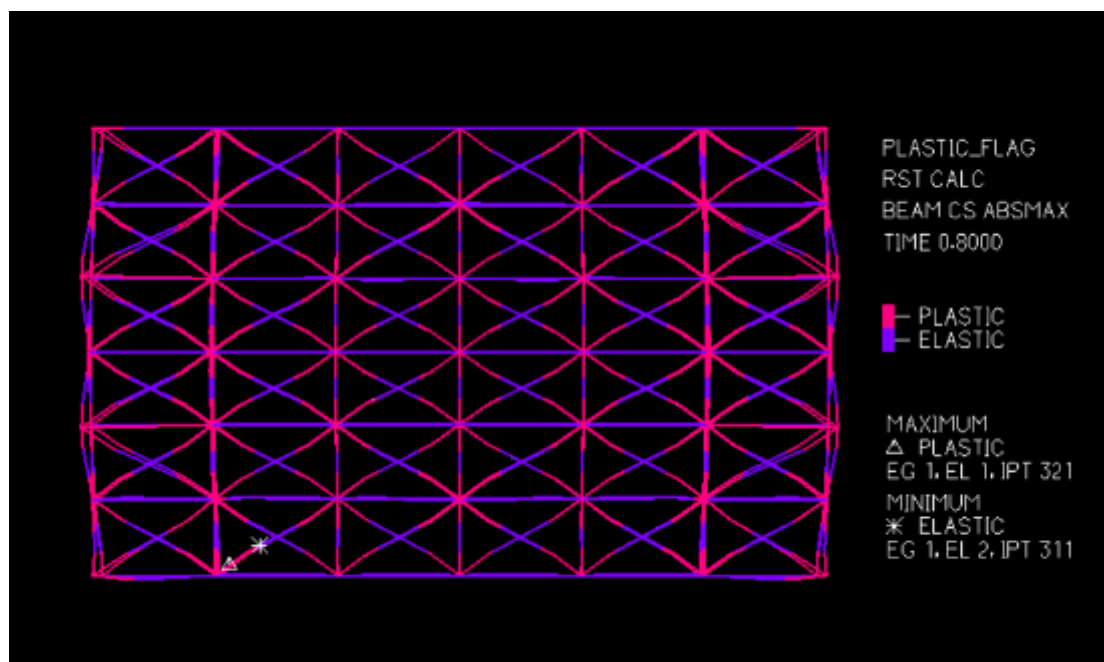


Σχήμα 4-2: Πλέγμα οκτάδας 3x3x3 στο λογισμικό ADINA



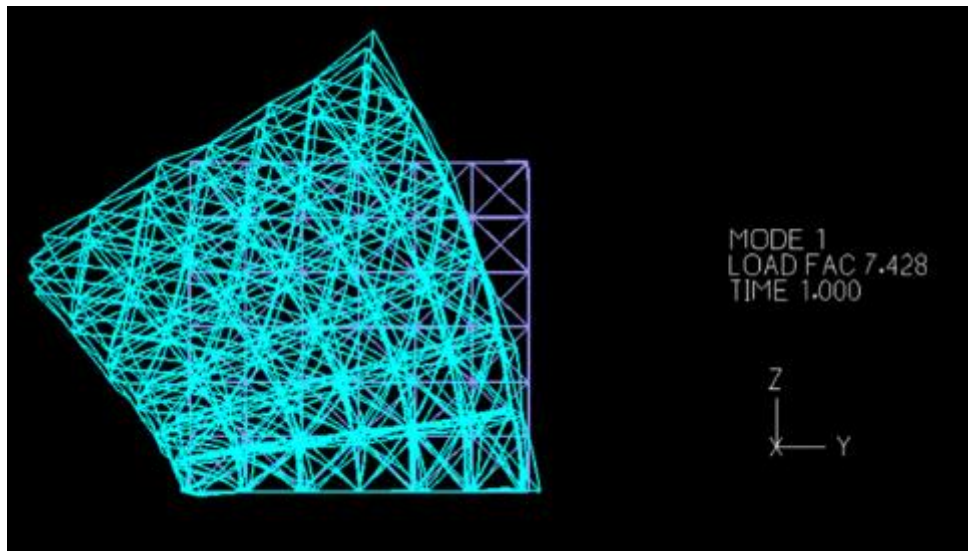
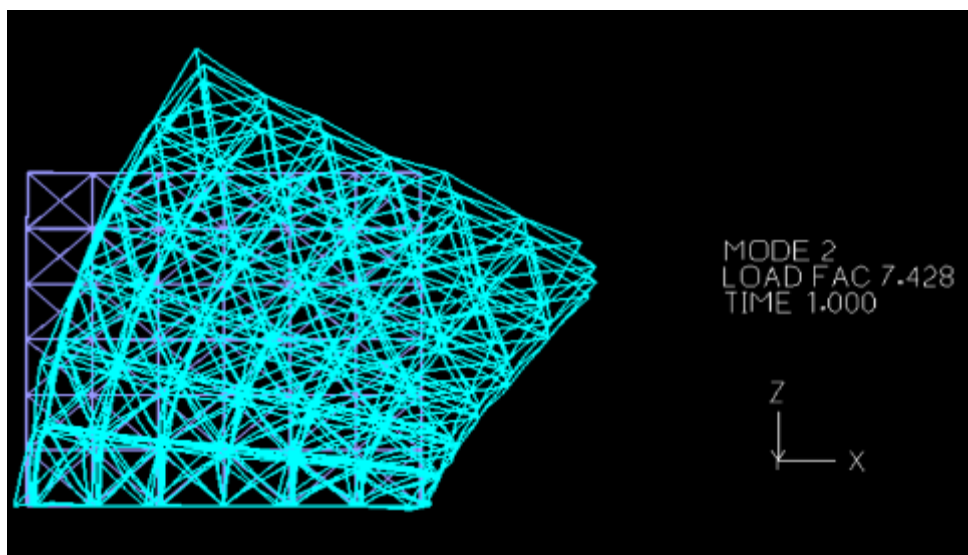
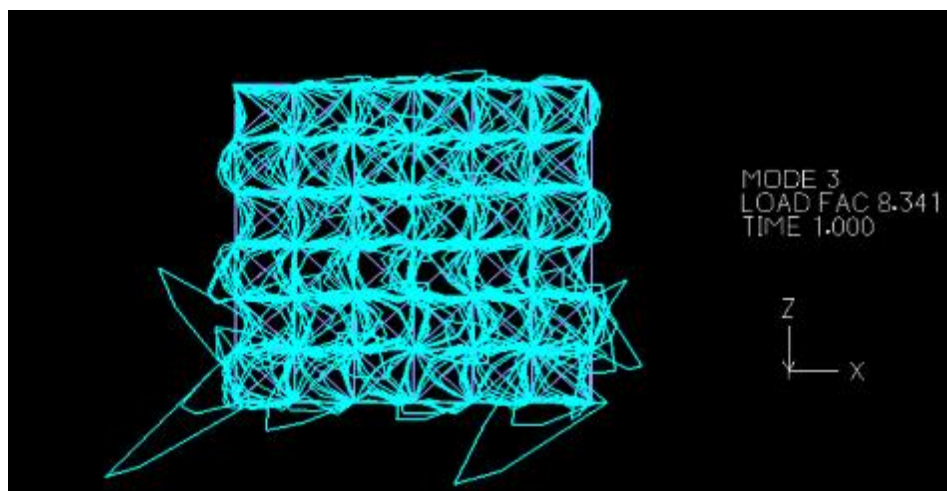
Σχήμα 4-3: Συνοριακές συνθήκες στήριξης πλέγματος οκτάδας, όπως σχεδιάστηκε στο λογισμικό ADINA

Πρώτα έγινε Μη Γραμμική Ανάλυση Κατάρρευσης (Collapse Analysis) χωρίς ατέλειες, με φόρτιση επιβαλλόμενης μετατόπισης 5 mm σε όλους τους άνω κόμβους του μοντέλου. Λόγω της συμμετρίας του μοντέλου, τόσο σε γεωμετρία όσο και σε φόρτιση, η ανάλυση σταμάτησε δίνοντας μια τελική εικόνα συμμετρική, με συγκέντρωση της αστοχίας στους κόμβους (Σχήμα 4-4). Επομένως, κρίθηκε σκόπιμο να εισαχθούν στον φορέα αρχικές ατέλειες, με σκοπό να διαταράξουν αυτήν την απόλυτη συμμετρία και να προκύψει κάποια εικόνα αστοχίας που θα προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα.



Σχήμα 4-4: Εικόνα αστοχίας GMNA πλέγματος οκτάδας

Ως αρχικό βήμα, έγινε Γραμμική Ανάλυση Λυγισμού (Linear Buckling Analysis) με ελαστικό υλικό και φόρτιση των άνω κόμβων με σκοπό την εξαγωγή των πρώτων ιδιομορφών του πλέγματος, όπως φαίνονται παρακάτω. Οι πρώτες δύο ιδιομορφές έχουν χαρακτήρα καθολικής πλευρικής μετατόπισης κατά τους άξονες  $x$  και  $y$  αντίστοιχα και με ίδιο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, ενώ η τρίτη ιδιομορφή κυριαρχείται από λυγισμό των επιμέρους ράβδων.

Σχήμα 4-5: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος οκτάδαςΣχήμα 4-6: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος οκτάδαςΣχήμα 4-7: 3<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος οκτάδας



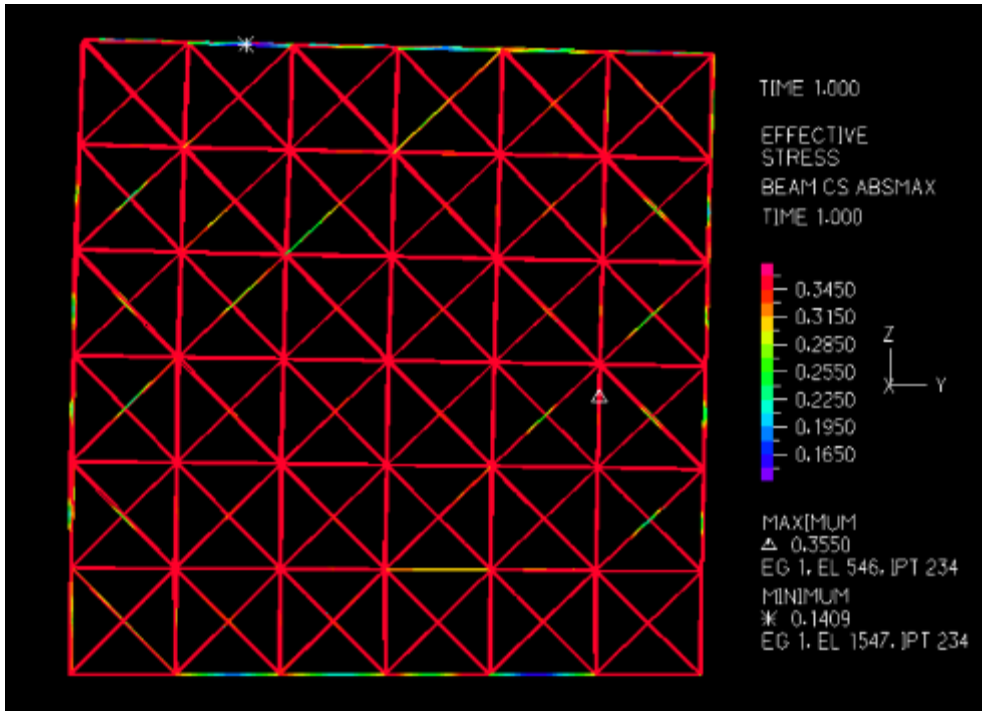
Κάνοντας μια πρόχειρη εκτίμηση για την αντοχή των συστατικών ράβδων, όπως παρακάτω, φαίνεται ότι το φορτίο Euler κάθε μεμονωμένης ράβδου είναι σχεδόν 20 φορές μεγαλύτερο από το φορτίο διαρροής της.

Πίνακας 4-1: Φορτία αντοχής μεμονωμένης ράβδου  $L = 2.2$  mm και  $D = 0.5$  mm

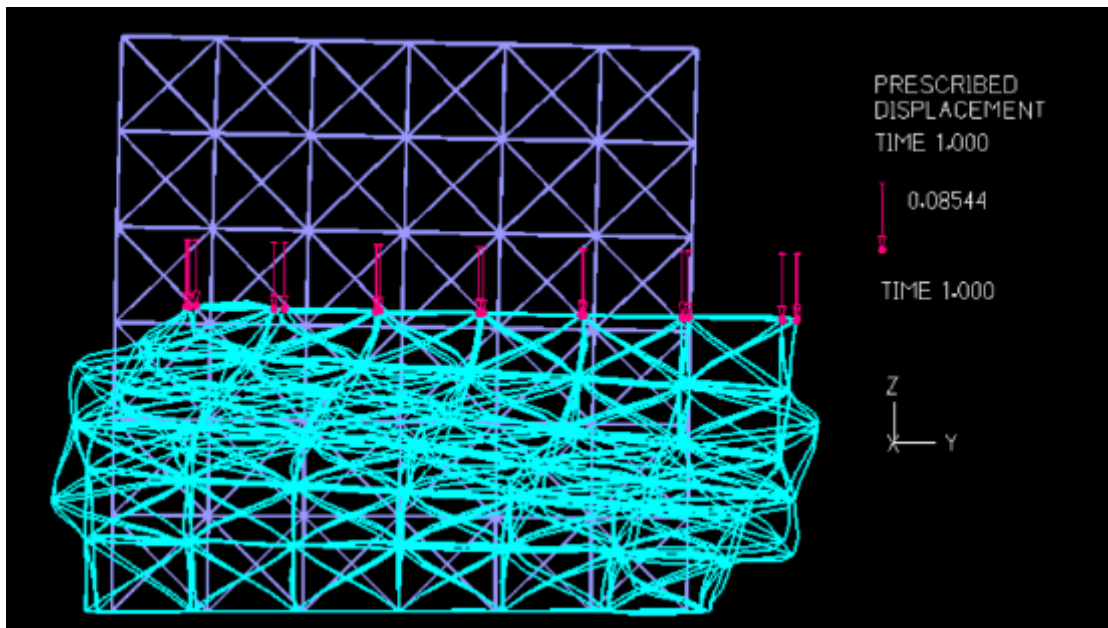
ΔΙΑΡΡΟΗ ΡΑΒΔΟΥ	ΦΟΡΤΙΟ EULER ΡΑΒΔΟΥ
$f_y = 0.355$ kN/mm <sup>2</sup>	$E = 210$ kN/mm <sup>2</sup>
$A = \pi D^2/4 = 0.196$ mm <sup>2</sup>	$I = 3.068E-03$ mm <sup>4</sup>
$d = 0.5$ mm	$L = 2.5$ mm
<b><math>N = A f_y = 0.07</math> kN</b>	<b><math>N = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = 1.3</math> kN</b>

Βάσει των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4-1, είναι εύλογη η υπόθεση ότι η αστοχία του πλέγματος δεν θα οφείλεται σε λυγισμό των ράβδων (όπως φαίνεται στην τρίτη ιδιομορφή), αλλά σε διαρροή του υλικού. Για αυτόν τον λόγο, λαμβάνονται ατέλειες σύμφωνα με τις πρώτες δύο ιδιομορφές, μεγέθους 0.1 mm στον άνω δεξιά κόμβο του πλέγματος κατά  $x$  και  $y$ , ωθώντας το πλέγμα να αστοχήσει όπως αναμένεται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Έπειτα, γίνεται Μη Γραμμική Ανάλυση Κατάρρευσης (Collapse Analysis) του μοντέλου με όλες τις παραπάνω παραδοχές και τις ατέλειες όπως εξηγήθηκαν παραπάνω και έτσι προκύπτει η εικόνα παραμόρφωσης (αστοχία) του πλέγματος με σημειωμένες τις τάσεις στο σύνολο του μοντέλου (Σχήμα 4-8). Στο Σχήμα 4-9 φαίνεται και η παραμορφωμένη εικόνα πολλαπλασιασμένη με μεγεθυντικό συντελεστή, προκειμένου να φανεί καλύτερα το πού υπάρχουν οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις και τον τρόπο με τον οποίο καταπονούνται οι περισσότερο επιβαρυνόμενες ράβδοι. Παρόλο που το μεγαλύτερο μέρος του πλέγματος έχει φτάσει την τάση διαρροής (355 MPa) και φαίνεται να εκτρέπεται πλευρικά με εντονότερες παραμορφώσεις στο εσωτερικό του πλέγματος, η τελική εικόνα δεν ταυτίζεται με εκείνη της παραγράφου 2.2.3, όπως έδειξε η εργασία των (Liu et al). Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι η εν λόγω εργασία χρησιμοποίησε ατέλειες που προέκυψαν και μετρήθηκαν από πραγματικά δοκίμια κατασκευασμένα με τη μέθοδο SLM, ενώ στην ανάλυση που έγινε για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας, ως ατέλειες χρησιμοποιήθηκε ένας γραμμικός συνδυασμός των δυο πρώτων ιδιομορφών. Τέτοιου είδους ατέλειες φαίνεται πως δεν είναι επαρκείς για να εντοπίσουν και να περιγράψουν το τί ακριβώς συμβαίνει στην πραγματικότητα. Είναι επίσης πιθανό η απόκλιση από τις αντίστοιχες έρευνες της βιβλιογραφίας να οφείλεται και στο μέγεθος του πλέγματος. Όλες οι σχετικές αναλύσεις και πειράματα έχουν γίνει με σημαντικά μεγαλύτερα πλέγματα πχ 9x9x9 (Jost et al), ενώ σε αυτήν την εργασία υπήρχε περιορισμός στο μέγεθος του μοντέλου, λόγω της εκπαιδευτικής έκδοσης του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Παρόλα αυτά, παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένοι δρόμοι ισορροπίας και εικόνες παραμόρφωσης, όπως προέκυψαν από αυτήν την ανάλυση. Στα Σχήματα 4-13 έως 4-18 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας κατά  $x$ ,  $y$  και  $z$  δύο κόμβων της άνω πλευράς του πλέγματος (συντελεστής  $\lambda \sim 17 \times 10^{-3}$ ). Οι κόμβοι αυτοί είναι ο 234 και ο 1404, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-12.

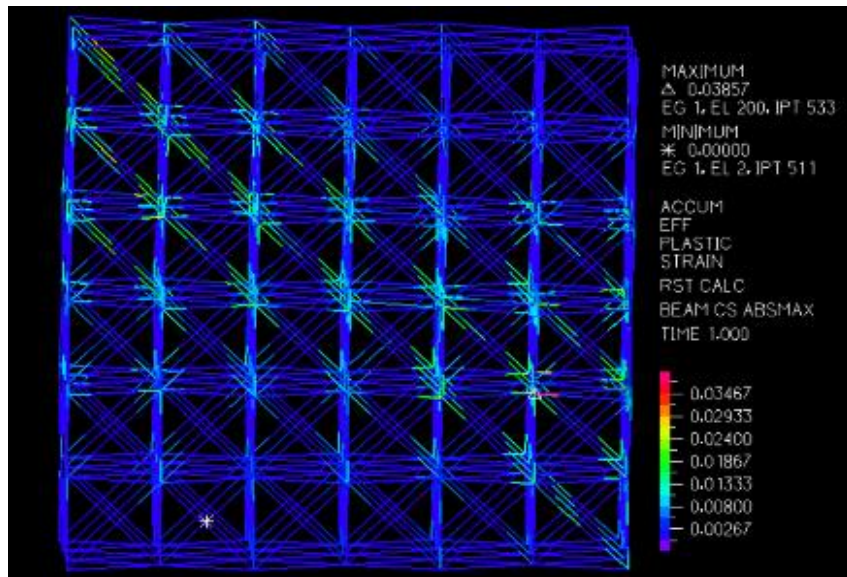


Σχήμα 4-8: Παραμορφωμένη εικόνα προσομοιώματος πλέγματος οκτάδας και τάσεις που αναπτύσσονται

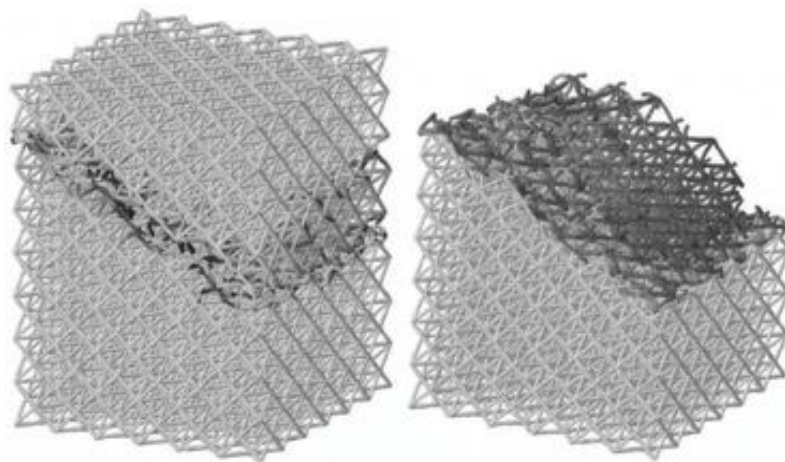


Σχήμα 4-9: Παραμορφωμένη εικόνα προσομοιώματος πλέγματος οκτάδας με μεγεθυντικό συντελεστή

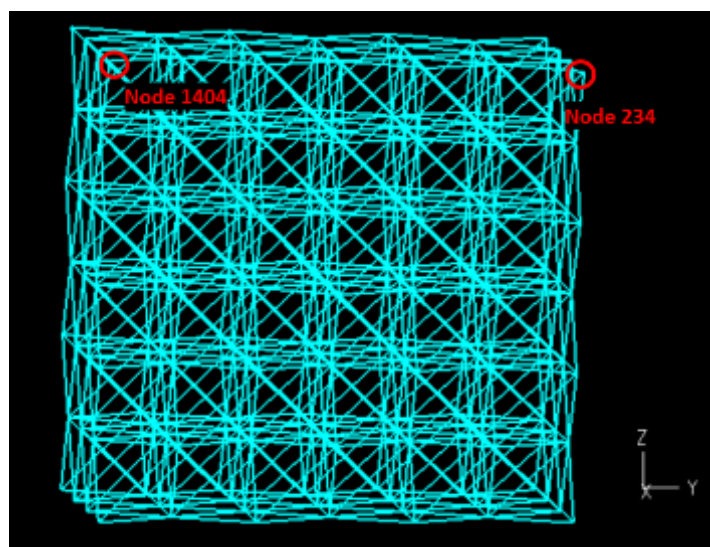
Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εικόνα ανηγμένων παραμορφώσεων του πλέγματος. Φαίνεται ότι οι ράβδοι που βρίσκονται πάνω στην μια διαγώνιο παραμορφώνονται περισσότερο (έως ~4%), όπως άλλωστε επιβεβαιώνει και το Σχήμα 4-10. Υπενθυμίζεται ότι στην παράγραφο 2.2.3, η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στο πλέγμα οκτάδας κατέληξε σε αστοχία σύμφωνα με το Σχήμα 4-11. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται εδώ, αν και φαίνεται να υπάρχει μια τάση για εμφάνιση της αστοχίας κατά μήκος μιας κεκλιμένης επιφάνειας.



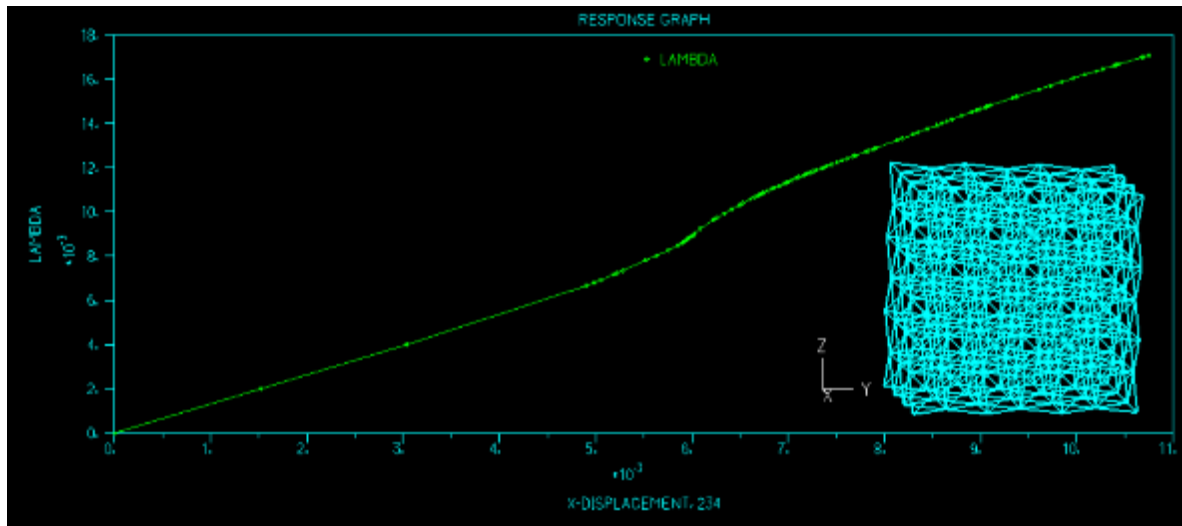
Σχήμα 4-10: Ανηγμένες παραμορφώσεις προσομοιώματος πλέγματος οκτάδας



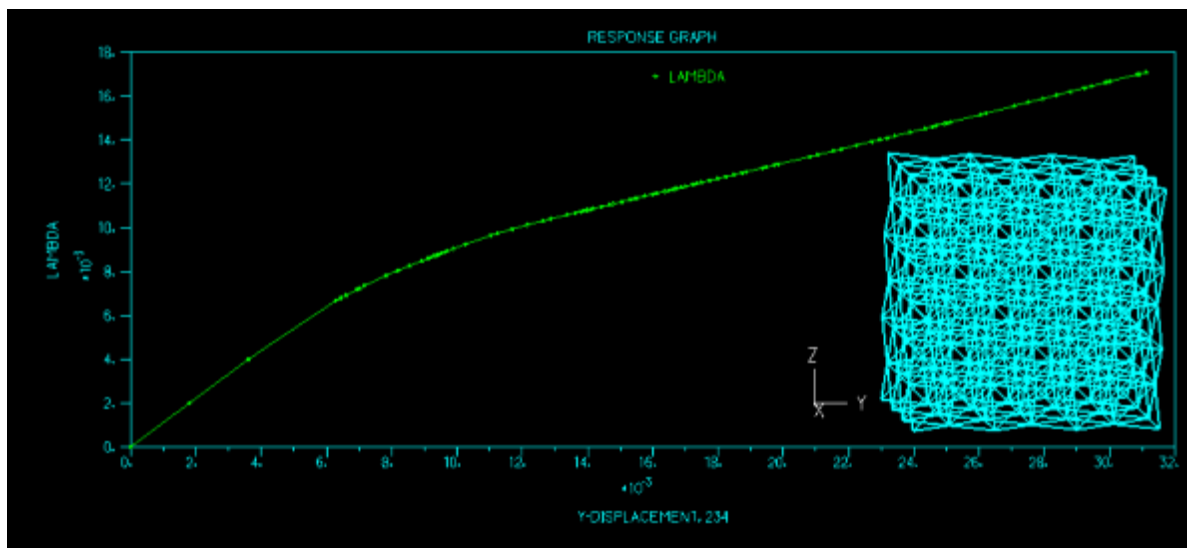
Σχήμα 4-11: Εικόνα αστοχίας πλέγματος οκτάδας από FEM (από Liu et al)



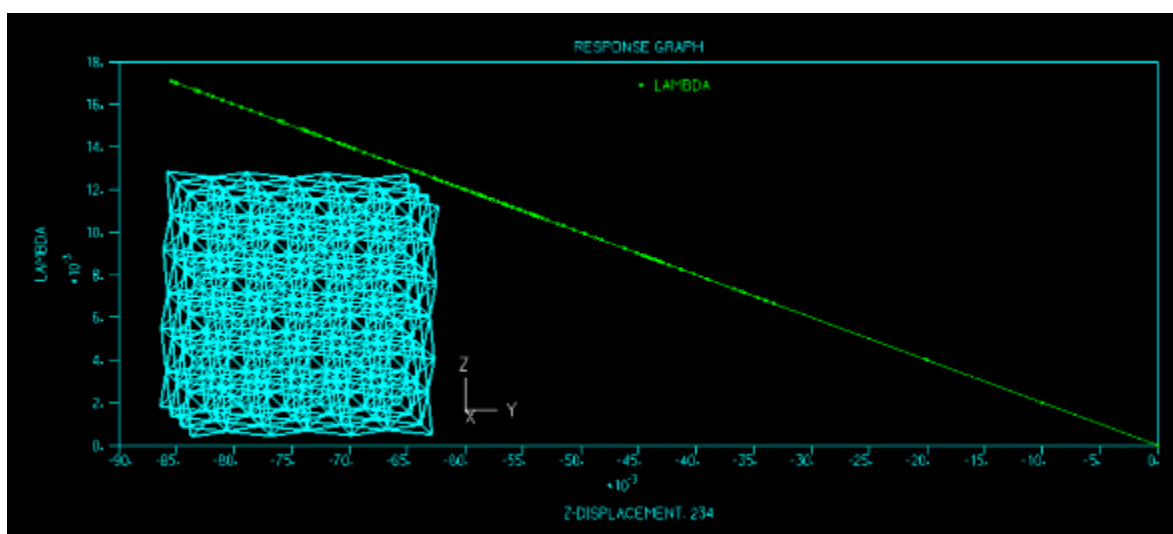
Σχήμα 4-12: Κόμβοι 234 και 1404 πλέγματος οκτάδας



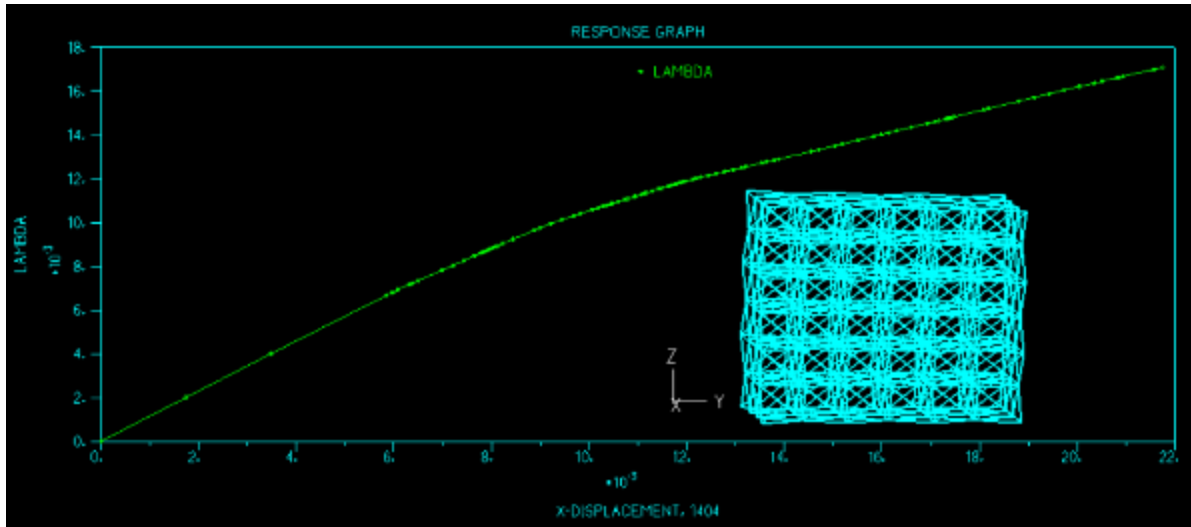
Σχήμα 4-13: Δρόμος ισορροπίας άνω και δεξιά κόμβου κατά X



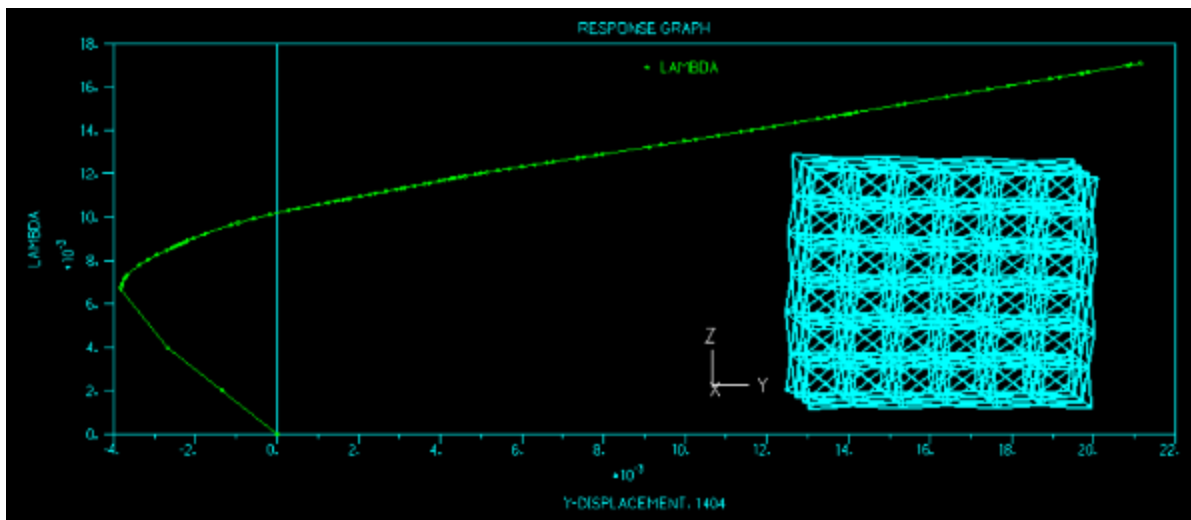
Σχήμα 4-14: Δρόμος ισορροπίας άνω και δεξιά κόμβου (234) κατά Y



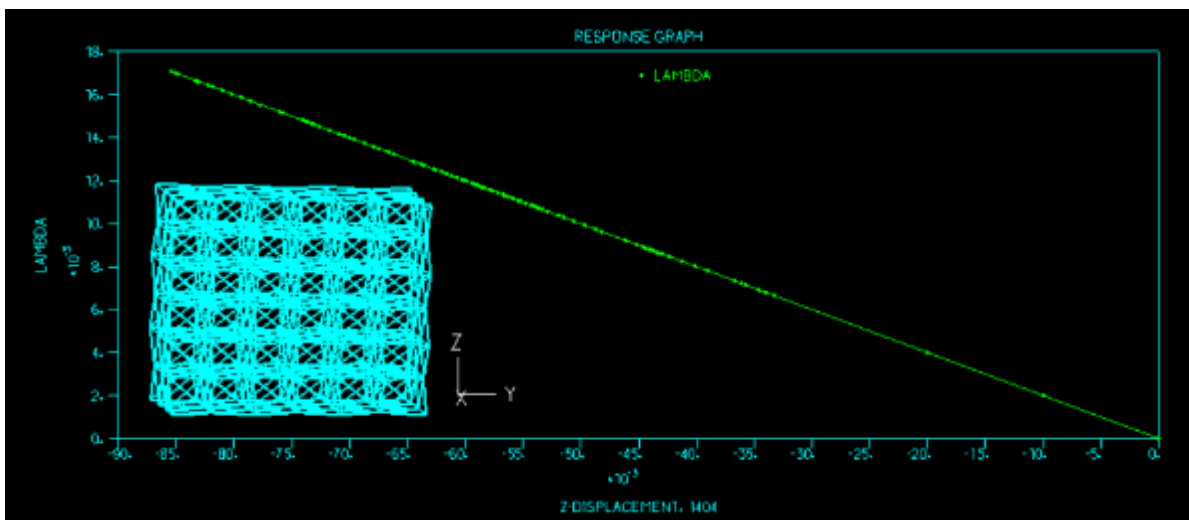
Σχήμα 4-15: Δρόμος ισορροπίας άνω και δεξιά κόμβου (234) κατά Z



Σχήμα 4-16: Δρόμος ισορροπίας άνω και αριστερά κόμβου (1404) κατά Χ



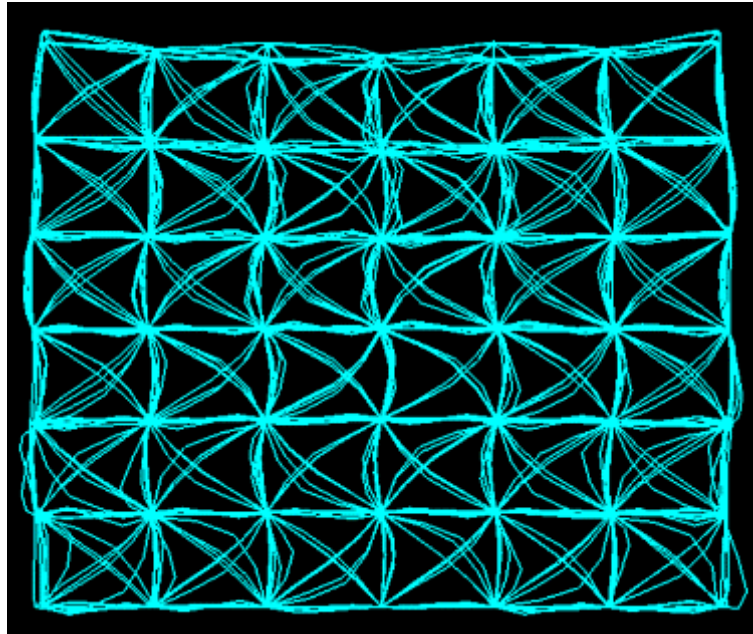
Σχήμα 4-17: Δρόμος ισορροπίας άνω και αριστερά κόμβου (1404) κατά Υ



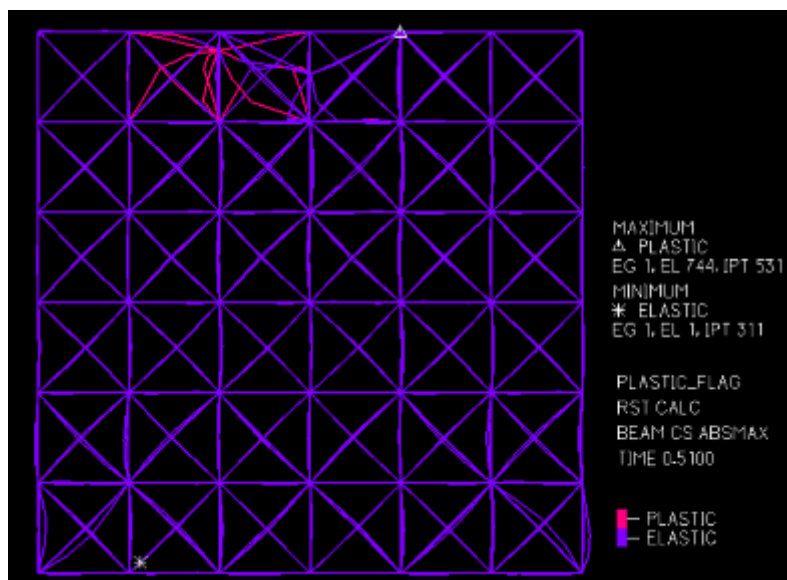
Σχήμα 4-18: Δρόμος ισορροπίας άνω και αριστερά κόμβου (1404) κατά Ζ



Τέλος, για το πλέγμα οκτάδας έγινε Μη Γραμμική Ανάλυση χωρίς αρχικές ατέλειες για πλέγμα πυκνότητας  $\rho < 0.3$ , που βάσει των Tancogne-Dejean et al είναι η πυκνότητα πλέγματος για την οποία ο μηχανισμός αστοχίας μεταβάλλεται από "twist mode" σε "stable buckling mode". Προς επιβεβαίωση αυτού, έγινε μια δοκιμή για πλέγμα με λεπτότερες ράβδους, με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Πράγματι, από τις εικόνες λυγισμού και αστοχίας φαίνεται ότι ο μηχανισμός κατάρρευσης του πλέγματος κυριαρχείται από λυγισμό των ράβδων, όμοια με το Σχήμα 2-6.



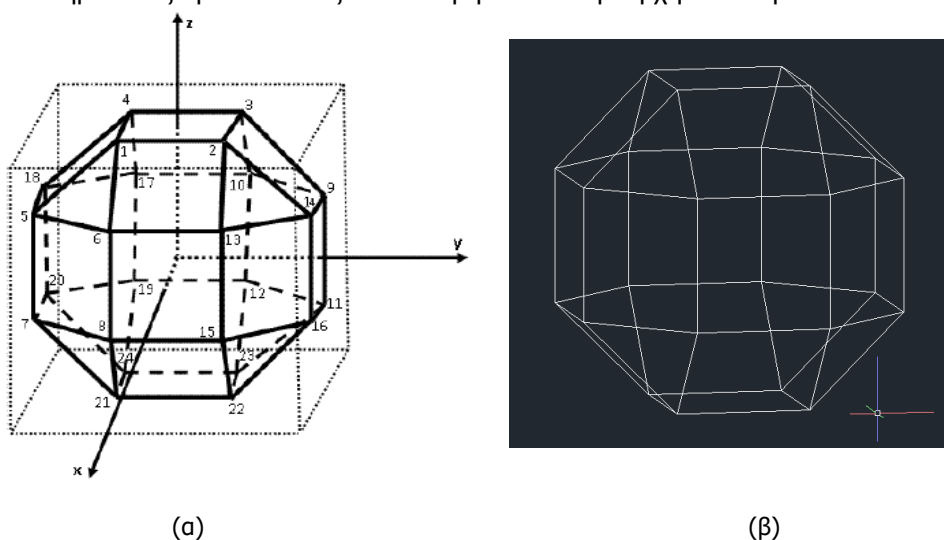
Σχήμα 4-19: Ιδιομορφή πλέγματος οκτάδας μικρής πυκνότητας – "twist mode"



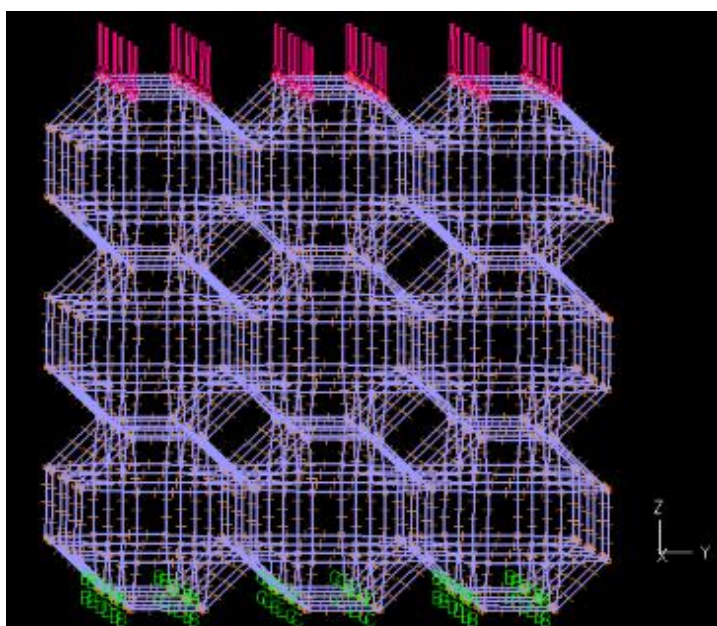
Σχήμα 4-20: Μηχανισμός αστοχίας πλέγματος οκτάδας μικρής πυκνότητας – "twist mode"

## 4.2 Μη Γραμμική Ανάλυση Πλέγματος Ρομβοκυβοκτάεδρου

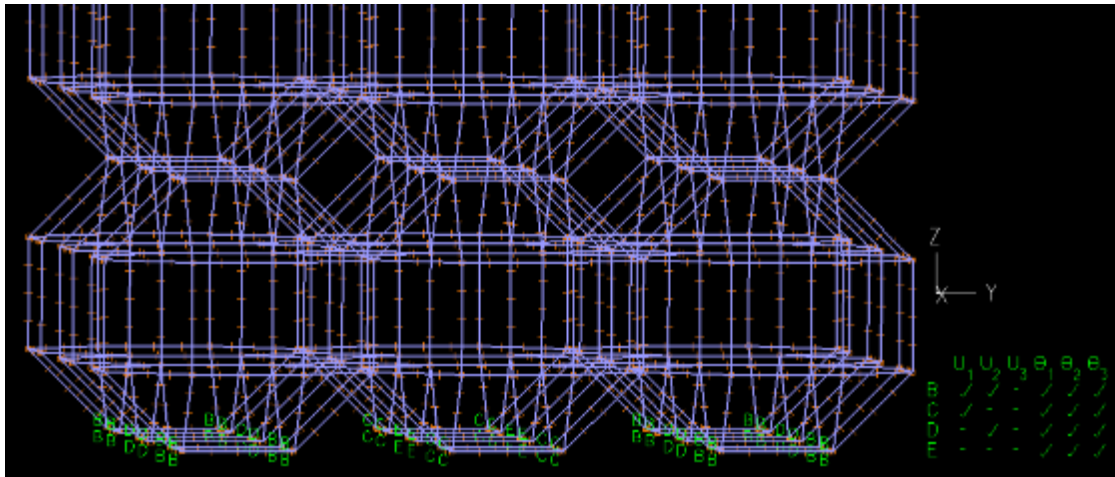
Το πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μονάδες ρομβοκυβοκτάεδρου, του οποίου οι ράβδοι διατάσσονται όπως στο Σχήμα 4-21 (α). Στο Σχήμα 4-21 (β) φαίνεται το μοντέλο CAD που κατασκευάστηκε με σκοπό την εισαγωγή του στο λογισμικό ADINA. Το μήκος όλων των ράβδων είναι κοινό και ίσο με 1.38 mm ενώ οι διάμετροί τους είναι 1 mm για τις ράβδους των τετράγωνων εδρών και 0.5 mm για τις υπόλοιπες, όπως στο Σχήμα 2-13. Όπως και για το πλέγμα οκτάδας, οι τιμές αυτές λαμβάνονται ίσες ή παραπλήσιες σε τιμές της βιβλιογραφίας, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Κάθε μονάδα συνδέεται με τις διπλανές της στις 6 τετράγωνες έδρες που δημιουργούνται, θεωρώντας συνέχεια του υλικού, χωρίς δηλαδή εσωτερικές ελευθερώσεις. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας είναι μεγέθους 3x3x3. Έγινε διακριτοποίηση (mesh) των ράβδων σε 4 επιμέρους στοιχεία έτσι ώστε να επιτρέπεται η εμφάνιση παραμορφώσεων εικόνας λυγισμού. Οι συνοριακές συνθήκες στη βάση του πλέγματος φαίνονται στο Σχήμα 4-23. όπου με – συμβολίζονται οι δεσμευμένοι βαθμοί ελευθερίας, ενώ με το σύμβολο ν φαίνονται οι ελεύθεροι. Τέθηκαν έτσι ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις που αναφέρονται στην αρχή του κεφαλαίου.



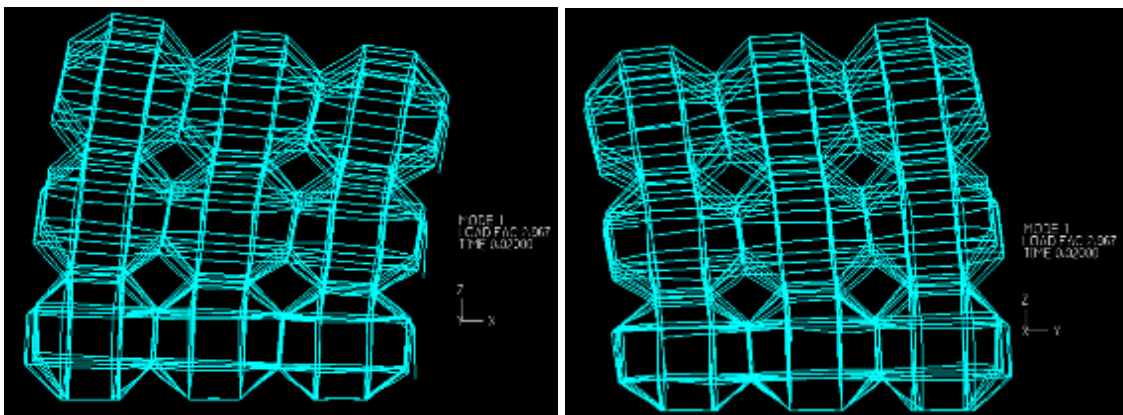
Σχήμα 4-21: Γεωμετρία Ρομβοκυβοκτάεδρου (α) από Meral Şadiye Cakmak, 2014 (β) Μοντέλο Auto-CAD



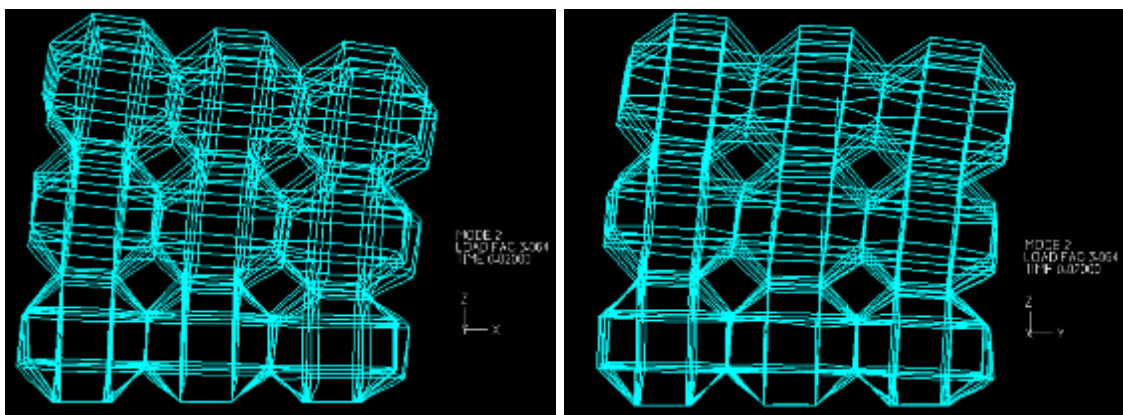
Σχήμα 4-22: Πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου στο λογισμικό ADINA



Ως αρχικό βήμα, έγινε Γραμμική Ανάλυση Λυγισμού (Linear Buckling Analysis) με ελαστικό υλικό και φόρτιση των άνω κόμβων με σκοπό την εξαγωγή των πρώτων ιδιομορφών του πλέγματος, όπως φαίνονται παρακάτω. Οι πρώτες δύο ιδιομορφές είναι συνδυασμός πλευρικής μετατόπισης κατά  $x$  και  $y$ . Οι επόμενες δύο ιδιομορφές φαίνεται να επηρεάζουν κυρίως το πάνω στρώμα του πλέγματος μέσω μιας περισσότερο ακανόνιστης παραμόρφωσης, σύμφωνα με τα επόμενα σχήματα.

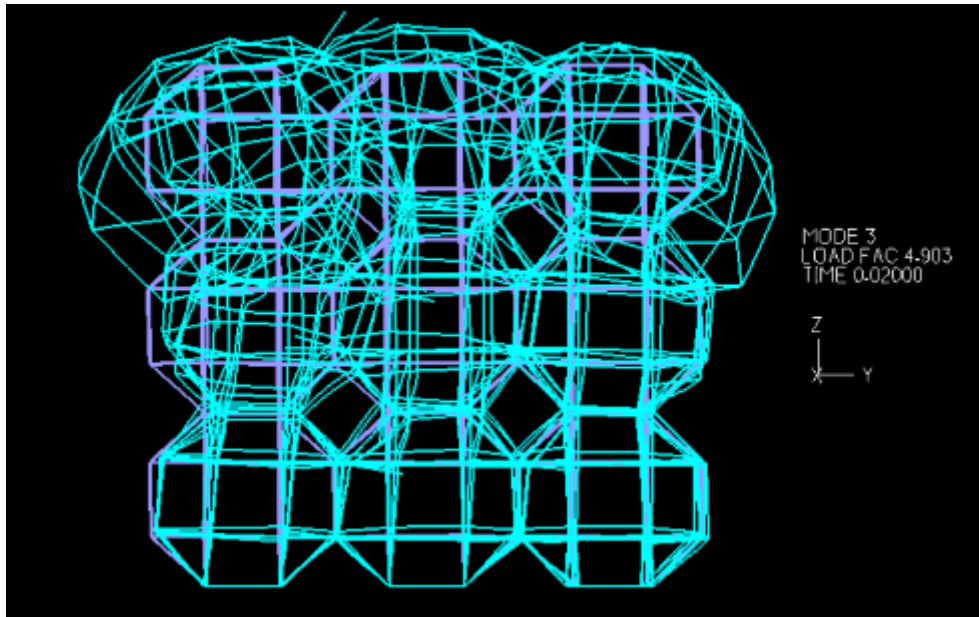


Σχήμα 4-24: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου, άξονες Z-X και Z-Y

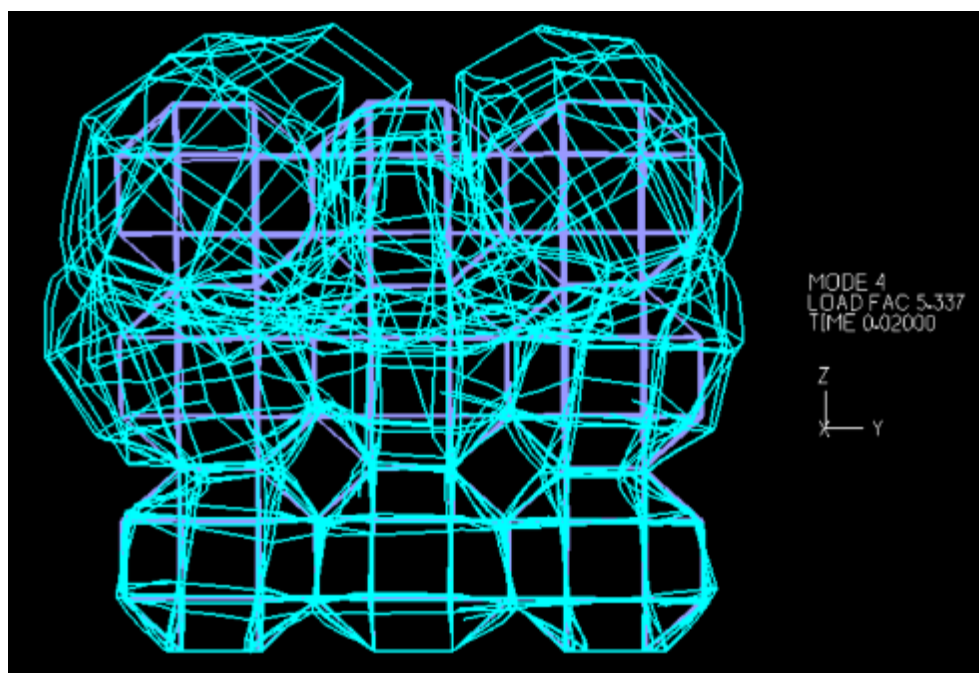


Σχήμα 4-25: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου, άξονες Z-X και Z-Y





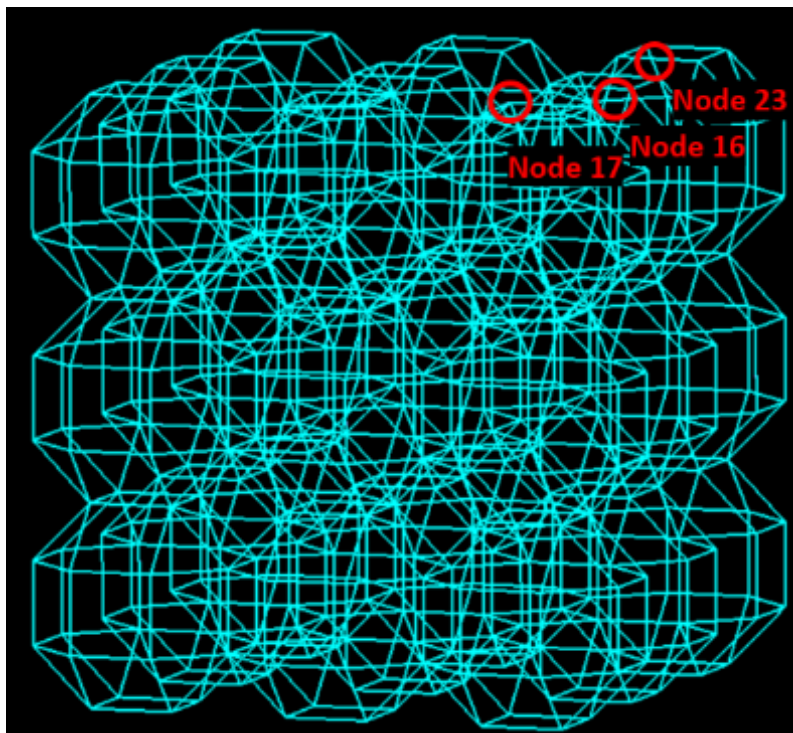
Σχήμα 4-26: 3<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου



Σχήμα 4-27: 4<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε Μη Γραμμική Ανάλυση Κατάρρευσης με αρχικές ατέλειες που ελήφθησαν και από τις 4 πρώτες ιδιομορφές λυγισμού, έτσι ώστε να ανιχνευθούν όσο το δυνατόν ορθότερα οι μηχανισμοί αστοχίας αυτού του πλέγματος. Ένας ακόμη λόγος που καθιστά σημαντικό το να ληφθούν υπόψιν όλες οι παραπάνω ιδιομορφές είναι το πόσο κοντινά είναι μεταξύ τους τα οριακά φορτία λυγισμού τους. Όταν συμβαίνει αυτό, θεωρείται ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των ιδιομορφών και έτσι είναι καλό να μην αγνοούνται. Ήδη από τη βιβλιογραφία, είναι γνωστό ότι το πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου κυριαρχείται από κάμψη, σε αντίθεση με το πλέγμα οκτάδας, επομένως και αναμένεται μια διαφορετική μορφή αστοχίας. Όπως έχει φανεί από πειράματα και αναλύσεις, σε αυτήν την μορφή αστοχίας προσβάλλονται πρώτα τα ακραία στρώματα (άνω και κάτω). Λόγω του ότι γίνεται προσομοίωση της εργαστηριακής δοκιμής στατικής συμπίεσης, ο ορθότερος τρόπος μοντελοποίησης αυτής της καταπόνησης, είναι μέσω επιβολής μετατόπισης στην άνω παρειά του πλέγματος, όπως

δηλαδή συμβαίνει μέσω της άκαμπτης πλάκας κατά την επιτόπου δοκιμή. Το μοντέλο πλέγματος με επιβαλλόμενη μετατόπιση 5 mm στους άνω κόμβους, δεν συμπεριφέρθηκε όπως αναμενόταν, γι' αυτό και αποφασίστηκε η μοντελοποίηση του πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου να γίνει μέσω επιβολής δύναμης. Με βάση αυτό, έγιναν 2 Μη Γραμμικές Αναλύσεις (Ανάλυση Α και Β) με επιβαλλόμενη δύναμη 10 kN στους άνω κόμβους και ατέλειες μεγέθους 0.01 mm και 0.1 mm, αντίστοιχα για την κάθε ανάλυση. Οι κόμβοι στους οποίους εισήχθησαν οι ατέλειες ανήκουν στην άνω πλευρά του πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-28.



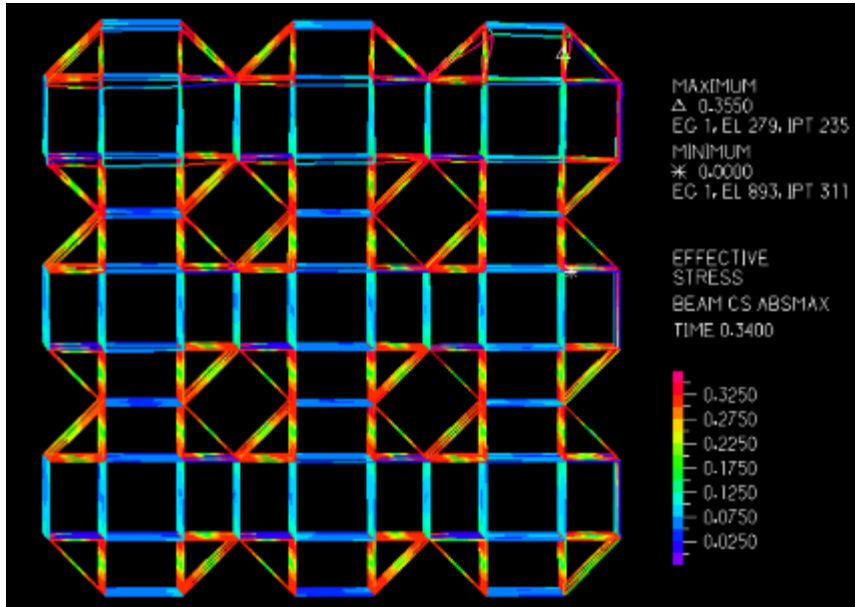
Σχήμα 4-28: Κόμβοι που εισήχθησαν οι ατέλειες - μοντέλο πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου

#### 4.2.1 Πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου - Ανάλυση Α

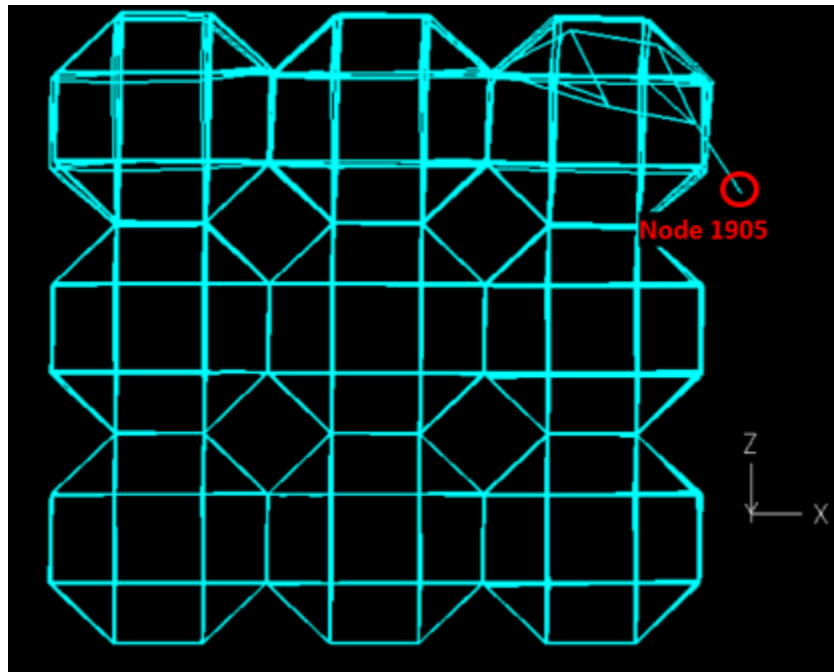
Στην Ανάλυση Α εισήχθησαν μικρές ατέλειες. Αναλυτικά, θεωρήθηκαν όπως στον Πίνακα 4-2. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδωσαν την εικόνα παραμόρφωσης που φαίνεται στο Σχήμα 4-30. Παρατηρείται ακαριαία θραύση στα άκρα ορισμένων ράβδων. Ο κόμβος 1905 παρουσιάζει και την εντονότερη μετατόπιση. Στα Σχήματα 4-31, 4-31 και 4-33, παρατίθενται οι δρόμοι ισορροπίας αυτού του κόμβου, όπως προέκυψαν από το λογισμικό ADINA. Οι δρόμοι ισορροπίας είναι αρχικά γραμμικοί ελαστικοί, ενώ στη συνέχεια εμφανίζουν καθοδικούς κλάδους, που υποδηλώνουν κατάρρευση και μείωση του φορτίου για μετατοπίσεις μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν στο οριακό φορτίο (συντελεστής  $\lambda \sim 6 \times 10^{-3}$ ). Οι ακόλουθοι δρόμοι ισορροπίας δείχνουν αστοχία λόγω μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας αλλά δυνατότητα μεγάλων μετατοπίσεων που μαρτυρά σημαντική απορρόφηση ενέργειας στην πλαστική περιοχή. Οι ράβδοι διαμέτρου 0.5 mm φτάνουν πρώτες στο όριο διαρροής (Σχήμα 4-29).

Πίνακας 4-2: Ατέλειες Α ανάλυσης (από ADINA)

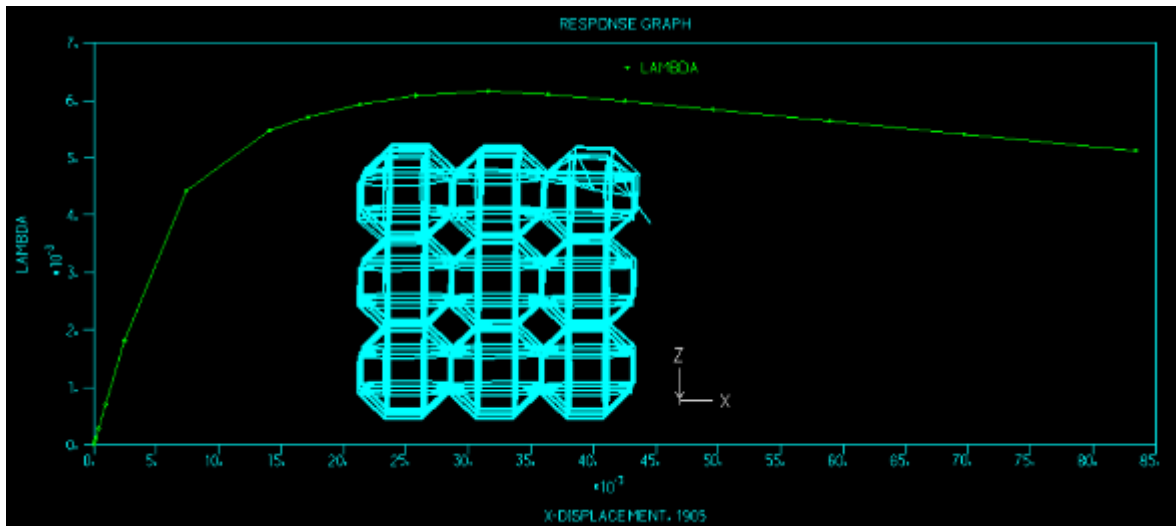
	Mode #	Point #	Direction	Displacement
1	1	16	X-Translation	0.01
2	2	23	Y-Translation	0.01
3	3	16	Z-Translation	0.01
4	4	17	Z-Translation	0.01



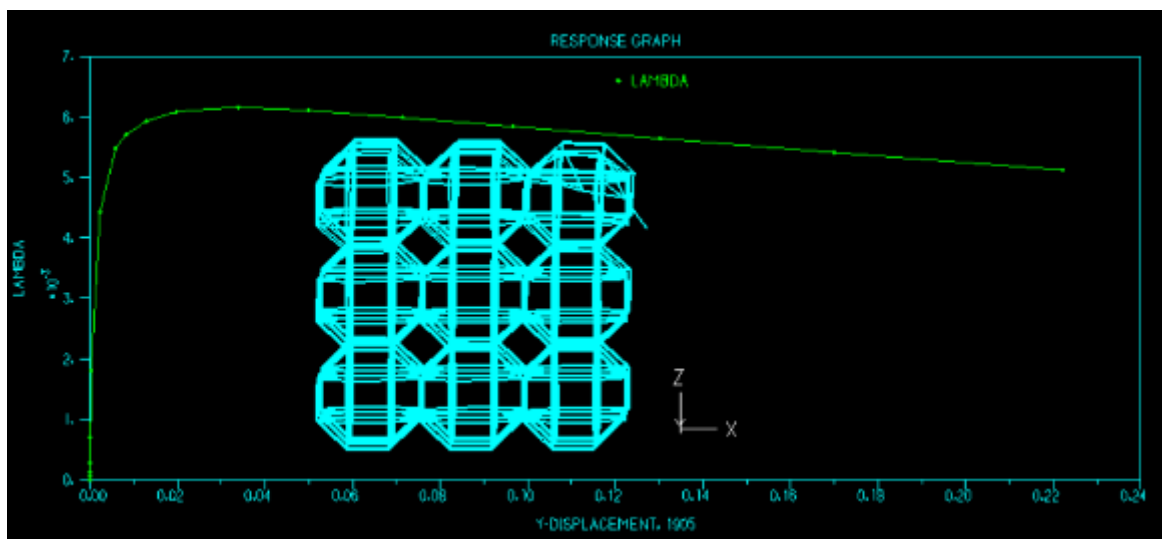
Σχήμα 4-29: Αναπτυσσόμενες τάσεις πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου - Ανάλυση A



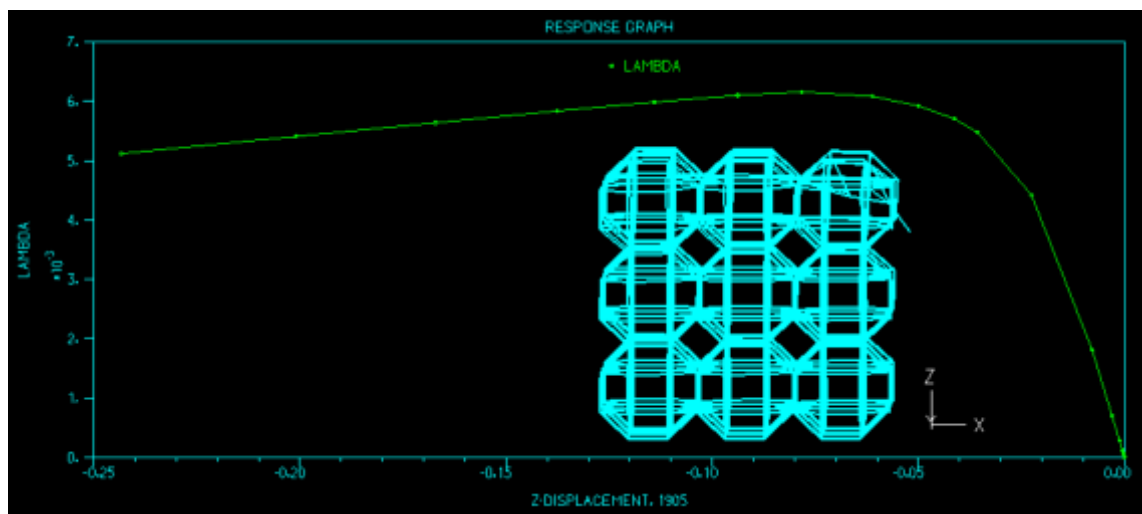
Σχήμα 4-30: Παραμορφωμένη εικόνα – Ανάλυση A



Σχήμα 4-31: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά X – Ανάλυση A



Σχήμα 4-32: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά Y – Ανάλυση A



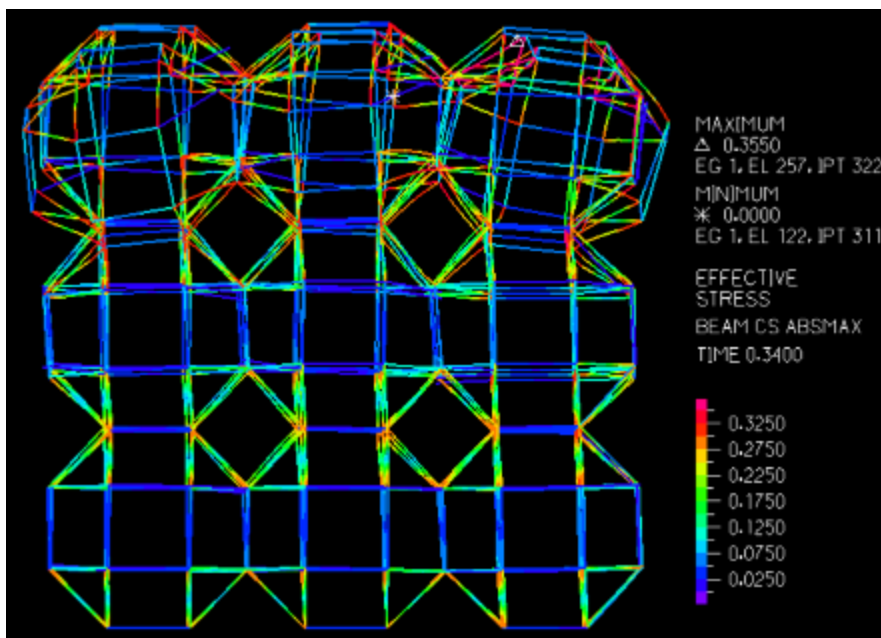
Σχήμα 4-33: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά Z – Ανάλυση A

#### 4.2.2 Πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου - Ανάλυση Β

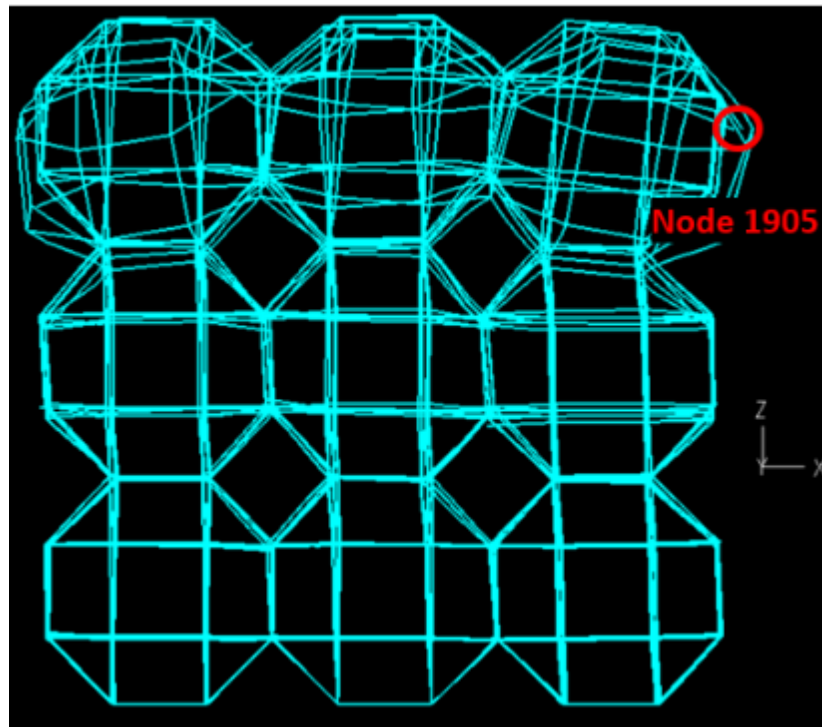
Στην Ανάλυση Β εισήχθησαν μεγαλύτερες ατέλειες, ίδιας τάξης δηλαδή με τις ατέλειες της Μη Γραμμικής Ανάλυσης Πλέγματος Οκτάδας. Αυτό έγινε, αφενός, για να υπάρχει μια σύγκριση μεταξύ των δύο πλεγμάτων και αφετέρου, για να διαπιστωθεί κατά πόσον αλλάζουν τα αποτελέσματα και η μορφή αστοχίας, θεωρώντας μεγαλύτερες ατέλειες στο ίδιο πλέγμα. Αναλυτικά, θεωρήθηκαν όπως στον Πίνακα 4-3. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδωσαν την εικόνα παραμόρφωσης που φαίνεται στο Σχήμα 4-35. Παρατηρείται και πάλι ακαριαία θραύση στα άκρα ορισμένων ράβδων και διόγκωση κυρίως του άνω τμήματος. Λαμβάνεται πάλι ο κόμβος 1905 για λόγους σύγκρισης. Στα Σχήματα 4-36, έως 4-38, παρατίθενται οι δρόμοι ισορροπίας αυτού του κόμβου, όπως προέκυψαν από το λογισμικό ADINA. Οι δρόμοι ισορροπίας, όμοια με πριν, είναι αρχικά γραμμικοί ελαστικοί, ενώ στη συνέχεια εμφανίζουν καθοδικούς κλάδους, που υποδηλώνουν κατάρρευση και μείωση του φορτίου για μετατοπίσεις μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν στο οριακό φορτίο (συντελεστής  $\lambda \sim 3.8 \times 10^{-3}$ ). Σε σχέση με την Ανάλυση Α, οι ατέλειες που εισήχθησαν τώρα ήταν δεκαπλάσιες ενώ το οριακό φορτίο μειώθηκε μόλις κατά 37%. Οι ακόλουθοι δρόμοι ισορροπίας δείχνουν αστοχία λόγω μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας. Παρόλα αυτά, οι παραμορφώσεις στην άνω στρώση του πλέγματος γίνονται αρκετά εντονότερες από πριν και φαίνεται να παίρνουν μορφή αντίστοιχη με εκείνη της 3<sup>ης</sup> ιδιομορφής. Οι ράβδοι διαμέτρου 0.5 mm φτάνουν πρώτες στο όριο διαρροής, όμοια με πριν, ωστόσο στην ανάλυση Β φαίνεται η εντονότερη καταπόνηση στην ανώτερη στρώση του πλέγματος.

Πίνακας 4-3: Ατέλειες Β ανάλυσης (από ADINA)

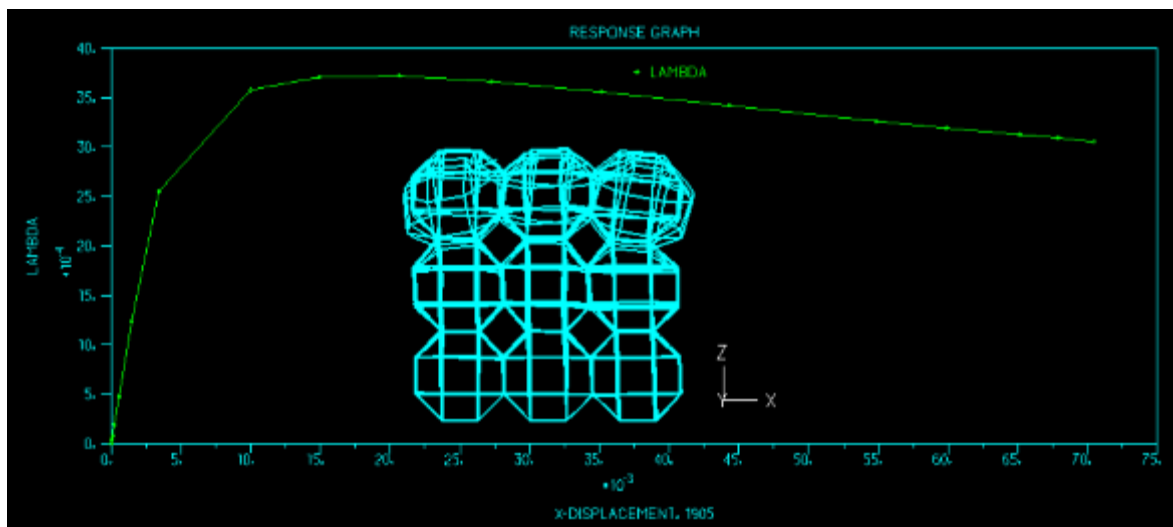
	Mode #	Point #	Direction	Displacement
1	1	16	X-Translation	0.1
2	2	23	Y-Translation	0.1
3	3	16	Z-Translation	0.1
4	4	17	Z-Translation	0.1



Σχήμα 4-34: Αναπτυσσόμενες τάσεις πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου - Ανάλυση Β

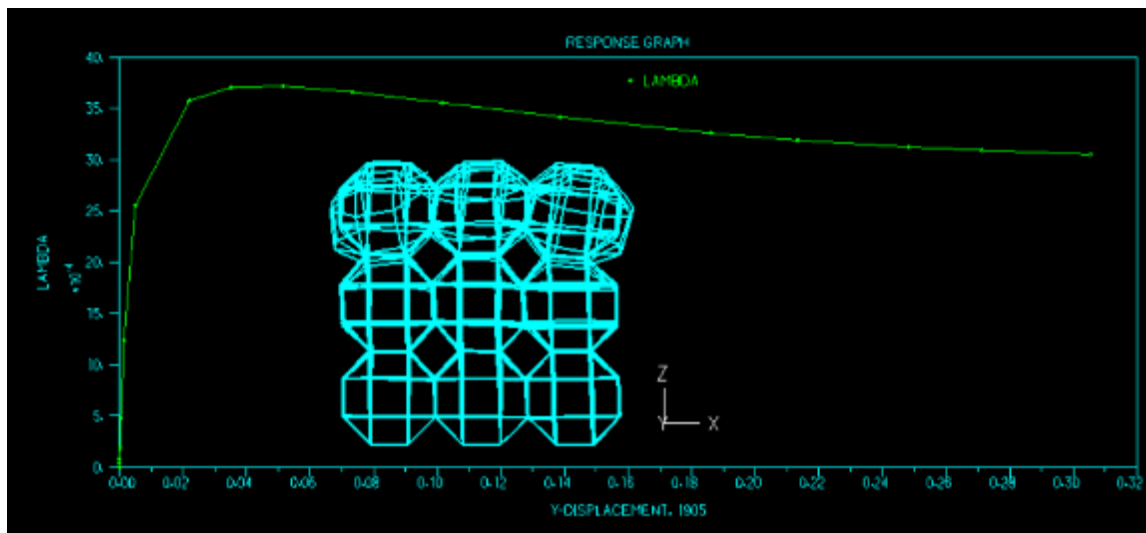


Σχήμα 4-35: Παραμορφωμένη εικόνα – Ανάλυση Β

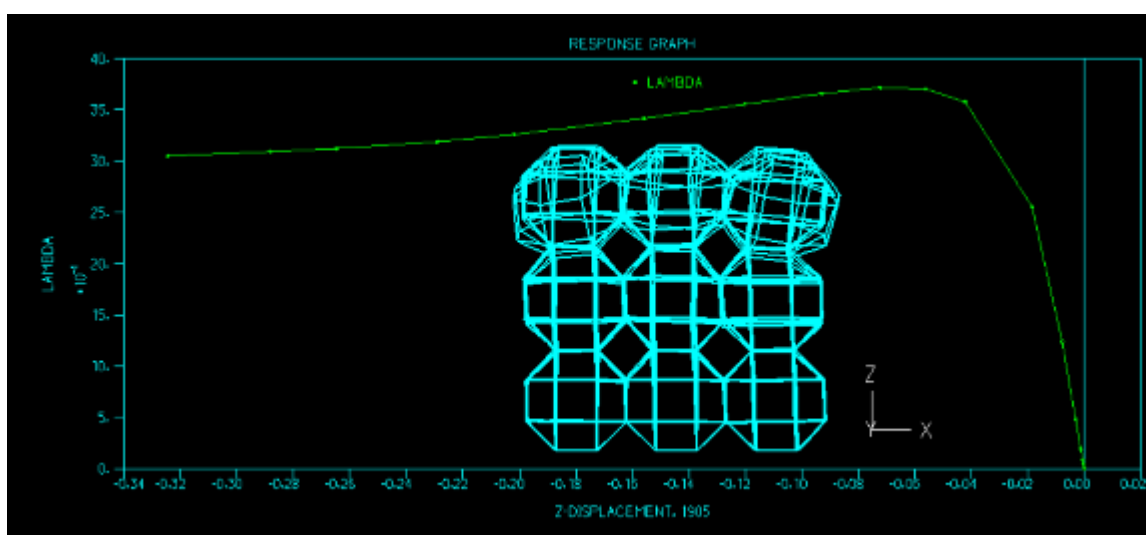


Σχήμα 4-36: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά X – Ανάλυση Β





Σχήμα 4-37: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά Y – Ανάλυση B



Σχήμα 4-38: Δρόμος ισορροπίας κόμβου 1905 κατά Z – Ανάλυση B

### 4.3 Συμπεράσματα και σχόλια

Οι μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο ακολούθησαν όσο πιο πιστά τις διαθέσιμες πηγές από ανάλογες μελέτες. Εφόσον όμως, τα δύο πλέγματα αναλύθηκαν μέσω διαφορετικά επιβαλλόμενης φόρτισης μεταξύ τους, ένας τρόπος αντιπαραβολής των αποτελεσμάτων τους είναι μέσω της σύγκρισης του μέγιστου αθροίσματος των κατακόρυφων αντιδράσεων των στηρίξεων κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Σημαντικότερη είναι η παρατήρηση ότι για το πλέγμα οκτάδας αυτό το άθροισμα είναι περίπου 60% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου. Αντίθετα, οι μέγιστες μετακινήσεις του πλέγματος οκτάδας είναι συγκριτικά μικρότερες. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είχαν κοινά σημεία αλλά και ορισμένες σημαντικές αποκλίσεις από την βιβλιογραφία. Αυτές οφείλονται μεν στους περιορισμούς της εκπαιδευτικής έκδοσης του λογισμικού που ήταν διαθέσιμο, αλλά και στην πολυπλοκότητα του προβλήματος που κατέστησαν δύσκολη την επίλυσή του με τις γνώσεις που διαθέτω. Παρόλα αυτά, η διαδικασία της μοντελοποίησης και της αντιμετώπισης των εμποδίων που προέκυψαν στην πορεία, μου παρείχαν χρήσιμα μαθήματα.



## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 Μικροπλέγματα

Κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας μελετήθηκε σε βάθος ένας νέος τύπος υλικών, ικανός να επιτρέψει την εμφάνιση εξαιρετικά ελαφριών αλλά ανθεκτικών κατασκευών. Τα ίδια υλικά σχεδιάζονται ώστε να επιτυγχάνουν σημαντική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, δίνοντάς τους τη δυνατότητα εφαρμογής και σε χώρες με αυξημένη σεισμική δραστηριότητα, όπως είναι η Ελλάδα. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχει κάνει εφικτή την ύπαρξη τέτοιων δομών μέσω της προσθετικής κατασκευής, που είναι σε θέση να δημιουργήσει εξατομικευμένες δομές και με μεγάλη ακρίβεια στην μικροκλίμακα. Κάτι τέτοιο δεν θα ήταν δυνατό με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής υλικών που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα. Οι πλεονεκτικές ιδιότητες των μικροπλεγμάτων αναλύθηκαν εκτενώς, στρέφοντας την προσοχή στην μελλοντική έρευνα που απαιτείται για την ένταξη αυτών των δομών στον χώρο της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το κόστος της διαδικασίας παραγωγής αποτελεί προς το παρόν απαγορευτικό παράγοντα για την χρήση σε κλίμακα τεχνικών έργων. Αντίθετα, η χρήση των μικροπλεγμάτων σε άλλες βιομηχανίες, όπως είναι η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία, είναι ήδη εφικτή μιας και οι διαστάσεις των ζητούμενων τμημάτων σε αυτά τα πεδία, είναι τάξεις μεγέθους μικρότερες από αυτών της βιομηχανίας των κατασκευών.

Ο χάλυβας, ένα από τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα υλικά στον τομέα των κατασκευών, έχει ως μεταλλικό υλικό την ικανότητα τήξης και επανεκτύπωσης, που του δίνει την δυνατότητα να συμμετάσχει σε διαδικασίες προσθετικής κατασκευής. Γνωρίζοντας ήδη καλά τις ιδιότητες του χάλυβα, δίνεται το πλεονέκτημα για κατασκευή πλεγμάτων που διέπονται από μια οικεία συμπεριφορά υλικού, αν και η μη γραμμικότητα του υλικού και της γεωμετρίας των μικροπλεγμάτων, είναι σημεία που απαιτούν προσεκτική μελέτη. Συγκεκριμένα για το πλέγμα οκτάδας, φαίνεται πως είναι μια πολλά υποσχόμενη δομή, αφού συνδυάζει ιδιότητες που ευνοούν τις κατασκευές από χάλυβα, κυριαρχούμενο από εφελκυσμό και παρουσιάζοντας εντυπωσιακή πλαστιμότητα κατά την θλιπτική καταπόνησή του. Από την άλλη, το πλέγμα ρομβοκυβοκτάεδρου κυριαρχείται δυσμενώς από κάμψη των ράβδων του, αλλά παρόλα αυτά είναι κι αυτό ικανό για παραλαβή σημαντικών φορτίων, διατηρώντας χαμηλή πυκνότητα και επομένως χαμηλό βάρος κατασκευής. Εντυπωσιακή είναι επίσης και η δυνατότητα που δίνεται για την κατασκευή πλεγμάτων με αυξητικό χαρακτήρα, μια ιδιότητα σχεδόν αδύνατον να βρεθεί στη φύση. Μάλιστα, η σημαντικότητά της αναδεικνύεται σε αυτήν την εργασία, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την ενσωμάτωση πλεγμάτων που συμπεριφέρονται αυξητικά σε τμήματα σκυροδέματος που καλούνται να αναλάβουν θλίψη. Τέλος, τα μικροπλέγματα πλακών χαρακτηρίζονται από την ασυναγώνιστη αποτελεσματικότητά τους στην απορρόφηση ενέργειας, που μπορεί να απαιτείται κατά τη διάρκεια ακραίων δυναμικών φορτίσεων, όπως είναι ο σεισμός. Μπορούν να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό

σεισμικών δομικών στοιχείων για να ενισχύσουν την ικανότητά τους να απορροφούν και να ανακατανέμουν τις σεισμικές δυνάμεις. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό αποσβεστήρων ή σεισμικής μόνωσης κτιρίων, για τη βελτίωση της ανθεκτικότητάς τους στον σεισμό. Γενικά, τα μικροπλέγματα επιτρέπουν την βέλτιστη χρήση και την οικονομία υλικού, αφού μέσω της προσεκτικά κατασκευασμένης δομής τους ελαχιστοποιούν την χρησιμοποιούμενη ποσότητα, θυσιάζοντας όμως πόρους για την εύρεση και υλοποίηση της καλύτερης δυνατής διάταξης των ράβδων ή πλακών που τα αποτελούν.

## 5.2 Έξυπνα Κτίρια

Με την πάροδο των χρόνων, εφευρίσκονται όλο και περισσότερες νέες τεχνολογίες που σταδιακά εγκαθιδρύονται στην καθημερινότητά μας. Μια από αυτές τις τεχνολογίες είναι και η μετατροπή των κτιρίων όπως τα γνωρίζουμε, σε έξυπνες οντότητες με νέες δυνατότητες, ανταποκρινόμενες στις εξωτερικές συνθήκες. Η επιδίωξη είναι σύγχρονες κατασκευές που δουλεύουν συνεχώς, με στόχο την βελτίωση των εσωτερικών συνθηκών τους, την μεγιστοποίηση της άνεσης των χρηστών και σημαντικότερα την στροφή σε πιο φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις, ικανές να ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό και κλιματισμό. Δεν είναι πλέον φαντασία, καθώς υπάρχουν πλέον κτίρια που καταφέρνουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και μελέτες που συνδυάζουν παράλληλα παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο πρόκειται για στατικά φωτοβολταϊκά συστήματα συνδυασμένα με εγκαταστάσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Στην ανασκόπηση που γίνεται στο κεφάλαιο 3, φαίνεται ότι αυτό είναι μόνο η αρχή, καθώς πολύ πιο εξελιγμένες προσόψεις θα επιφέρουν και τα ανάλογα αποτελέσματα. Ενώ οι κινούμενες δυναμικές προσόψεις μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η πρόκληση βρίσκεται στην ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας, με εκμετάλλευση του ηλιακού φωτός. Αυτή η τεχνολογία δεν είναι ανέφικτη αλλά βρίσκεται ακόμη σε στάδιο που απαιτεί την αντιμετώπιση αρκετών προκλήσεων, όπως η ανέγερση των ογκωδών συλλεκτών ενέργειας αλλά και της απαίτησης στενής συνεργασίας διαφορετικών κλάδων μηχανικών και τεχνιτών.

## 5.3 Μη Γραμμικές Αναλύσεις Μικροπλεγμάτων

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για δυο δοκιμαστικά πλέγματα, ένα οκτάδας και ένα ρομβοκυβοκτάεδρου, είχαν μεγάλο υπολογιστικό κόστος, καθώς η ανάλυση κατάρρευσης που εκτελέστηκε από το λογισμικό ADINA, προϋποθέτει προσεκτική μοντελοποίηση, αρκετό χρόνο και σημαντικό αποθηκευτικό χώρο. Μάλιστα, η ανάλυση του πλέγματος οκτάδας δεν κατέληξε σε αποτελέσματα ακριβώς σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αν και τηρήθηκαν όσο πιο πιστά οι παραδοχές αντίστοιχων αναλύσεων. Το πλέγμα του ρομβοκυβοκτάεδρου συμπεριφέρθηκε καλύτερα και το λογισμικό εξήγαγε δρόμους ισορροπίας που μαρτυρούν την κατάρρευσή του, με αστοχία οφειλόμενη τόσο στη μη γραμμικότητα του υλικού όσο και της γεωμετρίας. Όπως αναφέρθηκε και στο σχετικό κεφάλαιο, σημαντικότερη είναι η παρατήρηση ότι για το πλέγμα οκτάδας η μέγιστη συνολική κατακόρυφη αντίδραση στων στηρίξεων, είναι περίπου 60% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του πλέγματος ρομβοκυβοκτάεδρου. Αντίθετα, οι μέγιστες μετακινήσεις του πλέγματος οκτάδας είναι συγκριτικά μικρότερες.

## 5.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία δεν έγινε εμβάθυνση στις ενεργές προσόψεις παραγωγής ενέργειας, μια τεχνολογία με υποσχόμενη πρόοδο στον κλάδο της βιωσιμότητας στις κατασκευές. Θα ήταν χρήσιμη η περαιτέρω μελέτη των διαθέσιμων τεχνολογιών καθώς και νέες προτάσεις για την κατασκευή και εγκατάστασή τους. Αυτό προϋποθέτει γνώσεις ηλεκτρολογίας και μηχανολογίας, αλλά θα εμπλούτιζε σημαντικά το συγκεκριμένο πεδίο έρευνας καθώς και τη διαθέσιμη ελληνική βιβλιογραφία στον τομέα των Έξυπνων Προσώπων. Παράλληλα, για την μοντελοποίηση του πλέγματος οκτάδας, που δεν έφτασε σε επαρκώς ικανοποιητικά αποτελέσματα, θεωρείται σκόπιμο να γίνει η προσομοίωση ενός μεγαλύτερου

πλέγματος σε κάποιο άλλο λογισμικό ή στην κανονική έκδοση του λογισμικού ADINA, έτσι ώστε να επιτρέπεται η ανάπτυξη αρκετά μεγάλου πλήθους κόμβων. Ακόμη, η προσομοίωση με ατέλειες που προσεγγίζουν καλύτερα εκείνες που εισάγονται από την διαδικασία SLM, ενδεχομένως να δώσει ρεαλιστικότερα αποτελέσματα από τις ατέλειες με βάση τις ιδιομορφές.





## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Derveni F., Gross A.J., Peterman K.D, Gerasimidis S. (2022). "Postbuckling behavior and imperfection sensitivity of elastic-plastic periodic plate-lattice materials." *Extreme Mechanics Letters*, 50, 101510.
2. Deshpande V.S., Fleck N.A., Ashby M.F, (2001). "Effective properties of the octet-truss lattice material." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49 (8), 1747-1769.
3. Jost E.W., Moore D.G., Saldana C. (2021). "Evolution of global and local deformation in additively manufactured octet truss lattice structures." *Additive Manufacturing Letters*, 1, 100010.
4. Li Y., Pavier M., Coules H. (2021). "Compressive fatigue characteristics of octet-truss lattices in different orientations." *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(27), 6390-6402.
5. Li Y., Zhao Y., Chi Y., Hong Y., Yin J. (2021). "Shape-morphing materials and structures for energy-efficient building envelopes." *Materials Today Energy*, 22, 100874
6. Ling C., Cernicchi A., Gilchrist M., Cardiff P. (2019). "Mechanical behaviour of additively-manufactured polymeric octet-truss lattice structures under quasi-static and dynamic compressive loading." *Materials and design*, 162, 106-118.
7. Liu L., Kamm P., García-Moreno F., Banhart J., Pasini D. (2017). "Elastic and failure response of imperfect three-dimensional metallic lattices: the role of geometric defects induced by Selective Laser Melting." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 107, 160-187.
8. Schaedler T.A., Carter W.B. (2016). "Architected Cellular Materials." *Annual Reviews*, 46, 187-210.
9. Souza, Eduardo (2019). "Smart Facades: Buildings that Adapt to the Climate Through their Skin." [Fachadas Inteligentes: Edifícios adaptando-se ao clima através da pele] *ArchDaily*.
10. Tancogne-Dejean T., Spierings A., Mohr D. (2016). "Additively manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading." *Acta Materialia*, 116, 14-28.
11. Tzortzinis G., Gross A., Gerasimidis S. (2022). "Auxetic boosting of confinement in mortar by 3D reentrant truss lattices for next generation steel reinforced concrete members." *Extreme Mechanics Letters*, 52.
12. Verma S. (2023). "Everything You Need to Know About Kinetic Architecture." <https://www.novatr.com/blog/kinetic-architecture-guide> [24/10/2023].