



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ

ΝΤΑΡΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

A.M. 2018010098

ΕΠΙΒΛΕΨΗ

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, την αδερφή μου και τη γιαγιά μου για την αδιάκοπη συναισθηματική και οικονομική τους υποστήριξη τα τελευταία έξι χρόνια. Οι συμβουλές και η ενθάρρυνσή τους ήταν ανεκτίμητες στη διάρκεια αυτού του ακαδημαϊκού ταξιδιού.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
1. Επιστημονικό υπόβαθρο.....	5
1.1 Τρισδιάστατη Εκτύπωση	5
1.1.1 Ιδιότητες των υλικών.....	6
1.1.2 Επίδραση των παραμέτρων εκτύπωσης στις ιδιότητες υλικών.....	6
1.1.3 Διαφορές στις ιδιότητες των Τελικών Υλικών	7
1.2 Ελαστοπλαστική συμπεριφορά.....	8
1.3 COMSOL Multiphysics	8
2. Πειραματική Διαδικασία	9
3. Ανάλυση Δεδομένων Προσομοίωσης	11
3.1 Περιγραφή υλικού για ελαστοπλαστική ανάλυση.....	11
3.2 Καμπύλη Stress-Strain.....	12
3.2.1 Περιγραφή σχήματος καμπύλης και σημείου μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική περιοχή.....	12
3.2.2 Ανάλυση Ελαστικής Περιοχής	13
3.2.3 Ανάλυση Πλαστικής Περιοχής.....	15
4. Ελαστοπλαστική Ανάλυση Γεωμετριών στο περιβάλλον του COMSOL.....	16
4.1 Υλικά και Μέθοδοι	16
5. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	18
5.1 Μοντέλο Primitive	18
5.1.1 Primitive Scale 0.25 – 0%Cu	18
5.1.3 Primitive Scale 0.25 – 1%Cu	21
5.1.4 Primitive Scale 0.5 – 0%Cu	23
5.1.5 Primitive Scale 0.5 – 0.5%Cu	26
5.1.7 Primitive Scale 1 – 0%Cu	31
5.1.8 Primitive Scale 1 – 0.5%Cu	33
5.1.9 Primitive Scale 1 – 1%Cu	36
5.2 Μοντέλο Diamond.....	39
5.2.1 Diamond Scale 1-0%Cu.....	39
5.2.2 Diamond Scale 1-0.5%Cu.....	42
5.2.3 Diamond Scale 1-1%Cu.....	44
5.3 Μοντέλο Gyroid.....	47
5.3.1 Gyroid Scale 1-0.5%Cu.....	47
5.3.2 Gyroid Scale 1-0.5%Cu.....	50
5.3.3 Gyroid Scale 1-1%Cu.....	52

Περίληψη Αποτελεσμάτων	55
Συμπέρασμα	56
Βιβλιογραφία	57

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστίασε στην ελαστοπλαστική ανάλυση πολυμερικών υλικών ενισχυμένων με νανοσωματίδια χαλκού (Cu) σε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες: Primitive, Diamond και Gyroid. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές για τη μέτρηση των παραμορφώσεων και της απόκρισης των υλικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες φόρτισης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το COMSOL Multiphysics για την προσομοίωση της συμπεριφοράς αυτών των γεωμετριών με την ίδια σύνθεση υλικών και συνθήκες φόρτισης.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του υλικού, ειδικά σε σχέση με την τάση διαρροής, το μέτρο εφαπτομένης και την πλαστική παραμόρφωση. Ενώ η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων παρείχε μία ακριβή προσέγγιση για τη συμπεριφορά των υλικών. Υπήρχαν διαφορές στις μετατοπίσεις, με το μοντέλο Primitive να παρουσιάζει τα μεγαλύτερα σφάλματα, ενώ το Gyroid εμφάνισε τις χαμηλότερες αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα.

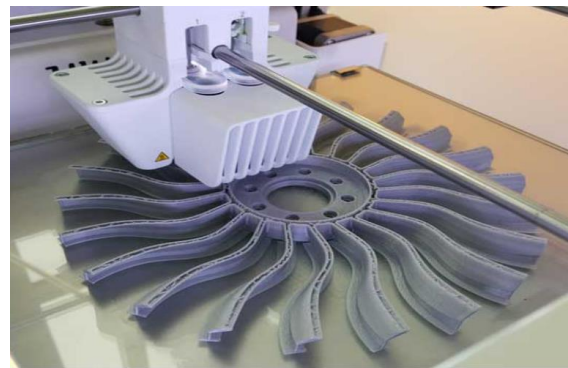
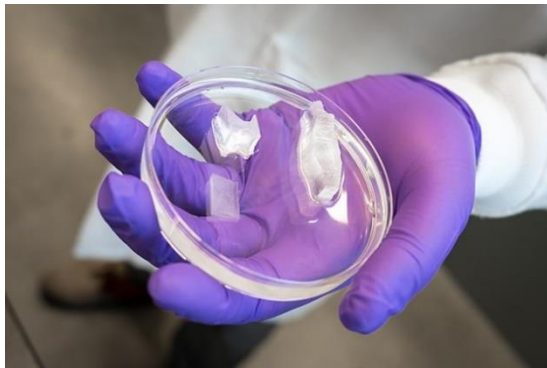
Η εργασία καταδεικνύει τη σημασία της γεωμετρίας και της σύνθεσης των υλικών στην ακρίβεια των προσομοιώσεων και υπογραμμίζει τη δυνατότητα χρήσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς υλικών σε διάφορες εφαρμογές.

1. Επιστημονικό υπόβαθρο

1.1 Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αναδειχθεί ως μια επαναστατική τεχνολογία με εκτεταμένες εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως η επιστήμη, η μηχανική, η ιατρική και η βιομηχανία. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων στρώμα με στρώμα από ένα ψηφιακό μοντέλο, χρησιμοποιώντας υλικά όπως πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά και σύνθετα υλικά. Αυτή η μέθοδος προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής, όπως η δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων γεωμετριών, η μείωση της σπατάλης υλικών και η προσαρμογή των σχεδίων με υψηλή ακρίβεια.

Η ευελιξία της 3D εκτύπωσης την έχει καταστήσει αναπόσπαστο εργαλείο στη σύγχρονη μηχανική και την επιστημονική έρευνα. Επιτρέπει τη γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων, δίνοντας τη δυνατότητα στους μηχανικούς να επαναλαμβάνουν τα σχέδια γρήγορα και να δοκιμάζουν τη λειτουργικότητά τους πριν από τη μαζική παραγωγή. Στον ιατρικό τομέα, η 3D εκτύπωση έχει επαναστατήσει την παραγωγή προσαρμοσμένων εμφυτευμάτων, προσθετικών και ακόμη και σκαλωσιών για την καλλιέργεια ιστών, προσαρμοσμένων στις συγκεκριμένες ανάγκες των ασθενών. Στη βιομηχανία της αεροδιαστημικής και των αυτοκινήτων, η 3D εκτύπωση χρησιμοποιείται για την παραγωγή ελαφρών και υψηλής αντοχής εξαρτημάτων, οδηγώντας σε βελτιωμένη κατανάλωση καυσίμου και απόδοση. (Vinod G. Gokhare, 2017)



1.1.1 (Αριστερά) Παράδειγμα χρήσης τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα της ιατρικής για την παραγωγή εμφυτευμάτων

1.1.2 (Δεξιά) Παράδειγμα χρήσης τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη δημιουργία εξαρτημάτων

Επιπλέον, η 3D εκτύπωση έχει επιτρέψει την ανάπτυξη νέων υλικών και σύνθετων υλικών με μοναδικές ιδιότητες που δεν ήταν προηγουμένως εφικτές. Με τον έλεγχο της μικροδομής και της σύνθεσης των εκτυπωμένων υλικών, οι ερευνητές μπορούν να επιτύχουν συγκεκριμένες μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις διάφορων εφαρμογών. Αυτή η δυνατότητα προσαρμογής των υλικών σε μικροκλίμακα ανοίγει νέες δυνατότητες στην επιστήμη και τη μηχανική των υλικών, επιτρέποντας τη δημιουργία λειτουργικών κλιμακωτών υλικών, μεταυλικών και άλλων προηγμένων υλικών με πρωτοφανείς δυνατότητες. (N. Shahrubudin, 2019)

1.1.1 Ιδιότητες των υλικών

Ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, οι τελικές ιδιότητες του εκτυπωμένου υλικού μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από το αρχικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία εκτύπωσης. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τις ιδιότητες του υλικού κατά την 3D εκτύπωση, όπως η θερμοκρασία εκτύπωσης, η ταχύτητα, το πάχος στρώματος και ο τύπος του εκτυπωτή που χρησιμοποιείται. Η κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση των μηχανικών, θερμικών και χημικών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος, εξασφαλίζοντας ότι πληροί τις επιθυμητές προδιαγραφές για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ένας από τους κύριους λόγους για την παραλλαγή στις ιδιότητες του υλικού είναι η αλλαγή της μικροδομής του υλικού κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Το αρχικό υλικό, συχνά με τη μορφή σκόνης, νήματος ή υγρής ρητίνης, υφίσταται μια φάση μετασχηματισμού καθώς θερμαίνεται, λιώνει και στερεοποιείται στρώμα με στρώμα. Ο ρυθμός ψύξης και οι θερμικές κλίσεις κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας μπορούν να οδηγήσουν σε παραλλαγές στην κρυσταλλικότητα, το μέγεθος των κόκκων και την κατανομή των φάσεων στο εκτυπωμένο υλικό, που με τη σειρά τους επηρεάζουν τη μηχανική αντοχή, την ελαστικότητα και την ανθεκτικότητά του. (Chunyan Feng, 2018)

Για παράδειγμα, σε διαδικασίες εκτύπωσης μετάλλων όπως η επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM) ή η τήξη με ηλεκτρονική δέσμη (EBM), οι ταχείες θερμικές και ψυκτικές κύκλοι μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό υπολειμματικών τάσεων και μικροδομικών ετερογενειών. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν ανισοτροπικές μηχανικές ιδιότητες, όπου η αντοχή και η ακαμψία του υλικού διαφέρουν ανάλογα με την κατεύθυνση του φορτίου. Παρομοίως, στην εκτύπωση πολυμερών, ο βαθμός πολυμερισμού, ο προσανατολισμός των μορίων και η παρουσία κενών ή ελαττωμάτων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις τελικές ιδιότητες του υλικού. (Necati Ucak, 2022)

1.1.2 Επίδραση των παραμέτρων εκτύπωσης στις ιδιότητες υλικών

Η θερμοκρασία στην οποία εκτυπώνεται το υλικό είναι ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τις τελικές ιδιότητες του εκτυπωμένου αντικειμένου. Για παράδειγμα, στα θερμοπλαστικά πολυμερή, η θερμοκρασία εκτύπωσης καθορίζει τον βαθμό σύντηξης μεταξύ των στρωμάτων, ο οποίος επηρεάζει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή στην κρούση του υλικού. Αν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή, τα στρώματα μπορεί να μην συνδέονται επαρκώς, με αποτέλεσμα την ασθενή συγκόλληση μεταξύ των στρωμάτων και την μειωμένη δομική ακεραιότητα. Αντιθέτως, αν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, μπορεί να προκαλέσει θερμική υποβάθμιση του πολυμερούς, μειώνοντας την μηχανική του απόδοση και αλλοιώνοντας τις χημικές του ιδιότητες.

Η ταχύτητα εκτύπωσης είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις τελικές ιδιότητες του υλικού. Μια μεγαλύτερη ταχύτητα εκτύπωσης μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή συγκόλληση μεταξύ των στρωμάτων, αυξημένη τραχύτητα της επιφάνειας και τον σχηματισμό εσωτερικών ελαττωμάτων, όπως κενά ή πορώδες. Από την άλλη, μια πιο αργή ταχύτητα εκτύπωσης επιτρέπει καλύτερη συγκόλληση των στρωμάτων και πιο ομοιόμορφη απόθεση του υλικού, αλλά μπορεί επίσης να αυξήσει την πιθανότητα συσσώρευσης

θερμικών τάσεων, που μπορεί να προκαλέσουν στρέβλωση ή παραμόρφωση του εκτυπωμένου αντικειμένου. (Manav Doshi, 2022)



Εικόνες 1.1.2.1 και 1.1.2.2 παραδείγματα σφαλμάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης

Ο τύπος του εκτυπωτή που χρησιμοποιείται παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών. Διάφορες τεχνολογίες 3D εκτύπωσης, όπως η μοντελοποίηση με εναπόθεση λιωμένου υλικού (FDM), η στερεολιθογραφία (SLA) και η συγκόλληση σε στρώματα (PBF), έχουν διαφορετικές δυνατότητες όσον αφορά την ανάλυση, την συμβατότητα με υλικά και το μέγεθος κατασκευής. Κάθε τεχνολογία έχει το δικό της σύνολο παραμέτρων διαδικασίας που πρέπει να βελτιστοποιηθούν για την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων των υλικών. Για παράδειγμα, στην τεχνολογία FDM, η διάμετρος του ακροφυσίου, ο ρυθμός εξώθησης και η θερμοκρασία της στήλης εκτύπωσης επηρεάζουν τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. (Ćwikła, 2017)

1.1.3 Διαφορές στις ιδιότητες των Τελικών Υλικών

Οι διαφορές στις ιδιότητες του αρχικού υλικού και του τελικού προϊόντος που προκύπτει από τη διαδικασία εκτύπωσης είναι ένα σημαντικό θέμα στην προσθετική κατασκευή. Το αρχικό υλικό μπορεί να έχει μια συγκεκριμένη μικροδομή, κρυσταλλικότητα και μηχανικές ιδιότητες που είναι γνωστές και τεκμηριωμένες. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, η μικροδομή του υλικού μπορεί να αλλάξει δραστικά λόγω της επεξεργασίας υψηλής θερμοκρασίας και της ταχείας στερεοποίησης, δημιουργώντας τελικά ένα υλικό με διαφορετικές ιδιότητες από τις αναμενόμενες.

Η θερμική ιστορία κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, όπως οι ρυθμοί ψύξης και οι θερμοκρασίες διατήρησης, μπορεί να επηρεάσει τη διαμόρφωση των κρυστάλλων και τη σύσταση των φάσεων. Σε πολλές περιπτώσεις, οι παραγόμενες εσωτερικές τάσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμες αλλαγές στην εσωτερική δομή του υλικού, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την ανθεκτικότητα και τη μακροχρόνια απόδοση του τελικού προϊόντος. Για παράδειγμα, στην εκτύπωση μετάλλων, η παρουσία μικρορωγμών ή πορώδους που δημιουργούνται κατά την εκτύπωση μπορεί να μειώσει σημαντικά την αντοχή στη θραύση του υλικού, ακόμη και αν οι αρχικές ιδιότητες της σκόνης ήταν άριστες.

Η κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη υλικών και διαδικασιών εκτύπωσης που μπορούν να προβλέψουν και να ελέγξουν τις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Οι προσομοιώσεις και οι πειραματικές μελέτες που συνδυάζουν διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης με τις ιδιότητες των υλικών είναι ζωτικής σημασίας για την περαιτέρω κατανόηση και βελτίωση αυτής της τεχνολογίας. (M. Manoj Prabhakar, 2021)

1.2 Ελαστοπλαστική συμπεριφορά

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά ανταποκρίνονται στην εφαρμοζόμενη τάση, συνδυάζοντας τόσο την ελαστική όσο και την πλαστική παραμόρφωση. Αρχικά, όταν ένα υλικό υπόκειται σε τάση, παραμορφώνεται ελαστικά, που σημαίνει ότι θα επιστρέψει στο αρχικό του σχήμα μόλις αφαιρεθεί η τάση. Αυτή η φάση διέπεται από το νόμο του Hooke, όπου η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης είναι γραμμική. Ωστόσο, εάν η τάση υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο που είναι γνωστό ως σημείο διαρροής, το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Σε αυτήν την πλαστική περιοχή, το υλικό υφίσταται μόνιμη παραμόρφωση ακόμη και μετά την αφαίρεση της τάσης. Η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά είναι κρίσιμη για την κατανόηση της απόδοσης των υλικών υπό διάφορες συνθήκες φόρτωσης, ειδικά σε εφαρμογές όπου είναι δυνατές τόσο προσωρινές όσο και μόνιμες παραμορφώσεις. (Rui Zou, 2016)

Η κατανόηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των υλικών είναι ζωτικής σημασίας για τις διαδικασίες μηχανικού σχεδιασμού και κατασκευής, καθώς επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την απόδοση των δομικών στοιχείων. Οι μηχανικοί πρέπει να διασφαλίζουν ότι τα υλικά μπορούν να αντέξουν λειτουργικά φορτία χωρίς να αντιμετωπίσουν καταστροφική αστοχία, η οποία συχνά συνεπάγεται παραμονή εντός της ελαστικής περιοχής κατά την κανονική χρήση. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, τα υλικά ωθούνται σκόπιμα στην πλαστική περιοχή, όπως σε διαδικασίες διαμόρφωσης ή διαμόρφωσης μετάλλων, όπου είναι επιθυμητή η ελεγχόμενη πλαστική παραμόρφωση. Η ακριβής πρόβλεψη πότε και πώς ένα υλικό θα μεταβεί από ελαστική σε πλαστική συμπεριφορά επιτρέπει τον σχεδιασμό εξαρτημάτων που μπορούν να αντέξουν τις πραγματικές συνθήκες, οδηγώντας σε πιο αποτελεσματικά και ανθεκτικά προϊόντα σε βιομηχανίες που κυμαίνονται από την αεροδιαστημική έως την αυτοκινητοβιομηχανία.

1.3 COMSOL Multiphysics

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα σύγχρονο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FEA) που έχει καθιερωθεί ως θεμέλιο στον τομέα της υπολογιστικής μοντελοποίησης. Είναι γνωστό για την ικανότητά του να επιλύει ένα ευρύ φάσμα φυσικών προβλημάτων, συνδυάζοντας διαφορετικά φυσικά φαινόμενα μέσα σε ένα ενιαίο, ολοκληρωμένο περιβάλλον. Αυτή η δυνατότητα πολλαπλής φυσικής είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη σε σύνθετα σενάρια όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ μηχανικής των κατασκευών, μεταφοράς θερμότητας, ροής υγρών και ηλεκτρομαγνητισμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα. (Zienkiewicz)

Στο πλαίσιο της μηχανικής των κατασκευών, το COMSOL είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στη μοντελοποίηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των υλικών. Η ελαστοπλαστικότητα αναφέρεται στη μελέτη των υλικών που υφίστανται μη αναστρέψιμη παραμόρφωση μετά την υπέρβαση του ορίου διαρροής. Αυτό αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στη μηχανική των υλικών και των κατασκευών, καθώς επηρεάζει άμεσα το σχεδιασμό και την ανάλυση δομών που υπόκεινται σε διάφορες συνθήκες φόρτισης. Η κατανόηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της απόδοσης των υλικών σε πραγματικές εφαρμογές, ειδικά σε τομείς όπως ο σχεδιασμός αυτοκινήτων, η αεροδιαστημική μηχανική και οι πολιτικές υποδομές.

Το COMSOL προσφέρει μια ευρεία γκάμα υλικών μοντέλων που μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια τόσο την ελαστική όσο και την πλαστική συμπεριφορά υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης. Αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν ιστροπική πλαστικότητα, όπου οι ιδιότητες του υλικού είναι ομοιόμορφες προς όλες τις κατευθύνσεις, και ανιστροπική πλαστικότητα, όπου οι ιδιότητες διαφέρουν ανάλογα με την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης. Επιπλέον, το COMSOL επιτρέπει την ενσωμάτωση προηγμένων χαρακτηριστικών πλαστικότητας, όπως η σκλήρυνση, η οποία λαμβάνει υπόψη την ενίσχυση των υλικών καθώς υφίστανται πλαστική παραμόρφωση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την απόδοση της σταδιακής εξέλιξης των ιδιοτήτων των υλικών υπό κυκλική ή διαρκή φόρτιση.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της χρήσης του COMSOL στη μοντελοποίηση ελαστοπλαστικότητας είναι η δυνατότητά του να ενσωματώνει πειραματικά δεδομένα στις προσομοιώσεις. Αυτή η ενσωμάτωση επιτρέπει στους ερευνητές να επικυρώνουν τα υπολογιστικά μοντέλα τους έναντι πραγματικών μετρήσεων, διασφαλίζοντας ότι οι προσομοιώσεις αντανakλούν με ακρίβεια τη συμπεριφορά των υλικών στον πραγματικό κόσμο. Με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα, μπορούν να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν αποκλίσεις, οδηγώντας σε πιο ακριβή και αξιόπιστα μοντέλα. Αυτή η προσέγγιση δεν βελτιώνει μόνο τις προγνωστικές δυνατότητες των μοντέλων, αλλά παρέχει και πολύτιμες πληροφορίες για την απόκριση των υλικών σε διάφορες συνθήκες φόρτισης. (Wang)

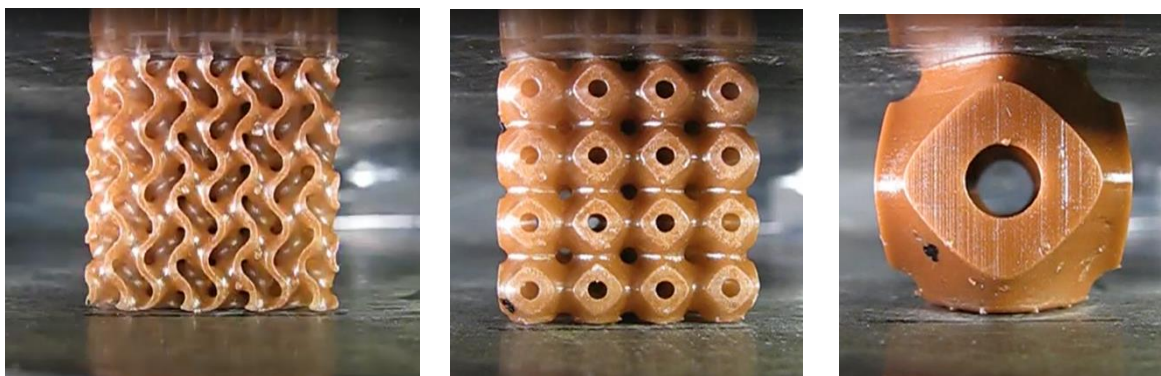
Σε αυτή τη μελέτη, το COMSOL χρησιμοποιείται για την εκτέλεση ελαστοπλαστικής ανάλυσης σε τρισδιάστατες γεωμετρίες που έχουν μετρηθεί πειραματικά για την πλαστικότητά τους. Ο στόχος είναι να συγκριθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα για να εντοπιστούν τυχόν διαφορές στη συμπεριφορά των υλικών. Αυτή η σύγκριση είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της ακρίβειας των υπολογιστικών μοντέλων και για την κατανόηση των περιορισμών των προσομοιώσεων στην πρόβλεψη της ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης θα συμβάλουν στη γενικότερη κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών υπό σύνθετες συνθήκες φόρτισης και θα βοηθήσουν στη βελτίωση του σχεδιασμού και της ανάλυσης των μηχανικών κατασκευών. (Ziqi Li, 2023)

2. Πειραματική Διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία μας δείχνει τις ενέργειες που ακολουθήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου για την απόκτηση δεδομένων τάσης-παραμόρφωσης για την ελαστοπλαστική ανάλυση νανοςύνθετων υλικών. Τα ακόλουθα δεδομένα των προσομοιώσεων καθώς και η πειραματική διαδικασία με την οποία λήφθηκαν τα δεδομένα αυτά έγινε από τους Νεκτάριος Βιδάκης, Μάρκος Πετούσης, Βασίλης Παπαδάκης και Νικόλαος Μουντάκης στο Ηράκλειο Κρήτης, Department of Mechanical Engineering - Hellenic Mediterranean University, Institute of Molecular Biology and Biotechnology - Foundation for Research and Technology.

Η μελέτη επικεντρώθηκε στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων μιας ιατρικής ρητίνης με την προσθήκη νανοσωματιδίων χαλκού (Cu). Η ρητίνη επεξεργάστηκε με χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω φωτοπολυμερισμού (VPP), και η μηχανική συμπεριφορά των παραγόμενων νανοςύνθετων υλικών χαρακτηρίστηκε μέσω εφελκυστικών και καμπτικών δοκιμών. Το βασικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια εμπορική ιατρική ρητίνη, Biomed Amber, γνωστή για τη βιοσυμβατότητά της και την καταλληλότητά της για την παραγωγή ανθεκτικών και άκαμπτων εξαρτημάτων. Στη

ρητίνη προστέθηκαν νανοσωματίδια χαλκού (Cu) σε διαφορετικές συγκεντρώσεις: 0,5 wt.% και 1,0 wt.%. Η ρητίνη και τα νανοσωματίδια χαλκού αναμίχθηκαν χρησιμοποιώντας ένα μίξερ υψηλής διάτμησης για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη διασπορά των νανοσωματιδίων στη ρητίνη. Προετοιμάστηκαν ξεχωριστά μείγματα, ένα για κάθε συγκέντρωση χαλκού και επεξεργάστηκαν στη συνέχεια με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή φωτοπολυμερισμού (VPP).

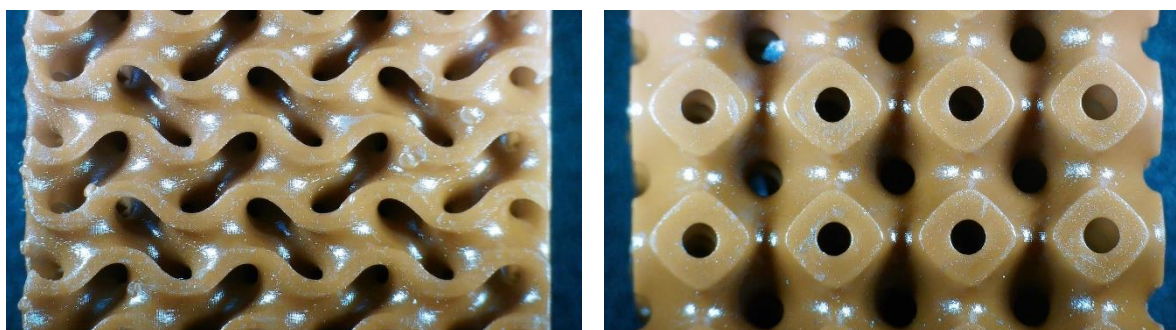


Εικόνες 2.1.1 και 2.1.2 Παραδείγματα εκτυπώσεων (Πηγή:Φωτογραφικό αρχείο της ομάδας που ανέλαβε την πειραματική διαδικασία)

Μέτρηση Δεδομένων Τάσης-Παραμόρφωσης

Εφελκυστικές - Καμπτικές Δοκιμές

Η εφελκυστική αντοχή και η επιμήκυνση των δειγμάτων μετρήθηκαν για να προσδιοριστεί πόση δύναμη μπορεί να αντέξει το υλικό πριν από την αστοχία. Για κάθε δείγμα δημιουργήθηκε η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, καταγράφοντας τη συμπεριφορά του υλικού από την ελαστική παραμόρφωση έως την πλαστική παραμόρφωση και την τελική θραύση. Η καμπτική αντοχή και η μετατόπιση μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τη διάταξη τριών σημείων. Αυτή η δοκιμή παρείχε πληροφορίες για την ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται σε καμπτικές δυνάμεις και για την έκταση της πλαστικής παραμόρφωσης πριν από την αστοχία.



Εικόνες 2.1.3, 2.1.4 και 2.1.5 Παραδείγματα εφελκυστικών και καμπτικών δοκιμών (Πηγή:Φωτογραφικό αρχείο της ομάδας που ανέλαβε την πειραματική διαδικασία)

_(Nectarios Vidakis, 2022)

Οι τιμές τάσης και παραμόρφωσης καταγράφηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας δοκιμών για τη δημιουργία καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για κάθε δείγμα. Αυτές οι καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της ελαστικής και πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού.

Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν στη συνέχεια με προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο COMSOL Multiphysics για την επικύρωση της ακρίβειας του μοντέλου FEM και για να κατανοηθεί περαιτέρω η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του υλικού. Αυτή η διάταξη επέτρεψε την ακριβή μέτρηση της τάσης και της παραμόρφωσης στα νανοσύνθετα υλικά, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για την ελαστοπλαστική ανάλυση του υλικού. Ο συνδυασμός πειραματικών δοκιμών και προσομοιώσεων FEM προσφέρει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την κατανόηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς των προηγμένων υλικών σε εφαρμογές μηχανικής.

3. Ανάλυση Δεδομένων Προσομοίωσης

3.1 Περιγραφή υλικού για ελαστοπλαστική ανάλυση

Το υλικό που αναλύθηκε στο εργαστήριο όπως αναφέρθηκε είναι ένα πολυμερές νανοσύνθετο που αποτελείται από μια βασική ρητίνη ιατρικής ποιότητας ενισχυμένη με νανοσωματίδια χαλκού (Cu). Αυτό το υλικό χρησιμοποιείται συνήθως για τη βιοσυμβατότητα και τη μηχανική του αντοχή, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για διάφορες ιατρικές και μηχανικές εφαρμογές. Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση στο περιβάλλον του COMSOL έπρεπε να βρεθούν ορισμένα χαρακτηριστικά του υλικού αυτού.

Πυκνότητα

Το υλικό έχει πυκνότητα 1220 kg/m, υποδηλώνοντας μια ελαφριά αλλά ισχυρή σύνθεση που είναι χαρακτηριστική των πολυμερών ενισχυμένων με νανοσωματίδια.

Young's Modulus

Η τιμή του Young's Modulus για αυτό το υλικό αντανακλά την ακαμψία του υλικού, υποδηλώνοντας πόσο θα παραμορφωθεί κάτω από ένα δεδομένο φορτίο στην ελαστική περιοχή πριν υποχωρήσει. Ο υπολογισμός της κλίσης εντός του αρχικού γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης θα δώσει το Young's Modulus.

Λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson είναι μια τυπική τιμή για τα πολυμερή, η οποία υποδεικνύει την αναλογία εγκάρσιας παραμόρφωσης προς αξονική τάση όταν το υλικό υποβάλλεται σε μονοαξονική τάση.

Αρχική τάση διαρροής (Initial Yield Stress)

Η αρχική τάση διαρροής του υλικού αντιπροσωπεύει την τάση στην οποία το υλικό αρχίζει να υφίσταται πλαστική (μόνιμη) παραμόρφωση. Το σημείο διαρροής θα εντοπιστεί είτε μέσω οπτικής επιθεώρησης της καμπύλης.

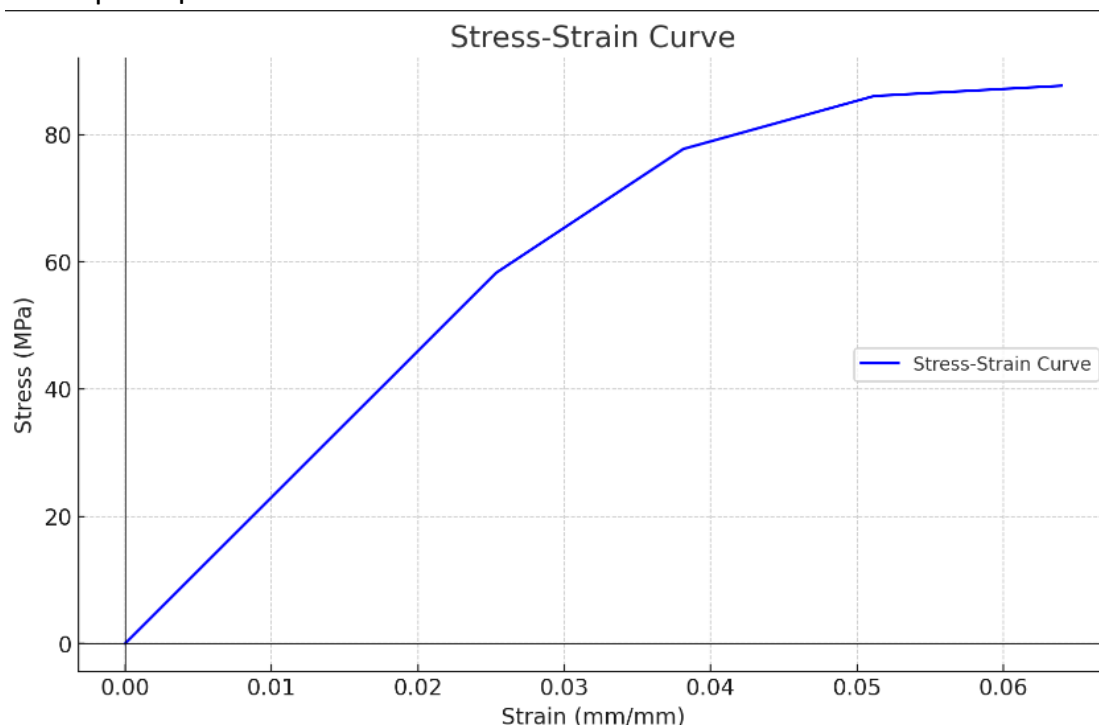
Μέτρο ιστροπικής εφαπτομένης (Isotropic Tangent Modulus)

Ο συντελεστής ιστροπικής εφαπτομένης χαρακτηρίζει την ακαμψία του υλικού κατά την πλαστική παραμόρφωση, δείχνοντας πώς η σχέση τάσης-παραμόρφωσης αλλάζει καθώς το

υλικό υποχωρεί. Στην πλαστική περιοχή μπορεί να υπολογιστεί προσδιορίζοντας την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης σε διαφορετικά σημεία μετά το σημείο διαρροής.

Αυτές οι ιδιότητες καθορίζουν την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του νανοσύνθετου πολυμερούς, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της απόδοσης του υλικού υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης. Η απόκριση του υλικού, που χαρακτηρίζεται από αυτές τις παραμέτρους, προσομοιώνεται για να προβλέψει την απόδοσή του σε πραγματικές εφαρμογές, διασφαλίζοντας ότι πληροί τις απαραίτητες απαιτήσεις αντοχής και ανθεκτικότητας.

3.2 Καμπύλη Stress-Strain



Εικόνα 3.2.1 Γραφική αναπαράσταση καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης

3.2.1 Περιγραφή σχήματος καμπύλης και σημείου μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική περιοχή

Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης παρουσιάζει μια τυπική συμπεριφορά υλικού που υφίσταται τόσο ελαστική όσο και πλαστική παραμόρφωση. Το αρχικό τμήμα της καμπύλης είναι γραμμικό, υποδεικνύοντας ελαστική συμπεριφορά, όπου το υλικό παραμορφώνεται αναλογικά με την εφαρμοζόμενη τάση και επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα όταν αφαιρεθεί το φορτίο. Αυτή η γραμμική περιοχή ακολουθείται από ένα σημείο όπου η καμπύλη αρχίζει να αποκλίνει από τη γραμμικότητα, σηματοδοτώντας τη μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά. Μετά από αυτό το σημείο, το υλικό εισέρχεται στην πλαστική περιοχή, όπου υφίσταται μόνιμη παραμόρφωση.

3.2.2 Ανάλυση Ελαστικής Περιοχής

Young's Modulus (E)

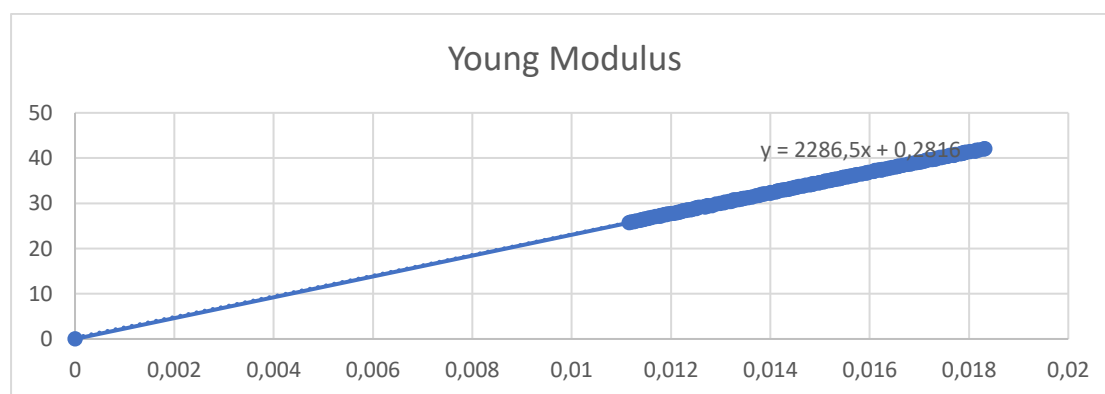
Ο συντελεστής Young's Modulus αποτελεί ένα μέτρο της ακαμψίας ενός υλικού. Ορίζεται ως η αναλογία της τάσης (σ) προς την παραμόρφωση (ε) στη γραμμική ελαστική περιοχή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης. Μαθηματικά, εκφράζεται ως:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

όπου σ είναι η τάση (δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας) και ε είναι η παραμόρφωση (παραμόρφωση ανά μονάδα μήκους).

Εύρεση του Young's Modulus με τη χρήση καμπύλης Τάσης-Παραμόρφωσης

Εφόσον έχουμε τα δεδομένα τάσης-παραμόρφωσης που αποκτήθηκαν από τη δοκιμή εφελκυσμού στο εργαστήριο μπορούμε να τα τοποθετήσουμε σε μορφή καμπύλης, με την τάση να σχεδιάζεται στον άξονα y και τη παραμόρφωση στον άξονα x . Ο συντελεστής Young's Modulus προσδιορίζεται από το αρχικό γραμμικό μέρος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, όπου το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά (δηλαδή επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα μετά την αφαίρεση του φορτίου). Η κλίση της γραμμικής περιοχής της καμπύλης είναι το Young's Modulus. Στην πράξη, αυτό γίνεται συνήθως με την εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης ή απλά επιλέγοντας δύο σημεία εντός της γραμμικής περιοχής και υπολογίζοντας την κλίση. Η ελαστική περιοχή εμφανίζεται σε χαμηλές τιμές παραμόρφωσης, πριν το όριο διαρροής του υλικού. Για τα περισσότερα υλικά, αυτό είναι σε τιμές παραμόρφωσης έως περίπου 0,01–0,02.



Εικόνα 3.2.2.1 Γραφική αναπαράσταση της ελαστικής περιοχής του υλικού.

Υπολογισμός κλίσης ευθείας

Κάθε σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί σε (ε_i, σ_i) όπου ε : stress και σ : strain. Η κλίση της καμπύλης δίνεται από τον τύπο:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Όπου Δσ: διαφορά τάσης και Δε: διαφορά παραμόρφωσης

Λήφθηκαν 3 διαφορές τιμές του Young's Modulus καθώς έχουν μετρηθεί διαφορετικές τιμές Δύναμης-Μετατόπισης και Τάσης-Παραμόρφωσης ανάλογα με την περιεκτικότητα σε χαλκό(Cu).

Model Type	0%Cu	0.5%Cu	1%Cu
Young's Modulus	2337.7	2286.5	2188.9

Πίνακας 3.2.2.1 Πίνακας εύρεσης τιμών για το συντελεστή Young's Modulus

Γραμμικότητα Καμπύλης στην Ελαστική Περιοχή

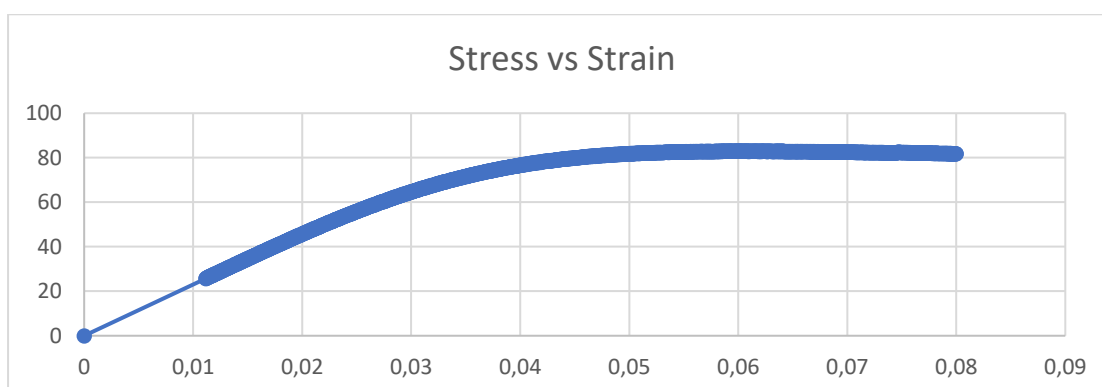
Στην ελαστική περιοχή, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης είναι γραμμική, πράγμα που σημαίνει ότι το υλικό υπακούει στον Νόμο του Hooke (η τάση είναι άμεσα ανάλογη της παραμόρφωσης). Η γραμμικότητα σε αυτή την περιοχή είναι βασικός δείκτης της ακαμψίας του υλικού, που ορίζεται από το Young's Modulus. Από το γράφημα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το αρχικό ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης επιβεβαιώνει τη γραμμική σχέση, η οποία παραμένει έγκυρη μέχρι να φτάσουμε στο σημείο διαρροής.

Initial Yield Stress

Η αρχική τάση διαρροής είναι η τάση στην οποία ένα υλικό αρχίζει να υφίσταται πλαστική παραμόρφωση. Πέρα από αυτό το σημείο, το υλικό δεν θα επιστρέψει στο αρχικό του σχήμα όταν αφαιρεθεί το φορτίο.

Εύρεση Initial Yield Stress

Στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, το σημείο διαρροής είναι εκεί όπου η καμπύλη αποκλίνει από την ευθεία και αρχίζει να εξομαλύνεται. Αυτό υποδεικνύει τη μετάβαση από ελαστική σε πλαστική συμπεριφορά. Η τάση που αντιστοιχεί σε αυτό το σημείο είναι το Initial Yield Stress.



Εικόνα 3.2.2.1 Γραφική αναπαράσταση της ελαστικής περιοχής του υλικού.

Model Type	0%Cu	0.5%Cu	1%Cu
Initial Yield Stress	80	75	74

Πίνακας 3.2.2.1 Πίνακας εύρεσης τιμών Αρχικής Τάσης Διαρροής

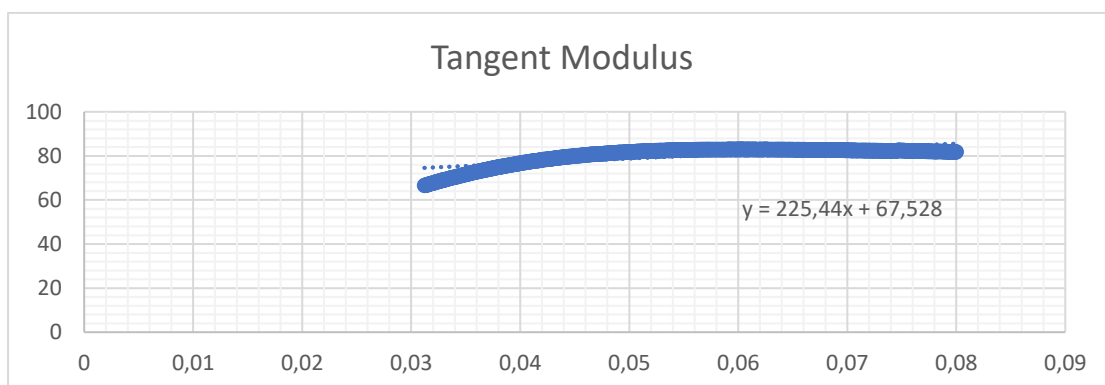
3.2.3 Ανάλυση Πλαστικής Περιοχής

Περιγραφή της Συμπεριφοράς του Υλικού στην Πλαστική Περιοχή

Στην πλαστική περιοχή, η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης γίνεται μη γραμμική. Το υλικό συνεχίζει να παραμορφώνεται υπό την επίδραση της τάσης, αλλά αυτή η παραμόρφωση είναι μόνιμη και δεν ανακάμπτει όταν αφαιρεθεί το φορτίο. Το σχήμα της καμπύλης σε αυτή την περιοχή παρέχει πληροφορίες για τη συμπεριφορά ενίσχυσης της παραμόρφωσης (strain hardening) του υλικού. Μετά τη διαρροή, η καμπύλη συνεχίζει να ανεβαίνει, αν και με μειωμένη κλίση σε σχέση με την ελαστική περιοχή. Αυτό υποδηλώνει strain hardening, όπου το υλικό γίνεται ισχυρότερο και πιο ανθεκτικό σε περαιτέρω παραμόρφωση καθώς παραμορφώνεται. Η ανοδική τάση στην καμπύλη υποδηλώνει ότι το υλικό μπορεί να αντέξει επιπλέον τάση, ακόμη και στην πλαστική περιοχή, πριν φτάσει σε τελική αστοχία. Η ικανότητα παραμόρφωσης των υλικών είναι κρίσιμη σε πολλές εφαρμογές καθώς αυξάνει την ικανότητα του υλικού να αντέχει φορτία. Ωστόσο, υπερβολική ενίσχυση μπορεί να οδηγήσει σε ευθραυστότητα, κάνοντας το υλικό επιρρεπές σε αιφνίδια αστοχία.

Isotropic Tangent Modulus

Ο συντελεστής Tangent Modulus αντιπροσωπεύει την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στην πλαστική περιοχή, όπου το υλικό δεν παραμορφώνεται πλέον ελαστικά αλλά πλαστικά. Δείχνει την ακαμψία του υλικού μετά τη διαρροή και κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης. Σε οποιοδήποτε σημείο εντός της πλαστικής περιοχής, ο σχεδιασμός μιας εφαπτόμενης γραμμής στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και ο υπολογισμός της κλίσης αυτής της εφαπτόμενης γραμμής μπορεί να δώσει το συντελεστή Tangent Modulus. Ο συντελεστής αυτός συνήθως μειώνεται καθώς το υλικό υφίσταται περισσότερη πλαστική παραμόρφωση.



Εικόνα 3.2.3.1 Γραφική αναπαράσταση της πλαστικής περιοχής του υλικού.

Model Type	0%Cu	0.5%Cu	1%Cu
Tangent Modulus (MPa)	234.25	225.44	219.31

Πίνακας 3.2.3.1 Πίνακας εύρεσης τιμών *Isotropic Tangent Modulus*

4. Ελαστοπλαστική Ανάλυση Γεωμετριών στο περιβάλλον του COMSOL

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει την ελαστοπλαστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε τρεις διακριτές γεωμετρίες με μεταβαλλόμενες συνθέσεις Χαλκού (Cu) και κλίμακες. Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της μελέτης ήταν να κατανοηθεί η επίδραση της περιεκτικότητας σε Cu στις μηχανικές ιδιότητες αυτών των γεωμετριών υπό διαφορετικές συνθήκες κλιμάκωσης. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός πειραματικών και προσομοιωτικών προσεγγίσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στην ενσωμάτωση των πειραματικών δεδομένων στο COMSOL Multiphysics για ακριβή μοντελοποίηση.

4.1 Υλικά και Μέθοδοι

Γεωμετρίες και Συνθέσεις Χαλκού

Επιλέχθηκαν τρεις διακριτές γεωμετρίες για τη μελέτη αυτή, καθεμία από τις οποίες αντιπροσώπευε μια διαφορετική διαμόρφωση που υποβλήθηκε σε ελαστοπλαστική ανάλυση. Οι γεωμετρίες αυτές σχεδιάστηκαν συστηματικά ώστε να ενσωματώνουν διάφορα ποσοστά Χαλκού (Cu), με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδραση διαφορετικών επιπέδων ενίσχυσης Cu στις μηχανικές ιδιότητες. Οι γεωμετρίες και οι αντίστοιχες συνθέσεις Cu ήταν οι εξής:

- Γεωμετρία Gyroid: X% Cu
- Γεωμετρία Primitive: Y% Cu
- Γεωμετρία Diamond: Z% Cu

Κάθε μια από τις γεωμετρίες αντιστοιχεί σε τρία ποσοστά Χαλκού (Cu) τα οποία είναι [X=0%, Y=0.5%, Z=1%]. Ο σχεδιασμός της κάθε γεωμετρίας είχε στόχο να καταγράψει την απόκριση του υλικού υπό συνθήκες που αναπαριστούν πιθανές εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο.

Κλιμάκωση (Scale) Γεωμετριών

Η μελέτη περιελάμβανε μια προσέγγιση κλιμάκωσης για κάθε γεωμετρία, προκειμένου να αξιολογηθεί ο αντίκτυπος του μεγέθους στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Εφαρμόζοντας διαφορετικούς παράγοντες κλιμάκωσης [0.25, 0.5, 1.0] στους αρχικούς σχεδιασμούς, η ανάλυση μπόρεσε να λάβει υπόψη τις διαφοροποιήσεις στην απόδοση του υλικού λόγω της κλιμάκωσης των γεωμετριών, κάτι που είναι κρίσιμο σε εφαρμογές όπου εξαρτήματα διαφορετικών μεγεθών υποβάλλονται σε παρόμοιες συνθήκες φόρτισης.

Αρχεία STL και Δημιουργία Πλέγματος για την Προσομοίωση στο COMSOL

Για κάθε συνδυασμό γεωμετρίας και σύνθεσης Cu, δημιουργήθηκε ένα αρχείο STL. Αυτά τα αρχεία STL αντιπροσωπεύουν τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από την πειραματική διάταξη, διασφαλίζοντας ότι οι προσομοιώσεις αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τα φυσικά αντίστοιχα που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές. Τα αρχεία STL εισήχθησαν στο COMSOL Multiphysics, όπου δημιουργήθηκαν πλέγματα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων κατάλληλων για προσομοίωση. Η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος ήταν κρίσιμη για να διασφαλιστεί ότι οι γεωμετρίες αναπαραστάθηκαν με επαρκή λεπτομέρεια ώστε να καταγραφούν οι ιδιότητες της ελαστοπλαστικής τους συμπεριφοράς.

Ελαστοπλαστική Ανάλυση στο COMSOL

Τα προετοιμασμένα πλέγματα χρησιμοποιήθηκαν στο COMSOL για την εκτέλεση ελαστοπλαστικών προσομοιώσεων. Οι ιδιότητες των υλικών, όπως η αντοχή στη διαρροή, το μέτρο ελαστικότητας του Young και ο λόγος του Poisson, εισήχθησαν με βάση τα πειραματικά δεδομένα που παρέχονται στο συνοδευτικό αρχείο Excel. Η προετοιμασία της προσομοίωσης περιλάμβανε την εφαρμογή κατάλληλων οριακών συνθηκών και σεναρίων φόρτισης που αναπαράγουν τις συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στα φυσικά πειράματα. Ο στόχος των προσομοιώσεων στο COMSOL ήταν να προβλέψουν την απόκριση τάσης-παραμόρφωσης κάθε γεωμετρίας και σύνθεσης υπό εφαρμοζόμενα φορτία, επιβεβαιώνοντας έτσι τα πειραματικά αποτελέσματα.

Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)

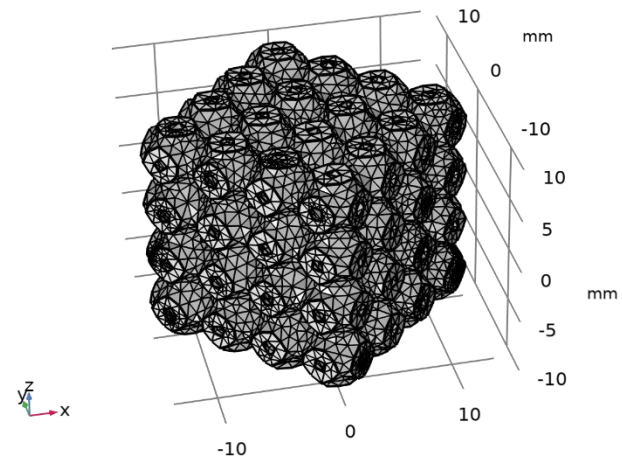
Οι γεωμετρίες στο COMSOL, οι οποίες έχουν όλες τη μορφή κύβου, υποβλήθηκαν σε κατάλληλες οριακές συνθήκες για να προσομοιωθεί η ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, το κάτω μέρος κάθε κύβου δεσμεύτηκε ώστε να μην επιτρέπεται καμία μετατόπιση (σταθερή σύσφιξη), προσομοιώνοντας μια κατάσταση όπου το κάτω μέρος του υλικού είναι πλήρως περιορισμένο. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε μια δύναμη στο αντίθετο, άνω μέρος του κύβου, προσομοιώνοντας έτσι τη φόρτιση που το υλικό θα υφίσταται στην κορυφή. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την ακριβή αναπαράσταση της συμπεριφοράς του υλικού υπό συνθήκες συμπίεσης, με την κάτω πλευρά να παραμένει σταθερή και την επάνω πλευρά να υφίσταται εφαρμογή δύναμης.

5. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Εκατέρωθεν θα παρουσιαστούν όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων των προσομοιώσεων που πάρθηκαν από το COMSOL χωρισμένα ανά γεωμετρία (Primitive, Diamond, Gyroid).

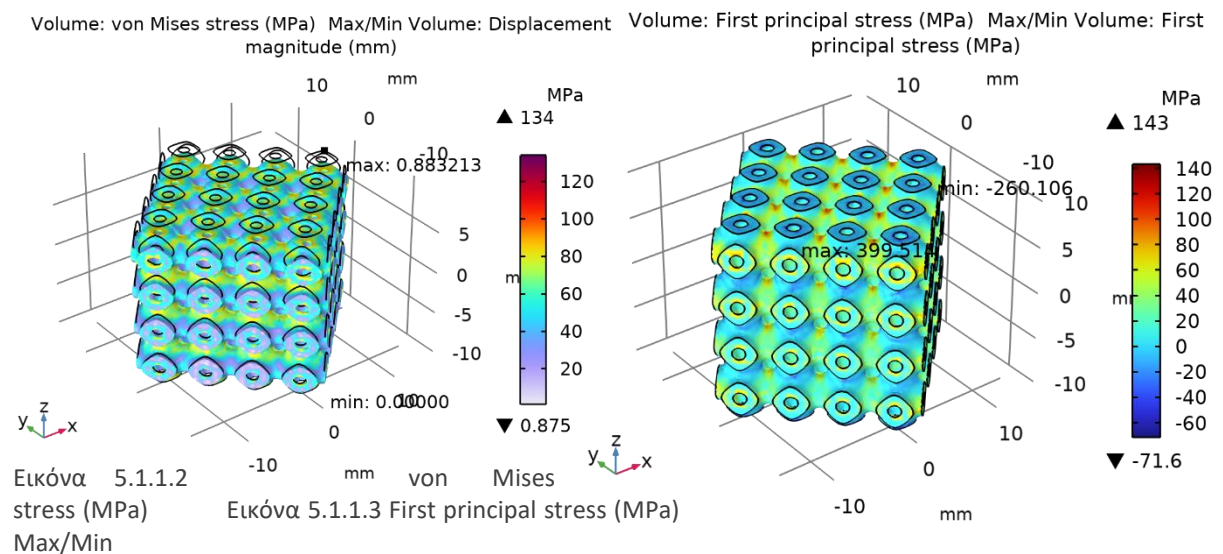
5.1 Μοντέλο Primitive

5.1.1 Primitive Scale 0.25 – 0%Cu



Εικόνα 5.1.1.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 0.25 – 0%Cu με τη μορφή Mesh

Stress



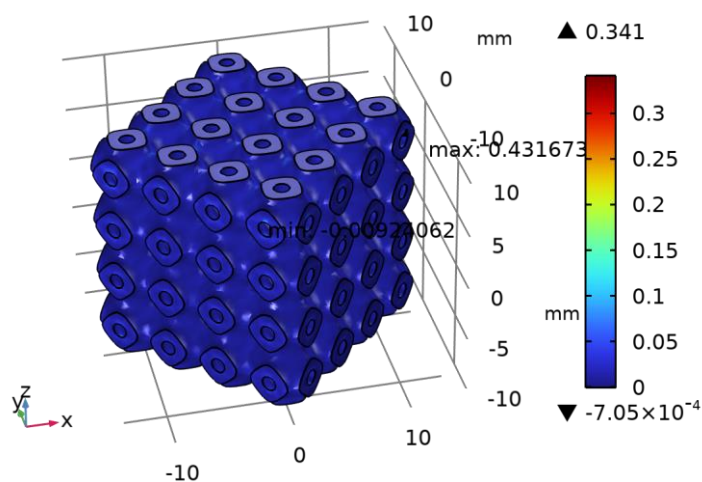
Στο γράφημα της Εικόνας 5.1.1.2 παρατηρούμε τις τάσεις με μέγιστη τιμή 399.51 MPa και ελάχιστη -260.11 MPa. Αυτό υποδεικνύει ότι το υλικό υπόκειται σε σημαντικές παραμορφώσεις στις περιοχές μέγιστης τάσης.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
11.95	2.1916	7.1913	-260.11
-4.8382	2.121	5.8983	399.51

Πίνακας 5.1.1.1 Max/min Stress volume

Strain

Volume: First principal strain (1) Max/Min Volume: First principal strain (1)



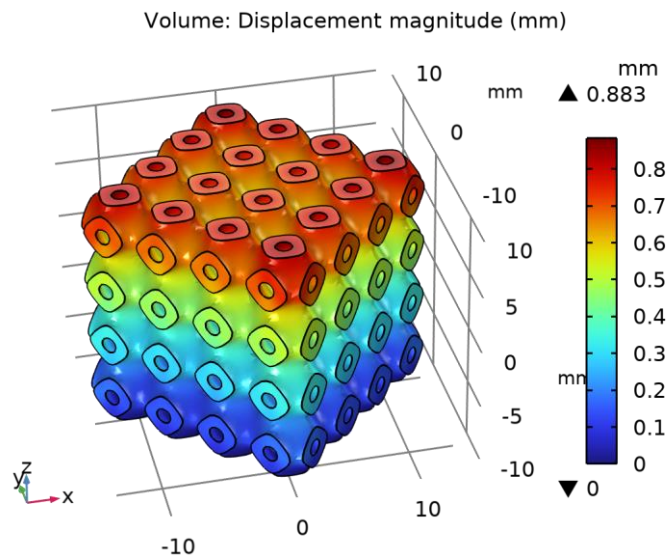
Εικόνα 5.1.1.4 First principal strain

Στην Εικόνα 5.1.1.4 παρουσιάζεται η πρώτη κύρια παραμόρφωση με μέγιστη τιμή 0.43167 και ελάχιστη -0.0092406. Οι περιοχές με υψηλές τιμές παραμόρφωσης υποδηλώνουν αυξημένη παραμόρφωση του υλικού.

X	Y	Z	First principal strain (1)
-1.3499	-1.2826	2.2453	-0.0092406
12.484	-1.6169	8.1548	0.43167

Πίνακας 5.1.1.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.1.1.5 Displacement magnitude (mm)

Η Εικόνα 5.1.1.5 δείχνει το μέτρο της μετατόπισης με μέγιστη τιμή 0.88321 mm και ελάχιστη 0 mm. Οι μετατοπίσεις υποδεικνύουν τη συνολική μετακίνηση του υλικού υπό την επίδραση των φορτίων.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
0.24572	-11.642	-10	0
11.268	0.12241	10	0.88321

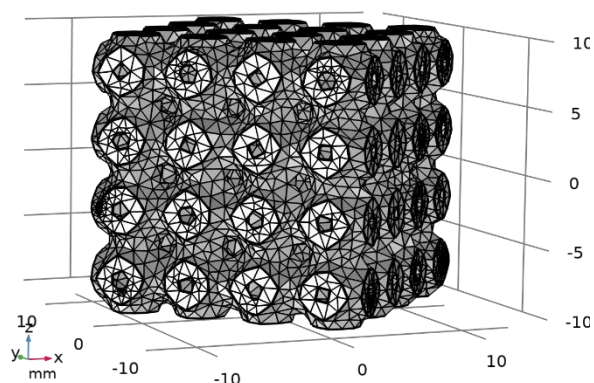
Πίνακας 5.1.1.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-4,005922	0,834	0,789	5,4%
-4,353912	0,921	0,883	4,1%
-4,598652	0,988	0,966	2,2%
-4,800906	1,046	1,05	-0,4%
-5,001782	1,116	1,17	-4,8%

Πίνακας 5.1.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

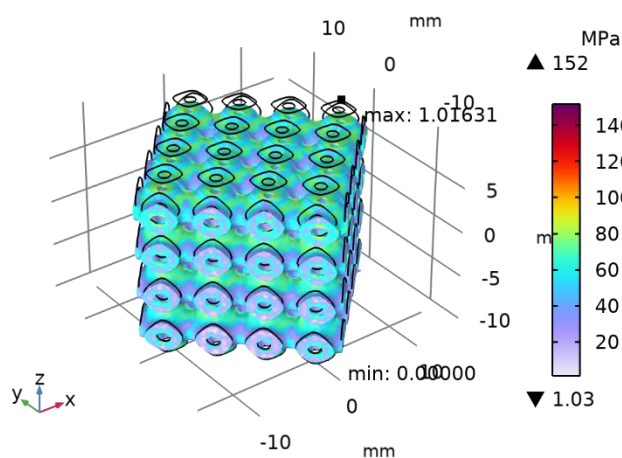
5.1.3 Primitive Scale 0.25 – 1%Cu



Εικόνα 5.1.3.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 0.25 – 1%Cu με τη μορφή Mesh

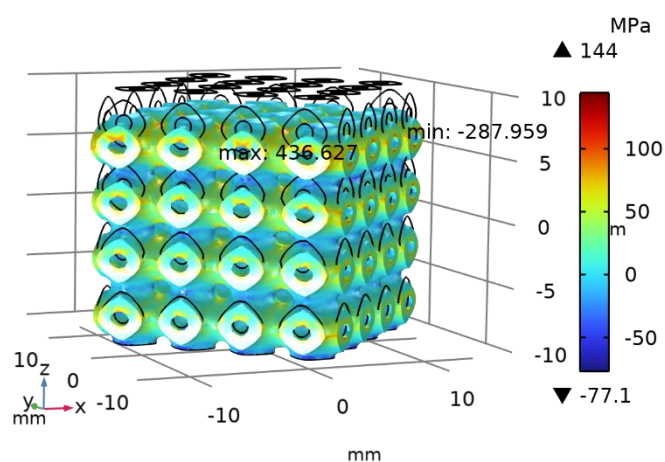
Stress

Volume: von Mises stress (MPa) Max/Min Volume: Displacement magnitude (mm)



Εικόνα 5.1.3.2 von Mises stress (MPa)

Volume: First principal stress (MPa) Max/Min Volume: First principal stress (MPa)



Εικόνα 5.1.3.3 First principal stress (MPa) Max/Min

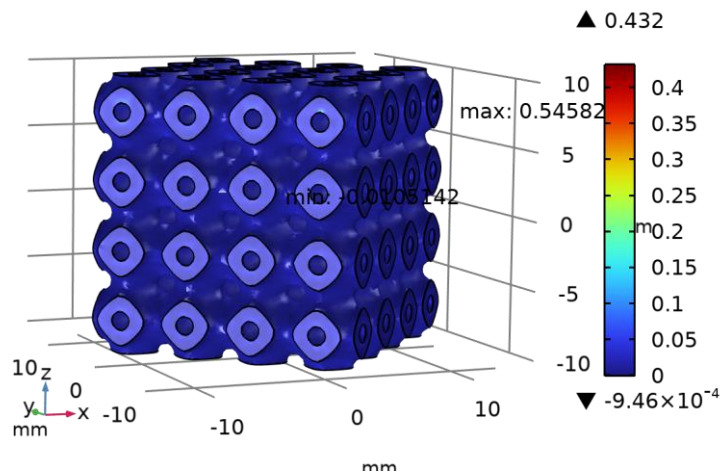
Στο γράφημα της Εικόνας 5.1.3.2 παρατηρούμε τις τάσεις von Mises με μέγιστη τιμή 436.63 MPa και ελάχιστη -287.96 MPa. Αυτό δείχνει ότι οι περιοχές υψηλής τάσης ενδέχεται να είναι πιο επιρρεπείς σε ρήξη.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
11.95	2.1916	7.1913	-287.96
-4.8382	2.121	5.8983	436.63

Πίνακας 5.1.3.1 Max/min Stress volume

Strain

Volume: First principal strain (1) Max/Min Volume: First principal strain (1)



Εικόνα 5.1.3.4 First principal strain

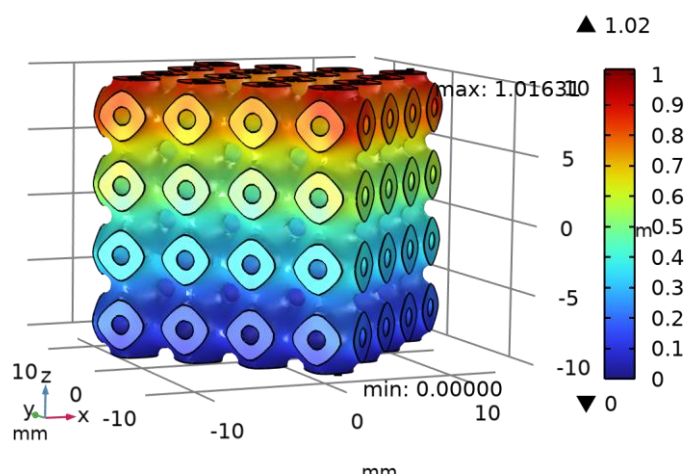
Η πρώτη κύρια παραμόρφωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.3.4 με μέγιστη τιμή 0.54583 και ελάχιστη -0.010514. Αυτές οι τιμές παραπέμπουν σε σημαντική παραμόρφωση του υλικού σε συγκεκριμένες περιοχές.

X	Y	Z	First principal strain (1)
-1.3499	-1.2826	2.2453	-0.010514
12.484	-1.6169	8.1548	0.54583

Πίνακας 5.1.3.2 Max/min Strain volume

Displacement

Volume: Displacement magnitude (mm) Max/Min Volume: Displacement magnitude (mm)



Εικόνα 5.1.3.5 Displacement magnitude (mm)

Στην Εικόνα 5.1.3.5 το μέτρο της μετατόπισης φτάνει τα 1.0163 mm ως μέγιστη τιμή και 0 mm ως ελάχιστη. Οι μετατοπίσεις δείχνουν τη μετακίνηση της δομής λόγω της εφαρμογής των φορτίων.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
0.24572	-11.642	-10	0
11.268	0.12241	10	1.0163

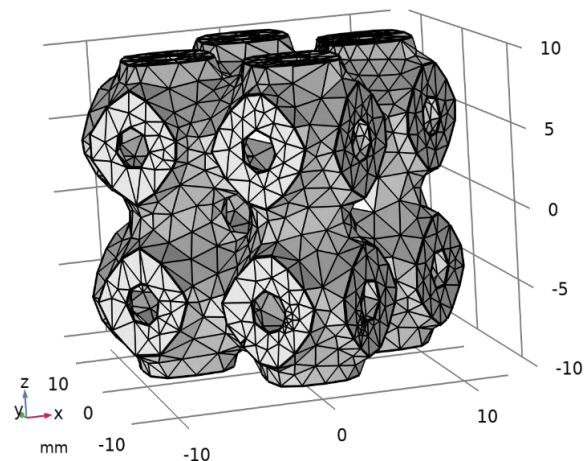
Πίνακας 5.1.1.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-4,400921	0,956	1,016	-6,3%
-4,09906	0,8840001	0,894	-1,1%
-3,900962	0,841	0,832	1,1%
-3,757199	0,8100001	0,791	2,3%
-3,502034	0,759	0,726	4,3%
-3,303395	0,721	0,678	6,0%

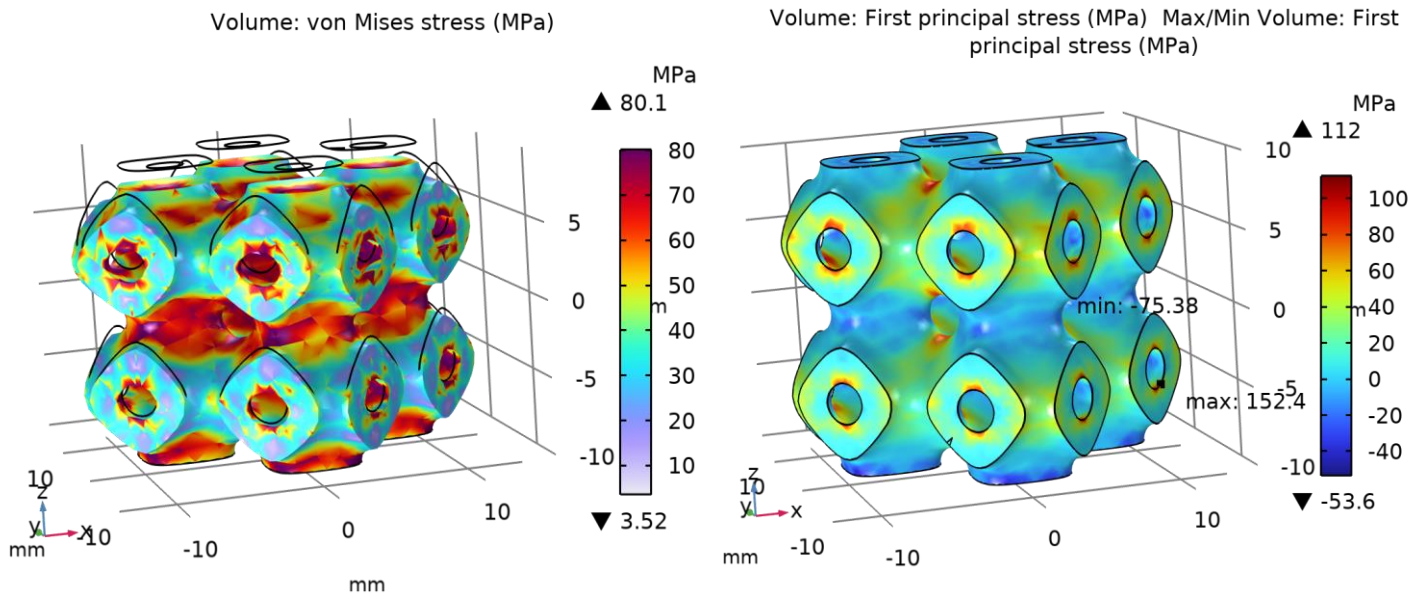
Πίνακας 5.1.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.1.4 Primitive Scale 0.5 – 0%Cu



Εικόνα 5.1.4.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 0.5 – 0%Cu με τη μορφή Mesh

Stress



Εικόνα 5.1.4.2 von Mises stress (MPa)

Εικόνα 5.1.4.3 First principal stress (MPa) Max/Min

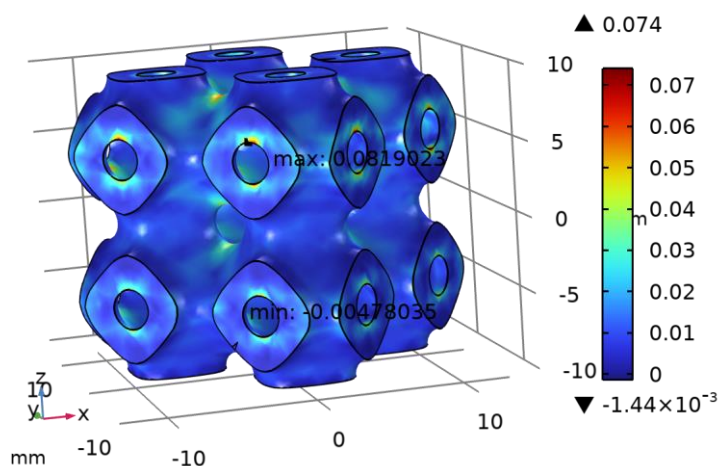
Η Εικόνα 5.1.4.2 δείχνει τις τάσεις von Mises με μέγιστη τιμή 152.43 MPa και ελάχιστη -75.38 MPa. Οι περιοχές με τις υψηλότερες τάσεις μπορεί να είναι πιο ευάλωτες σε αστοχία.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
5.5538	3.0439	-0.063307	-75.38
11.072	-3.0701	-6.1644	152.43

Πίνακας 5.1.4.1 Max/min Stress volume

Strain

Volume: First principal strain (1) Max/Min Volume: First principal strain (1)



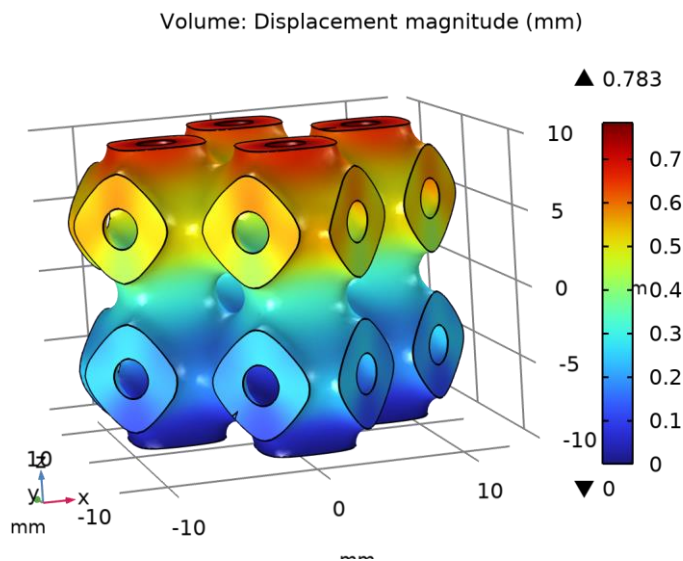
Εικόνα 5.1.4.4 First principal strain

Η πρώτη κύρια παραμόρφωση απεικονίζεται στην Εικόνα 5.1.4.4, όπου η μέγιστη τιμή είναι 0.081902 και η ελάχιστη -0.0047803. Η μεγάλη παραμόρφωση σε ορισμένες περιοχές υποδεικνύει πιθανή πλαστική παραμόρφωση.

X	Y	Z	First principal strain (1)
-2.7551	2.9652	-5.9527	-0.0047803
-3.5927	-10.549	6.3622	0.081902

Πίνακας 5.1.4.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.1.4.5 Displacement magnitude (mm)

Η Εικόνα 5.1.4.5 δείχνει ότι η μέγιστη μετατόπιση είναι 0.78294 mm και η ελάχιστη 0 mm. Αυτό υποδεικνύει την κίνηση της δομής υπό φορτία.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
-2.3131	9.8448	-10	0
0.6647	-8.2448	10	0.78294

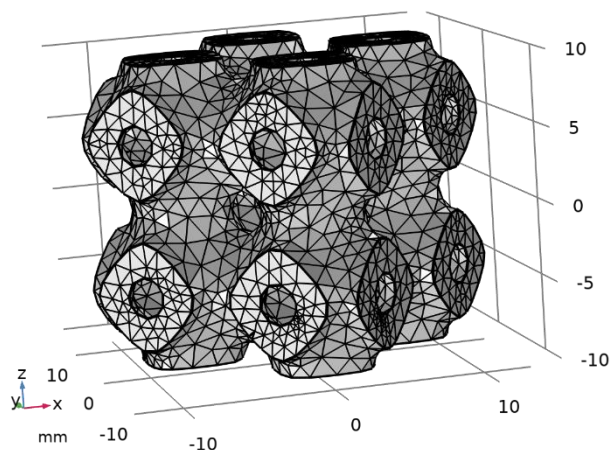
Πίνακας 5.1.4.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-2,908934	0,647	0,621	4,0%
-2,602358	0,5880001	0,55	6,5%
-3,300472	0,727	0,716	1,5%
-3,555106	0,78	0,783	-0,4%
-3,781051	0,828	0,848	-2,4%

Πίνακας 5.1.4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

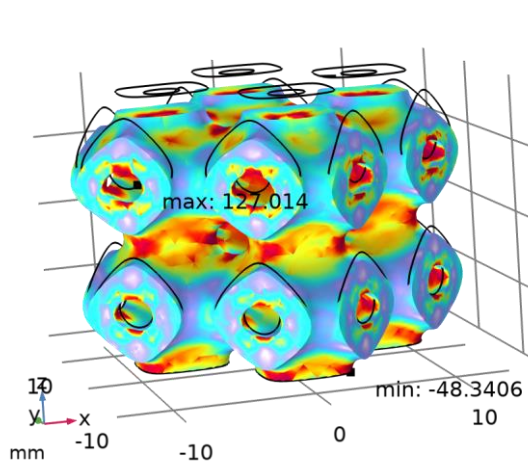
5.1.5 Primitive Scale 0.5 – 0.5%Cu



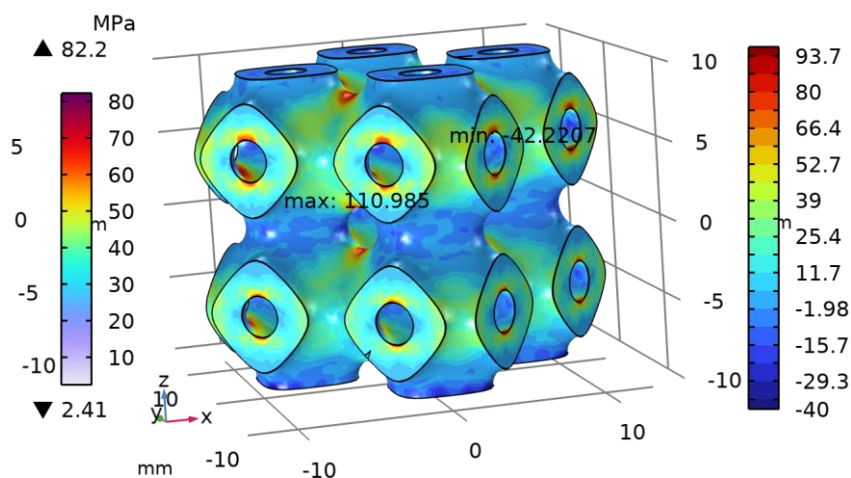
Εικόνα 5.1.5.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 0.5 – 0.5%Cu με τη μορφή Mesh

Stress

Volume: von Mises stress (MPa) Max/Min Volume: First principal stress (MPa) Contour: First principal stress (MPa) Max/Min Volume: First principal stress (MPa)



Εικόνα 5.1.5.2 von Mises stress (MPa)



Εικόνα 5.1.5.3 First principal stress (MPa) Max/Min

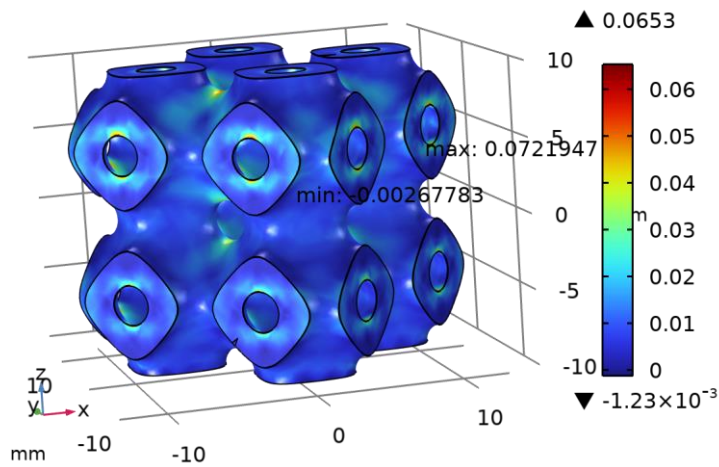
X	Y	Z	First principal stress (MPa)
4.0948	8.8814	4.9058	-42.221
-9.9468	-3.0829	3.4132	110.98

Πίνακας 5.1.5.1 Max/min Stress volume

Η Εικόνα 5.1.5.2 δείχνει τις τάσεις von Mises με μέγιστη τιμή 110.98 MPa και ελάχιστη -42.221 MPa. Οι περιοχές με τις υψηλότερες τάσεις μπορεί να είναι πιο ευάλωτες σε αστοχία.

Strain

Volume: First principal strain (1) Max/Min Volume: First principal strain (1)



Εικόνα 5.1.5.4 First principal strain

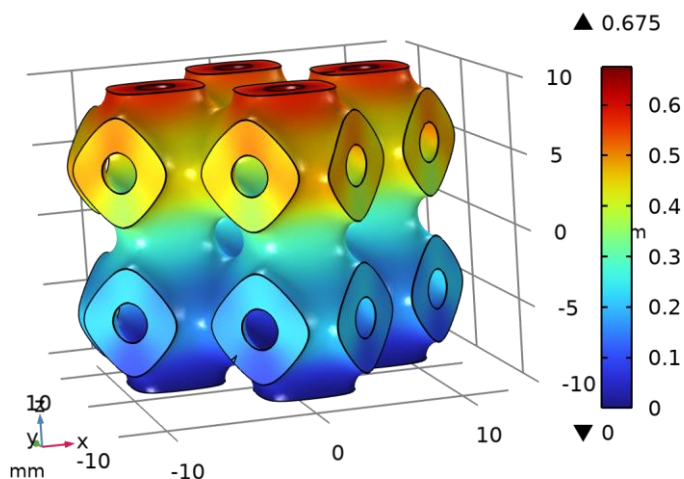
Η πρώτη κύρια παραμόρφωση απεικονίζεται στην Εικόνα 5.1.5.4, όπου η μέγιστη τιμή είναι 0.072195 και η ελάχιστη -0.0026778. Η μεγάλη παραμόρφωση σε ορισμένες περιοχές υποδεικνύει πιθανή πλαστική παραμόρφωση.

X	Y	Z	First principal strain (1)
2.2793	7.9024	0.71723	-0.0026778
10.561	3.5807	3.6377	0.072195

Πίνακας 5.1.5.2 Max/min Strain volume

Displacement

Volume: Displacement magnitude (mm)



Εικόνα 5.1.5.5 Displacement magnitude (mm)

Η Εικόνα 5.1.5.5 δείχνει ότι η μέγιστη μετατόπιση είναι 0.6749 mm και η ελάχιστη 0 mm. Αυτό υποδεικνύει την κίνηση της δομής υπό φορτία.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
-1.6431	-10.084	-9.9998	0
-7.9931	0.97426	10	0.6749

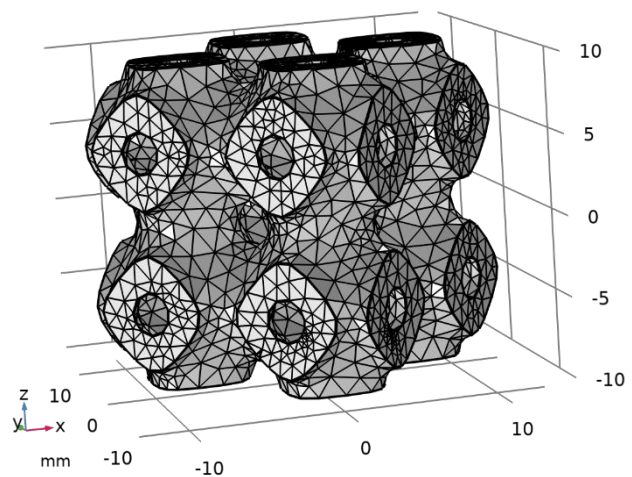
Πίνακας 5.1.5.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-3,001701	0,721	0,675	6,4%
-3,480095	0,845	0,807	4,5%
-3,723933	0,915	0,885	3,3%
-3,903756	0,976	0,951	2,6%
-4,146257	1,068	1,06	0,7%
-4,158969	1,066	1,07	-0,4%

Πίνακας 5.1.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

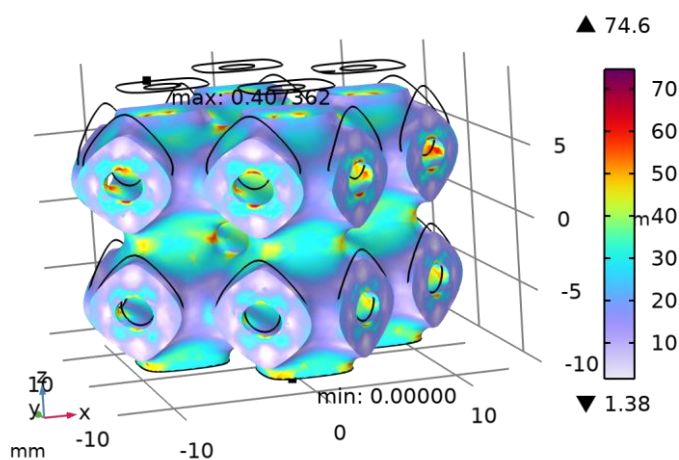
5.1.6 Primitive Scale 0.5 – 1%Cu



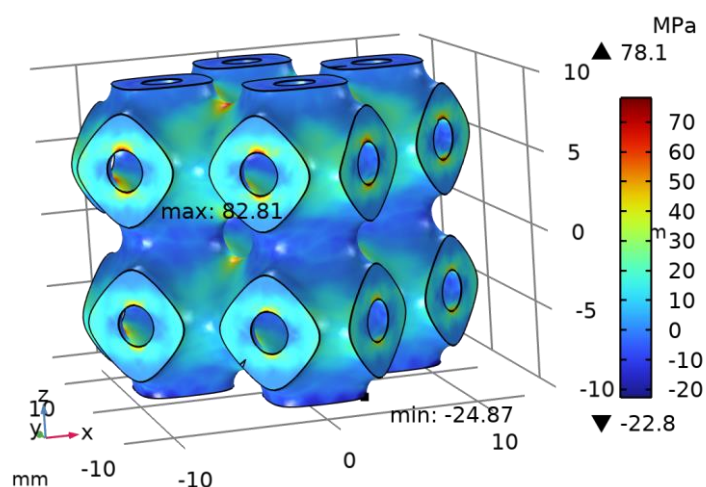
Εικόνα 5.1.6.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηρηστικων Scale 0. 5 – 1%Cu με τη μορφή Mesh

Stress

Volume: von Mises stress (MPa) Max/Min Volume: Displacement magnitude (mm)



Volume: First principal stress (MPa) Max/Min Volume: First principal stress (MPa)



Εικόνα 5.1.6.2 von Mises stress (MPa)

Εικόνα 5.1.6.3 First principal stress (MPa) Max/Min

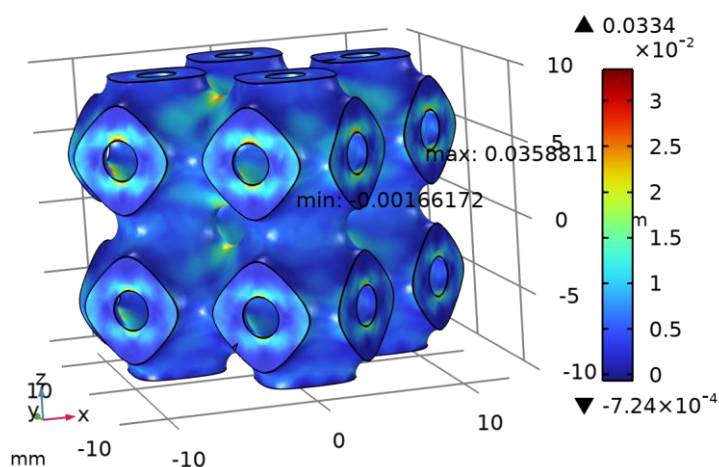
Η Εικόνα 5.1.6.2 απεικονίζει τις τάσεις von Mises με μέγιστη τιμή 82.808 MPa και ελάχιστη -24.868 MPa. Οι χαμηλότερες τάσεις υποδεικνύουν ότι η δομή είναι λιγότερο επιβαρυνμένη σε αυτές τις περιοχές.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
2.6414	-9.5643	-9.9999	-24.868
-9.9468	-3.0829	3.4132	82.808

Πίνακας 5.1.6.1 Max/min Stress volume

Strain

Volume: First principal strain (1) Max/Min Volume: First principal strain (1)



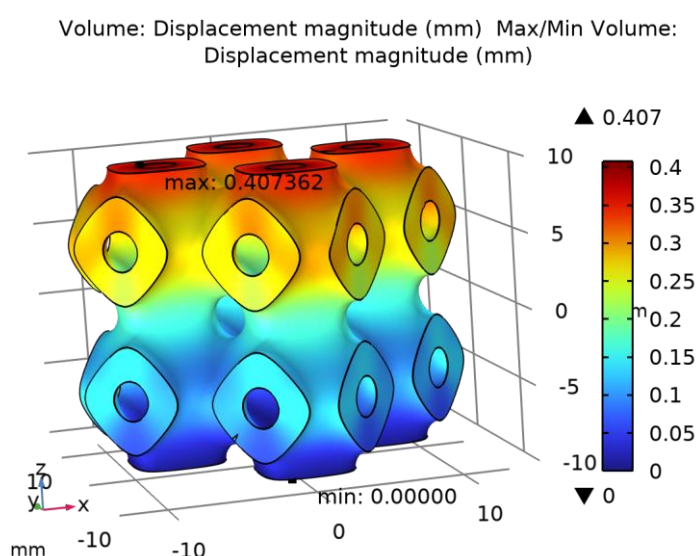
Εικόνα 5.1.6.4 First principal strain

Η πρώτη κύρια παραμόρφωση στην Εικόνα 5.1.6.4 παρουσιάζει μέγιστη τιμή 82.808 και ελάχιστη -24.868. Αυτό δείχνει μεγάλες παραμορφώσεις που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε μόνιμη παραμόρφωση.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
2.6414	-9.5643	-9.9999	-24.868
-9.9468	-3.0829	3.4132	82.808

Πίνακας 5.1.6.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.1.6.5 Displacement magnitude (mm)

Η μέγιστη μετατόπιση της Εικόνας 5.1.6.5 είναι 0.40736 mm και η ελάχιστη 0 mm, υποδεικνύοντας τη συνολική κίνηση της δομής.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
-1.6431	-10.084	-9.9998	0
-7.9931	0.97426	10	0.40736

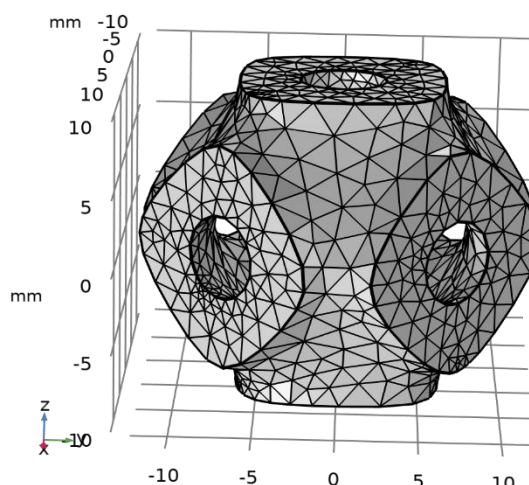
Πίνακας 5.1.6.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-1,400227	0,329	0,312	5,2%
-1,506366	0,349	0,337	3,4%
-1,805903	0,407	0,407	0,0%
-2,250171	0,497	0,515	-3,6%
-2,498457	0,545	0,577	-5,9%

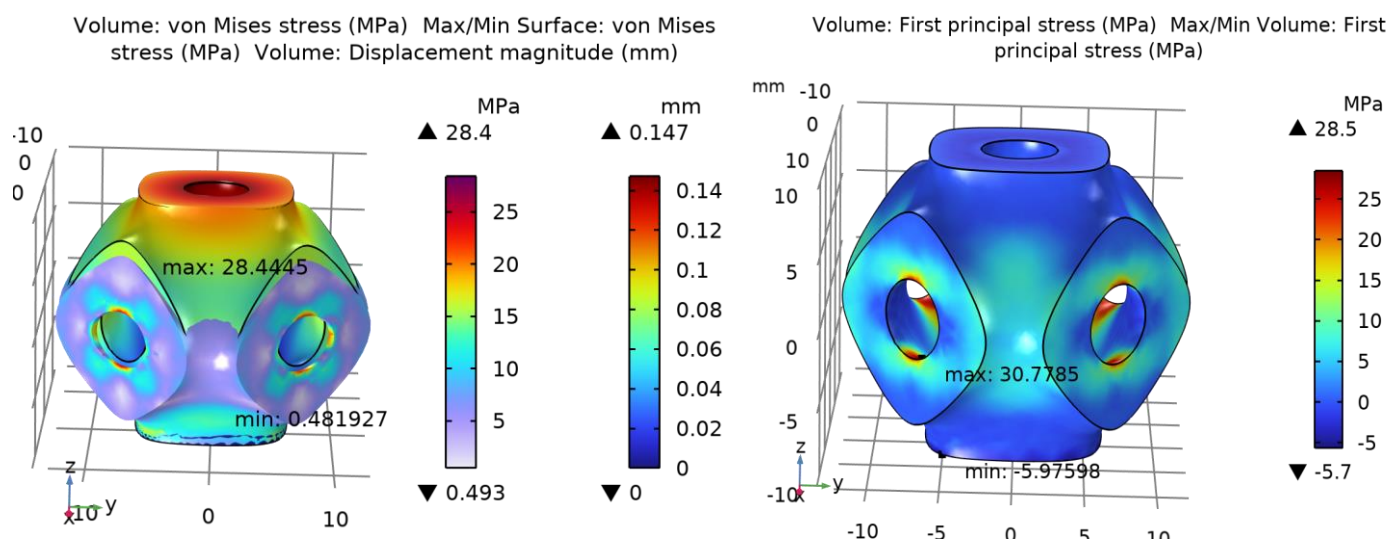
Πίνακας 5.1.6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.1.7 Primitive Scale 1 – 0%Cu



Εικόνα 5.1.7.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 1 – 0%Cu με τη μορφή Mesh

Stress



Εικόνα 5.1.7.2 von Mises stress (MPa)

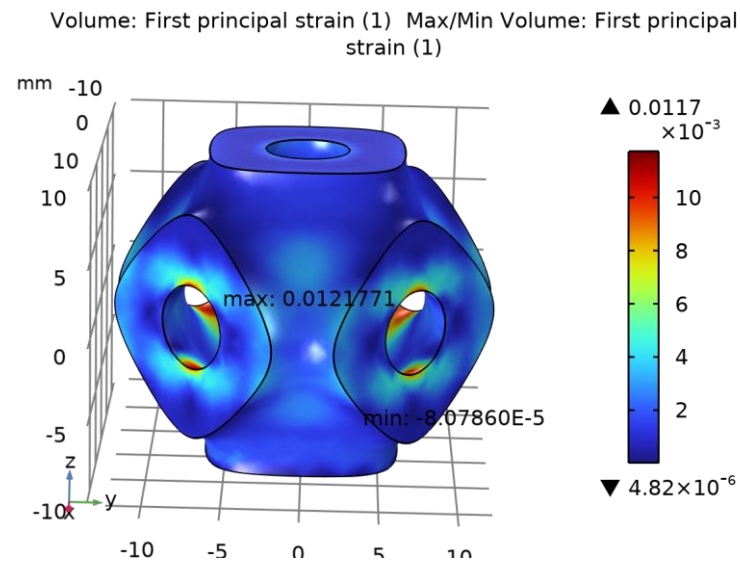
Εικόνα 5.1.7.3 First principal stress (MPa) Max/Min

Στην εικόνα 5.1.7.2 παρουσιάζεται η τάση von Mises, ενώ στην εικόνα 5.1.7.3 παρουσιάζεται η πρώτη κύρια τάση (First principal stress). Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.1.7.1, η μέγιστη τιμή της πρώτης κύριας τάσης είναι 30.779 MPa και η ελάχιστη -5.976 MPa. Η τιμή αυτή δείχνει τη μέγιστη αντοχή του υλικού υπό τις εφαρμοζόμενες συνθήκες φόρτισης.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
5.3364	-4.9417	-10	-5.976
6.5759	-6.4146	-2.8537	30.779

Πίνακας 5.1.7.1 Max/min Stress volume

Strain



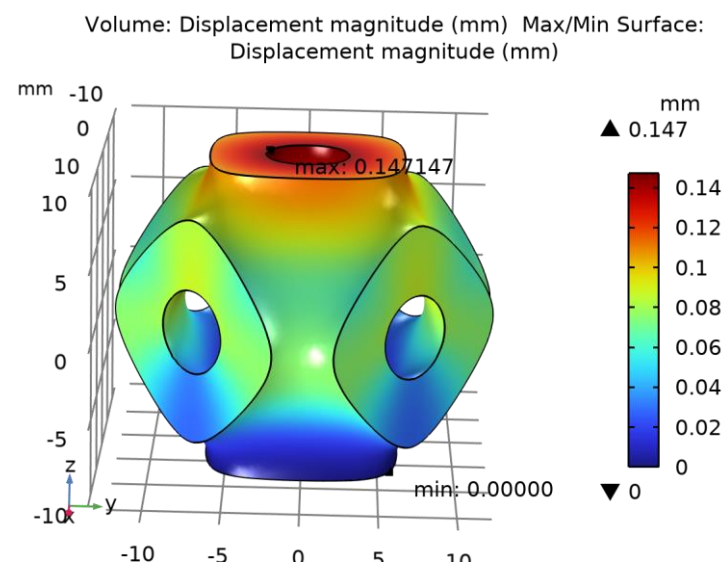
Εικόνα 5.1.7.4 First principal strain

Στην εικόνα 5.1.7.4 απεικονίζεται η πρώτη κύρια παραμόρφωση. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1.7.2, η μέγιστη τιμή της είναι 0.012177 και η ελάχιστη είναι -8.0786E-5. Αυτό υποδηλώνει την έκταση της παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό υπό την εφαρμογή της τάσης.

X	Y	Z	First principal strain (1)
-4.3177	2.4044	-8.3283	-8.0786E-5
6.4368	-6.6879	2.8184	0.012177

Πίνακας 5.1.7.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.1.7.5 Displacement magnitude (mm)

Στην εικόνα 5.1.7.5 παρουσιάζεται το μέτρο της μετατόπισης. Από τον Πίνακα 5.1.7.3, η μέγιστη τιμή της μετατόπισης είναι 0.14715 mm. Αυτό δείχνει τη μέγιστη αλλαγή στη θέση του υλικού λόγω των εφαρμοζόμενων φορτίων.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
4.2314	5.7573	-10	0
-1.1026	-2.4623	10	0.14715

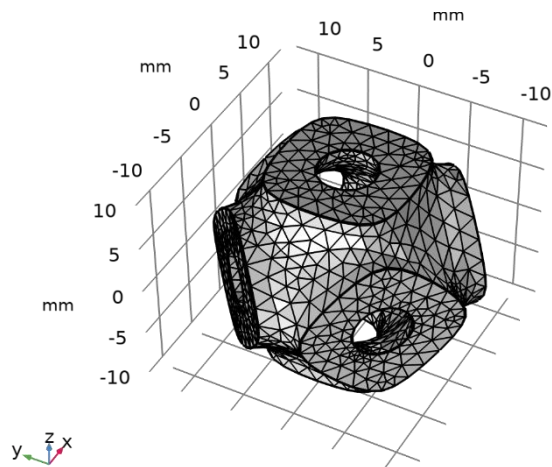
Πίνακας 5.1.7.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-0,3822881	0,105	0,0999	4,9%
-0,3962097	0,107	0,104	2,8%
-0,4165309	0,111	0,109	1,8%
-0,4990153	0,128	0,131	-2,3%
-0,5596783	0,141	0,147	-4,3%
-0,6004902	0,151	0,158	-4,6%

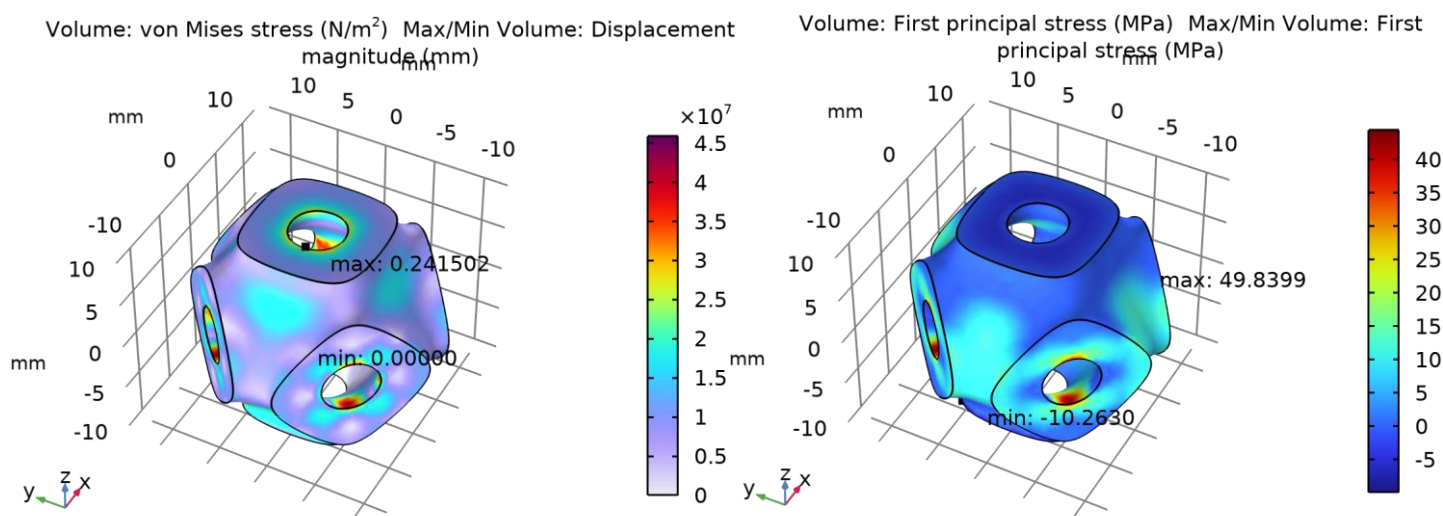
Πίνακας 5.1.7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.1.8 Primitive Scale 1 – 0.5%Cu



Εικόνα 5.1.8.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικων Scale 1 – 0.5%Cu με τη μορφή Mesh

Stress



Εικόνα 5.1.8.2 von Mises stress (MPa)

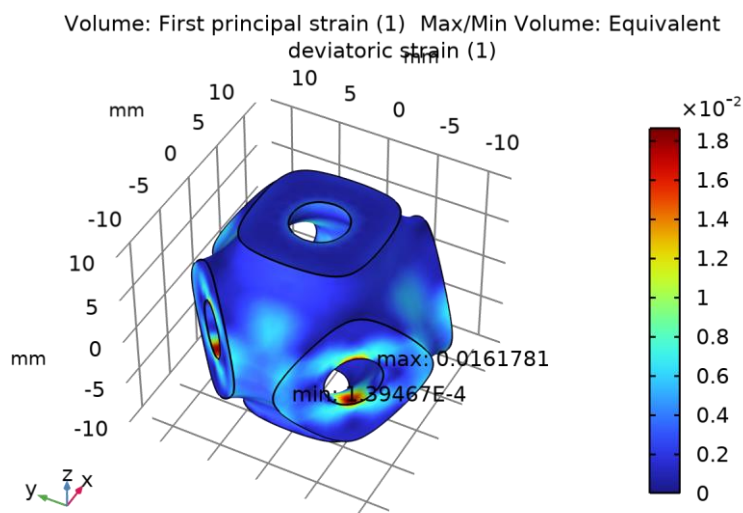
Εικόνα 5.1.8.3 First principal stress (MPa) Max/Min

Στην εικόνα 5.1.8.2 παρουσιάζεται η τάση von Mises, ενώ στην εικόνα 5.1.8.3 παρουσιάζεται η πρώτη κύρια τάση (First principal stress). Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1.8.1, η μέγιστη τιμή της πρώτης κύριας τάσης είναι 111.36 MPa και η ελάχιστη είναι -39.314 MPa.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
-8.3337	4.0985	0.25468	-39.314
6.5438	-6.4274	2.857	111.36

Πίνακας 5.1.8.1 Max/min Stress volume

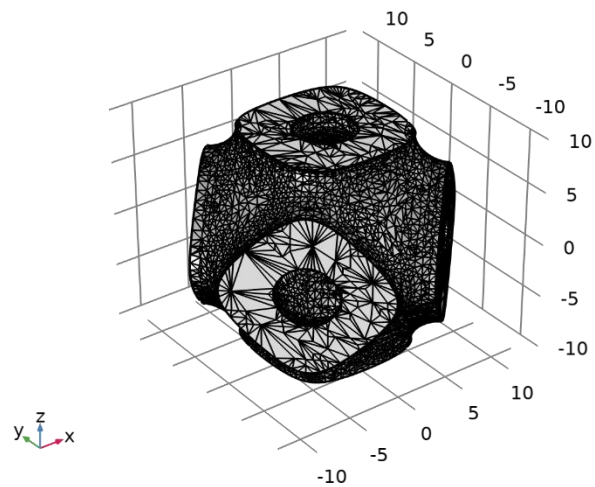
Strain



Εικόνα 5.1.8.4 First principal strain

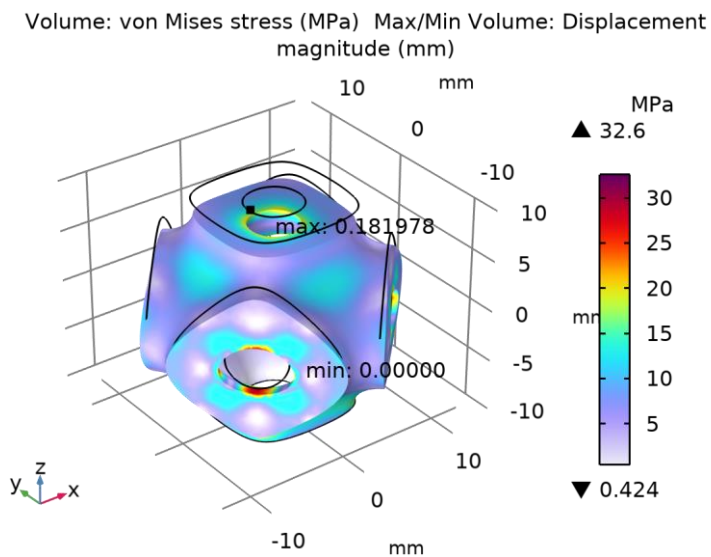
Στην εικόνα 5.1.8.4 απεικονίζεται η πρώτη κύρια παραμόρφωση. Οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ -3.119E-4 και 0.043346 σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1.8.2.

5.1.9 Primitive Scale 1 – 1%Cu

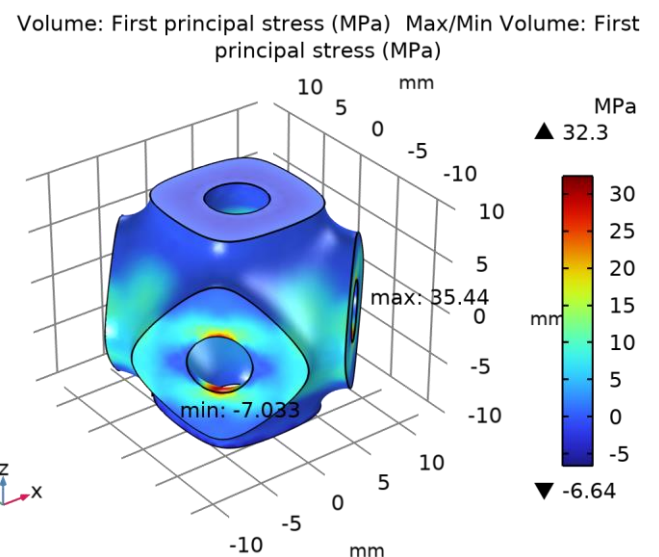


Εικόνα 5.1.9.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 1 – 1%Cu με τη μορφή Mesh

Stress



Εικόνα 5.1.9.2 von Mises stress (MPa)



Εικόνα 5.1.9.3 First principal stress (MPa) Max/Min

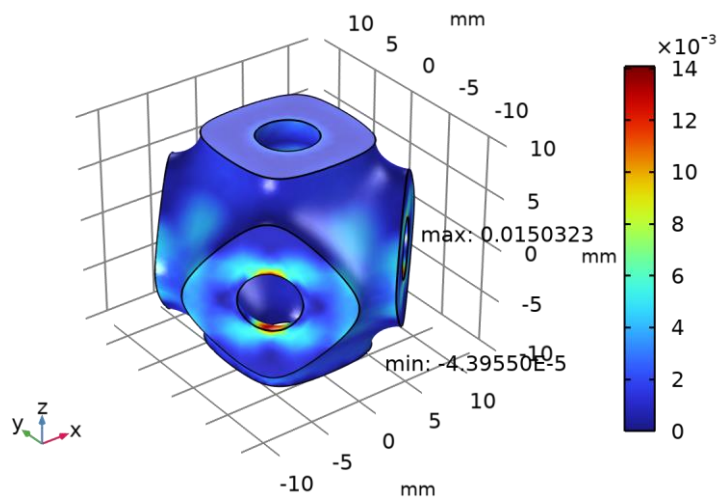
Στην εικόνα 5.1.9.2 παρουσιάζεται η τάση von Mises και η πρώτη κύρια τάση στην εικόνα 5.1.9.3. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1.9.1, η μέγιστη τιμή της πρώτης κύριας τάσης είναι 35.437 MPa και η ελάχιστη είναι -7.0333 MPa.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
-4.9419	5.3361	-10	-7.0333
6.5438	-6.4274	2.857	35.437

Πίνακας 5.1.9.1 Max/min Stress volume

Strain

Volume: First principal strain (1) Max/Min Volume: First principal strain (1)



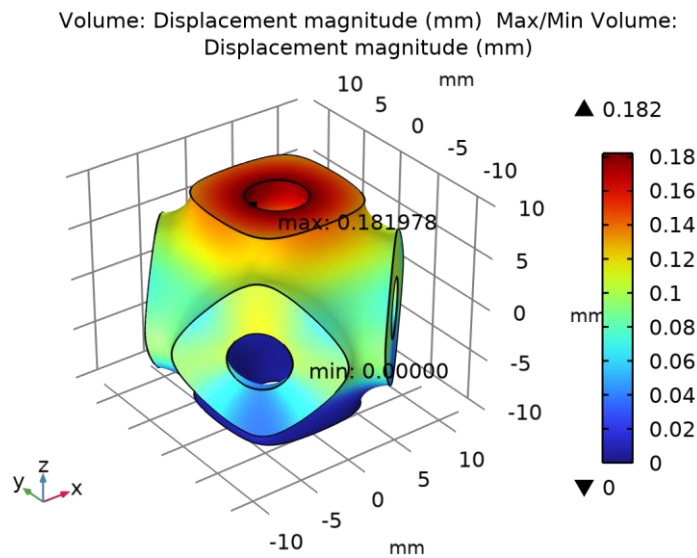
Εικόνα 5.1.9.4 Max/min volume

Η πρώτη κύρια παραμόρφωση φαίνεται στην εικόνα 5.1.9.4, με μέγιστη τιμή 0.015032 και ελάχιστη -4.3955E-5 σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1.9.2.

X	Y	Z	First principal strain (1)
4.3187	-4.6639	-10	-4.3955E-5
6.5438	-6.4274	2.857	0.015032

Πίνακας 5.1.9.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.1.9.5 Displacement magnitude (mm)

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
4.8615	5.383	-10	0
-2.667	-0.21615	10	0.18198

Πίνακας 5.1.9.3 Max/min Displacement volume

Η μέγιστη μετατόπιση, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 5.1.9.5, είναι 0.18198 mm σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1.9.3.

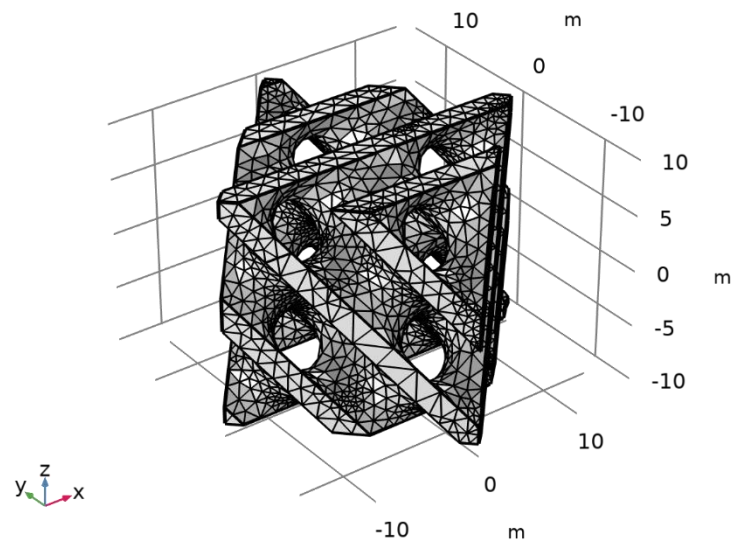
Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-0,5270016	0,157	0,149	5,1%
-0,6026122	0,173	0,17	1,7%
-0,6425787	0,183	0,182	0,5%
-0,7002885	0,194	0,199	-2,6%
-0,7974668	0,214	0,227	-6,1%

Πίνακας 5.1.9.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.2 Μοντέλο Diamond

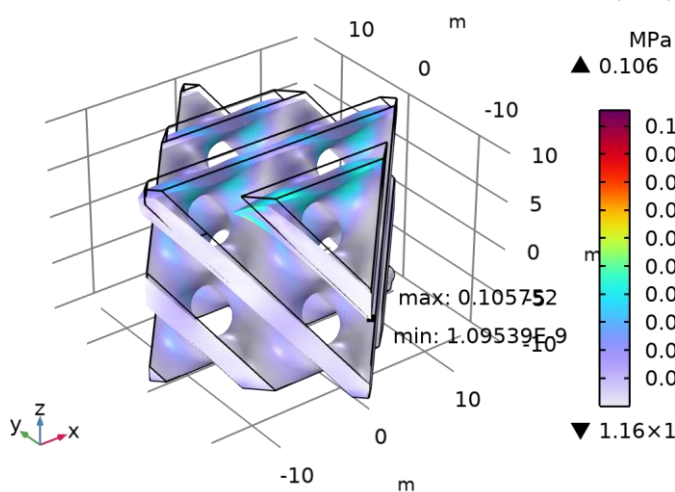
5.2.1 Diamond Scale 1-0%Cu



Εικόνα 5.2.1.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 1 – 0%Cu με τη μορφή Mesh

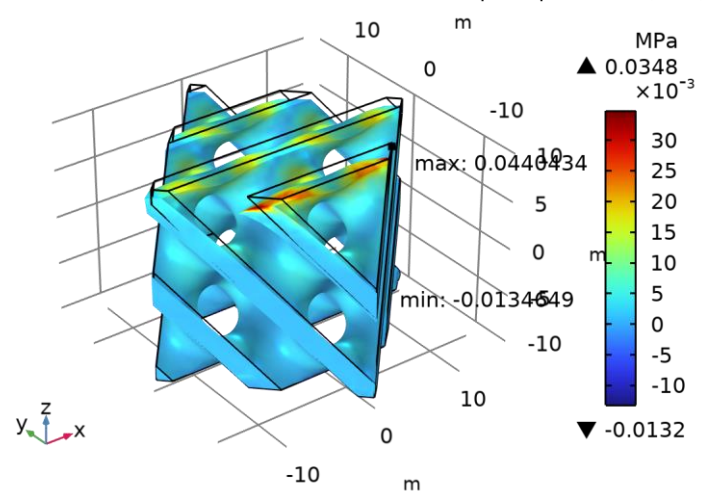
Stress

ExpF(26)=-1.3134E6 Volume: von Mises stress (MPa)
Max/Min Volume: von Mises stress (MPa)



Εικόνα 5.2.1.2 von Mises stress (MPa)

ExpF(1)=-9.0832E5 Volume: First principal stress (MPa)
Max/Min Volume: First principal stress (MPa)



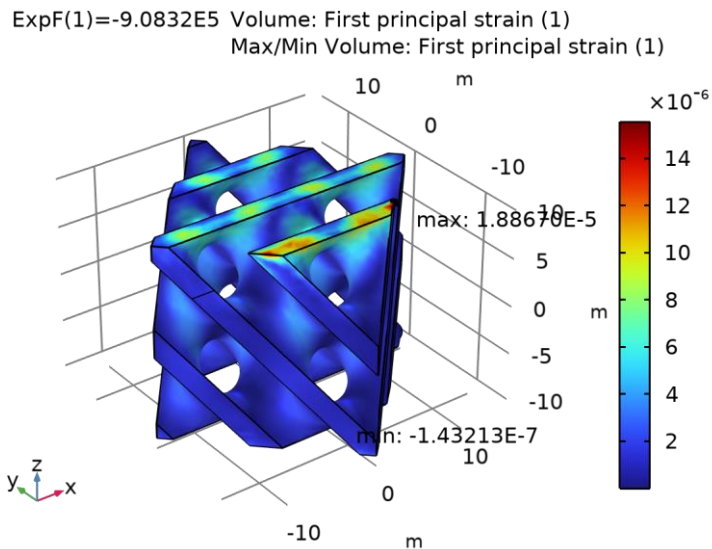
Εικόνα 5.2.1.3 First principal stress (MPa) Max/Min

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε τη μέγιστη τιμή τάσης von Mises, η οποία είναι 0.044043 MPa, και την ελάχιστη τιμή, η οποία είναι -0.013465MPa. Αυτές οι τιμές δείχνουν το εύρος των τάσεων που αναπτύσσονται στη δομή.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
12.515	1.067	-10	-0.013465
7.6011	-6.541	10	0.044043

Πίνακας 5.2.1.1 Max/min Stress volume

Strain



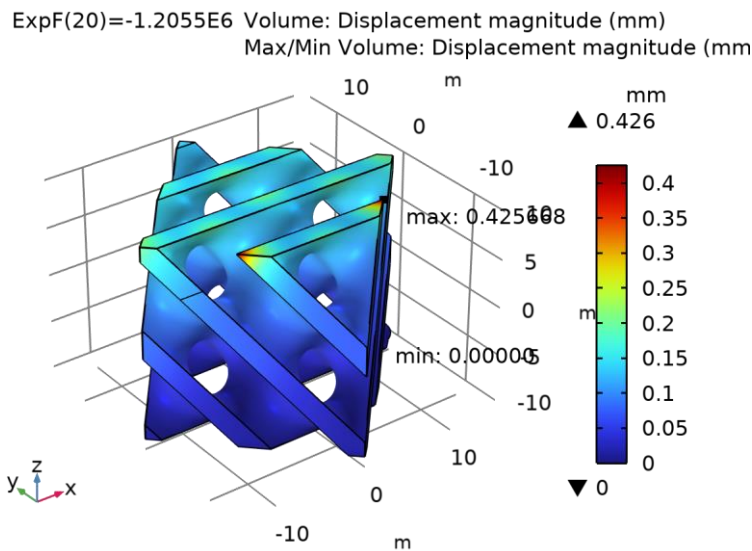
Εικόνα 5.2.1.4 First principal strain

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε την πρώτη κύρια παραμόρφωση με μέγιστη τιμή 1.8867E-5 και ελάχιστη τιμή -1.4321E-7. Αυτή η παραμόρφωση δείχνει τον τρόπο που το υλικό παραμορφώνεται υπό τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις.

X	Y	Z	First principal strain (1)
0.60927	-7.0736	-10	-1.4321E-7
7.6011	-6.541	10	1.8867E-5

Πίνακας 5.2.1.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.2.1.5 Displacement magnitude (mm)

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε τη μέγιστη μετατόπιση που είναι 0.42567 mm και την ελάχιστη μετατόπιση που είναι 0 mm. Αυτές οι τιμές αντικατοπτρίζουν την κίνηση του υλικού λόγω των δυνάμεων που ασκούνται.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
13.102	1.0405	-10	0
8.1382	-6.004	10	0.42567

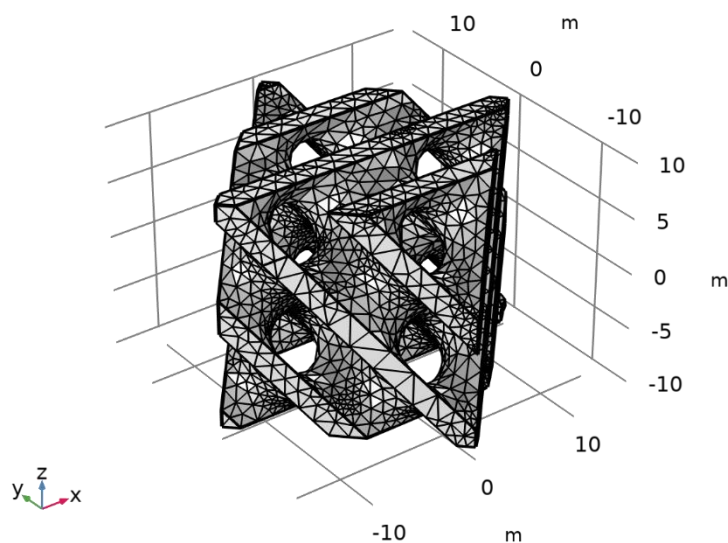
Πίνακας 5.2.1.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-1,010024	0,376	0,3566491	-5%
-1,041941	0,381	0,36792	-3%
-1,064969	0,385	0,376	-2%
-1,105438	0,391	0,390343	-0,2%
-1,146124	0,393	0,40471	3%
-1,205471	0,403	0,425668	6%

Πίνακας 5.2.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

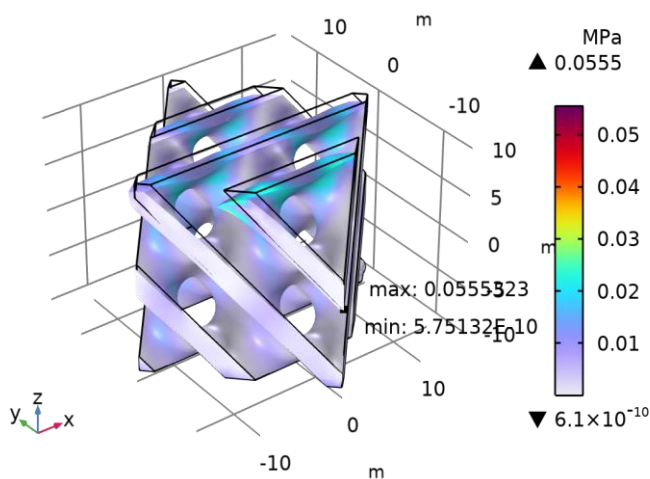
5.2.2 Diamond Scale 1-0.5%Cu



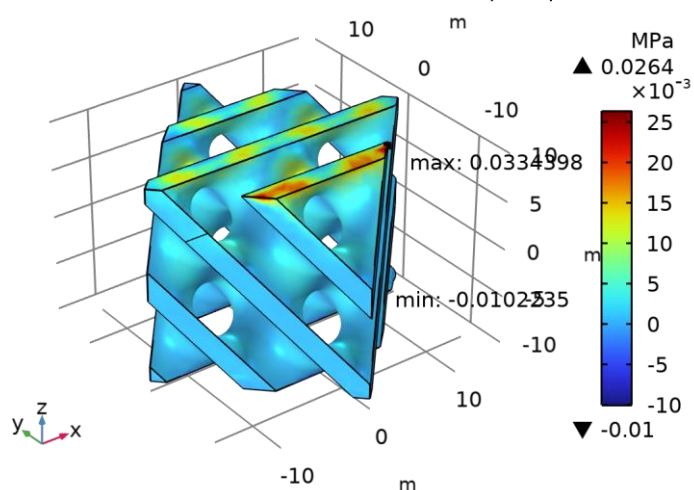
Εικόνα 5.2.2.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 1 – 0.5%Cu με τη μορφή Mesh

Stress

ExpF(34)=-6.8966E5 Volume: von Mises stress (MPa)
Max/Min Volume: von Mises stress (MPa)



ExpF(34)=-6.8966E5 Volume: First principal stress (MPa)
Max/Min Volume: First principal stress (MPa)



Εικόνα 5.2.2.2 von Mises stress (MPa)

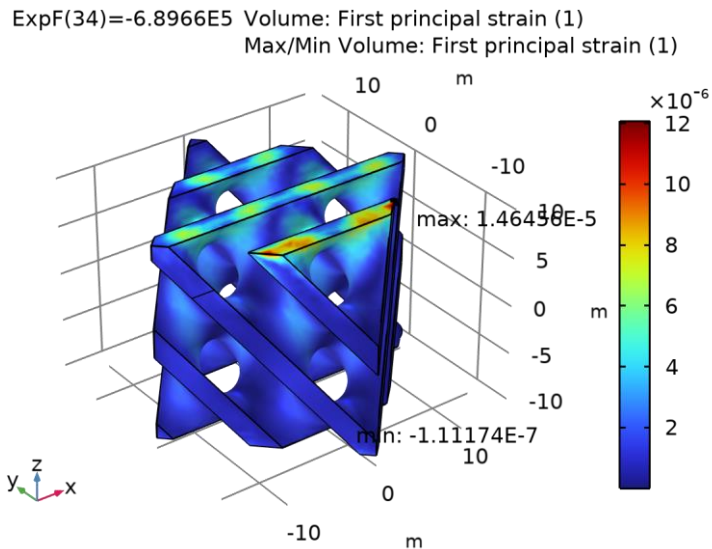
Εικόνα 5.2.2.3 First principal stress (MPa) Max/Min

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε τη μέγιστη τιμή τάσης που είναι 0.03344 MPa και την ελάχιστη τιμή -0.010224MPa. Οι τιμές αυτές δείχνουν τις τάσεις που αναπτύσσονται στη δομή υπό τις συνθήκες φόρτισης.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
12.515	1.067	-10	-0.010224
7.6011	-6.541	10	0.03344

Πίνακας 5.2.2.1 Max/min Stress volume

Strain



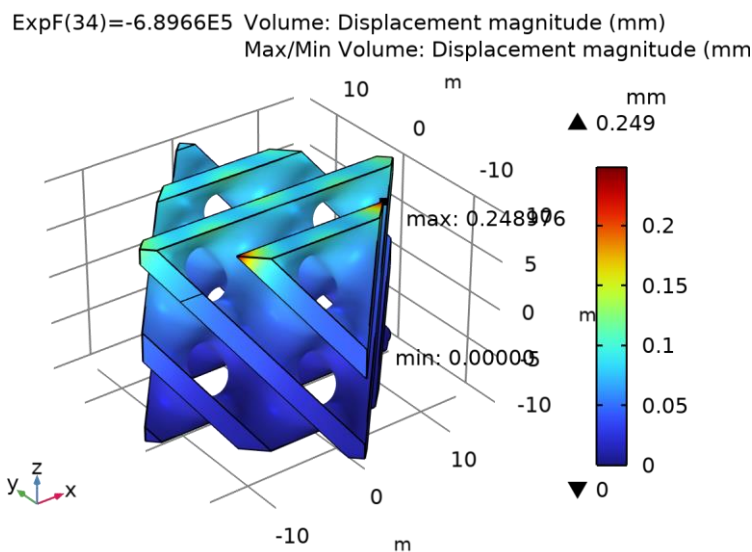
Εικόνα 5.2.2.4 First principal strain

Η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης που παρατηρούμε είναι 1.4646E-5 και η ελάχιστη είναι -1.1117E-7. Αυτή η παραμόρφωση αντικατοπτρίζει τον τρόπο με τον οποίο παραμορφώνεται η δομή κατά την εφαρμογή των δυνάμεων.

X	Y	Z	First principal strain (1)
0.60927	-7.0736	-10	-1.1117E-7
7.6011	-6.541	10	1.4646E-5

Πίνακας 5.2.2.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.2.2.5 Displacement magnitude (mm)

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι η μέγιστη μετατόπιση είναι 0.24898 mm και η ελάχιστη είναι 0 mm. Αυτές οι τιμές δείχνουν την κίνηση του υλικού ως αποτέλεσμα των εφαρμοζόμενων δυνάμεων.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
13.102	1.0405	-10	0
8.1382	-6.004	10	0.24898

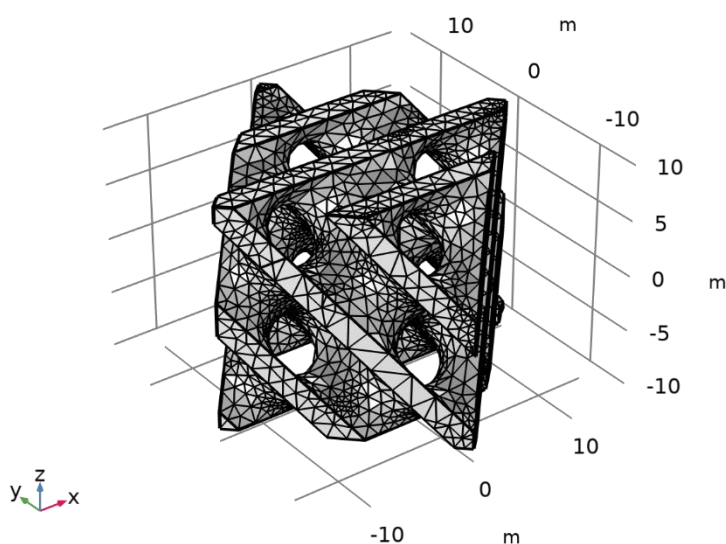
Πίνακας 5.2.2.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-0,4009447	0,156	0,14474	-7%
-0,4153846	0,158	0,14995	-5%
-0,433249	0,16	0,1564	-2%
-0,4568236	0,166	0,164913	-1%
-0,5000792	0,174	0,181	4%
-0,5275895	0,179	0,190459	6%

Πίνακας 5.2.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

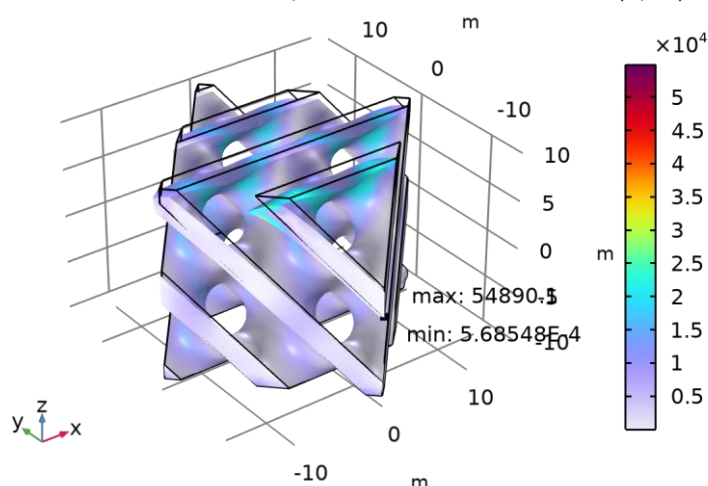
5.2.3 Diamond Scale 1-1%Cu



Εικόνα 5.2.3.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 1 – 1%Cu με τη μορφή Mesh

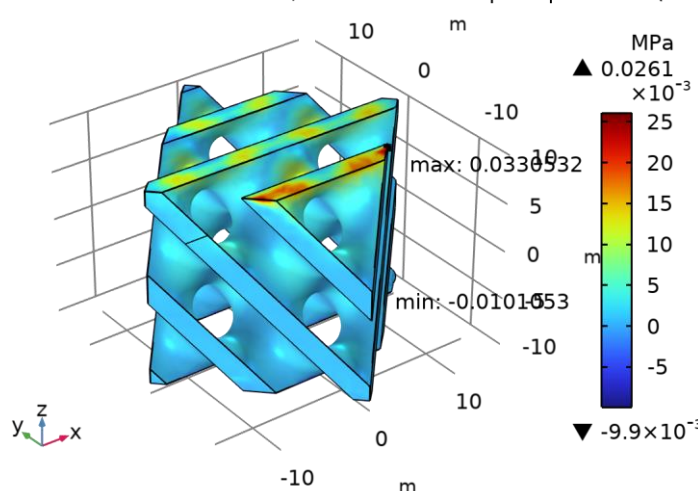
Stress

ExpF(13)=-6.8169E5 Volume: von Mises stress (N/m²)
Max/Min Volume: von Mises stress (N/m²)



Εικόνα 5.2.3.2 von Mises stress (MPa)

ExpF(13)=-6.8169E5 Volume: First principal stress (MPa)
Max/Min Volume: First principal stress (MPa)



Εικόνα 5.2.3.3 First principal stress (MPa) Max/Min

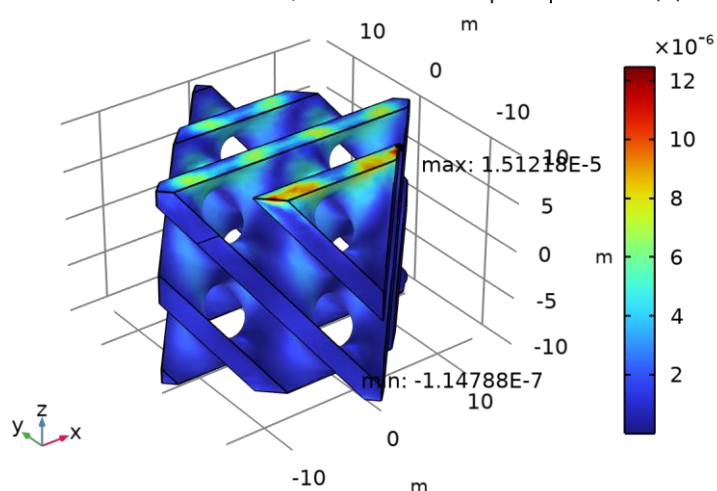
Σε αυτό το διάγραμμα, η μέγιστη τάση είναι 0.033053 MPa και η ελάχιστη είναι -0.010105 MPa. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν το εύρος των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή των δυνάμεων στη δομή.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
12.515	1.067	-10	-0.010105
7.6011	-6.541	10	0.033053

Πίνακας 5.2.3.1 Max/min Stress volume

Strain

ExpF(13)=-6.8169E5 Volume: First principal strain (1)
Max/Min Volume: First principal strain (1)



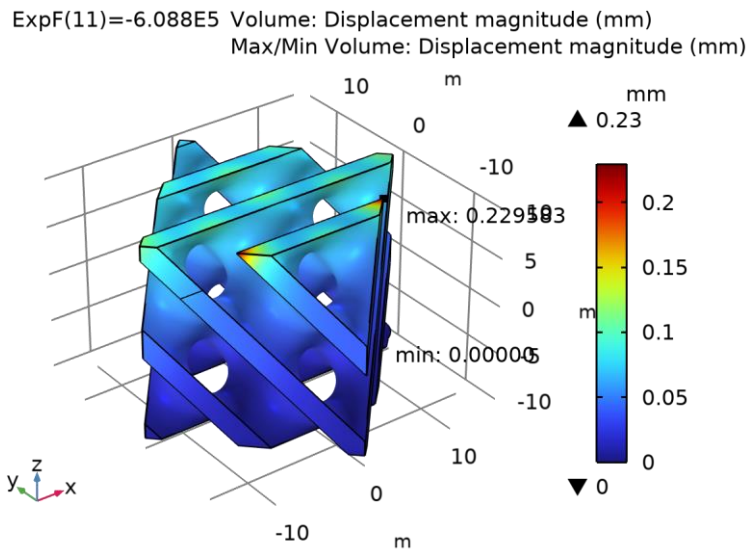
Εικόνα 5.2.3.4 First principal strain

Στο παρακάτω διάγραμμα, η μέγιστη παραμόρφωση είναι 1.5122E-5 και η ελάχιστη είναι -1.1479E-7. Αυτές οι τιμές παραμόρφωσης αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά του υλικού υπό την εφαρμογή φορτίου.

X	Y	Z	First principal strain (1)
0.60927	-7.0736	-10	-1.1479E-7
7.6011	-6.541	10	1.5122E-5

Πίνακας 5.2.3.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.2.3.5 Displacement magnitude (mm)

Η μέγιστη μετατόπιση που παρατηρείται είναι 0.22958 mm και η ελάχιστη είναι 0 mm. Αυτές οι μετατοπίσεις δείχνουν την απόκριση της δομής στις εφαρμοζόμενες δυνάμεις.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
13.102	1.0405	-10	0
8.1382	-6.004	10	0.22958

Πίνακας 5.2.3.3 Max/min Displacement volume

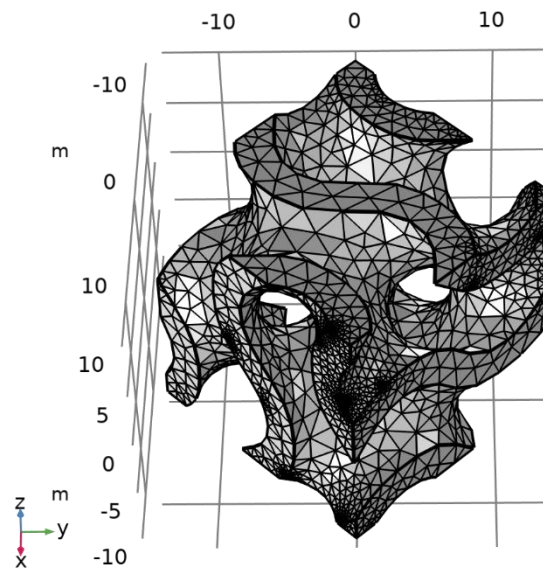
Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-0,4931972	0,196	0,189	-4%
-0,5153339	0,201	0,194	-3%
-0,5492778	0,204	0,207	1%
-0,5991784	0,214	0,225955	6%
-0,6087984	0,219	0,22958	5%

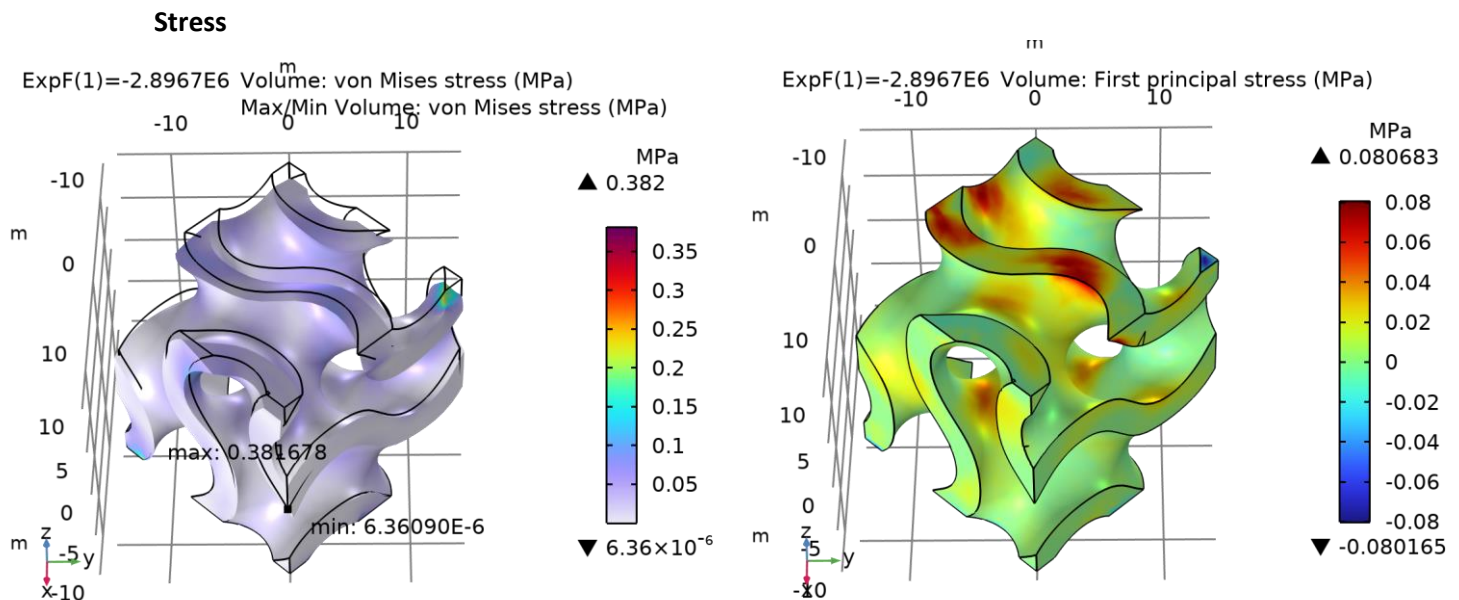
Πίνακας 5.2.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.3 Μοντέλο Gyroid

5.3.1 Gyroid Scale 1-0.5%Cu



Εικόνα 5.3.1.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 1 – 0%Cu με τη μορφή Mesh



Εικόνα 5.3.1.2 von Mises stress (MPa)

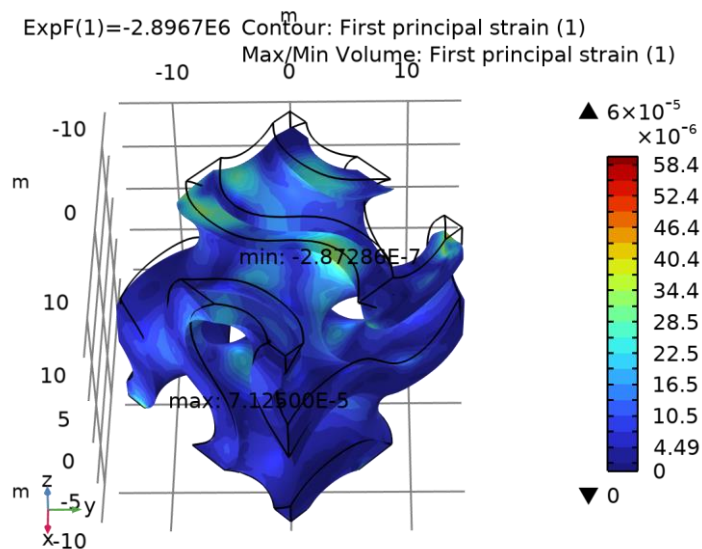
Εικόνα 5.3.1.3 First principal stress (MPa) Max/Min

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε τη μέγιστη τιμή τάσης, η οποία είναι 0.12829 MPa, και την ελάχιστη τιμή, η οποία είναι -0.094107 MPa. Αυτές οι τιμές δείχνουν το εύρος των τάσεων που αναπτύσσονται στη δομή.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
-5.7191	7.2048	-10	-0.094107
-4.6015	6.1945	-8.9175	0.12829

Πίνακας 5.2.1.1 Max/min Stress volume

Strain



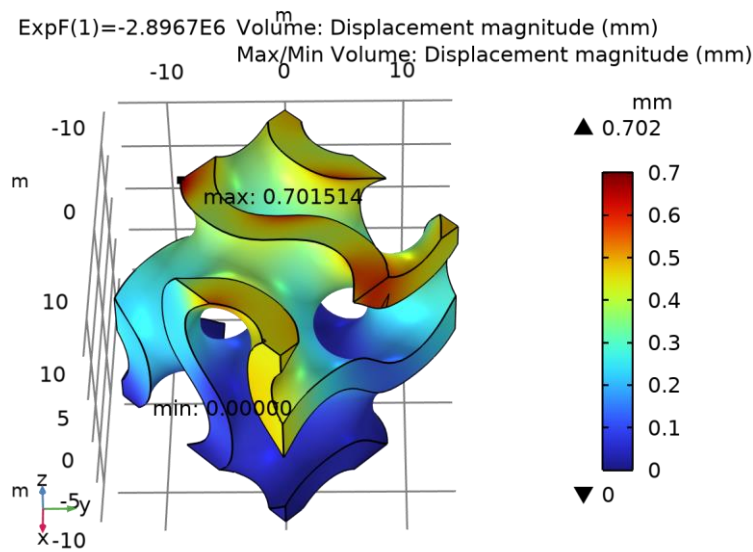
Εικόνα 5.3.1.4 First principal strain

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε την πρώτη κύρια παραμόρφωση με μέγιστη τιμή 7.125×10^{-5} και ελάχιστη τιμή -2.8729×10^{-7} . Αυτή η παραμόρφωση δείχνει πώς το υλικό παραμορφώνεται υπό τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις.

X	Y	Z	First principal strain (1)
-2.4551	-5.9532	7.2014	-2.8729E-7
-1.3936	-12.748	-10	7.125E-5

Πίνακας 5.3.1.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.3.1.5 Displacement magnitude (mm)

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε τη μέγιστη μετατόπιση που είναι 0.70151 mm και την ελάχιστη μετατόπιση που είναι 0 mm. Αυτές οι τιμές αντικατοπτρίζουν την κίνηση του υλικού λόγω των δυνάμεων που ασκούνται.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
-0.54113	-13.601	-10	0
-5.6813	-8.4608	10	0.70151

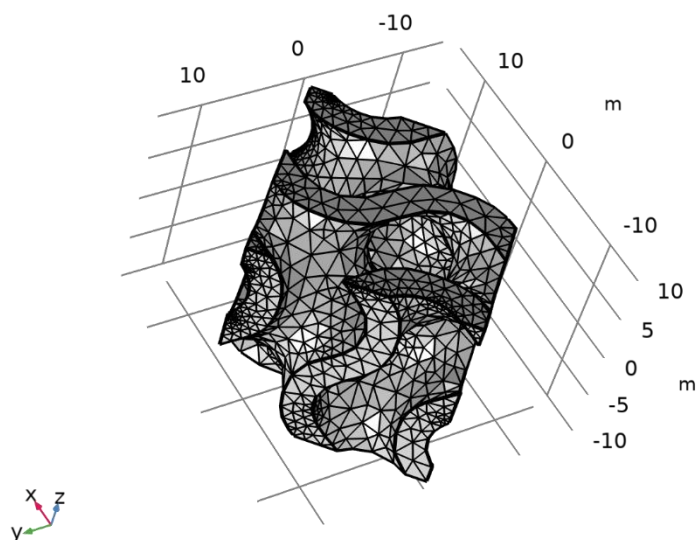
Πίνακας 5.3.1.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-2,896697	0,746	0,701514	-6%
-3,003552	0,769	0,72739	-5%
-3,141047	0,804	0,760696	-5%
-3,296863	0,843	0,798434	-5%
-3,501415	0,899	0,84798	-6%

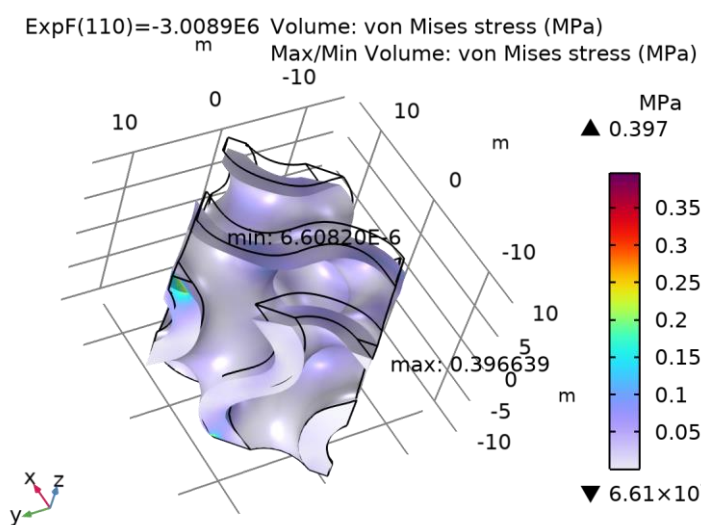
Πίνακας 5.3.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.3.2 Gyroid Scale 1-0.5%Cu

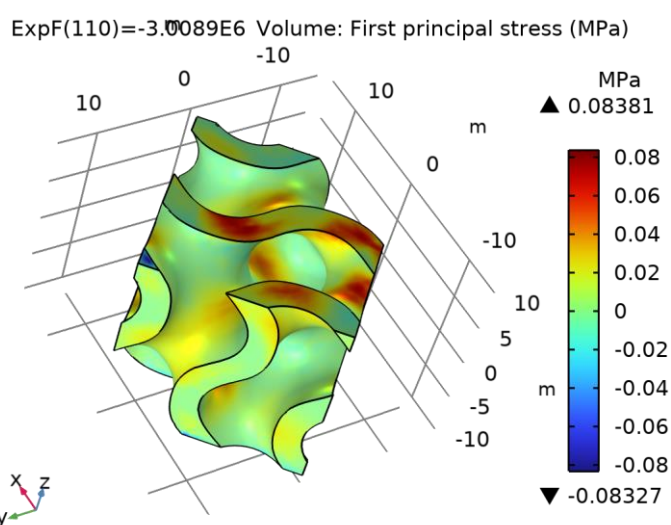


Εικόνα 5.3.1.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικών Scale 1 – 0.5%Cu με τη μορφή Mesh

Stress



Εικόνα 5.3.2.2 von Mises stress (MPa)



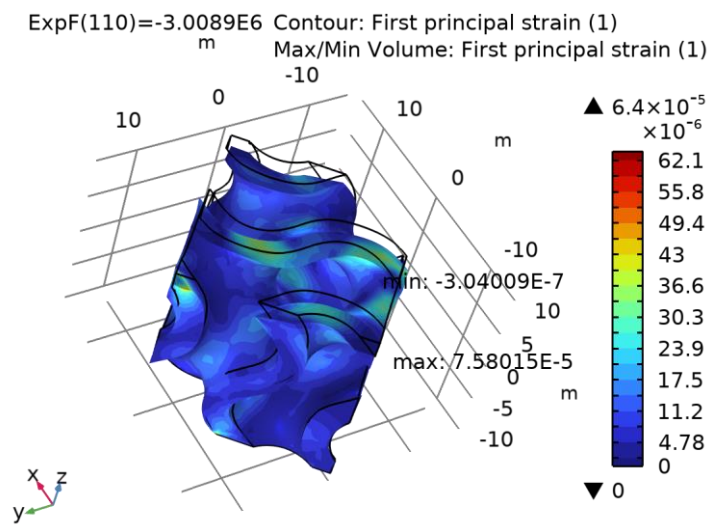
Εικόνα 5.3.2.3 First principal stress (MPa) Max/Min

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε τη μέγιστη τιμή τάσης που είναι 0.13326 MPa και την ελάχιστη τιμή -0.097753 MPa. Οι τιμές αυτές δείχνουν τις τάσεις που αναπτύσσονται στη δομή υπό τις συνθήκες φόρτισης.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
-5.7191	7.2048	-10	-0.097753
-4.6015	6.1945	-8.9175	0.13326

Πίνακας 5.3.2.1 Max/min Stress volume

Strain



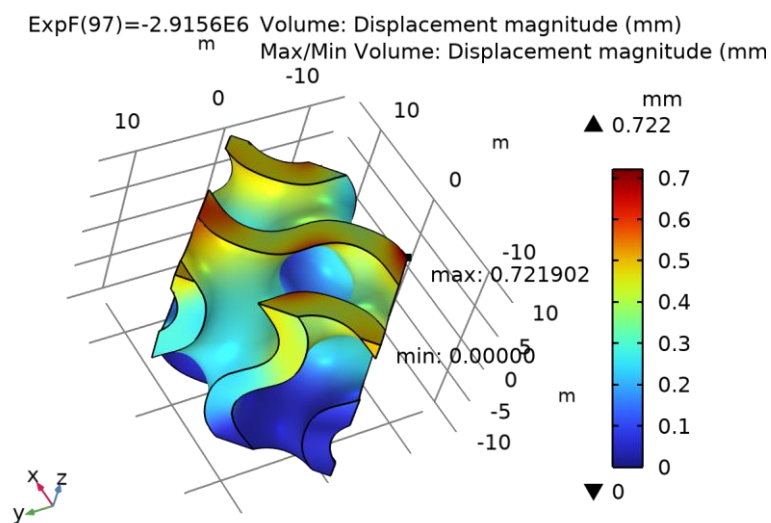
Εικόνα 5.3.2.4 First principal strain

Η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης που παρατηρούμε είναι 7.5802×10^{-5} και η ελάχιστη -3.0401×10^{-7} . Αυτή η παραμόρφωση αντικατοπτρίζει τον τρόπο με τον οποίο παραμορφώνεται η δομή κατά την εφαρμογή των δυνάμεων.

X	Y	Z	First principal strain (1)
-2.4551	-5.9532	7.2014	-3.0401E-7
-1.3936	-12.748	-10	7.5802E-5

Πίνακας 5.3.2.2 Max/min Strain volume

Displacement



Εικόνα 5.3.2.5 Displacement magnitude (mm)

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι η μέγιστη μετατόπιση είναι 0.7219 mm και η ελάχιστη είναι 0 mm. Αυτές οι τιμές δείχνουν την κίνηση του υλικού ως αποτέλεσμα των εφαρμοζόμενων δυνάμεων.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
-0.54113	-13.601	-10	0
-5.6813	-8.4608	10	0.7219

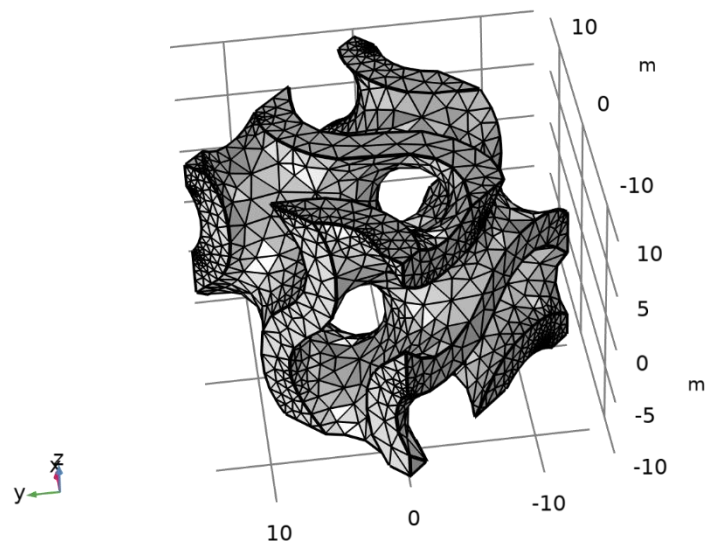
Πίνακας 5.3.2.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-2,104051	0,553	0,520951	-6%
-2,282814	0,596	0,565216	-5%
-2,495984	0,6530001	0,618	-5%
-2,712872	0,709	0,671705	-5%
-2,915585	0,767	0,721902	-6%
-3,008886	0,794	0,745005	-6%

Πίνακας 5.3.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

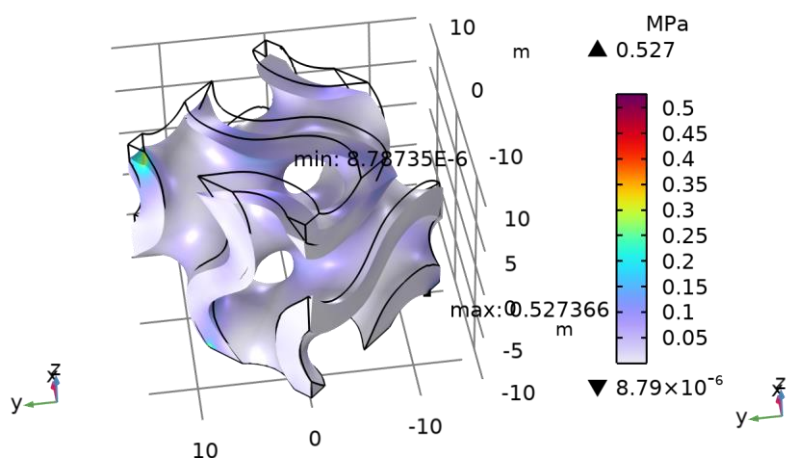
5.3.3 Gyroid Scale 1-1%Cu



Εικόνα 5.3.3.1 Αναπαράσταση γεωμετρίας χαρακτηριστικων Scale 1 – 1%Cu με τη μορφή Mesh

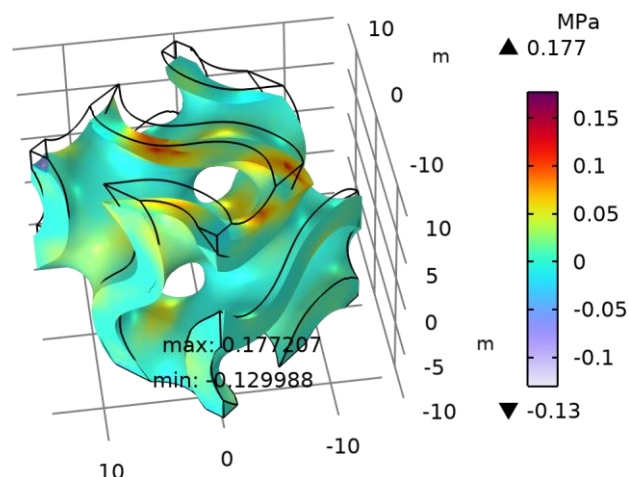
Stress

ExpF(8)=-4.001E6 Volume: von Mises stress (MPa)
Max/Min Volume: von Mises stress (MPa)
Max/Min Volume: von Mises stress (MPa)



Εικόνα 5.3.3.2 von Mises stress (MPa)

ExpF(8)=-4.001E6 Volume: First principal stress (MPa)
Max/Min Volume: First principal stress (MPa)



Εικόνα 5.3.3.3 First principal stress (MPa) Max/Min

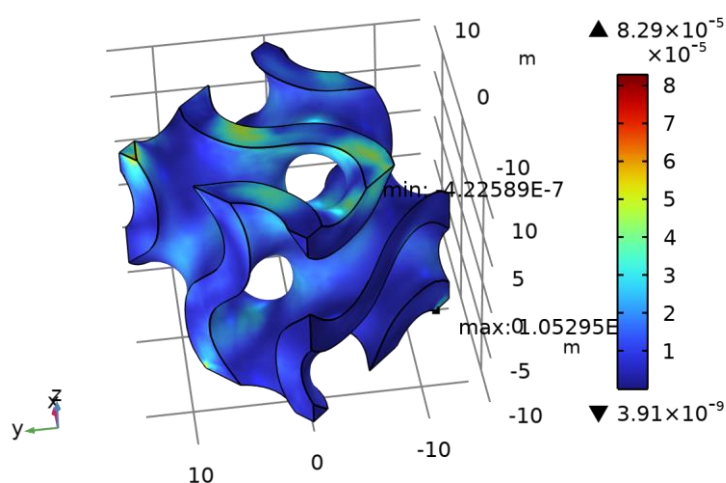
Σε αυτό το διάγραμμα, η μέγιστη τάση von Mises είναι 0.17721 MPa και η ελάχιστη -0.12999 MPa. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν το εύρος των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή των δυνάμεων στη δομή.

X	Y	Z	First principal stress (MPa)
-5.7191	7.2048	-10	-0.12999
-4.6015	6.1945	-8.9175	0.17721

Πίνακας 5.3.3.1 Max/min Stress volume

Strain

ExpF(8)=-4.001E6 Volume: First principal strain (1)
Max/Min Volume: First principal strain (1)



Εικόνα 5.3.3.4 First principal strain

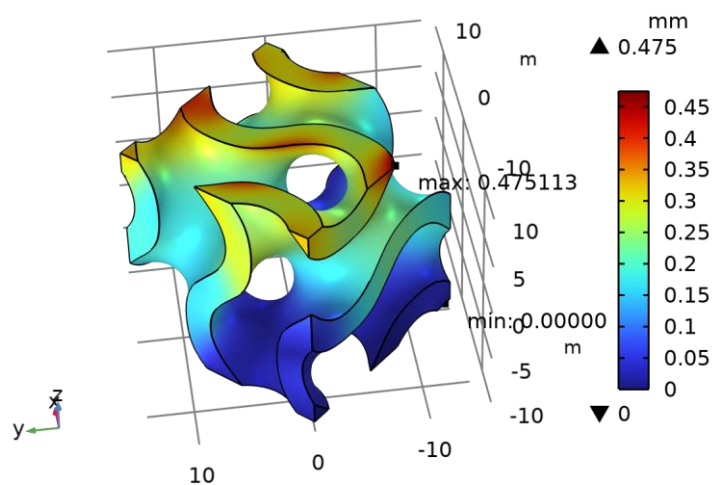
Στο παρακάτω διάγραμμα, η μέγιστη παραμόρφωση είναι 1.0529E-4 και η ελάχιστη είναι -4.2259E-7. Αυτές οι τιμές παραμόρφωσης αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά του υλικού υπό την εφαρμογή φορτίου.

X	Y	Z	First principal strain (1)
-2.4551	-5.9532	7.2014	-4.2259E-7
-1.3936	-12.748	-10	1.0529E-4

Πίνακας 5.3.3.2 Max/min Strain volume

Displacement

ExpF(1)=-1.837E6 Volume: Displacement magnitude (mm)
Max/Min Volume: Displacement magnitude (mm)



Εικόνα 5.3.3.5 Displacement magnitude (mm)

Η μέγιστη μετατόπιση που παρατηρείται είναι 0.47511 mm και η ελάχιστη είναι 0 mm. Αυτές οι μετατοπίσεις δείχνουν την απόκριση της δομής στις εφαρμοζόμενες δυνάμεις.

X	Y	Z	Displacement magnitude (mm)
-0.54113	-13.601	-10	0
-5.6813	-8.4608	10	0.47511

Πίνακας 5.3.3.3 Max/min Displacement volume

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Experimental Force (kN)	Experimental Displacement	FEA Displacement	Percentage Error
-1,837019	0,508	0,475113	-6%
-2,774861	0,716	0,71769	0%
-3,008393	0,773	0,7781	1%
-3,303241	0,857	0,854368	0%
-3,678341	0,975	0,951398	-2%
-4,000978	1,105	1,03486	-6%

Πίνακας 5.3.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Περίληψη Αποτελεσμάτων

Η ελαστοπλαστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα μοντέλα Primitive, Diamond και Gyroid παρείχε σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του υλικού υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης, τόσο πειραματικά όσο και μέσω προσομοιώσεων στο COMSOL Multiphysics.

Η Τάση Διαρροής σε όλα τα μοντέλα και τις συνθέσεις υλικών (0%, 0.5% και 1% Cu), αποτέλεσε το κρίσιμο σημείο μετάβασης από ελαστική σε πλαστική συμπεριφορά. Γενικά, η προσθήκη χαλκού (Cu) οδήγησε σε μικρή μείωση της τάσης διαρροής, υποδεικνύοντας ότι η ενίσχυση της πολυμερούς μήτρας με Cu δεν βελτίωσε σημαντικά την ελαστική συμπεριφορά, αλλά είχε μεγαλύτερη επίδραση στην πλαστική περιοχή.

Η Συμπεριφορά του Tangent Modulus που αντιπροσωπεύει την ακαμψία του υλικού κατά την πλαστική παραμόρφωση, διέφερε μεταξύ των τριών γεωμετριών. Στο μοντέλο Primitive, το μέτρο της εφαπτομένης παρουσίασε σταδιακή μείωση με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης, τονίζοντας φαινόμενα σκλήρυνσης παραμόρφωσης. Τα μοντέλα Diamond και Gyroid παρουσίασαν παρόμοια τάση, αν και ο βαθμός σκλήρυνσης διέφερε λόγω των διαφορετικών γεωμετρικών τους δομών. Η ανάλυση έδειξε ότι καθώς η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται, τα μοντέλα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε Cu παρουσίασαν ελαφρώς μεγαλύτερη ανθεκτικότητα πριν την τελική αστοχία.

Οι μετρήσεις μετατόπισης, τόσο πειραματικές όσο και προσομοιωμένες, αποκάλυψαν συνεπή συμπεριφορά πλαστικής παραμόρφωσης σε όλα τα μοντέλα. Οι πειραματικές τιμές έδειξαν γενικά μεγαλύτερη μετατόπιση σε σχέση με τις προσομοιώσεις Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA), με ποσοστό σφάλματος που κυμαινόταν από -6.3% έως 6.5%. Αυτή η απόκλιση υποδηλώνει ότι, ενώ το COMSOL παρείχε μια αρκετά ακριβή απεικόνιση της απόκρισης του υλικού, ορισμένες πολυπλοκότητες των πραγματικών δοκιμών—όπως ατέλειες στη γεωμετρία των δειγμάτων ή οι οριακές συνθήκες—δεν αποτυπώθηκαν πλήρως στην προσομοίωση.

Τα αποτελέσματα αυτής της ελαστοπλαστικής ανάλυσης έχουν σημαντικές εφαρμογές στον σχεδιασμό μηχανικών συστημάτων και σε πρακτικές εφαρμογές υλικών ενισχυμένων με νανοσωματίδια χαλκού, ειδικά για δομές που φέρουν φορτία και υφίστανται πλαστική παραμόρφωση. Τα μοντέλα ανέδειξαν πρακτικά στοιχεία όσον αφορά την ακρίβεια πρόβλεψης. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι η FEA σε συνεργασία με τη χρήση του COMSOL Multiphysics, αποτελεί ένα εργαλείο για την πρόβλεψη της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς υπό ελεγχόμενες συνθήκες.

Η χρήση του Cu δείχνει οριακές βελτιώσεις στην αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση. Ωστόσο, η μείωση της τάσης διαρροής με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Cu υποδεικνύει ότι, αν και το υλικό γίνεται πιο όλκιμο, μπορεί να μην είναι ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλά ελαστικά όρια.

Συμπέρασμα

Ο συνδυασμός πειραματικών δοκιμών και προσομοιώσεων παρείχε μια ισχυρή βάση για την κατανόηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των πολυμερών ενισχυμένων με Cu. Η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο COMSOL Multiphysics αποκάλυψε διαφορές στις μετατοπίσεις, με ποικίλους βαθμούς σφάλματος ανάμεσα στις τρεις γεωμετρίες: Primitive, Diamond και Gyroid. Μεταξύ των μοντέλων, το μοντέλο Primitive παρουσίασε τα μεγαλύτερα σφάλματα στις μετατοπίσεις, ιδιαίτερα στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις χαλκού (Cu) και στις μεγαλύτερες κλίμακες. Αυτό υποδηλώνει ότι η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του Primitive, σε συνδυασμό με την προσθήκη ενίσχυσης, εισήγαγε περισσότερη μεταβλητότητα στις προσομοιώσεις σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αντίθετα, το μοντέλο Gyroid εμφάνισε τα χαμηλότερα σφάλματα στις μετατοπίσεις, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη συνέπεια μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των προσομοιώσεων. Αυτή η χαμηλή απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στην πιο ομοιόμορφη δομή της γεωμετρίας του Gyroid, η οποία οδήγησε σε πιο προβλέψιμο μοτίβο παραμόρφωσης. Το μοντέλο Diamond παρουσίασε ενδιάμεσα σφάλματα, με καλύτερη απόδοση σε σχέση με το Primitive, αλλά όχι τόσο ακριβή όσο το Gyroid. Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία των γεωμετρικών παραμέτρων στην ακρίβεια των ελαστοπλαστικών προσομοιώσεων, όπου οι πιο πολύπλοκες γεωμετρίες τείνουν να παράγουν μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- Adams, D. F. (χ.χ.). *Mechanics of Composite Materials: Composite Materials*, Vol. 2, Τόμος 2.
- Chunyan Feng, M. Z. (2018). Materials Properties of Printable Edible Inks and Printing Parameters Optimization during 3D Printing: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 3074–3081.
- Ćwikła, G. (2017). The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *IOP Conference Series: Materials*.
- F. Latourte, A. C. (2007). Elastoplastic Behavior Identification for Heterogeneous Loadings and Materials.
- M. Manoj Prabhakar, A. S. (2021). A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. Στο *Materials Today: Proceedings* (σσ. 6108-6114).
- Manav Doshi, A. M. (2022). Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. Στο *Materials Today: Proceedings* (σσ. 2269-2275).
- N. Shahrubudin, T. L. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 11.
- Necati Uçak, A. Ç. (2022). Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 414-457.
- Nectarios Vidakis, M. P. (2022). Multifunctional Medical Grade Resin with Enhanced Mechanical and Antibacterial Properties: The Effect of Copper Nano-Inclusions in Vat Polymerization (VPP) Additive Manufacturing. *Journal of Functional Biomaterials*.
- Rui Zou, Y. X. (2016). *Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material*.
- Souley Mountaka, A. T. (2014). Nonlinear mechanical and poromechanical analyses : comparison with analytical solutions.
- Vinod G. Gokhare, D. D. (2017). A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 6.
- Wang. (χ.χ.). A Comprehensive Study on Elastoplastic Finite Element Analysis Using COMSOL Multiphysics.
- Zienkiewicz, T. a. (χ.χ.). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*.
- Ziqi Li, X. L. (2023). *Composite Structures*.