

Σχεδιασμός, ανάλυση και βελτιστοποίηση εκτυπωμένων κυψελωτών δομών για απορρόφηση ενέργειας σε ψευδοστατικά φορτία.

Βαρτζιώτη Αικατερίνη Δανάη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κυψελωτές δομές έχουν αποδειχθεί ωφέλιμες για εφαρμογές λόγω των εξαιρετικών τους ιδιοτήτων, όπως υψηλή αντοχή, απορρόφηση ενέργειας, ελαφρές κατασκευές και μειωμένες δονήσεις, οι οποίες έχουν μελετηθεί εκτενώς. Χάρι αυτών, οι κυψελωτές δομές έχουν χρησιμοποιηθεί στη διαστημική, στην αεροπορία, στην εμβιομηχανική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε εξοπλισμό αθλημάτων και σε πολλούς άλλους τομείς. Σήμερα, με την εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης η κατασκευή τέτοιων δομών έχει γίνει ακόμα πιο εύκολη καθώς προσφέρεται ευελιξία σχεδίασης και δοκίμια με πολύπλοκη γεωμετρία μπορούν να κατασκευαστούν επιτυγχάνοντας τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Οι δισδιάστατες κυψελωτές δομές είναι κυρίως γνωστές για τις ιδιότητες τους στην διεύθυνση κάθετη στον άξονά τους (out-of-plane), αλλά σε πολλές φορές η κρούση συμβαίνει σε διάφορες κατευθύνσεις. Για αυτό τεχνικές όπως η ενίσχυση της δομής με αφρό ή η μεταβολή της πυκνότητας της κατασκευής κατά το πάχος της, μελετώνται ώστε να αυξηθεί η ενέργεια απορρόφησης και στην διεύθυνση παράλληλα με τον άξονα της δομής (in-plane). Έπειτα από βιβλιογραφική ανασκόπηση καταλήξαμε ότι η συμπεριφορά Nylon 12 δισδιάστατων κυψελωτών δομών (honeycombs) δεν έχει ευρέως μελετηθεί παρότι είναι πολλά υποσχόμενες λόγω του χαμηλού τους βάρους και επειδή μπορούν να κατασκευαστούν με τρισδιάστατη έκπτωση. Έτσι, σε αυτή την διπλωματική μελετάτε η συμπεριφορά Nylon12 εξαγωνικής δομής. Η εγκυρότητα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων επιβεβαιώνεται κάνοντας σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα άλλου μελετητή. Έπειτα, εξετάζεται η επίδραση του μεγέθους της δισδιάστατης δομής στην συμπεριφορά και τις ιδιότητες της συγκριτικά με το αρχικό μέγεθος. Ακολούθως, μεταβάλλεται η πυκνότητα κατά το πάχος της δομής με ποικίλους μορφές, διατηρώντας την ολική μάζα ίση με την αρχική ομοιόμορφη δομή, αλλάζοντας το πάχος κάθε μοναδιαίας κυψελίδας (unit cell) με σκοπό να αυξηθεί η ενέργεια απορρόφησης. Συγκεκριμένες μεταβολές πυκνότητας οδήγησαν σε υψηλότερες παραμορφώσεις μέχρι την πλήρη συμπίεση της δομής, σε αυξημένη απορροφώμενη ενέργεια και χαμηλότερες αρχικές τάσεις, ενώ άλλες οδήγησαν στο αντίθετο. Επιπλέον η δομή ενισχύθηκε με αφρό διαφόρων

πυκνοτήτων και βρέθηκε ότι η απορροφώμενη ενέργεια αυξήθηκε μέχρι και 150% ενώ η μάζα κατά 41%, όμως παρατηρήθηκε και αύξηση των τάσεων. Τέλος, οι δύο αυτές μέθοδοι συνδυάστηκαν και η νέα δομή μεταβλητής πυκνότητας και με αφρό έδειξε την υψηλότερη απορροφώμενη ενέργεια και μείωση των αρχικών φορτίων. Και για τις τρεις προαναφερθείσες μέθοδοι οι παραμετροποίηση των μοντέλων των πεπερασμένων στοιχείων τους έγιναν μέσω ενός κώδικα στο MATLAB, όπου και επεξεργάστηκαν και αποθηκευτήκαν τα αποτελέσματα για μελλοντική χρήση.

Ιδανικά, μια δομή που απορροφά ενέργεια πρέπει να έχει υψηλή ειδική ενέργεια απορρόφησης, μικρό βάρος και να αντέχει και μειώνει τα φορτία που μεταφέρονται στην κατασκευή. Μέχρι σήμερα έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες σχετικές με τέτοιου είδους δομές ενώ την τελευταία δεκαετία έχουν επικεντρωθεί στην κατασκευή αυτών των δομών με την βοήθεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πέρα από την ανάπτυξη κλασσικών τέτοιων κυψελωτών δομών, έχουν γίνει έρευνες που μελετούν διάφορες παραμετρικές αλλαγές και το πως αυτές επηρεάζουν τις ιδιότητες της δομής. Βρέθηκαν δύο τεχνικές για αύξηση της ειδικής απορροφώμενης ενέργειας των honeycombs. Η πρώτη αφορά την ενίσχυση των δομών με αφρό (foam filled honeycombs) και η δεύτερη την ανακατανομή του πάχους της δομής (Gradient Structures) με τέτοιο τρόπο ώστε να συνολικό βάρος να παραμένει σταθερό.

Βιβλιογραφική Έρευνα

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα ειδικής ενέργειας απορρόφησης με την πυκνότητα. Από αυτό, φαίνεται ότι οι τρισδιάστατες κυψελωτές δομές (3D lattices) από θερμοπλαστικό υλικό (Nylon12) έχουν σχεδόν την ίδια ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA) με το μεταλλικά, αλλά διατηρούν σημαντικά μικρότερο βάρος. Από την άλλη η SEA των δισδιάστατων δομών (2D lattices - honeycombs) εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισής τους. Όπως, φαίνεται από το διάγραμμα ότι θερμοπλαστικές και μεταλλικές δομές (Al, or thermoplastic like PEEK, CF/PEEK and PLA), έχουν εξαιρετική ειδική ενέργεια απορρόφησης όταν συμπιέζονται σε διεύθυνση κάθετα στο επίπεδό τους (out-of-plane loading), ενώ σε φόρτιση παράλληλα σε αυτό (in plane loading), δίνουν σημαντικά μικρότερη SEA. Για να αυξηθεί η SEA ενεργεία των δομών αυτών και στο in-plane επίπεδο έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές μεταβλητής πυκνότητας και η τεχνική γεμίσματος με αφρό, οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Η SEA αυξάνεται επίσης με την αύξηση του πάχους των κυψελίδων, όπως αναφέρουν στην έρευνά τους ο Habib και οι υπόλοιποι [1]. Ωστόσο, εδώ θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, διότι με αύξηση του πάχους

αυξάνεται και το βάρος της κατασκευής και η SEA, που είναι ο λόγος της απορροφώμενης ενέργειας προς το βάρος, μπορεί να μείνει ίδια ή να μειωθεί.

Όσον αφορά τη γεωμετρία της κυψελίδας, ο J. Jefferson Andre και οι υπόλοιποι [2] βρήκαν ότι τα 3D printed PEEK εξαγωνικά honeycombs είχαν καλύτερες ιδιότητες από τα chiral and the re-entrant. Από άλλη έρευνα [3] βρέθηκε, επίσης, ότι για Nylon12 honeycombs, τις καλύτερες ιδιότητες τις είχε η εξαγωνική δομή και ακολουθούσε η οκταγωνική.

Στο διάγραμμα απεικονίζεται η συμπεριφορά των κυψελωτών δομών, τόσο σε ψευδοστατικές όσο και δυναμικές και κρουστικές φορτίσεις. Παρατηρείται ότι σε κρούση η SEA αυξάνεται για 3D lattices (Aluminum [4], Nylon12- [5]) και για honeycombs που φορτίζονται παράλληλα στο επίπεδό τους (Nylon - [6], PEEK&CF/PEEK - [2]). Ενώ η κρούση κάθετα στο επίπεδο των honeycombs οδηγεί σε μείωση της SEA σύμφωνα με την μελέτη των J. Jefferson Andre et. al. [2]. Γενικά η αύξηση του ρυθμού φόρτισης οδηγεί σε αύξηση της SEA. Για αυτό και συνιστάται να γίνεται πρώτα ψευδοστατική μελέτη, καθώς από αυτή μπορούμε να καταλάβουμε την κυρίαρχη συμπεριφορά των δομών, η οποία θα αναπτυχθεί και στις δυναμικές ή κρουστικές φορτίσεις.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η SEA των δισδιάστατων δομών είναι αρκετά υψηλή στην out-of-plane διεύθυνση, ενώ στην in-plane είναι σημαντικά μικρότερη.

Για να αυξηθεί η SEA και στην άλλη διεύθυνση έχουν διεξαχθεί μελέτες όπου τα κενά στην δομή γεμίζουν με αφρό ([20-22], [8]). Ο Liu και οι υπόλοιποι [7], δοκίμασαν να γεμίσουν honeycomb από αλουμίνιο με διογκωμένο αφρό πολυπροπυλενίου (Expanded Polypropylene – EPP foam) και παρατήρησαν ότι στην in-plane διεύθυνση η SEA και το φορτίο που έφερε η κατασκευή αυξήθηκαν, ανεξαιρέτως της πυκνότητας του αφρού. Αντίθετα, στην out-of-plane διεύθυνση η SEA μειώθηκε συγκριτικά με εκείνη του άδειου honeycomb. Επιπλέον, η παραμόρφωση όπου το honeycomb έχει πλήρως συμπιεστεί (densification strain) μειώθηκε με τον αφρό. Αυτό, παρατηρήθηκε και στη μελέτη των Mozafari et al. [9], οι οποίοι μελέτησαν honeycomb αλουμινίου με αφρό πολυουρεθάνης (Polyurethane – PU foam), ενώ η SEA αυξήθηκε με τον αφρό.

Πέρα από honeycomb αλουμινίου που προαναφέρθηκαν, μελέτες έχουν γίνει και για θερμοπλαστικές δομές [8], [10]. Σε μελέτη με honeycombs τύπου re-entrant, chiral, εξαγωνικό και truss κατασκευασμένα με τρισδιάστατη εκτύπωση με VeroWhite

υλικό, βρέθηκε ότι όταν ήταν γεμάτα με ελαστομερές υλικό TangoPlus, η SEA στην in-plane φόρτιση αυξήθηκε [8]. Ακόμα, ο Yan και οι υπόλοιποι [10] δημιούργησαν ένα honeycomb από 3D εκτύπωση από PLA (Polylactic acid - Πολυγαλακτικό οξύ) με αφρό PMI (Polymethacrylimide – πολυμεθακρυλικός αφρός ή αλλιώς Rohacell foam). Κατέληξαν, ότι σε in-plane φόρτιση η SEA αυξήθηκε με τον αφρό ενώ σε φόρτιση κάθετη στο επίπεδο της δομής, η SEA μειώθηκε ελάχιστα.

Συνοψίζοντας, η ενίσχυση ενός honeycomb με αφρό οδήγησε στην αύξηση της SEA όταν φορτίζεται σε διεύθυνση παράλληλα με το επίπεδό του, ενώ στην κάθετη σε αυτό διεύθυνση σημειώθηκε μικρή μείωση της SEA. Ωστόσο στην out-of-plane διεύθυνση η SEA ήταν αρκετά υψηλή και η μικρή πτώση της δεν επηρεάζει δραστικά την συμπεριφορά της δομής.

Άλλες μελέτες για αύξηση της in-plane SEA διερευνούν την επίδραση της μεταβαλλόμενης πυκνότητας ([5-8]) τόσο στην φόρτιση κατά το επίπεδο της δομής όσο και κάθετο σε αυτό. Για παράδειγμα, ο Kumar και οι υπόλοιποι [11] μελέτησαν την απόδοση ενός re-entrant, εξαγωνικού και chiral honeycomb από VeroWhite σε φόρτιση κάθετα στο επίπεδό τους, όταν το πάχος κάθε κυψελίδας μεταβαλλόταν στην out-of-plane διεύθυνση. Κατέληξαν ότι οι δομές μεταβλητής πυκνότητας είχαν υψηλότερη SEA από ότι οι ομοιόμορφες, ενώ οι αρχικές τάσεις μειώθηκαν. Το ίδιο παρατηρήθηκε και σε μελέτη [5] με εξαγωνικό honeycomb από PA12. Παρόμοια αποτελέσματα σημειώθηκαν και σε μελέτες όπου οι φόρτιση γινόταν κατά την in plane διεύθυνση. Οι Rahman and Koohbor [12] μελέτησαν εξαγωνικά honeycombs από TPU (thermoplastic polyurethane – θερμοπλαστική πολυουρεθάνη) και πρότειναν ότι σε δομές με μικρό βάρος, η μεταβολή της πυκνότητας μπορεί να αυξήσει τη δύναμη και την SEA, αφού η δομή συνεχίζει να παραμορφώνεται σε μεγαλύτερες τιμές, δηλαδή αυξήθηκε η densification strain. Η συμπεριφορά TPU honeycomb έχει μελετηθεί και από άλλους μελετητές [13]. Και εδώ παρατηρήθηκε αύξηση της SEA σε μεγάλες τιμές παραμόρφωσης, ενώ σε μικρές η ομοιόμορφη δομή φάνηκε να είναι πιο αποτελεσματική. Τέλος, οι H. Niknam and A.H. Akbarzadeh [14] διεξήγαγαν μια πλήρη έρευνα για διάφορους τύπους μεταβολής της πυκνότητας και σε πολλές τοπολογίες κυψελίδων (Truss-like lattices, Shell-like lattices, Schwarz D and 2D lattices-honeycombs). Παρατήρησαν ότι η μεταβολή της πυκνότητας κάθετα την διεύθυνση της φόρτισης οδήγησε σε υψηλή SEA από την αρχή έως την τελική παραμόρφωση. Αντιθέτως, η μεταβολή παράλληλα την διεύθυνση της φόρτισης, συνεπάγεται μικρότερες τιμές της SEA ενώ οι τάσεις μειώθηκαν.

Έτσι, από τις παραπάνω αναφορές αλλά και πολλές άλλες, κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα ειδικής ενέργειας απορρόφησης ως προς την πυκνότητα. Από αυτό καταλήγουμε στο ότι η μεταβολή της πυκνότητας στη δομή μπορεί να ενισχύσει την απόδοση και να αυξηθεί η SEA. Το ίδιο ισχύει και όταν οι δομές αυτές ενισχύονται με αφρό, αν και σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται και το βάρος, το οποίο γενικά θέλουμε να διατηρήσουμε χαμηλό. Ωστόσο, οι δισδιάστατες δομές ενισχυμένες με αφρό φαίνεται να παραμένουν πιο ελαφρές από τα μεταλλικά 3D lattices, πετυχαίνοντας SEA αρκετά κοντά σε αυτά. Επίσης, συμπεράνουμε ότι οι πλεγματικές δομές δίνουν ψηλότερη SEA όταν φορτίζονται σε δυναμικά ή κρουστικά φορτία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προτείνεται μελλοντικά να διεξαχθούν μελέτες για honeycombs από PEEK ή Nylon12, καθώς δίνουν αρκετά καλές ιδιότητες και μικρό βάρος. Επίσης, να ελεγχθεί η συμπεριφορά τους με ενίσχυση με αφρό, με μεταβολή της πυκνότητας στη δομή διατηρώντας το βάρος σταθερό, αλλά και με τον συνδυασμό αυτών ταυτόχρονα. Σκοπός είναι να καταλήξουμε σε μια δομή χαμηλού βάρους και υψηλής ειδικής ενέργειας απορρόφησης για χρήση σε αεροδιαστημικές και όχι μόνο εφαρμογές.

Ειδική ενέργεια απορρόφησης Αφρών

Στην συνέχεια κατασκευάσαμε ένα διάγραμμα SEA – ρ για διάφορα είδη αφρών. Από αυτό καταλέξαμε ότι ο αφρός Rohacell/PMI και PVC προσφέρουν την υψηλότερη SEA, και ακολουθούν οι αφροί EPP, PU και PES. Έτσι στο επόμενο κεφάλαιο της διπλωματικής το honeycomb θα ενισχυθεί με Rohacell, καθώς έδειξε την καλύτερη σχέση SEA – ρ από το διάγραμμα.

Beyond state of the art

Από τη βιβλιογραφία βρήκαμε ότι έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες για την συμπεριφορά των gradient δομών συγκριτικά με τις ομοιόμορφες και κυρίως σε δομές όπου η πυκνότητα μεταβάλλεται παράλληλα στην διεύθυνση της φόρτισης, με μικρότερο βάρος στο πάνω μέρος που έρχεται σε επαφή με τον προσκρουστήρα και μεγαλύτερο βάρος στη βάση. Ωστόσο, δεν βρέθηκε καμία έρευνα που να μελετά την επίδραση της μεταβαλλόμενης πυκνότητας σε hexagonal honeycomb από θερμοπλαστικό υλικό Nylon12. Συνεπώς στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε με την συμπεριφορά Nylon12 hexagonal honeycombs με

μεταβαλλόμενη πυκνότητα, όχι μόνο με τον προαναφερθέντα τρόπο άλλα θα εξερευνήσουμε διάφορες τοπολογίες μεταβολής της πυκνότητας, παράλληλα, κάθετα και σε γωνία με την διεύθυνση φόρτισης.

Ακόμη, δεν έχουν γίνει μελέτες για την συμπεριφορά Nylon12 honeycomb με ενίσχυση αφρού αλλά και ούτε έχει μελετηθεί η επίδραση Rohacell αφρού ως ενίσχυση σε honeycomb. Συνεπώς σε επόμενο κεφάλαιο της διπλωματικής θα μελετηθεί πως αλλάζουν οι ιδιότητες ενός Nylon12 honeycomb αν γεμίσουμε τα κενά με Rohacell αφρό.

Τέλος, θεωρήσαμε πολύ ενδιαφέρον να δούμε την συμπεριφορά μιας δομής εάν συνδυάσουμε και τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους. Έτσι, στο τελευταίο κεφάλαιο μελετάμε ένα honeycomb μεταβλητής πυκνότητας και ενισχυμένο με αφρό.

Προσομοίωση και εγκυρότητα του μοντέλου

Αφού στηθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων για το honeycomb με 12x13 unit cells στο LS-DYNA, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων (mesh sensitivity analysis). Μελετήθηκε η συμπεριφορά του honeycomb με 2, 3, 4 και 6 στοιχεία ανά πλευρά κάθε κυψελίδας και καταλήξαμε ότι η σύγκλιση των αποτελεσμάτων γίνεται από τα τέσσερα στοιχεία (1.125mm x 1.112mm) και έπειτα. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση της μέγιστης αρχικής τάσης, της μέσης τάσης, της densification strain και της SEA σε παραμόρφωση 0.65 και σε ϵ_d του μοντέλου με μέγεθος στοιχείων 1.125mm x 1.112mm με τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης [31] και το σφάλμα που προέκυψε ήταν μέχρι 6.2% υποδεικνύοντας ότι η προσομοίωση ήταν αρκετά ακριβής.

Επίδραση μεγέθους της δομής

Ακολούθησε μελέτη για την επίδραση του μεγέθους – αριθμού των μοναδιαίων κυψελίδων του honeycomb στην συμπεριφορά του. Honeycombs με 4 x 5, 6 x 7, 8 x 9, 10 x 11 and 12 x 13 (αρχικό μοντέλο) unit cells υποβλήθηκαν σε ψευδοστατική θλίψη και από τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης φαίνεται ότι μικραίνοντας τον αριθμό των unit cells η καμπύλη μεταφέρεται προς τα πάνω και οι ταλαντώσεις είναι μικρότερες σε αριθμό και σε πλάτος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ταλαντώσεις σχετίζονται με τις collapse zones, που δημιουργούνται όταν δυο σειρές έρθουν σε επαφή.

Συνεπώς στα μεγαλύτερα honeycombs που έχουν περισσότερες σειρές από unit cells θα υπάρχουν και περισσότερες τέτοιες ζώνες άρα και ταλαντώσεις. Γενικά όλα τα μεγέθη φαίνεται να υπερεκτιμούν τις ιδιότητες συγκριτικά με το αρχικό μοντέλο, ωστόσο για honeycombs με 8x9 unit cells και παραπάνω παρατηρείται έντονη ομοιότητα στη συμπεριφορά και τις ιδιότητες. Οπότε, το honeycomb με 8x9 unit cells επιλέγεται για την συνέχεια της διπλωματικής, καθώς έτσι μειώνεται ο χρόνος προσομοίωσης διατηρώντας τα αποτελέσματα κοντά στην αρχική γεωμετρία.

MATLAB

Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας της προσομοίωσης και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε ένας κώδικας στο MATLAB.

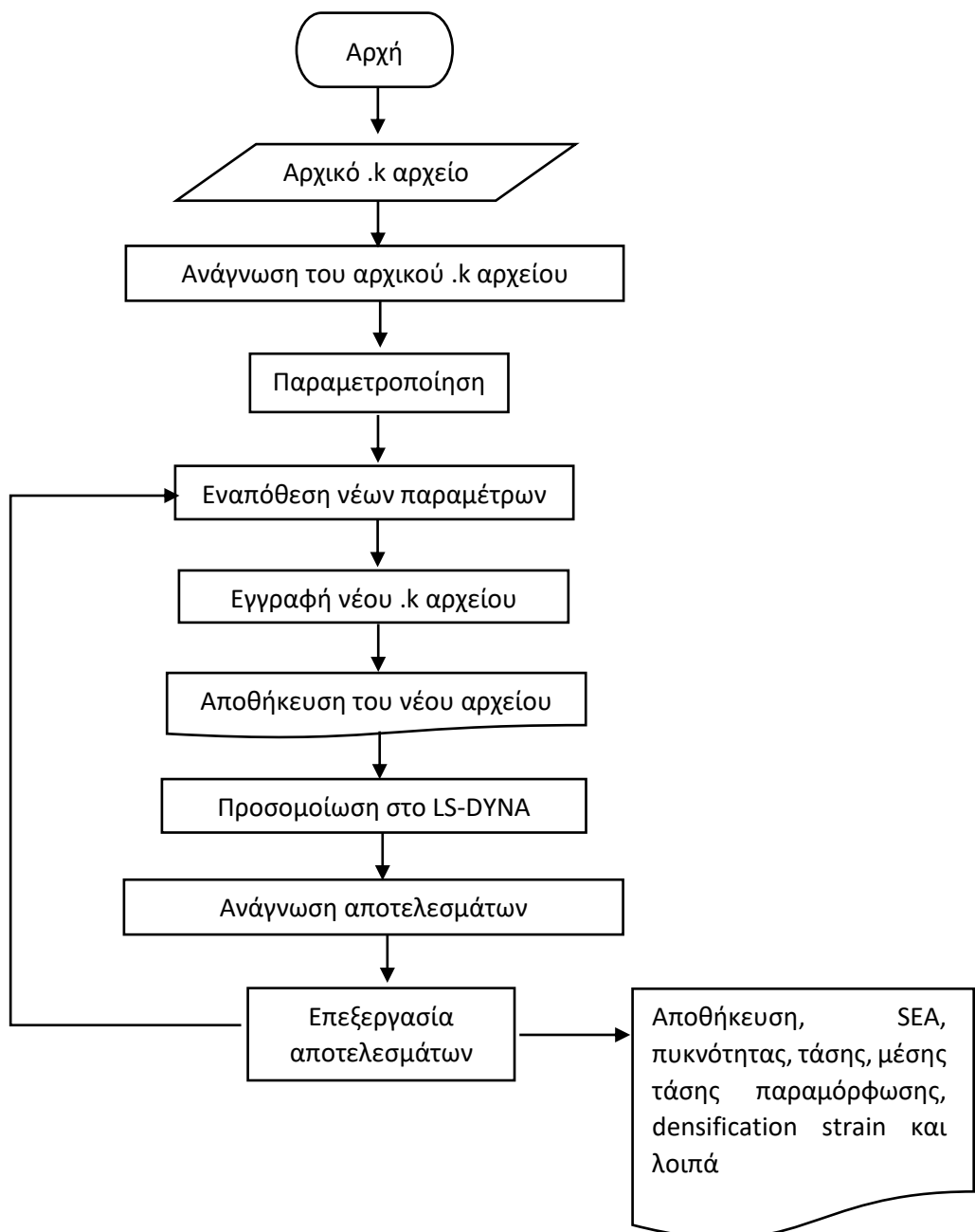
Ένα αρχικό αρχείο, όπου έχει το βασικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, διαβάζεται και τροποποιείται κατάλληλα ώστε να δημιουργηθεί το τελικό αρχείο της προσομοίωσης.

Για την περίπτωση της μεταβλητής πυκνότητας, το αρχικό αρχείο αποτελεί το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στις προηγούμενες προσομοιώσεις και απλώς σε κάθε επανάληψη αλλάζει το πάχος του κάθε unit cell (γιατί αλλάζοντας το πάχος αλλάζει και η πυκνότητα) σύμφωνα με μια αναλυτική εξίσωση. Για τις προσομοιώσεις με αφρό, το αρχικό αρχείο είναι ένα .k αρχείο όπου στο honeycomb έχει μπει αφρός στους χώρους εσωτερικά των κυψελίδων του. Εδώ, σε κάθε επανάληψη μεταβάλλεται η πυκνότητα του αφρού. Τέλος, η παραμετροποίηση του τρίτου μοντέλου με αφρό και μεταβαλλόμενης πυκνότητας δομή υποδηλοί την αλλαγή του πάχους κάθε unit cell και του αφρού.

Αφού γίνουν οι κατάλληλες παραμετροποιήσεις γίνεται αυτόματα η προσομοίωση στο LS-DYNA και έπειτα διαβάζονται, επεξεργάζονται και αποθηκεύονται τα αποτελέσματα για μελλοντική χρήση.

Με αυτό τον τρόπο ελέγχουμε όλο το φάσμα των λύσεων. Αντίθετα, αν χρησιμοποιούσαμε βελτιστοποιητές του MATLAB (optimizers) θα γλυτώναμε χρόνο αλλά ίσως κάποια πιθανή λύση να χανόταν.

Το διάγραμμα ροής του κώδικα παρουσιάζεται ενδεικτικά παρακάτω.



Προσομοίωση Tailored Honeycomb

Μελετήθηκαν οκτώ διαφορετικές περιπτώσεις μεταβολής της πυκνότητας του honeycomb.

- i. Ομοιόμορφη κατανομή
- ii. Μεταβολή πυκνότητας από την μία πλευρά στην άλλη

Gradient A – Κατά τη διεύθυνση της φόρτισης

Gradient A_N – Κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης

- iii. Μεταβολή πάχους με περισσότερη πυκνότητα στη μέση της δομής και μικρότερη στα δύο άκρα

Gradient B – Παράλληλα με τη διεύθυνση της φόρτισης

Gradient B_N - Κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης

- iv. Μικρότερα πάχη στη μέση και μεγαλύτερα στο άκρα

Gradient C - Παράλληλα με τη διεύθυνση της φόρτισης

Gradient C_N - Κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης

- v. Μεταβολή πυκνότητας σε γωνία 45 μοιρών από τον κατακόρυφο άξονα.

Gradient D_1 – Μεγαλύτερης πυκνότητας τα unit cells προς το πάνω

Gradient D_2 - Μεγαλύτερης πυκνότητας τα unit cells προς το κάτω

Η μεταβολή του πάχους είναι κλιμακωτή για κάθε παράμετρο κατανομής α . Η μεταβλητή α είναι ο λόγος της μεγαλύτερης τιμής του πάχους της δομής προς την μικρότερη. Το α παίρνει τις τιμές 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 και 0.8, ώστε οι τιμές του πάχους να είναι μεταξύ 0.5mm και 1.5mm.

Παραμόρφωση

Από την παραμόρφωση της κάθε δομής φαίνεται ξεκινά από τις γραμμές με την μικρότερη πυκνότητα, καθώς αντιστέκονται λιγότερο στην παραμόρφωση, συνεχίζοντας προς τις στρώσεις με μεγαλύτερα πάχη – πυκνότητα. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο ευδιάκριτο στις δομές με μεταβολή της πυκνότητας παράλληλα στην διεύθυνση της φόρτισης όπου η παραμόρφωση συμβαίνει σειρά – σειρά. Αντίθετα σε μεταβολές πυκνότητας κάθετα στην φόρτιση, οι δομές παρουσιάζουν πιο ασταθή παραμόρφωση. Τα unit cells με μικρό πάχος παραμορφώνονται πρώτα, αφού δεν αντέχουν την φόρτιση, αλλά εκείνα με το μεγαλύτερο πάχος που βρίσκονται στην ίδια σειρά έρχονται σε επαφή νωρίτερα δημιουργώντας μια ανομοιόμορφη παραμόρφωση. Τέλος, στις δομές που έχουν μεταβολή πάχους σε γωνία η παραμόρφωση είναι ομαλή γραμμή – γραμμή με την περιοχή που είναι συγκεντρωμένα τα παχύτερα unit cells να συμπιέζεται πλήρως πρώτη.

Επίδραση στις ιδιότητες

Για τα Gradients A, B, C δεν υπάρχει πλατώ στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και η τάσεις αυξάνονται συνεχώς με την αύξηση της παραμόρφωσης, μειώνοντας τις

αρχικές τάσεις που δέχεται η δομή και οδηγώντας σε αύξηση της densification strain. Αντίθετα στα Gradients A_N , B_N and C_N η ϵ_d μικραίνει και στις αντίστοιχες καμπύλες υπάρχει πλατώ, ενώ οι αρχικές τάσεις παραμένουν ίσες ή αυξάνονται συγκριτικά με την ομοιόμορφη δομή. Στα Gradients D_1 και D_2 οι τάσεις τους αυξάνονται με την παραμόρφωση, αλλά όχι τόσο απότομα όσο συνέβαινε στα Gradients A , B , C . Στα αρχικά στάδια της παραμόρφωσης 10% η τάσεις είναι μικρότερες από αυτές της ομοιόμορφης δομής αλλά στη συνέχεια αυξάνονται.

Συνεπώς οι δομές με μεταβολή πυκνότητας παράλληλα στον άξονα της φόρτισης φαίνεται να προσφέρουν καλές ιδιότητες και να απορροφούν μεγαλύτερη ενέργεια σε συνθήκες μεγάλης παραμόρφωσης, ενώ στα αρχικά στάδια της θλίψης κρατούν την τάση σε χαμηλές τιμές. Συγκεκριμένα, τα Gradients A_1 and A_2 , B και D_1 αύξησαν την SEA μέχρι και 30% (για $\alpha=0.5$), 21.4% (για $\alpha=0.3$) and 16% (για $\alpha=0.4$) αντιστοίχως, ενώ οι αρχικές τάσεις μειώθηκαν από 36-37.1%, 65.2% και 8%. Συνεπώς, αυτές οι δομές θα μπορούσαν να θεωρηθούν ωφέλιμες για εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής και των σπορ.

Foam filled Honeycombs

Honeycombs ενισχύθηκαν με αφρό Rohacell τριών διαφορετικών πυκνοτήτων 51 kg/m³, 71kg/m³ και 110 kg/m³ και προσομοιώθηκαν στο LS-DYNA.

Αρχικά δοκιμάστηκαν διάφορα στοιχεία για την μοντελοποίηση του αφρού, όπως εξαγωνικά με πεντάεδρα (με 16 και 32 στοιχεία στην περιοχή εσωτερικά μιας κυψελίδας) και μόνο εξαγωνικά (24 στοιχεία γέμιζαν τον χώρο εσωτερικά μιας κυψελίδας). Και στις τρεις περιπτώσεις η συμπεριφορά ήταν σχεδόν ίδια, αλλά καταλήξαμε στη μοντελοποίηση του αφρού με εξαγωνικά - πεντάεδρα στοιχεία γιατί πληρούσαν τις προδιαγραφές για την ποιότητα των στοιχείων.

Επίδραση αφρού στην παραμόρφωση

Στο άδειο honeycomb η παραμόρφωση τοπικοποιείται και γίνεται σειρά προς σειρά. Ενώ η συμπεριφορά του μπορεί να χαρακτηριστεί ως stretch-dominated, καθώς στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης έχει ταλαντώσεις. Αντίθετα στα honeycombs με αφρό όταν οι τα τοιχώματα των κυψελίδων τείνουν να λυγίσουν ο αφρός εμποδίζει την κίνηση αυτή και για αυτό και η τάση στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης αυξάνεται. Επίσης για τις υψηλότερες πυκνότητες αφρό παρατηρείται ότι η καμπύλη έχει strain hardening effect καθώς ο αφρός δίνει μεγαλύτερη στήριξη στη δομή.

Τα τρία honeycombs με τις διαφορετικές πυκνότητες αφρού και το αρχικά άδειο φαίνεται να παραμορφώνονται το ίδιο αρχικά για τιμή παραμόρφωσης 0.1, αλλά σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις το μοτίβο που παραμορφώνονται αλλάζει. Τα unit cells στα honeycombs με την μικρότερη πυκνότητα παραμορφώνονται περισσότερο από ότι στη δομή με μεγαλύτερη πυκνότητα αφρού. Όταν η πυκνότητα του αφρού είναι 51kg/m^3 η collapse zone δημιουργείται στο κάτω μέρος της δομής και με καθυστέρηση, σε αντίθεση με το άδειο honeycomb όπου παρατηρείται στις πρώτες σειρές των unit cell και στα πρώτα στάδια της παραμόρφωσης. Όταν η πυκνότητα του αφρού είναι 71kg/m^3 η παραμόρφωση του honeycomb παίρνει ένα μοτίβο τύπου ">" ενώ για πυκνότητα 110kg/m^3 δεν παρατηρούνται ευδιάκριτες collapse zones.

Σε αντίθεση με το άδειο honeycomb, αυτά με αφρό επηρεάζονται παντού στη δομή από την θλίψη και όχι μόνο σε περιοχές κοντά στις collapse zones. Η παραμόρφωση δεν είναι πλέον τύπου διάτμησης (όπως ήταν στην άδεια δομή), αλλά φαίνεται ότι με τον αφρό το σχήμα των κυψελίδων από εξαγωνικό καθώς παραμορφώνονται παίρνει την δομή re-entrant που είναι γνωστή ως δομή που δίνει αρνητικό λόγο Poisson. Λόγω αυτής της δομής το μοτίβο της παραμόρφωσης αλλάζει από τοπικό σε ολικό και για αυτό στις καμπύλες τάσεις παραμόρφωσης των δομών με αφρό παρατηρούνται λιγότερες ταλαντώσεις. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ενώ τα άδεια honeycombs έχουν την συμπεριφορά μιας stretching-dominated δομής, τα honeycombs με αφρό έχουν bending-dominated συμπεριφορά. Το οποίο βρέθηκε και στη μελέτη του Li et al. [8].

Επίδραση αφρού στις ιδιότητες

Ενισχύοντας τα honeycombs με αφρό καταλήξαμε σε δομές με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, αρχικές τάσεις, μέσες τάσεις και SEA, και όσο περισσότερο αυξανόταν η πυκνότητα της δομής (λόγω της πυκνότητας του αφρού) τόσο μεγαλύτερη ήταν η αύξηση αυτών των ιδιοτήτων. Συγκεκριμένα η ειδική απορροφώμενη ενέργεια αυξήθηκε 60%, 92% και 150% όταν ο αφρός ήταν 51 kg/m^3 , 71 kg/m^3 και 110 kg/m^3 , αντίστοιχα, ενώ η πυκνότητα αυξήθηκε μόλις 19%, 27% και 41%. Η SEA της δομής με αφρό μεγάλωσε σε σχέση με το άδειο honeycomb, ωστόσο παρέμεινε μικρότερη από την SEA του αφρού. Επίσης, ο αφρός είχε επίδραση και στην densification strain καθώς μειώθηκε από 0.63 σε 0.59-0.6. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η πυκνότητα δεν έπαιξε ρόλο στο ποσοστό μείωσης της ϵ_D , το οποίο βρέθηκε και στη μελέτη του Liu και των συνεργατών του [7], αφού βρέθηκε περίπου η ίδια τιμή και στις τρεις περιπτώσεις.

Honeycombs με αφρό και με μεταβλητή πυκνότητα

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις συμπεραίνεται ότι κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις, ενίσχυση της δομής με αφρό ή μεταβολή της πυκνότητάς της, προσέφεραν θετικά και αρνητικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα με τον αφρό αυξήθηκε η αντοχή και σημαντικά η ειδική ενέργεια απορρόφησης, αλλά αυξήθηκαν και οι αρχικές τάσεις, μειώθηκε η densification strain και αυξήθηκε το βάρος της κατασκευής. Από την άλλη, μεταβάλλοντας την πυκνότητα της δομής, συγκεκριμένες τοπολογίες οδήγησαν σε μικρότερες αρχικές τάσεις και σε αύξηση της ϵ_d . Αύξηση σημειώθηκε και στην SEA, όμως όχι τόσο πολύ όσο στην μέθοδο του αφρού. Οπότε για να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα κάθε μεθόδου θεωρήσαμε πολύ ενδιαφέρον να δούμε την επίδραση και των δύο ταυτόχρονα σε μία δομή. Έτσι στη συνέχεια της διπλωματικής μελετάτε η συμπεριφορά honeycomb με αφρό και μεταβλητή πυκνότητα. Η τοπολογίες για την κατανομή του πάχους είναι οι Gradient A₂ και B και με $\alpha=0.3$, καθώς αυτές είχαν την καλύτερη απόδοση SEA και χαμηλών αρχικών τάσεων. Ο αφρός που επιλέχθηκε ως ενισχυτικό είναι ο ίδιο των προηγούμενων κεφαλαίων: Rohacell με πυκνότητες 51 kg/m³, 71 kg/m³ και 110 kg/m³.

Μοτίβο Παραμόρφωσης

Σε χαμηλές τιμές παραμόρφωσης και στο Gradient A₂ και στο Gradient B με αφρό φαίνεται να κυριαρχούν τα χαρακτηριστικά της μεταβαλλόμενης πυκνότητας, καθώς η παραμόρφωση ξεκινά από τις σειρές όπου βρίσκονται τα λεπτότερα – ελαφρύτερα unit cells. Όταν οι τιμές της παραμόρφωσης αυξάνονται, ο αφρός αρχίζει να επιδρά, καθυστερώντας τον λυγισμό των τοιχωμάτων των κυψελίδων της δομής και συγκρατώντας τα. Έτσι καθυστερεί την αστοχία και η παραμόρφωση συμβαίνει ολικά στη δομή και όχι μόνο σειρά προς σειρά όπως γίνεται στο άδειο honeycomb μεταβλητής πυκνότητας. Έτσι ο αφρός και στην περίπτωση της κατανομής της πυκνότητας, όπως και όταν η δομή ήταν ομοιόμορφη, κάνει τη δομή να έχει συμπεριφορά bending-dominated. Το σχήμα των κυψελίδων από εξαγωνικό γίνεται re-entrant, όπως και στην ομοιόμορφη δομή με αφρό. Το σχήμα αυτό κατά την συμπίεση τείνει να στρέφει προς τα μέσα τα τοιχώματα της κυψελίδας με αποτέλεσμα η πλήρη συμπίεση να συμβαίνει νωρίτερα, από ότι στο αντίστοιχο gradient άδειο honeycomb.

Ιδιότητες

Οι καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης των δομών αυτών φαίνεται να συνδυάζουν την συμπεριφορά και των δύο μεθόδων. Με την αύξηση της πυκνότητας του αφρού οι καμπύλες μετακινούνται προς τα πάνω ενώ έχουν πιο πολλές ταλαντώσεις από τις ομοιόμορφες δομές με αφρό, και αυτό λόγω τις μεταβαλλόμενης πυκνότητάς τους που συμβάλει στην αστοχία των λεπτότερων και έπειτα των παχύτερων σειρών. Επίσης, παρατηρείται strain hardening effect, καθώς η τάση αυξάνεται όσο αυξάνεται η παραμόρφωση. Συγκριτικά με τα foam filled honeycombs με ομοιόμορφη κατανομή πυκνότητας, εδώ οι αρχικές τάσεις μειώνονται ενώ η densification strain αυξάνεται, λόγω της συμβολής της gradient τοπολογίας. Σε μικρότερες πυκνότητες αφρού κυριαρχεί η συμπεριφορά της τοπολογίας της μεταβαλλόμενης πυκνότητας, ενώ όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα τόσο πιο πολύ επιδρά ο αφρός στην συμπεριφορά. Για αυτό και οι αρχικές τάσεις μειώνονται περισσότερο όταν η πυκνότητα του αφρού είναι 51kg/m^3 και λιγότερο όταν είναι 110kg/m^3 . Ακόμα, τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η μέση τάση αυξήθηκαν σε σχέση με τα άδεια honeycomb με την αντίστοιχη μεταβολή πυκνότητας, ενώ σε σχέση με την ομοιόμορφη δομή με αφρό το μέτρο ελαστικότητας μειώθηκε και η μέση τάση ήταν μεγαλύτερη.

Ως αποτέλεσμα της αύξησης της densification strain και της μέσης τάσης, έχουμε και αύξηση της SEA. Συγκεκριμένα η SEA αυξήθηκε περισσότερο στην δομής με την μικρότερη πυκνότητα αφρού 51kg/m^3 κατά 31.9% για Gradient A₂ honeycombs, ενώ 12.7% για Gradient B σε σχέση με το ομοιόμορφο honeycomb με αφρό. Όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα του αφρού, τόσο μικρότερη η αύξηση της ειδικής ενέργειας απορρόφησης συγκριτικά με την ομοιόμορφη δομής με αφρό.

Συνεπώς η συμβολή και των δύο μεθόδων σε μια δομή επέφερε θετικά αποτελέσματα καθώς η SEA αυξήθηκε διατηρώντας τις αρχικές τάσεις σε ένα καλό επίπεδο και το βάρος σχετικά μικρό.

Μελλοντικές Προτάσεις

Το παραπάνω συμπεράσματα προκύπτουν από προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων όπου οι ατέλειες των πραγματικών εκτυπωμένων δοκιμών αμελούνται. Για αυτό είναι σημαντικό να γίνει και πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς των προαναφερόμενων δομών ώστε να εξακριβωθούν τα αποτελέσματα και να έχουμε μια ρεαλιστική και πλήρη εικόνα των μηχανικών ιδιοτήτων αυτών των δομών. Ακόμη, καλό θα ήταν να μελετηθεί η επίδραση των μεθόδων που αναλύθηκαν σε αυτή τη διπλωματική (ενίσχυση με αφρό και μεταβλητή πυκνότητα) και σε φορτίσεις κάθετα στον άξονα των honeycomb.

Τέλος, προτείνεται να μελετηθεί και η συμβολή άλλου είδους αφρού σε τέτοιες δομές, και προτείνουμε το αφρό PVC, καθώς ήταν ο αμέσως επόμενος υποψήφιος μετά τον Rohacell, σύμφωνα με την μελέτη που κάναμε.

Αναμένουμε να εξελιχθεί και άλλα ο κλάδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς δομές τέτοιου είδους θα μπορούν να κατασκευαστούν ακόμα πιο εύκολα ανοίγοντας το δρόμο για νέα υλικά, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και προσφέροντας ευελιξία και πολλά οφέλη στους τομείς της εμβιομηχανικής, αεροναυπηγικής, των σπορ, της αυτοκινητοβιομηχανίας, των μεταφορών και σε πολλούς άλλους βιομηχανικούς κλάδους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΩΝ

EA (Energy Absorption)	Ενέργεια Απορρόφησης
SEA (Specific Energy Absorption)	Ειδική Ενέργεια Απορρόφησης (EA διαιρεμένη με την πυκνότητα της κατασκευής)
Densification strain (ϵ_d)	Η παραμόρφωση κατά την οποία η δομή έχει παραμορφωθεί/ συμπιεστεί πλήρως.
Honeycomb – 2D lattice	Η μοναδιαία κυψελίδα επαναλαμβάνεται και δημιουργεί ένα δισδιάστατο επίπεδο, το οποίο επεκτείνεται έπειτα στην τρίτη διεύθυνση.
Lattice Structure	Πρισματικές δομές που αποτελούνται από ράβδους συνδεδεμένες με διαφορετικούς προσανατολισμούς
Unit cell	Μοναδιαία κυψελίδα, στοιχείο που επαναλαμβάνεται στο χώρο για να δημιουργηθεί η τελική δομή.
Gradient Structures	Δομές με μεταβαλλόμενη πυκνότητα
Bending- dominated	Η αστοχία ξεκινά από κάμψη
Stretching-dominated	Η αστοχία ξεκινά από λυγισμό
Collapse zone	Η περιοχή (ζώνη) όπου γίνεται έντονη και οπτικοποιείται η αστοχία των σειρών κυψελωτών δομών
Foam filled Honeycombs	Δισδιάστατες κυψελωτές δομές ενισχυμένες με αφρό
Out-of-plane direction	Διεύθυνση κάθετα στο επίπεδό μιας δομής
In-plane direction	Διεύθυνση παράλληλη στο επίπεδό μιας δομής
Re-entrant	Τύπος – γεωμετρία μοναδιαίας κυψελίδας όπου οι ακμές στρέφονται προς το κέντρο της. Είναι μετατροπή του εξαγωνικού honeycomb που προκύπτει για αρνητικούς λόγους Poisson