



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΙΑΣ ΑΥΞΗΤΙΚΗΣ ΣΟΛΑΣ
ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Επιβλέπων Καθηγητής | Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης
Φοιτητής | Ματθαίος Ν. Αλιώπης

Πρόλογος

Την άνοιξη του 2015 η Nike κατοχύρωσε με την πατέντα¹ US 2015/0075033A1 μια “αυξητική σόλα”, μια σόλα που λειτουργεί αυξητικά ενώ είναι κατασκευασμένη από μη αυξητικό, κοινό υλικό. Η σόλα αυτή έχει κάποιες αστεροειδής κάθετες τρύπες σε όλη την επιφάνειά του όγκου της, οι οποίες την δίνουν την ιδιότητα της αυξητικής συμπεριφοράς σαν αυτή να ήταν κατασκευασμένη από ένα αυξητικό υλικό. Στην παρούσα εργασία θα συγκρίνουμε την συμπεριφορά της αυξητικής αυτής σόλας σε σχέση με μια απλή, συμπαγής και χωρίς τρύπες σόλα και μίας σόλας με κυκλικές τρύπες.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κ. Γεώργιο Ε. Σταυρουλάκη για την ανάθεση του θέματος και την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε ώστε να ολοκληρωθεί ομαλά αυτή η εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδακτορικό φοιτητή και φίλο κ. Γιάννη Κωνσταντίνο για την αμέριστη συμπαράσταση καθ’ όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης εργασίας.

Σ.1. Στο τέλος της ενότητας 1, παρατίθεται το έγγραφο κατοχύρωσης της πατέντας το οποίο δείχνει με λεπτομέρειες την μορφή της αυξητικής σόλας.

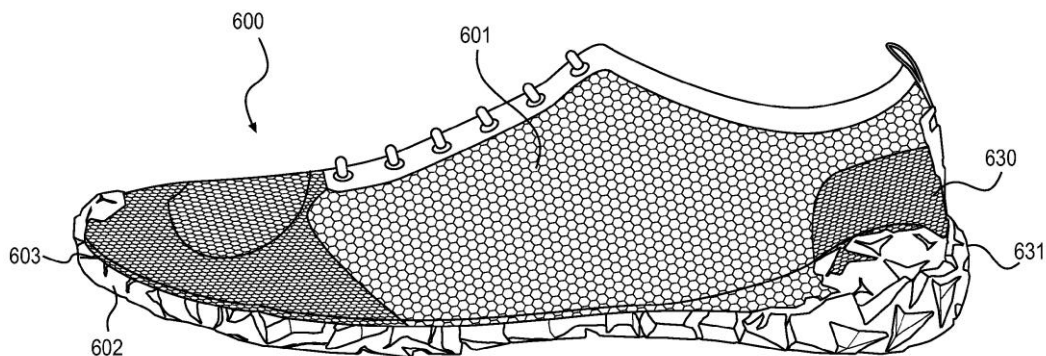
Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
1 Εισαγωγή	5
1.1 Ιστορική Ανασκόπηση	5
1.2 Αυξητικά υλικά – Αυξητικές δομές.....	6
1.3 Η αυξητική σόλα	9
2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν	11
2.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	11
2.2. PRO/ENGINEERING	13
2.3 Comsol Multiphysics	15
3 Σχεδιασμός των δοκιμών.....	17
3.1 Αυξητική σόλα (star).....	18
3.2 Σόλα με κυκλικές εγκοπές	22
3.2 Συμπαγής Σόλα	25
3.3 Ενδιάμεση Σόλα	25
3.4 Συναρμολόγηση – Τελικό μοντέλο	26
4 Μεθοδολογία της Ανάλυσης	27
4.1 Στάδια της Ανάλυσης.....	27
4.2 Παρουσίαση των μοντέλων.....	28
5 Μοντελοποίηση στο COMSOL MULTIPHYSICS	31
5.1 Καθορισμός περιβάλλοντος	32
5.2 Προσδιορισμός τύπου ανάλυσης.....	33
5.3 Εισαγωγή του μοντέλου	34
5.4 Προσδιορισμός υλικών, των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του Μοντέλου	34
5.5 Πλεγματοποίηση (Meshing)	37
5.6 Επίλυση και Συλλογή αποτελεσμάτων	38
6 Αποτελέσματα Της Ανάλυσης	39
6.1 Στατική Ανάλυση	41
6.2 Δυναμική ανάλυση	49
7 Συμπεράσματα και επεκτάσεις	63
Βιβλιογραφία	64

1 | Εισαγωγή

1.1 | Ιστορική Ανασκόπηση

Η ιστορία του παπουτσιού είναι βέβαια πανάρχαια, ταυτισμένη με την ιστορία του ανθρώπου, αφού καλύπτει μια βασική ανάγκη του. Από το 14.000 π.Χ. έχουν βρεθεί αναπαραστάσεις με ανθρώπους που φορούν υποδήματα. Τον 19ο αιώνα στις ΗΠΑ, αναπτύσσεται συστηματικά η παραγωγή υποδημάτων, αλλά και για πρώτη φορά στην ιστορία παράγονται ζευγάρια, δηλαδή διαφορετικό παπούτσι για το αριστερό και διαφορετικό για το δεξί πόδι - μέχρι τότε ήταν ίδια και για τα δυο πόδια! Ταυτοχρόνως αρχίζουν να λειτουργούν τα πρώτα εμπορικά καταστήματα, ενώ και στην Ευρώπη, ανοίγουν τις πόρτες τους οι πρώτοι Οίκοι Υποδηματοποιείας, πολλοί εκ των οποίων λειτουργούν ως σήμερα. Η είσοδος του 20^{ου} αιώνα, με τη δραματική εξέλιξη της τεχνολογίας και την εμπορική ανάπτυξη θα φέρει βέβαια και την αντίστοιχη ανάπτυξη στον χώρο του παπουτσιού με τη μόδα πλέον να παίζει τον πρώτο ρόλο και τα χρώματα, τα σχέδια και τα υλικά να ποικίλουν ανά εποχή. Σήμερα πια, το παπούτσι είναι αναπόσπαστο κομμάτι της αισθητικής όλων μας, με άπειρες επιλογές για τον καθένα τόσο στα σχέδια και τα υλικά όσο και βέβαια στο κόστος. Η ταχύρυθμη ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης των υλικών στα τέλη του 20^{ου} αιώνα συνδέεται άμεσα με την βιομηχανία των υποδημάτων. Οι κατασκευάστριες εταιρίες έχουν πλέον μια σημαντική θέση στην παγκόσμια οικονομία και ως εκ τούτου είναι μεγάλα τα ποσά που δαπανούνται στην έρευνα που αφορά τα υλικά με τα οποία θα κατασκευάσουν τα υποδήματα. Την άνοιξη του 2015 η Nike πατένταρε μια αυξητική σόλα. Χρησιμοποιώντας τρύπες που μοιάζουν με αυξητικές κυψέλες (στην περίπτωση μας αστεροειδούς μορφής) αντιστρέφεται η γωνιά μιας μονάδας κελιού σε αρνητική. Στην αυξητική δομή με την αντιστροφή της γωνίας μεταβάλλεται και ο λόγος Poisson σε αρνητικές τιμές.



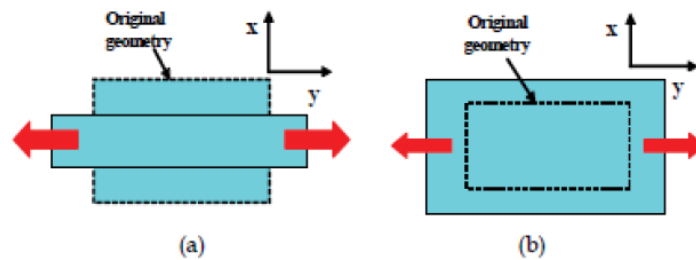
1.2 | Αυξητικά υλικά – Αυξητικές δομές

Η σύγχρονη τεχνολογία απαιτεί νέα υλικά ειδικών ιδιοτήτων. Ένας από τους λόγους για τον οποίο υπάρχει ενδιαφέρον για υλικά με ασυνήθιστες μηχανικές ιδιότητες προέρχεται από το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες για να σχηματίσουν σύνθετα με άλλα υλικά τα οποία έχουν κάποιες επιθυμητές ιδιότητες, π.χ. ηλεκτρικές, μαγνητικές, και άλλου τύπου ιδιότητες. Ένα νέο πεδίο δραστηριότητας είναι η μελέτη υλικών που παρουσιάζουν αρνητικό λόγο Poisson (NPR). Μεγάλης κλίμακας κυτταρικές δομές με ιδιότητες αρνητικού λόγου Poisson NPR εισήχθησαν για πρώτη φορά το 1982 με τη μορφή δισδιάστατων κυψελών από ελαστική σιλικόνη ή αλουμίνιο τα οποία παραμορφώθηκαν με την κάμψη των νευρώσεων (Gibson, et al, 1982 & 1988).

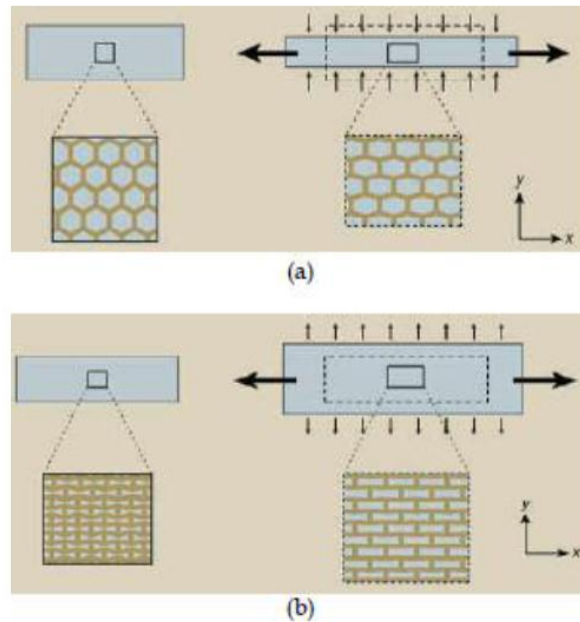
Το 1987, ο Lakes ανέπτυξε για πρώτη φορά τον αφρό πολυουρεθάνης με αρνητικό λόγο Poisson με αυξητική δομή (Lakes, 1987a and 1987b). Αυτός ο πολυμερής αφρός είχε λόγο Poisson -0,7. Αυτά τα νέου τύπου υλικά ονομάστηκαν αυξητικά από τον Evans (Evans, et al, 1991), τα οποία σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά (όπως το καουτσούκ, γυαλί, μέταλλα, κ.λπ.) έχουν την ιδιότητα να γίνονται παχύτερα όταν τεντώνονται, ή να γίνονται λεπτότερα όταν συμπιέζονται. Ο όρος αυξητικά "Auxetics" προέρχεται από την Ελληνική λέξη αυξητικός, που σημαίνει «εκείνο το οποίο μπορεί να αυξηθεί».

Τα αυξητικά υλικά είναι γνωστά για πάνω από 100 χρόνια, παρόλα αυτά ειδικά στην αρχή δεν δόθηκε αρκετή προσοχή σε αυτά καθώς και σε εφαρμογές που θα μπορούσαν να έχουν. Αυτός ο τύπος υλικών μπορεί να βρεθεί στην φύση σε μερικά είδη πετρωμάτων και ορυκτά καθώς και σε ζώα, χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το δέρμα που καλύπτει την θηλή των αγελάδων. Μέχρι σήμερα, μεγάλη ποικιλία αυξητικών υλικών έχει κατασκευαστεί, σε αυτά περιλαμβάνονται πολυμερείς και μεταλλικοί αφροί, μικροπορώδη πολυμερή, ελάσματα ανθρακονημάτων καθώς και δομές κυψελών. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το ευρέως γνωστό τεφλόν (συνθετικό πολυμερές- πολυτετραφθοροαιθυλενίου PTFE), το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια. Άλλα παραδείγματα υλικών τα οποία έχουν την ιδιότητα αρνητικού λόγου Poisson είναι το μικροπορώδες, εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (UHMWPE), το πολυπροπυλένιο (PP) (Caddock & Evans, 1989; Picklrs, et al, 1996; Alderson, et al, 2000), καθώς και αρκετοί τύποι πετρωμάτων (Nur & Simmons, 1969). Παρόλα αυτά, τα ειδικά χαρακτηριστικά δεν είχαν γίνει ευρέως γνωστά μέχρι σχετικά πρόσφατα, όπου η δουλειά του Lakes, του Evans και άλλων επιστημόνων προσέλκυσε την προσοχή στα αυξητικά υλικά.

Τα αυξητικά υλικά τυγχάνουν ενδιαφέροντος λόγω του γεγονότος ότι παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, όπως διατμητική αντοχή, αντίσταση στην παραμόρφωση και αντοχή σε θραύση (Lakes, 1987a; Evans, 1990), σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται. Συνεπώς, η μελέτη τέτοιου τύπου μη συμβατικών υλικών είναι πραγματικά σημαντική από την σκοπιά στοιχειώδους έρευνας καθώς και πιθανών πρακτικών εφαρμογών, ιδιαίτερα στο πεδίο της ιατρικής, της αεροδιαστημικής καθώς και της αμυντικής βιομηχανίας. Στην πραγματικότητα, μερικά υλικά με τέτοιου είδους ασυνήθιστες (π.χ. NPR) ιδιότητες έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, όπως είναι ο πυρολιθικός γραφίτης που χρησιμοποιείται για θερμική προστασία στην αεροδιαστημική καθώς και δομή κρυστάλλων Ni3Al σε βάνες στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.

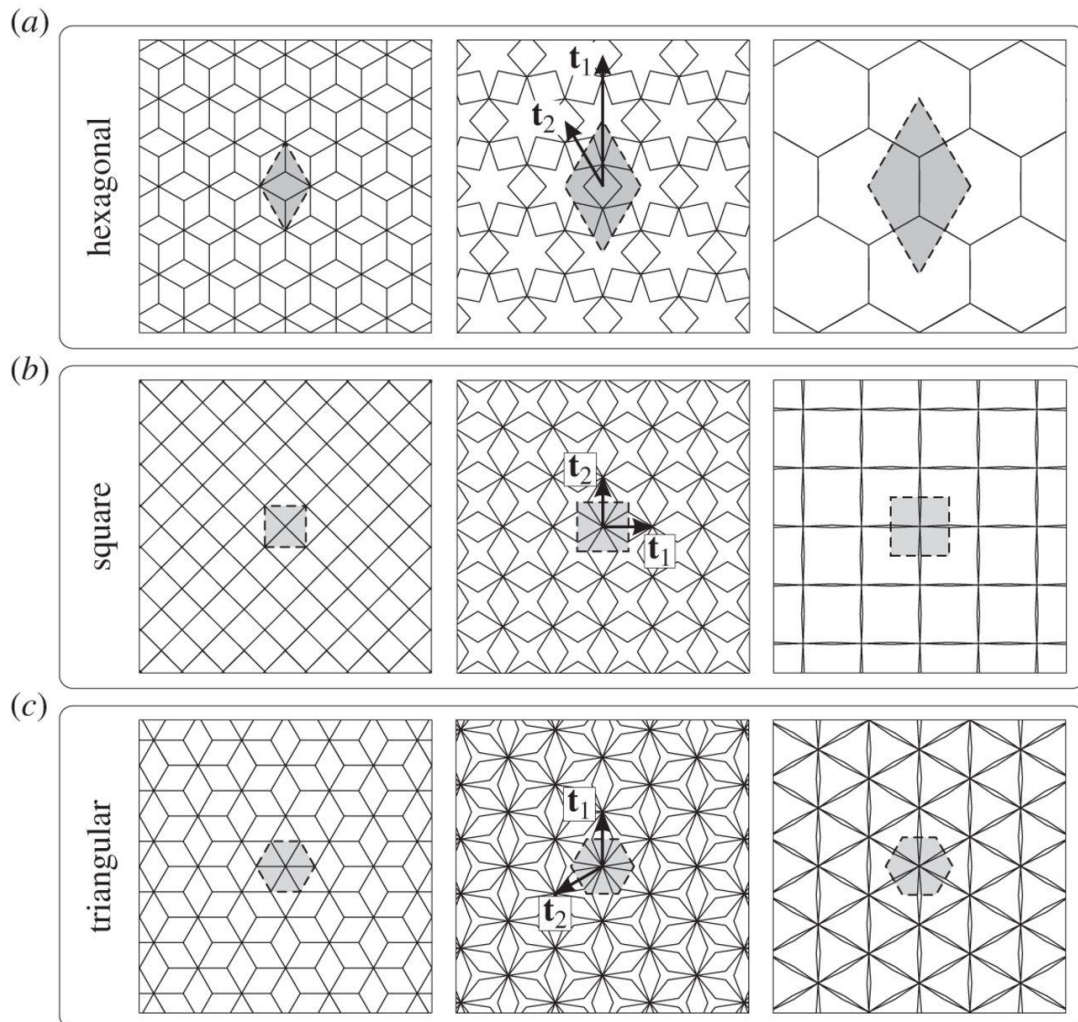


Εικόνα 1.1: (a) Παραμόρφωση υλικού με θετικό λόγο Poisson και (b) Παραμόρφωση υλικού με αρνητικό λόγο Poisson.



Εικόνα 1.2: Σύγκριση συμπεριφοράς παραμόρφωσης: (a) Συμβατικό υλικό, (b) Αυξητικό υλικό.

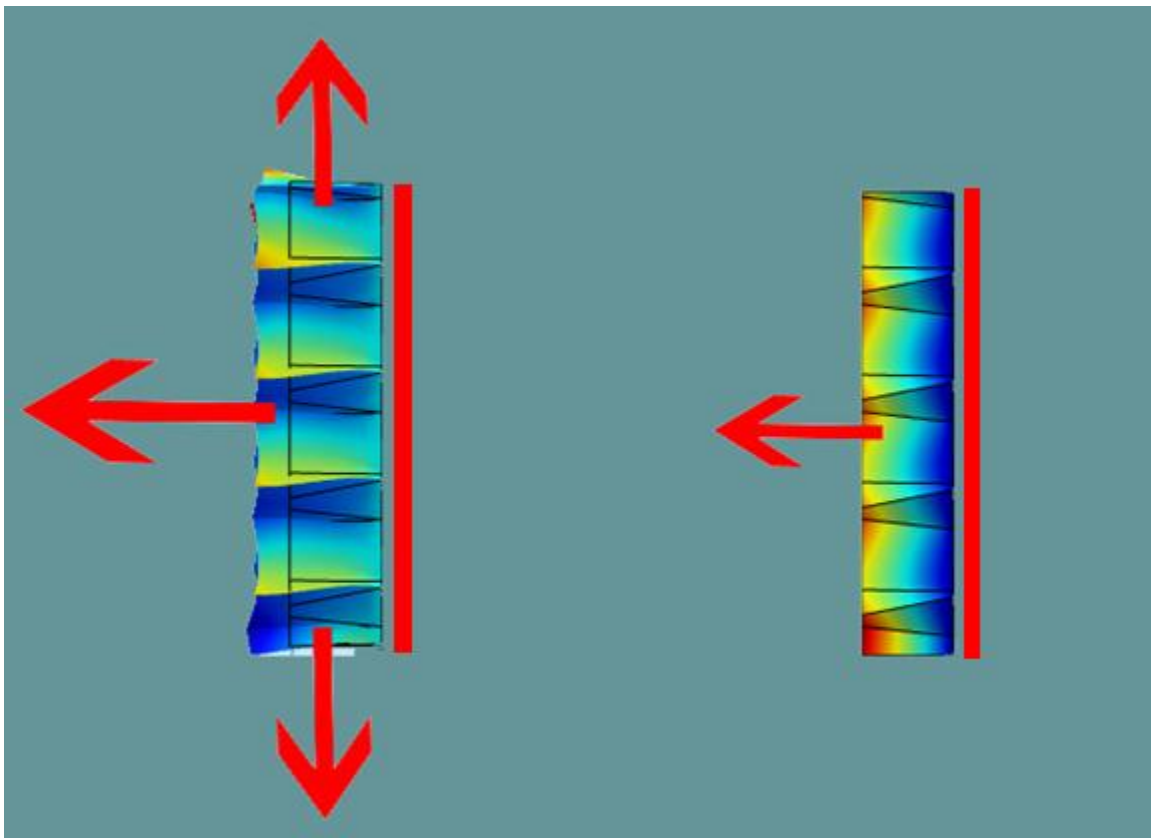
Η ιδέα για την κατασκευή αυξητικών δομών αναπτύχθηκε στις αρχές του 19ου αιώνα, ωστόσο η ανάπτυξη τους ολοκληρώθηκε τον 20ο αιώνα. Η χρήση κατασκευών που προέκυψαν επικράτησε σε πολλές κατασκευές χάρη στα ποικίλα πλεονεκτήματα που προσφέρει όσον αφορά την εξοικονόμηση βάρους και την δυνατότητα ελέγχου της ακαμψίας της δομής. Γενικά, οι αυξητικές δομές αποτελούνται από τον πυρήνα που βρίσκεται στην μέση και είναι από ελαφρύ υλικό και έχει ως κύριο σκοπό την μεταφορά των διατμητικών τάσεων μεταξύ δύο επιστρώσεων, οι οποίες με την σειρά τους είναι από ισχυρότερο υλικό ανθεκτικό στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης που εφαρμόζονται στο επίπεδο τους. Οι επιστρώσεις είναι κολλημένες στις κύριες επιφάνειες του πυρήνα με κατάλληλο τρόπο που εξαρτάται από τον τύπο του στρωματοειδούς. Κάθε μέρος αυτής δομής από μόνο του είναι αδύναμο και εύκαμπτο, όταν λειτουργεί όμως ως σύνολο παρέχει μια άκαμπτη, ισχυρή και ελαφριά δομή. Ένα πλεονέκτημα της κυψελοειδούς δομής είναι η αντίσταση της στη κόπωση.



Εικόνα 1.3.: Κάποιες κοινές αυξητικές δομές

1.3 | Η αυξητική σόλα

Η αυξητική σόλα είναι μία σόλα που αν και έχει κατασκευαστεί από ένα κοινό ελαστομερές υλικό (στην περίπτωση μας Καουτσούκ), συμπεριφέρεται σαν να ήταν κατασκευασμένη από ένα αυξητικό υλικό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αστεροειδή δομή της, μια δομή που θεωρείται αυξητική. Οι αστεροειδής τρύπες που φέρει η σόλα της δίνουν τις αυξητικές ιδιότητες. Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγιναν κάποιοι έλεγχοι για να δούμε κατά πόσο ισχύει αυτή η παραδοχή σε σχέση με τα υλικά και τις διαστάσεις που εμείς επιλέξαμε και χρησιμοποιήσαμε για την μελέτη αυτή. Τα αποτελέσματα κατά τον εφελκυσμό της σόλας με τις αστεροειδής – τριγωνικές τρύπες παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1.4) που δείχνει την σόλα να διογκώνεται όταν εφαρμόζονται δυνάμεις εφελκυσμού.



Εικόνα 1.4 Συμπεριφορά αυξητικής σόλας κατά τον εφελκυσμό

Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η συμπεριφορά της σόλας αυτής και συγκρίνεται με την συμπεριφορά άλλων δομών καθώς και με μία συμπαγής, χωρίς τρύπες σόλα, κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό.

2 | Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν

2.1 | Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Ιστορική Ανασκόπηση:

Αν και η αρχική σύλληψη της ΜΠΣ είχε στόχο την μητρική ανάλυση, η θεωρητική της βάση διευρύνθηκε σημαντικά. Κι αυτό γιατί σύντομα έγινε αντιληπτό η δυνατότητα εφαρμογής της στην ανάλυση συνεχών μέσων (κελύφη, ελάσματα κτλ.). Πιο συγκεκριμένα, κύριο χαρακτηριστικό της ΜΠΣ είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων στην προσομοίωση συνεχών μέσων. Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε η ιδέα αυτή ήταν εκείνη των Turner, Clough, Martin και Torp (1956) οι οποίοι κατάφεραν να δημιουργήσουν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία. Πρόδρομος, ωστόσο, της προσέγγισης αυτής θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η μελέτη τόσο του Hrenikoff (1941) όσο και των Courant (1943) και McHenry (1943). Η σχετική βιβλιογραφία εμπλουτίστηκε σημαντικά χάρη στις δημοσιεύσεις του καθηγητή Αργύρη και των συνεργατών του κατά την περίοδο από το 1954 ως το 1960. Μετά την καθιέρωση της στη γραμμική ελαστική περιοχή η μέθοδος εφαρμόστηκε και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού, ενώ οι μαθηματικές της βάσεις τέθηκαν στη δεκαετία του '70 καταδεικνύοντας ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε πρόβλημα πεδίου με μεταβολική διατύπωση.

Βασικές έννοιες της μεθόδου:

Η ΜΠΣ αποτελεί σήμερα ένα πανίσχυρο εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός σημαντικού φάσματος προβλημάτων του μηχανικού καθώς στον πυρήνα της βρίσκεται η δυνατότητα προσομοίωσης μιας πραγματικής, συνεχούς κατασκευής, χωρίς φυσικούς διαχωρισμούς, με τεχνητά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία, είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά με τους κόμβους να καταλαμβάνουν τις θέσεις των άκρων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται, επομένως, ένας πεπερασμένος αριθμός διακριτών μεταβλητών επί των οποίων είναι εφικτό να εφαρμοσθούν μητρικές μέθοδοι. Οι

μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, και οι παράγωγοί τους. Στην τελευταία αυτή περίπτωση κάνουμε λόγο για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Έτσι, οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους, άρα και το πρόβλημα μετασχηματίζεται από συνεχές σε διακριτό εκφραζόμενο ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με μητρωικές μεθόδους. Ωστόσο, μια διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί να αποδώσει πάντοτε και με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξάρτητα από τον αριθμό των διακριτών μεταβλητών που εκάστοτε χρησιμοποιούνται. Υπάρχει, δηλαδή, πάντοτε το περιθώριο σφάλματος. Με την ορθή όμως επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και την κατάλληλη διακριτοποίηση το αριθμητικό σφάλμα μπορεί να περιορισθεί και να χαρακτηριστεί ως αμελητέο και τοπικό. Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος για διατύπωσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικά στατικά προβλήματα βασίζεται στη μέθοδο των μετατοπίσεων. Άλλοι τρόποι κάνουν χρήση της ισορροπίας δυνάμεων ή άλλων υβριδικών ή και μεικτών μεθόδων. Σε κάθε περίπτωση, όμως, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων, η επίλυση των οποίων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου:

- I. Η προσομοίωση (διακριτοποίηση) της κατασκευής με ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται με συνοριακούς κόμβους.
- II. Ο προσδιορισμός των γενικευμένων (αγνώστων) μετατοπίσεων που α καθορίσουν πλήρως την απόκριση της κατασκευής.
- III. Η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες κομβικές μετατοπίσεις και η επίλυσή τους.
- IV. Ο υπολογισμός των εσωτερικών κατανομών των τάσεων των στοιχείων για δεδομένες μετατοπίσεις στους κόμβους.
- V. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (μετατοπίσεις και τάσεις) με βάση τις δεδομένες παραδοχές του προβλήματος.

Οι αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος αποτελούσαν για χρόνια το μεγάλο μειονέκτημα της εν λόγω μεθόδου ιδίως όταν εφαρμοζόταν σε σύνθετα μοντέλα. Το μειονέκτημα όμως αυτό αμβλύνθηκε χάρη στη ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών μηχανών και των συστημάτων CAD (Computer Aided Design). Σήμερα, εναλλακτικά μοντέλα μπορούν να ελεγχθούν σε ψηφιακό περιβάλλον πολύ πριν την κατασκευή του πρωτοτύπου εκμηδενίζοντας ουσιαστικά το περιθώριο αυτού που παραπάνω κατονομάστηκε ως σφάλμα.

2.2. | PRO/ENGINEERING

Το Pro/Engineer αποτελεί λογισμικό στερεάς μοντελοποίησης το οποίο δίνει ακριβείς αναπαραστάσεις τόσο της γεωμετρίας όσο και της μάζας. Μετά την πρώτη δύσχρονη έκδοσή του το 1987 υπέστη σειρά αναβαθμίσεων που το έχουν καταστήσει σήμερα σημείο αναφοράς στον χώρο της παραμετρικής σχεδίασης. Αυτό οφείλεται στις δυνατότητες που έχει αυτή η εφαρμογή της Parametric Technology Corporation (PTC) στην πλήρη ανάλυση ενός προϊόντος με ακριβή αποτελέσματα, όσον αφορά την κατεργασία, τις αντοχές και πολλούς άλλους υπολογισμούς. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από την τρισδιάστατη παραμετρική μοντελοποίηση (Part) με βάση Features (χαρακτηριστικά), τη συναρμολόγηση (Assembly) των προϊόντων που έχουν ήδη σχεδιασθεί και τη δημιουργία ολοκληρωμένων μηχανολογικών σχεδίων (Drawings) το Pro/Engineer δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας αρχείων προσομοίωσης και σύνδεσης με την εργαλειομηχανή (Manufacturing) αλλά και την ευχέρεια πλήρους επικοινωνίας μεταξύ των τύπων εργασίας. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται στον χειριστή η επιλογή να παρεμβαίνει σε οποιοδήποτε στάδιο ανάπτυξης ενός προϊόντος (ενημερώνοντας ταυτόχρονα όλους τους τύπους εργασίας) έχοντας στη διάθεση του γρήγορες κι εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού για την ακριβέστερη μοντελοποίηση πολύπλοκων γεωμετρικών στερεών. Με άλλα λόγια, το Pro/Engineer είναι ένα σχεδιαστικό πακέτο που βασίζεται στην παραμετρική μοντελοποίηση με διαχείριση χαρακτηριστικών (Feature Manipulation) στο οποίο η σχεδίαση είναι Feature Based (βασιζόμενη σε χαρακτηριστικά), Parametric (Παραμετρική) Associative (Συνδυαστική). Σε ό,τι ακολουθεί γίνεται μια σύντομη ανάλυση των όρων αυτών.

Feature Based:

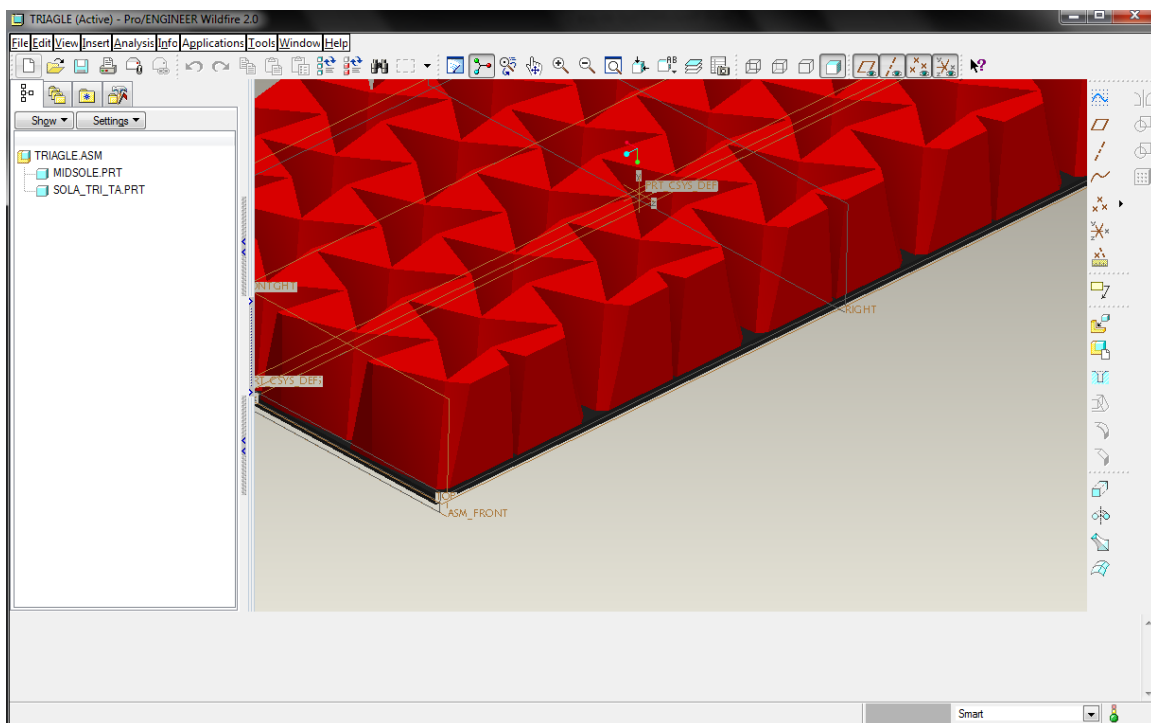
Η σχεδίαση στο Pro/Engineer, βασισμένη δηλαδή σε χαρακτηριστικά. Ο όρος Feature Based χρησιμοποιείται για γεωμετρικά μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί από Features (χαρακτηριστικά σχεδίασης) τα οποία προκύπτουν από προέκταση, περιστροφή, οπές, κοψίματα, στρογγυλοποιήσεις κτλ. Κάθε διαμόρφωση του αντικειμένου αποτελεί ένα Feature το οποίο προστίθεται σε μια δενδροειδή λίστα με το σύνολο των Features. Μεταξύ τους, μάλιστα, δημιουργείται μια ιεραρχική σχέση με το τελευταίο προστιθέμενο να τίθεται στο βάθος της ιεραρχίας. Κατά τον τρόπο αυτό, το γεωμετρικό μοντέλο δημιουργείται Feature by Feature με τον σχεδιαστή να επιλέγει τη σειρά προσθήκης καθενός.

Parametric:

Ο όρος Parametric σημαίνει ότι το γεωμετρικό μοντέλο έχει προκύψει από παραμέτρους ή διαστάσεις των οποίων οι τιμές μπορούν να μεταβάλλονται οποιαδήποτε στιγμή κατά την πορεία της σχεδίασης ή και σε ήδη αποθηκευμένο αρχείο. Συνεπώς, η γεωμετρία κάθε μοντέλου μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα με την μεταβολή των τιμών διαστάσεων, ενώ το κάθε Feature ορίζεται ως προς τα υπόλοιπα που ήδη υπάρχουν στο μοντέλο: Αν γίνει μορφοποίηση σε ένα μόνο Feature τότε μορφοποιούνται και όσα άλλα Features συνδέονται με αυτό – αν και αυτό δεν είναι πάντα απόλυτο. Έτσι δημιουργείται μια σχέση Parent / Child, όπου Parent είναι αυτό που βρίσκεται υψηλότερα στην ιεραρχία και Child αυτό που είναι χαμηλότερα.

Associative:

Στο Pro/Engineer πολλά μοντέλα αποτελούνται από διάφορα στερεά, γι' αυτό υπάρχει η δυνατότητα συναρμολόγησής τους και η δημιουργία μηχανολογικών σχεδίων. Με την ύπαρξη λειτουργικών διασυνδέσεων στο λογισμικό, σε όποια λειτουργία κι αν γίνει αλλαγή σε μια παράμετρο του γεωμετρικού μοντέλου, ενημερώνονται άμεσα όλες οι υπόλοιπες, οπότε οι περαιτέρω αλλαγές γίνονται πια στην ενημερωμένη έκδοση του μοντέλου.



Εικόνα 2.1 Περιβάλλον εργασίας ProEngineer

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα του Pro/Engineer:

Συμπερασματικά, στα πλεονεκτήματα του Pro/Engineer συμπεριλαμβάνει κανείς την ευκολία κατά τη σχεδίαση στερεών που προκύπτουν από δισδιάστατα σχέδια με την αλλαγή διαστάσεων ή τη διαγραφή / μετακίνηση οποιουδήποτε Feature, όπως επίσης και τον υπολογισμό κέντρου βάρους, υλικού και καταπονήσεων σε οποιοδήποτε γεωμετρικό μοντέλο. Επιπλέον, η δημιουργία μηχανολογικών σχεδίων και προσομοιώσεων κοπής καθώς και αρχείων σε μορφή φωτογραφίας συμπεριλαμβάνονται στα σημεία υπεροχής του συγκεκριμένου λογισμικού. Από την άλλη πλευρά, στα μειονεκτήματά του θα μπορούσε κανείς να καταχωρήσει το γεγονός ότι για τη δημιουργία ορισμένων Features απαιτούνται πολλές παράμετροι (π.χ. Drafts) με αποτέλεσμα τη συχνή πιθανότητα λάθους. Ακόμη, λόγω έλλειψης εικονιδίων συντόμευσης καθίστανται δύσχρηστες ορισμένες εντολές (πχ. τη δημιουργία Protrusion). Και οι δυο όμως αδυναμίες είναι δυνατόν να υπερκεραστούν μέσω της τριβής και της εμπειρίας του χρήστη.

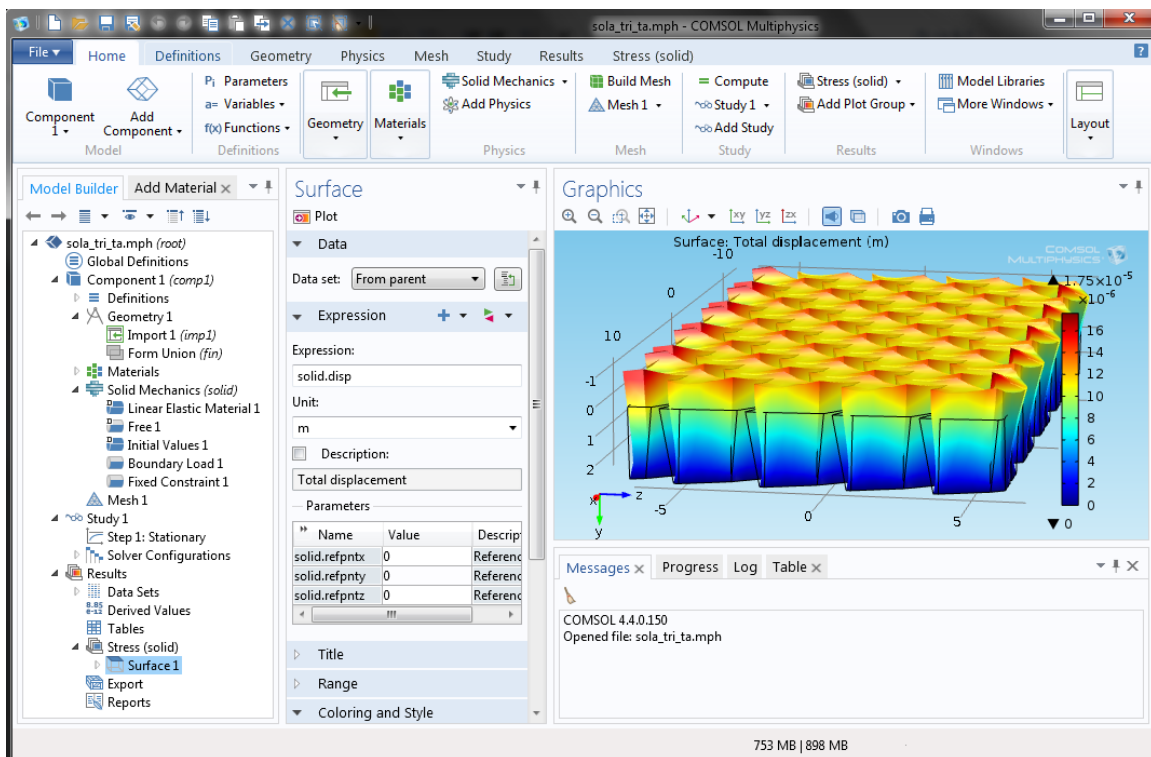
2.3 | Comsol Multiphysics

Το COMSOL Multiphysics αποτελεί ένα Δυναμικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση και την επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων και βασίζεται σε μερικές διαφορικές εξισώσεις (partial differential equations ,PDEs). Στην πραγματικότητα, δεν απαιτείται μια εις βάθος γνώση μαθηματικών ή αριθμητικής ανάλυσης. Χάρη στη δομή του λογισμικού, είναι δυνατό να χτίζουμε μοντέλα προσδιορίζοντας σχετικές φυσικές ποσότητες, όπως ιδιότητες υλικών, φορτία, περιορισμούς, πηγές κλπ, παρά προσδιορίζοντας τις σχετικές εξισώσεις. Το COMSOL Multiphysics συνδυάζει ένα σύνολο PDEs που αντιπροσωπεύουν το μοντέλο εξολοκλήρου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανάλυσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπεριλαμβανομένων, στατικής και εξαρτημένης χρόνου ανάλυσης, γραμμικής και μη γραμμικής, ανάλυσης ιδιοτιμών (ιδιοσυχνοτήτων). Για την επίλυση των PDEs το COMSOL Multiphysics χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (finite element method, FEM). Το λογισμικό τρέχει τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων παράλληλα με προσαρμοζόμενο πλέγμα και έλεγχο σφαλμάτων, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία αριθμητικών solvers (linear, non linear, direct). Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του λογισμικού αυτού είναι το extended multiphysics , δηλαδή ο συνδυασμός των μεταβλητών για να συνδέσει PDE μοντέλα σε διάφορες γεωμετρίες. Αυτό φανερώνει ένα βήμα προς τη μοντελοποίηση σε επίπεδο συστήματος. Ένα άλλο μοναδικό

χαρακτηριστικό του COMSOL Multiphysics είναι η ικανότητα να συνδυάζει τομείς διαφορετικών χωρικών διαστάσεων στο ίδιο πρόβλημα. Αυτή η ευελιξία όχι μόνο απλοποιεί τη μοντελοποίηση, αλλά και μειώνει τον χρόνο εκτέλεσης.

Η εφαρμογή της ΜΠΣ απαιτεί πια τα ακόλουθα στάδια:

- Εισάγεται η γεωμετρία της υπό μελέτης κατασκευής σε ένα πρόγραμμα, όπως το CM και δημιουργείται ένα τρισδιάστατο μοντέλο αυτής.
- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία, δημιουργείται το πλέγμα, επιλέγεται ο τρόπος επίλυσης και εισάγονται τα πρόσθετα δεδομένα που απαιτούνται.
- Τα προς επίλυση δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα επίλυσης του προβλήματος.
- Μετά την επίλυση, χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων και ανάγνωσής τους από τον μελετητή



Εικόνα 2.1 Περιβάλλον εργασίας COMSOL Multiphysics

3 | Σχεδιασμός των δοκιμίων



Σχεδιάστηκαν τρία διαφορετικά δοκίμια – σόλες. Όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες ο σχεδιασμός έγινε στο πρόγραμμα Pro Engineering Wildfire 2.0 και σε αυτή τη ενότητα περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός καθώς και οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν.

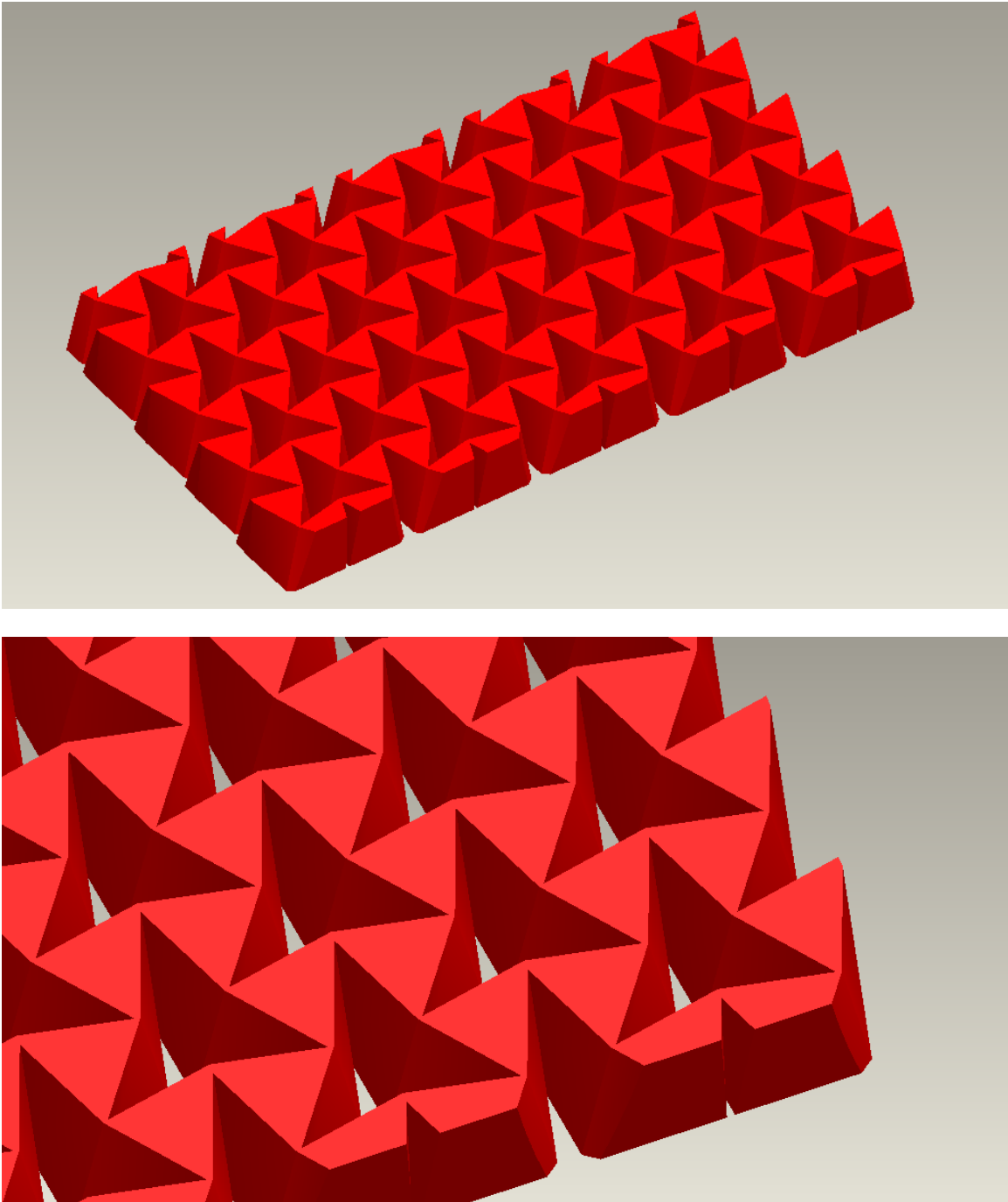
Οι τύποι σόλας που σχεδιάστηκαν είναι οι εξής:

- Μια σόλα με αυξιτική γεωμετρία (star)
- Μια με κυκλικές εγχοπές (round)
- Και μια συμπαγής σόλα χωρίς εγχοπές (solid)

Πάνω από κάθε σόλα έχει τοποθετηθεί ένα συμπαγές λεπτό στρώμα (midsole) που αντιπροσωπεύει την σόλα που έρχεται σε άμεση επαφή με το πέλμα.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά όλη η διαδικασία υλοποίησης του σχεδιασμού και δίνεται μια συνολική εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος Pro Engineering Wildfire 2.0 διευκρινίζοντας τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι εντολές. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στις εικόνες 3.13, 3.14, 3.15 της ενότητας 3.4.

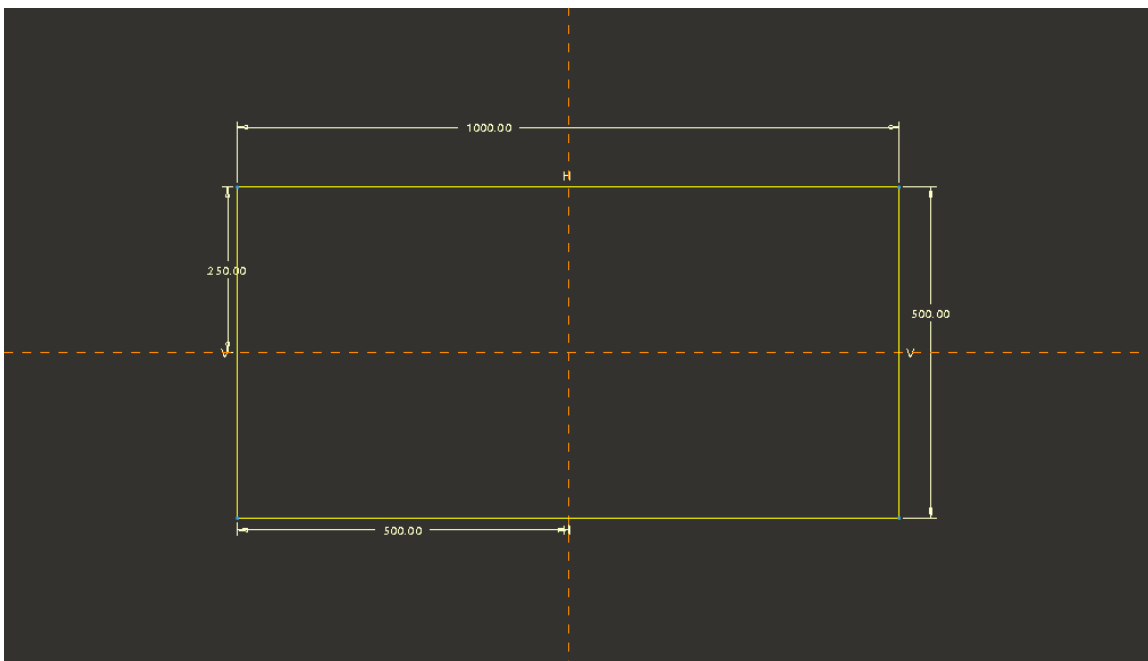
3.1 | Αυξητική σόλα (star)



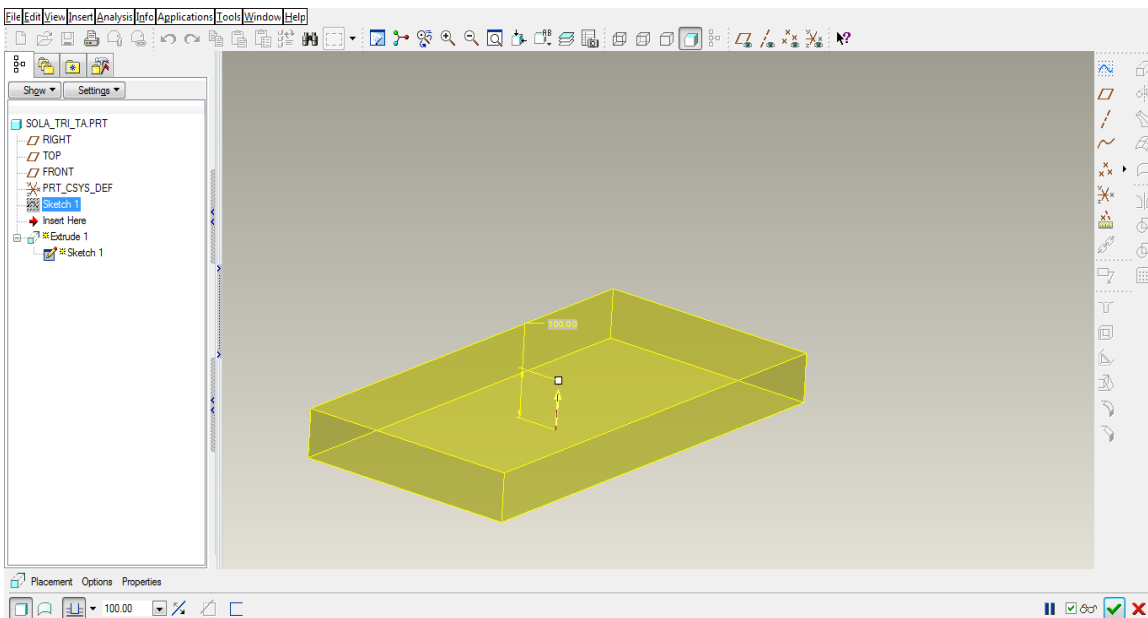
εικόνα 3.1

Η γεωμετρία αυτή με τις τριγωνικές εγκοπές ευθύνεται για την αυξιτική συμπεριφορά της σόλα σαν αυτή να ήταν κατασκευασμένη απο ενα αυξιτικό υλικό. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας αυτών των εγκοπών.

Για τον σχεδιασμό της σόλας αυτής, αρχικά δημιουργείται στον sketcher του προγράμματος ένα ορθογώνιο (εικόνα 3.3) και στην συνέχεια με την εντολή extrude δίνουμε το βάθος που επιθυμούμε (εικόνα 3.4).



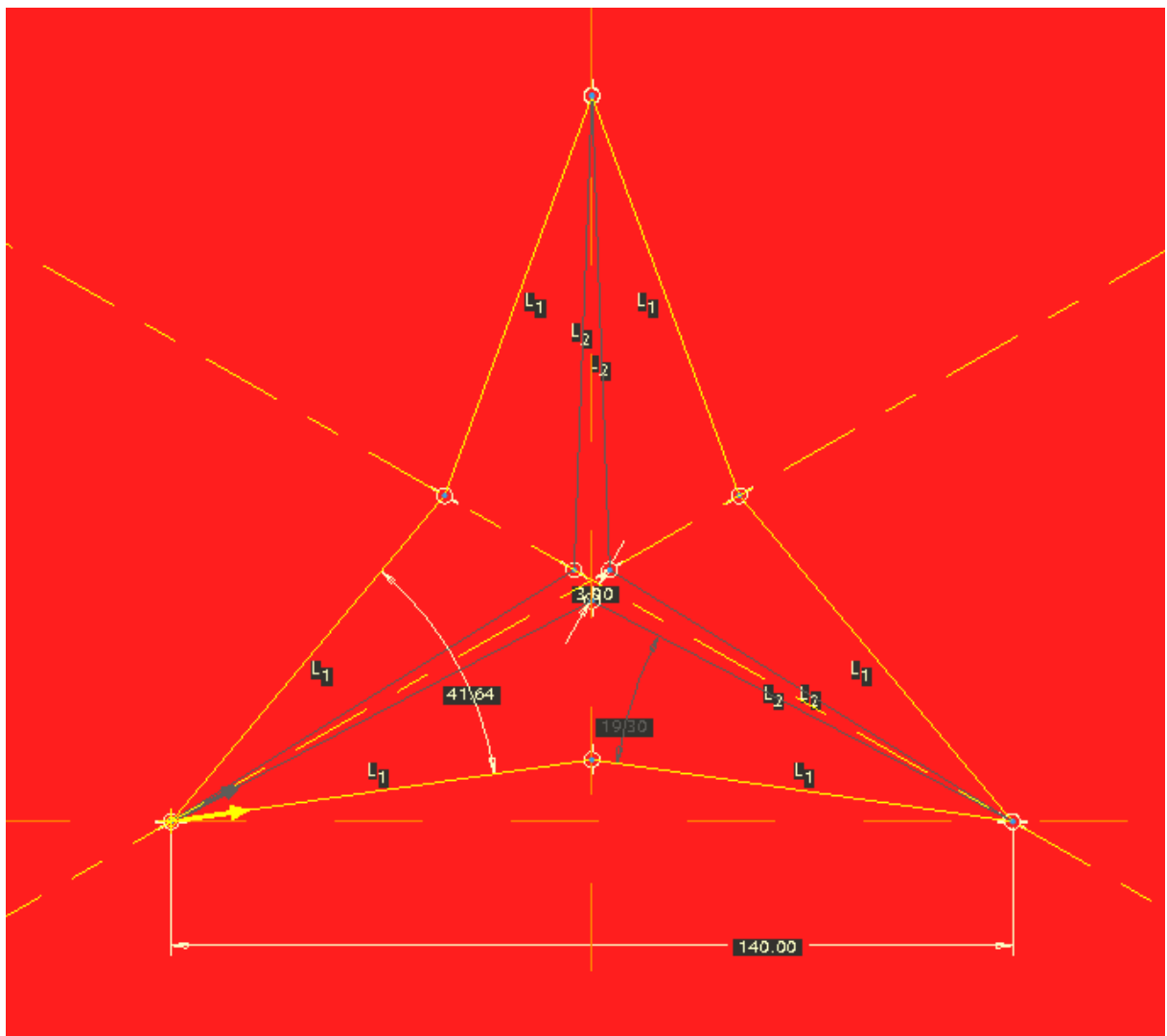
εικόνα 3.3



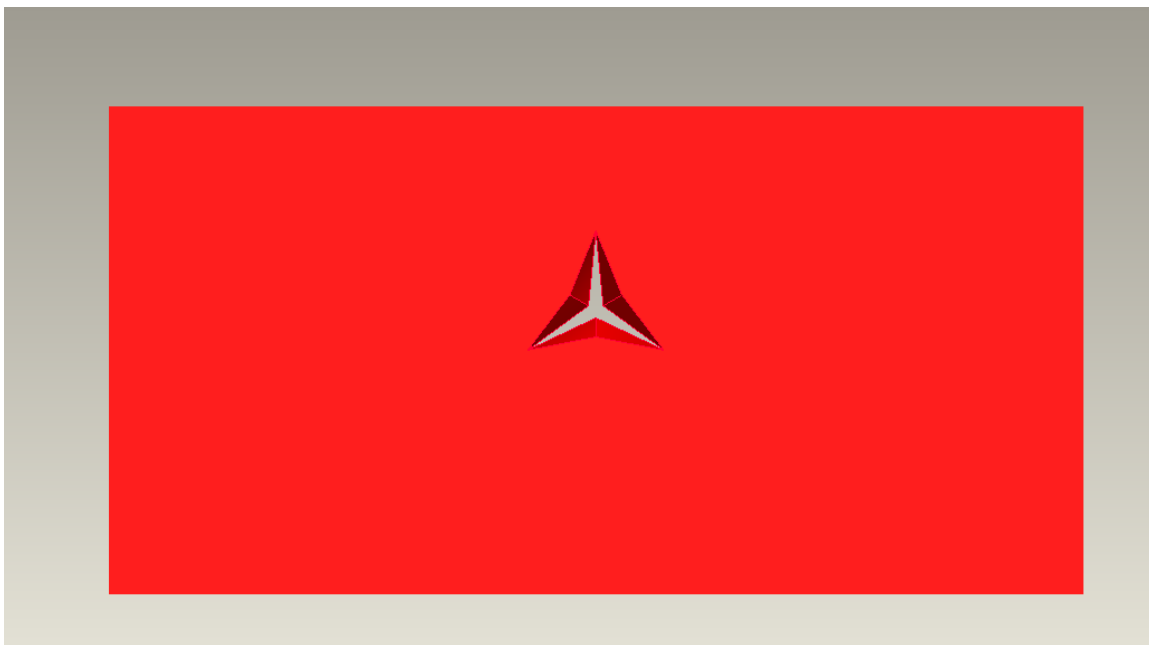
εικόνα 3.4

Στην συνέχεια με την βοήθεια του εργαλείου CUT BLEND που διαθέτει το πρόγραμμα θα σχεδιάσουμε την εγκοπή και μετά θα την αναπαράξουμε σε όλη την επιφάνεια της σόλας με την χρήση της εντολής PATTERN (εικόνα 3.7).

CUT BLEND: Επιλέγουμε την επιφάνεια στην οποία θέλουμε να σχεδιάσουμε την εγκοπή και το πρόγραμμα μας εισάγει στον sketcher. Εκεί σχεδιάζουμε δυο διατομές όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5. Μόλις τελειώσουμε την σχεδίαση το προγραμμα μας ζητά να δώσουμε την κατεύθυνση αλλά και το βάθος της κοπής. Ουσιαστικά εδώ κόβουμε το υλικό απο την μία διατομή ως την άλλη. Εισάγουμε τις επιθυμητές τιμές και συνεχίζουμε. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 3.6.

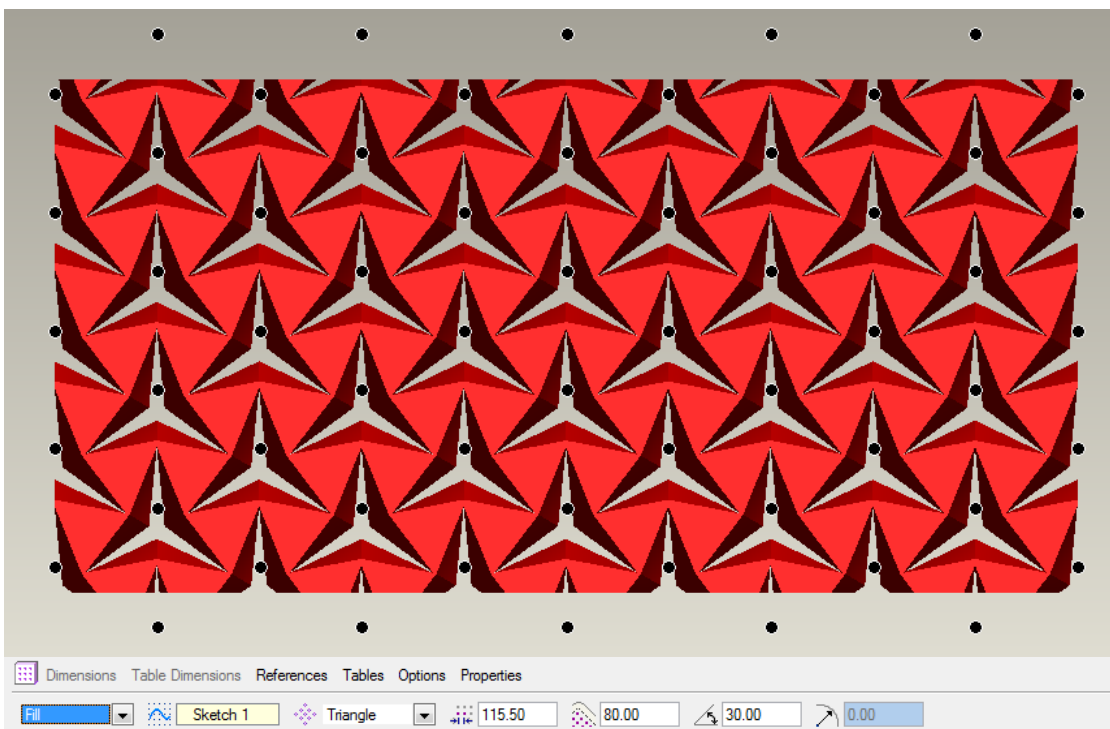


Εικόνα 3.5



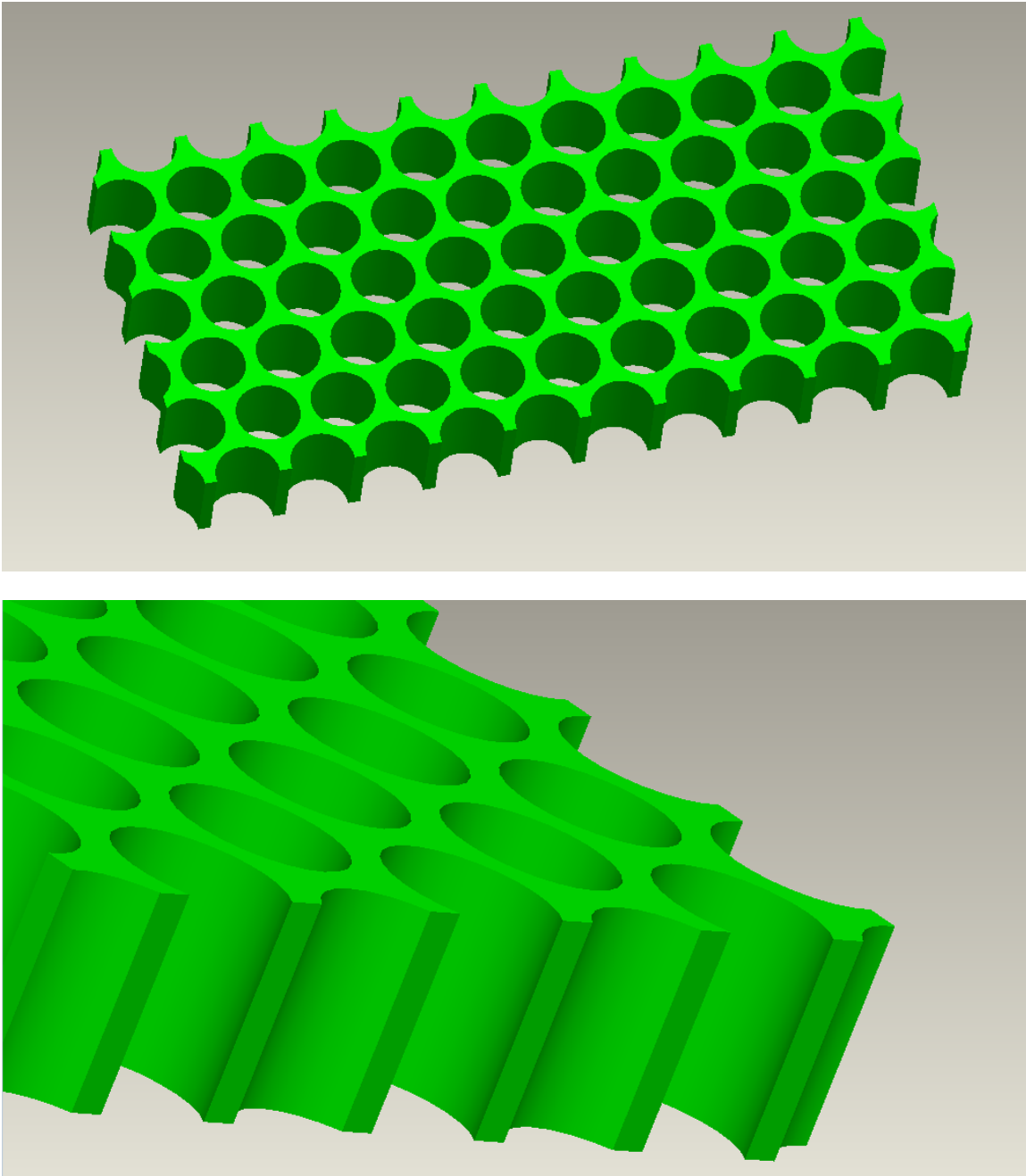
Εικόνα 3.6

Δίνοντας τις κατάλληλες παραμέτρους που μας ζητάει το πρόγραμμα αναπαράγουμε την εγκοπή σε όλη την επιφάνεια της σόλας στην επιφάνεια που σχεδιάσαμε στην εικόνα 3.3. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 3.7 που ακολουθεί:



Εικόνα 3.7

3.2 | Σόλα με κυκλικές εγκοπές

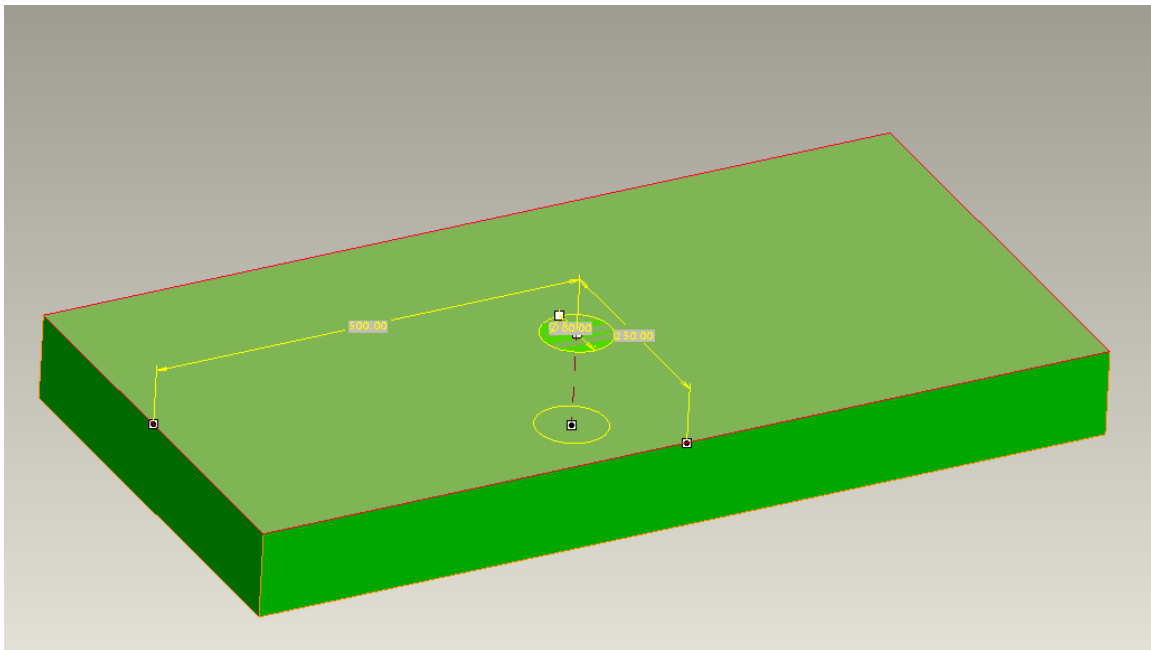


Εικόνα 3.8

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε για την δημιουργία αυτής της σόλας είναι αρκετά απλή. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας των κυκλικών εγκοπών.

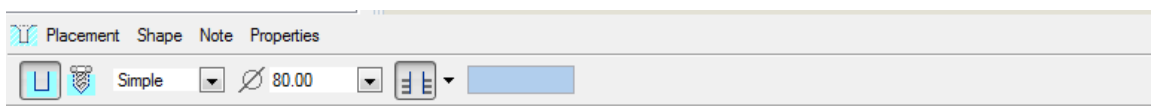
Για τον σχεδιασμό της σόλας αυτής, αρχικά δημιουργείται στον sketcher του προγράμματος ένα ορθογώνιο (εικόνα 3.3) και στην συνέχεια με την εντολή extrude δίνουμε το βάθος που επιθυμούμε (εικόνα 3.4). Όπως ακριβώς ξεκινήσαμε και τον σχεδιασμό της προηγούμενης σόλας.

Στην συνέχεια με την χρήση του HOLE TOOL δημιουργούμε μια τρύπα σε κάποιο σημείο τις επιφάνειας όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9 και την αναπαράγουμε σε όλη την επιφάνεια με την χρήση της εντολής PATTERN (εικόνα 3.10).

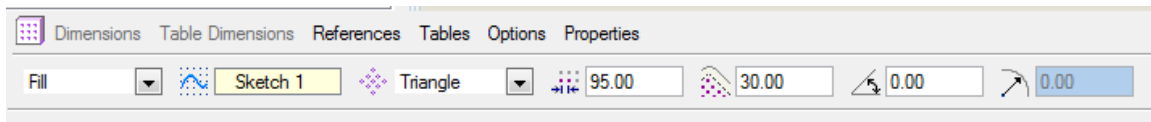


Εικόνα 3.9

Η δημιουργία της τρύπας με το HOLE TOOL είναι πολύ απλή. Επιλέγουμε την διάμετρο του κύκλου, την επιφάνεια που θα τρυπίσουμε και την θέση της τρύπας στην επιφάνεια αυτή όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Επιλέγουμε “drill through all” ή “drill up to next surface”, έτσι ώστε η τρύπα να διαπεράσει όλο τον όγκο του δοκιμίου.

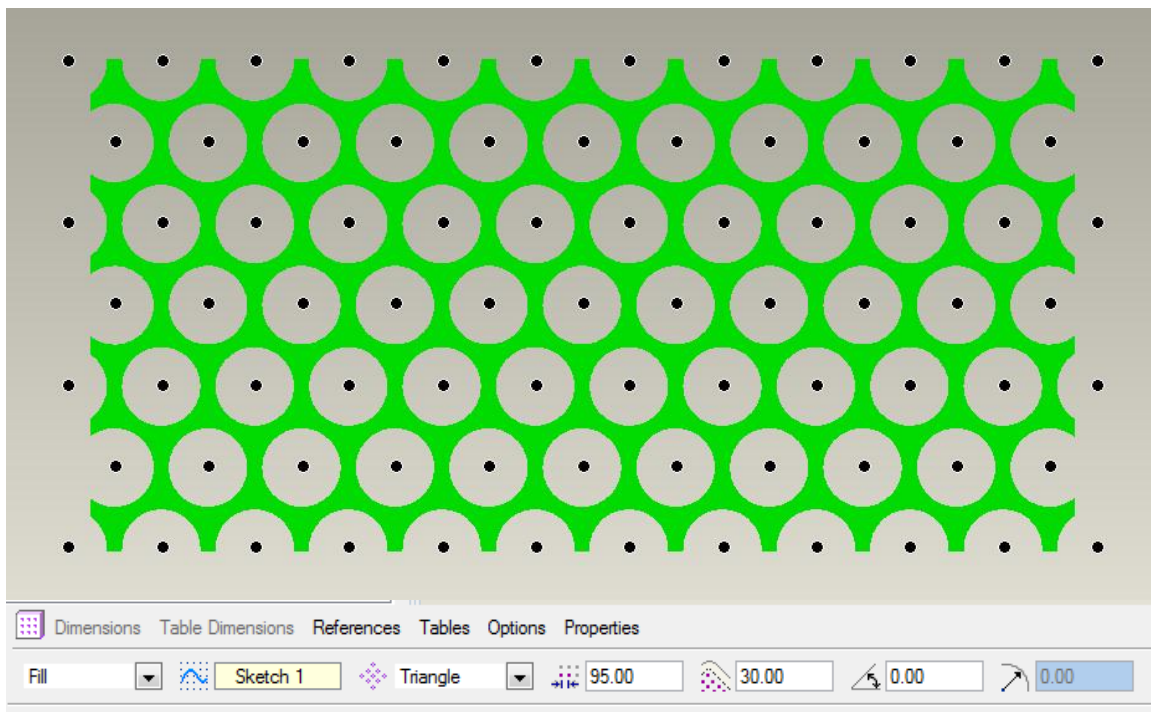


Το επόμενο βήμα είναι να αναπαράξουμε την τρύπα σε όλη την επιφάνεια της σόλας όπως και προηγουμένος με την εντολή PATTERN→FILL. Δίνουμε τις κατάλληλες παραμέτρους που μας ζητάει το πρόγραμμα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



- Επιφάνεια στην οποία θα αναπαραχθεί η τρύπα
- Το μοτίβο με το οποίο να χωρίζονται οι τρύπες κατα την αναπαραγωγή
- Την μεταξύ τους απόσταση (απο το κέντρο του κάθε κυλίνδρου)
- Την απόσταση απο τα όρια του όγκου.

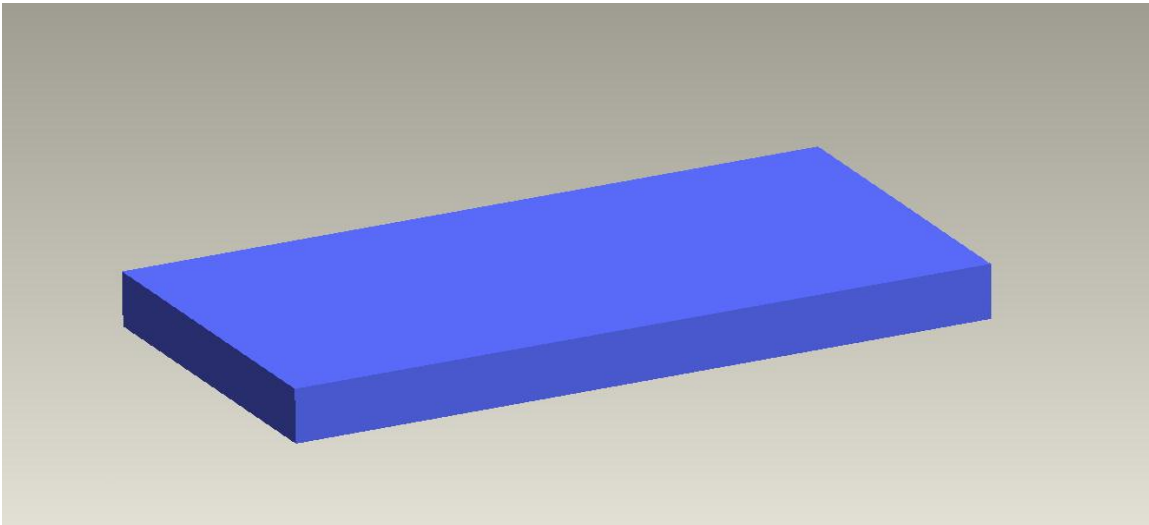
Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 3.10 που ακολουθεί όπου οι μαύρες τελίες δείχνουν τα κέντα των κυλίνδρων που πρόκειται να αναπαραχθούν:



Εικόνα 3.10

3.2 | Συμπαγής Σόλα

Για τον σχεδιασμό της σόλας αυτής, αρχικά δημιουργείται στον sketcher του προγράμματος ένα ορθογώνιο (εικόνα 3.3) και στην συνέχεια με την εντολή extrude δίνουμε το βάθος που επιθυμούμε (εικόνα 3.4). Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 3.11 που ακολουθεί:



Εικόνα 3.11

3.3 | Ενδιάμεση Σόλα

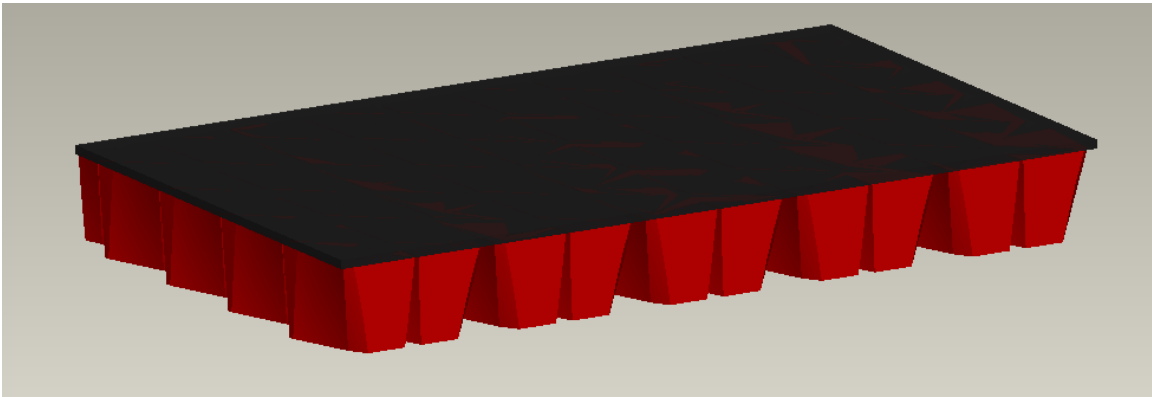
Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο σχεδιάζουμε και την ενδιάμεση σόλα που όπως αναφέραμε προηγουμένος αντιπροσωπεύει την σόλα που έρχεται σε άμεση επαφή με το πέλμα.



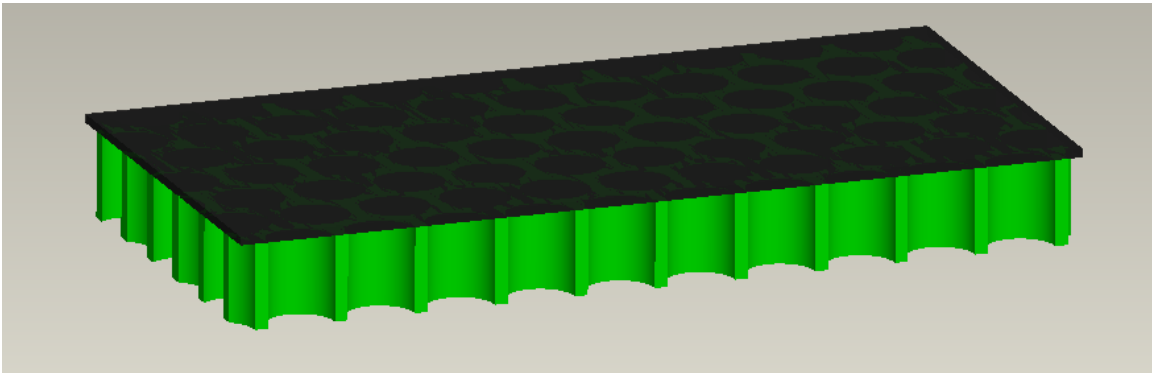
Εικόνα 3.12

3.4 | Συναρμολόγηση – Τελικό μοντέλο

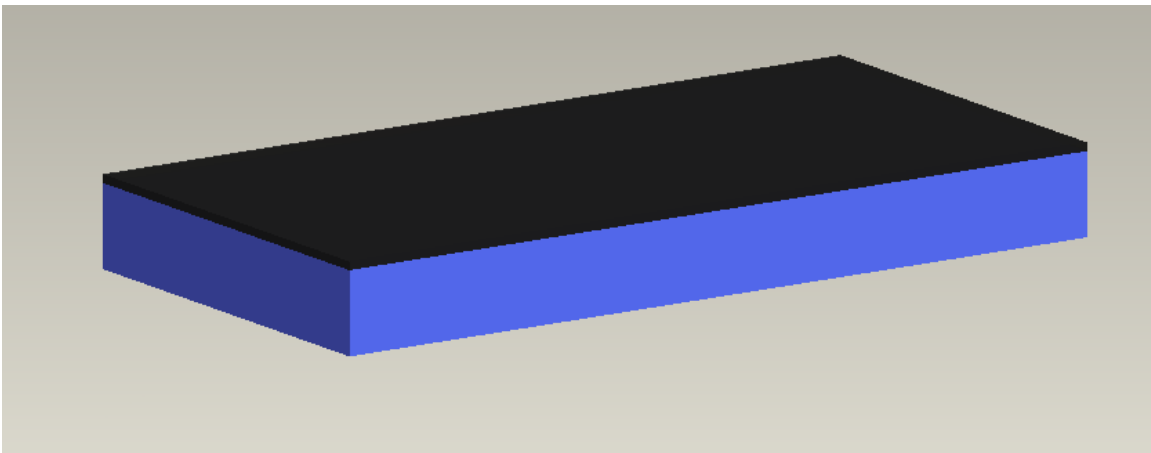
Στο σημείο αυτό με την βοήθεια του προγράμματος, κολλάμε την ενδοιάμεση σόλα πάνω απο κάθε σόλα. Τα τελικά δοκίμια που προκύπτουν και χρησιμοποιούμε για την μετέπειτα ανάλυση παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 3.13



εικόνα 3.14



εικόνα 3.15

4 | Μεθοδολογία της Ανάλυσης

4.1 | Στάδια της Ανάλυσης

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο να μελετήσει την στατική αλλά και την δυναμική συμπεριφορά τριών διαφορετικών τύπων σόλας καθώς και την σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν. Οι σόλες που θα μελετηθούν είναι οι εξής:

- Μια συμπαγής σόλα
- Μια σόλα με κυκλικές τρύπες
- Μια αυξητική σόλα (ή σόλα με αστεροειδής τρύπες)

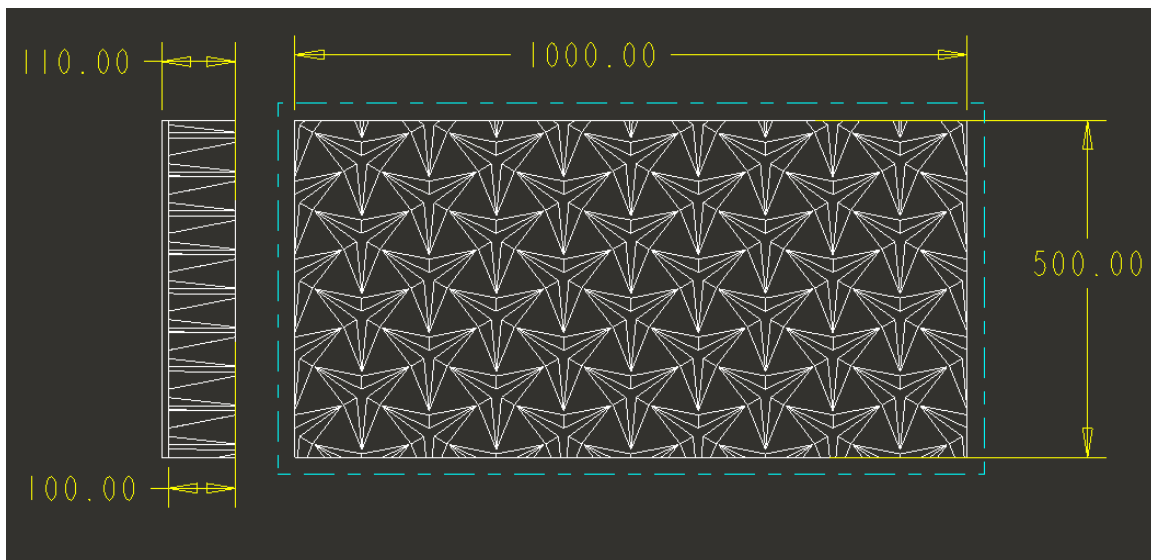
Κάθε σόλα αποτελείται από ένα εξωτερικό κομμάτι με εγκοπές και ένα εσωτερικό (ως προς το παπούτσι) κομμάτι που παρακάτω ονομάζεται midsole και αναπαριστά την επιφάνεια της σόλας που έρχεται σε απευθείας επαφή με το πέλμα.

Οι σόλες είναι σχεδιασμένες σε ίδιες διαστάσεις-κλίμακα και σε όλες τις σόλες έχει προστεθεί το ίδιο υλικό κατασκευής. Το υλικό αυτό είναι το ίδιο για κάθε σόλα και κάθε midsole. Σημειώνεται ότι το υλικό αυτό είναι ένα απλό ελαστομερές υλικό και δεν είναι αυξητικό υλικό. Αυτό που κάνει την σόλα “αυξητική” είναι ακριβώς η γεωμετρία της εξωτερικής επιφάνειας δηλαδή οι αστεροειδής αυτές τρύπες για τις οποίες γίνεται λόγος σε προηγούμενο κεφάλαιο.

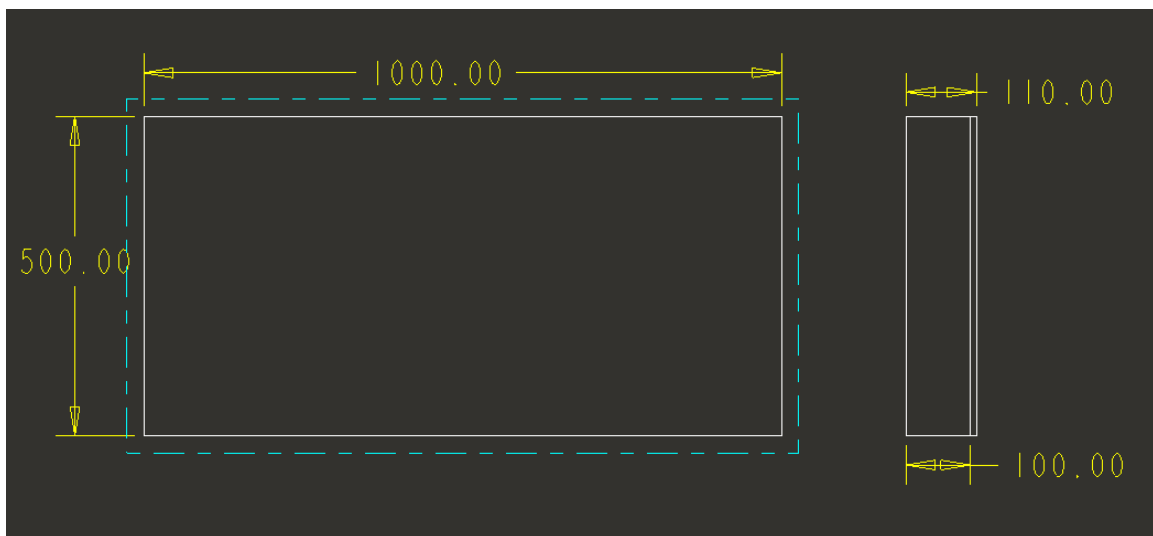
Σε κάθε σόλα γίνεται δυναμική και στατική ανάλυση στο Comsol Multiphysics. Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης μας ενδιαφέρουν για την αίσθηση που δίνει η σόλα και κατ’ επέκταση το παπούτσι όταν βρισκόμαστε σε στάση. Από την άλλη, τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης μας είναι χρήσιμα για τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων και των αντίστοιχων αποκρίσεων σε εξωτερικές διεγέρσεις. Οι φυσικές συχνότητες είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν διότι σε περιπτώσεις που η σόλα διεγείρεται σε μια από αυτές τότε είναι πολύ πιθανό να εμφανιστούν φαινόμενα συντονισμού με αποτέλεσμα υψηλό επίπεδο δονήσεων, δυναμικής φόρτισης και υψηλά επίπεδα θορύβου. Αυτό σημαίνει ότι τα μοντέλα θα πρέπει να αναλυθούν δυναμικά στο εύρος εκείνων των συχνοτήτων που προκαλούν οι υπάρχουσες πηγές διεγέρσεων. Ωστόσο στη συγκεκριμένη εργασία επιλέγονται προς μελέτη, οι πρώτες δέκα (10) ιδιοσυχνότητες που εξάγονται από τα αποτελέσματα του Comsol Multiphysics.

4.2 | Παρουσίαση των μοντέλων

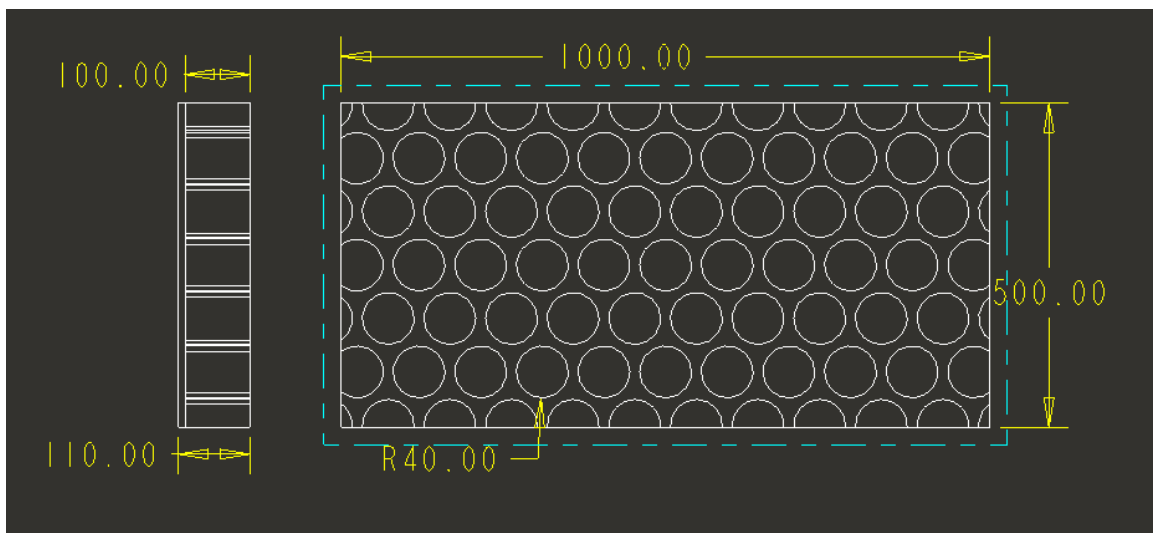
Αρχικά οι τρεις τύποι σόλας είχαν σχεδιαστεί σε 1:1 κλίμακα. Λόγω όμως της πολύπλοκης γεωμετρίας (συγκεκριμένα της αστεροειδής-αυξητικής σόλας και της σόλας με κυκλικές τρύπες) και των αυξημένων απαιτήσεων υπολογιστικού κόστους κατά την δημιουργία του mesh δεν κατέσται δυνατή η ανάλυση σε έναν κοινό υπολογιστή σαν αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία. Ο λόγος είναι απλός. Όσο μικρότερα στοιχεία έχει η γεωμετρία που εισάγουμε στο πρόγραμμα, τόσο μικρότερα άρα και περισσότερα στοιχεία (mesh elements) απαιτούνται για την πλεγματοποίηση και συνεπώς οι PDEs (διαφορικές εξισώσεις) που θα προσπαθήσει το πρόγραμμα να λύσει θα είναι πολύ περισσότερες. Ένας τρόπος να λυθεί αυτό το πρόβλημα της ανάλυσης μικρών δοκιμίων, με πολύπλοκη γεωμετρία σε κάποια σημεία του όγκου τους από έναν “μικρό” υπολογιστή θα ήταν η δυνατότητα παρέμβασης στην παραμετρική τοποθέτηση των στοιχείων της πλεγματοποίησης. Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο το Comsol μας δίνει την δυνατότητα να παρέμβουμε σε διάφορες παραμέτρους που ορίζουν τα στοιχεία πλεγματοποίησης. Μπορούμε όμως, σχεδιάζοντας τα δοκίμια σε μεγαλύτερη κλίμακα και επιλέγοντας κατά την εισαγωγή της γεωμετρίας να χρησιμοποιηθούν διαστάσεις από το Comsol και όχι από το CAD πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του προς εισαγωγή μοντέλου, να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα στην παρούσα έρευνα άσχετα από το μέγεθος και την κλίμακα σχεδίασης των μοντέλων. Τα προς μελέτη μοντέλα με τις τελικές τους διαστάσεις παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνες 4.1, 4.2 και 4.3).



Εικόνα 4.1 Αυξητική σόλα

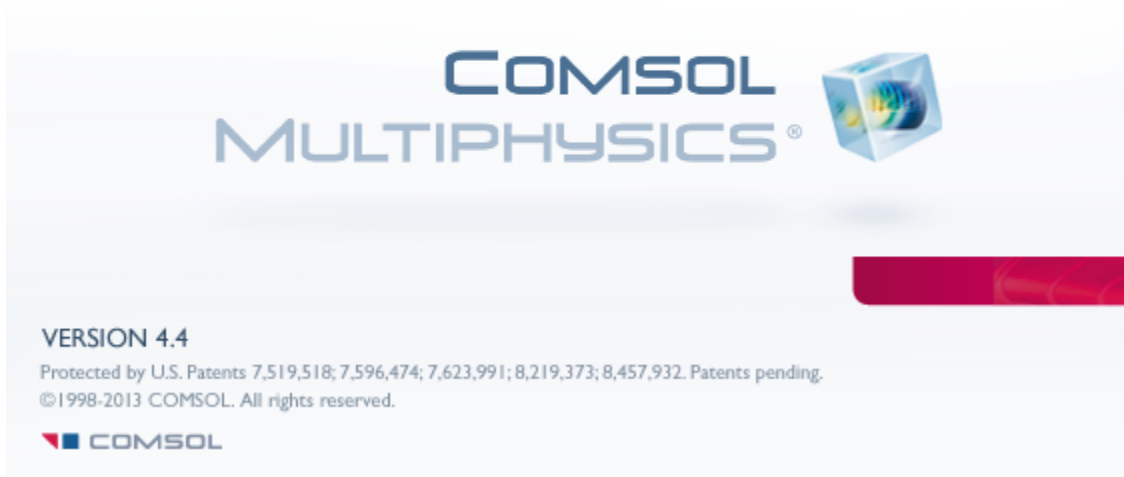


Εικόνα 4.2 Συμπαγής σόλα.



Εικόνα 4.3 Σόλα με κυκλικές τρύπες.

5 | Μοντελοποίηση στο COMSOL MULTIPHYSICS



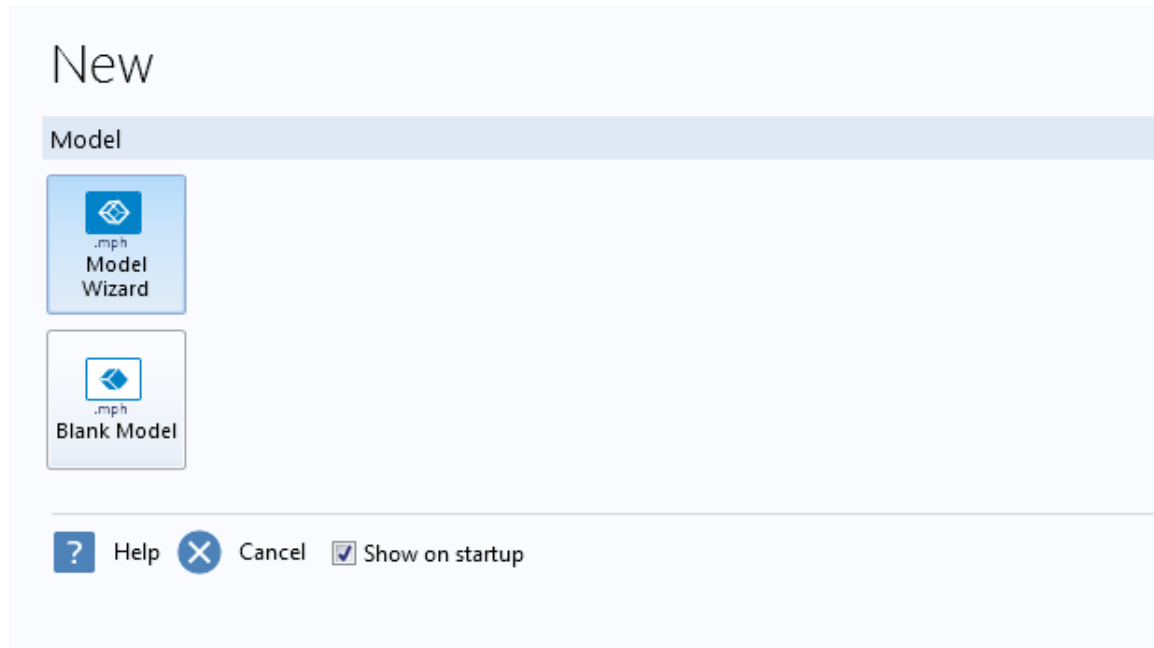
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα στάδια που απαιτούνται για την μοντελοποίηση στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics, για το οποία έγινε αναφορά στο εισαγωγικό κεφάλαιο. Η περιγραφή που θα ακολουθήσει αφορά όλες τις σόλες που παρουσιάστηκαν στο 3^ο κεφάλαιο. Τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν για την πραγματοποίησης της ανάλυσης είναι:

1. Καθορισμός περιβάλλοντος
2. Προσδιορισμός τύπου ανάλυσης
3. Εισαγωγή της γεωμετρίας από το ProE
4. Προσδιορισμός υλικών, ιδιοτήτων και συμπεριφοράς του μοντέλου
5. Πλεγματοποίηση (meshing)
6. Επίλυση
7. Συλλογή αποτελεσμάτων.

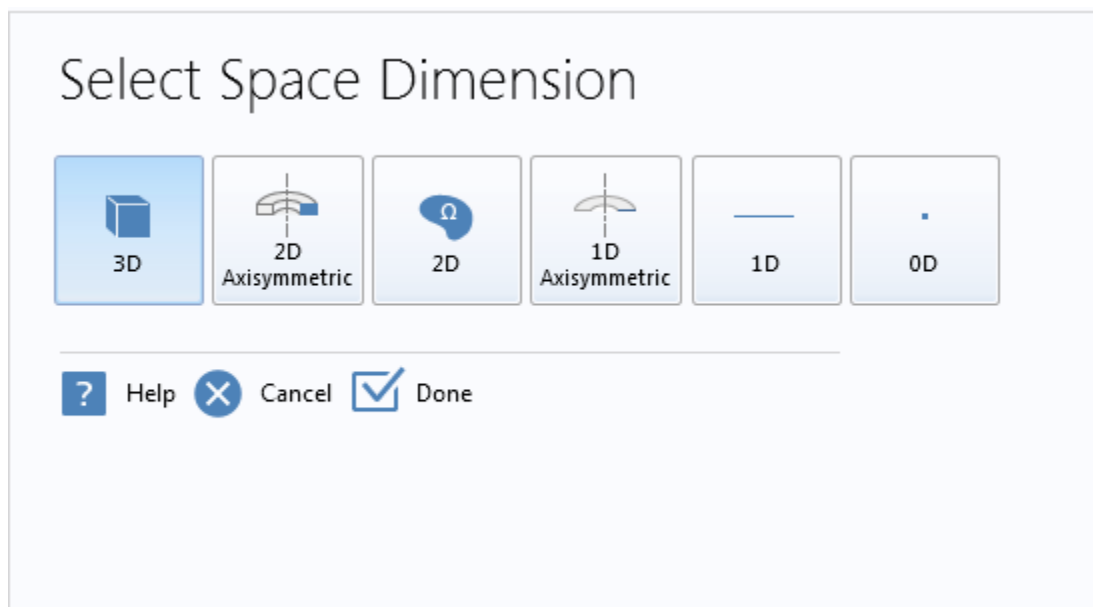
Για καθένα από τα παραπάνω στάδια ακολουθεί μια μικρή περιγραφή, δίνοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα για τον τρόπο που λειτουργεί το συγκεκριμένο πρόγραμμα.

5.1 | Καθορισμός περιβάλλοντος

Με την εκκίνηση του προγράμματος Comsol Multiphysics 4.4, ανοίγει το αρχικό περιβάλλον του και οι πρώτες επιλογές που εμφανίζονται είναι σε πιο περιβάλλον ορίζεται για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Οι επιλογές μπορεί να είναι σε τρισδιάστατο περιβάλλον σε δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό, σε δισδιάστατο, σε μονοδιάστατο αξονοσυμμετρικό και σε μονοδιάστατο. Το περιβάλλον που μας αφορά είναι το τρισδιάστατο οπότε και γίνεται η επιλογή.



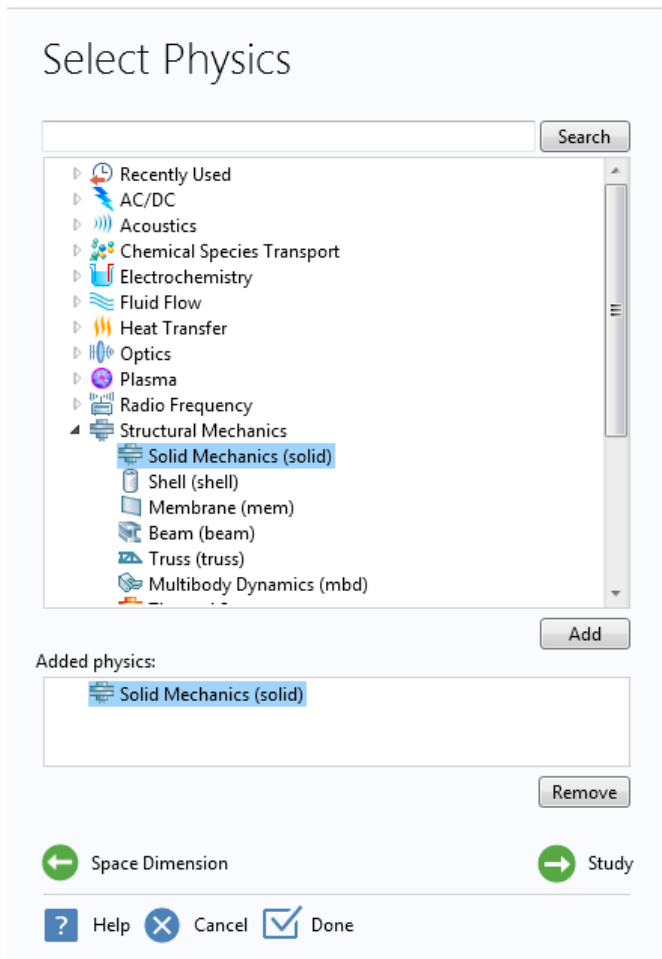
Εικόνα 5.1 Εισαγωγή στο Model Wizard



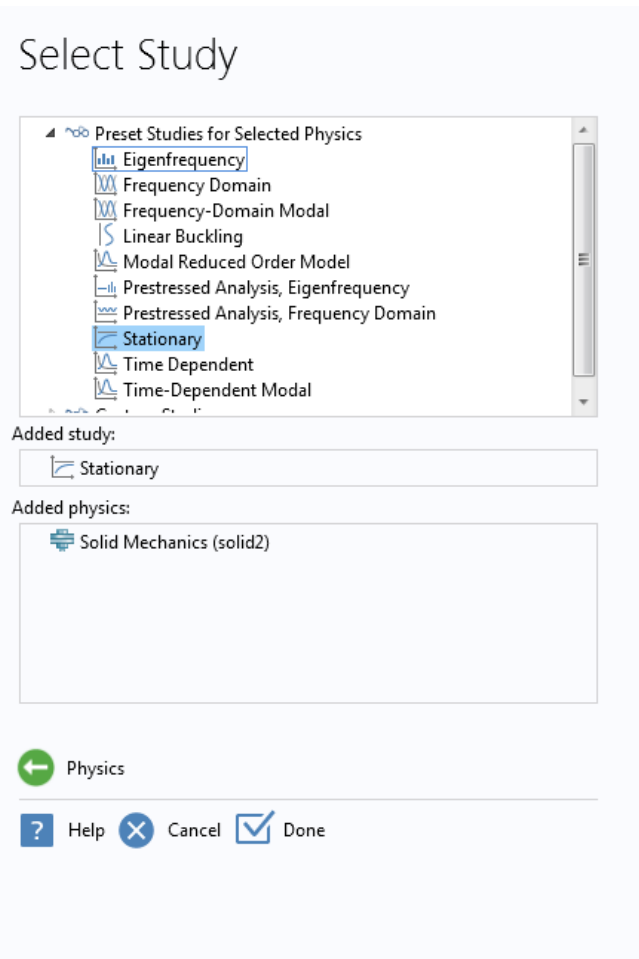
Εικόνα 5.2 Επιλογή τρισδιάστατου περιβάλλοντος

5.2 | Προσδιορισμός τύπου ανάλυσης

Στην συνέχεια ζητείται από το πρόγραμμα να επιλεγεί ο τύπος της ανάλυσης. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες ανάλυσης, για τις οποίες έγινε λόγος στην εισαγωγή. Ωστόσο η ανάλυση που πρόκειται εμείς να πραγματοποιήσουμε είναι η στατική και η ιδιομορφική. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο στην εργασία αυτή θα γίνουν δυο ειδών αναλύσεις. Αρχικά θα γίνει στατική ανάλυση κάθε σόλας που μας ενδιαφέρει για την αίσθηση που δίνει το παπούτσι σε στάση. Στην συνέχεια θα γίνει δυναμική ανάλυση προκειμένου να εξάγουμε τις ιδιομορφές και τις ιδιοσυχνότητες. Επιλέγουμε κατ'επέκταση την επιλογή Solid Mechanics και στην συνέχεια την στατική και την ιδιομορφική ανάλυση (Stationary και Eigenfrequency αντίστοιχα).



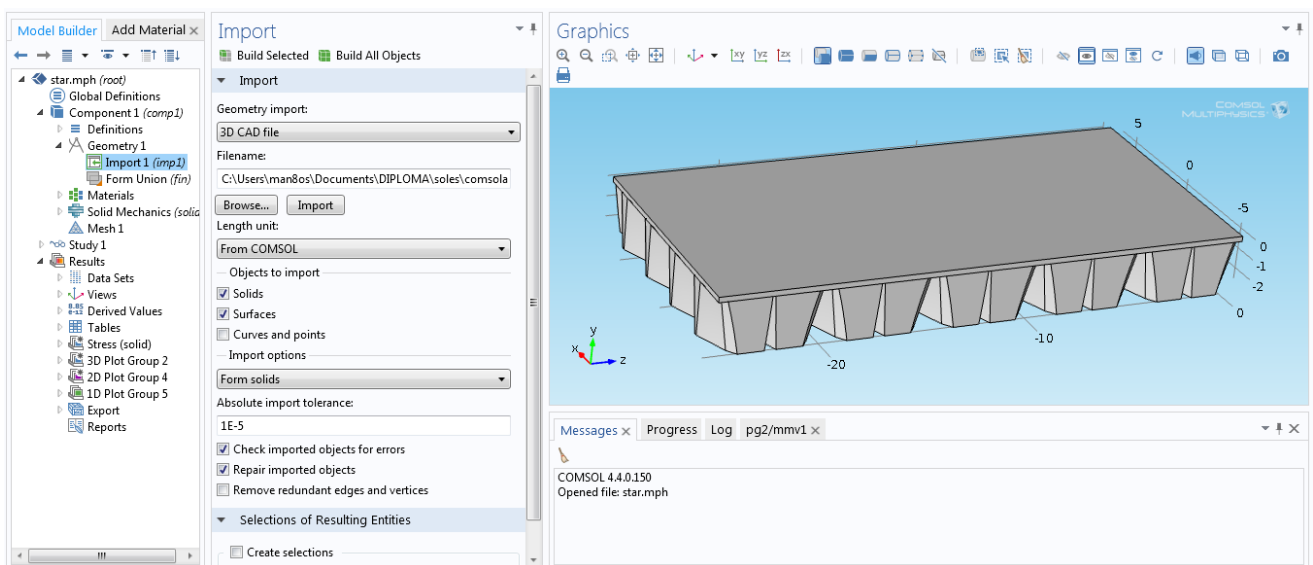
Εικόνα 5.3 Επιλογή μηχανική στερεών



Εικόνα 5.4 Επιλογή τύπου ανάλυσης

5.3 | Εισαγωγή του μοντέλου

Αφού έχει προετοιμαστεί το μοντέλο προς επεξεργασία στο περιβάλλον του Pro/Engineering, το επόμενο στάδιο είναι η εισαγωγή του στο Comsol Multiphysics. Δίνεται επίσης η επιλογή να σχεδιαστεί η διάταξη στο περιβάλλον του Comsol. Ωστόσο αυτό αποτελεί ένα υποτυπώδες σχεδιαστικό περιβάλλον, ακατάλληλο για τη σχεδίαση περίπλοκων γεωμετριών όπως αυτής της αυξητικής σόλας. Για το λόγο αυτό έγινε και η χρήση του προγράμματος του Pro/Engineering. Από το Model Builder, το δέντρο πάνω στο οποίο γίνονται όλες οι επιλογές της διάταξης, πηγαίνουμε στον κόμβο της γεωμετρίας (Geometry) για να προχωρήσουμε στην συνέχεια στην εισαγωγή του σχεδίου (import CAD file).

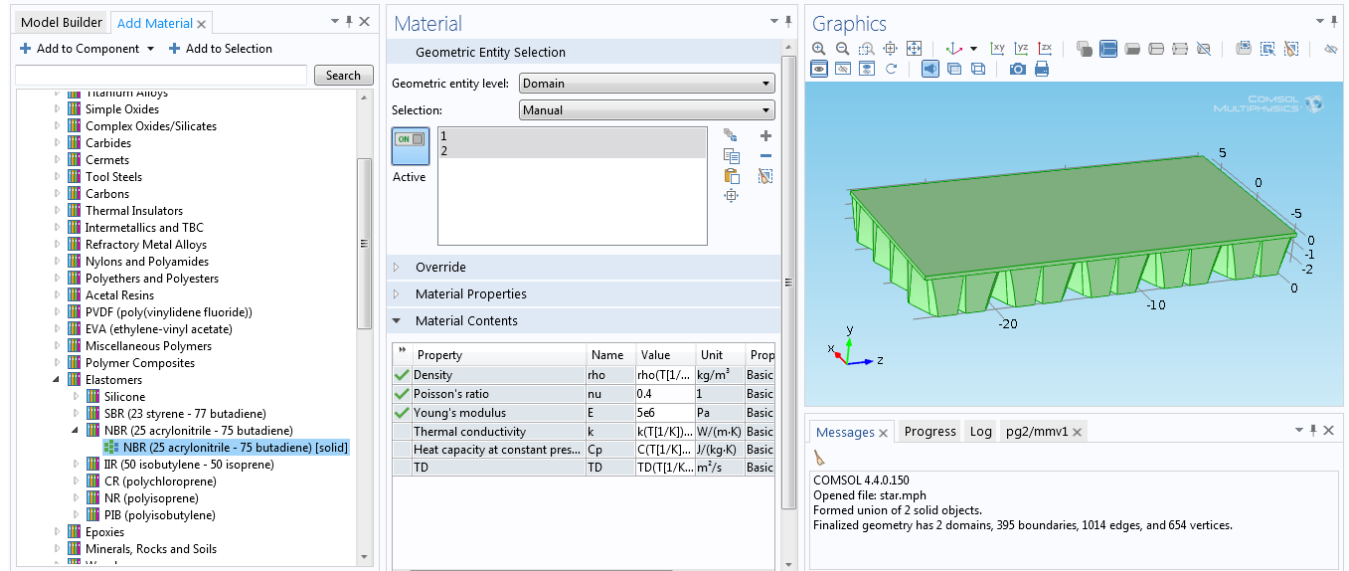


Εικόνα 5.5 Εισαγωγή του μοντέλου.

5.4 | Προσδιορισμός υλικών, των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του Μοντέλου

Το αμέσως επόμενο βήμα περιλαμβάνει την επιλογή του υλικού της διάταξης. Το πρόγραμμα Comsol Multiphysics διαθέτει μια πλούσια βιβλιοθήκη με υλικά όλων πολλών ειδών, μέσα από την οποία μπορούμε να επιλέξουμε το υλικό που μας ενδιαφέρει. Το υλικό που θα εισάγουμε για την παρούσα ανάλυση είναι καουτσούκ τύπου NBR (25 acrylonitrile – 75 butadiene). Το συγκεκριμένο υλικό είναι ένα ελαστομερές συνθετικό υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία της υπόδησης. Αποτελείται από 25% ακρυλονιτριλίου και 75% βουταδιενίου. Το τυπικό

μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε θερμοκρασία δωματίου (25 ° C) κυμαίνεται στα 2-5 MPa και η τυπική πυκνότητα του είναι περίπου 1000kg/m³. Η χαρακτηριστική αντοχή σε εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 MPa. Τέλος η αναλογία Poisson είναι 0,4. Αυτό το είδος καουτσούκ θα αποτελέσει το υλικό για όλες τις σόλες που θα μελετηθούν και αποτελεί κοινή διαδικασία η εισαγωγή του υλικού με τις ιδιότητες του. Οπότε από το δέντρο μοντελοποίησης του προγράμματος εισάγουμε στην διάταξη το συγκεκριμένο είδος υλικού και μετά το εισάγουμε σε κάθε ένα από τα μέρη της διάταξης (sole και midsole) ξεχωριστά.



Material Browser

Search

- Acetal Resins
- PVDF (poly(vinylidene fluoride))
- EVA (ethylene-vinyl acetate)
- Miscellaneous Polymers
- Polymer Composites
- Elastomers**
 - Silicone
 - SBR (23 styrene - 77 butadiene)
 - NBR (25 acrylonitrile - 75 butadiene)**
 - IR (50 isobutylene - 50 isoprene)
 - CR (polychloroprene)
 - NR (polyisoprene)
 - PIB (polyisobutylene)
- Epoxies
- Minerals, Rocks and Soils
- Woods
- Polypropylenes

Add to Component Add To

Added to model:

NBR (25 acrylonitrile - 75 butadiene) [solid], Component 1

Material: NBR (25 acrylonitrile - 75 butadiene)

Phase: solid

Orientation/variation:

Composition: 25% acrylonitrile, 75% butadiene

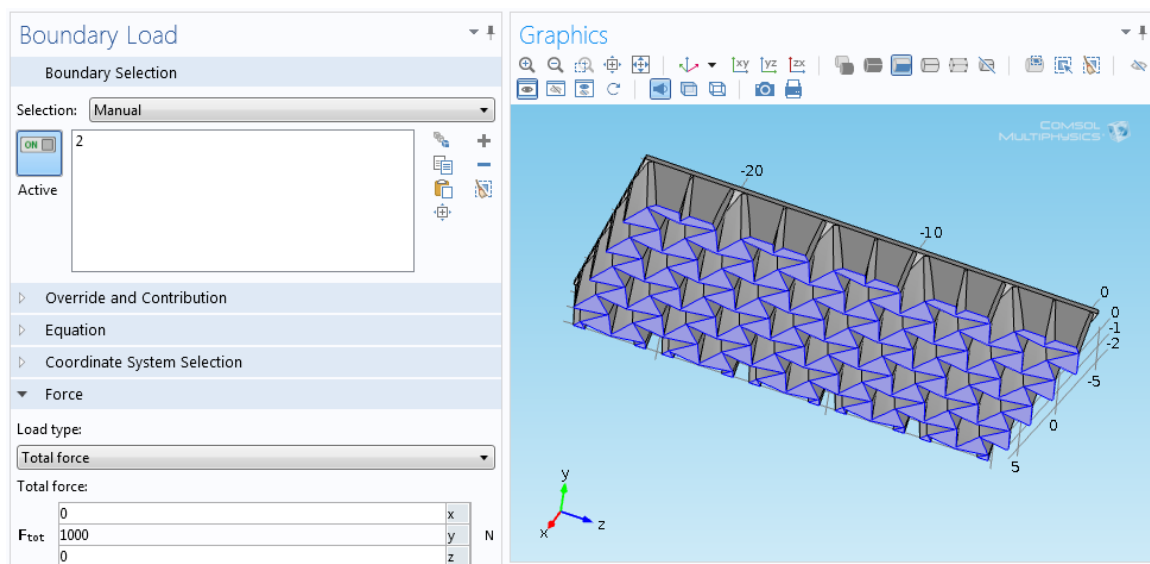
Property	Expression	Unit	Property group
Thermal conductivity	$k(T[1/K])[W/(m^*K)]$	$W/(m^*K)$	
Heat capacity at constant pr...	$C(T[1/K])[J/(kg^*K)]$	$J/(kg^*K)$	
Density	$\rho(T[1/K])[kg/m^3]$	kg/m^3	
TD	$TD(T[1/K])[m^2/s]$		

Property reference:

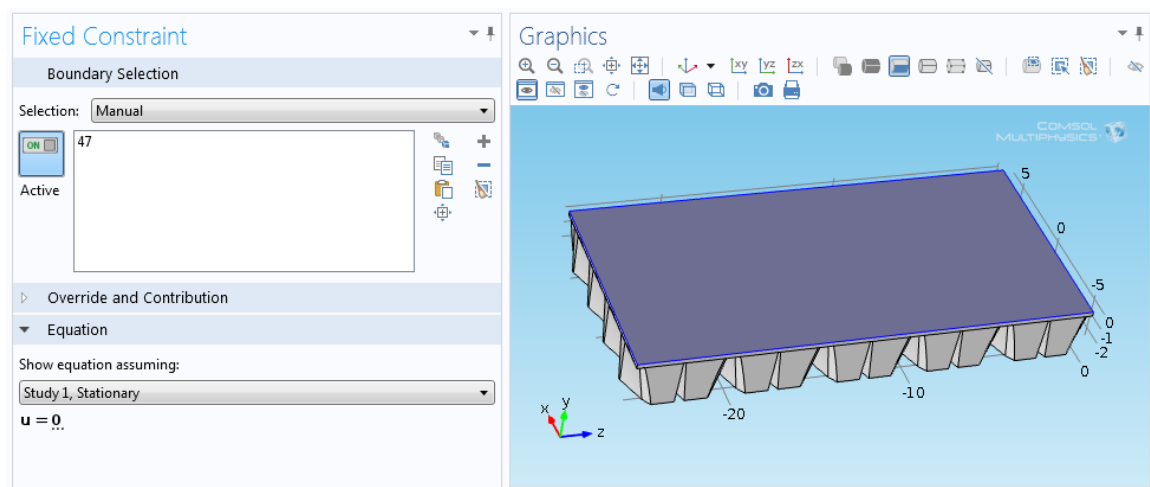
Εικόνα 5.6 Προσθήκη υλικού

Στο ίδιο στάδιο πρέπει επίσης να οριστούν οι μηχανικές οριακές συνθήκες. Στην στατική ανάλυση της σόλας θα πακτώσουμε το επάνω μέρος της σόλας το οποίο έρχεται σε επαφή με το πέλμα και θα ασκήσουμε μια δύναμη από την κάτω πλευρά ίση με το βάρος ενός ανθρώπου 102 κιλών έτσι ώστε να δούμε κατά πόσο και πως καταπονείται το πόδι όταν βρισκόμαστε σε στάση. Τις ίδιες οριακές συνθήκες ορίζουμε και για την δυναμική ανάλυση που θα ακολουθήσει.

Από το Model Builder πάμε στο Solid Mechanics και προσθέτουμε τις επιλογές Boundary Load και Fixed Constraint. Με ένα κλικ επιλέγουμε την κάτω επιφάνεια της σόλας στο boundary load έτσι ώστε να εφαρμοστεί εκεί η δύναμη των 1000N και την επάνω επιφάνεια ως Fixed Constraint.



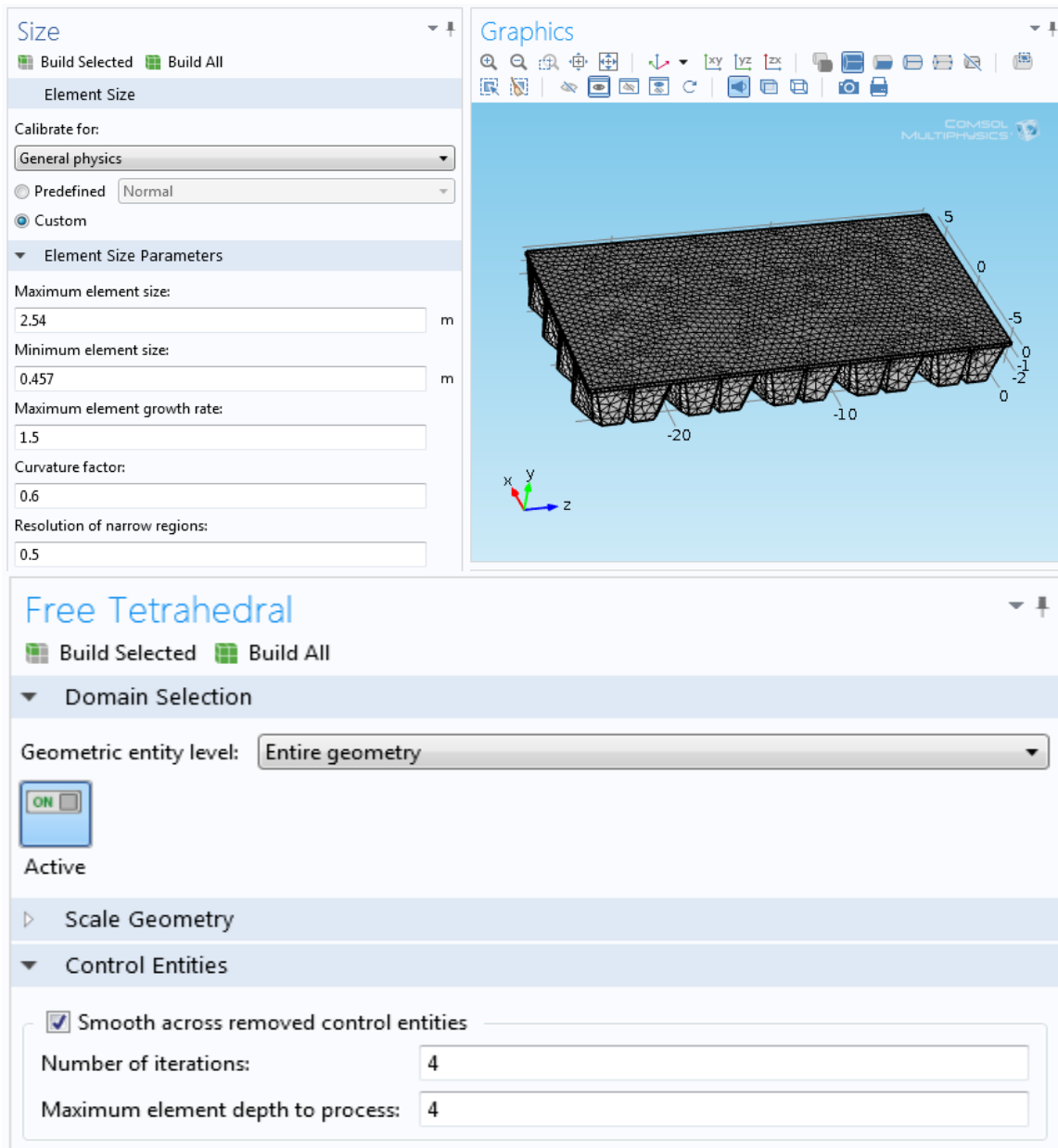
Εικόνα 5.7 Εισαγωγή του Boundary Load



Εικόνα 5.8 Fixed Constraint

5.5 | Πλεγματοποίηση (Meshing)

Στο στάδιο αυτό το πρόγραμμα δημιουργεί αυτόματα τα στοιχεία του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των συναρτήσεων που χρησιμοποιεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για να παράγει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Για κάθε μοντέλο σόλας που εισάγεται στο Comsol Multiphysics, πραγματοποιείται πλεγματοποίηση, των οποίων τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο. Από τον Model Builder πατάμε την επιλογή mesh για να προχωρήσουμε στην δημιουργία του πλέγματος. Στην συνέχεια πρέπει να ορίσουμε το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος καθώς και την μορφή του όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5.9 Πλεγματοποίηση

5.6 | Επίλυση

Αφού έχει ολοκληρωθεί η ρύθμιση των παραμέτρων, το επόμενο στάδιο είναι η επίλυση του προβλήματος από το πρόγραμμα. Αυτό πρέπει να κάνουμε και για τους δυο τύπους ανάλυσης στους οποίους θα προχωρήσουμε (στατική και δυναμική ανάλυση), είναι να προχωρήσουμε στην επίλυση μέσω της επιλογής Study που μας δίνεται από το δέντρο μοντελοποίησης του προγράμματος. Κατά την δυναμική ανάλυση ζητάμε από το πρόγραμμα να μας δώσει τις 10 πρώτες, τις 10 σημαντικότερες ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες για κάθε τύπο σόλας, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.10.

The screenshot shows the 'Eigenfrequency' study settings. The 'Study Settings' section includes: 'Desired number of eigenfrequencies' set to 10, 'Search for eigenfrequencies around' set to 0, 'Eigenfrequency search method around shift' set to 'Closest in absolute value', and an unchecked checkbox for 'Include geometric nonlinearity'. The 'Physics and Variables Selection' section has an unchecked checkbox for 'Modify physics tree and variables for study step'. Below this, a table shows 'Physics' set to 'Solid Mechanics (solid)' and 'Solve for' set to 'Discretization' with a green checkmark. The 'Values of Dependent Variables' section is collapsed. The 'Mesh Selection' section shows 'Geometry' set to 'Geometry 1' and 'Mesh' set to 'Mesh 1'. The 'Study Extensions' section is collapsed.

Eigenfrequency	
▼ Study Settings	
Desired number of eigenfrequencies:	10
Search for eigenfrequencies around:	0
Eigenfrequency search method around shift:	Closest in absolute value
<input type="checkbox"/> Include geometric nonlinearity	
▼ Physics and Variables Selection	
<input type="checkbox"/> Modify physics tree and variables for study step	
» Physics	Solve for
Solid Mechanics (solid)	Discretization
	✓ Physics settings
▶ Values of Dependent Variables	
▼ Mesh Selection	
» Geometry	Mesh
Geometry 1	Mesh 1
▶ Study Extensions	

Εικόνα 5.10

5.7 | Συλλογή αποτελεσμάτων

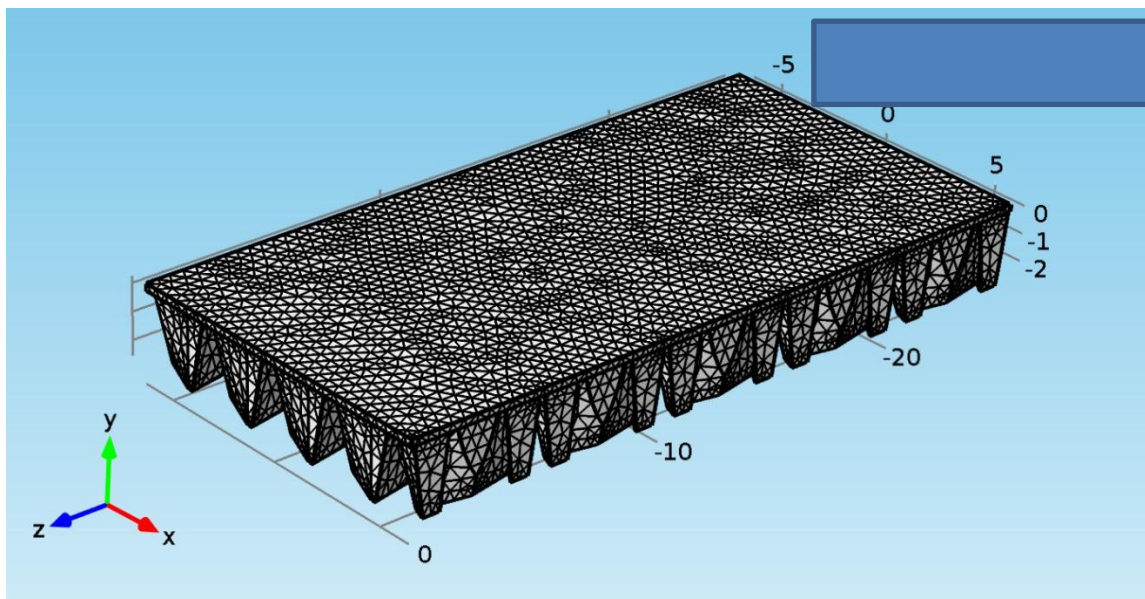
Αφού το πρόγραμμα τελικά επιλύσει το πρόβλημα, μας δίνεται η δυνατότητα να κάνουμε την συλλογή των αποτελεσμάτων. Από το δέντρο μοντελοποίησης του προγράμματος μπορούμε να αναζητήσουμε τις τιμές που μας ενδιαφέρει. Οι δυνατότητες επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι πάρα πολλές. Μπορούμε να επεξεργαστούμε τρισδιάστατες εικόνες των αποτελεσμάτων, να τις μετατρέψουμε σε δισδιάστατη μορφή, όπως και να δημιουργήσουμε διαγράμματα από τις τιμές των αποτελεσμάτων.

6 | Αποτελέσματα Της Ανάλυσης

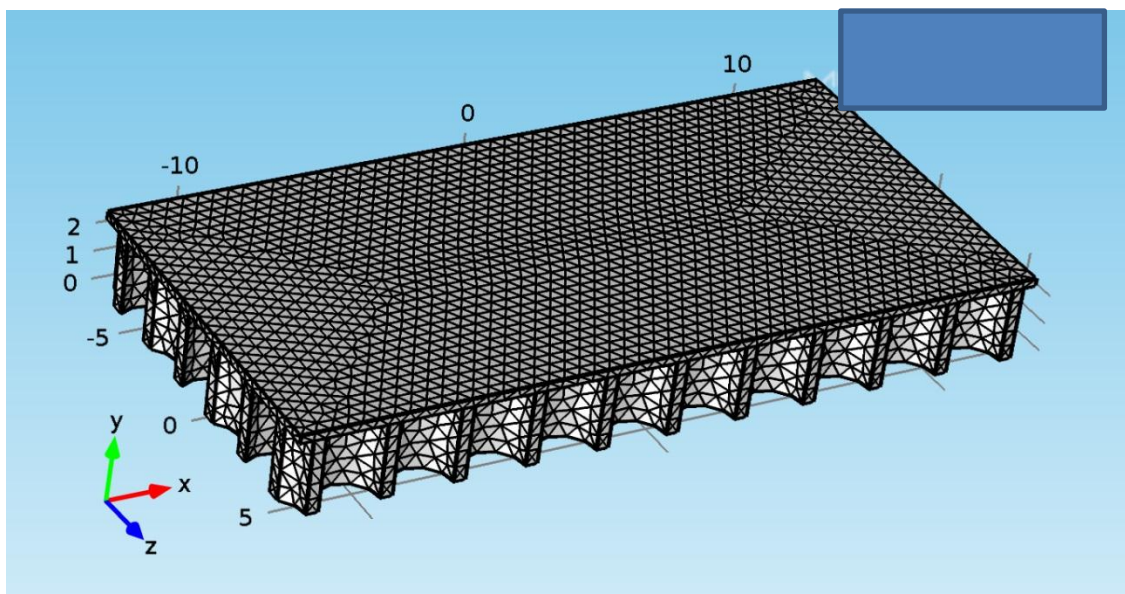
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για να εφαρμόσει το Comsol Multiphysics την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο υπό μελέτη μοντέλο και να επιλύσει το πρόβλημα, είναι απαραίτητη η πλεγματοποίηση. Στο σύνολο της μελέτης πραγματοποιήθηκε πλεγματοποίηση σε ένα μόνο επίπεδο, καθώς η δεύτερη πλεγματοποίηση θα αύξανε σε σημαντικό βαθμό τον υπολογιστικό φόρτο έτσι ώστε η επίλυση από ένα κοινό υπολογιστή θα γινότανε χρονοβόρα έως και αδύνατη. Τα αποτελέσματα της πλεγματοποίησης για κάθε σόλα δίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Αποτελέσματα Της Πλεγματοποίησης

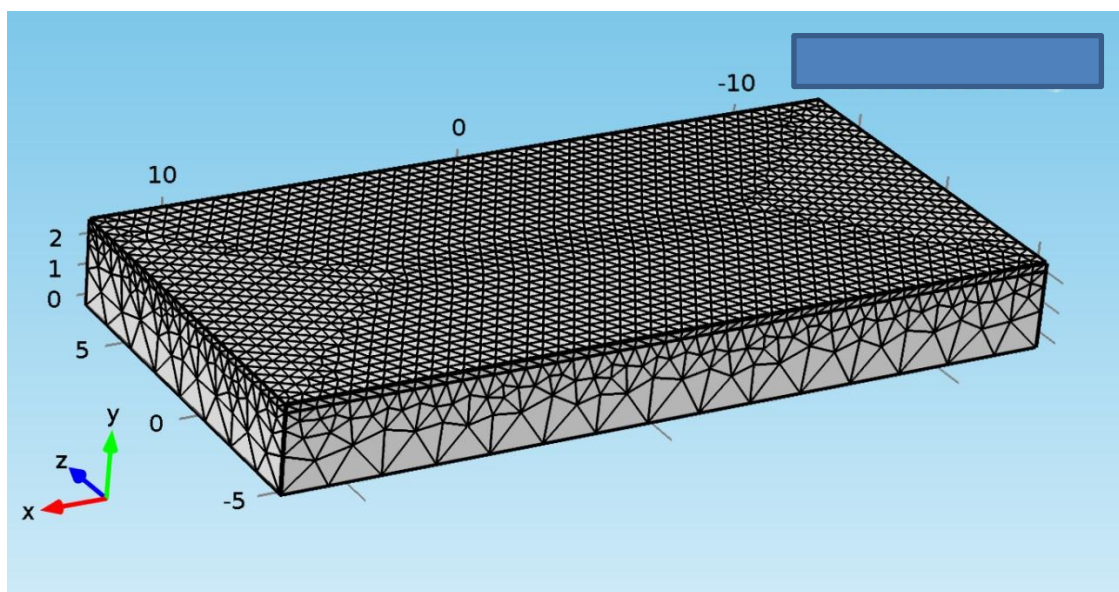
	Star	Solid	Round	
Tetrahedral Elements	48045	26341	35000	Τετραεδρικά Στοιχεία
Triangular Elements	24234	7128	19258	Τριγωνικά Στοιχεία
Edge Elements	4395	362	2794	Στοιχεία Ακμών
Vertex Elements	654	12	332	Στοιχεία Κορυφών



Εικόνα 6.1 Πλεγματοποίηση αυξητικής Σόλας



Εικόνα 6.2 Πλεγματοποίηση σόλας με κυκλικές τρύπες

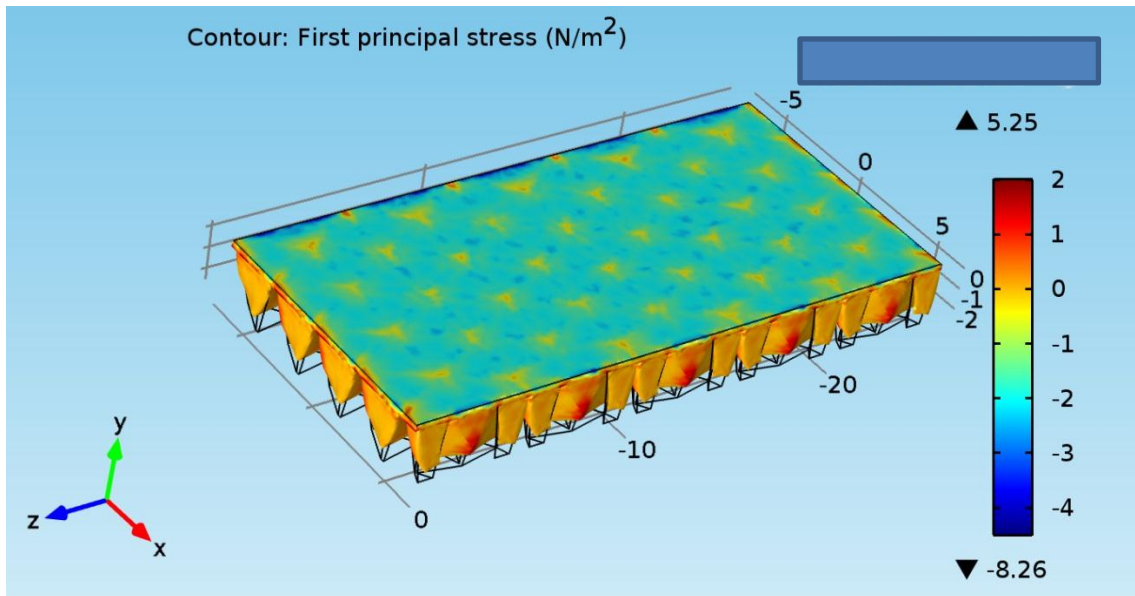


Εικόνα 6.3 Πλεγματοποίηση Συμπαγούς σόλας

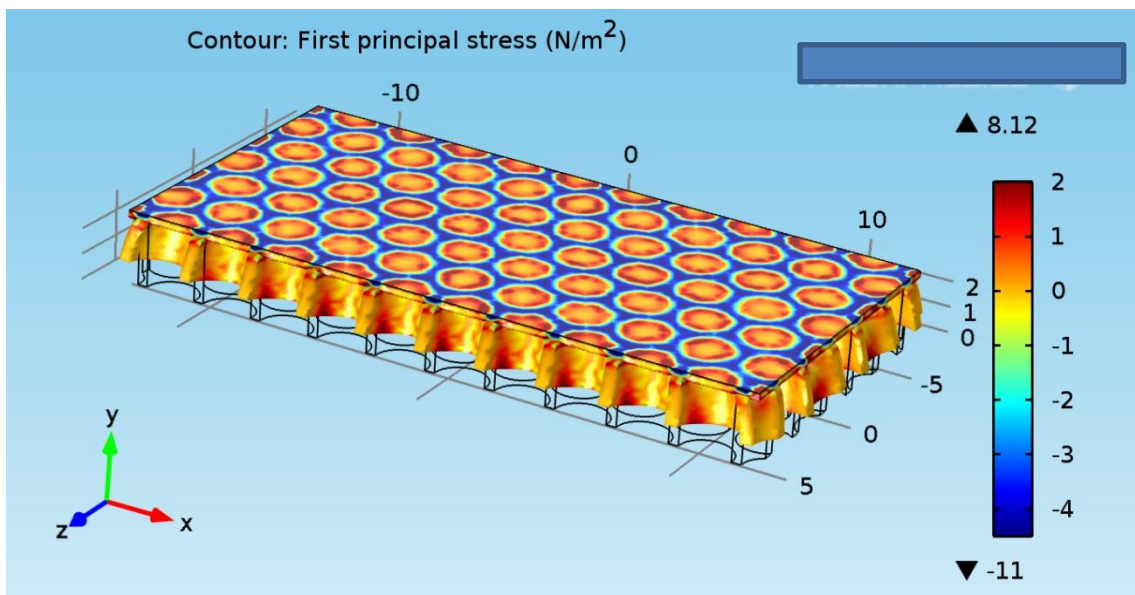
Αφού πραγματοποιηθεί η ανάλυση, προσφέρεται η δυνατότητα να καταγραφούν τόσο αριθμητικά όσο και παραστατικά τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά και για τους δυο τύπους ανάλυσης, σε εικόνες που προσφέρονται από το πρόγραμμα. Με τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δίνεται μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς του μοντέλου κατά την στατική και την δυναμική του ανάλυση, καθώς παρατηρώντας τα, μπορούμε να δούμε από το χρώμα την τιμή κάθε μεταβλητής στα διάφορα σημεία του.

6.1 | Στατική Ανάλυση

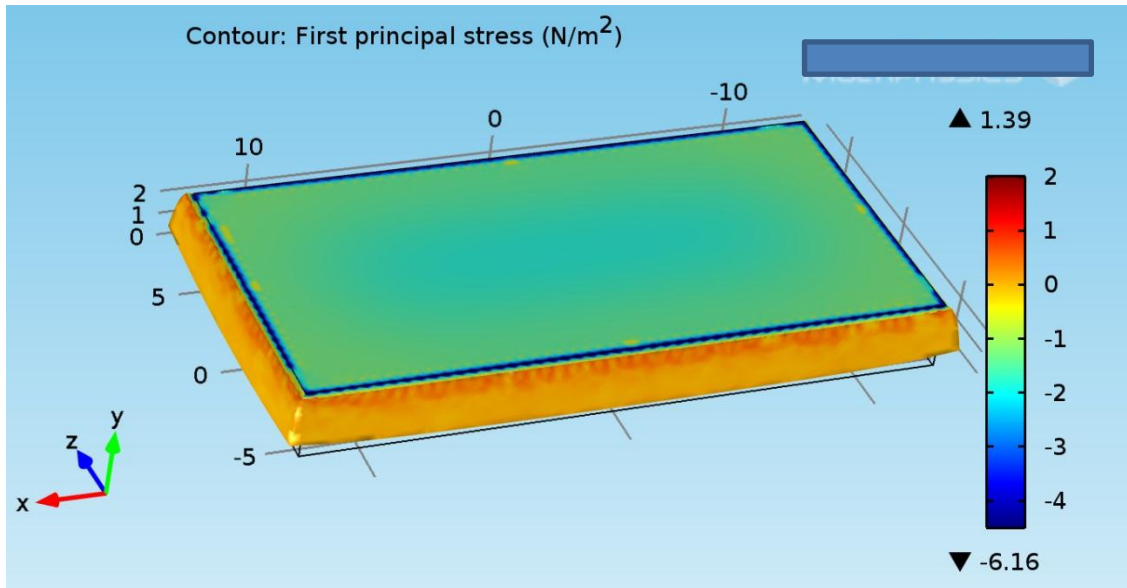
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης για κάθε σόλα. Αυτό που μας ενδιαφέρει στο σημείο αυτό, είναι να δούμε τις δυνάμεις που μεταφέρονται στο πέλμα και η αίσθηση που δίνει η κάθε σόλα όταν βρισκόμαστε σε στάση. Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων έχουν γίνει τομές (2D και 1D) στον όγκο της κάθε σόλας οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 6.4 Τάσεις και παραμόρφωση της αυξητικής σόλας

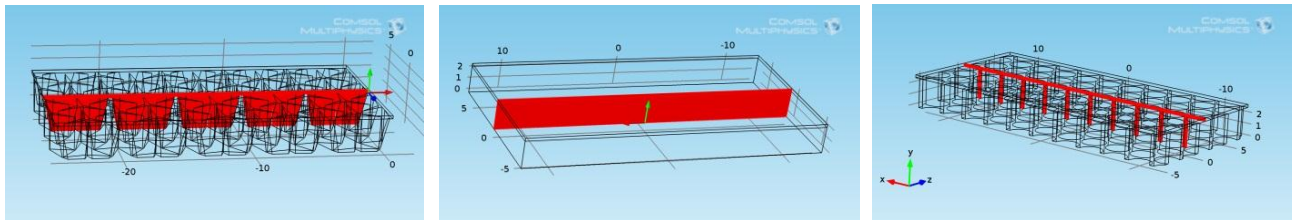


Εικόνα 6.5 Τάσεις και παραμόρφωση της σόλας με κυκλικές τρύπες

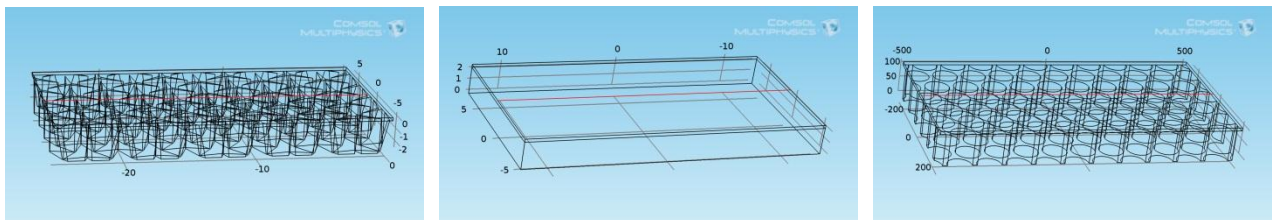


Εικόνα 6.5 Τάσεις και παραμόρφωση της συμπαγούς σόλας

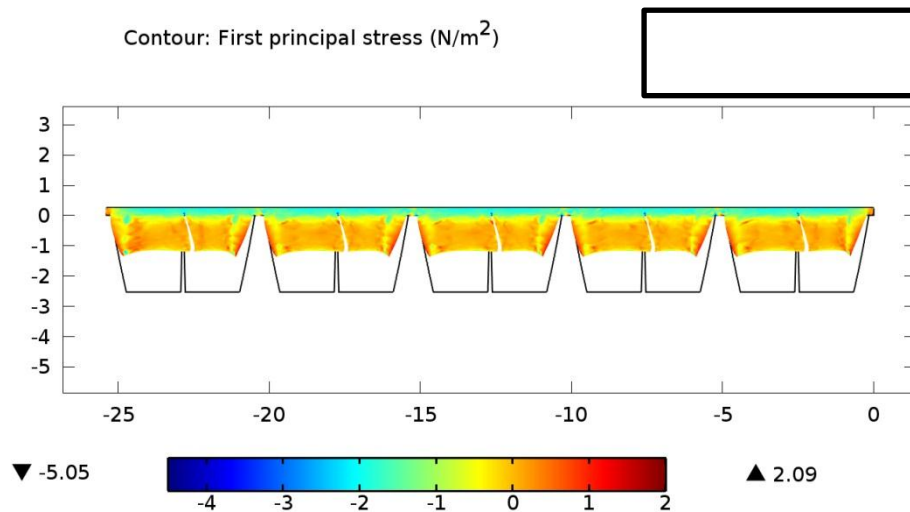
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις σε τομές για κάθε σόλα. Οι επιφάνειες στις οποίες έγιναν οι τομές φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 6.6) ενώ παρουσιάζονται και διαγράμματα με την κατανομή των τάσεων στην ευθεία που τα επίπεδα της εικόνας 6.6 τέμνουν την επάνω επιφάνεια της σόλας (εικόνα 6.7)



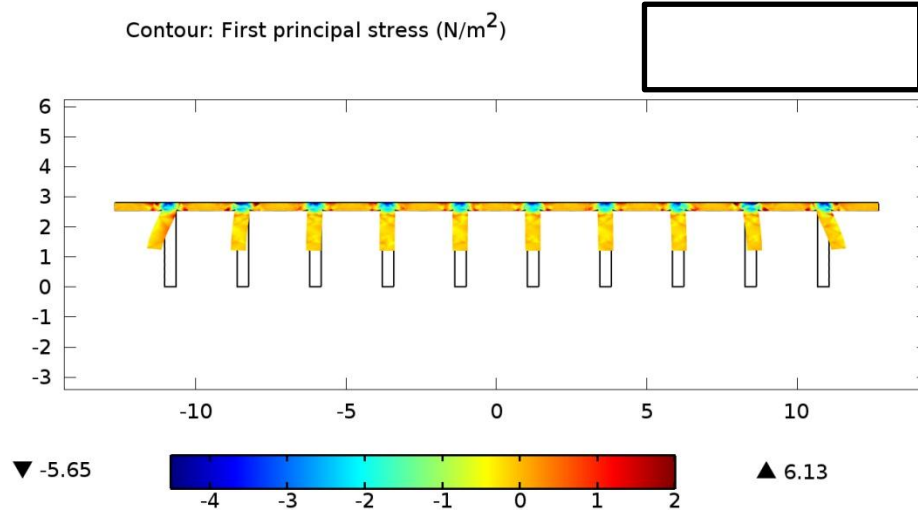
Εικόνα 6.6 Επίπεδα Τομών 2D



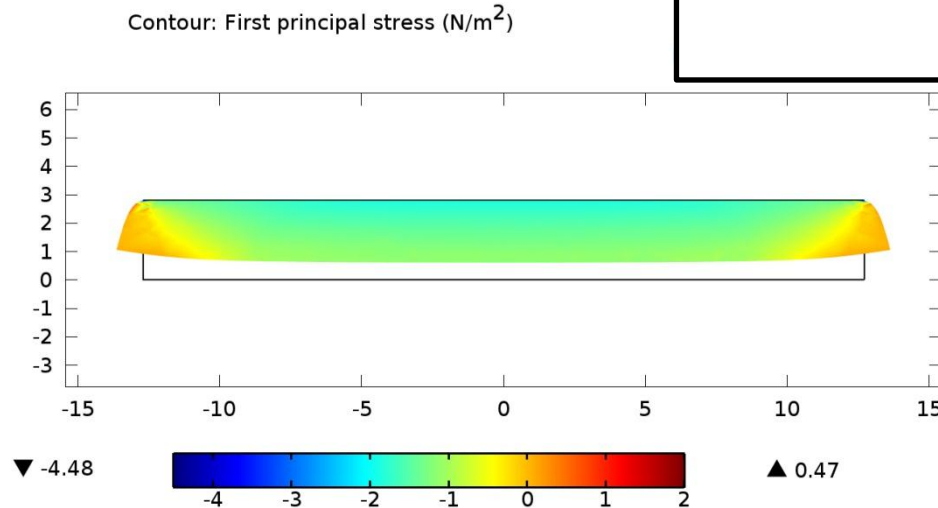
Εικόνα 6.7 Cut lines 1D



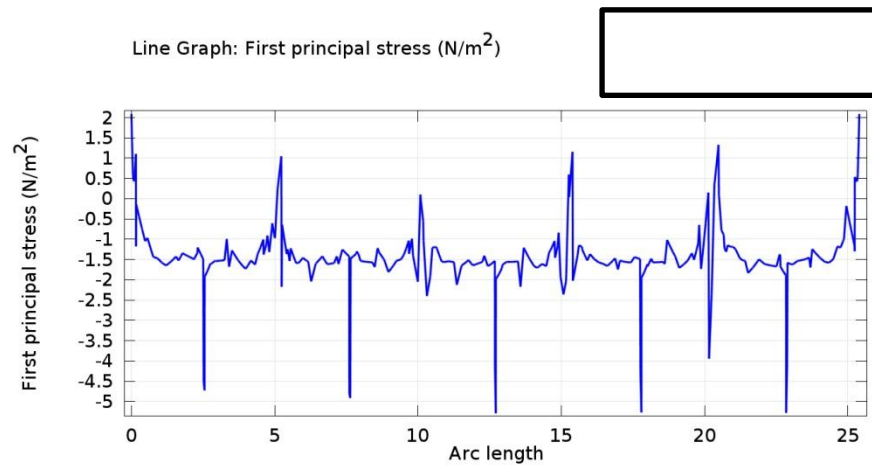
Εικόνα 6.8 Τομή κατά μήκος της αυξητικής σόλας



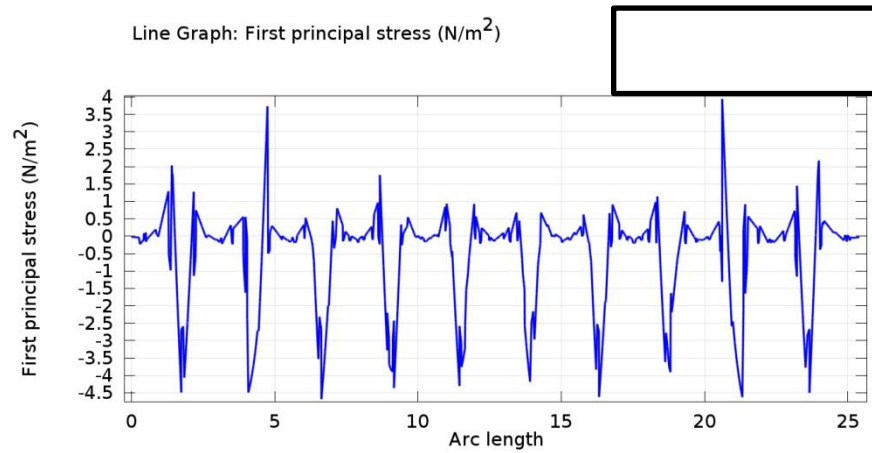
Εικόνα 6.9 Τομή κατά μήκος της σόλας με κυκλικές τρύπες



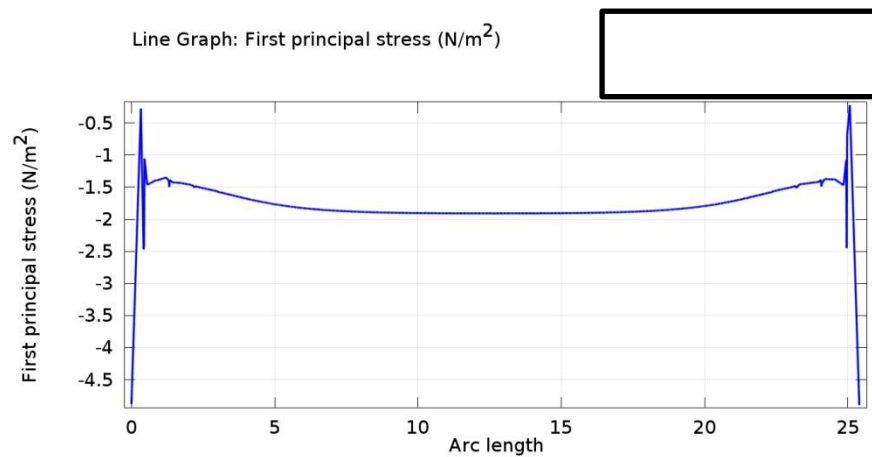
Εικόνα 6.10 Τομή κατά μήκος της συμπαγούς σόλας



Εικόνα 6.11 Αυξητική Σόλα

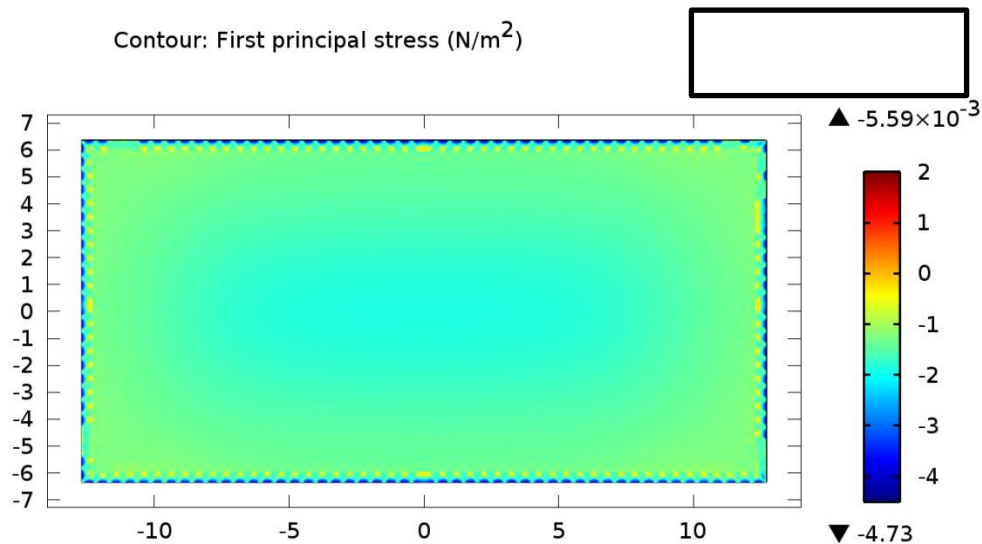
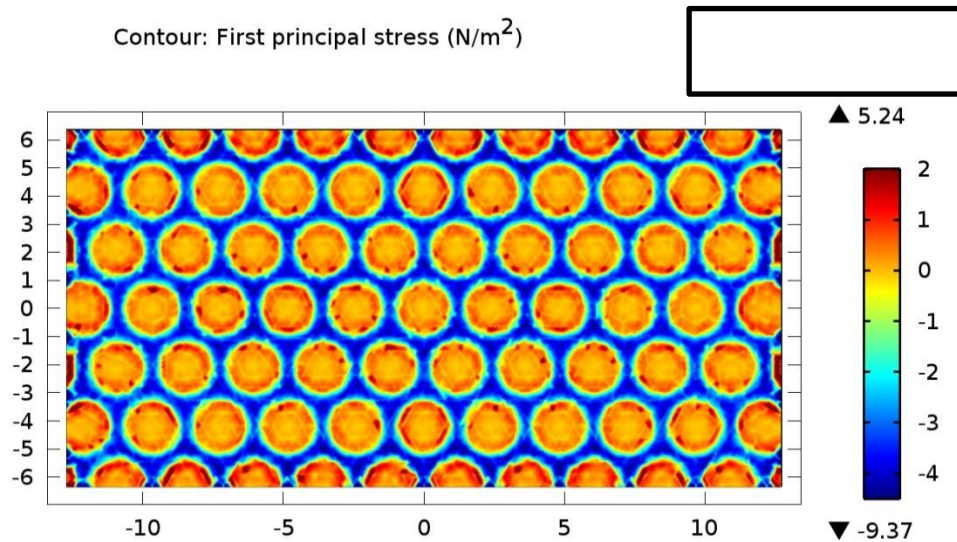
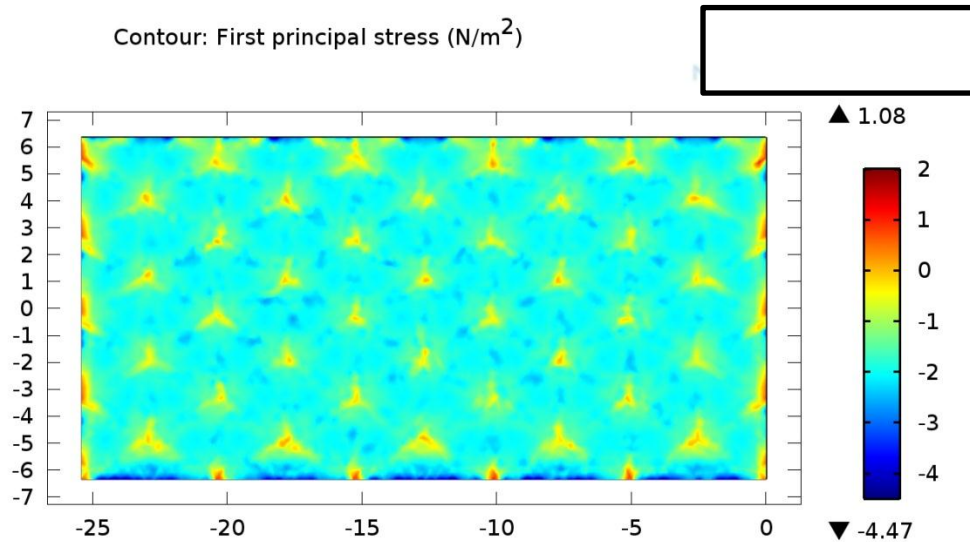


Εικόνα 6.12 Σόλα με κυκλικές τρύπες

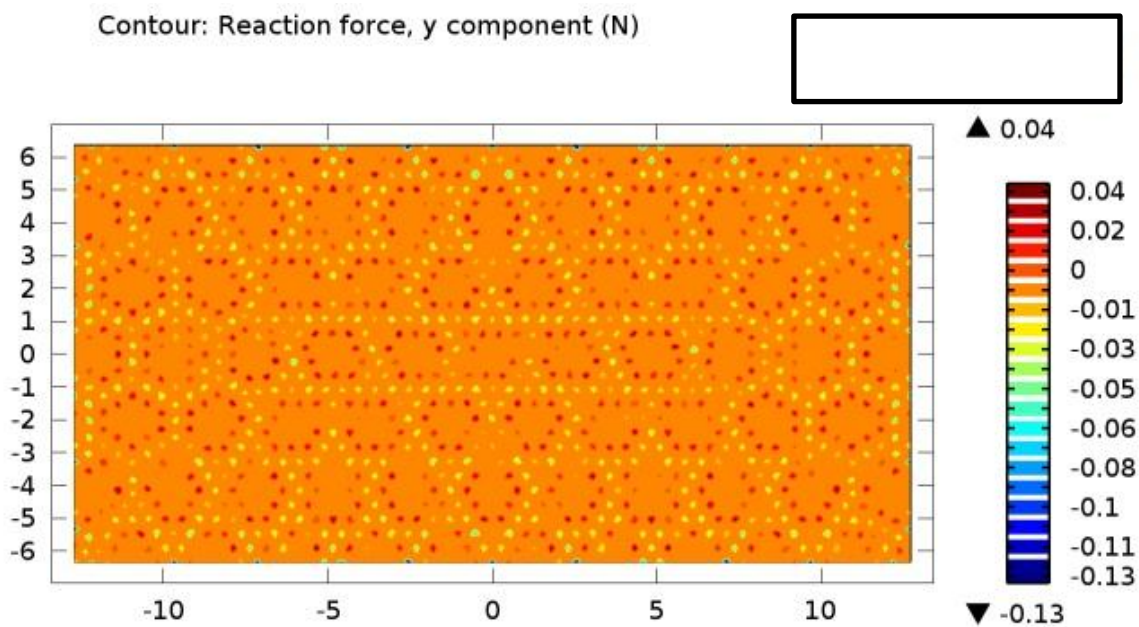
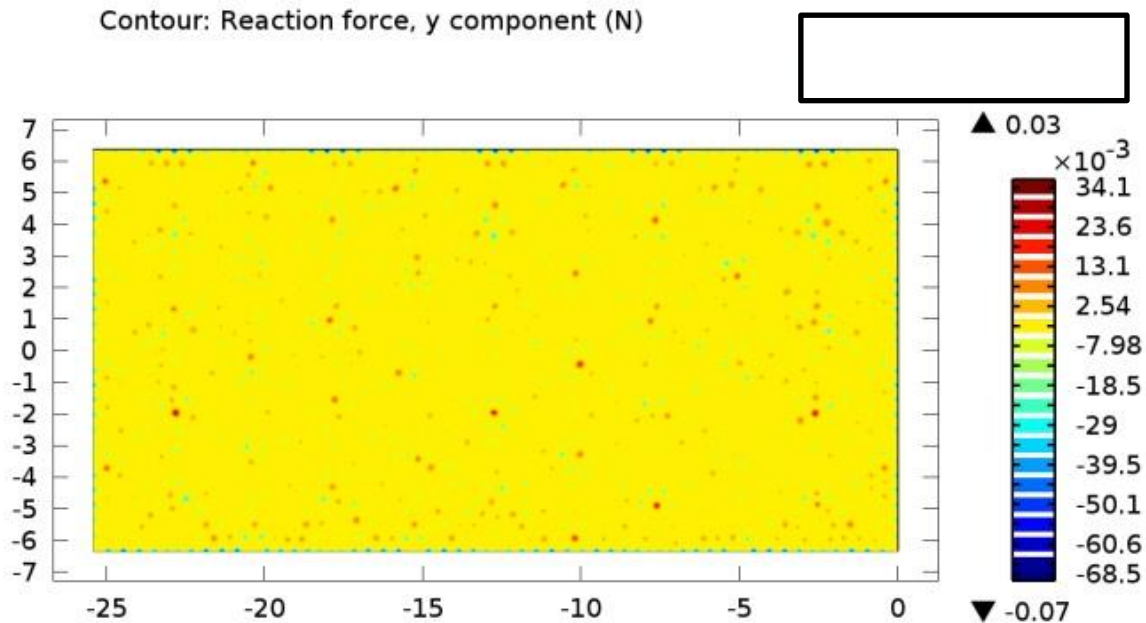


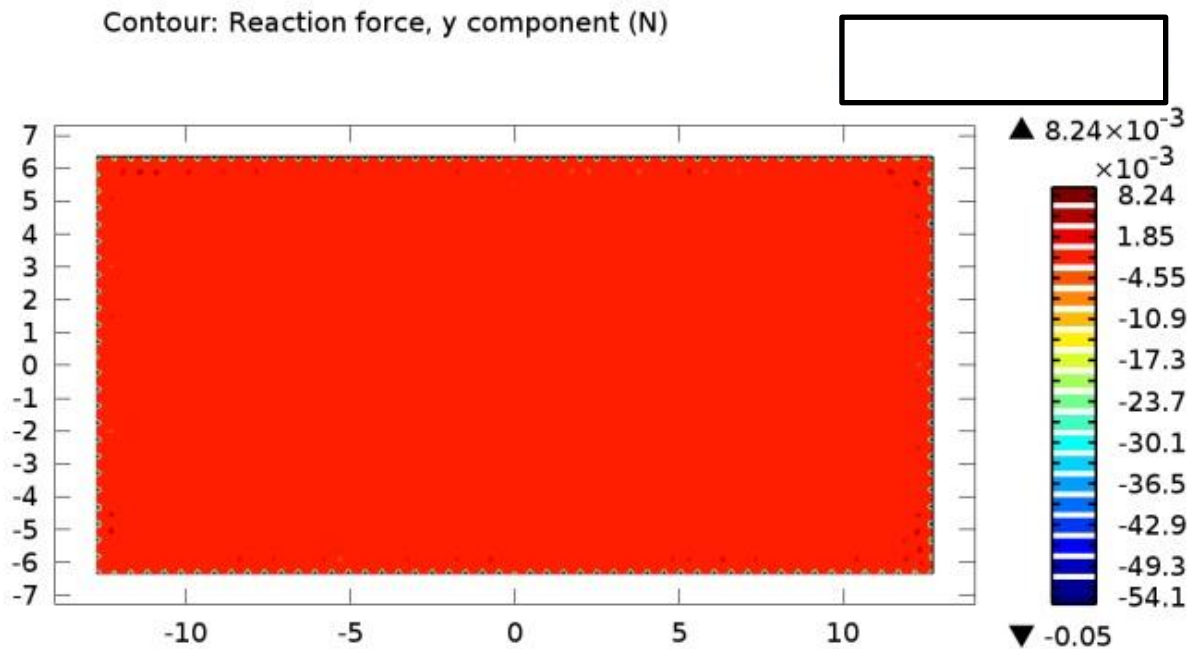
Εικόνα 6.13 Συμπαγής σόλα.

Ακολουθούν διαγράμματα σε δυσδιάστατο επίπεδο που δείχνουν τις τάσεις που αναπτύσσονται στην επάνω επιφάνεια της σόλας, δηλαδή στην επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το πέλμα. (αυξητική σόλα, σόλα με κυκλικές τρύπες, συμπαγής σόλα)

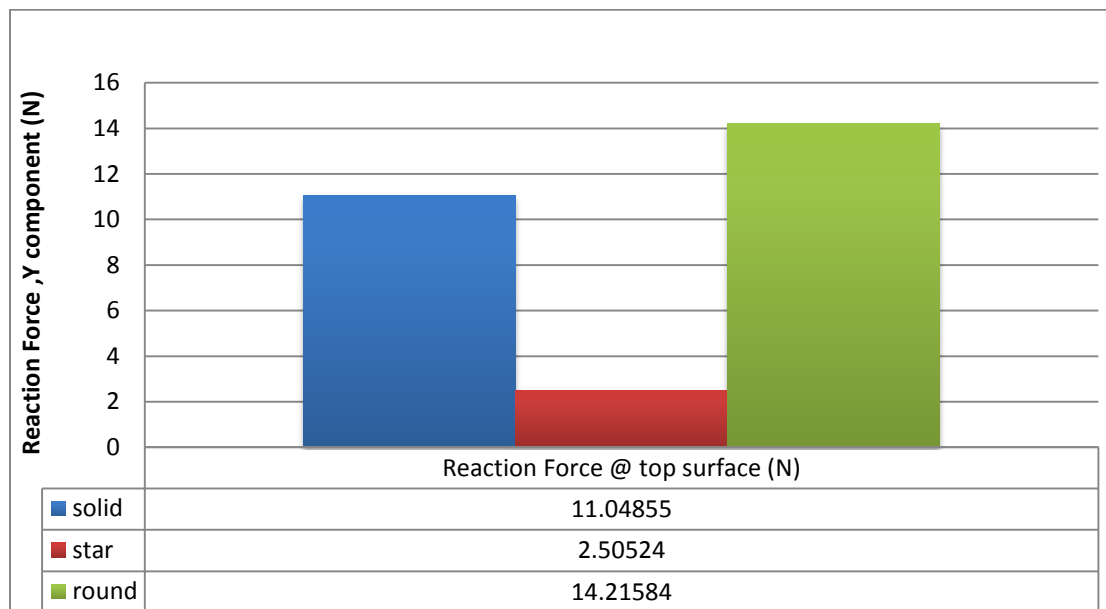


Ακολουθούν διαγράμματα σε δυσδιάστατο επίπεδο που δείχνουν την κατανομή των αντιδράσεων κατά τον άξονα Y, στην επάνω επιφάνεια της σόλας, δηλαδή στην επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το πέλμα. (αυξητική σόλα, σόλα με κυκλικές τρύπες, συμπαγής σόλα)



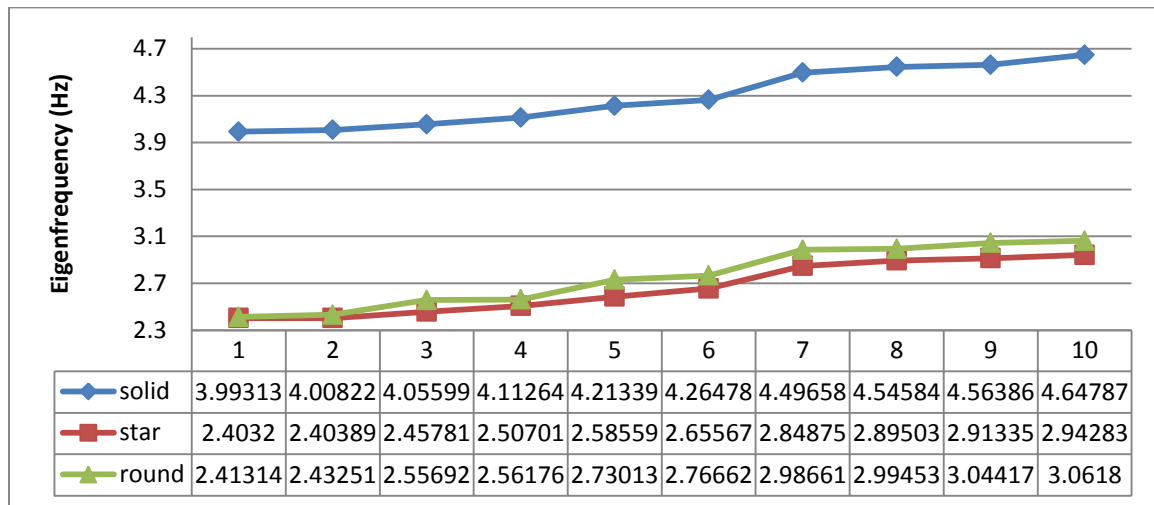


Ολοκληρώνοντας τις κατά Y αντιδράσεις σε αυτήν την επιφάνεια προκύπτει ο παρακάτω πίνακας. Από τον πίνακα φαίνεται πως η αυξητική σόλα λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνει τις τάσεις που φτάνουν στο πέλμα.

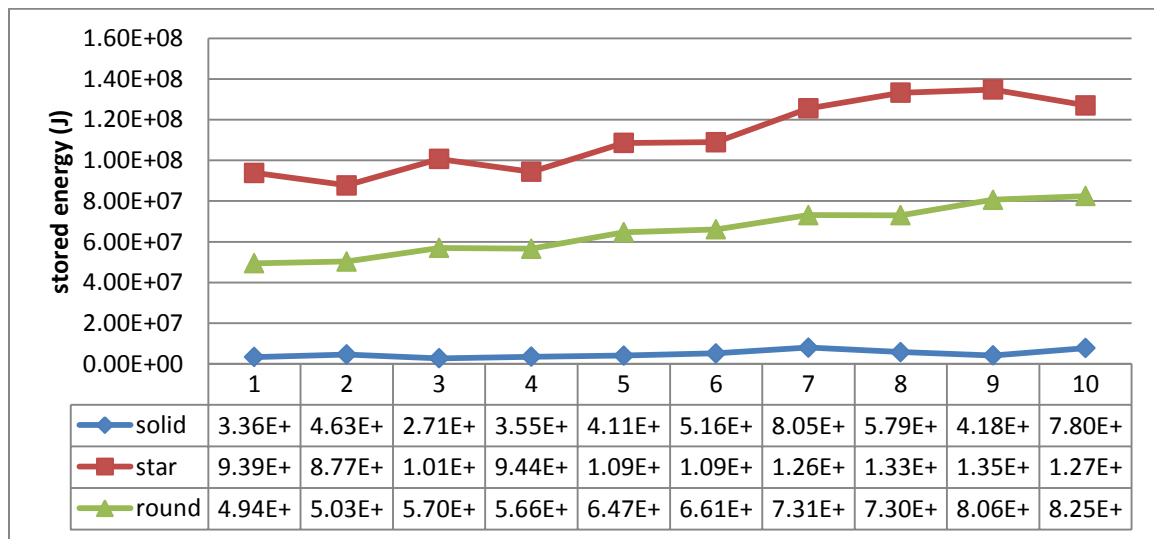


6.2 | Δυναμική ανάλυση

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο ζητήσαμε από το πρόγραμμα να μας δώσει τις 10 πρώτες, τις 10 σημαντικότερες ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες για κάθε τύπο σόλας. Στο παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα 6.2) φαίνονται οι 10 ιδιοσυχνότητες για κάθε τύπο σόλας.



Διάγραμμα 6.2

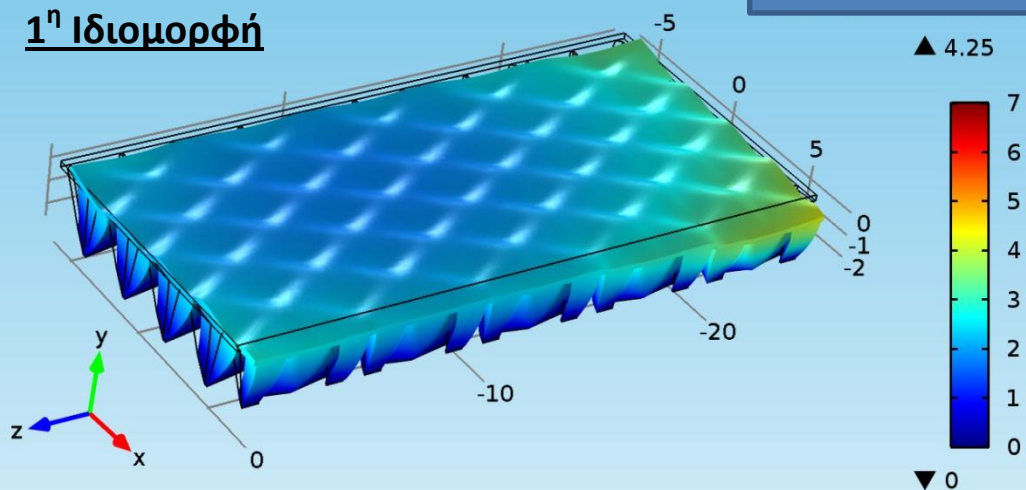


Παρατηρούμε ότι η αυξητική σόλα καθώς και αυτή με τις κυκλικές τρύπες ταλαντώνονται σε χαμηλότερες συχνότητες από αυτές που ταλαντώνεται η συμπαγής σόλα. Η αυξητική σόλα ταλαντώνεται σε συχνότητες μικρότερες από αυτές στις οποίες ταλαντώνονται οι άλλες σόλες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι δέκα πρώτες ιδιομορφές για κάθε τύπο σόλας και ακολουθεί ένας σύντομος σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών.

Αυξητική Σόλα

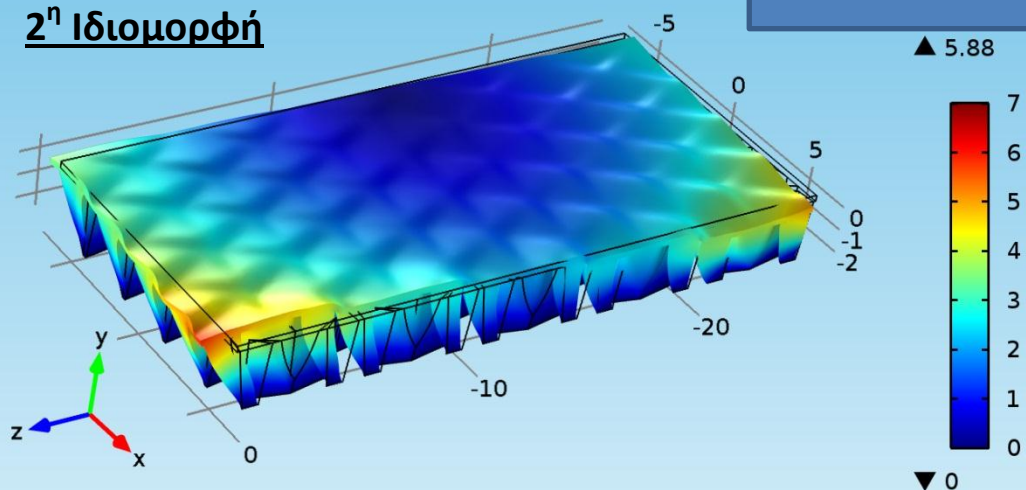
Eigenfrequency=2.403201 Surface: Total displacement (m)

1^η Ιδιομορφή



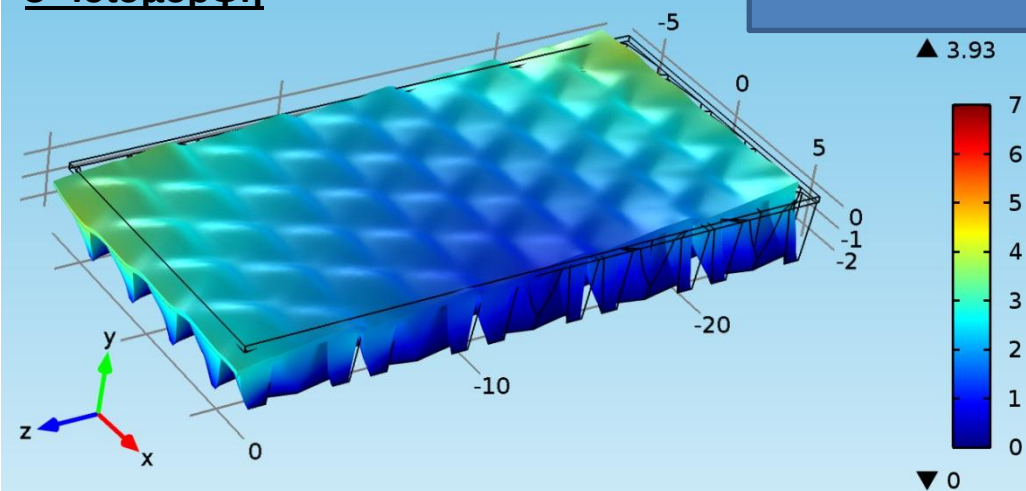
Eigenfrequency=2.403887 Surface: Total displacement (m)

2^η Ιδιομορφή



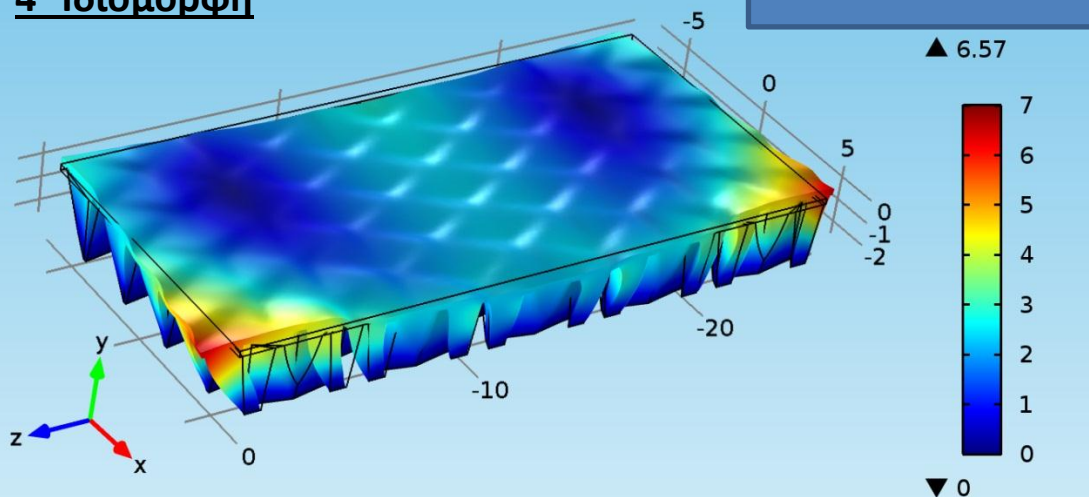
Eigenfrequency=2.457806 Surface: Total displacement (m)

3^η Ιδιομορφή



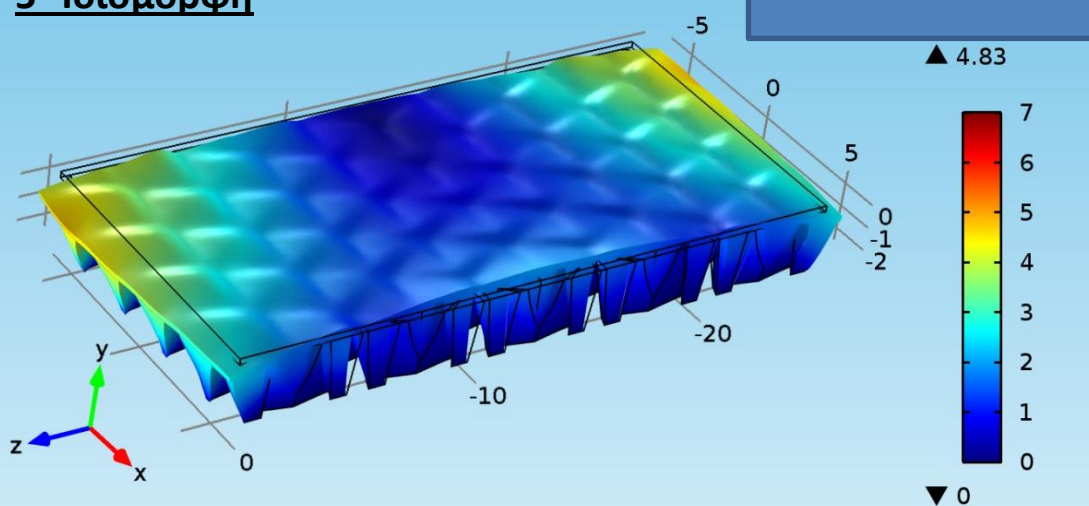
Eigenfrequency=2.507006 Surface: Total displacement (m)

4^η Ιδιομορφή



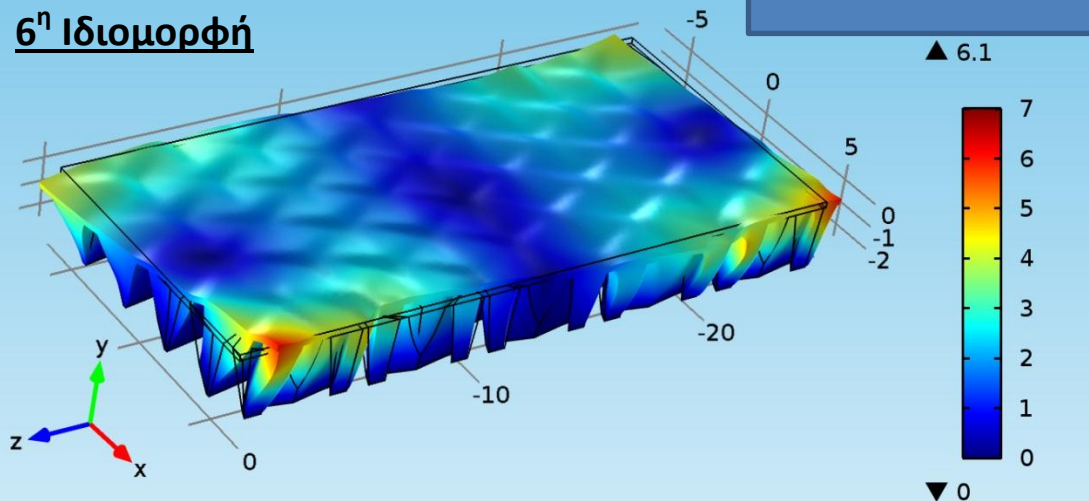
Eigenfrequency=2.585593 Surface: Total displacement (m)

5^η Ιδιομορφή



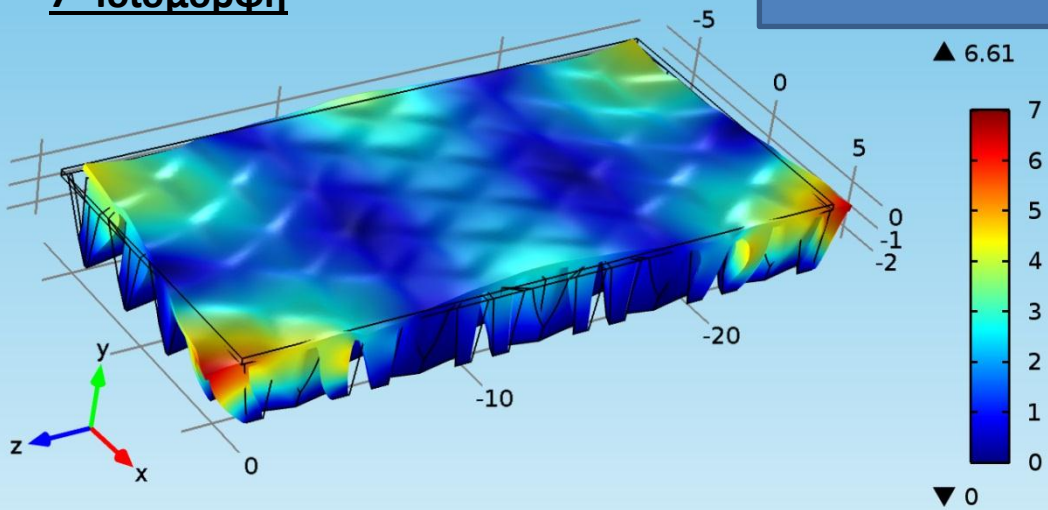
Eigenfrequency=2.655672 Surface: Total displacement (m)

6^η Ιδιομορφή



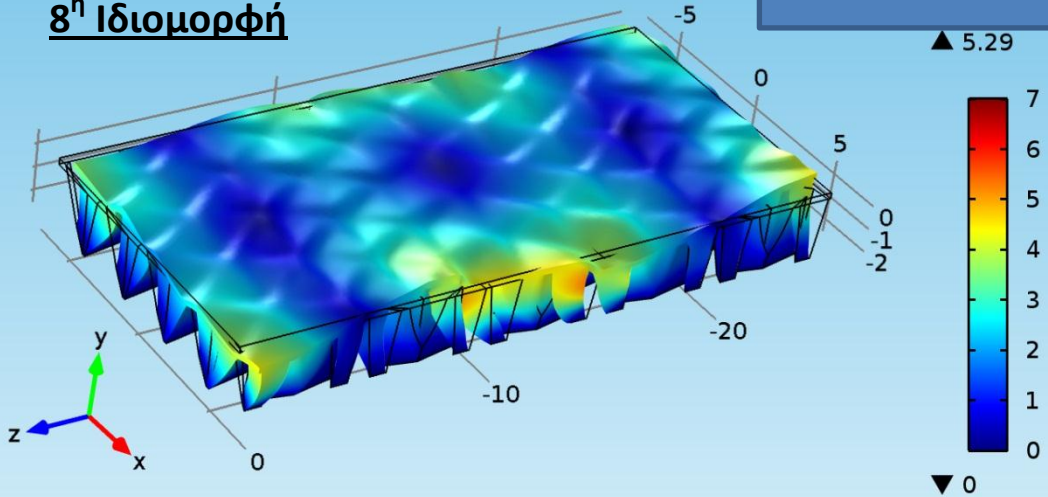
Eigenfrequency=2.848755 Surface: Total displacement (m)

7^η Ιδιομορφή



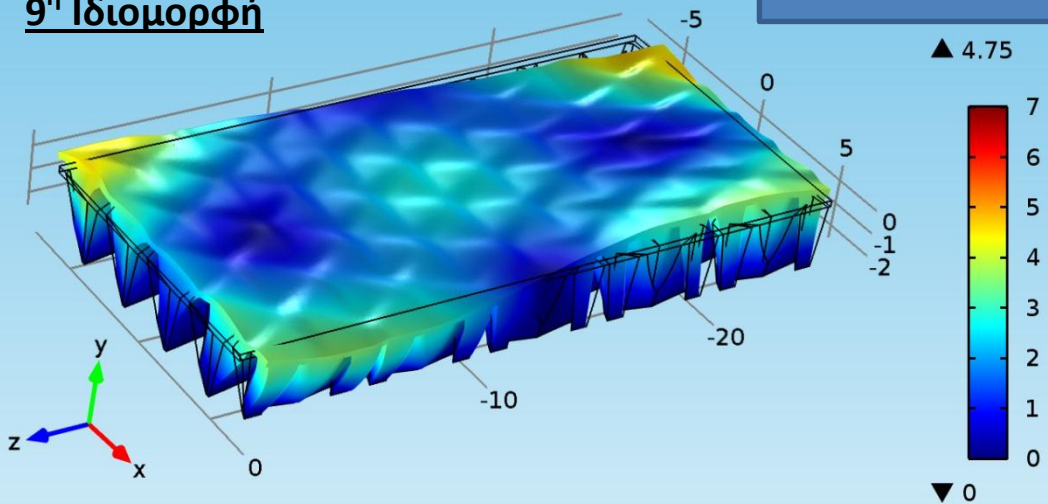
Eigenfrequency=2.895028 Surface: Total displacement (m)

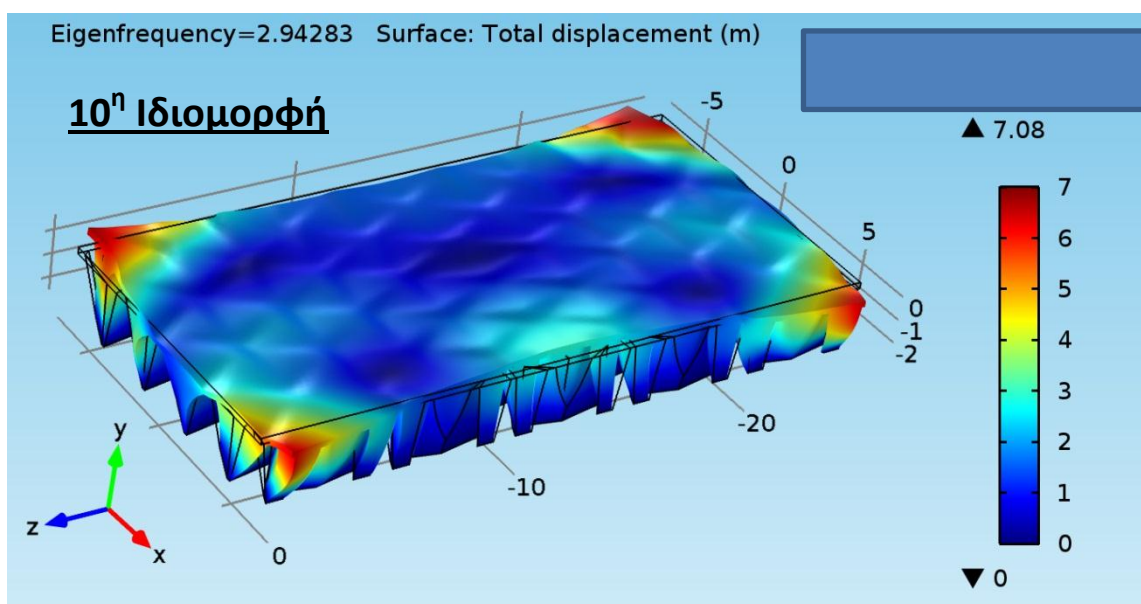
8^η Ιδιομορφή



Eigenfrequency=2.913354 Surface: Total displacement (m)

9^η Ιδιομορφή





Ο συγκεντρωτικός πίνακας που ακολουθεί περιέχει στη πρώτη στήλη τις ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν από την ανάλυση στην αυξητική σόλα και στις επόμενες ακολουθούν οι τιμές της μέγιστης μετατόπισης, των τάσεων Von Mises που αναπτύσσονται στο μοντέλο και η τιμή της ενέργειας που προκύπτει.

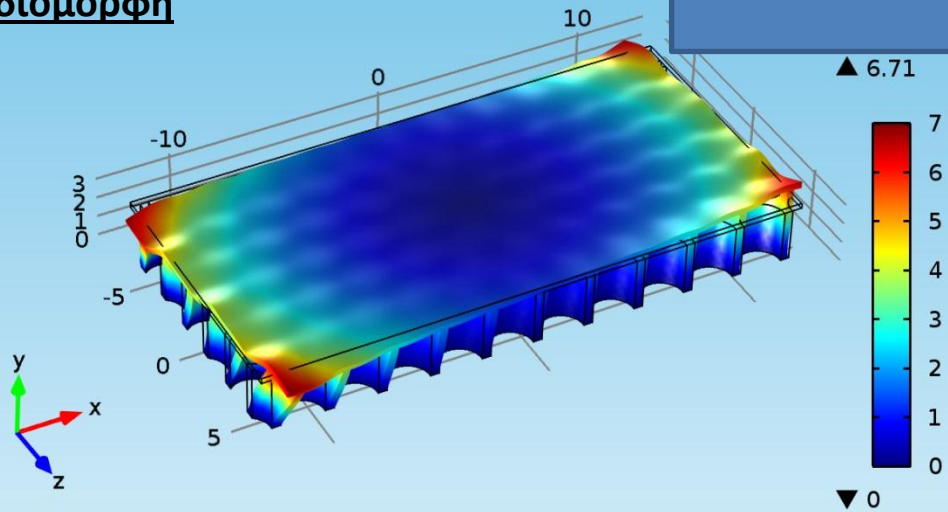
Ιδιοσυχνότητα	Μέγιστη Μετατόπιση (m)	Von Mises (Pa)	Stored Energy (J)
2.4032	4.25312	1.46E+07	9.39E+07
2.40389	5.88464	1.83E+07	8.77E+07
2.45781	3.92549	1.52E+07	1.01E+08
2.50701	6.56861	1.91E+07	9.44E+07
2.58559	4.83206	1.84E+07	1.09E+08
2.65567	6.10084	2.21E+07	1.09E+08
2.84875	6.61257	2.64E+07	1.26E+08
2.89503	5.28563	1.95E+07	1.33E+08
2.91335	4.74693	1.71E+07	1.35E+08
2.94283	7.07709	2.37E+07	1.27E+08

Μετά από την επεξεργασία του πρώτου μοντέλου (αυξητική σόλα) και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, μπορούμε να παρατηρήσουμε τις δέκα ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν. Η μικρότερη τιμή είναι **2.4032 Hz** ενώ η μεγαλύτερη φτάνει έως τα **2.94283 Hz**. Σημειώνεται ότι αυτές αποτελούν κατ'επιλογήν τις πρώτες δέκα ιδιοσυχνότητες του μοντέλου.

Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης συναντάται στην δέκατη ιδιοσυχνότητα (**2.94283 Hz**) με τιμή **4.37026 mm** και σύμφωνα με την αντίστοιχη ιδιομορφή παρατηρούμε ότι εμφανίζεται στις γωνίες της σόλας. Ωστόσο μεγάλες τιμές μετατόπισης εμφανίζονται μόνο στις γωνίες ενώ στον υπόλοιπο όγκο υπάρχει ελάχιστη ως και μηδενική μετατόπιση. Την μικρότερη μέγιστη τιμή την συναντάμε στην 3^η ιδιοσυχνότητα (**2.45781 Hz**) με τιμή **3.92549 mm**.

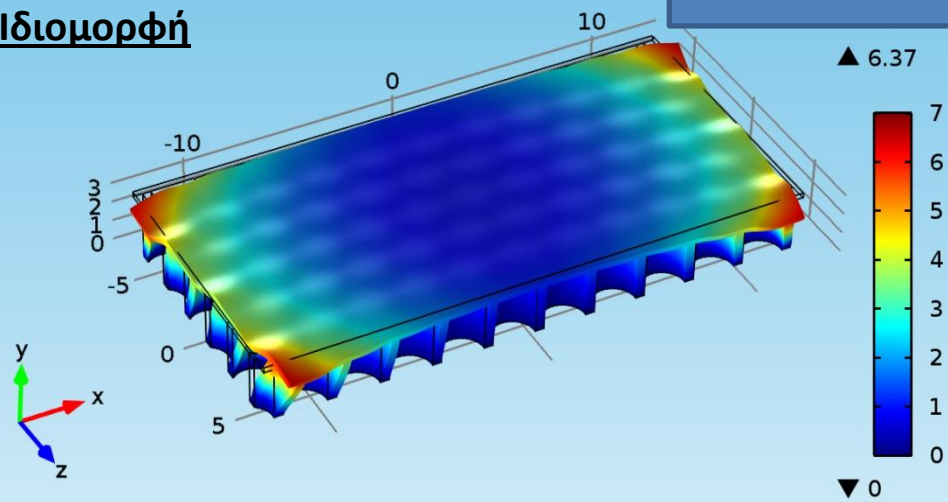
Σόλα με κυκλικές τρύπες

Eigenfrequency=2.413141 Surface: Total displacement (m)
1^η Ιδιομορφή



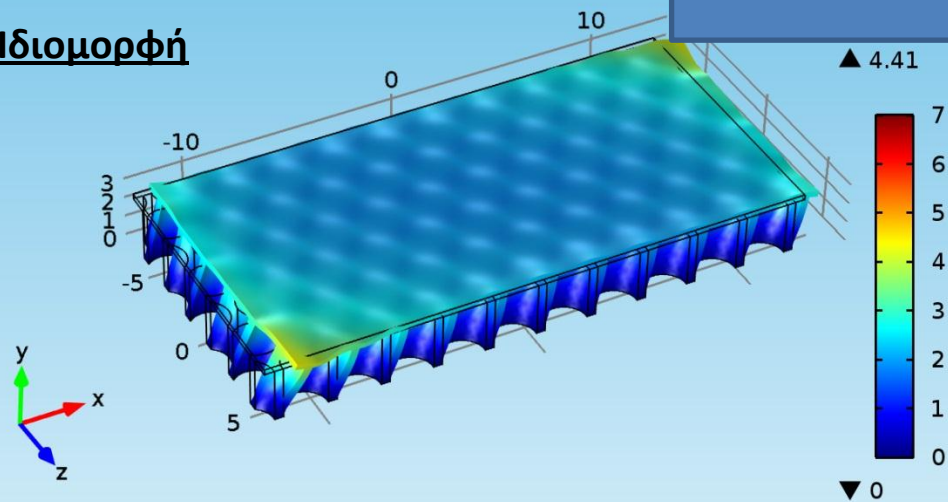
Eigenfrequency=2.432507 Surface: Total displacement (m)

2^η Ιδιομορφή



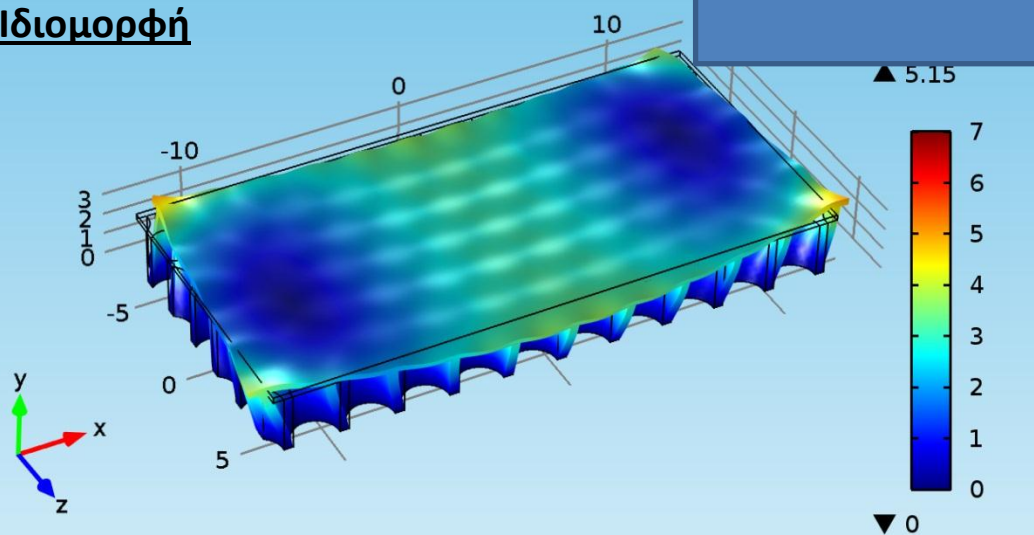
Eigenfrequency=2.556919 Surface: Total displacement (m)

3^η Ιδιομορφή



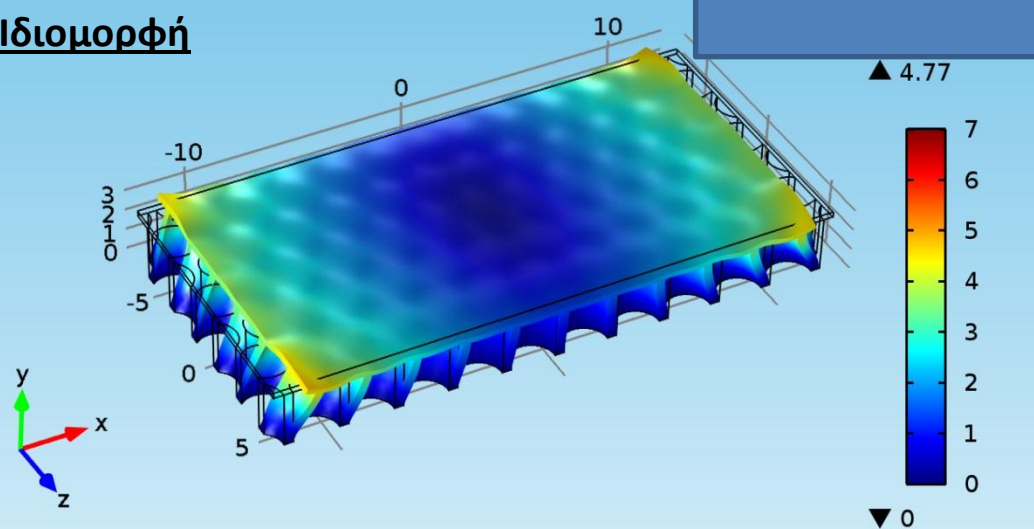
Eigenfrequency=2.561763 Surface: Total displacement (m)

4^η Ιδιομορφή



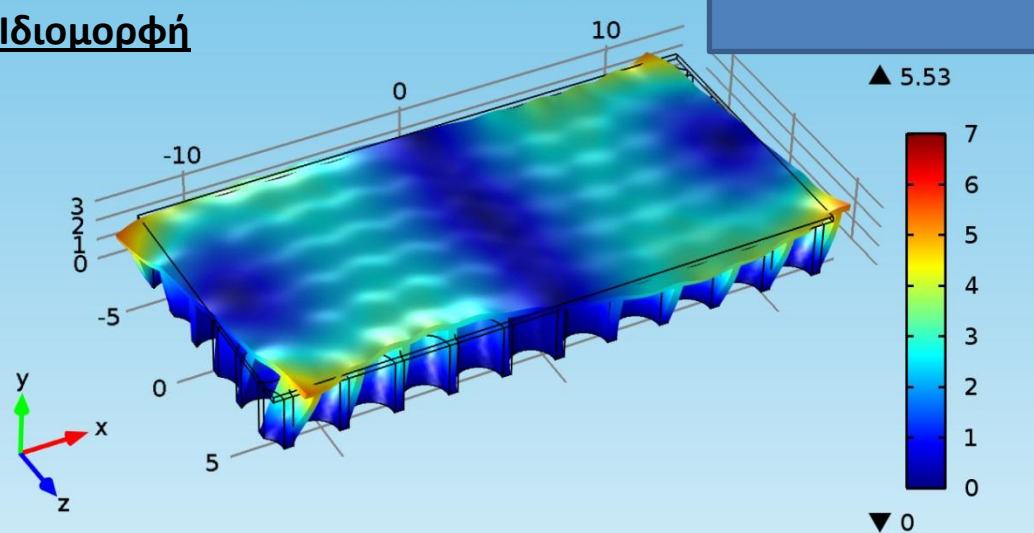
Eigenfrequency=2.730134 Surface: Total displacement (m)

5^η Ιδιομορφή



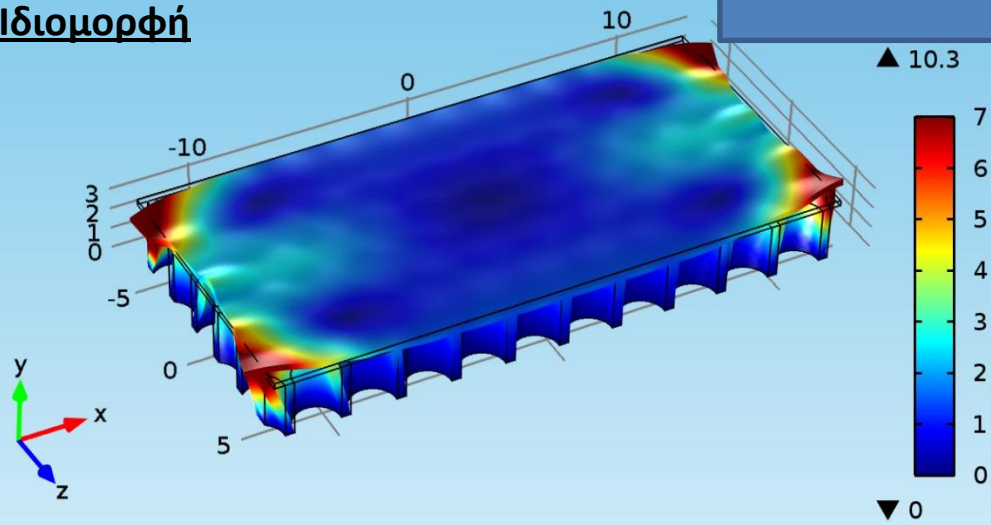
Eigenfrequency=2.766624 Surface: Total displacement (m)

6^η Ιδιομορφή



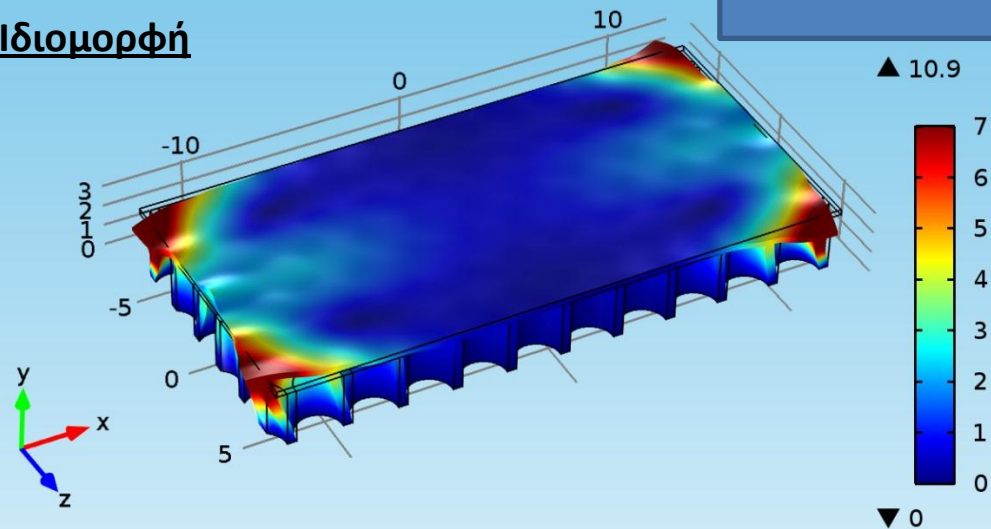
Eigenfrequency=2.986611 Surface: Total displacement (m)

7^η Ιδιομορφή



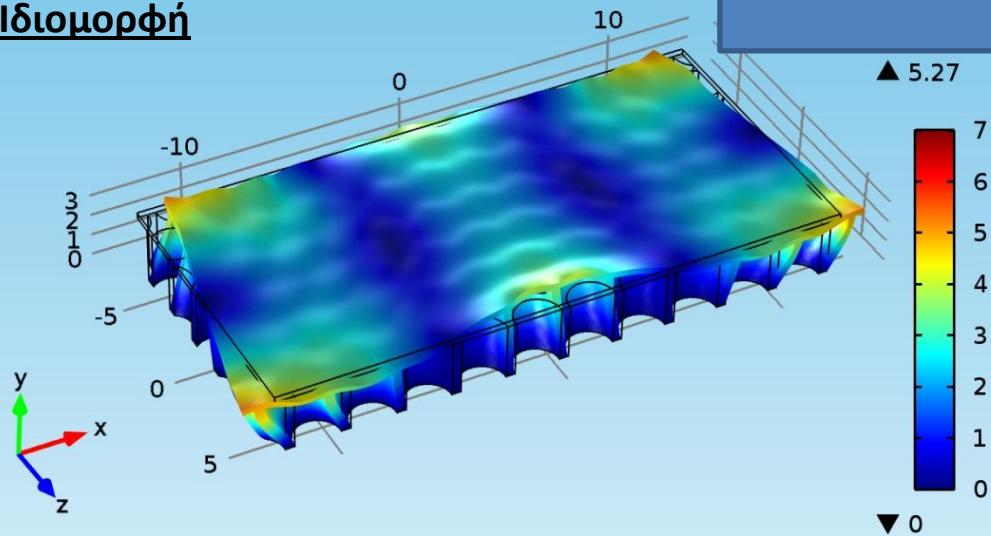
Eigenfrequency=2.994533 Surface: Total displacement (m)

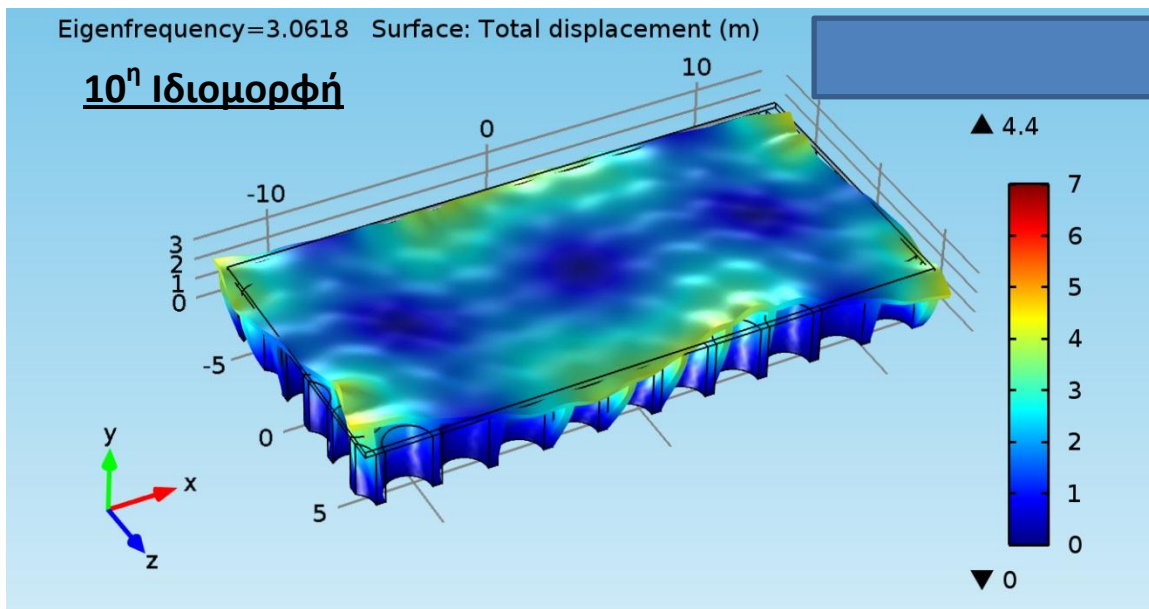
8^η Ιδιομορφή



Eigenfrequency=3.044174 Surface: Total displacement (m)

9^η Ιδιομορφή





Ο συγκεντρωτικός πίνακας που ακολουθεί περιέχει στη πρώτη στήλη τις ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν από την ανάλυση στην σόλα με κυκλικές τρύπες και στις επόμενες ακολουθούν οι τιμές της μέγιστης μετατόπισης, των τάσεων Von Misses που αναπτύσσονται στο μοντέλο και η τιμή της ενέργειας που προκύπτει.

Ιδιοσυχνότητα	Μέγιστη Μετατόπιση (m)	Von Misses (Pa)	Stored Energy (J)
2.41314	6.70723	1.23E+07	4.94E+07
2.43251	6.37471	1.13E+07	5.03E+07
2.55692	4.41031	1.03E+07	5.70E+07
2.56176	5.15188	1.09E+07	5.66E+07
2.73013	4.77193	1.08E+07	6.47E+07
2.76662	5.53455	1.29E+07	6.61E+07
2.98661	10.34887	2.13E+07	7.31E+07
2.99453	10.86682	2.29E+07	7.30E+07
3.04417	5.26873	1.30E+07	8.06E+07
3.06180	4.40302	1.52E+07	8.25E+07

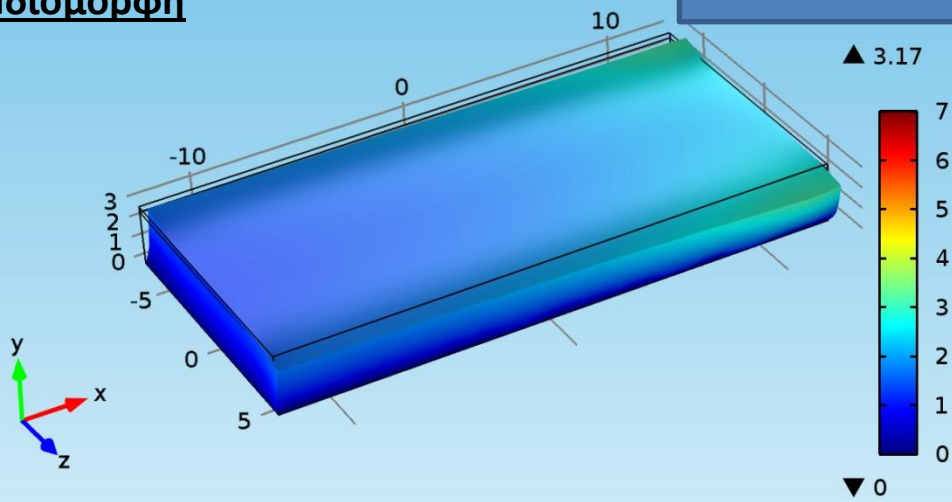
Παρατηρούμε ότι οι τιμές των 10 ιδιοσυχνοτήτων ξεκινούν από τα **2.41314 Hz** της πρώτης και φτάνουν μέχρι τα **3.06180 Hz** της δέκατης.

Η μέγιστη μετατόπιση συναντάται στην 8^η ιδιοσυχνότητα (2.99453 Hz) και έχει την τιμή **10.86682 mm** ενώ η μικρότερη τιμή της μέγιστης μετατόπισης συναντάται στην 10^η ιδιοσυχνότητα (3.06180 Hz) στα **4.40302 mm**. Στην ίδια συχνότητα (10^η) συναντάμε και την μεγαλύτερη τιμή Von Misses (2.29e+7 Pa) ενώ η μικρότερη τιμή (1.03e+7 Pa) συναντάται στην 3^η ιδιοσυχνότητα.

Συμπαγής Σόλα

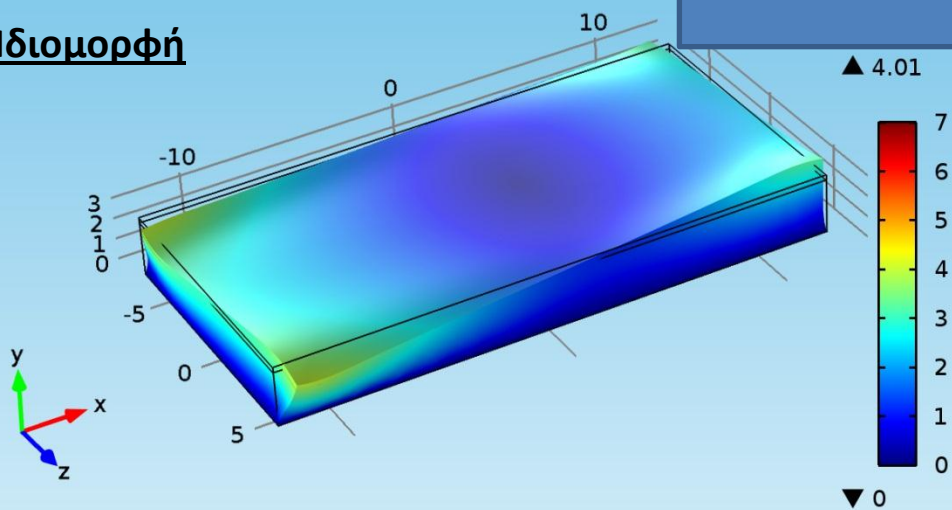
Eigenfrequency=3.620022 Surface: Total displacement (m)

1^η Ιδιομορφή



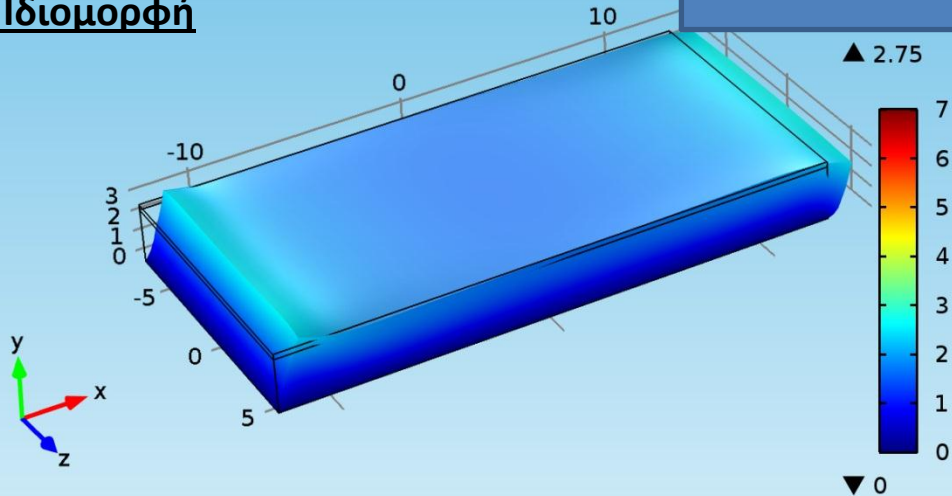
Eigenfrequency=3.635145 Surface: Total displacement (m)

2^η Ιδιομορφή



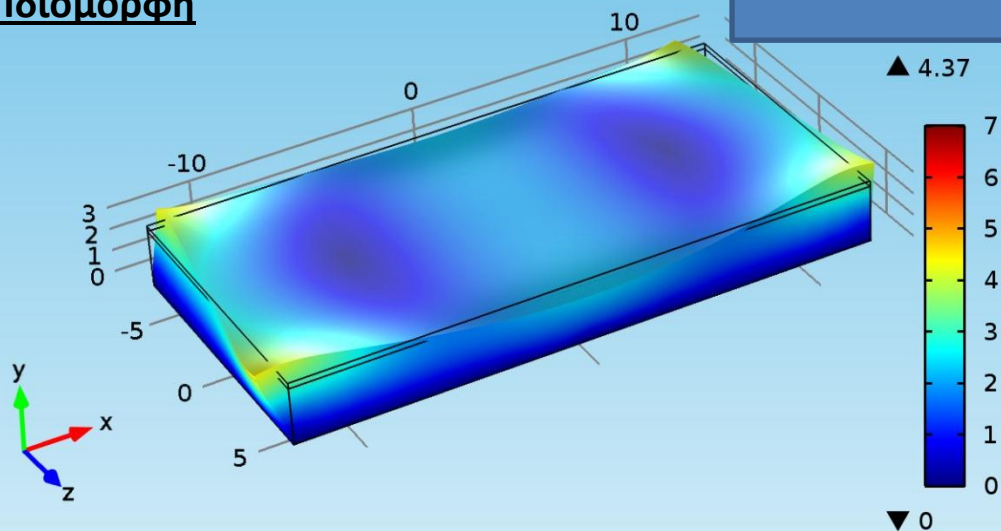
Eigenfrequency=3.67463 Surface: Total displacement (m)

3^η Ιδιομορφή



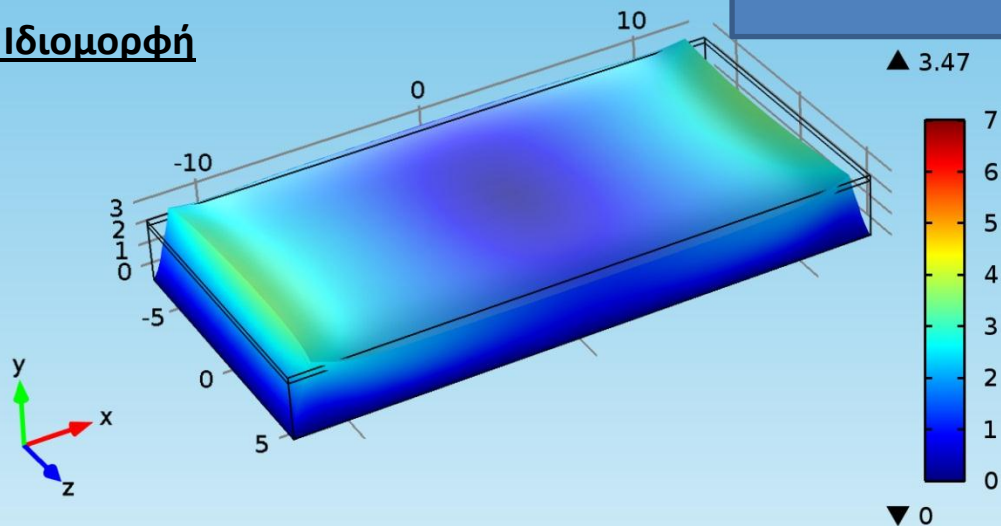
Eigenfrequency=3.748754 Surface: Total displacement (m)

4^η Ιδιομορφή



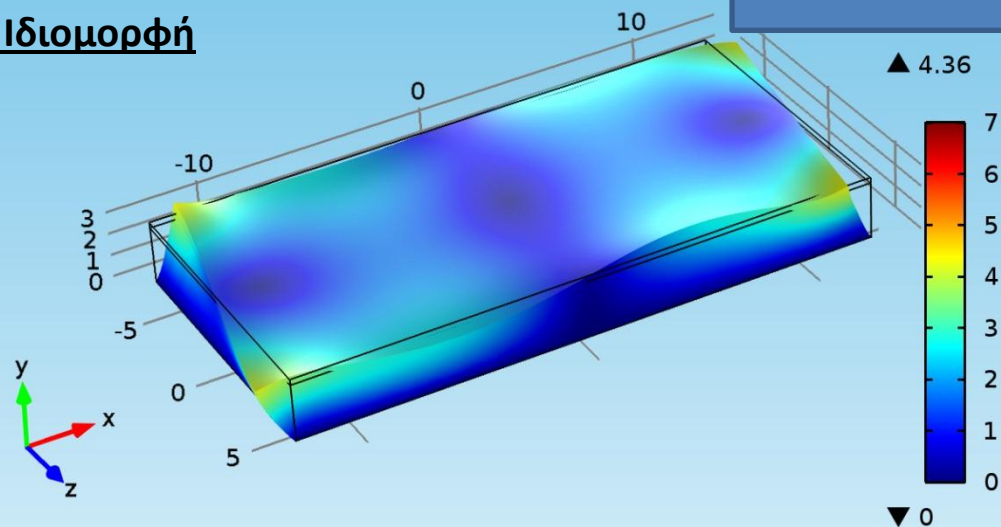
Eigenfrequency=3.851603 Surface: Total displacement (m)

5^η Ιδιομορφή



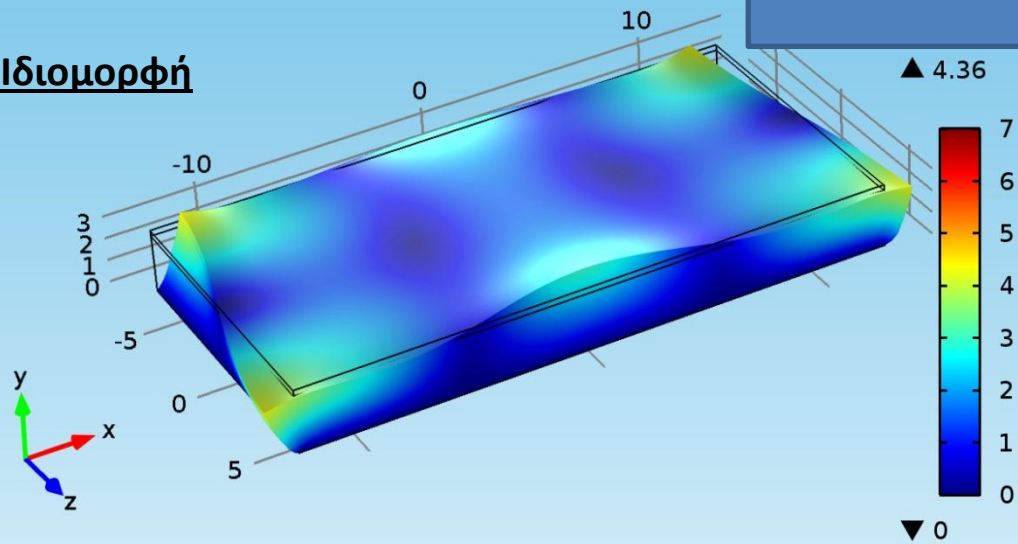
Eigenfrequency=3.912491 Surface: Total displacement (m)

6^η Ιδιομορφή



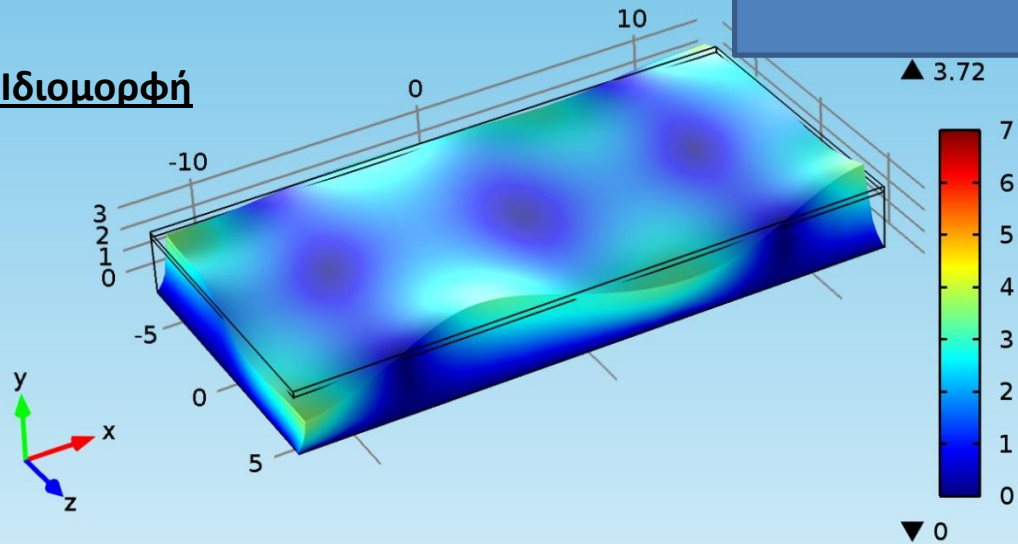
Eigenfrequency=4.165651 Surface: Total displacement (m)

7^η Ιδιομορφή



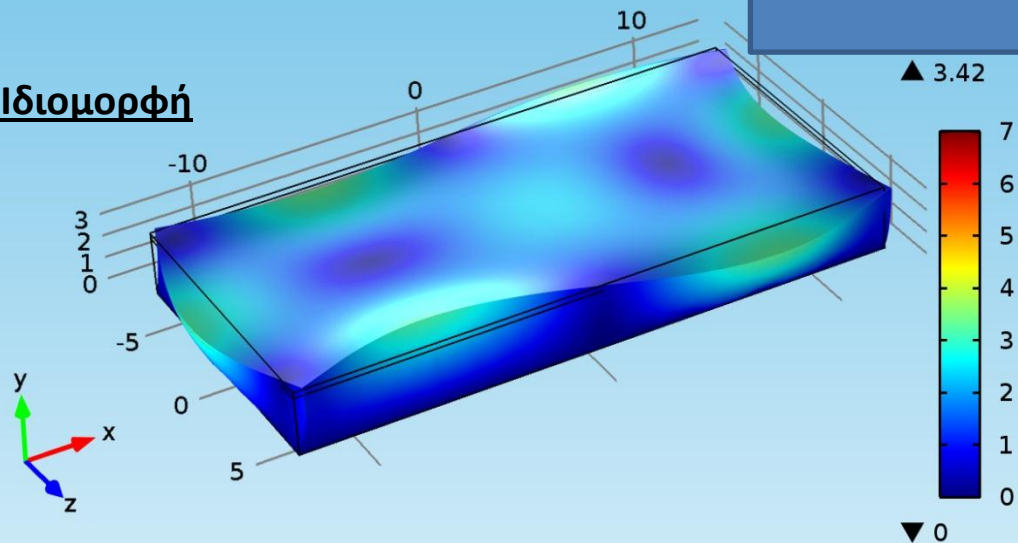
Eigenfrequency=4.216066 Surface: Total displacement (m)

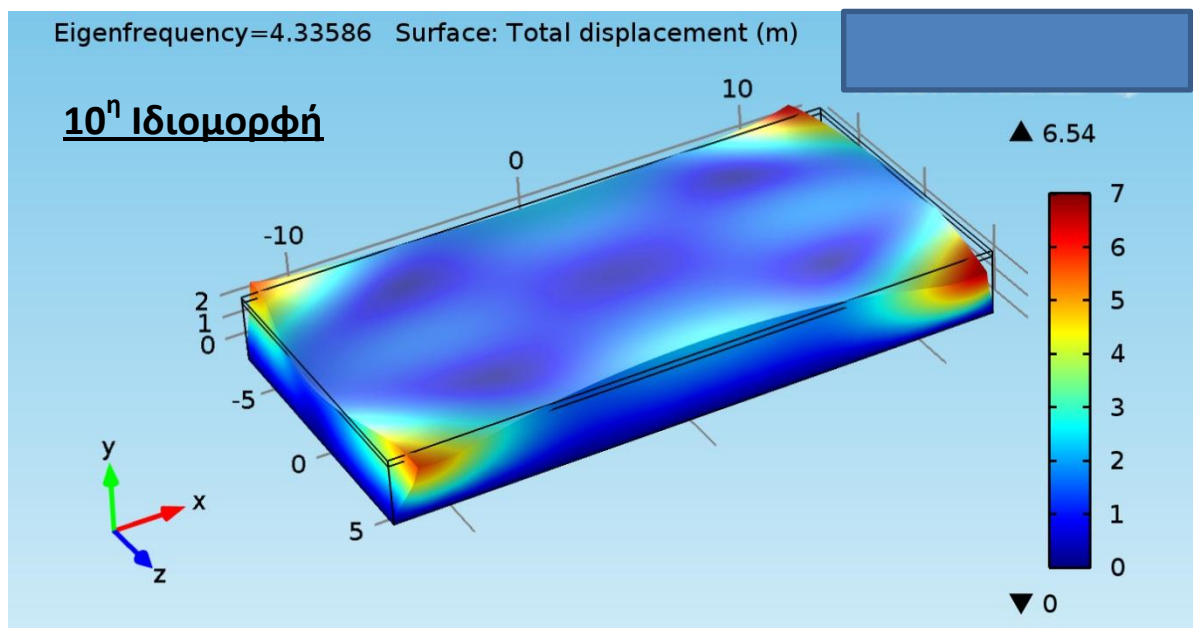
8^η Ιδιομορφή



Eigenfrequency=4.240722 Surface: Total displacement (m)

9^η Ιδιομορφή





Ο συγκεντρωτικός πίνακας που ακολουθεί περιέχει στη πρώτη στήλη τις ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν από την ανάλυση στην συμπαγή σόλα και στις επόμενες ακολουθούν οι τιμές της μέγιστης μετατόπισης, των τάσεων Von Mises που αναπτύσσονται στο μοντέλο και η τιμή της ενέργειας που προκύπτει.

Ιδιοσυχνότητα	Μέγιστη Μετατόπιση (m)	Von Mises (Pa)	Stored Energy (J)
3.99313	2.99577	6.84E+06	3.36E+06
4.00822	3.948	7.36E+06	4.63E+06
4.05599	2.73544	6.54E+06	2.71E+06
4.11264	4.41391	6.69E+06	3.55E+06
4.21339	3.50044	8.17E+06	4.11E+06
4.26478	4.44146	7.62E+06	5.16E+06
4.49658	4.443	8.87E+06	8.05E+06
4.54584	3.78818	7.63E+06	5.79E+06
4.56386	3.43829	7.50E+06	4.18E+06
4.64787	6.71689	9.79E+06	7.80E+06

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων κυμαίνονται σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με αυτές των άλλων δοκιμών. Η 1^η ιδιοσυχνότητα εμφανίζεται στα **3.99313 Hz** ενώ η 10^η και τελευταία ιδιοσυχνότητα εμφανίζεται στα **4.64787 Hz** στην συχνότητα που όπως βλέπουμε και στον πίνακα συναντάμε και την μέγιστη τιμή της μετατόπισης (6.71689 mm). Η ελάχιστη τιμή της μετατόπισης εμφανίζεται στα 4.05599 Hz δηλαδή στην 3^η ιδιοσυχνότητα.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προς σύγκριση σε μορφή πινάκων:

Ιδιοσυχνότητες (Hz)

Συμπαγής	Αστεροειδής	Κυκλική
3.99313	2.4032	2.41314
4.00822	2.40389	2.43251
4.05599	2.45781	2.55692
4.11264	2.50701	2.56176
4.21339	2.58559	2.73013
4.26478	2.65567	2.76662
4.49658	2.84875	2.98661
4.54584	2.89503	2.99453
4.56386	2.91335	3.04417
4.64787	2.94283	3.0618

Von Misses (Pa)

6.84E+06	1.46E+07	1.23E+07
7.36E+06	1.83E+07	1.13E+07
6.54E+06	1.52E+07	1.03E+07
6.69E+06	1.91E+07	1.09E+07
8.17E+06	1.84E+07	1.08E+07
7.62E+06	2.21E+07	1.29E+07
8.87E+06	2.64E+07	2.13E+07
7.63E+06	1.95E+07	2.29E+07
7.50E+06	1.71E+07	1.30E+07
9.79E+06	2.37E+07	1.52E+07

Stored Energy (J)

3.36E+06	9.39E+07	4.94E+07
4.63E+06	8.77E+07	5.03E+07
2.71E+06	1.01E+08	5.70E+07
3.55E+06	9.44E+07	5.66E+07
4.11E+06	1.09E+08	6.47E+07
5.16E+06	1.09E+08	6.61E+07
8.05E+06	1.26E+08	7.31E+07
5.79E+06	1.33E+08	7.30E+07
4.18E+06	1.35E+08	8.06E+07
7.80E+06	1.27E+08	8.25E+07

7 | Συμπεράσματα και επεκτάσεις

Οι δυο βασικοί τύποι ανάλυσης που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο της σόλας, στατική και δυναμική ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της συμπεριφοράς κάθε σόλας κρατώντας σταθερές τις παραμέτρους των διαστάσεων και του υλικού κατασκευής και αλλάζοντας μόνο την δομή της κατασκευής και συγκεκριμένα την μορφή και την κατανομή των τρυπών ανά τον όγκο της σόλας.

Κατά την εισαγωγή των αστεροειδών τρυπών, οι οποίες όπως είδαμε λειτουργούν σαν αυξητικές κυψέλες, υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων και για τους δυο τύπους ανάλυσης που εφαρμόστηκαν. Αρχικά είδαμε ότι η σόλα με τις αστεροειδής τρύπες λειτουργεί αυξητικά και μπορεί ως εκ τούτου να θεωρηθεί αυξητική σόλα. Στην στατική ανάλυση είδαμε ότι οι δυνάμεις αντίδρασης της επάνω επιφάνειας της σόλας (της επιφάνειας που έρχεται σε επαφή με το πέλμα) είναι κατά πολύ μικρότερες σε σχέση με τις άλλες σόλες. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στον όγκο της αυξητικής σόλας κατανέμονται σε ένα ανομοιόμορφο μοτίβο το οποίο λειτουργεί έτσι ώστε να φέρνει πιο κοντά τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τάσεων. Επίσης σημαντικές ήταν οι διαφορές που εντοπίστηκαν κατά την δυναμική ανάλυση. Είδαμε ότι η αυξητική σόλα, με τις αστεροειδής τρύπες που λειτουργούν σαν αυξητικές κυψέλες αντιστρέφοντας τον λόγο Poisson, έχει τις χαμηλότερες συχνότητες διέγερσης σε σχέση με τις άλλες σόλες. Επίσης είναι σημαντική η διαφοροποίηση που προκύπτει στην εσωκλείουσα ενέργεια, όπου η αυξητική σόλα δείχνει να εγκλωβίζει ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας σε σχέση με τις άλλες σόλες.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα θα μπορούσε να μελετηθεί και από την σκοπιά της διάταξης των αυξητικών τρυπών σε σχέση με την γεωμετρία του παπουτσιού αλλά και το μέγεθος των τρυπών ανάλογα με το μέγεθος της σόλας. Από εκεί ίσως προέκυπταν ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Θα μπορούσε ακόμα να γίνει μια ανάλυση σε κρούση δηλαδή για ένα "βήμα" με το φορτίο του ποδιού να εφαρμόζεται παραμετρικά στην επιφάνεια που η σόλα έρχεται σε επαφή με το πέλμα.

Μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε επίσης και η μοντελοποίηση του προβλήματος σε γενικότερη μορφή πέραν από τις σόλες, χρησιμοποιώντας διάφορες γνωστές αυξητικές δομές και συγκρίνοντας τις μεταξύ τους.

Βιβλιογραφία

- Σταυρουλάκης Γεώργιος, Σημειώσεις μαθήματος υπολογιστικής μηχανικής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice-Hall, Inc. 2002
- Computational Modeling of Auxetics, Tomasz Strek, Bogdan Maruszewski, Artur A. Pozniak and Krzysztof W. Wojciechowski, 2010.
- Συντζανάκης Αντώνιος, Μεταπτυχιακή Διατριβή με Θέμα: Μελέτη Αυξητικών Κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία. Χανιά, 2015
- William D. Callister, Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, Εκδόσεις Τζιόλα, 2008
- Αγγελόπουλος Δημήτριος, Διπλωματική εργασία: Σχεδιασμός κατακόρυφου δράπανου και δυναμική ανάλυση μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Χανιά 2014
- Comsol Multiphysics User manual
- Pro Engineer wildfire 2.0 User manual
- Μπιλάλης Νικόλαος και Εμμανουήλ Μαραβελάκης, Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση, Εκδόσεις Κρητική, 2009

Χρήσιμα link

- <http://www.ptc.com/product/creo/proengineer>
- <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- <http://www.matweb.com>