



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

“Τοπολογική βελτιστοποίηση κυψελωτών δομών με χρήση του προγράμματος NX”

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την
απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό την

Ελένη Σπ. Κοκκινάκη

Χανιά, Μάρτιος 2018

© Copyright 2018: υπό Ελένη Σπ. Κοκκινάκη

Απαγορεύεται η αναδημοσίευση, η αποθήκευση και γενικά η αναπαραγωγή και μεταβίβαση τμήματος ή ολόκληρου του παρόντος έργου με οποιονδήποτε ηλεκτρονικό, μηχανικό ή φωτοαντιγραφικό σύστημα χωρίς την προηγούμενη άδεια του συγγραφέα.

Η διατριβή της Ελένης Σπ. Κοκκινάκη (2016019030) με τίτλο: “Τοπολογική βελτιστοποίηση κυψελωτών δομών με χρήση του προγράμματος NX” εγκρίνεται

Μπιλάλης Νικόλαος, Καθηγητής, Επιβλέπων

Αντωνιάδης Αριστομένης, Καθηγητής

Σταυρουλάκης Γεώργιος, Καθηγητής

Acknowledgment

This research is supported by the Technical University of Crete and it has been financed by PanCretan Endowment Fund (PEF), also known as, PanCretan Association of America (PAA) with Scholarship of Excellence (2017).

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον καθηγητή κ.Μπιλάλη Νικόλαο, επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής, για την πολύτιμη βοήθειά του και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ τους καθηγητές κ.Αντωνιάδη Αριστομένη και κ.Σταυρουλάκη Γεώργιο, για όσα με δίδαξαν αυτά τα χρόνια τόσο σε προπτυχιακό όσο και μεταπτυχιακό επίπεδο, αλλά και για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν από την αρχή μέχρι το τέλος της εργασίας, προσφέροντάς μου τις γνώσεις τους σε θέματα τοπολογικής βελτιστοποίησης και χρήσης του λογισμικού NX 12. Δεν ξεχνώ την άμεση και ευχάριστη συνεργασία με την καθηγήτρια Aura Mihai και την Marianna Costea, από το "Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi, Textile, Leather and Industrial Management Faculty, οι οποίες μου έδωσαν τα δεδομένα για την εφαρμογή στο τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής μου.

Τέλος, έχω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όσα μου προσέφερε και συνεχίζει να κάνει για μένα.

Ελένη

Περίληψη

Η διαδικασία βελτιστοποίησης της δομής ενός αντικειμένου έχει σημειώσει πολύ μεγάλη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Το γεγονός αυτό οφείλεται τόσο στην ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα της τεχνολογίας, όσο και στην εξέλιξη των μεθόδων σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός βελτιστοποιημένων αντικειμένων είναι μια συνεχής απαίτηση για τις επιχειρήσεις και επιταχύνεται από την ανάπτυξη νέων παραγωγικών διαδικασιών που αλλάζουν ριζικά τον τρόπο παραγωγής όλων των εξαρτημάτων/προϊόντων, τόσο για σύνθετα/πολύπλοκα προϊόντα, όσο και για απλά καθημερινά αντικείμενα. Απαιτήσεις όπως η κατασκευή ελαφριών δομών, η εξοικονόμηση υλικού, η μείωση του χρόνου παραγωγής και εισόδου στην αγορά, είναι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τόσο το χρόνο όσο και το κόστος του παραγόμενου αντικειμένου.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τις μεθόδους βελτιστοποίησης και θα μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο βελτιστοποιούν την αρχική γεωμετρία ενός μοντέλου. Ακόμη, θα γίνει αναφορά στις πλεγματικές δομές και πως εισάγονται με αποτελεσματικό τρόπο στην τοπολογικά βελτιστοποιημένη λύση ενός προβλήματος. Τις περισσότερες φορές, ο σχεδιασμός που προκύπτει από όλες αυτές τις διεργασίες αποτελείται από πολύ περίπλοκη δομή η οποία δεν είναι δυνατό να κατασκευαστεί με τις κλασσικές μεθόδους παραγωγής. Ωστόσο αυτό δεν αποτελεί μειονέκτημα, καθώς κατά την βελτιστοποίηση λαμβάνεται υπόψη ότι το μοντέλο θα κατασκευαστεί μέσω των τεχνικών προσθετικής παραγωγής, όπως την τρισδιάστατη εκτύπωση. Επομένως, το αποτέλεσμα είναι έτοιμο για άμεση παραγωγή. Ένα από τα σχεδιαστικά πακέτα που περιλαμβάνουν τις προαναφερθείσες τεχνικές, είναι το NASTRAN NX 12 της Siemens, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Σκοπός λοιπόν, εκτός από την εξοικείωση με μια από τις πλέον αναπτυσσόμενες τεχνικές στον τομέα του σχεδιασμού που είναι η εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τις πλεγματικές δομές, είναι και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Abstract

In recent years, structural optimization of objects has noted remarkable progress, due to the rapid technology growth and the development of design methods. Designing optimized parts is a constant requirement for businesses and is accelerated by the development of new production processes that radically change the way in which all components/products are produced, both for complex products and for simple everyday objects. Required factors, such as manufacturing lightweight structures, saving materials, reducing time for production and entry into the market, affect both the time and cost of the object being produced.

This paper is related with optimization methods and the way in which they optimize the original geometry of a model. Furthermore, lattice structures will be mentioned and how they are inserted suitably in a topology optimization solution of a problem. Most of the time the design which results from all these processes consists of very complex structures that cannot be manufactured with conventional production methods. This is not a disadvantage though, as during the optimization it is taken into account that the model will be produced via additive manufacturing processes, like 3d printing. Therefore, the optimized model is eligible for direct production. A software package which includes the aforementioned techniques and will be used for the needs of this paper is Siemens NASTRAN NX 12. In conclusion, the ultimate goal for this paper, besides familiarizing with one of the advanced techniques in the field of design, the topology optimization method in conjunction with lattice structures, is also the interpretation of the obtained results.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract.....	6
1. Εισαγωγή.....	9
1.1. Μέθοδοι βελτιστοποίησης	9
1.2. Πλεονεκτήματα βελτιστοποίησης	11
1.3. Μέθοδοι τοπολογικής βελτιστοποίησης	11
2. Τοπολογική βελτιστοποίηση	13
2.1. Κατηγορίες τοπολογικής βελτιστοποίησης	13
2.1.1. Τοπολογία δικτυωμάτων	13
2.1.2. Τοπολογία όγκου.....	15
2.2. Σχηματισμός του προβλήματος	16
2.2.1. Στόχοι ενός προβλήματος (ΤΟ).....	17
2.3. Πως λειτουργεί ο αλγόριθμος.....	18
3. Εισαγωγή στο Nastran.....	22
3.1. Ιστορική αναδρομή.....	22
3.1.1. Αρχιτεκτονική του λογισμικού	23
3.2. Nastran και τοπολογική.....	24
3.3. Διάγραμμα ροής εργασιών (Workflow).....	24
3.3.1. Δημιουργία λύσης.....	25
3.3.2. Καθορισμός στόχου	32
3.3.3. Επιλογή Optimization / frozen area	33
3.3.4. Εφαρμογή φορτίσεων.....	35
3.3.5. Καθορισμός περιορισμών	35
3.3.6. Επίλυση.....	42
3.3.7. Επεξεργασία αποτελεσμάτων	43
3.4. Πλεγματικές δομές (Lattice structures).....	47
3.4.1. Συμπεριφορά πλεγματικών δομών	48
4. Εφαρμογή	50
4.1. Δεδομένα εργασίας	50
4.2. Μοντέλο cad	52
4.3. Δημιουργία fem.....	53
4.4. Δημιουργία sim	54

4.5. Επίλυση προβλήματος.....	58
4.6. Επαλήθευση	62
4.7. Δοκιμές	63
4.7.1. Πυκνότητα ανά διαφορετικό περιορισμό σχεδίασης	64
4.7.2. Πυκνότητα ανά τύπο πλεγματικής δομής	65
5. Συμπεράσματα	68
Βιβλιογραφία	70
Παράρτημα Α'	75
Παράρτημα Β'	76
Παράρτημα Γ'	79

1. Εισαγωγή

Σήμερα, ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος μειώνεται συνεχώς, κυρίως λόγω του μεγάλου ανταγωνισμού αλλά και των νέων τεχνολογιών που αναπτύσσονται με ραγδαίους ρυθμούς. Ειδικότερα ο χρόνος που απαιτείται από την σύλληψη της ιδέας μέχρι την είσοδό του στην αγορά είναι πολύ κρίσιμος και μπορεί να κοστίσει στον κύκλο ζωής του. Για τους παραπάνω λόγους, έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην διαδικασία σχεδίασης των προϊόντων, προκειμένου να μειωθούν συνολικά τόσο ο χρόνος όσο και το κόστος παραγωγής. Μια διάσταση σύντμησης του χρόνου ανάπτυξης αποτελεί και η μέθοδος της δομικής βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών με υψηλές ταχύτητες αλλά και η βελτίωση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό βελτιστοποίησης, είναι οι παράγοντες που ωθούν τους περισσότερους μηχανικούς να επενδύσουν στις τεχνικές βελτιστοποίησης της δομής του προϊόντος.

Η δομική βελτιστοποίηση ή αλλιώς βελτιστοποίηση της δομής (structural optimization), στοχεύει στην βελτίωση της μορφής μιας κατασκευής, ικανοποιώντας ταυτόχρονα ποικίλους περιορισμούς. Η μέθοδος αυτή γίνεται ολοένα και πιο απαραίτητη στο σχεδιασμό, διότι τα αποθέματα πρώτων υλών είναι περιορισμένα, υπάρχει η ανάγκη ελαφριών, οικονομικών κατασκευών με έμφαση στην απόδοση και στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Συνεπώς, απαιτούνται κατασκευές με υψηλές αποδόσεις, μικρό βάρος και όσο το δυνατό πιο μικρό κόστος κατασκευής, λειτουργίας και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

1.1. Μέθοδοι βελτιστοποίησης

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης επιδιώκουν να βελτιώσουν το σχεδιασμό ενός αντικειμένου, προσαρμόζοντας τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης με σκοπό να πετύχουν ή έστω να πλησιάσουν όσο μπορούν τον επιθυμητό στόχο. Οι στόχοι αυτοί συνήθως σχετίζονται με την απόδοση της δομής ή γενικά με το βάρος του αντικειμένου. Παράλληλα με την προσαρμογή των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης, γίνεται και έλεγχος των περιορισμών καθώς δεν πρέπει να παραβιάζεται κανένας προκειμένου η μέθοδος αυτή να οδηγήσει σε ασφαλές και εφικτό αποτέλεσμα.

Έχει αναπτυχθεί πληθώρα συνθέσεων από προβλήματα βελτιστοποίησης που ποικίλουν βάση του τύπου του στόχου αλλά ακόμη και γιατί μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον σκοπό του προβλήματος. Παρακάτω, καταγράφονται οι τρεις κύριοι τύποι προβλημάτων βελτιστοποίησης σχετικά με τον σχεδιασμό, οι οποίοι είναι ταξινομημένοι κατά σειρά αύξουσας πολυπλοκότητας και φάσματος του πεδίου εφαρμογών.

1. Βελτιστοποίηση μεγέθους (Size optimization)
2. Βελτιστοποίηση σχήματος (Shape optimization)
3. Βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization)

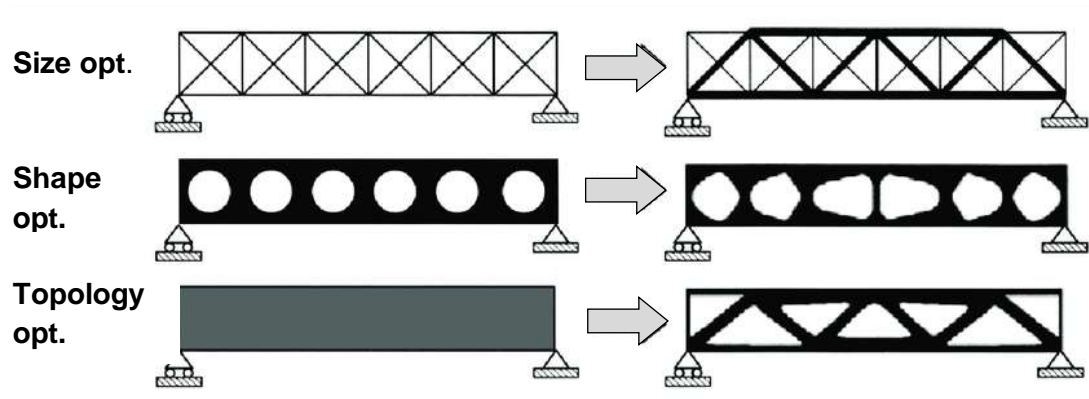
Στην βελτιστοποίηση μεγέθους, προσδιορίζονται οι τιμές επιλεγμένων διαστάσεων που επιτυγχάνουν καλύτερα τους στόχους σχεδίασης ενώ παράλληλα ικανοποιούν τους υπάρχοντες περιορισμούς. Για τυπικές εφαρμογές βελτιστοποίησης της δομής, οι στόχοι θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση της μέγιστης τάσης, της ενέργειας παραμόρφωσης, της εκτροπής ή του όγκου, ή του βάρους ενός αντικειμένου. Μία ή περισσότερες από αυτές τις ποσότητες μπορούν επίσης να διαμορφωθούν ως περιορισμοί. Για πολλά μηχανικά μέρη, ένας μικρός αριθμός διαστάσεων μεγέθους θα αποτελεί μέρος του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ωστόσο, για τις κυψελοειδείς δομές, όπως τα πλέγματα, ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού θα μπορούσε να ανέλθει σε δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες.

Η βελτιστοποίηση σχήματος ενός αντικειμένου ή μιας δεδομένης περιοχής, είναι μια γενίκευση της βελτιστοποίησης μεγέθους. Τυπικά η μέθοδος αυτή βελτιώνει το σχήμα των καμπυλών ή των επιφανειών που οριοθετούν την περιοχή που έχει προσδιορίσει ο χρήστης. Έτσι πολλές φορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές σχεδίασης, τα σημεία ελέγχου των εκάστοτε καμπυλών ή επιφανειών του μοντέλου. Συχνά γίνεται συνδυασμός των δυο παραπάνω μεθόδων βελτιστοποίησης, προκειμένου να επιτευχθούν δομές οι οποίες να έχουν είτε σχήμα ελεύθερης μορφής είτε κάποιο τυποποιημένο (πχ. κύλινδρος) με διαστάσεις.

Τέλος, η τοπολογική βελτιστοποίηση προσδιορίζει το συνολικό σχήμα, τη διάταξη των στοιχείων αλλά και τον τρόπο σύνδεσής τους στην περιοχή σχεδίασης. Οι βασικές διαφορές μεταξύ της βελτιστοποίησης τοπολογίας και της βελτιστοποίησης σχήματος ή μεγέθους, οφείλονται στην διαφορετική αρχική διαμόρφωση αλλά και στην επιλογή των μεταβλητών. Οι διαφορές αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές βελτιώσεις της δομικής απόδοσης του μοντέλου. Το πρόσφατο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για την τοπολογική βελτιστοποίηση ως μέθοδος σχεδιασμού για παραγωγή με προσθετικές μεθόδους, δικαιολογεί μια πιο προσεκτική εξέταση αυτής της τεχνολογίας.

Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε ένα πρόβλημα σχεδίασης όπου χρήζει δομικής βελτιστοποίησης στο οποίο το μέγεθος, το σχήμα και η τοπολογία ενός προϊόντος βελτιστοποιούνται ξεχωριστά ή ταυτόχρονα. Αυτές οι έννοιες είναι πολύ σημαντικές για να βρεθεί ένα βέλτιστο μέγεθος, σχήμα και κατανομή του υλικού κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του προϊόντος. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, η βελτιστοποίηση μεγέθους ασχολείται με τη βελτιστοποίηση του μεγέθους ενός αντικειμένου (μήκος, πλάτος ή βάθος). Αντίθετα, η βελτιστοποίηση του σχήματος στοχεύει στην εύρεση του βέλτιστου σχήματος ενός τμήματος ή οπών στο αντικείμενο. Απ' την άλλη, η βελτιστοποίηση τοπολογίας ασχολείται με τη βελτιστοποίηση ολόκληρης της

γεωμετρίας του τμήματος, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους και του σχήματος.



Εικόνα 1. Συγκριτική απεικόνιση της βελτιστοποίησης μεγέθους, σχήματος και τοπολογίας ^[1]

1.2. Πλεονεκτήματα βελτιστοποίησης

Η δομική βελτιστοποίηση, γενικά, έχει τεράστια δυνητικά οφέλη στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας ειδικότερα έχει τα ακόλουθα οφέλη στη διαδικασία σχεδιασμού ^[1]:

- Δημιουργία ελαφριών δομών
- Δημιουργία έτοιμου προς κατασκευή σχεδίου
- Εξοικονόμηση τεράστιας ποσότητας υλικού
- Εξοικονόμηση ενέργειας επεξεργασίας
- Μείωση της κατασκευής φυσικών πρωτοτύπων
- Μείωση των φυσικών δοκιμών
- Μείωση του χρόνου εισόδου στην αγορά

1.3. Μέθοδοι τοπολογικής βελτιστοποίησης

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μεγέθους και σχήματος, διαχειρίζονται παραμέτρους σχετικά με το μέγεθος και το σχήμα των συστατικών μιας δομής, αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να έχουν μια τιμή μεταξύ των ορίων που έχουν τεθεί, χωρίς όμως να αλλάξει ο αριθμός των στοιχείων που απαρτίζουν τη δομή. Εάν ένας μηχανικός/σχεδιαστής δεν γνωρίζει εκ των προτέρων το βέλτιστο σχήμα και μέγεθος του αντικειμένου που πρέπει να επεξεργαστεί, τότε πρέπει να χρησιμοποιήσει την βελτιστοποίηση τοπολογίας. Τα δυο κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι πρώτον, ότι η ελαστικές ιδιότητες των υλικών, ως συνάρτηση της πυκνότητά τους, μπορούν να ποικίλουν κατά μήκος της περιοχής σχεδίασης και δεύτερον, ότι το υλικό μπορεί να αφαιρεθεί μόνιμα από την περιοχή σχεδίασης ^[2]. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι βελτιστοποίησης της τοπολογίας οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δυο κατηγορίες, μέθοδοι κριτηρίων

βελτιστοποίησης (Optimality Criteria methods) και ευρετικές μέθοδοι (Heuristic methods) ^[3,4].

Οι μέθοδοι κριτηρίων βελτιστοποίησης είναι έμμεσες μέθοδοι βελτιστοποίησης. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι ικανοποιούν ένα σύνολο κριτηρίων που σχετίζεται με τη συμπεριφορά της δομής. Συχνά, βασίζονται στην συνθήκη βελτιστοποίησης Kuhn-Tucker ^[5], γεγονός που καθιστά τις μεθόδους αυτές ιδιαίτερα αυστηρές. Η χρήση τους αφορά κυρίως προβλήματα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών σχεδίασης και λίγους περιορισμούς. Οι μέθοδοι που ανήκουν στην κατηγορία της τοπολογίας βελτιστοποίησης κριτηρίων είναι:

- i. Homogenization ^[6,7,8]
- ii. Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) ^[6,9,10]
- iii. Level Set Method ^[11,12,13]
- iv. Growth Method for Truss Structures

Σχετικά με τις ευρετικές μεθόδους, είναι εκείνες οι οποίες μπορεί να βασίζονται στη διαίσθηση, στις παρατηρήσεις των διαδικασιών μηχανικής ή ακόμα και σε παρατηρήσεις βιολογικών συστημάτων. Αυτές οι μέθοδοι δεν εγγυώνται ότι πάντα θα βρίσκουν τη βέλτιστη λύση, ωστόσο παρέχουν βιώσιμες και αποτελεσματικές λύσεις. Ορισμένες από τις ευρετικές μεθόδους βελτιστοποίησης είναι:

- i. Fully Stressed Design (FSD) ^[5]
- ii. Computer-Aided Optimization (CAO) ^[14,15]
- iii. Soft Kill Option (SKO)
- iv. Evolutionary Structural Optimization (ESO) ^[16,17]
- v. Bidirectional ESO (BESO) ^[18,19]
- vi. Sequential Element Rejection and Admission (SERA)
- vii. Isolines/Isosurfaces Topology Design (ITD)

2. Τοπολογική βελτιστοποίηση

Η ονομασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε παγκόσμιο επίπεδο ορίζεται ως “topology optimization” και η συντομογραφία αυτής είναι “TO” όπου προκύπτει από τα αρχικά της. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν πολλές μέθοδοι βελτιστοποίησης που επικεντρώνονται στην τοπολογία ενός αντικειμένου, καθορίζοντας τη συνολική διαμόρφωση των στοιχείων σε μια δεδομένη περιοχή σχεδίασης. Γενικά, είναι μέθοδοι δομικής βελτιστοποίησης και το γεγονός αυτό προσοικονομεί την ανάγκη αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης κατά την εφαρμογή της. Φυσικό επακόλουθο αυτών, είναι ότι η τοπολογική βελτιστοποίηση μπορεί να έχει υψηλές υπολογιστικές απατήσεις. Στην συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα εξεταστούν εκτενέστερα οι παράγοντες που εξαρτώνται άμεσα και έμμεσα με το υπολογιστικό κόστος της μεθόδου αυτής.

2.1. Κατηγορίες τοπολογικής βελτιστοποίησης

Οι λύσεις μιας τοπολογικής βελτιστοποίησης θα πρέπει να περιλαμβάνουν αποτελέσματα των οποίων οι δομές να είναι σχεδόν πλήρως φορτισμένες ή να έχουν σταθερή ενέργεια παραμόρφωσης σε όλη τη γεωμετρία που έχουν εφαρμοστεί οι συνθήκες φόρτισης. Έχουν αναπτυχθεί δυο προσεγγίσεις για τα προβλήματα τοπολογίας. Η πρώτη βασίζεται στην κατανομή δοκών (truss-based) ενώ η δεύτερη προσέγγιση αφορά τη διαμόρφωση της πυκνότητας ενός αρχικού όγκου (volume-based). Παρακάτω, γίνεται πιο λεπτομερής αναφορά για καθεμία ώστε να γίνει κατανοητός ο ρόλος και η ανάγκη διαφοροποίησής τους.

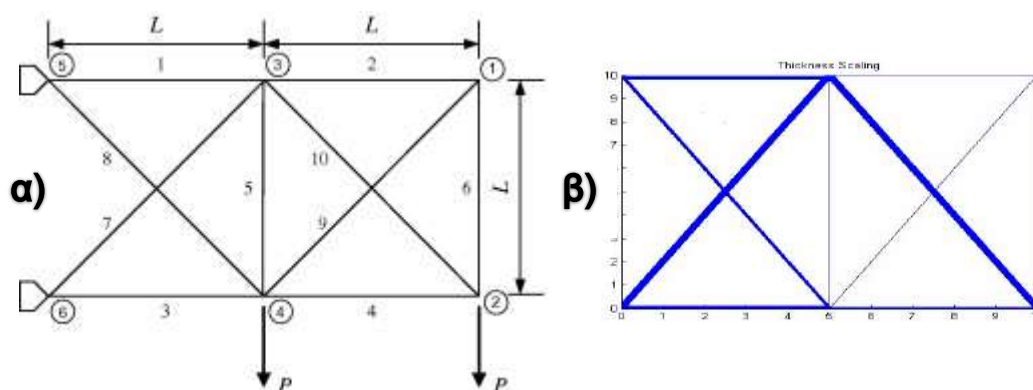
2.1.1. Τοπολογία δικτυωμάτων

Η προσέγγιση τοπολογίας δικτυωμάτων (truss-based) βασίζεται σε δομικά στοιχεία τα οποία αφορούν ένα πλέγμα δοκών μεταξύ ενός συνόλου κόμβων, το οποίο βρίσκεται σε έναν δεδομένο όγκο. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου το πλέγμα αυτό μπορεί να αναπαριστά ένα πλήρες γράφημα είτε μπορεί να βασίζεται σε μεμονωμένα στοιχεία. Στα προβλήματα αυτού του είδους, η τοπολογική βελτιστοποίηση αρχικά εντοπίζει ποια στηρίγματα είναι απαραίτητα (αντηρίδες), έπειτα προσδιορίζει το μέγεθός τους (πχ τη διάμετρο) και στη συνέχεια αφαιρεί τις δοκούς που δεν ικανοποιούν τις εκάστοτε προδιαγραφές.

Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης προκύπτει συναρτήσεως του αρχικού πλέγματος των δοκών. Η εικόνα που περιγράφει τον βέλτιστο σχεδιασμό του πλέγματος, παρουσιάζεται με εμφανείς διακυμάνσεις στις διαμέτρους των στηριγμάτων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό από το χρήστη, ποιες δοκοί είναι περισσότερο χρήσιμες και ποιες λιγότερο, βάση των περιορισμών που έχουν τεθεί.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα τοπολογικής βελτιστοποίησης που βασίζονται στη μέθοδο truss. Αρχικά παρατίθεται ένα πρόβλημα το οποίο αφορά δέκα ράβδους συνδεδεμένες όπως φαίνεται στην

Εικόνα 2 (α). Ως μεταβλητή σχεδίασης ορίζεται η διάμετρος κάθε στοιχείου. Αφού καθοριστούν οι φορτίσεις και οι περιορισμοί, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος τοπολογικής βελτιστοποίησης. Το αποτέλεσμα αυτής παρουσιάζει βάση της διαμέτρου των δοκών, ποιες είναι οι πιο χρήσιμες (έντονη μπλε σκίαση), ποιες είναι οι λιγότερο απαραίτητες (ενδιάμεση σκίαση) και ποιές ράβδοι είναι περιττές (χωρίς μεταβολή στο πάχος τους). Τελικά, είναι εμφανές ποιες δοκοί πρέπει να αφαιρεθούν, προκειμένου η κατασκευή να είναι πιο ελαφριά αλλά με διατήρηση της αντοχής της.



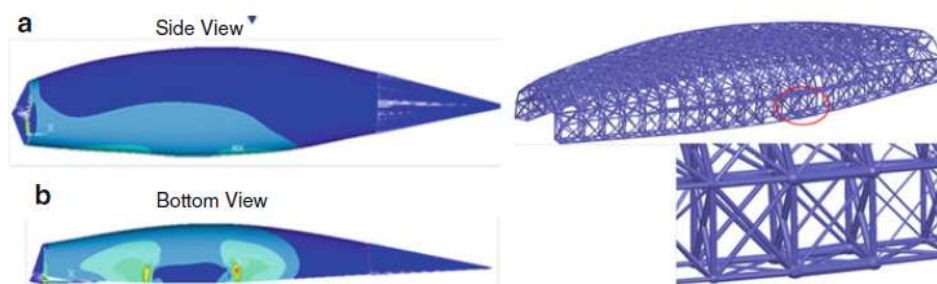
Εικόνα 2. Συστοιχία δοκών α) στο αρχικό πρόβλημα και β) αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης ^[20,21]

Τέτοια προβλήματα μπορούν εύκολα να επιλυθούν όταν ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης είναι σχετικά μικρός. Όσο μεγαλώνει το πρόβλημα, τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα ο αλγόριθμος να μην καταφέρει να συγκλίνει εύκολα, με αισιόδοξο αποτέλεσμα να καθυστερήσει να βρει λύση και απαισιόδοξο, να εγκλωβιστεί σε επαναλήψεις και να τρέχει επ' άπειρον.

Φυσικά, έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι που αντιμετωπίζουν τέτοιου είδους προβλήματα. Υπάρχουν λοιπόν αλγόριθμοι που κάνουν χρήση ευρετικών μεθόδων βελτιστοποίησης, οι οποίοι στοχεύουν στην σημαντική μείωση των μεταβλητών σχεδιασμού σε ένα πρόβλημα.

Μια τέτοια μέθοδος είναι η Size Matching and Scaling (SMS). Χαρακτηριστικά της είναι ότι απαιτεί μόνο δυο μεταβλητές σχεδιασμού και την ελάχιστη και μέγιστη διάμετρο των ράβδων. Λειτουργεί εκτελώντας μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) σε ένα στερεό σώμα του σχεδίου. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι αρχικά, η κατασκευή μια συμπαγούς δομής πλέγματος που χωράει μέσα στο στερεό σώμα. Έπειτα συγκεντρώνονται οι τοπικές τιμές τάσης ή πίεσης από τα αποτελέσματα FEA και χρησιμοποιούνται για την κλίμακα δοκών στη δομή πλέγματος με αποτέλεσμα ένα σύνολο σχετικών τιμών μεγέθους δοκού. Η βελτιστοποίηση του μεγέθους πραγματοποιείται στη δομή πλέγματος για τον προσδιορισμό των τιμών της ελάχιστης και της μέγιστης διαμέτρου των ράβδων, χρησιμοποιώντας στοιχεία του πλαισίου για να μοντελοποιηθεί η δομή του πλέγματος. Η εφαρμογή της

μεθόδου SMS σε απλοποιημένο πρόβλημα σχεδιασμού ατράκτου UAV απεικονίζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3. SMS method results on UAV fuselage design problem ^[22]

2.1.2. Τοπολογία όγκου

Η δεύτερη βασική προσέγγιση τοπολογικής βελτιστοποίησης στηρίζεται στον προσδιορισμό της κατάλληλης πυκνότητας υλικού ενός συνόλου voxels που συγκροτούν ένα χωρικό πεδίο. Ο όρος voxel, αντιπροσωπεύει μια τιμή σε ένα πλέγμα στον τρισδιάστατο χώρο ^[23]. Η μέθοδος βελτιστοποίησης της τοπολογίας με βάση την πυκνότητα (volume-based) είναι η πλέον διαδεδομένη καθώς είναι εκείνη που χρησιμοποιείται στα εμπορικά πακέτα λογισμικού. Είναι γνωστή με τον όρο SIMP - Solid Isotropic Material with Penalization.

Η διαδικασία επίλυσης με χρήση αυτής της μεθόδου βελτιστοποίησης, ξεκινάει με τον καθορισμό ενός ευθύγραμμου μπλοκ το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο voxels. Όπως προαναφέρθηκε, κάθε voxel εξ ορισμού φέρει μια τιμή όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση, περιγράφει στην πυκνότητα. Συνεπώς, η τιμή των voxel θεωρείται σαν μεταβλητή σχεδιασμού. Οι τιμές πυκνότητας κυμαίνονται μεταξύ του μηδέν και του ένα. Πυκνότητα με τιμή ίση με τη μονάδα, υποδεικνύει ότι το υλικό είναι πλήρως πυκνό, αντίθετα όταν η τιμή είναι μηδέν υποδεικνύει την απουσία υλικού στο συγκεκριμένο στοιχείο του μπλοκ (voxel). Όλες οι ενδιάμεσες τιμές δηλώνουν ότι το υλικό δεν χρειάζεται να είναι πλήρως στερεό για να υποστηριχθούν οι τάσεις στο συγκεκριμένο στοιχείο. Οι τιμές της πυκνότητας χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση των τιμών ακαμψίας των voxel στα μοντέλα FEA όπου εφαρμόζονται κατά τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Παλαιότερα, υπήρχε περιορισμός στην πυκνότητα, καθώς υλικά μερικώς πυκνά ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν. Σήμερα, με την είσοδο των πλεγματικών δομών στην παραγωγική διαδικασία και τη βοήθεια της προσθετικής παραγωγής, τα πράγματα είναι πιο εύκολα καθώς μπορεί να γίνει αντικατάσταση των voxel με κάποια ενδιάμεση τιμή του μηδέν και του ένα, από πλεγματική δομή. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτή την διαδικασία και τα πλεονεκτήματά της, θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Ένα τυπικό πρόβλημα τοπολογικής βελτιστοποίησης σχηματίζεται ως εξής [18].

$$\min_x L(u) = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx + \int_{\Gamma} \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} ds \quad (1)$$

$$\text{τέτοιο ώστε,} \quad a(u, v) = L(v), \quad \text{all } v \in U \quad (2)$$

$$\text{όπου,} \quad a(u, v) = \int_{\Omega} E_{ijkl} \varepsilon_{kl}(u) \varepsilon_{ij}(v) \mathbf{v} dx \quad (3)$$

x: σημεία του χωρίου ενδιαφέροντος

U: αποδεκτά πεδία μετατόπισης

f: δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα

t: μετατοπίσεις επιφάνειας

Η συνάρτηση (3) είναι γνωστή ως διγραμμική μορφή ενέργειας. Σε αυτό το σχηματισμό, οι μεταβλητές σχεδίασης είναι οι τάσεις ελαστικότητας E_{ijkl} . Στην μέθοδο SIMP, η ελαστικότητα είναι συνάρτηση της πυκνότητας και μερικές φορές και του προσανατολισμού.



Εικόνα 4. Απλό παράδειγμα τοπολογικής βελτιστοποίησης [24]

2.2. Σχηματισμός του προβλήματος

Πριν την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης προηγείται ο σχηματισμός του προβλήματος, ο οποίος απαιτεί μεγάλη προσοχή. Το πρόβλημα πρέπει να είναι σωστά ορισμένο ούτως ώστε η επίλυσή του να εξασφαλίσει την καλύτερη δυνατή λύση. Παρακάτω παρατίθενται τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν κατά το σχεδιασμό ενός τέτοιου προβλήματος [1].

- i. **Καθορισμός του στόχου του προβλήματος**, δηλαδή τι πρέπει να επιτευχθεί με την βελτιστοποίηση και υπό ποια κριτήρια
- ii. **Συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και πληροφοριών**
- iii. **Καθορισμός των μεταβλητών σχεδίασης**, αναγνώριση και καθορισμός των μεταβλητών σχεδίασης που περιγράφουν το πρόβλημα. Το πλήθος αυτό επηρεάζει άμεσα το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας.

- iv. **Προσδιορισμός του κριτηρίου προς βελτιστοποίηση**, δηλαδή πρέπει να αποσαφηνιστεί το κριτήριο αξιολόγησης και τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Αυτό το κριτήριο είναι η αντικειμενική συνάρτηση η οποία πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος
- v. **Προσδιορισμός των περιορισμών**, σε αυτό το στάδιο γίνεται ο εντοπισμός των περιορισμών του προβλήματος.

Γενικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης σχηματίζεται με τον παρακάτω μαθηματικό τρόπο:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize:} && f(x) \\
 &\text{Subject to:} && g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, m \\
 &&& h_j(x) = 0, \quad j = 1, p \\
 &&& x_k^l \leq x_k \leq x_k^u, \quad k = 1, n
 \end{aligned}$$

Όπου, $f(x)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση που θα ελαχιστοποιηθεί ενώ ικανοποιούνται οι περιορισμοί $g(x)$ και $h(x)$, ανισότητας και ισότητας αντίστοιχα. Το x , αντιπροσωπεύει ένα διάνυσμα το οποίο περιέχει τις μεταβλητές σχεδίασης, το πλήθος των οποίων συμβολίζεται με n . Τέλος, παρατηρούμε το κάτω και άνω όριο για την μεταβλητή σχεδίασης x_k .

2.2.1. Στόχοι ενός προβλήματος (ΤΟ)

Η τοπολογική βελτιστοποίηση συσχετίζεται με την τροποποίηση της τοπολογίας μιας δεδομένης ποσότητας υλικού, με τρόπο τέτοιο ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του συστήματος. Στην ουσία, γίνεται αναζήτηση μιας πιο δύσκαμπτης τοπολογίας σε συνδυασμό με ελαχιστοποίηση του υλικού. Συνεπώς, στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας (compliance), διότι όσο χαμηλότερη είναι η ενδοτικότητα τόσο υψηλότερη είναι η δυσκαμψία.

Με τον όρο ενδοτικότητα, εννοούμε το εξωτερικό έργο που δρα στο αντικείμενο και είναι ίσο με το άθροισμα όλων των μετατοπίσεων στα σημεία εφαρμογής των φορτίσεων, σταθμισμένα με το μέγεθος της φόρτισης ^[25]. Δηλαδή, ελαχιστοποιώντας την ενδοτικότητα, μειώνεται η παραμόρφωση λόγω φορτίσεων στο αντικείμενο που μελετάται και τελικά μεγιστοποιείται η συνολική δυσκαμψία. Ο στόχος σχεδίασης βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας C , υπό τον περιορισμό του όγκου. Οι συναρτήσεις που περιγράφουν την ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας είναι ^[2]:

$$\text{minimize } C = F^T u, \quad Ku = F$$

$$V_{(\rho_e)} = \sum_{e=1}^N \rho_e \frac{V_e}{V_{Tot}} \leq V^{Lim}$$

$$e = 1, \dots, N$$

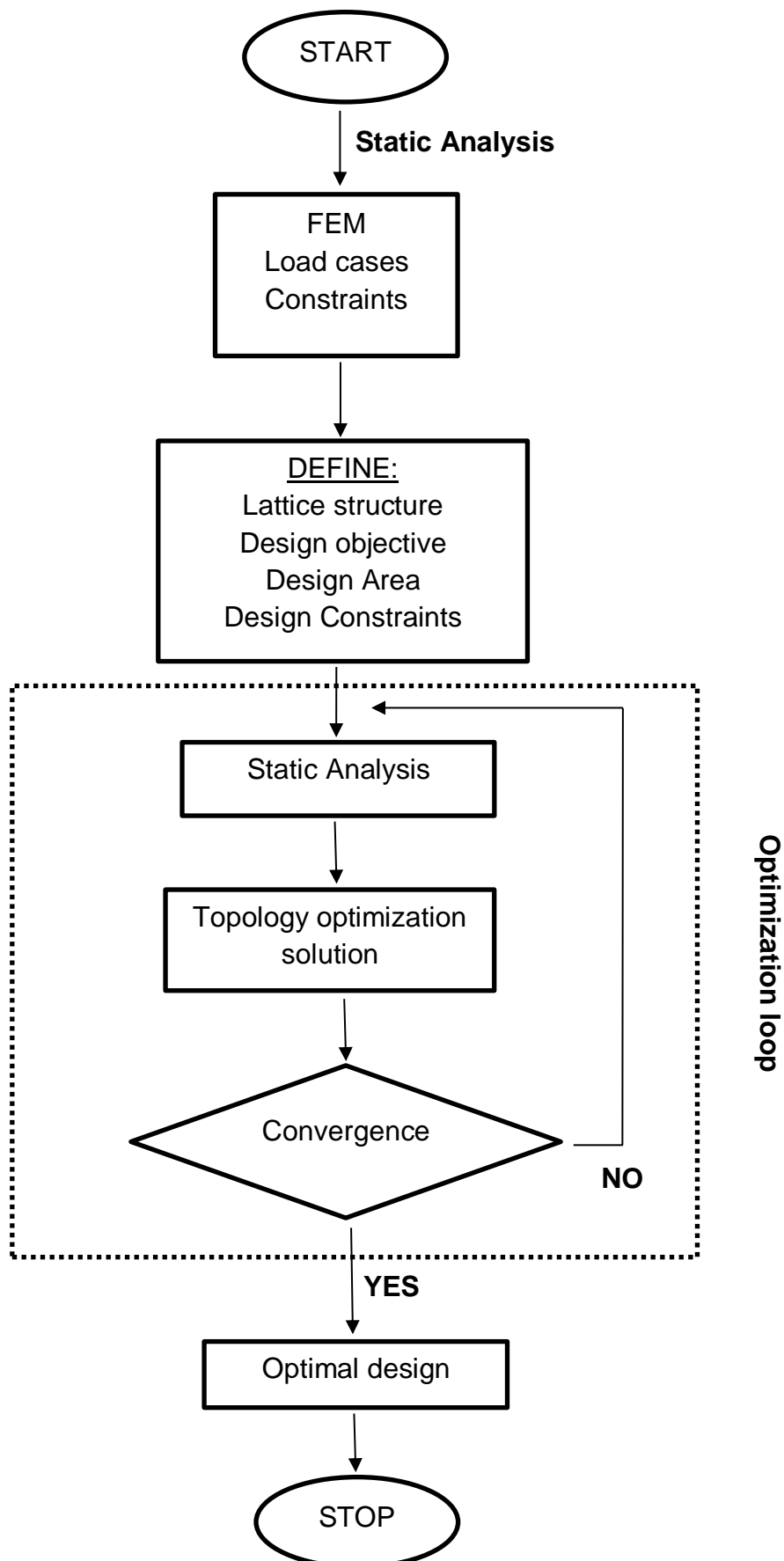
$$\rho_e = \{\rho_{min}, 1\}$$

Όπου, K συμβολίζεται η μήτρας δυσκαμψίας της δομής, F είναι το διάνυσμα δύναμης ανά κόμβο και u , το πεδίο μετατόπισης. Ακόμη, ρ_e είναι η “εικονική” πυκνότητα, V_e είναι ο όγκος του e -οστού πεπερασμένου στοιχείου (N : πλήθος πεπερασμένων στοιχείων), V_{Tot} συμβολίζεται ο συνολικός όγκος του μέγιστου χωρίου που μπορεί να καταλάβει η δομή ενώ V_{Lim} είναι ο επιθυμητός όγκος που καθορίζεται από το χρήστη.

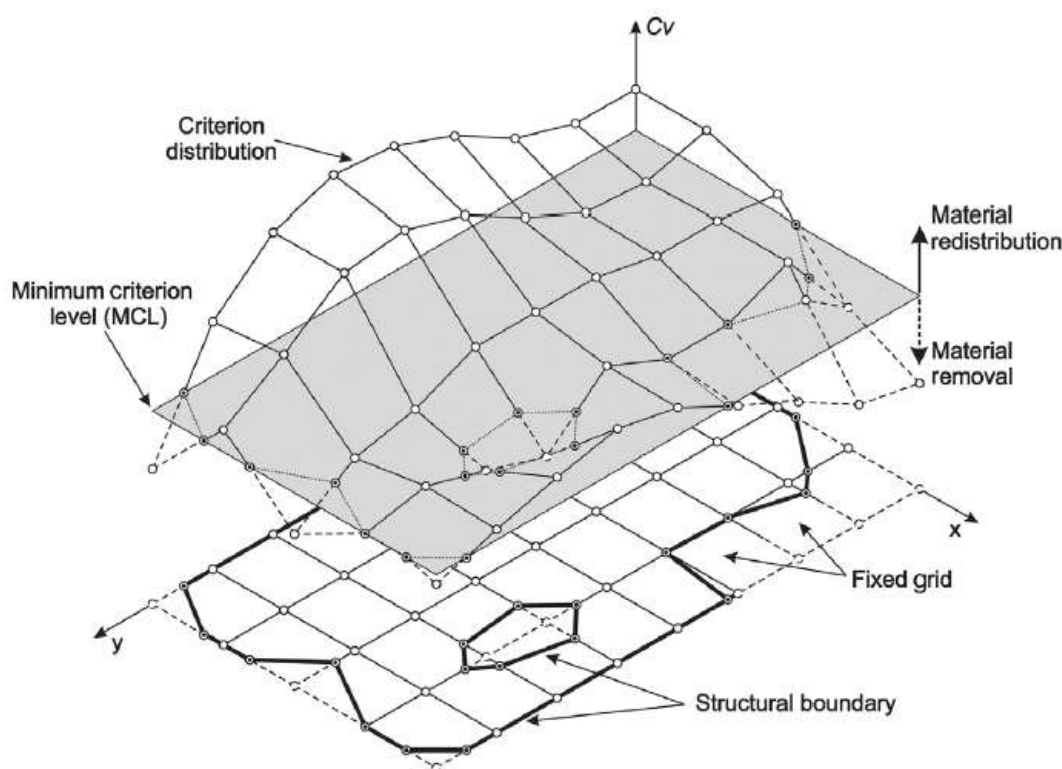
Η διαδικασία “προετοιμασίας” του μοντέλου ώστε να εφαρμοστεί η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι συγκεκριμένη. Αρχικά θα πρέπει να οριστούν, η περιοχή σχεδίασης δηλαδή η περιοχή στην οποία θα επιτρέπεται η αλλαγή της τοπολογίας αλλά και η περιοχή η οποία θα παραμείνει σταθερή κατά την βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνει εφαρμογή των φορτίσεων αλλά και των οριακών συνθηκών – περιορισμών. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται μια αριθμητική μέθοδος ανάλυσης, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis). Με αυτό τον τρόπο γίνεται διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία και ορίζεται μια πυκνότητα υλικού. Συνήθως, η βελτιστοποίηση τοπολογίας στοχεύει στην βέλτιστη κατανομή του υλικού ώστε να μειωθεί η μάζα.

2.3. Πως λειτουργεί ο αλγόριθμος

Η τοπολογική βελτιστοποίηση λειτουργεί μεταβάλλοντας την πυκνότητα των στοιχείων, προκειμένου να βρει την κατανομή υλικού που οδηγεί στο βέλτιστο σχεδιασμό, ικανοποιώντας τους περιορισμούς. Τα βασικά βήματα για την διαδικασία εφαρμογής της τοπολογικής βελτιστοποίησης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σχετικά με την πλεγματοποίηση, τον καθορισμό των παραμέτρων σχεδίασης και την όλη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Ακόμη θα ακολουθήσει μια εφαρμογή των διαδικασιών αυτών η οποία θα παρουσιαστεί βήμα-βήμα.



Στο σημείο αυτό θεωρείται χρήσιμο, να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει η νέα σχεδίαση ενός μοντέλου όταν υπόκειται στην διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, η πρώτη διαδικασία που απαιτείται για την μετέπειτα ανάλυση, είναι η πλεγματοποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο διακριτοποιείται με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται πλέον από ένα σύνολο στοιχείων και κόμβων. Γενικά, όλες οι μέθοδοι βελτιστοποίησης κατά την ανάλυσή τους, αυτό που κάνουν είναι να κινούν τους κόμβους των στοιχείων, προκειμένου να εξερευνηθούν νέες διατάξεις του πλέγματος οι οποίες θα αποφέρουν βέλτιστες ιδιότητες. Έτσι και η τοπολογική βελτιστοποίηση σε κάθε επανάληψή της, επαναπροσδιορίζει τη συστοιχία των κόμβων και των επιφανειών. Συνεπώς υπάρχει συνεχής αλληλεπίδραση μεταξύ της δομικής συμπεριφοράς και της τοπολογίας του μοντέλου, με τη βοήθεια των isolines (οριογραμμών) για 2d στοιχεία, και των isosurfaces (ισο-επιφανειών) για τα 3d στοιχεία. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο τρόπος εξαγωγής των isolines και των isosurfaces στο χώρο, από ένα αρχικό πλέγμα.

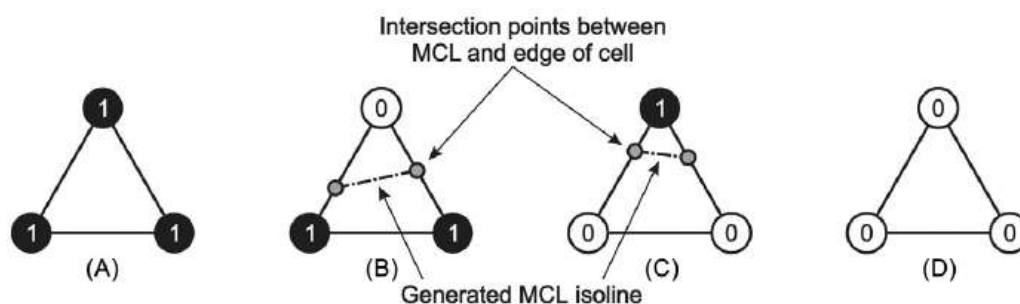


Εικόνα 5. Δημιουργία νέων στοιχείων στο χώρο

Ας μελετήσουμε όμως πιο αναλυτικά τον τρόπο με τον οποίο παράγονται τα νέα στοιχεία σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.

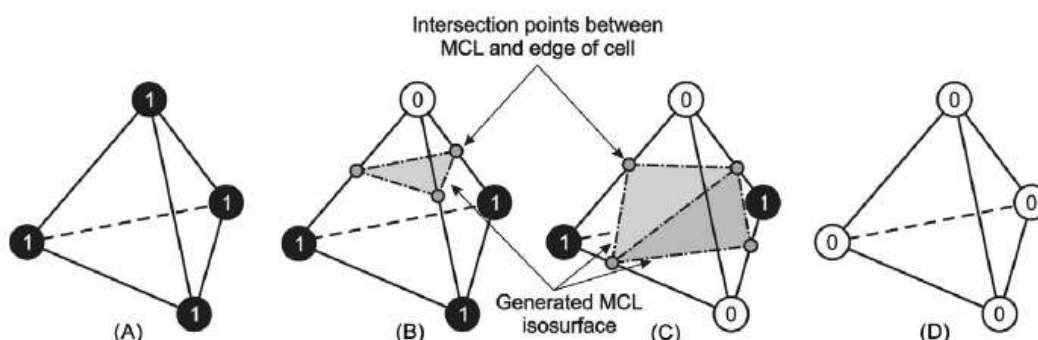
Για τη δημιουργία των οριογραμμών (isolines) χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Marching Triangles^[26]. Σύμφωνα με αυτόν, κάθε πεπερασμένο στοιχείο θεωρείται τριγωνικό. Σε περίπτωση που κάποιο έχει τετράπλευρο σχήμα, υποδιαιρείται σε τέσσερα τριγωνικά στοιχεία εισάγοντας ένα σημείο στο

κέντρο εκείνου του στοιχείου. Η τιμή του κεντρικού σημείου προκύπτει από τον υπολογισμό του μέσου όρου των τεσσάρων γωνιακών κόμβων ή από παρεμβολή χρησιμοποιώντας τις τιμές στα σημεία Gauss των στοιχείων. Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται νέα στοιχεία, εξαρτάται από την οριογραμμή που θα σχεδιαστεί έπειτα από γραμμική παρεμβολή μεταξύ των κόμβων στα οποία υπάρχει υλικό (δείκτης 1). Προφανώς, όταν οι κόμβοι έχουν δείκτη 0, δεν αντιστοιχούν σε υλικό άρα δεν υπάρχει λόγος δημιουργίας νέου στοιχείου. Στην Εικόνα 6, φαίνονται οι περιπτώσεις εισαγωγής οριογραμμής στα τριγωνικά στοιχεία ενός πλέγματος.



Εικόνα 6. Περιπτώσεις αλγορίθμου για την προσθήκη οριογραμμής (isoline)

Για τη δημιουργία των ισοεπιφανειών σε τρισδιάστατα προβλήματα, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Marching Tetrahedra ^[27]. Η αναπαράσταση μιας τρισδιάστατης δομής μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε συνδυασμό των ακόλουθων πεπερασμένων στοιχείων, τετράεδρα (tetrahedrons), εξάεδρα (hexahedrons) και επτάεδρα (pentahedrons). Ωστόσο, όταν το στοιχείο είναι επτάεδρο, πρέπει να διαχωριστεί σε 14 τετράεδρα και όταν το στοιχείο είναι εξάεδρο, σε 24 τετράεδρα. Έπειτα ο αλγόριθμος παράγει τις ισοεπιφάνειες με τη βοήθεια της γραμμικής παρεμβολής, σχηματίζοντας τα νέα στοιχεία όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7. Περιπτώσεις αλγορίθμου για την προσθήκη ισοεπιφάνειας (isosurface)

3. Εισαγωγή στο Nastran

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί το λογισμικό Nastran μέσω του οποίου θα γίνει στη συνέχεια η εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Αρχικά θα γίνει μια μικρή αναφορά στην ιστορική αναδρομή της εξέλιξής του. Στη συνέχεια θα γίνει συσχέτιση του με την μέθοδο της τοπολογικής βελτιστοποίησης, παρουσιάζοντας την διαδικασία εφαρμογής της βήμα-βήμα. Σε επόμενη ενότητα θα μελετηθούν τα είδη πλεγματικών δομών και πως αυτές εντάσσονται στη διαδικασία του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης τοπολογίας ενός αντικειμένου.

3.1. Ιστορική αναδρομή

Κατά τη διάρκεια της ετήσιας επισκόπησης στο ερευνητικό πρόγραμμα «structural dynamics» της NASA τον Ιανουάριο του 1964, προτάθηκε για πρώτη φορά η ανάπτυξη ενός κοινού λογισμικού το οποίο θα ικανοποιεί τις ανάγκες όλων των ερευνητικών κέντρων της. Έτσι, συστάθηκε μια επιτροπή αποτελούμενη από άτομα των οκτώ κέντρων της NASA ώστε να καθορίσουν τις προδιαγραφές του νέου λογισμικού, ονόματι Ad Hoc Group ^[28].

Μετά από έξι μήνες έρευνας, η Ad Hoc Group ανέφερε στα κεντρικά της NASA ότι δεν υπάρχει κανένα ψηφιακό πρόγραμμα που να έχει ευρεία ομοιόμορφη ικανότητα στις τρεις αλληλοσυνδεόμενες αρχές της αναλυτικής μηχανικής, των αριθμητικών μεθόδων και του προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών. Παρατηρήθηκε όμως ότι γενικά στην αεροδιαστημική βιομηχανία υπήρχε σημαντική αλλά διεσπαρμένη ικανότητα-πληροφορία, χωρίς όμως να είναι συγκεντρωμένη σε ένα πρόγραμμα. Έτσι η NASA ανέθεσε στην Computer Sciences Corporation (CSC) την ανάπτυξη του νέου λογισμικού ^[29]. Το πρώτο όνομα που δόθηκε στο λογισμικό κατά την ανάπτυξή του, ήταν GPSA (General Purpose Structural Analysis). Τελικά το όνομα που ενέκρινε η NASA ήταν το γνωστό μας NASTRAN, όπου σχηματίζεται από την αγγλική ορολογία “NASA’s structural analysis”. Στην κυκλοφορία δόθηκαν διάφορες εκδοχές του NASTRAN ωστόσο το αυθεντικό λογισμικό που αναπτύχθηκε από τους Joe Mule (NASA), Gerald Sandler (NASA) και Stephen Burns (University of Rochester) ήταν διαθέσιμο στο κοινό το 1971.

Η εμπορική χρήση του NASTRAN βοήθησε στην ανάλυση της συμπεριφοράς ελαστικών δομών οποιουδήποτε μεγέθους, σχήματος ή σκοπού. Για παράδειγμα, η αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για το σχεδιασμό των εμπρός συστημάτων ανάρτησης και συνδέσμων διεύθυνσης. Χρησιμοποιείται επίσης στο σχεδιασμό σιδηροδρομικών γραμμών, αυτοκινήτων, γεφυρών, σταθμών παραγωγής ενέργειας, ουρανοξυστών και αεροσκαφών. Το πρόγραμμα μόνο του εκτιμάται ότι επέστρεψε 701 εκατομμύρια δολάρια σε εξοικονόμηση κόστους από το 1971 έως το 1984. Το NASTRAN εισήχθη στο Hall of Fame της Διαστημικής Τεχνολογίας των

Ηνωμένων Πολιτειών το 1988, μία από τις πρώτες τεχνολογίες που έλαβαν αυτή την υψηλού κύρους τιμή ^[30].

Το λογισμικό Nastran αποτελεί κυρίως έναν επιλυτή ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Πρέπει να τονιστεί ότι μόνο του δεν διαθέτει λειτουργίες που επιτρέπουν τη γραφική αναπαράσταση μοντέλων ή πλεγμάτων. Αντίθετα, όλες οι εισοδοί και έξοδοι του συστήματος αποτελούν αρχεία κειμένου. Ωστόσο τα περισσότερα λογισμικά που σχετίζονται με την επεξεργασία μοντέλων με τη βοήθεια υπολογιστή, έχουν την δυνατότητα εισόδου και επεξεργασίας CAD μοντέλων, πλεγματοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία και άμεσης εφαρμογής φορτίσεων και περιορισμών. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν στο χρήστη να κάνει μια ανάλυση με το Nastran, να εισάγει τα αποτελέσματα και να αναπαραχθούν γραφικά στο περιβάλλον του εκάστοτε λογισμικού. Εκτός από τις δυνατότητες προ- και μετά- επεξεργασίας αρκετοί προμηθευτές Nastran έχουν ενσωματώσει πιο προηγμένες δυνατότητες στα προϊόντα Nastran, όπως για παράδειγμα τη γραμμική ανάλυση. Μερικά λογισμικά που εμπεριέχουν τον αρχικό κώδικα Nastran είναι τα παρακάτω:

- MSC Nastran
- NASTRAN-xMG
- NEi Nastran (πλέον λογισμικό της Autodesk)
- NX Nastran (ανήκει στην Siemens PLM Software και αναδημιουργήθηκε με το όνομα Siemens NX (Unigraphics))
- Nastran όπου διανέμεται από το Open Channel Foundation

3.1.1. Αρχιτεκτονική του λογισμικού

Αρχικά το λογισμικό Nastran γράφηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Fortran και αποτελούνταν πάνω από ένα εκατομμύριο γραμμές κώδικα. Όπως προαναφέρθηκε το Nastran πωλείται εντός μεγάλων σχεδιαστικών πακέτων και είναι συμβατό με τους περισσότερους υπολογιστές και τα λειτουργικά συστήματα αυτών, από μικρούς σταθμούς εργασίας μέχρι τους μεγαλύτερους υπερ-υπολογιστές.

Το Nastran σχεδιάστηκε εξ αρχής για να περιέχει πολλές λειτουργίες και να ικανοποιεί ένα ευρύ φάσμα αναγκών. Μια από τις λειτουργίες του είναι η συλλογή υπορουτίνων που είναι σχεδιασμένες να εκτελούν μια συγκεκριμένη διεργασία όπως για παράδειγμα, η επεξεργασία γεωμετρίας μοντέλου, οι συναρμολογήσεις, η εφαρμογή περιορισμών, η επίλυση προβλημάτων μήτρας (matrix problems), υπολογισμός ποσοτήτων εξόδου, σύνδεση με τη βάση δεδομένων, εκτύπωση της λύσης κ.ά. Κάθε τύπος διαθέσιμης ανάλυσης ονομάζεται ακολουθία λύσεων. Ορισμένοι από τους πιο συνηθισμένους κώδικες ακολουθίας λύσεων φαίνονται παρακάτω, ωστόσο όλοι όσοι χρησιμοποιούνται από το Nastran παρατίθενται στο Παράρτημα Α' ^[31].

- SOL 101 Linear Statics – Global Constraints
- SOL 103 Real Eigenvalues
- SOL 200 Design Optimization

- SOL 200 Topology Optimization
- SOL 401 Multi-Step Nonlinear

3.2. Nastran και τοπολογική

Στην παρούσα εργασία θα γίνει χρήση του Nastran μέσω του λογισμικού NX 12 της Siemens. Το συγκεκριμένο πακέτο τρισδιάστατης σχεδίασης, περιέχει όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα διάφορες επιλύσεις. Εκείνη που συνδυάζει την τοπολογική βελτιστοποίηση και περιλαμβάνει πλεγματικές δομές, ονομάζεται SOL 200 Topology Optimization.

Στην ενότητα αυτή, θα μελετηθεί η διαδικασία προετοιμασίας και εκτέλεσης μιας τοπολογικά βελτιστοποιημένης λύσης. Στάδια αυτής της διαδικασίας είναι ο καθορισμός της περιοχής σχεδίασης, του στόχου του σχεδίου (design objective), η εισαγωγή των περιορισμών αλλά και οι αποκρίσεις σχεδιασμού.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση του NX μπορεί να μας βοηθήσει στο σχεδιασμό ενός νέου αντικειμένου αφού είναι σε θέση να παρέχει μια βέλτιστη πρόταση σχεδίασης. Η πρόταση αυτή παράγεται από το λογισμικό βάση της προσομοίωσης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Model) και τις περιπτώσεις φόρτισης που έχουν προκύψει μέσω του Nx Nastran. Το NX κατά την εξέλιξή του έχει χρησιμοποιήσει διάφορους επιλύτες για την τοπολογική βελτιστοποίηση. Σε παλαιότερες εκδόσεις, χρησιμοποιούσε τον επιλύτη Tosca Topology Optimization από την FE DESIGN. Για το NX 11 το οποίο κυκλοφόρησε στην αγορά τον Αύγουστο του 2016 ^[32], η Siemens εισήγαγε ένα δικό της λογισμικό ενώ παράλληλα σε ενημερώσεις της αρχικής έκδοσης, πρόσθεσε την εντολή Frustum TopOpt. Σήμερα, στο νέο NX 12 που κυκλοφόρησε τέλη Οκτωβρίου του 2017, η Siemens έχει αναβαθμίσει αρκετά την τοπολογική βελτιστοποίησή της, εισάγοντας νέες εντολές και δυνατότητες, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζει όλες τις προηγούμενες εκδόσεις. Με αυτό τον τρόπο προσεγγίζει τις απαιτήσεις τόσο των μηχανικών σχεδιασμού, όσο και των ειδικών που ασχολούνται με το CAE (Computer-Aided Engineering).

3.3. Διάγραμμα ροής εργασιών (Workflow)

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν όλες οι εργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια τυπική ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας, από την αρχική σχεδίαση ενός μοντέλου έως και την παραγωγή της βέλτιστης γεωμετρίας του.

Αρχικά θα πρέπει να γίνει στατική ανάλυση του αντικειμένου και στην συνέχεια θα εφαρμοστεί η τοπολογική βελτιστοποίηση. Ακολουθεί η ανάλυση της τοπολογικά βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, η οποία ουσιαστικά επαληθεύει τα αποτελέσματα της προηγούμενης ανάλυσης. Τέλος το μορφοποιημένο μοντέλο εισάγεται στο λογισμικό για περαιτέρω λεπτομερή σχεδιασμό ώστε να είναι έτοιμο για την παραγωγική διαδικασία ^[33]. Επιγραμματικά οι εργασίες που απαιτούνται είναι οι εξής:

1. Στατική ανάλυση

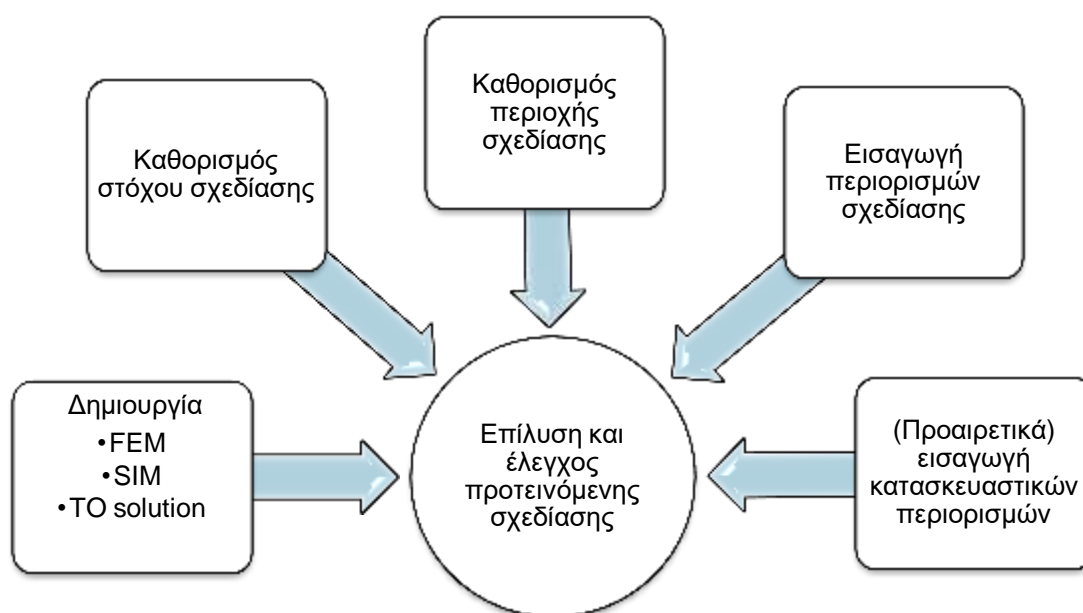
- Δημιουργία ή εισαγωγή της γεωμετρίας του μοντέλου στο λογισμικό
- Διακριτοποίηση της γεωμετρίας
- Προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών, των φορτίων και των οριακών συνθηκών

2. Ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας

- Ορισμός στόχου σχεδίασης
- Ορισμός περιοχής σχεδίασης και σταθερών τμημάτων (εάν υπάρχουν)
- Ορισμός περιορισμών βελτιστοποίησης
- Ορισμός κατασκευαστικών περιορισμών (εάν υπάρχουν)
- Καθορισμός μορφής παρουσίασης των αποτελεσμάτων
- Εξαγωγή της βέλτιστης γεωμετρίας σε αρχείο STL

3. Ανάλυση επιβεβαίωσης


- Εισαγωγή του αρχείου STL στο λογισμικό μοντελοποίησης, επεξεργασία του μοντέλου και εισαγωγή πλεγματικών δομών στην κατάλληλη περιοχή σχεδίασης
- Επανάληψη της στατικής ανάλυσης για την εξαγωγή συμπερασμάτων



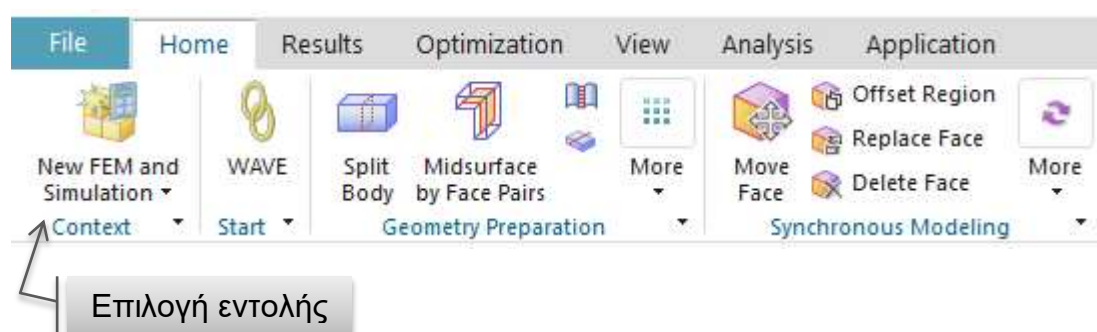
3.3.1. Δημιουργία λύσης

Αρχικά λοιπόν θα πρέπει το προς σχεδίαση και βελτιστοποίηση μοντέλο, είτε να σχεδιαστεί εξ αρχής είτε απλά να εισαχθεί η γεωμετρία του, στο λογισμικό NX 12 της Siemens. Το μοντέλο μπορεί να είναι κάποιο απλό σχέδιο, ή ένα πιο περίπλοκο ή ακόμη και μια συναρμολόγηση ενός μηχανισμού. Επιπλέον μπορεί να αποτελείται από στερεά τμήματα, τμήματα επιφανειών ή και συνδυασμό αυτών.

Για να ξεκινήσουμε μια προσομοίωση θα πρέπει πρώτα να δημιουργήσουμε τα αντίστοιχα αρχεία προσομοίωσης (Simulation - sim file) και πεπερασμένων στοιχείων (finite element method – fem file). Ο λόγος ύπαρξης δυο ξεχωριστών αρχείων, είναι η δυνατότητα πολλαπλών προσομοιώσεων οι οποίες μπορούν να βασίζονται ίδιο αρχείο fem. Στο περιβάλλον του NX, επιλέγουμε την καρτέλα Application και στη συνέχεια **Pre/Post**.

Application Tab →  Pre/Post

Στην συνέχεια, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα, επιλέγουμε την εντολή **New Fem and Simulation** από την καρτέλα Home ώστε να δημιουργήσουμε τα επιθυμητά αρχεία και να προχωρήσουμε στην προσομοίωση του μοντέλου.



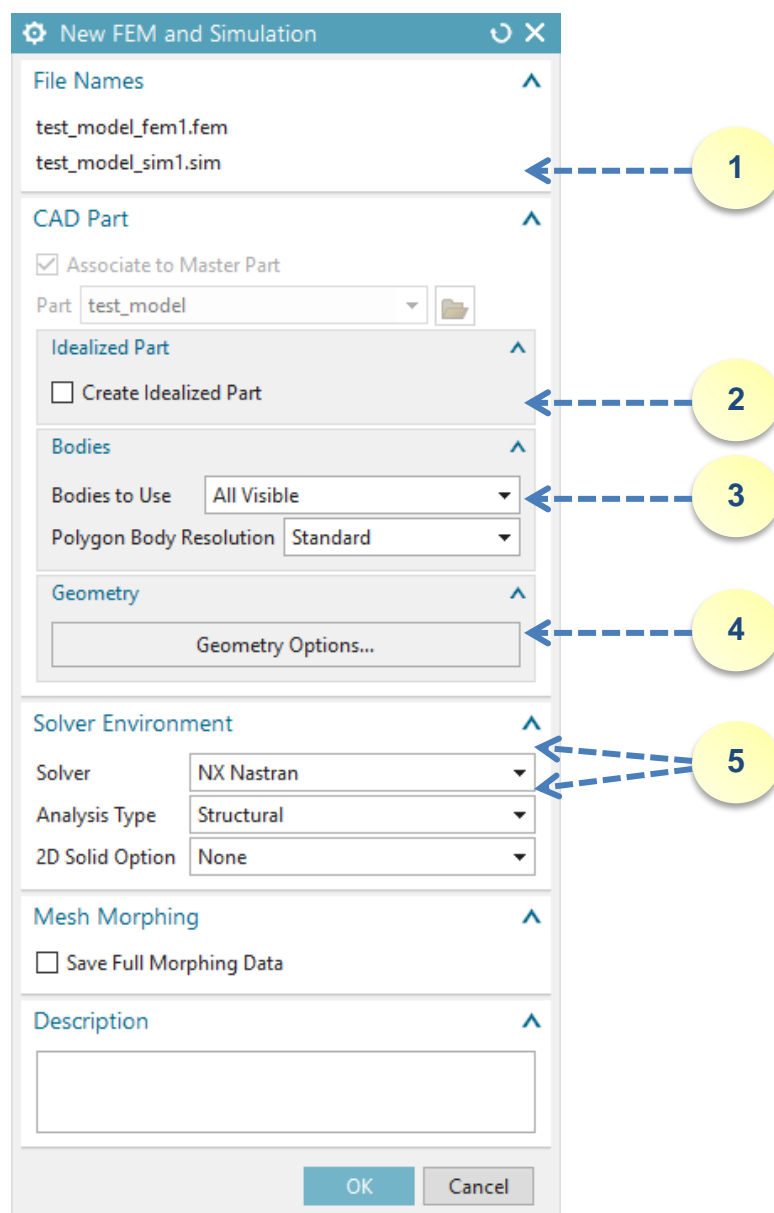
Τα επόμενα δυο παράθυρα που θα εμφανιστούν επιλέγοντας την εντολή **New Fem and Simulation**, περιγράφουν ορισμένα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης. Αρχικά, στην Εικόνα 4 και με την ένδειξη 1, βλέπουμε αρχικά τα ονόματα που θα έχουν τα αρχεία fem και sim, τα οποία έχουν προκύψει με αυτόματο τρόπο από το λογισμικό το οποίο προσθέτει καταλήξεις στο όνομα που έχει δοθεί στη μοντελοποίηση του αντικειμένου. Σε περίπτωση που επιθυμούμε να ορίσουμε ένα άλλο όνομα, επιλέγουμε **File→ Utilities→ Customer Defaults**. Μετά επιλέγουμε, **Simulation→ Pre/Post→ General→ FE Model and Simulation Create**.

Στο ίδιο παράθυρο, με την ένδειξη 2, παρατηρούμε την δυνατότητα δημιουργίας *idealized part* ή αλλιώς ενός εξιδανικευμένου αντικειμένου. Το αντικείμενο αυτό είναι ένα αρχείο prt που περιέχει ένα αντίγραφο του βασικού μοντέλου, στο οποίο μπορούν να γίνουν αλλαγές στη γεωμετρία χωρίς να επηρεαστεί το αρχικό ^[34]. Στην ουσία λοιπόν μπορούν να δημιουργηθούν πολλά τέτοια αντικείμενα που να συνδέονται με το αρχικό μοντέλο, πολλά αρχεία fem τα οποία συνδέονται με κάθε ένα *idealized part* και επίσης πολλαπλές προσομοιώσεις που να συνδέονται με ένα αρχείο fem. Αυτή η λειτουργία έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση της εργασίας που απαιτείται για να γίνουν διαφορετικές αναλύσεις στο ίδιο αντικείμενο.

Όπως προαναφέρθηκε, ο σχεδιασμός του μοντέλου μπορεί να αποτελείται από στερεά σώματα ή επιφάνειες. Συνεπώς, υπάρχει η εντολή που προσδιορίζει ποια σώματα θα συμπεριληφθούν στο αρχείο fem (ένδειξη 3 στην Εικόνα 8). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ των παρακάτω:

- **All Visible** (προεπιλογή): περιλαμβάνει όλα τα στερεά σώματα και τις επιφάνειες που εμφανίζονται εκείνη τη στιγμή στο παράθυρο των γραφικών (Graphics window) που αφορούν το idealized part και το fem
- **All**: περιλαμβάνει όλα τα στερεά σώματα και τις επιφάνειες, μαζί με όσα είναι κρυμμένα, που αφορούν το idealized part και το fem
- **Select**: περιλαμβάνει μόνο τα επιλεγμένα τμήματα στο idealized part και το fem. Επίσης ενεργοποιούνται οι παρακάτω επιλογές,
 - **Type Filter**
 - **Selection scope**
- **None**: δημιουργία ενός idealized part το οποίο δεν περιέχει κανένα τμήμα από το αρχικό-κύριο μοντέλο.

Τέλος, με την ένδειξη 5 στην παρακάτω εικόνα, υπάρχουν οι εντολές που αφορούν την επιλογή επιλύτη καθώς και το είδος της ανάλυσης. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο NX Nastran επιλύτης και θα γίνει δομική ανάλυση.



Εικόνα 8. Παράθυρο εντολών για τη δημιουργία των αρχείων Fem & Simulation

Στη συνέχεια το λογισμικό προτρέπει άμεσα το χρήστη για να δημιουργήσει μια λύση εμφανίζοντας το παράθυρο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 9. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει είτε άμεσα είτε αργότερα ώστε να δημιουργηθούν μια ή περισσότερες λύσεις. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα έχει επιλεγεί η λύση (Solution type) που αφορά την τοπολογική βελτιστοποίηση και ονομάζεται Sol 200 Topology Optimization. Επιπλέον, στην καρτέλα Bulk data μπορούν να προσδιοριστούν τα εξής:

- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγόριθμου (DESMAX)
- Εφαρμογή κανόνα ποινής (DRMLAW), όπου υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές. Στην περίπτωση μας θα επιλεγεί το Lattice όπου η εφαρμογή και οι δυνατότητες που δίνει, θα παρουσιαστούν στην ενότητα 3.4.
 - Linear

- SIMP
- RAMP
- LATTICE

Οι κανόνες ποινής (Penalty Law) καθορίζουν τη σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων του υλικού και της κανονικοποιημένης πυκνότητας υλικού στο βελτιστοποιημένο μοντέλο ^[35]. Όταν επιλεγθεί ο γραμμικός (Linear) κανόνας, τότε η δυσκαμψία των στοιχείων κλιμακώνεται γραμμικά με την πυκνότητά τους. Αυτό συχνά παράγει αποτελέσματα βελτιστοποίησης τοπολογίας με πολλές ενδιάμεσες τιμές πυκνότητας υλικού, οι οποίες μπορεί να μην είναι επιθυμητές. Η μέθοδος SIMP υπολογίζει την δυσκαμψία των στοιχείων μέσω της ακόλουθης εξής, όπου p είναι η τιμή που δίδεται στον κανόνα ποινής SIMP.

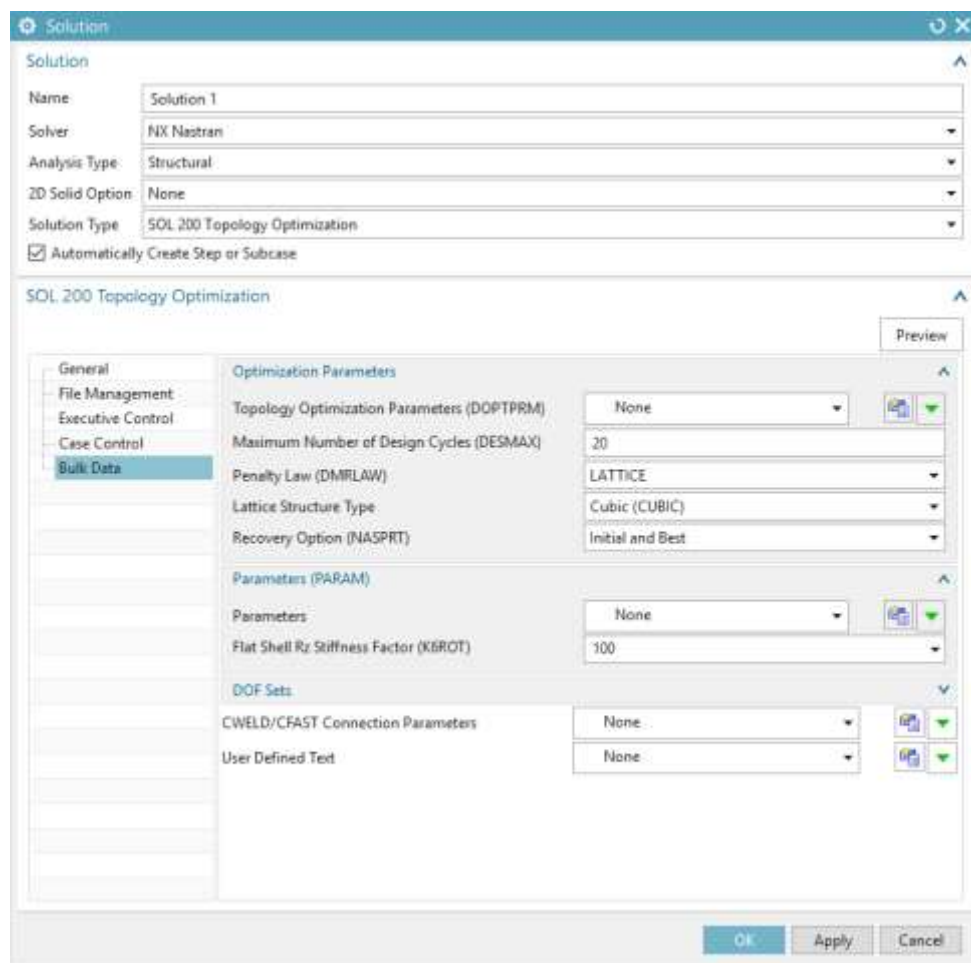
$$E(\mu) = \mu^p E_0$$

Ο τρίτος κανόνας ποινής, είναι ο RAMP, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας με τον καθορισμό της παραμέτρου q . Αυτή η επιλογή μπορεί να βελτιώσει τη σύγκλιση για προβλήματα βελτιστοποίησης που σχετίζονται με τη συχνότητα.

$$E(\mu) = \frac{\mu}{1 + q(1 - \mu)} E_0$$









Τέλος, υπάρχει και ο κανόνας ποινής Lattice ο οποίος καθορίζει μια πλεγματική δομή η οποία θα παραχθεί με τρισδιάστατη εκτύπωση. Ο τύπος των πλεγματικών δομών πρόκειται να μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία, οπότε σε επόμενα κεφάλαια θα γίνει λεπτομερείς εξέτασή τους.

- Επιλογή ανάκτησης (NASPRT), η οποία καθορίζει ποιοι κύκλοι σχεδιασμού θα συμπεριληφθούν στα αποτελέσματα. Οι επιλογές είναι συγκεκριμένες,
 - *Initial and Best*, περιλαμβάνει αποτελέσματα από την επανάληψη 0 (καμία βελτιστοποίηση) και από την τελευταία επανάληψη, στην οποία πρέπει να περιέχεται η βέλτιστη λύση.
 - *Initial with Skipped Cycles*, περιλαμβάνει αποτελέσματα από την επανάληψη 0 και από όλες όσες δεν παρακάμφθηκαν.
 - *Initial and All Improved*, περιλαμβάνει αποτελέσματα από την επανάληψη 0 και κάθε επανάληψη στην οποία παρατηρείται βελτίωση των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με την αμέσως προηγούμενή της.



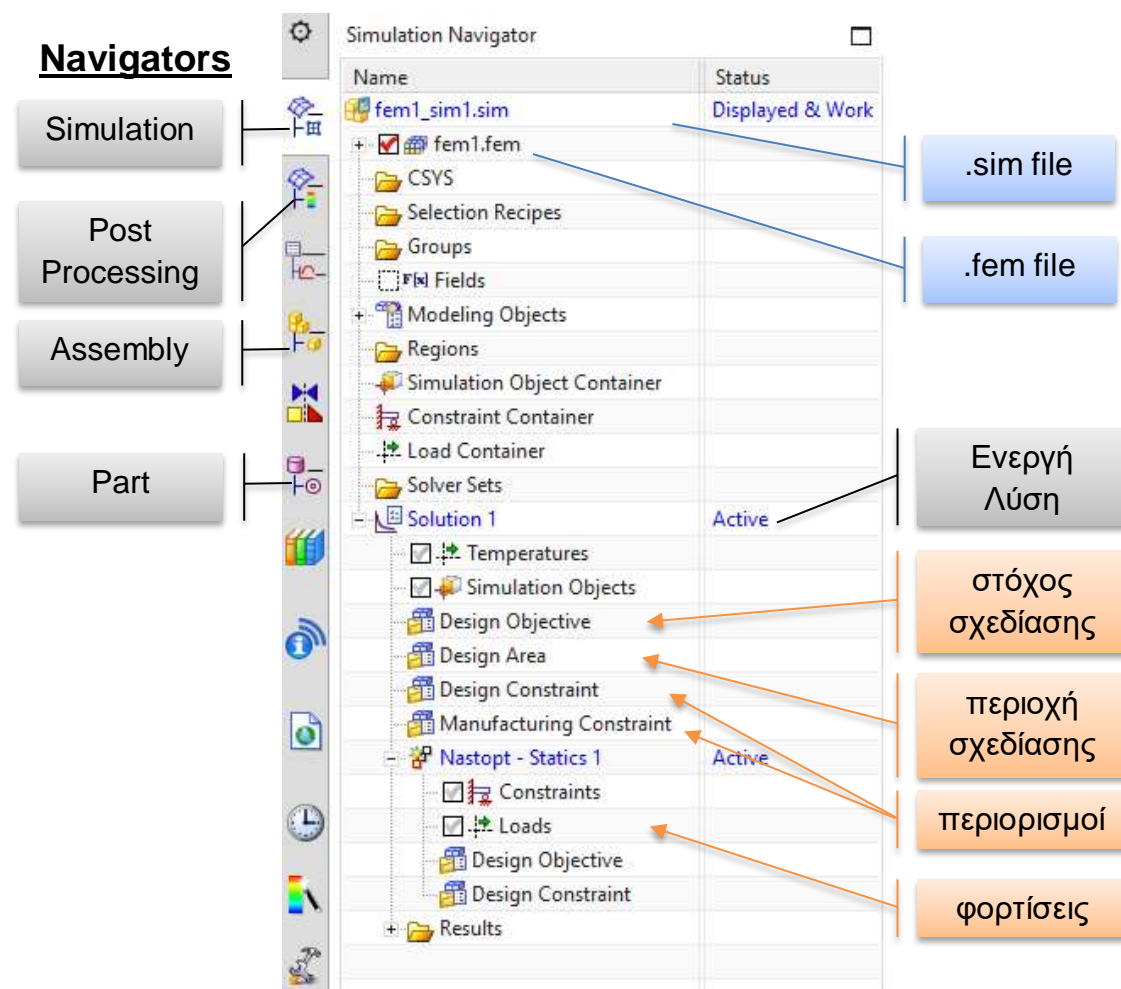
Εικόνα 9. Παράθυρο NX Nastran για τη δημιουργία λύσης

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία δημιουργίας των αρχείων fem και sim, το περιβάλλον του λογισμικού προσαρμόζεται έτσι ώστε να βοηθήσει το χρήστη να εφαρμόσει την πλεγματοποίηση στην γεωμετρία του εκάστοτε αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα, οι καρτέλες στο επάνω μέρος του περιέχουν εντολές που οδηγούν σε διακριτοποίηση του μοντέλου (Mesh), στερεάς μορφής ή και επιφάνειας. Ακόμη, κατά τη διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος, το λογισμικό “υπενθυμίζει” στο χρήστη να αντιστοιχίσει το κατάλληλο υλικό σε καθένα απ’ αυτά. Διαφορετικά, υπάρχουν οι αντίστοιχες εντολές στην καρτέλα Home ώστε να γίνει επιλογή υλικού και ιδιοτήτων του μοντέλου οποιαδήποτε άλλη στιγμή μετά την πλεγματοποίηση. Μία άλλη κατηγορία εντολών αφορά τη σύνδεση αντικειμένων και των πλεγμάτων τους. Πολλές φορές η γεωμετρία ενός αντικειμένου είναι απαραίτητο να χωριστεί σε επιμέρους τμήματα για πιο εύκολη διακριτοποίηση, για την εφαρμογή φορτίσεων ή περιορισμών σε συγκεκριμένο τμήμα του μοντέλου και όχι σε μια ολόκληρη επιφάνεια. Ωστόσο, επειδή στην προσομοίωση πρέπει το αντικείμενο να έχει ενιαία δομή προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του, προκύπτει η ανάγκη σύνδεσης των τμημάτων του. Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες εντολές που βρίσκονται στην καρτέλα Home στο περιβάλλον του NX όταν μοντελοποιείται το αρχείο fem.

Εντολή	Όνομα	Περιγραφή
	3D Tetrahedral	Διακριτοποίηση στερεών
	2D Mesh	Διακριτοποίηση επιφανειών
	Mesh Control	Έλεγχος πλέγματος
	Mesh Collector	Συλλογή πλεγμάτων με ίδια χαρακτηριστικά
	Physical Properties	Διαχείριση φυσικών ιδιοτήτων
	Manage Materials	Διαχείριση υλικών
	Mesh Mating	Ένωση 2 στερεών τμημάτων και των πλεγμάτων τους
	1D Connection	Ένωση FE αντικειμένων ή γεωμετρικών μοντέλων

Πίνακας 1. Βασικές εντολές του NX κατά την διαμόρφωση του fem αρχείου

Αφού ολοκληρωθεί η διακριτοποίηση του μοντέλου, ακολουθεί η προσαρμογή της διαδικασίας προσομοίωσης και η εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Αριστερά από το παράθυρο των γραφικών, έχουν ταξινομηθεί οι πλοηγοί (Navigators) του NX. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, πρώτος πλοηγός είναι εκείνος της προσομοίωσης (Simulation Navigator) ο οποίος περιέχει ένα δέντρο εργασιών που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση και συγκεκριμένα αφορούν την επίλυση της τοπολογικής βελτιστοποίησης που μελετάται στην παρούσα εργασία. Στην κορυφή υπάρχουν τα αρχεία sim και fem, εκ των οποίων τώρα είναι ενεργό το πρώτο. Έπειτα υπάρχει μια σειρά διαφόρων εντολών μερικές από τις οποίες θα παρουσιαστούν σε επόμενες ενότητες. Εκείνο που αξίζει να σημειωθεί προς το παρόν, είναι η ενεργή λύση (Solution 1) που αφορά την βελτιστοποίηση τοπολογίας και ότι κάτω από αυτήν βρίσκονται οι παράμετροι που πρέπει καθοριστούν ώστε να μπορέσει να “εκτελεστεί” ο επιλύτης Nastran-Sol 200 Topology Optimization.



Εικόνα 10. Διάταξη του πλοηγού προσομοίωσης στο λογισμικό NX 12

3.3.2. Καθορισμός στόχου

Ο στόχος σχεδίασης (design objective) αφορά την επιθυμητή/ιδανική σχεδίαση την οποία επιθυμεί ο χρήστης να πετύχει. Στόχος σχεδίασης μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους ή η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας, δηλαδή η αύξηση της δυσκαμψίας (βλ. ενότητα 2.2.1). Κάθε στόχος σχεδίασης είναι ένα αντικείμενο μοντελοποίησης (modeling object). Μπορούν να δημιουργηθούν πολλοί στόχοι σχεδίασης άρα και πολλά αντικείμενα μοντελοποίησης, ωστόσο κάθε λύση τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να έχει μόνο ένα στόχο.

Διαδικασία δημιουργίας στόχου σχεδίασης

1. Στον Simulation Navigator κάτω από την ενεργή λύση (TO) ή από το βήμα (step) αυτής, επιλένουμε:

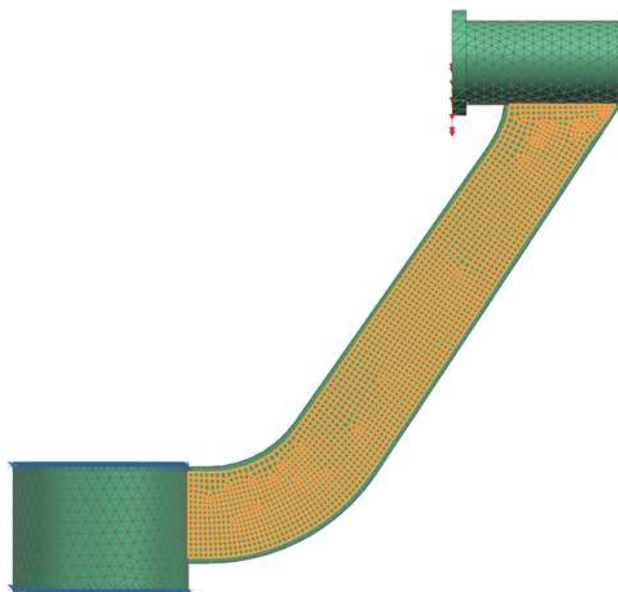
Design Objective  → **New or Replace Design Objective**

2. **Name**, επιλογή ονόματος

3. **Description**, (προαιρετικά) προσθήκη σημείωσης για το συγκεκριμένο στόχο σχεδίασης
4. **Response Type**, επιλογή του στόχου σχεδίασης μεταξύ των
 - a. *Total Model Weight (WEIGHT)*
 - b. *Compliance (CMPLNCE)*
5. **Method**, επιλογή τρόπου βελτιστοποίησης του στόχου μεταξύ των
 - a. *MIN*
 - b. *MAX*

3.3.3. Επιλογή Optimization / frozen area

Η περιοχή σχεδίασης υποδεικνύει ποια στοιχεία του μοντέλου θα υποκύψουν στη βελτιστοποίηση και ποια (εάν υπάρχουν) θα παραλειφθούν από τη διαδικασία αυτή. Τα στοιχεία που παραλείπονται από τη διαδικασία βελτιστοποίησης ονομάζονται *frozen elements*. Στην παρακάτω εικόνα είναι επισημασμένα μόνο τα στοιχεία τα οποία περιλαμβάνονται στην περιοχή σχεδίασης (design area).



Εικόνα 11. Παράδειγμα στοιχείων που περιλαμβάνονται στην περιοχή σχεδίασης ^[36]

Αντίστοιχα με το στόχο σχεδίασης, έτσι κάθε περιοχή σχεδίασης αποτελεί ένα modeling object. Μπορούν να δημιουργηθούν πολλές περιοχές σχεδίασης (άρα και Modeling objects) και σε αντίθεση με τον στόχο σχεδίασης, τώρα μια λύση μπορεί να περιέχει περισσότερες από μια τέτοιες περιοχές. Για παράδειγμα έστω μια περιοχή σχεδίασης περιλαμβάνει ολόκληρο το μοντέλο ενώ μια δεύτερη περιλαμβάνει ορισμένα στοιχεία του μοντέλου τα οποία δεν θα βελτιστοποιηθούν (frozen elements). Εάν και οι δυο αυτές περιοχές σχεδίασης εισαχθούν στην λύση της τοπολογικής βελτιστοποίησης, τότε το λογισμικό θα βελτιστοποιήσει μόνο εκείνα τα στοιχεία που δεν είναι παγωμένα (frozen). Αν στη συνέχεια αφαιρεθεί από τη λύση η περιοχή με τα παγωμένα

στοιχεία και γίνει επίλυση της προσομοίωσης, τότε βελτιστοποιείται ολόκληρο το μοντέλο.


Καθένα Modeling object της περιοχής σχεδίασης μπορεί να περιλαμβάνει μόνο περιοχές βελτιστοποίησης, μόνο παγωμένα στοιχεία ή και συνδυασμό αυτών των δυο. Εάν η περιοχή σχεδίασης περιλαμβάνει μόνο παγωμένες περιοχές, τότε τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου θα υποκύψουν στην βελτιστοποίηση. Αντίθετα, αν η περιοχή σχεδίασης περιλαμβάνει μόνο περιοχές βελτιστοποίησης, τότε τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου θεωρούνται παγωμένα. Αν ένα στοιχείο αναγνωριστεί τόσο ως παγωμένο όσο και διαθέσιμο για βελτιστοποίηση, τότε υπερισχύει το frozen θεωρώντας το παγωμένο και αποκλείεται από την βελτιστοποίηση.

Ένα μοντέλο μπορεί να περιγράφεται από πολλούς τύπους στοιχείων με κύρια διαφορά όσοι οφείλονται σε στερεά στοιχεία ή επιφάνειες. Ο επόμενος πίνακας που παρατίθενται, παρουσιάζει τα στοιχεία τα οποία δέχονται βελτιστοποίηση. Ωστόσο δεν είναι όλοι οι τύποι στοιχείων διαθέσιμοι για βελτιστοποίηση και σε περίπτωση που υπάρχει τέτοιο είδος στοιχείου στο μοντέλο, δεν βελτιστοποιείται.

2D Στοιχεία επιφανειών	3D Στερεά στοιχεία
CTRIA3,	CHEXA
CTRIA6	CPENTA
CTRIAR	CPYRAM
CQUAD4	CTETRA
CQUAD8	
CQUADR	

Πίνακας 2. Διαθέσιμοι τύποι στοιχείων για βελτιστοποίηση

Διαδικασία δημιουργίας στόχου σχεδίασης

1. Στον Simulation Navigator κάτω από την ενεργή λύση (TO), επιλέγουμε:
Design Area  → **New Design Area**
2. **Name**, επιλογή ενός μοναδικού ονόματος
3. **Modeling Object group** → **Label**, πληκτρολόγηση ενός ακέραιου αριθμού ο οποίος θα χαρακτηρίζει αυτό το object
4. **Description**, (προαιρετικά) προσθήκη σημείωσης για τη συγκεκριμένη περιοχή σχεδίασης
5. **Area Type**, επιλογή του τύπου της περιοχής σχεδίασης, μεταξύ των:
 - a. *Optimization Area*
 - b. *Frozen Area*
6. **Properties** → **Label**, πληκτρολόγηση ενός χαρακτηριστικού της περιοχής σχεδίασης ώστε να γραφεί στο αρχείο dat όταν γίνει η επίλυση

7. **Element Selection Method**, επιλογή του τρόπου χρήσης των επιλεγμένων στοιχείων, μεταξύ των:

- a. *Entire model*
- b. *Specified elements*


3.3.4. Εφαρμογή φορτίσεων

Ο καθορισμός των φορτίσεων δεν αποτελεί στάδιο της τοπολογικής βελτιστοποίησης, αλλά αφορά τη στατική ανάλυση που προηγείται. Η εφαρμογή των φορτίσεων γίνεται στο στάδιο της επεξεργασίας του αρχείου προσομοίωσης. Στο λογισμικό NASTRAN, οι στατικές φορτίσεις εφαρμόζονται στα πεπερασμένα στοιχεία του πλέγματος. Παρακάτω καταγράφονται οι τύποι φορτίσεων που διατίθενται στο λογισμικό NX 12.

1. Φορτίσεις που εφαρμόζονται κατευθείαν σε σημεία του πλέγματος
2. Πίεση σε επιφάνειες
3. Φορτίσεις βαρύτητας (παράγονται εσωτερικά)
4. Φυγόκεντρες δυνάμεις λόγω σταθερής περιστροφής
5. Ισοδύναμα φορτία που προκύπτουν από:
 - α) θερμική διαστολή
 - β) αναγκαστικές παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων
 - γ) μετατοπίσεις σημείων του πλέγματος



Φορτίσεις


	Temperature		Torque		Gravity
	Acceleration		Pressure		Rotation
	Force		Nodal Pressure		Axial 1D Element Deformation
	Moment		Hydrostatic Pressure		Enforced Motion Load
	Bearing		Centrifugal Pressure		Darea Nodal Force & Moment















3.3.5. Καθορισμός περιορισμών

Σχετικά με τους περιορισμούς, υπάρχουν οι περιορισμοί που αφορούν την σχεδίαση ενός μοντέλου, αλλά και εκείνοι που ασχολούνται με την δυνατότητα κατασκευής του αντικειμένου.

3.3.5.1. Περιορισμοί σχεδίασης

Οι περιορισμοί σχεδιασμού διασφαλίζουν ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης θα ικανοποιούν οποιεσδήποτε σημαντικές απαιτήσεις. Αντίστοιχα με το στόχο και την περιοχή σχεδίασης, έτσι και κάθε ένας περιορισμός είναι ένα αντικείμενο μοντελοποίησης. Μπορούν να δημιουργηθούν πολλοί περιορισμοί σχεδίασης και να χρησιμοποιηθεί ένας ή περισσότεροι σε κάθε λύση της τοπολογικής βελτιστοποίησης ή σε κάποιο επιμέρους βήμα της. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένας περιορισμός σχεδιασμού για τη λύση, που να καθορίζει το μέγιστο βάρος του μοντέλου και ένας άλλος περιορισμός για κάποιο βήμα της στατικής λύσης, ο οποίος να καθορίζει τη μέγιστη μετατόπιση για έναν επιλεγμένο κόμβο. Συνεπώς σε επίπεδο λύσης της τοπολογικής βελτιστοποίησης, οι τύποι περιορισμών που είναι διαθέσιμοι αφορούν το βάρος ή τον όγκο του μοντέλου. Επιπρόσθετα, σε επίπεδο βήματος της στατικής ανάλυσης, μπορεί να οριστεί οποιεσδήποτε άλλος περιορισμός εκτός αυτών που περιγράφουν το βάρος και τον όγκο του μοντέλου. Οι διαθέσιμοι περιορισμοί για τη στατική ανάλυση παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.



Περιορισμοί

	User Defined		Simply Supported		Symmetric
	Enforced Displacement		Pinned		Anti-Symmetric
	Fixed		Cylindrical		Automatic Coupling
	Fixed Translation		Slider		Manual Coupling
	Fixed Rotation		Roller		



Πίνακας 3. Διαθέσιμοι περιορισμοί στατικής ανάλυσης

Διαδικασία δημιουργίας στόχου σχεδίασης

1. Στον Simulation Navigator κάτω από την ενεργή λύση (ΤΟ) ή από το βήμα (step) αυτής, επιλέγουμε:

Design Constraint  **→ New Design Constraint**

2. **Name**, πληκτρολόγηση ενός μοναδικού ονόματος
3. **Description**, (προαιρετικά) προσθήκη σημείωσης για το συγκεκριμένο περιορισμό σχεδίασης
4. **Response Type**, επιλογή του περιορισμού σχεδίασης μεταξύ των
 - a. *Weight (WEIGHT)*

- b. *Design Area Weight (DWEIGHT)*
 - c. *Normal Modes (FREQ)*
 - d. *Displacement (DISP)*: ενεργή επιλογή μόνο όταν ο περιορισμός αφορά βήμα της λύσης
5. Εάν επιλεγεί η μετατόπιση **Displacement (DISP)**, ακολουθούν τα επόμενα βήματα:
- a. Για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης της μετατόπισης, επιλέγουμε,  *Specify Displacement Vector*, και στη συνέχεια επιλέγουμε τον κατάλληλο άξονα από το παράθυρο των γραφικών
 - b. Επιλέγουμε την εντολή *Select Node*  και από το παράθυρο των γραφικών, επιλέγουμε τους κόμβους τους οποίους αφορά ο περιορισμός
6. Εάν επιλεγεί το **Normal Modes (FREQ)**, τότε στην επιλογή *Mode Number*, πληκτρολογούμε τον αριθμό της λειτουργίας (mode) που θέλουμε να περιορίσουμε
7. Τέλος, θέτουμε κάτω και άνω όριο για τον επιλεγμένο περιορισμό μέσω των επιλογών, **Lower Limit** και **Upper Limit**, αντίστοιχα. Δεν είναι πάντα απαραίτητο να προσδιορίσουμε και τις δυο τιμές των ορίων, για παράδειγμα μπορεί να οριστεί μόνο το άνω όριο, δίχως να τεθεί κάποιο ελάχιστο.

3.3.5.2. Κατασκευαστικοί περιορισμοί

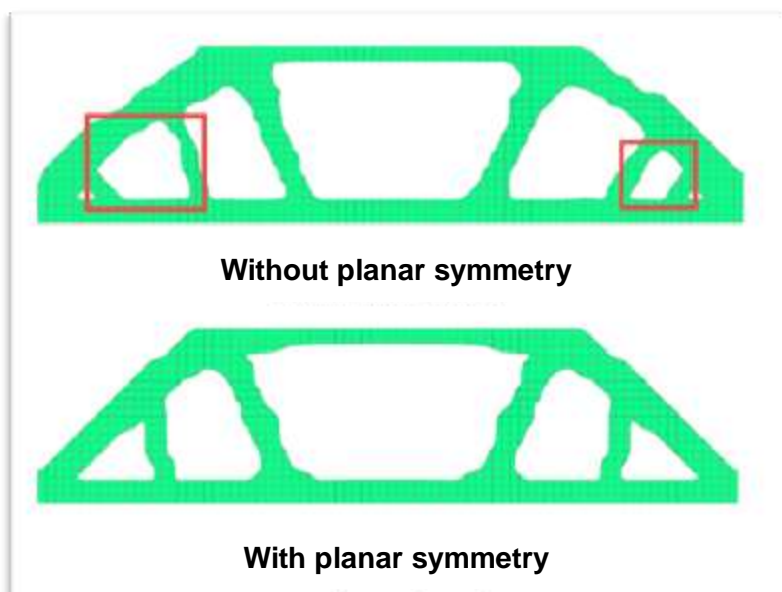
Η δεύτερη κατηγορία περιορισμών είναι οι κατασκευαστικοί περιορισμοί και η εφαρμογή τους είναι προαιρετική. Σκοπός τους είναι η εξασφάλιση ότι το αποτέλεσμα που θα προκύψει από την τοπολογική βελτιστοποίηση θα ικανοποιεί τα κριτήρια παραγωγής που είναι διαθέσιμα.

Κάθε ένας κατασκευαστικός περιορισμός αποτελεί ένα αντικείμενο μοντελοποίησης (design object). Μπορούν να δημιουργηθούν πολλά τέτοια αντικείμενα μοντελοποίησης και να χρησιμοποιηθεί ένα ή περισσότερα σε κάθε λύση της τοπολογικής. Για παράδειγμα μπορεί να οριστεί ένα επίπεδο συμμετρίας και περιορισμός που αφορά την κατεύθυνση της μήτρας χύτευσης, για τη διασφάλιση του ότι το αντικείμενο είναι συμμετρικό αλλά και ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί η χύτευση στο καλούπι. Οι κατασκευαστικοί περιορισμοί εφαρμόζονται μόνο σε στοιχεία τα οποία μπορούν να βελτιστοποιηθούν και όχι σε περιοχές που δεν μεταβάλλονται (frozen areas).

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για κάθε κατασκευαστικό περιορισμό που είναι διαθέσιμος στο λογισμικό NX 12 ^[37].

- **Planar Symmetry (SYMP)**

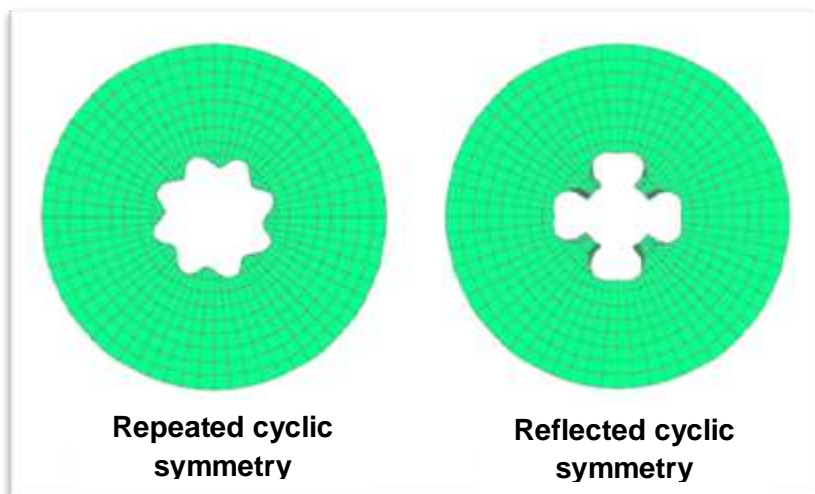
Όταν πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε αλλαγή βελτιστοποίησης στη μια πλευρά του επιπέδου, τότε γίνεται και η αντίστοιχη αλλαγή στην άλλη πλευρά, εφόσον τα στοιχεία εκείνα δεν είναι παγωμένα (frozen). Σχετικά με τη διακριτοποίηση, το πλέγμα δεν χρειάζεται να είναι πανομοιότυπο στις πλευρές εκατέρωθεν του επιπέδου. Σε περίπτωση όμως που υπάρχουν διαφορές, το διάνυσμα κατεύθυνσης προς το επίπεδο ίσως επηρεάσει τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Μια λύση μπορεί να περιλαμβάνει μέχρι δυο περιορισμούς συμμετρίας, αρκεί τα επίπεδα αυτών να είναι μεταξύ τους κάθετα. Στα παρακάτω σχήματα, το επίπεδο διαιρεί το μοντέλο σε αριστερό και δεξί τμήμα.



- **Cyclic Symmetry (SYMC)**

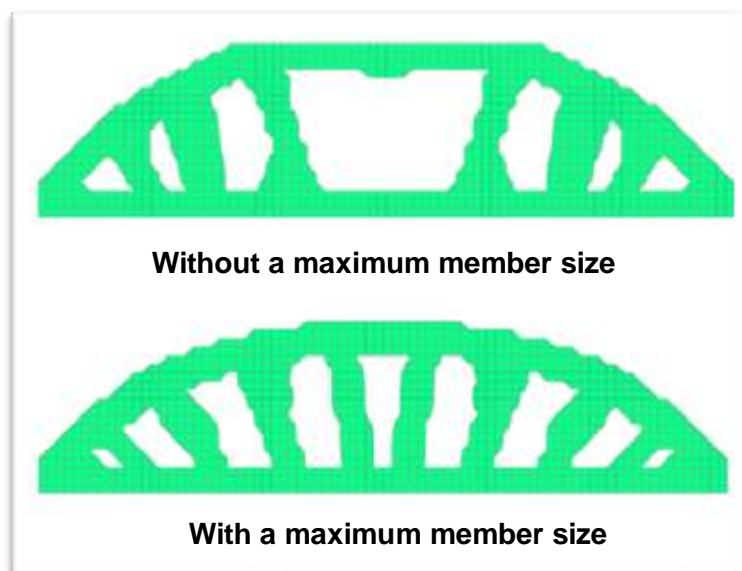
Όταν πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε αλλαγή βελτιστοποίησης σε ένα τομέα ενός κυκλικού μοντέλου, τότε λαμβάνουν χώρα ισοδύναμες αλλαγές σε άλλους τομείς με περιστροφικό τρόπο, σε στοιχεία που δεν είναι παγωμένα. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση περιορισμού, το πλέγμα δεν είναι απαραίτητο να είναι ταυτόσημο σε άλλους τομείς, αλλά τυχόν διαφορές μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.

Η κυκλική συμμετρία μπορεί να επαναληφθεί ή να αντικατοπτριστεί. Με συμμετρία που επαναλαμβάνεται, κάθε τομέας είναι παρόμοιος με κάθε άλλο τομέα. Με συμμετρία που κατοπτρίζεται, κάθε τομέας είναι κατοπτρική εικόνα του προηγούμενου τομέα. Η κυκλική συμμετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν ο αριθμός των τομέων είναι άρτιος. Τα παρακάτω αποτελέσματα χρησιμοποιούν το ίδιο μοντέλο, έναν κύκλο με κυκλική οπή, όπου το καθένα έχει οκτώ τομείς.



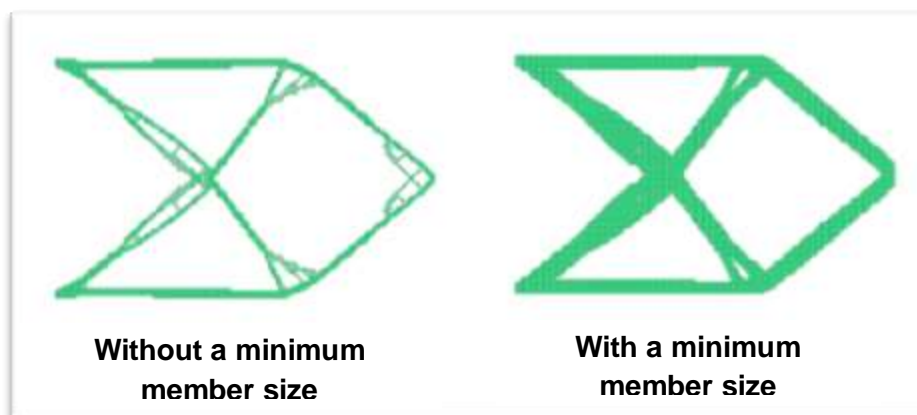
- **Maximum Member Size (MAXS)**

Κάθε δοκοί που δημιουργούνται μέσω διαδικασιών βελτιστοποίησης, δεν μπορεί να είναι παχύτεροι από το προκαθορισμένο μέγεθος, παρόλο που μπορεί να υπάρχουν και εξαιρέσεις. Αυτό ίσως σημαίνει ότι ο συνιστώμενος σχεδιασμός έχει περισσότερες ράβδους από ότι θα είχε χωρίς τον περιορισμό αυτό. Επιπλέον, οι περισσότερες από τις βελτιστοποιημένες ράβδους έχουν καθορισμένο πάχος, επομένως συνήθως δεν είναι απαραίτητο να γίνει ορισμός ούτε του μέγιστου ούτε του ελάχιστου αριθμού μελών.



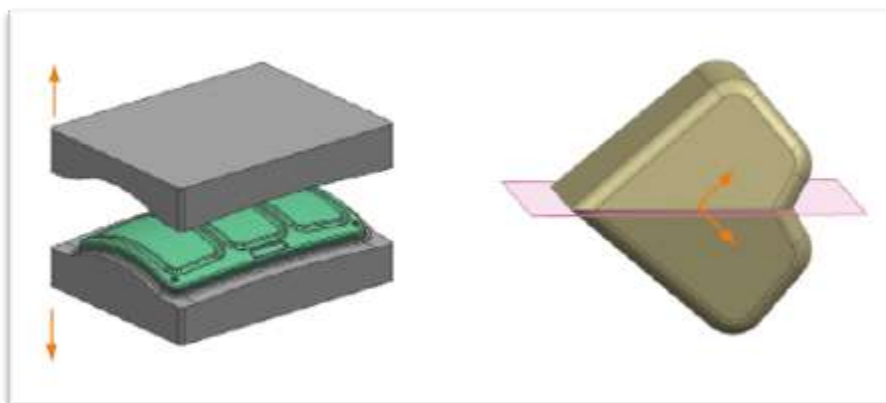
- **Minimum Member Size (MINS)**

Με αυτό τον κατασκευαστικό περιορισμό, κάθε δοκοί που δημιουργούνται μέσω διαδικασιών βελτιστοποίησης, δεν μπορεί να είναι πιο λεπτοί από το προκαθορισμένο μέγεθος, παρόλο που μπορεί να υπάρχουν και εξαιρέσεις.



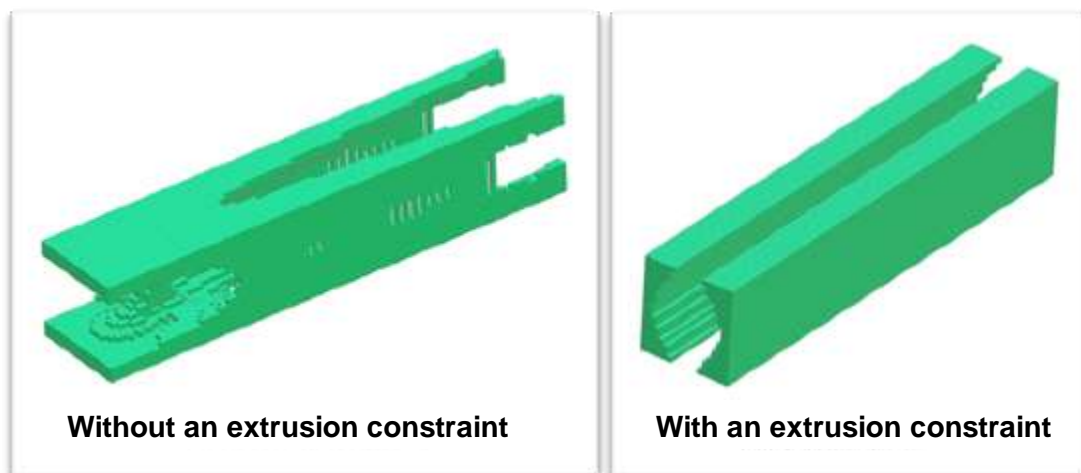
- **Casting Die Direction (CDID)**

Η διαδικασία βελτιστοποίησης δεν δημιουργεί εσωτερικές κοιλότητες ή υποσκάψεις που θα καθιστούσαν αδύνατη την αφαίρεση του τμήματος από το καλούπι. Η χρήση του περιορισμού αυτού αφορά καλούπια αποτελούνται από δυο μέρη καθώς μπορεί να καθοριστεί η κατεύθυνση με την οποία κάθε μισό τμήμα του πρόκειται να διαχωριστεί από το αντικείμενο.



- **Extrusion (EXTC)**

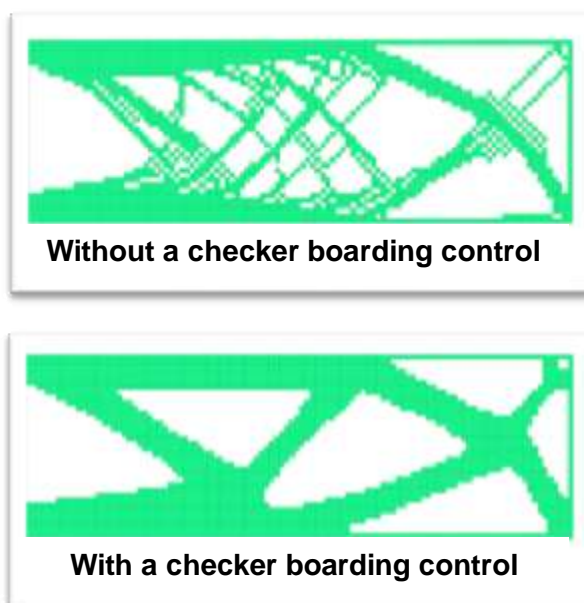
Με τη χρήση του συγκεκριμένου περιορισμού, διασφαλίζεται η συνέχεια του υλικού στην κατεύθυνση της εξώθησης για την παραγωγή του βελτιστοποιημένου αντικειμένου. Υποστηρίζονται εξωθήσεις που λαμβάνουν χώρα με ευθύγραμμη είσοδο του υλικού στο καλούπι.



- **Checker Boarding Control (CHBC)**

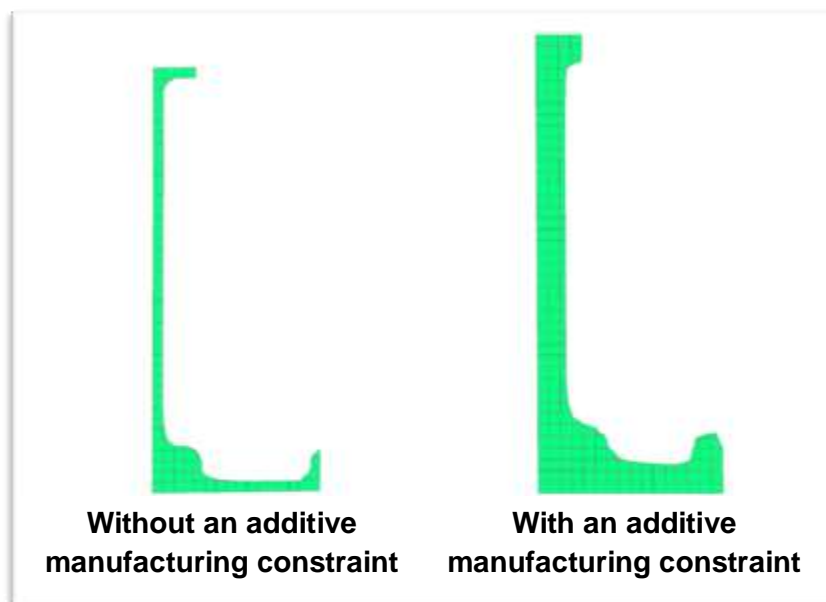
Η διαδικασία βελτιστοποίησης υπολογίζει το μέσο όρο των τιμών των πυκνοτήτων του υλικού που υπάρχουν συνολικά εντός μιας συγκεκριμένης ακτίνας και μετά εφαρμόζει την μέση τιμή αυτή στα στοιχεία που ανήκουν στην ακτίνα. Εάν δεν καθοριστεί η ακτίνα, ο μέσος όρος προκύπτει από όλα τα παρακείμενα στοιχεία. Η διαδικασία αυτή αποτρέπει την αφαίρεση στοιχείων σε ένα εναλλασσόμενο μοτίβο, παρόμοιο με μια σκακιέρα.

Από προεπιλογή, το NX Nastran υπολογίζει αυτόματα τις τιμές πυκνότητας υλικού των παρακείμενων στοιχείων, παρόμοια με τη δημιουργία ενός κατασκευαστικού περιορισμού ελέγχου του μοτίβου (checker boarding control) χωρίς να καθορίζει ακτίνα. Για να επιτραπεί ο έλεγχος του μοτίβου (δηλαδή, για να απενεργοποιηθεί ο έλεγχος στο NX Nastran), πρέπει να δημιουργηθεί ένας τέτοιος κατασκευαστικός περιορισμός και η τιμή της ακτίνας να είναι αρνητική.



- **Additive Manufacturing Overhang Angle (ADDM)**


Αυτός ο περιορισμός διασφαλίζει ότι υπάρχει επαρκής δομική ακεραιότητα καθώς κατασκευάζεται το μοντέλο στρώμα-στρώμα (layer-by-layer) χρησιμοποιώντας την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μπορεί λοιπόν να καθοριστεί η μέγιστη γωνία για κάθε ράβδο, προεξοχή ή κλίση σε σχέση με το κανονικό διάνυσμα της βάσης του εκτυπωτή καθώς και το ελάχιστο πάχος για οποιοδήποτε τμήματα του σώματος.



3.3.6. Επίλυση

Όταν ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός όλων των απαραίτητων παραμέτρων για την τοπολογική βελτιστοποίηση του μοντέλου, το λογισμικό είναι έτοιμο για την επίλυση. Στην φάση της επίλυσης, το λογισμικό τροποποιεί την πυκνότητα του υλικού και το μέτρο ελαστικότητας (young's modulus) των στοιχείων στο αρχείο fem, ώστε να επιτύχει το στόχο σχεδίασης που έχει οριστεί ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς. Για τη διασφάλιση ότι η επίλυση θα είναι επιτυχής και ότι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα είναι ακριβή, πριν την έναρξη της επίλυσης μπορεί να γίνει ένας έλεγχος στην ποιότητα των στοιχείων. Συνεπώς η διαδικασία επίλυσης ενός μοντέλου ακολουθεί την παρακάτω σειρά:

Διαδικασία επίλυσης

1. **Model Setup** (προαιρετικά), έλεγχος των στοιχείων
2. Στον Simulation Navigator επιλέγουμε: **Solution (λύση)**  → **Solve**
3. Στο παράθυρο **Solve, Submit** επιλέγουμε μια διεργασία μεταξύ των:
 - a. *Solve*
 - b. *Write Solver Input File*

c. *Solve Input File*

d. *Write, Edit & Solve Input File*

4. **Edit Solution Attributes**, επεξεργασία των ιδιοτήτων της επίλυσης
5. **Edit Solver Parameters**, επεξεργασία των παραμέτρων του επιλύτη
6. Επεξεργασία των *output, export, and formatting option* για το NX Nastran (και για οποιοδήποτε άλλο επιλύτη), μέσω της εντολής **Edit Advanced Solver Options**

Με την έναρξη της επίλυσης, εμφανίζεται το παράθυρο **Analysis Job Monitor**. Όταν ολοκληρωθεί η ανάλυση, εμφανίζεται η διεργασία **Results** στον πλοηγό της προσομοίωσης (**Simulation Navigator**).

3.3.7. Επεξεργασία αποτελεσμάτων

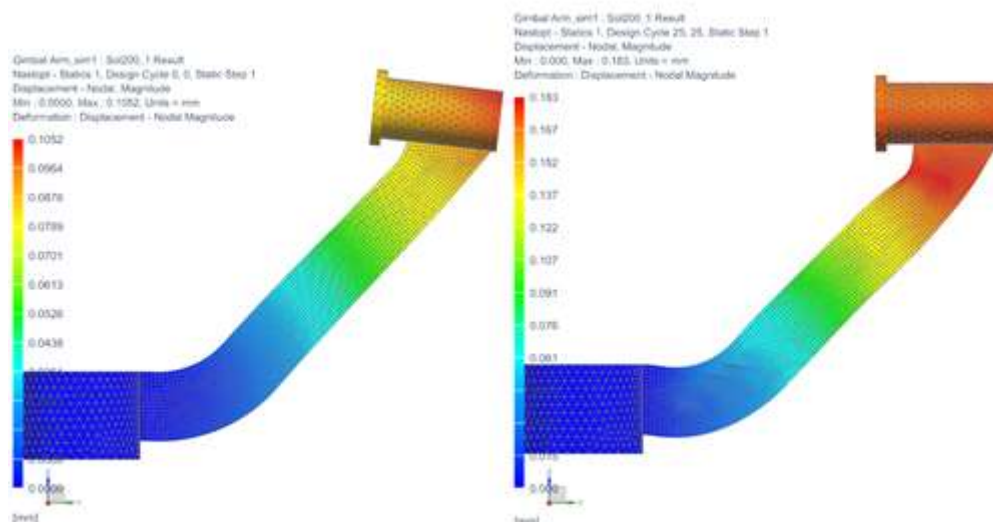
Για την εμφάνιση και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, γίνεται χρήση του πλοηγού της μετά-επεξεργασίας (**Post-Processing Navigator**) ο οποίος βρίσκεται μετά τον πλοηγό της προσομοίωσης (**Simulation Navigator**). Ένα από τα χρήσιμα εργαλεία του NX στο σημείο αυτό, είναι η δυνατότητα εξαγωγής του αποτελέσματος σε ένα αρχείο το οποίο στη συνέχεια μπορεί να λειτουργήσει ως οδηγός για τη δημιουργία ενός νέου μοντέλου.

Ενώ η διαδικασία επίλυσης της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι σε εξέλιξη, το NX Nastran εκτελεί πολλαπλούς κύκλους σχεδίασης για τον καθορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού που θα επιτυγχάνει το στόχο και θα ικανοποιεί τους περιορισμούς. Η προεπιλογή του επιλύτη αφορά 20 κύκλους σχεδίασης, ωστόσο ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τον αριθμό αυτό όπως επιθυμεί. Ορισμένα μοντέλα ενδέχεται να χρειάζονται μέχρι και 50 κύκλους, αριθμός ο οποίος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τον αριθμό και τη μη γραμμικότητα των περιορισμών. Η αύξηση του αριθμού των κύκλων σχεδιασμού παράγει μια πιο τελειοποιημένη πρόταση σχεδιασμού, αλλά αυξάνει επίσης το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της επεξεργασίας.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3.1, κατά την δημιουργία ή την επεξεργασία της λύσης, είναι δυνατό να καθοριστεί ποιοι κύκλοι σχεδιασμού θα συμπεριληφθούν στα αποτελέσματα (όπως, μόνο ο πρώτος και ο τελευταίος κύκλος (*Initial and Best*), πχ κάθε πέμπτος κύκλος (*Initial with Skipped Cycles*) ή κάθε κύκλος που δείχνει βελτίωση σε σχέση με τον προηγούμενο (*Initial and All Improved*)).

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν πάντα τον πρώτο κύκλο σχεδιασμού (κύκλος σχεδιασμού 0), στον οποίο δεν έχει ακόμη εφαρμοστεί η βελτιστοποίηση. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εξετάσει τα αποτελέσματα όπως τη μετατόπιση και τις φορτίσεις πριν γίνει οποιαδήποτε αλλαγή βελτιστοποίησης, αλλά και να μπορέσει να συγκρίνει τα



αποτελέσματα για κάθε δεδομένο κύκλο σχεδιασμού (με το αρχικό στάδιο), αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης.

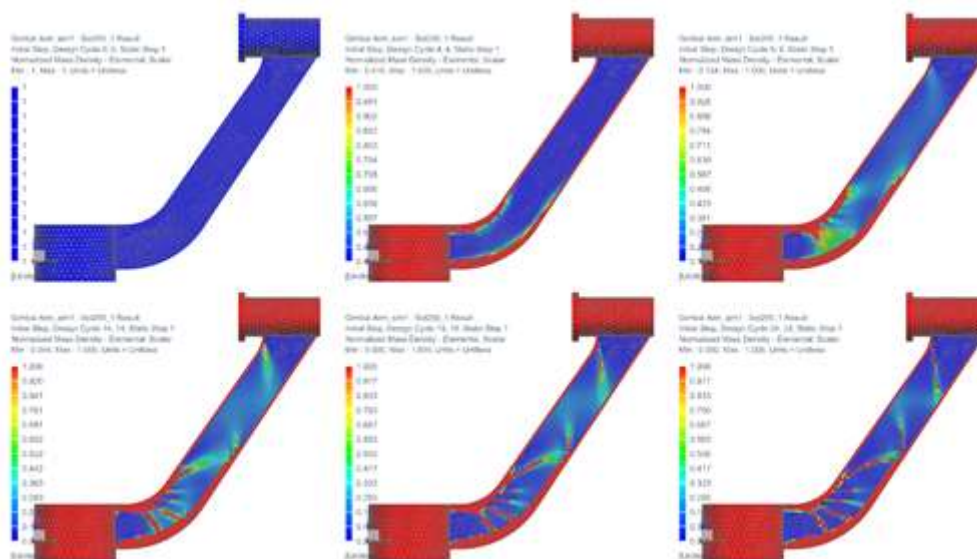


Εικόνα 12. Σύγκριση του μεγέθους της μετατόπισης (magnitudo of nodal displacement) για τους κύκλους 0 και 25 ^[38]

3.3.7.1. Κατασκευή διαγράμματος για την πυκνότητα του υλικού

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης, το NX Nastran μειώνει το μέτρο ελαστικότητας και την πυκνότητα καθενός από τα στοιχεία στην περιοχή σχεδιασμού, δίνοντας σε κάθε στοιχείο μια κανονικοποιημένη τιμή πυκνότητας υλικού που κυμαίνεται από 0,0 έως 1,0. Στοιχεία του μοντέλου τα οποία ανήκουν σε παγωμένη περιοχή σχεδίασης (frozen area), έχουν την τιμή 1,0 πράγμα που σημαίνει ότι στα στοιχεία αυτά υπάρχει παρουσία υλικού. Στοιχεία τα οποία μπορούν να αφαιρεθούν από το μοντέλο ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της σχεδίασης και να ικανοποιούνται οι περιορισμοί, έχουν την τιμή 0,0. Τα άλλα στοιχεία που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία του μοντέλου, μπορούν να πάρουν τιμές από όλο το φάσμα (0,0 μέχρι 1,0). Τα αποτελέσματα σχετικά με την πυκνότητα του υλικού για κάθε κύκλο σχεδιασμού που έχει συμπεριληφθεί στην λύση, είναι πολύ εύκολο να παρουσιαστούν γραφικά ακολουθώντας τις παρακάτω οδηγίες.

1. Επιλέγουμε την καρτέλα του **Post Processing Navigator**, και στη συνέχεια,
Solution→ **Structural**  **→Load**
2. **Solution**→ **Structural**→ **Loadcase Independent Results**→ **Design Cycle x**, όπου x είναι ο αριθμός του κύκλου σχεδίασης του οποίου τα αποτελέσματα επιθυμούμε να ελέγξουμε
3. **Normalized Mass Density - Elemental**  **→Plot**

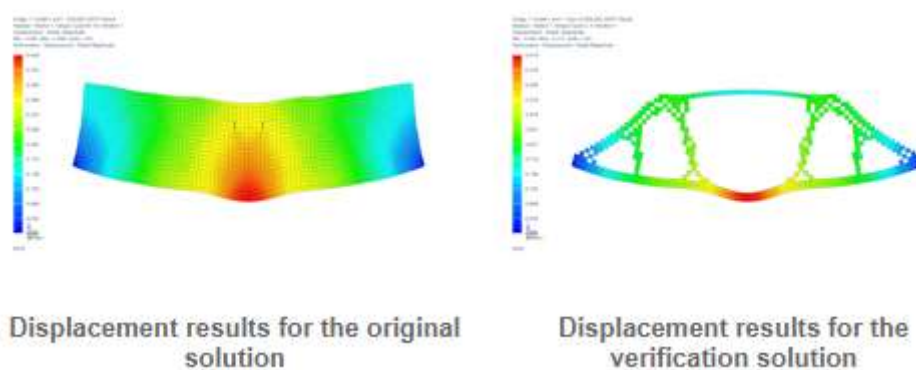


Εικόνα 13. Γραφήματα των αποτελεσμάτων της πυκνότητας υλικού για 6 κύκλους σχεδίασης, συμπεριλαμβανομένου και του κύκλου 0 (πρώτο γράφημα επάνω αριστερά) ^[39]

3.3.7.2. Δημιουργία λύσης επαλήθευσης








Όταν ολοκληρωθεί η τοπολογική βελτιστοποίηση και αφού παρουσιαστούν γραφικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν, θα πρέπει να γίνει έλεγχος της βέλτιστης λύσης. Πιο συγκεκριμένα, είναι απαραίτητο ο χρήστης του λογισμικού να ελέγξει αν η βέλτιστη σχεδίαση που προέκυψε ικανοποιεί τους περιορισμούς που έχουν τεθεί και γενικά να ελέγξει τη συμπεριφορά του αντικειμένου κάτω από τις συνθήκες ορισμού. Τα αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό είναι εκείνα που έχουν προκύψει από την βελτιστοποίηση και δεν έχουν υποστεί κάποια εξομάλυνση (not smoothed). Βάση αυτών δημιουργείται μια λύση επαλήθευσης. Στην ουσία η λύση επαλήθευσης είναι αντίγραφο της αρχικής λύσης που όμως περιλαμβάνει μόνο τα στοιχεία που διατηρήθηκαν κατά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης.

Το όνομα της λύσης επαλήθευσης έχει τη μορφή Copy of [solution_name]. Μόλις αυτή δημιουργηθεί, πρέπει να επεξεργαστεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (DESMAX) και να τεθεί ίσος με 0. Αυτό διασφαλίζει ότι όταν γίνει επίλυση της λύσης επαλήθευσης, τα αποτελέσματα θα περιλαμβάνουν μόνο έναν κύκλο σχεδιασμού χωρίς περαιτέρω βελτιστοποίηση. Επιπλέον, πρέπει να καταργηθεί η επιλογή που αφορά στον έλεγχο του μοντέλου (Model Setup Check) η οποία εμφανίζεται στο παράθυρο Solve, διαφορετικά θα προκύψουν σφάλματα. Μετά την επίλυση της λύσης επαλήθευσης, μπορούν να εξεταστούν τα αποτελέσματα όπως η μετατόπιση, στο βελτιστοποιημένο μοντέλο.



Εικόνα 14. Μετατόπιση αρχικής επίλυσης και επίλυσης επαλήθευσης^[40]

Διαδικασία δημιουργίας της λύσης επίλυσης

1. Επιλέγουμε την καρτέλα του **Post Processing Navigator**, και στη συνέχεια,
Solution → **Structural**  → **Load**
2. **Solution** → **Structural**  →  **Material Density Results**
3. Στην **Solid Area**, μετακινούμε το κάτω όριο (Lower Bound) με τη βοήθεια της μπάρας, στο χαμηλότερο όριο για να βεβαιωθούμε ότι δεν υπάρχουν ελεύθερα στοιχεία στο μοντέλο που δεν συνδέονται με τα υπόλοιπα
4. Όταν η λύση περιλαμβάνει πλεγματικές δομές (lattice), όπως στην παρούσα εργασία, στην καρτέλα **Lattice Area**, μετακινούμε το κάτω όριο αριστερά ή δεξιά για να αλλάξουμε την ελάχιστη τιμή της πυκνότητας υλικού για τις πλεγματικές δομές. Περισσότερες πληροφορίες για τις πλεγματικές δομές θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα.
5. Αποεπιλογή του **Smooth (Nodal Average)**
6. **Verification Solution** →  **Create**
7. Κλείσιμο του παραθύρου πληροφοριών (Information) και του Material Density Display/Export
8. **Simulation Navigator** →  **Copy of [solution_name]** → **Make Active**
9. **Copy of [solution_name]** →  **Edit**
10. Στην καρτέλα **Bulk Data** → **Maximum Number of Design Cycles (DESMAX)**, πληκτρολογούμε την τιμή 0
11. **Copy of [solution_name]** →  **Solve**
12. Αποεπιλογή του **Model Setup Check** και επίλυση.










3.4. Πλεγματικές δομές (Lattice structures)

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά νέα υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες, των οποίων η δομή αποτελείται από ένα σύνολο στερεών δοκών [41]. Αυτά έχουν σχεδιαστεί για να ικανοποιούν πληθώρα αναγκών, όπως τη μείωση του βάρους, τη μεταφορά θερμότητας και τη θερμομόνωση [42,43,44,45,46]. Υλικά με ιδιαίτερη πλεγματική δομή, μπορούν να παραχθούν εύκολα με τις μεθόδους της προσθετικής παραγωγής (Additive manufacturing-AM). Γενικά, η προσθετική παραγωγή αφορά διαδικασίες που χαρακτηρίζονται από τοποθέτηση του υλικού σε στρώσεις (layer-by-layer) και άμεση κατασκευή του αντικειμένου κατευθείαν από το τρισδιάστατο μοντέλο του [47,48]. Δομές οι οποίες σχεδιάζονται με σκοπό την παραγωγή μέσω AM, αναφέρονται ως Lattice structures, δηλαδή πλεγματικές ή αλλιώς κυψελωτές δομές.

Η προσθετική παραγωγή καθιστά δυνατή την παραγωγή σύνθετων γεωμετριών οι οποίες παλαιότερα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν. Συνεπώς, παράλληλα με την εξέλιξη των τεχνολογιών προσθετικής παραγωγής, αναπτύσσονται επίσης και διάφορες στρατηγικές σχεδιασμού, με σκοπό την οικονομική κατασκευή αντικειμένων υψηλής ποιότητας. Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να υλοποιηθούν αντικείμενα με συγκεκριμένη δυσκαμψία και αντοχή, ενώ παράλληλα γίνεται οικονομική διαχείριση των υλικών. Όλα αυτά είναι εφικτά με το συνδυασμό των τεχνικών προσθετικής παραγωγής και της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Σήμερα τα περισσότερα πακέτα λογισμικών που αφορούν την σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Design-CAD), έχουν εντάξει στις δυνατότητές τους εκτός από τις μεθόδους βελτιστοποίησης και τις πλεγματικές δομές. Το λογισμικό NX 12 το οποίο χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, όχι μόνο διαθέτει όλες αυτές τις λειτουργίες αλλά μπορεί να τις συνδυάσει βρίσκοντας την βέλτιστη λύση για το εκάστοτε πρόβλημα σχεδιασμού.

Μια πλεγματική δομή, είναι μια λεπτή διάταξη σχήματος που μοιάζει με ράβδο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην προσθετική παραγωγή (πχ τρισδιάστατη εκτύπωση) για τη δημιουργία ελαφριών τμημάτων, διατηρώντας τα δομικά χαρακτηριστικά του όπως την αντοχή και την ακεραιότητά του. Κατά τη δημιουργία ή την επεξεργασία μιας τοπολογικά βελτιστοποιημένης λύσης, μπορεί να επιλεγεί μια από τις διαθέσιμες πλεγματικές δομές οι οποίες υποστηρίζονται από το λογισμικό. Η κατάλληλη δομή εξαρτάται όχι μόνο από τις ανάγκες του σχεδιασμού αλλά επίσης και από τις απαιτήσεις της παραγωγής του αντικειμένου. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι πλεγματικές δομές του NX Nastran.

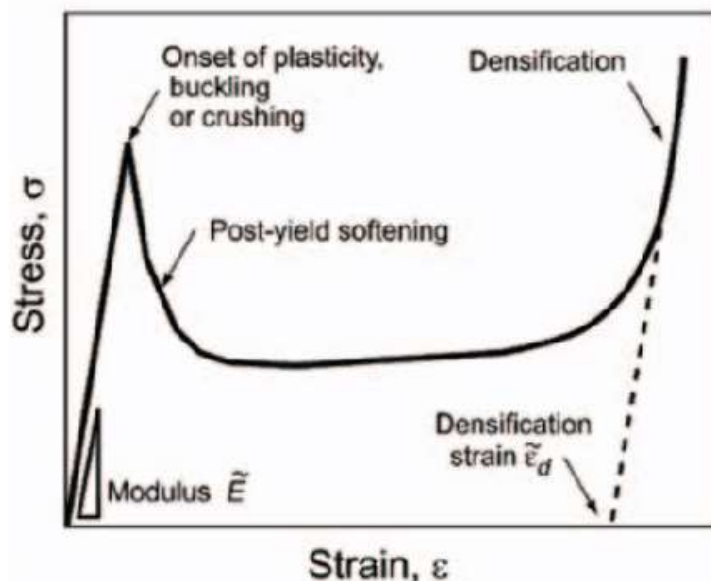
	Body Centered Cubic (BCC)		Cubic (Cubic)
	Face Centered Cubic (FCC)		BCC+CUBIC (BCCCUBIC)
	BCC+FCC (BCCFCC)		FCC+CUBIC (FCCCUBIC)
	Octahedral (OCTAHDRL)		BCC+FCC+CUBIC (BFCUBIC)
			FCC+OCTAHDRL (OCTET)

Πίνακας 4. Πλεγματικές δομές (lattice structures) στο NX 12

3.4.1. Συμπεριφορά πλεγματικών δομών

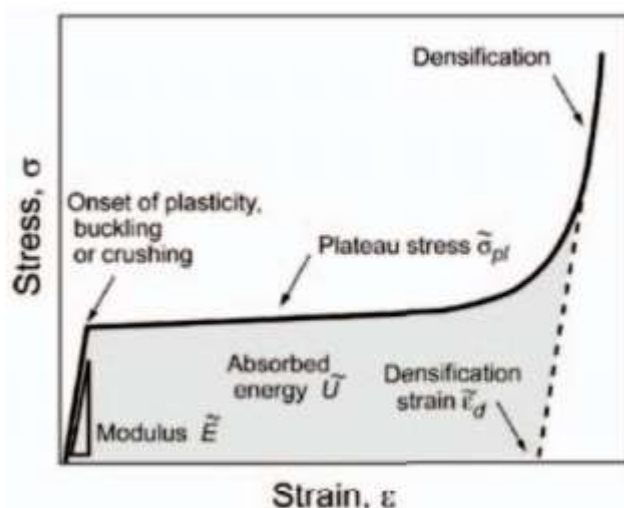
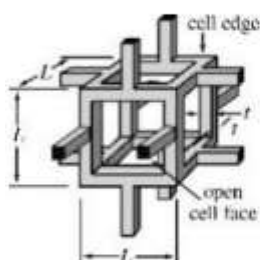
Η μηχανική συμπεριφορά μιας πλεγματικής δομής εξαρτάται από το υλικό κατασκευής και κυρίως από την κατανομή αλλά και το πορώδες του. Οι μηχανικές ιδιότητες μιας πλεγματικής δομής καθορίζονται από, το μέτρο ελαστικότητας, την τάση παραμόρφωσης, την ολκιμότητα, το όριο κόπωσης και άλλα χαρακτηριστικά του υλικού.

Στην Εικόνα 15, παρουσιάζεται η σχηματική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης της πλεγματικής δομής τύπου FCC+OCTAHDRL, η οποία υπόκειται σε φόρτιση εφελκυσμού ^[49]. Παρατηρούμε ότι έχει μεγάλη κλίση στην περιοχή ελαστικής παραμόρφωσης και επιτυγχάνει υψηλή τάση παραμόρφωσης πριν φτάσει στην πλαστική περιοχή. Το σχήμα που έχει η πλαστική περιοχή οφείλεται στην συνεχιζόμενη κατάρρευση των στηριγμάτων η οποία έχει προέλθει από την απότομη αύξηση της τάσης.



Εικόνα 15. Γράφημα τάσης – παραμόρφωσης σε μια πλεγματική δομή η οποία υπόκειται σε εφελκυσμό

Ας μελετήσουμε όμως και τη συμπεριφορά μιας τυπικής δομής πλέγματος που δέχεται την αντίστοιχη τάση, αλλά σε κάμψη (Εικόνα 16). Το γράφημα τάσης – παραμόρφωσης αναδεικνύει τις διαφορές σε σχέση με την προηγούμενη πλεγματική δομή. Τώρα, η γραμμική ελαστική περιοχή είναι πολύ μικρότερη με σχετικά μικρή τάση παραμόρφωσης. Συμπερασματικά, θα λέγαμε ότι όταν θέλουμε να επιτύχουμε το σχεδιασμό ενός αντικειμένου με ελαχιστοποιημένο βάρος και με υψηλή δυσκαμψία και αντοχή, επιλέγουμε τη χρήση πλεγματικών δομών, όπως αυτές παρουσιάστηκαν παραπάνω. Το παράδειγμα αυτό ήταν μια απλή εφαρμογή, η οποία είχε στόχο την ανάδειξη της συμπεριφοράς των πλεγματικών δομών.



Εικόνα 16. Γράφημα τάσης – παραμόρφωσης σε μια τυπική πλεγματική δομή η οποία υπόκειται σε κάμψη

4. Εφαρμογή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης τοπολογίας με σκοπό αφενός την κατανόηση των παραμέτρων και αφετέρου για την εύρεση της βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα που θα εξεταστεί. Η εφαρμογή αφορά τον τομέα της υποδηματοποιίας, καθώς το πρόβλημα που θα μελετηθεί σχετίζεται με ένα μοντέλο σόλας ενός παπουτσιού, στο οποίο θα εφαρμοστούν οι προαναφερθείσες τεχνικές. Το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για αυτή τη διαδικασία είναι το NX 12 της εταιρείας Siemens, με χρήση του επιλύτη Nastran.

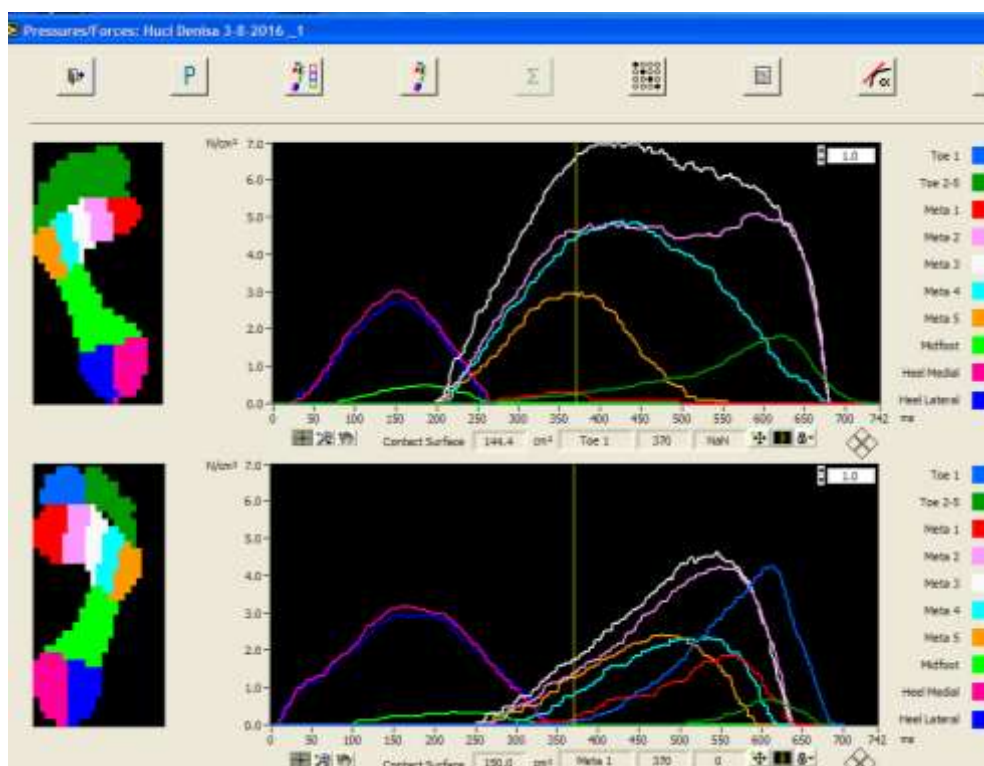
Ο κλάδος της υποδηματοποιίας και της έρευνας σχετικά με την ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων συνεχώς εξελίσσεται. Στην αγορά υπάρχει τεράστιο ενδιαφέρον για τα νέα προϊόντα, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις, συνδυάζουν την άνεση, την εμφάνιση, την ανθεκτικότητα με την τεχνολογική ανάπτυξη. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό στον τομέα της υποδηματοποιίας το οποίο φαίνεται να κατακτά την αγορά, είναι η εξατομίκευση των προϊόντων στις ανάγκες του καταναλωτή. Σήμερα οι εξελίξεις στον τομέα αυτό σημειώνονται με ραγδαίους ρυθμούς και υπάρχουν πολλές ομάδες ανά τον κόσμο όπου ασχολούνται αποκλειστικά με την ανάπτυξη νέων μεθόδων. Οι ομάδες αυτές συνεργάζονται άμεσα με τις μεγαλύτερες βιομηχανίες υποδημάτων ανά τον κόσμο, είτε αθλητικών είτε μόδας και στοχεύουν στην καινοτομία και εν γένει στην κατάκτηση του μεγαλύτερου μεριδίου αγοράς και μετέπειτα αύξηση των εσόδων τους. Φυσικά όλες αυτές οι εταιρίες έχουν αναπτύξει δικό τους λογισμικό για την έρευνα και ανάπτυξη των μοντέλων τους. Ωστόσο το NX 12 όπου θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, διαθέτει πληθώρα εντολών και δυνατοτήτων, είναι σε θέση να αντιμετωπίσει ένα τέτοιου είδους πρόβλημα.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση θα εφαρμοστεί σε μια σόλα ενός γυναικείου παπουτσιού. Η παρούσα έρευνα αναζητά την βέλτιστη κατανομή του υλικού στην σόλα προκειμένου να είναι πιο ανθεκτική και κυρίως πιο ελαφριά. Για το λόγο αυτό θα γίνει προσθήκη πλεγματικών δομών κατά τη διάρκεια της τοπολογικής βελτιστοποίησης και θα μελετηθούν τα αποτελέσματα. Επειδή η έρευνα αυτή βασίζεται κυρίως στην μέθοδο της βελτιστοποίησης τοπολογίας σε συνδυασμό με τη χρήση πλεγματικών δομών, ορισμένα στοιχεία του προβλήματος θα θεωρηθούν δεδομένα και δεν θα γίνει περαιτέρω έρευνα σ' αυτά. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι δεδομένα όπως οι φορτίσεις που δέχεται το παπούτσι κατά το βάδισμα και το μοντέλο που θα βασιστεί η έρευνα, προέρχεται από την διδακτορική έρευνα της κ. Mariana Costea από το "Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi στην Ρουμανία. Έγινε συνεργασία τόσο με την Mariana Costea, όσο και με την καθηγήτρια Aura Mihai και το εργαστήριό τους "Faculty of Textiles, Leather Engineering and Industrial Management".

4.1. Δεδομένα εργασίας

Βάση της έρευνας ^[50] μετά από ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο της σόλας ενός παπουτσιού, θεωρήθηκε ότι ένας από τους συνδυασμούς των υλικών που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του συστήματος

είναι τα υλικά EVA (Ethylene-Vinyl Acetate) medium density + PVC (Polyvinyl Chloride) soft. Σκοπός της εργασίας ήταν εύρεση της αποτελεσματικότητας βάση δοκιμών τόσο στα υλικά όσο και στο πάχος της σόλας υπό την κατανομή των πιέσεων στο μοντέλο και των φυσικών περιορισμών του περιβάλλοντος (πχ οριακές συνθήκες). Όπως αναφέρεται στην έρευνα, χρειάστηκε να γίνουν πελματικές μετρήσεις ώστε να εξαχθούν τα δεδομένα πιέσεων που ασκούνται στο παπούτσι, τόσο σε στάση ακινησίας όσο και κατά το βάδισμα. Οι πιέσεις εξαρτώνται αφενώς από το βάρος του σώματος, από την κατανομή του βάρους του καθώς βαδίζει και γενικά από τη μορφολογία του πέλματός του. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η κατανομή πιέσεων σε κάθε τμήμα του πέλματος ανά το χρόνο οι οποίες έχουν προέλθει μέσω της πλατφόρμας μέτρησης της πίεσης “Plantar Pressure Measurement Platform” RSScan (Εικόνα 17). Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός των τμημάτων του πέλματος δεν είναι τυχαίος, αλλά βασίζεται σε πληθώρα ερευνών [51,52,53,54,55]. Ο πίνακας 5 που ακολουθεί, περιέχει τις μέγιστες φορτίσεις που ασκούνται σε κάθε τμήμα του πέλματος μετρούμενες τόσο σαν δυνάμεις όσο και σαν πιέσεις.



Εικόνα 17. Πιέσεις σε τμήματα του πέλματος ανά το χρόνο (RSScan)

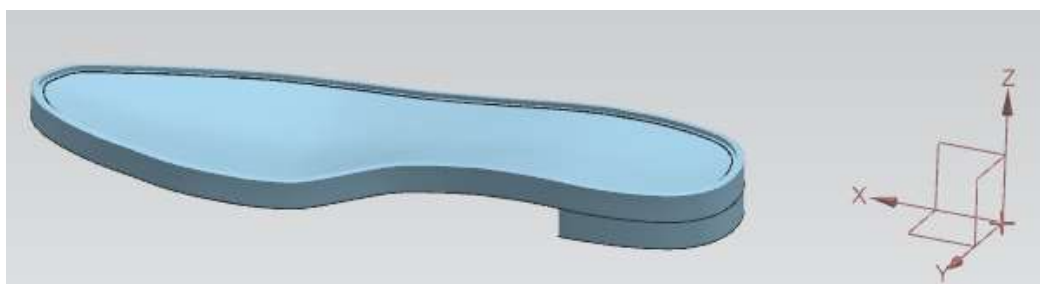
	Left		Right	
	max F (N)	max P (N/cm ²)	max F (N)	max P (N/cm ²)
Toe 1	0	0	57.4	4.3
Toe 2-5	72.6	1.8	12.2	0.7
Meta 1	2.3	0.3	26.1	1.9
Meta 2	45.9	5.1	49.2	4.2
Meta 3	54.8	7	45.2	4.6

	Left		Right	
	max F (N)	max P (N/cm ²)	max F (N)	max P (N/cm ²)
Meta 4	42.2	4.9	24.4	2.3
Meta 5	31	3	25.4	2.4
Midfoot	14.8	0.5	8.6	0.3
Heel Medial	46.9	3	59.7	3.2
Heel Lateral	36	2.7	47.5	2.9

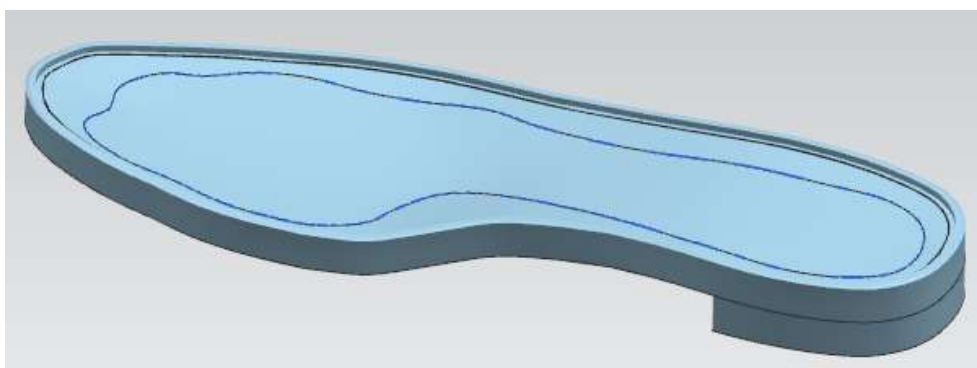
Πίνακας 5. Μέγιστες φορτίσεις ανά τμήμα του πέλματος στο αριστερό και το δεξί πόδι

4.2. Μοντέλο cad

Στην παρούσα εργασία ουσιαστικά συνεχίζεται η έρευνα [50], με σκοπό την τοπολογική βελτιστοποίηση της σόλας και την εισαγωγή πλεγματικών δομών. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται το αρχικό μοντέλο στο οποίο θα εφαρμοστούν οι προαναφερθείσες μέθοδοι. Το μοντέλο αυτό είχε αρχικά μοντελοποιηθεί στο λογισμικό MindCad και είχε γίνει εξωγωγή του με τη μορφή stl. Για την είσοδό του στο NX 12, ακολουθήθηκε η διαδικασία, **File→Import→Stl**. Στο παράθυρο εισόδου του stl αρχείου, επιλέχθηκε ο τύπος του μοντέλου να είναι Convergent και ως μονάδα μέτρησης τα χιλιοστά (mm). Το μοντέλο αυτό αποτελείται από επιφάνειες οι οποίες δεν είναι απόλυτα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Αυτό το πρόβλημα όμως θα επιλυθεί κατά τη δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων στο αρχείο fem. Προς το παρόν, επεξεργάστηκε κατάλληλα η πάνω επιφάνεια της σόλας προκειμένου στη συνέχεια να οριοθετηθούν τα τμήματα εφαρμογής των πιέσεων. Επιπλέον ορίστηκε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων το οποίο περιγράφει πιο εύκολα το μοντέλο. Το τελικό αποτέλεσμα της μοντελοποίησης του αντικειμένου, παρουσιάζεται στην Εικόνα 19.



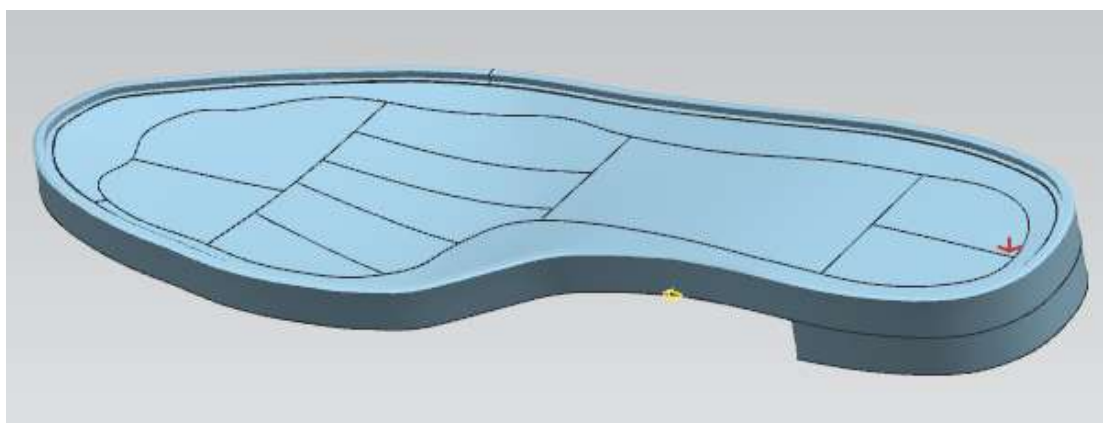
Εικόνα 18. Είσοδος του μοντέλου στο λογισμικό NX 12



Εικόνα 19. Μορφοποιημένο μοντέλο cad (έτοιμο για ανάλυση)



4.3. Δημιουργία fem

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής εργασιών και την ενότητα 3.3.1, μετά την δημιουργία ή γενικά την τροποποίηση του μοντέλου, σειρά έχει η δημιουργία της λύσης. Στο σημείο αυτό θα γίνει διακριτοποίηση του παπουτσιού προκειμένου να εφαρμοστεί στη συνέχεια η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Πριν την διαδικασία της διακριτοποίησης, πρόκειται να χωριστεί η άνω επιφάνεια της σόλας σύμφωνα με τα τμήματα που έχουν καθοριστεί. Η εντολή που διαχωρίζει τις επιφάνειες ονομάζεται Split Face και ανήκει στην καρτέλα μορφοποίησης της γεωμετρίας. Η Εικόνα 20 περιγράφει το μοντέλο πριν την διακριτοποίησή του.



Εικόνα 20. Εφαρμογή εντολής Split Face στη γεωμετρία του μοντέλου.

Εν συνεχεία ορίζουμε τις ιδιότητες των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα, τα υλικά είναι EVA (Ethylene-Vinyl Acetate) medium density όπου θα χρησιμοποιηθεί στην σόλα του παπουτσιού και το PVC (Polyvinyl Chloride) soft όπου θα αφορά το υλικό του τακουινιού. Επειδή τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες ιδιότητες, δεν υπάρχουν στη λίστα των διαθέσιμων υλικών του NX, αλλά πρέπει να δημιουργηθούν. Οι εντολές που απαιτούνται για αυτή τη διεργασία είναι οι εξής:

1. Στην καρτέλα Home→Properties επιλέγουμε  Manage Material
2. New Material→  Create
3. Στο παράθυρο Isotropic Material, εισάγουμε τις ιδιότητες όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, ώστε να δημιουργηθούν τα νέα υλικά.

	EVA medium density	PVC soft
Density (g/cm ³)	0.941	1.245
Young Modulus (MPa)	60	30
Poisson Coefficient	0.49	0.40
Tensile Yield Strength (MPa)	7.31	20
Tensile Ultimate Strength (MPa)	12.5	15.8

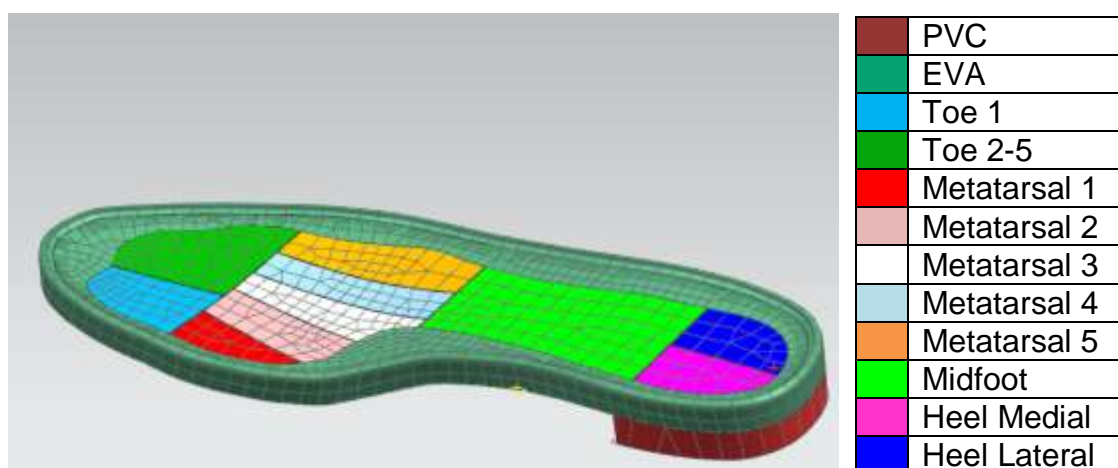
Πίνακας 6. Πίνακας ιδιοτήτων των υλικών EVA και PVC

Η διαδικασία της διακριτοποίησης είναι το επόμενο βήμα που πρέπει να γίνει. Επειδή η γεωμετρία του μοντέλου αφορά επιφάνειες, η εντολή που ταιριάζει στην περίπτωση μας είναι η *2D Mesh*. Το παράθυρο που εμφανίζεται μετά την επιλογή της εντολής αυτής, ζητάει από το χρήστη να επιλέξει την περιοχή που θέλει να διακριτοποιήσει, να επιλέξει τον τύπο και το μέγεθος των στοιχείων που επιθυμεί και τέλος να ορίσει το υλικό. Αυτή η διαδικασία θα επαναληφθεί έως ότου διακριτοποιηθεί όλη η γεωμετρία του μοντέλου.

Εκτός από την διαδικασία διακριτοποίησης, όπως είχε προαναφερθεί, πρέπει στο σημείο αυτό να γίνει ένωση των επιφανειών του μοντέλου και συγκεκριμένα ένωση των πλεγμάτων (mesh) στα σημεία που είναι απαραίτητο. Η εντολή η οποία “ενώνει” τα πλέγματα είτε βάση κοινών ακμών είτε ακμής-επιφάνειας, είναι η *1D Connection*.

Τέλος, με την εντολή *Edit display* μπορούμε να δώσουμε οποιοδήποτε χρώμα στο εκάστοτε πλέγμα. Ο λόγος ύπαρξης της εντολής αυτής δεν είναι τόσο αισθητικός, όσο λειτουργικός. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τα χρώματα των πλεγμάτων ανάλογα με το υλικό του μοντέλου ώστε να είναι εύκολα ορατή η διαφοροποίηση ανά πλέγμα. Στην περίπτωση μας, επιλέχθηκε η εντολή αυτή ούτως ώστε κάθε χρώμα να αντικατοπτρίζει ένα διαφορετικό τμήμα του πέλματος, όπως φαίνεται στα δεδομένα της Εικόνας 17.

Μετά από τις παραπάνω διεργασίες, το μοντέλο είναι έτοιμο για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και την τοπολογική βελτιστοποίηση που θα ακολουθήσει (Εικόνα 21).



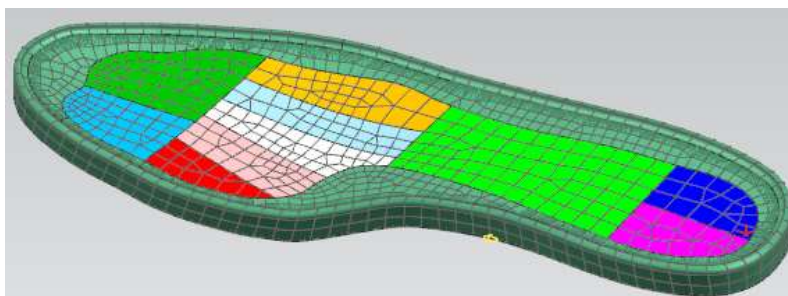
Εικόνα 21. Meshed model

4.4. Δημιουργία sim

Βάση του διαγράμματος ροής, πρέπει να τοποθετηθούν οι φορτίσεις και οι περιορισμοί στο μοντέλο ώστε να γίνει η στατική ανάλυση. Το υλικό του

αντικειμένου καθορίστηκε στο προηγούμενο βήμα μαζί με την πλεγματοποίηση της γεωμετρίας του.


Η εργασία μελετάει τη συμπεριφορά της σόλας όταν υπόκειται σε τοπολογική βελτιστοποίηση. Το μοντέλο του παπουτσιού το οποίο διαθέτουμε, εκτός από τη σόλα διαθέτει και τακούνι που όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, αποτελείται από διαφορετικό υλικό κατασκευής (PVC). Για να “ελαφρύνουμε” την ανάλυση, αφαιρούμε το τακούνι το οποίο έτσι κι αλλιώς δεν επηρεάζει την ανάλυσή μας, διότι ολόκληρο το κάτω μέρος της σόλας θεωρείται σταθερό. Επομένως τώρα η ανάλυση αφορά αποκλειστικά τη σόλα του παπουτσιού.






Εικόνα 22. Τελικό μοντέλο προς ανάλυση


Σχετικά με τις φορτίσεις που ασκούνται στη σόλα του παπουτσιού, είναι διαφορετικές ανά τμήμα του πέλματος. Επίσης, δεν είναι στατικές αλλά μεταβάλλονται με το χρόνο. Για το λόγο αυτό πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό με κατάλληλο τρόπο ώστε να περιγράφουν σωστά το πρόβλημα. Το NX διαθέτει την αντίστοιχη εντολή (*Table*), όπου δηλαδή μια παράμετρος μπορεί να αλλάζει (εξαρτημένη), βάση μιας άλλης ανεξάρτητης. Στην περίπτωση μας, ως ανεξάρτητη μεταβλητή θεωρείται ο χρόνος με μονάδα μέτρησης τα δευτερόλεπτα (sec) και ως εξαρτημένη μεταβλητή θέτουμε την πίεση, με μονάδα μέτρησης τα Pascal (pa ή N/cm^2). Όπως φαίνεται στα γραφήματα της Εικόνας 17, κατά το βάδισμα οι πιέσεις που ασκούνται στη σόλα του παπουτσιού αλλάζουν με το χρόνο και διαφέρουν ανά τμήμα του πέλματος. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τα παραπάνω, εισάγουμε τις τιμές των πιέσεων και του χρόνου σε διαφορετικό πίνακα (table) ανά τμήμα του πέλματος. Έτσι στη συνέχεια θα μπορέσουμε εύκολα να “καλέσουμε” τον πίνακα που αντιστοιχεί σε κάθε τμήμα και να εφαρμόσουμε τις φορτίσεις. Αυτή η διαδικασία μεταφράζεται στο NX, με τις εξής εντολές:

Δημιουργία Πίνακα φορτίσεων ανά το χρόνο

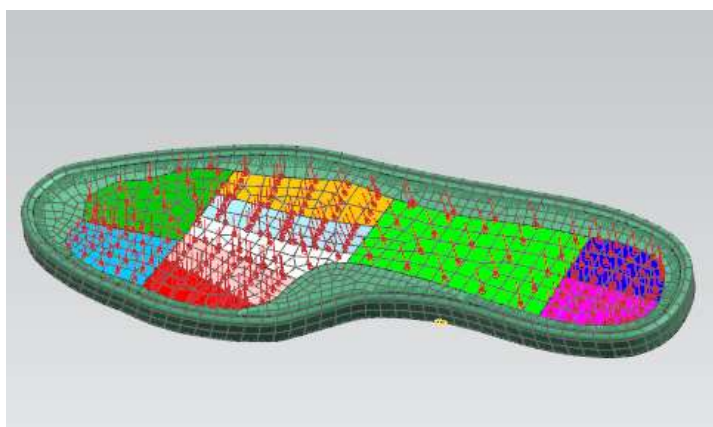
1. Menu→ Insert→ Field→  Table
2. Name, πληκτρολόγηση ονόματος για την περιγραφή του πίνακα
3. Στην καρτέλα Domain→ Independent, επιλέγουμε από τη λίστα, την ανεξάρτητη μεταβλητή (στην περίπτωσή μας είναι ο χρόνος →Time)
4. Έλεγχος της μονάδας μέτρησης (s από προεπιλογή)

5. Στην καρτέλα Domain→ Dependent, επιλέγουμε από τη λίστα, την εξαρτημένη μεταβλητή (στην περίπτωση μας είναι η πίεση →Pressure)
6. Έλεγχος της μονάδας μέτρησης (MPa από προεπιλογή)
7. Αλλαγή της μονάδας μέτρησης σε N/cm^2 , ως εξής:
στην στήλη της πίεσης, Pressure  →Change Units for Variable→ N/cm^2
8. Πληκτρολόγηση των τιμών στην περιοχή Data Points, κατά τη μορφή “number_of_time”, “number_of_pressure” και μετά από κάθε ζευγάρι τιμών, επιλογή του  Accept Edit
9.  OK

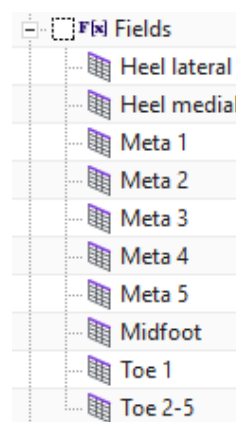
Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, παρατηρούμε στον πλοηγό της προσομοίωσης (Simulation Navigator) στην καρτέλα Fields, ότι έχουν δημιουργηθεί οι πίνακες για κάθε τμήμα του πέλματος, οι οποίοι περιγράφουν τις φορτίσεις ανά το χρόνο (Εικόνα 24). Στη συνέχεια πρέπει να αντιστοιχηθούν στο τμήμα του πέλματος που αφορά η κάθε μια φόρτιση. Η διαδικασία αυτή θα εφαρμοστεί για όλα τα τμήματα του πέλματος και περιγράφεται από την εξής σειρά εντολών:

- Load Type → Pressure
- Select object: επιλογή περιοχής του πέλματος που θα εφαρμοστεί η πίεση
- Στο πεδίο Pressure, επιλέγουμε =,
-  Select Existing Field...
- Επιλέγουμε τον πίνακα που περιγράφει τις πιέσεις ανά το χρόνο για το τμήμα που επιλέξαμε προηγουμένως

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής των πιέσεων όπως ασκούνται στη σόλα, φαίνεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23. Εφαρμογή φορτίσεων σε κάθε τμήμα της σόλας

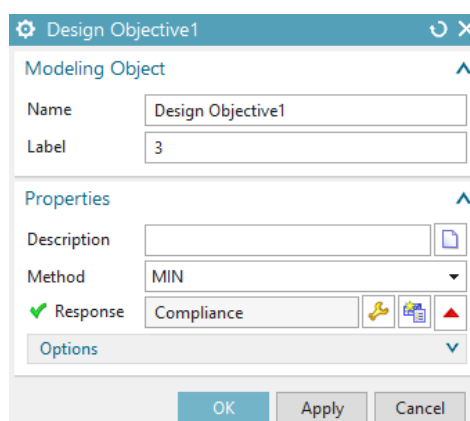


Εικόνα 24.
Πίνακες φορτίσεων
ανά το χρόνο

Για την στατική ανάλυση του μοντέλου, προστίθεται ένας περιορισμός πάκτωσης στο κάτω μέρος της σόλας (Fixed Constraint). Ακόμη θέτουμε έναν περιορισμό σχεδίασης στα τμήματα που εφαρμόζονται οι φορτίσεις προκειμένου να μην μετατοπιστούν περισσότερο από το επιτρεπτό όριο.

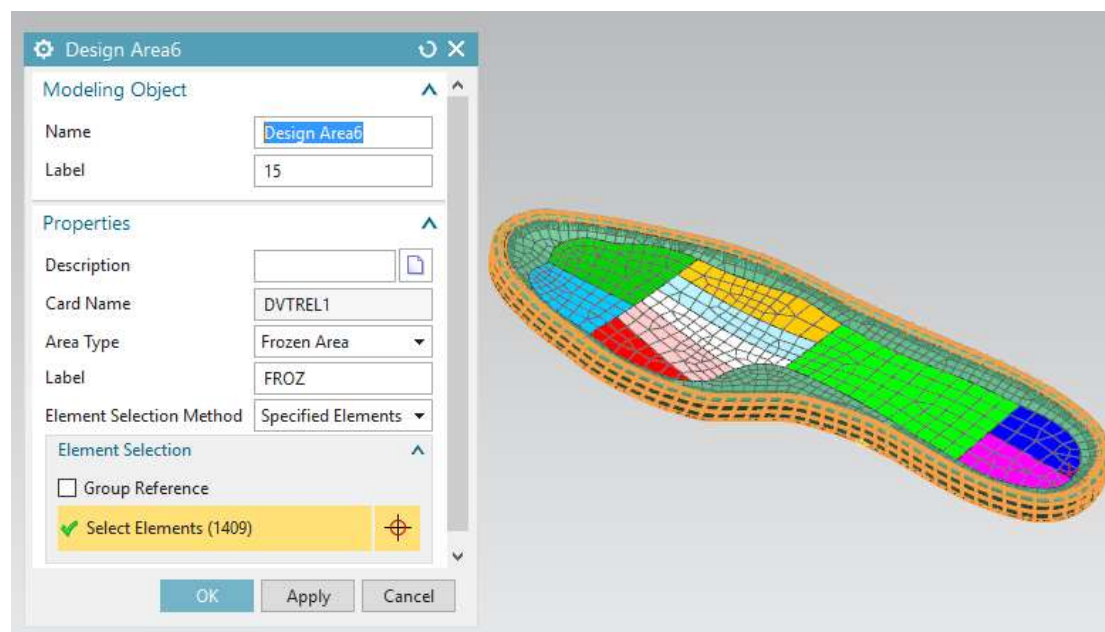
Οι παραπάνω μεταβλητές αφορούν τη στατική ανάλυση του μοντέλου. Στο σημείο αυτό πρέπει να οριστούν οι μεταβλητές που απαιτούνται για την τοπολογική βελτιστοποίηση του μοντέλου. Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής εργασιών, θα ακολουθηθεί η διαδικασία όπως περιγράφηκε στις ενότητες του κεφαλαίου 3.3.

Στην παρούσα εργασία, ως στόχος σχεδιασμού θα τεθεί η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας, δηλαδή η αύξηση της δυσκαμψίας του μοντέλου. Η επιλογή της συγκεκριμένης παραμέτρου έγινε διότι η σόλα που επιθυμούμε να βελτιώσουμε, θα πρέπει να έχει τη μέγιστη δυνατή αντοχή. Δεν επιλέχθηκε η βελτιστοποίηση του όγκου καθώς ήδη στις παραμέτρους της τοπολογικής βελτιστοποίησης, έχει τεθεί η είσοδος των πλεγματικών δομών στο μοντέλο. Συνεπώς, η πιο ελαφριά κατασκευή θα στηρίζεται στις πλεγματικές δομές και ταυτόχρονα με στόχο σχεδίασης την μείωση της ενδοτικότητας, στοχεύουμε στην αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας της σόλας του παπουτσιού.



Εικόνα 25. Ορισμός του στόχου σχεδίασης

Η περιοχή σχεδίασης μπορεί να αναφέρεται σε τμήματα του μοντέλου τα οποία θα βελτιστοποιηθούν (optimization area) και σε τμήματα τα οποία θα παραμείνουν ως έχουν (frozen area). Ωστόσο, χρήσιμο θα ήταν σε περίπτωση προβλήματος που το επιτρέπει, να καθοριστούν μόνο τα στοιχεία που θα βελτιστοποιηθούν ή μόνο τα παγωμένα στοιχεία του μοντέλου, ώστε να μην επιβαρυνθεί το λογισμικό με περιττές πληροφορίες και να επιτύχει πιο γρήγορα σύγκλιση στην βέλτιστη λύση. Στην περίπτωσή μας, επιλέχθηκε να οριστεί η περιοχή με τα σταθερά στοιχεία (frozen area), όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Το πλήθος των στοιχείων που αφορούν την περιοχή σχεδίασης είναι 1409 και περιγράφουν το κάτω μέρος της σόλας και τα στοιχεία περιμετρικά αυτής (Εικόνα 26).



Εικόνα 26. Περιοχή σχεδίασης (frozen area)

Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί ο περιορισμός σχεδίασης (design constraint) για την ανάλυση της βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση μας ως παράμετρος που περιγράφει τον περιορισμό, τίθεται το συνολικό βάρος του μοντέλου. Συνεπώς, πριν από κάθε ανάλυση θα πρέπει να καθορίζεται πιο είναι το επιθυμητό βάρος το οποίο θέλουμε να επιτύχουμε, ώστε να οριστούν το άνω και κάτω όριο του περιορισμού. Για παράδειγμα, έστω ότι επιθυμούμε μείωση του βάρους να κυμαίνεται μεταξύ 40% και 50%, τότε θέτουμε το κάτω όριο ίσο με 0.5 και το πάνω 0.6. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η βέλτιστη σχεδίαση θα έχει βάρος μεταξύ 0.5 και 0.6 σε σχέση με το αρχικό.

Τέλος, θέτουμε έναν κατασκευαστικό περιορισμό που αφορά στην προσθετική παραγωγή (Additive manufacturing constraint). Επειδή το μοντέλο προορίζεται για παραγωγή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, ορίζουμε τις παραμέτρους που αφορούν στον εκτυπωτή, δηλαδή καθορίζουμε τη γωνία και το πάχος εξώθησης του υλικού.

4.5. Επίλυση προβλήματος

Σκοπός της εφαρμογής της τοπολογικής βελτιστοποίησης με την εισαγωγή πλεγματικών δομών, είναι η ανάπτυξη μιας νέας βελτιωμένης σχεδίασης, με ελαχιστοποιημένη ενδοτικότητα και μειωμένο βάρος. Η μέθοδος της τοπολογικής βελτιστοποίησης αρχικά θέτει σε όλα τα στοιχεία του μοντέλου πυκνότητα ίση με τη μονάδα. Κατά τη διαδικασία της επίλυσης, η πυκνότητα των στοιχείων μεταβάλλεται και εισάγονται όπου είναι απαραίτητο οι πλεγματικές δομές που έχουμε ορίσει. Το τελικό βέλτιστο μοντέλο που προκύπτει από την ανάλυση αυτή, είναι συνήθως μια μίξη στερεών στοιχείων και πλεγματικών δομών. Η ποσότητα και η ποιότητα των πλεγματικών δομών καθορίζεται από το λογισμικό. Οι τιμές της πυκνότητας των στοιχείων υποδεικνύουν τον τύπο των πλεγματικών δομών αλλά και τα κατώτερα όρια

των στερεών και πλεγματικών περιοχών. Το αρχείο που παράγεται μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση και περιέχει αυτές τις πληροφορίες, είναι τύπου υπολογιστικών φύλλων και έχει κατάληξη csv. Το NX δεν έχει τη δυνατότητα εισάγοντας το αρχείο αυτό να παρουσιάσει γραφικά τη νέα σχεδίαση. Το λογισμικό που είναι κατάλληλο για τη διαδικασία αυτή είναι το Materialise 3-matic, το οποίο χρησιμοποιεί το αρχείο stl σε συνδυασμό με το csv, ώστε να αναπαραστήσει γραφικά τις τρισδιάστατες πλεγματικές δομές. Ωστόσο το λογισμικό αυτό δεν είναι διαθέσιμο Πολυτεχνείο Κρήτης, οπότε θα σταματήσουμε στο βήμα όπου παρατηρούμε το βέλτιστο σχέδιο με χρωματική εναλλαγή για κάθε τύπο δομής.

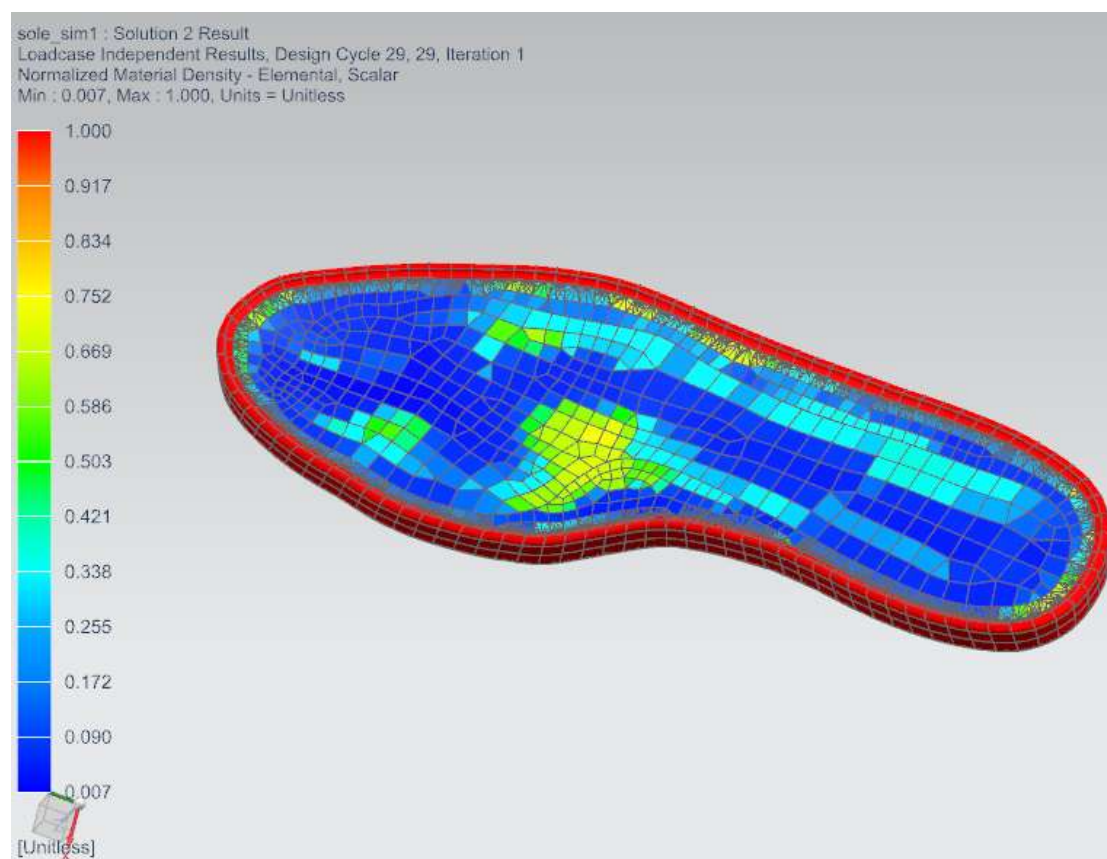
Μέχρι τώρα, έχει γίνει εισαγωγή της γεωμετρίας της σόλας στο λογισμικό NX 12, έχει διακριτοποιηθεί και έχουν καθοριστεί όλες οι παράμετροι που περιγράφουν το πρόβλημα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον τύπο πλεγματικής δομής αλλά και στον περιορισμό σχεδίασης που αφορά το βάρος. Έστω λοιπόν ότι επιλέγεται η δομή πλέγματος να είναι τύπου BCC. Επίσης, θεωρούμε ότι το βάρος του μοντέλου μπορεί να μειωθεί έως και 50% σε σχέση με το αρχικό. Έπειτα, ακολουθεί η επίλυση.

Lattice Type	BCC
Maximum number of design cycles	30
Design Objective	min Compliance
Design Area	Frozen elements (κάτω και περιμετρικά της σόλας)
Design Constraint	Μείωση του βάρους έως και 50%
Manufacturing Constraint	Additive Manufacturing

Πίνακας 7. Βασικές παράμετροι της επίλυσης

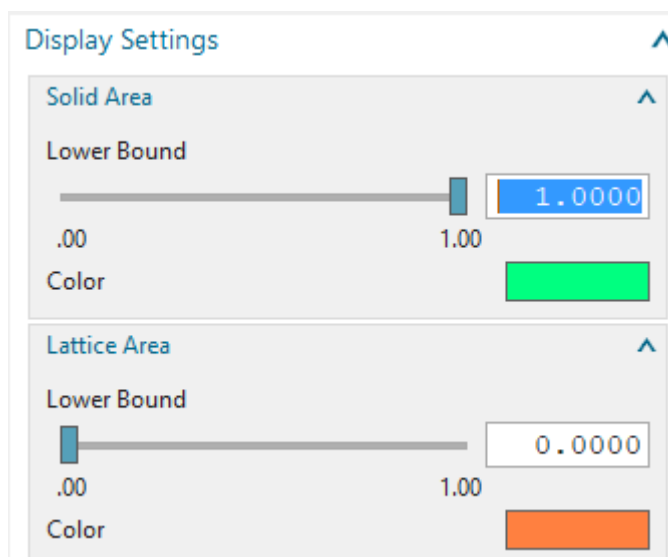
Μετά την εκτέλεση της παραπάνω ανάλυσης, όλα τα αποτελέσματα είναι τοποθετημένα στον Post Processing Navigator. Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης για τον κύκλο σχεδίασης 0 και για τον κύκλο σύγκλισης 29, βρίσκονται στο Παράρτημα Β'. Ο κύκλος σύγκλισης αφορά την επανάληψη του αλγόριθμου στην οποία δημιουργήθηκε η βέλτιστη σχεδίαση του αντικειμένου. Σχετικά με την πυκνότητα του υλικού ανά στοιχείο του μοντέλου, αναπαρίστανται γραφικά μέσω του *Loadcase Independent Results* → *Normalized Mass Density – Elemental*. Ο κύκλος σχεδίασης 0 αφορά την αρχική γεωμετρία του μοντέλου, οπότε υπάρχουν όλα τα στοιχεία της γεωμετρίας του με αποτέλεσμα να έχουν πυκνότητα ίση με τη μονάδα. Στην Εικόνα 27, παρατηρούμε την κατανομή πυκνότητας του υλικού EVA κατά μήκος της σόλας. Με μπλε χρώμα συμβολίζεται η απουσία υλικού, ενώ όσο το

χρώμα πλησιάζει στο κόκκινο, βάση της κλίμακας που βρίσκεται στα αριστερά, αυξάνεται η πυκνότητα.

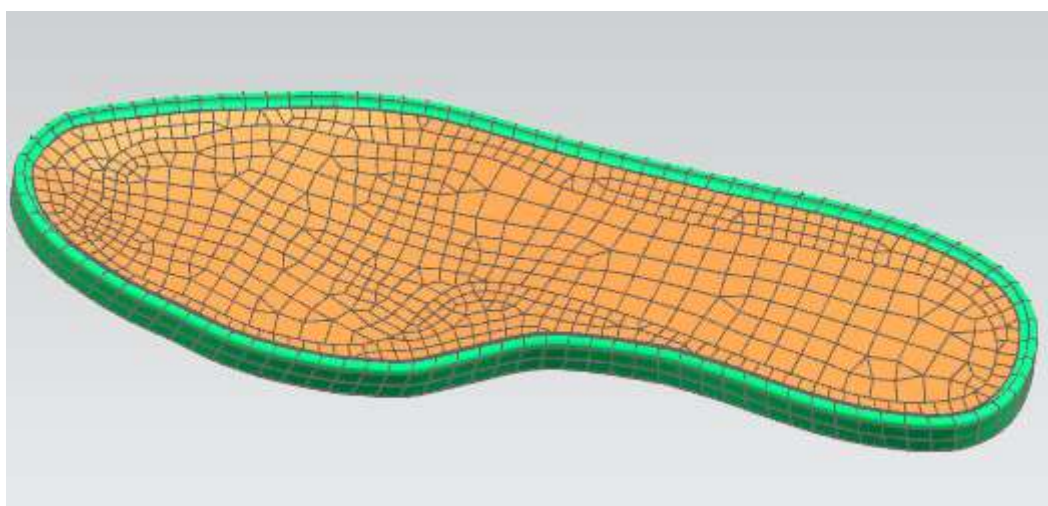


Εικόνα 27. Κατανομή πυκνότητας του υλικού (κύκλος σύγκλισης=29)

Εκτός από την κατανομή της πυκνότητας του κύκλου σχεδίασης που γίνεται η σύγκλιση, μπορούμε να εξετάσουμε γραφικά τη δομή των στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα το λογισμικό NX 12, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να προσαρμόσει (εντός των επιτρεπτών ορίων) τις περιοχές που αφορούν στερεή και πλεγματική δομή (βλ.3.3.7.2). Αρχικά, στην Εικόνα 28 βλέπουμε τον διαχωρισμό της πυκνότητας για κάθε δομή (στερεή και πλεγματική) και ταυτόχρονα το παράθυρο των γραφικών να έχει την μορφή της Εικόνας 29. Με κάθε αλλαγή στην πυκνότητα του υλικού, αλλάζει η μορφή της εικόνας του μοντέλου. Δηλαδή, προσαρμόζονται τα χρώματα σε πράσινο όταν η τιμή της πυκνότητας ανήκει στο πεδίο της στερεής δομής, και πορτοκαλί όταν ανήκει στο πεδίο της πλεγματικής δομής.



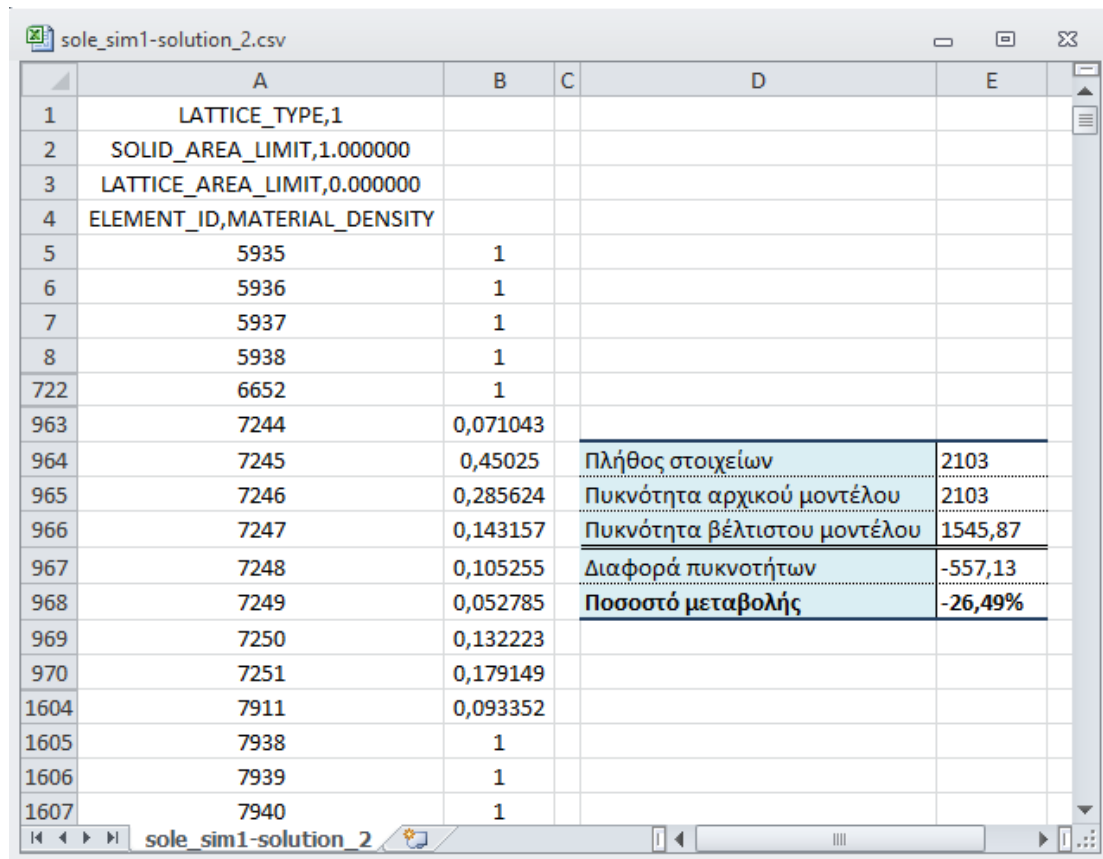
Εικόνα 28. Έλεγχος πυκνότητας του στερεού τμήματος και των πλεγματικών δομών



Εικόνα 29. Γραφική αναπαράσταση δομής του βέλτιστου σχεδιασμού
 α) πράσινο χρώμα = στερεό
 β) πορτοκαλί χρώμα = πλεγματική δομή (BCC)

Εκτός των προφανών, μπορούμε να υπολογίσουμε έμμεσα την πυκνότητα του βελτιστοποιημένου μοντέλου αλλά και την μείωσή της σε σχέση με την αρχική σχεδίαση. Οι απαραίτητες πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν στο αρχείο τύπου csv. Όπως προαναφέρθηκε το αρχείο αυτό περιέχει τιμές της πυκνότητας των στοιχείων που υποδεικνύουν τον τύπο των πλεγματικών δομών αλλά και τα κατώτερα όρια των στερεών και πλεγματικών περιοχών που χρησιμοποιούνται. Τα δεδομένα αυτά μπορούμε να τα επεξεργαστούμε εκτός του λογισμικού NX. Για παράδειγμα, ανοίγουμε το αρχείο csv με τη βοήθεια ενός προγράμματος επεξεργασίας υπολογιστικών φύλλων (πχ Excel). Επεξεργαζόμαστε αρχικά τα δεδομένα ώστε κάθε κελί, να περιέχει μια τιμή. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται ο αριθμός του κάθε στοιχείου όπως έχει καθοριστεί από την διαδικασία πλεγματοποίησης (Figure 1). Δίπλα, στην δεύτερη στήλη, είναι αντιστοιχισμένη η τιμή της βέλτιστης πυκνότητας που έχει το κάθε στοιχείο. Συνεπώς, αρκεί να υπολογίσουμε το πλήθος των στοιχείων και το άθροισμα των πυκνότητων τους, ώστε να ανάγουμε τα δεδομένα στα επιθυμητά αποτελέσματα. Έτσι υπολογίζεται η πυκνότητα του

βέλτιστου μοντέλου. Ακόμη θεωρώντας ότι το αρχικό μοντέλο έχει πυκνότητα ίση με τη μονάδα για κάθε στοιχείο του, τότε μπορούμε εύκολα να εξαγάγουμε συμπέρασμα σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του βέλτιστου σχεδιασμού. Στην παρούσα εφαρμογή η μείωση της πυκνότητας του υλικού αγγίζει το ποσοστό του 26,49%.



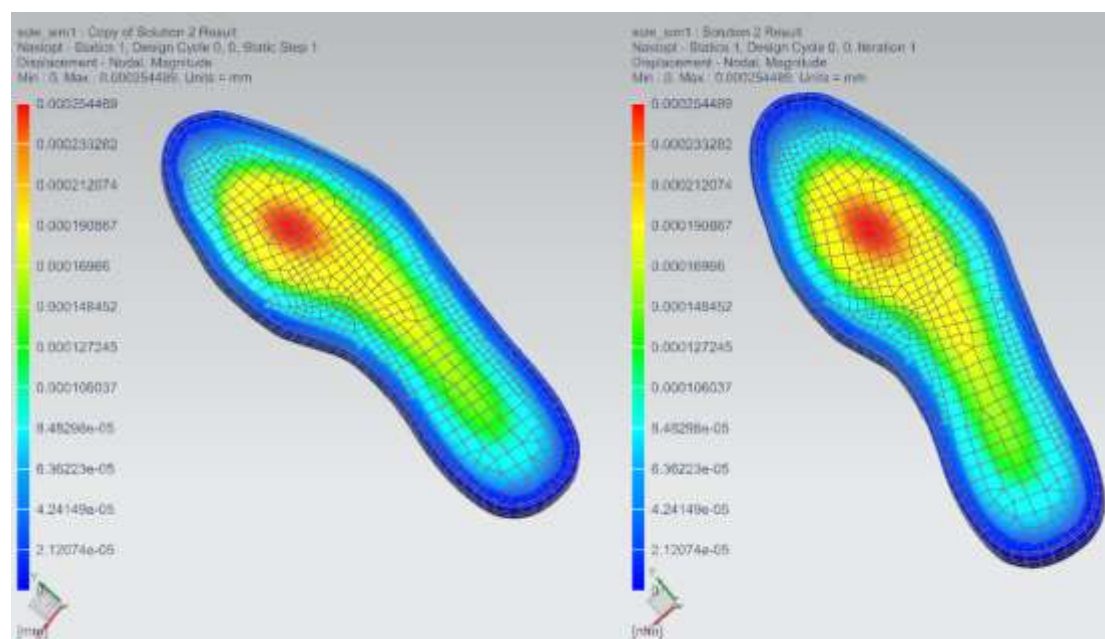
	A	B	C	D	E
1	LATTICE_TYPE,1				
2	SOLID_AREA_LIMIT,1.000000				
3	LATTICE_AREA_LIMIT,0.000000				
4	ELEMENT_ID,MATERIAL_DENSITY				
5	5935	1			
6	5936	1			
7	5937	1			
8	5938	1			
722	6652	1			
963	7244	0,071043			
964	7245	0,45025	Πλήθος στοιχείων	2103	
965	7246	0,285624	Πυκνότητα αρχικού μοντέλου	2103	
966	7247	0,143157	Πυκνότητα βέλτιστου μοντέλου	1545,87	
967	7248	0,105255	Διαφορά πυκνοτήτων	-557,13	
968	7249	0,052785	Ποσοστό μεταβολής	-26,49%	
969	7250	0,132223			
970	7251	0,179149			
1604	7911	0,093352			
1605	7938	1			
1606	7939	1			
1607	7940	1			

Figure 1. Επεξεργασία αρχείου csv, ώστε να μελετηθεί το ποσοστό μεταβολής της πυκνότητας που προέκυψε μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση και την προσθήκη πλεγματικών δομών (BCC)

4.6. Επαλήθευση

Το παράθυρο στο οποίο προσαρμόστηκε προηγουμένως η πυκνότητα που αντιστοιχεί στην εκάστοτε δομή, είναι διαθέσιμες και άλλες χρήσιμες ενέργειες. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει εξαγωγή των αρχείων στερεολιθογραφίας (stl) και του αρχείου Nastran (bdf), τα οποία περιέχουν facets της βελτιστοποιημένης σχεδίασης του μοντέλου. Επίσης, μπορεί να γίνει εξαγωγή του αρχείου csv, για το οποίο έγινε λόγος στην αρχή της προηγούμενης παραγράφου. Τέλος, υπάρχει η εντολή με την οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα ενότητα, η δημιουργία λύσης επαλήθευσης (Create Verification Solution). Λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία δημιουργίας της λύσης επαλήθευσης από την ενότητα 3.3.7.2, προσαρμόζουμε την τιμή του κύκλου σχεδίασης και επιλύουμε δίχως να γίνει Model Setup Check. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης βρίσκονται στον πλοηγό μετά-επεξεργασίας (Post Processing Navigator).

Στο σημείο αυτό, ελέγχουμε τη βέλτιστη σχεδίαση που προέκυψε μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση η οποία έχει συνδυασμό στερεών στοιχείων και πλεγματικής δομής. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να ελέγξουμε αν όντως η παραγόμενη σχεδίαση ικανοποιεί τους περιορισμούς και αν τα αποτελέσματά της είναι συμπίπτουν με την ανάλυση του μοντέλου πριν την εφαρμογή των πλεγματικών δομών. Έτσι, παραθέτουμε δίπλα-δίπλα τις δομικές αναλύσεις της λύσης επαλήθευσης του βελτιστοποιημένου μοντέλου και της λύσης του αρχικού (Εικόνα 30). Στο Παράρτημα Γ', είναι τοποθετημένες οι συγκρίσεις της λύσης επαλήθευσης με την αρχική επίλυση, για κάθε παράμετρο της στατικής ανάλυσης. Παρατηρούμε ότι οι τιμές παρέμειναν ακριβώς οι ίδιες, επομένως δεχόμαστε τη σχεδίαση που προέκυψε από την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης αλλά και την είσοδο των πλεγματικών δομών στο μοντέλο μας. Αξίζει λοιπόν να σημειωθεί ότι με την μέθοδο της βελτιστοποίησης της δομής και τη βοήθεια των πλεγματικών δομών, διατηρήθηκε η αντοχή και ταυτόχρονα επιτεύχθηκε σημαντική μείωση του βάρους της σόλας. Επομένως η επίλυση ήταν επιτυχής.



Εικόνα 30. Σύγκριση των αποτελεσμάτων της λύσης επαλήθευσης και της αρχικής επίλυσης

4.7. Δοκιμές


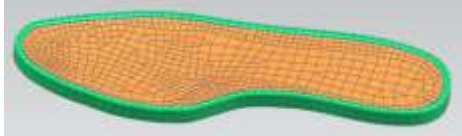
Ένας από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας ενός μοντέλου, με την προσθήκη και βέλτιστη κατανομή των πλεγματικών δομών, ενώ παράλληλα ικανοποιούνται όλες οι συνθήκες του προβλήματος. Στις ενότητες που ακολουθούν, πρόκειται να γίνουν ορισμένες δοκιμές μεταβάλλοντας κάποιες παραμέτρους κάθε φορά, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την χρήση της τοπολογικής βελτιστοποίησης πλεγματικών δομών.

4.7.1. Πυκνότητα ανά διαφορετικό περιορισμό σχεδίασης

Έστω ότι με την τοπολογική βελτιστοποίηση έχουμε σκοπό να μειώσουμε το βάρος του αντικειμένου. Αυτό είναι εφικτό, αφενός με τη βέλτιστη κατανομή υλικού και αφετέρου με την προσθήκη πλεγματικών δομών. Ουσιαστικά όταν ξεκινάει μια τέτοια ανάλυση έχει προσδιοριστεί το επιθυμητό ποσοστό μείωσης του βάρους. Μπορεί η μείωση του βάρους να πρέπει να είναι ίση με μια τιμή ή να κυμαίνεται μεταξύ ενός εύρους τιμών. Σε οποιαδήποτε περίπτωση είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε εκ των προτέρων ποια θα είναι η τελική πυκνότητα του υλικού και ειδικότερα ποια θα είναι η σχέση της με το αρχικό αντικείμενο.

Στην σόλα του παπουτσιού η οποία μελετάται, πρόκειται να γίνουν τρεις διαφορετικές επιλύσεις τοπολογίας, οι οποίες θα διαφέρουν μόνο ως προς τον περιορισμό σχεδίασης που αφορά το βάρος. Η πρώτη περίπτωση έχει περιορισμό το επιθυμητό βάρος να μειωθεί το πολύ κατά 50% σε σχέση με το αρχικό. Στην δεύτερη περίπτωση, το βάρος θα μπορεί να μειωθεί μεταξύ 50% και 80%, ενώ στην τρίτη τη μείωση του βάρους θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 80%. Στο αντίστοιχο παράθυρο του λογισμικού, εισάγονται τα δεδομένα με κανονικοποιημένη μορφή. Και οι τρεις περιπτώσεις έχουν πλεγματική δομή τύπου BCC. Αφού γίνουν οι απαραίτητες επιλύσεις, εξάγονται τα αποτελέσματα όπως φαίνονται στον Πίνακα 8.

Αρχικά, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό μείωσης του βάρους, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πυκνότητας που επιτυγχάνεται. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό, καθώς για να επιτευχθεί μεγάλη μείωση στο βάρος του μοντέλου, θα πρέπει αρκετά στοιχεία να παραληφθούν και η στερεά δομή να αντικατασταθεί με πλεγματική σε πολλές περιοχές της σόλας. Επίσης, είναι φανερό ότι ο επιλύτης συγκλίνει πιο γρήγορα στην βέλτιστη λύση, όταν το ποσοστό μείωσης του βάρους μεγαλώνει. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο διότι χρειάζονται λιγότερες επαναλήψεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης όταν μπορεί να αφαιρέσει πολλά στοιχεία ή και να τοποθετήσει πλεγματικές δομές. Με άλλα λόγια συγκλίνει γρηγορότερα γιατί ο επιλύτης μπορεί να δοκιμάσει μικρότερο αριθμό συνδυασμό τιμών πυκνότητας που αντιστοιχούν σε στερεή και πλεγματική δομή. Στην περίπτωση αυτή βέβαια, η ταχύτητα σύγκλισης είναι πιθανό να οφείλεται και στο μικρότερο εύρος τιμών στο οποίο μπορεί να κινείται η μείωση του βάρους.

Hybrid material: Solid EVA + LATTICE			
Εύρος ποσοστού μείωσης βάρους	Βάρος % επί του αρχικού	Κύκλος σχεδίασης σύγκλισης	%Διαφορά πυκνότητας
80% - 100%	[0 - 0,2]	15	-31.25%
50% - 80%	[0.2 - 0.5]	16	-29.39%
0% - 50%	[0.5 - 1]	20	-18.34%

Πίνακας 8. Επιλύσεις για διάφορες τιμές του περιορισμού μείωσης όγκου

4.7.2. Πυκνότητα ανά τύπο πλεγματικής δομής

Στο παραπάνω παράδειγμα εφαρμόστηκαν δοκιμές με εφαρμογή κοινής διαδικασίας επίλυσης για την τοπολογική βελτιστοποίηση αλλά με μόνη διαφορά μια αλλαγή στον περιορισμό σχεδίασης. Σειρά έχει η μελέτη της κατανομής της πυκνότητας, για τους διαφορετικούς τύπους πλεγματικών δομών. Με τις δοκιμές αυτές θα εξάγουμε αποτελέσματα σχετικά με τις πλεγματικές δομές και θα γίνει εφικτή η σύγκρισή τους.

Υπάρχουν εννέα διαφορετικές πλεγματικές δομές που υποστηρίζει το λογισμικό NASTRAN NX 12. Συνεπώς, για τις ανάγκες της παρούσας ενότητας, θα πρέπει να γίνουν εννέα ξεχωριστές επιλύσεις τοπολογικής βελτιστοποίησης. Οι παράμετροι σχεδιασμού και στατικής ανάλυσης είναι κοινοί σε όλες τις επιλύσεις. Το μόνο που διαφέρει είναι, προφανώς, ο τύπος της πλεγματικής δομής που ορίζεται για κάθε επίλυση. Τα δεδομένα έχουν ως εξής:








Maximum number of design cycles	20
Design Objective	min Compliance
Design Area	Frozen elements (κάτω και περιμετρικά της σόλας)
Design Constraint	Μείωση του βάρους έως και 80%
Manufacturing Constraint	Additive Manufacturing



Πίνακας 9. Κοινά δεδομένα δοκιμών (οι επιλύσεις διαφέρουν μόνο στον τύπο Lattice)

Μετά από κάθε επίλυση του προβλήματος, υπολογίζεται το ποσοστό μείωσης της πυκνότητας. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 10.

Παρατηρούμε ότι η εφαρμογή της δοκιμής στην σόλα του παπουτσιού, απέδωσε μικρή διαφορά στην κατανομή της πυκνότητας ανά πλεγματική δομή. Πιο συγκεκριμένα, ο τύπος BCC αποδίδει μεγάλη μείωση στην πυκνότητα καθώς όπως είναι φανερό από το σχεδιασμό του, απαιτεί μικρή ποσότητα υλικού. Σε γενικές γραμμές, όσο πιο απλή είναι η δομή του πλέγματος, τόσο πιο μεγάλη είναι η αναμενόμενη μείωση στην πυκνότητα και συνεπώς στη μάζα του υλικού.

Αξιοσημείωτο είναι το αποτέλεσμα που προκύπτει για τον τύπο FCC+OCTAHEDRAL, καθώς αποδίδει μεγαλύτερη μείωση στην συνολική πυκνότητα της σόλας. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί με το λόγο ότι η συγκεκριμένη δομή εφαρμόζει καλύτερα στις παραμέτρους της σόλας και προσδίδει μεγαλύτερη σταθερότητα και αντοχή, με ταυτόχρονη μείωση της μάζας.

Hybrid material: Solid EVA +	LATTICE TYPE	%Μείωση της πυκνότητας
	CUBIC	27,49%
	FCC	27,59%
	BCC	29,39%
	OCTAHEDRAL	27,61%
	BCC+FCC	27,48%
	BCC+CUBIC	27,65%
	FCC+CUBIC	27,5%

Hybrid material: Solid EVA +	LATTICE TYPE	%Μείωση της πυκνότητας
	BCC+FCC+CUBIC	27,64%
	FCC+OCTAHEDRAL	30.91%

Πίνακας 10. Επίλυση του ίδιου προβλήματος για κάθε περίπτωση πλεγματικής δομής

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε εφαρμογή της μεθόδου τοπολογικής βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με την προσθήκη πλεγματικών δομών, σε ένα μοντέλο σόλας ενός παπουτσιού. Η διαδικασία αυτή έγινε μέσω του λογισμικού NASTRAN NX 12 και έχει σκοπό να αναδείξει τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι προαναφερθείσες τεχνικές.

Αρχικά, έγινε εισαγωγή του μοντέλου της σόλας στο περιβάλλον σχεδιασμού του NX. Έπειτα όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, ακολούθησε η δημιουργία λύσης της προσομοίωσης όπου αφορά την τοπολογική βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια, αφού έγινε διακριτοποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου, εφαρμόστηκαν οι απαραίτητες φορτίσεις που οφείλονται στις μετρήσεις πίεσης του πέλματος και προσδιορίστηκαν οι περιορισμοί. Σε επόμενο βήμα καθορίστηκαν οι παράμετροι που σχετίζονταν με την διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης και με τις πλεγματικές δομές. Πραγματοποιήθηκε μια σειρά επιλύσεων που σχετίζονταν είτε με τους περιορισμούς σχεδίασης είτε με τις διαφορές στις πλεγματικές δομές.

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 4, κάθε σχεδιασμός που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος, έχει βελτιστοποιημένες ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται να μειώνεται η απαιτούμενη ποσότητα υλικού, με την εισαγωγή οποιουδήποτε τύπου πλεγματικής δομής. Η μείωση της πυκνότητας του απαιτούμενου υλικού, είναι της τάξης του 27-29%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης της τοπολογίας και με τη χρήση πλεγματικών δομών, το αντικείμενο σχεδιασμού καταλήγει να ζυγίζει περίπου τα 2/3 του αρχικού του βάρους. Ακόμη μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι οι πλεγματικές δομές τύπου BCC και FCC+OCTAHDR, είναι εκείνες που αποφέρουν μεγαλύτερη μείωση στο βάρος, φυσικά με ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των περιορισμών.

Σήμερα τεχνικές όπως η τοπολογική βελτιστοποίηση, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην βιομηχανία για λόγους οικονομίας υλικού (χρήση πλεγματικών δομών) αλλά και ελαχιστοποίησης του χρόνου παραγωγής ενός αντικειμένου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο τομέας της υποδηματοποιίας καθώς οι μεγαλύτερες εταιρείες κυρίως στο χώρο των αθλητικών υποδημάτων, φαίνεται ήδη να έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους προς τις νέες τεχνικές που υπόσχονται την παραγωγή καινοτόμων και οικονομικών προϊόντων. Ωστόσο, για την παραγωγή των προϊόντων που προκύπτουν από μεθόδους όπως η βελτιστοποίηση τοπολογίας, απαιτούνται και οι ανάλογες τεχνικές. Ειδικότερα, απαιτούνται τόσο νέες μέθοδοι παραγωγής αλλά και ανάπτυξη υλικών με βελτιστοποιημένες ιδιότητες. Η προσθετική παραγωγή, με μεθόδους όπως η τρισδιάστατη, τώρα πλέον και η τετραδιάστατη εκτύπωση, κυριαρχεί σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας (πχ ιατρική, αεροπορική, υποδηματοποιία). Βασικό πλεονέκτημα της, είναι η κατασκευή αντικειμένων οποιασδήποτε πολυπλοκότητας, καθώς τοποθετεί το υλικό στρώση-στρώση. Η τεχνολογία αυτή αποδίδει γρήγορα και οικονομικά τόσο την κατασκευή πρωτοτύπων για τον αρχικό έλεγχο των ιδιοτήτων του μοντέλου, όσο και την κατασκευή των τελικών προϊόντων, έτοιμων να προωθηθούν στην αγορά.

Οι απαιτήσεις της αγοράς οδηγούν στην ανάγκη εξέλιξης της τεχνολογίας σε τομείς όπως η σχεδίαση και η παραγωγή προϊόντων. Τα τελευταία χρόνια, γίνονται προσπάθειες εξέλιξης των αλγορίθμων σχεδιασμού ώστε να παράγουν σχεδόν αυτόματα, ξεχωριστά προϊόντα με βελτιωμένες ιδιότητες που θα ικανοποιούν στο μέγιστο τις ανάγκες των χρηστών. Εκτός από την τοπολογική βελτιστοποίηση, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που προτείνουν βέλτιστο σχεδιασμό για ένα πρόβλημα. Για παράδειγμα, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αλλά και τα νευρωνικά δίκτυα ^[56], είναι σχετικά νέες τεχνικές που υπόσχονται καινοτόμους σχεδιασμούς. Όπως όλα δείχνουν, το μέλλον στην σχεδίαση βασίζεται σε μεθόδους βελτιστοποίησης, η οποίες με τη σειρά τους θα απαιτούν την ταυτόχρονη ανάπτυξη των τεχνολογιών παραγωγής.

“Design is not just what it looks like and feels like. Design is how it works.”
Steve Jobs

Βιβλιογραφία

- [1] Gebisa A.W, Lemu H.G, (2017), “A case study on topology optimized design for additive manufacturing”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **276**
- [2] Querin, O., Victoria, M., Alonso, C., Ansola, R. and Marti, P., (2017), *Topology Design Methods for Structural Optimization*, Elsevier Academic Press
- [3] Zhou, M., Rozvany, G.I.N., (1992), “DCOC: An optimality criterion method for large systems. Part I: theory”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **5**, Issue 1–2, pp 12–25
- [4] Zhou, M., Rozvany, G.I.N., (1993), “DCOC: An optimality criteria method for large systems. Part II: algorithm”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **6**, Issue 4, pp 250-262
- [5] Haftka, R., Gürdal, Z., (1992), *Elements of Structural Optimization*, 3rd Edition, Springer Netherlands
- [6] Bendsoe, M.P., (1989), “Optimal shape design as a material distribution problem”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **1**, Issue 4, pp. 193-202
- [7] Bendsøe, M.P., (1995), *Optimization of Structural Topology, Shape, and Material*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [8] Bendsøe, M.P., Kikuchi, N., (1988), “Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **71**, Issue 2, pp. 197-224
- [9] Bendsøe, M.P., Sigmund, O., (2004), *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [10] Rozvany G.I.N., Zhou M., (1991), “Applications of the COC Algorithm in Layout Optimization In: Eschenauer H.A.”, Mattheck C., Olhoff N. (eds) *Engineering Optimization in Design Processes. Lecture Notes in Engineering*, **63**, Springer, Berlin, Heidelberg
- [11] Allaire, G., Jouve, F., Toader, A.M., (2004), “Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method”, *Journal of Computational Physics*, **194**, Issue 1, pp. 363-393
- [12] Amstutz, A., Andrä, H., (2006), “A new algorithm for topology optimization using a level-set method”, *Journal of Computational Physics*, **216**, Issue 2, pp. 573-588

- [13] Wang, M., Wang, X., and Guo, D., (2003), "A level set method for structural topology optimization", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **192**, Issues 1-2, pp.227-246
- [14] Mattheck, C., (1990), "Engineering components grow like trees", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **21**, Issue 4, pp.143-168
- [15] Mattheck, C., Scherrer, M., Bethge, K., Tesari, I., (2005), "Shape optimization: an analytical approach", *Computer Aided Optimum Design in Engineering IX*, WIT Press, Southampton
- [16] Xie, Y.M, Steven, G.P, (1993), "A simple evolutionary procedure for structural optimization", *Computers & Structures*, **49**, Issue 5, pp. 885-896
- [17] Xie, Y.M, Steven, G.P, (1997), *Evolutionary Structural Optimization*, Springer-Verlag, Berlin
- [18] Huang, X., Xie, M., (2010), *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, Sussex, UK
- [19] Querin, O.M., Steven, G.P, Xie, Y.M., (1998), "Evolutionary structural optimization using a bidirectional algorithm", *Engineering Computations*, **15**, Issue 8, pp.1031-1048
- [20] Σκάρος, Ν. (2008), "Βέλτιστος σχεδιασμός δικτυωτών φορέων με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και αλγορίθμων βελτιστοποίησης", Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης
- [21] Perez, R.E and Behdinanb, K., (2007), "Particle swarm approach for structural design optimization", *Computers & Structures*, **85**, Issues 19-20, pp. 1579-1588
- [22] Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., (2015), "Synthesis Methods", *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*, Second Edition, Springer, pp. 426-433
- [23] Voxel, (2018, March 7), από Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Voxel>
- [24] Bendsoe, M.P., (1989), "Optimal shape design as a material distribution problem", *Structural Optimization 1*, Springer-Verlag, pp. 193-202
- [25] Αγωγιάνης, Χ., (2017), "Μέθοδοι τοπολογικής βελτιστοποίησης στην ανάλυση και το σχεδιασμό κατασκευών", Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας.
- [26] Hilton, A., Illingworth, J., (1997), *Marching Triangles: Delaunay Implicit Surface Triangulation*, University of Surrey, Guildford, UK.

- [27] Treece, G.M, Prager, R.W., and Gee, A.H., (1999), “Regularised marching tetrahedra: improved iso-surface extraction”, *Computers & Graphics*, **23**, Issue 4, pp.583-598
- [28] McComas, R.I., (1970), “NASTRAN, NASA'S GENERAL PURPOSE STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM”, pp.23-26
- [29] Natran, (2018, March 7), από Wikipedia,
<https://en.wikipedia.org/wiki/Nastran>
- [30] Shorre, J., Friedman, D. & Wang, (IBM), (2018, March 7), “NASA Structural Analysis Computer Software”,
<https://www.spacefoundation.org/what-we-do/space-technology-hall-fame/inducted-technologies/nasa-structural-analysis-computer>
- [31] NX Nastran's User Guide,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12.0.1/nx_help#uid:1128419:1128428:index_User:506711:505256
- [32] Siemens NX, (2018, March 7), από Wikipedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens_NX
- [33] Topology optimization workflow, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:1128419:index_advanced:384581:1331664:1323082
- [34] Holland, D., (2012), “Associative 3D FEA Models”,
<http://www.endesin.com/nx-technical-articles/associative-3d-fea-models>
- [35] Solution dialog box (NX Nastran), Bulk Data page, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:632436
- [36] Design areas in topology optimization, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:1128419:index_advanced:384581:1331664:1323064
- [37] Manufacturing constraints in topology optimization, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:1128419:index_advanced:384581:1331664:1323103
- [38] Topology optimization post-processing results, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:1128419:index_advanced:384581:1331664:1375298:1323083

- [39] Plotting the material density results, from Siemens' Doc Center, https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xd1128419:index_advanced:xd384581:xd1331664:xd1375298:xd1375301
- [40] Verification solutions, from Siemens' Doc Center, https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xd1128419:index_advanced:xd384581:xd1331664:xd1375298:xd1375303
- [41] Gibson, L., Ashby, M., (1999), *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press
- [42] Panesar, A., Abdi, M., Hickma, D., Ashcroft, I., (2018), "Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimization for Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing*, **19**, pp. 81-94
- [43] Fleck, N.A., Deshpande, V.S, Ashby, M.F, (2010), "Micro-architected materials: past, present and future", The royal society publishing, **466**, pp. 2495–2516
- [44] Brennan-Craddock, J., Brackett, D., Wildman, R., and Hague, R., (2012), "The design of impact absorbing structures for additive manufacture", *Journal of Physics: Conference Series*, **382**
- [45] Maskery, I., Hussey, A., Panesar, A., and more, (2016), "An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures", *Journal of Cellular Plastics*, **53**, Issue 2, pp. 151–165
- [46] Panesar, A., Ashcroft, I., Brackett, D., Wildman, R., Hague, R., (2017), "Design framework for multifunctional additive manufacturing: Coupled optimization strategy for structures with embedded functional systems", *Additive Manufacturing*, **16**, pp.98-106
- [47] Tang, Y., Zhao, Y.F, (2016), "A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance", *Rapid Prototyping Journal*, **22**, Issue 3, pp. 569-590
- [48] ASTM International, (2012), *Standard terminology for additive manufacturing technologies: designation F2792-12a*, West Conshohocken, PA: ASTM International
- [49] Tao, W., Leu, M.C., (2016), "DESIGN OF LATTICE STRUCTURE FOR ADDITIVE MANUFACTURING", *2016 International Symposium on Flexible Automation*, Cleveland, Ohio, U.S.A.
- [50] Costea, M., Mihai, A., Bilalis, N., (2012), "FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR INSOLE-SOLE PROTOTYPES", *4th International Conference on Advanced Materials and Systems – ICAMS 2012*

- [51] Mihai, A., Hortal, G., Costea, M., (2013), "Plantar Footprints Analysis - Case Study (Part 1)", *Leather and Footwear Journal*, **13**, Issue 3, pp. 201-210
- [52] Costea, M., Vasilescu, A.M., Hortal, G., Mihai, A., (2014), "Plantar Footprints Analysis - Case Study (Part 2)", *Leather and Footwear Journal*, **14**, Issue 4, pp. 243-250
- [53] Giacomozzi, C., Stebbins, J., (2017), "Anatomical masking of pressure footprints based on the Oxford Foot Model: validation and clinical relevance", *Gait & Posture*, **53**, pp.131-138
- [54] Costea, M., Sarghie, B., Mihai, A., Rezus, E., (2017), "Classification of the Elderly Foot Types Based on Plantar Footprints", *10th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2016*
- [55] Buldt, A., Allan, J., Landorf, K, Menz, H., (2018), "The relationship between foot posture and plantar pressure during walking in adults: A systematic review", *Gait & Posture*, **62**, pp. 56-67
- [56] Sosnovik, I., Oseledets, I., (2017), "Neural networks for topology optimization", University of Amsterdam, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow and Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia.

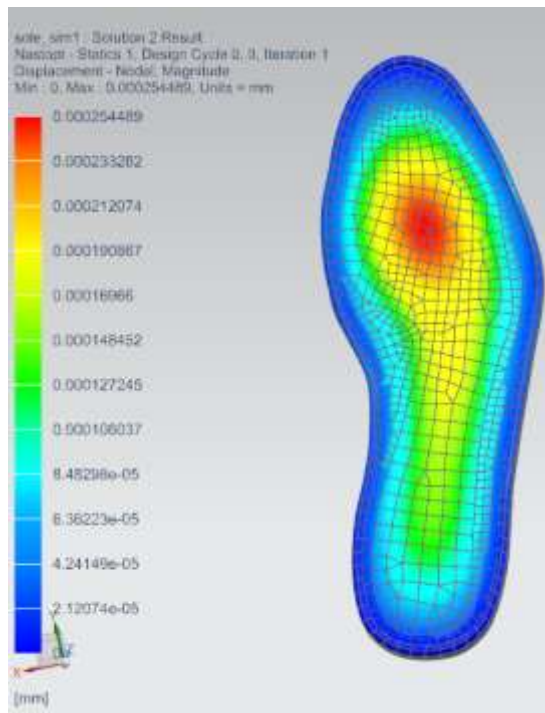
Παράρτημα Α'

SOL Number	SOL Name	Description
101	SESTATIC	Statics with options: Linear Heat Transfer, Alternate Reduction, Inertia Relief
103	SEMODES	Normal Modes
105	SEBUCKL	Buckling
106	NLSTATIC	Nonlinear Statics
107	SEDCEIG	Direct Complex Eigenvalues
108	SEDFREQ	Direct Frequency Response
109	SEDTRAN	Direct Transient Response
110	SEMCEIG	Modal Complex Eigenvalues
111	SEMFREQ	Modal Frequency Response
112	SEMTRAN	Modal Transient Response
114	CYCSTATX	Cyclic Statics with option: Alternate Reduction
115	CYCMODE	Cyclic Normal Modes
116	CYCBUCKL	Cyclic Buckling
118	CYCFREQ	Cyclic Direct Frequency Response
129	NLTRAN	Nonlinear Transient Response
144	AESTAT	Static Aeroelastic Response
145	SEFLUTTR	Aerodynamic Flutter
146	SEAERO	Aeroelastic Response
153	NLSCSH	Static Structural and/or Steady State Heat Transfer Analysis
159	NLTCSH	Transient Structural and/or Transient Heat Transfer Analysis
187	DDAM	DDAM analysis
190	DBTRANS	Database Transfer
200	DESOPT	Design Optimization with additional option for only Sensitivity Analysis
401	NLSTEP	Multistep, structural solution which supports a combination of static (linear or nonlinear) subcases and modal (real eigenvalue) subcases
601,N		Advanced nonlinear implicit
701		Advanced nonlinear explicit

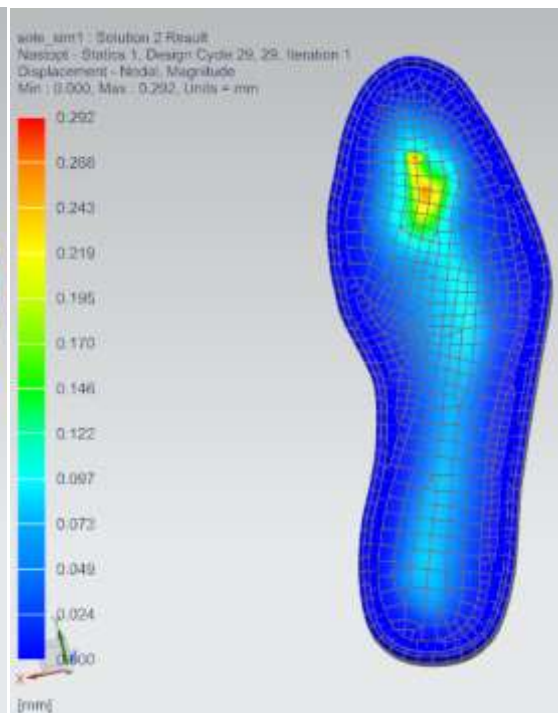
Παράρτημα Β'

Displacement - Nodal

Design cycle 0



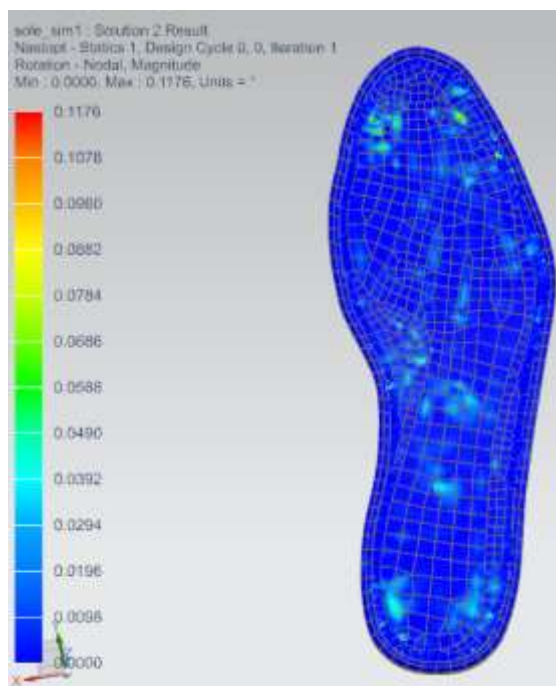
Design cycle 29



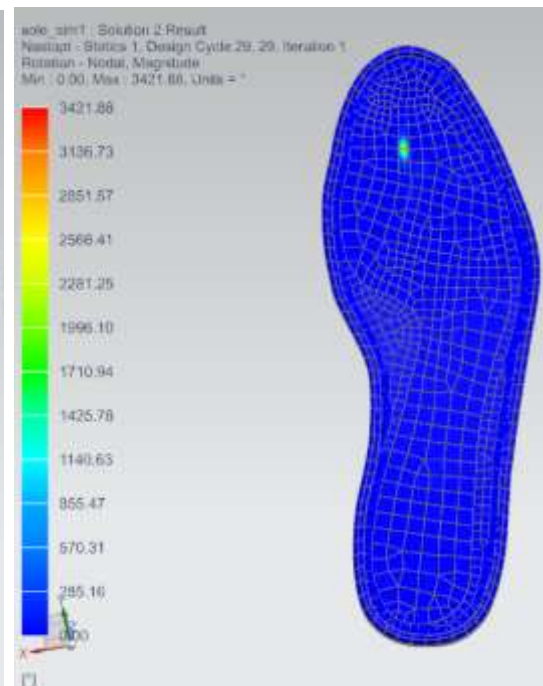
Rotation - Nodal

Stress - Elemental

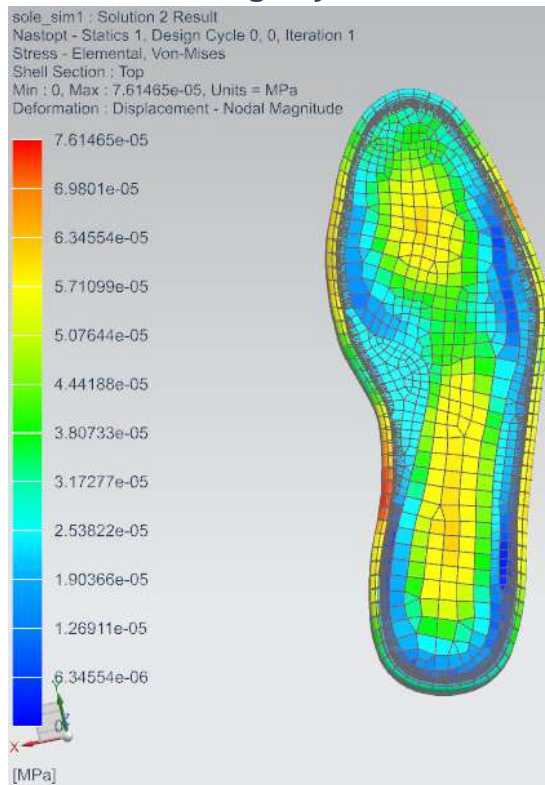
Design cycle 0



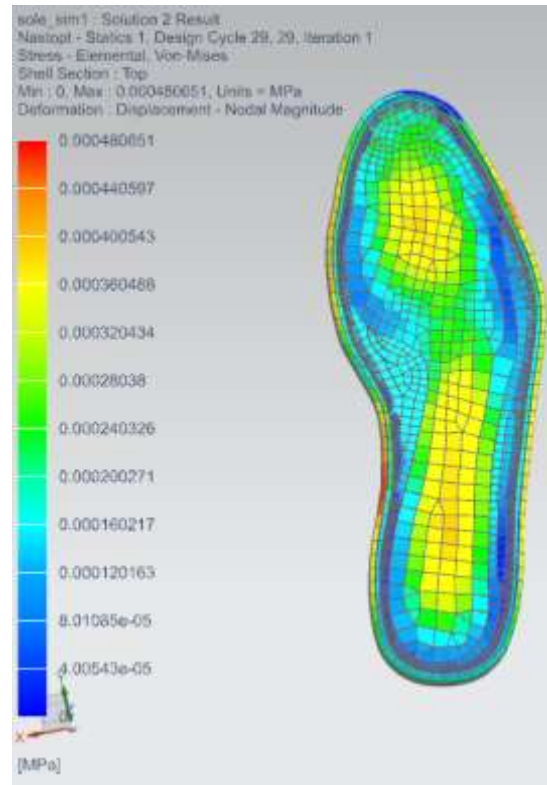
Design cycle 29



Design cycle 0

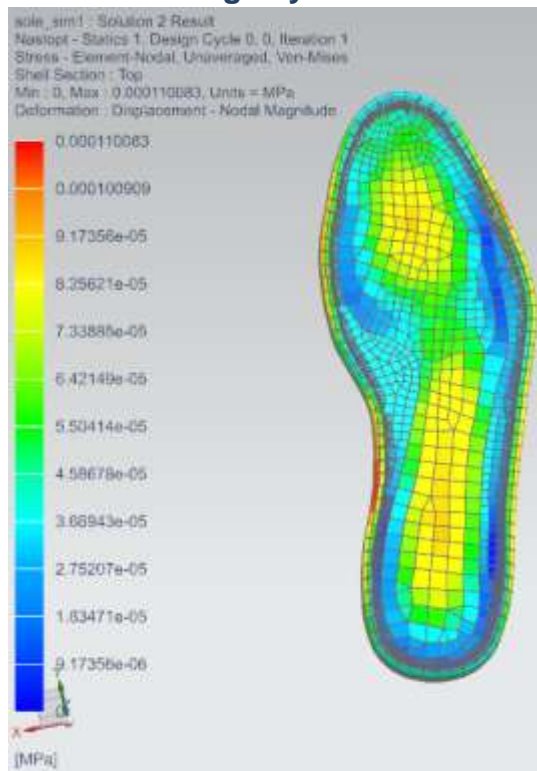


Design cycle 29

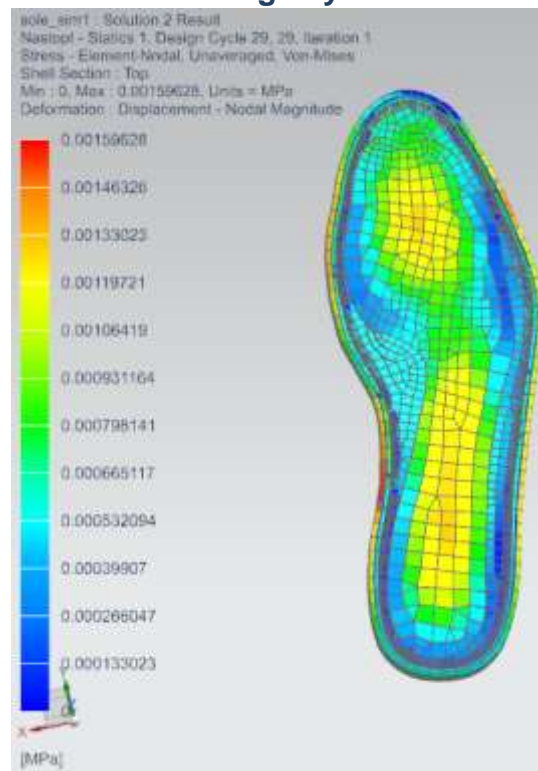


Stress – Element – Nodal

Design cycle 0



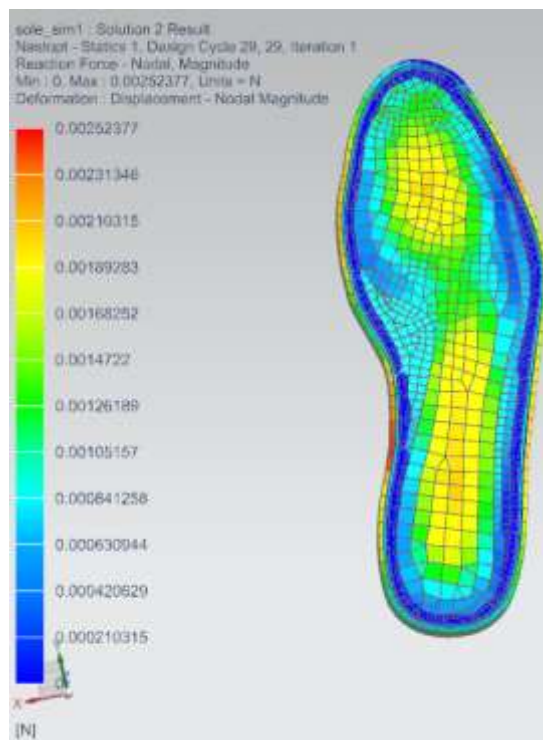
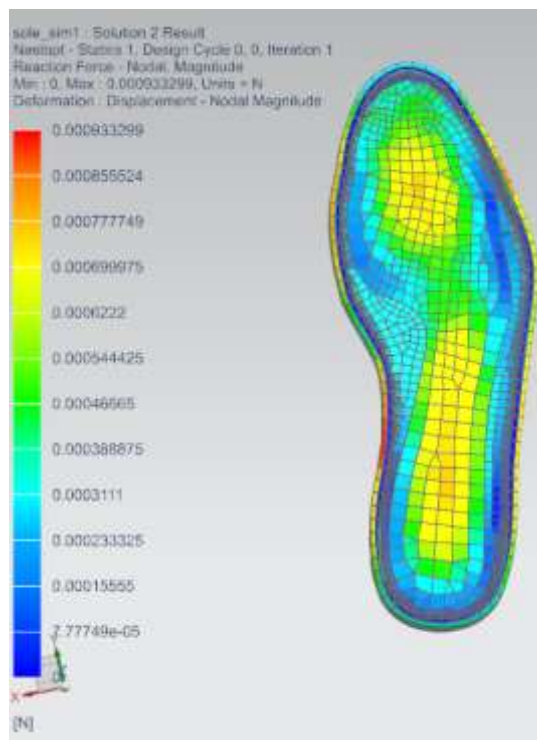
Design cycle 29



Reaction Force – Nodal

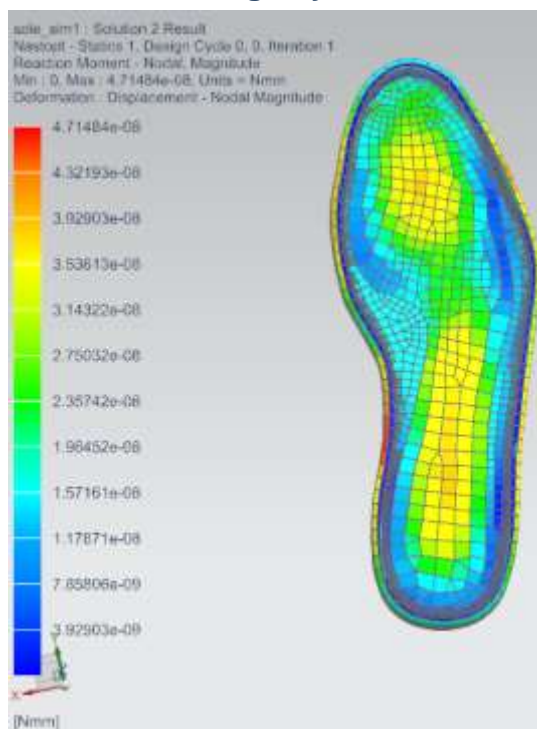
Design cycle 0

Design cycle 29

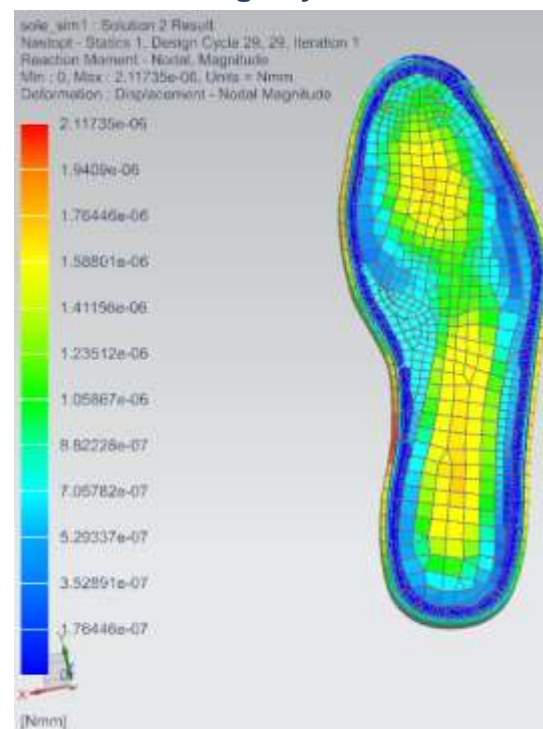


Reaction Moment – Nodal

Design cycle 0



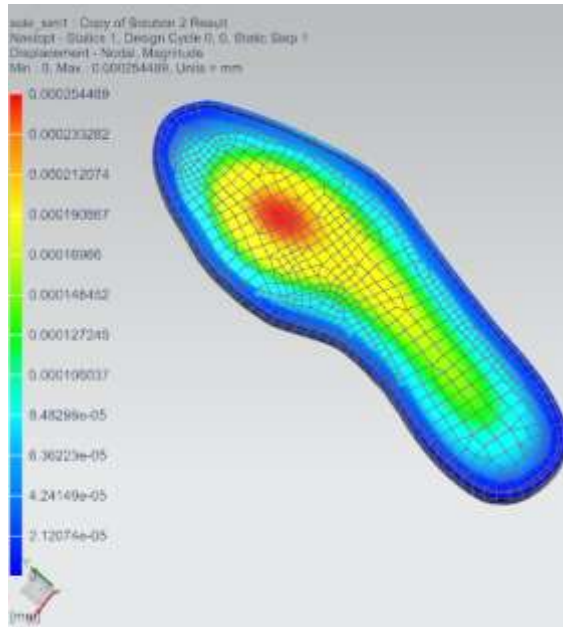
Design cycle 29



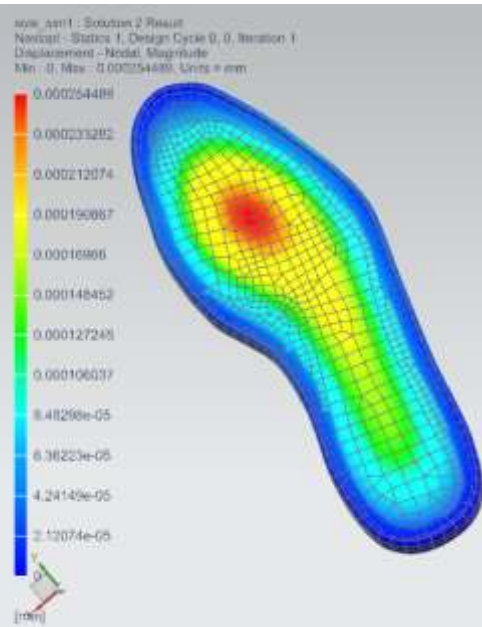
Παράρτημα Γ'

Displacement – Nodal

Copy of Solution - BCC

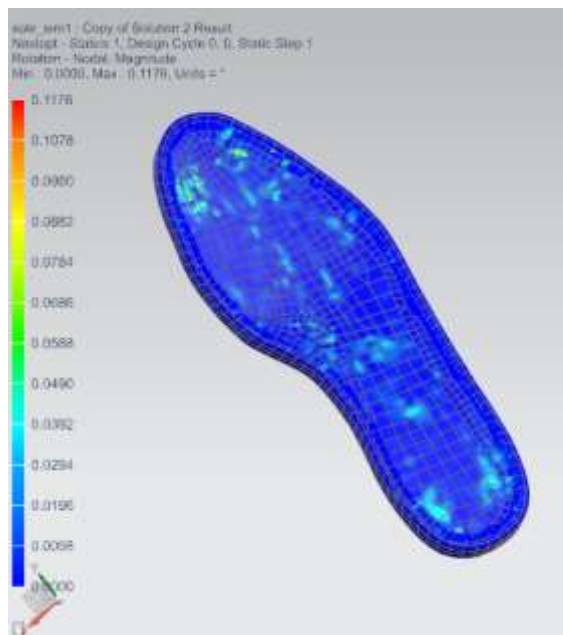


Solution - BCC

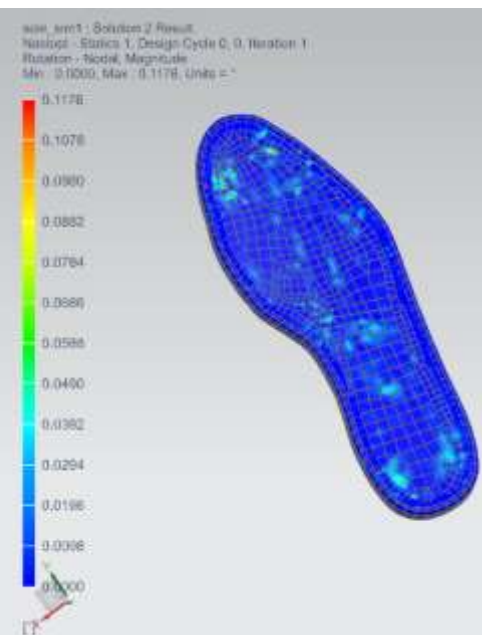


Rotation - Nodal

Copy of Solution - BCC

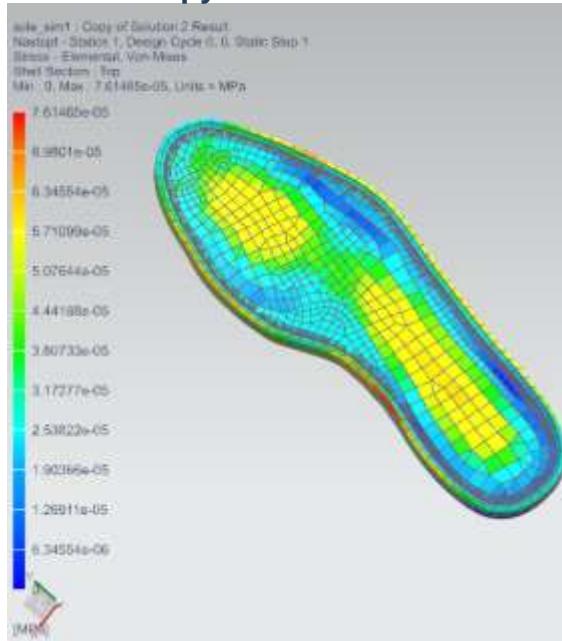


Solution - BCC

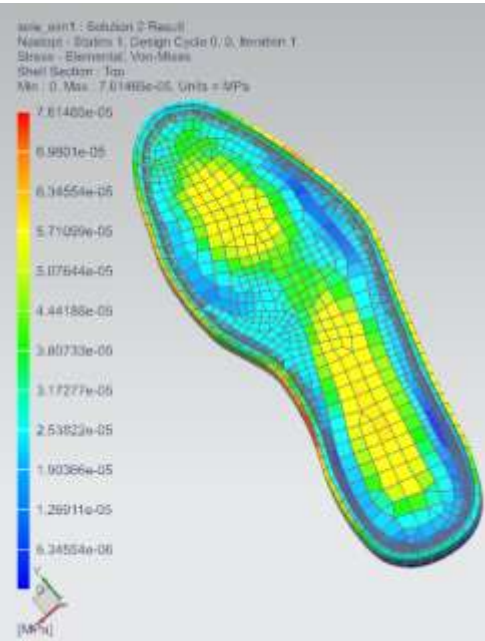


Stress – Elemental

Copy of Solution - BCC

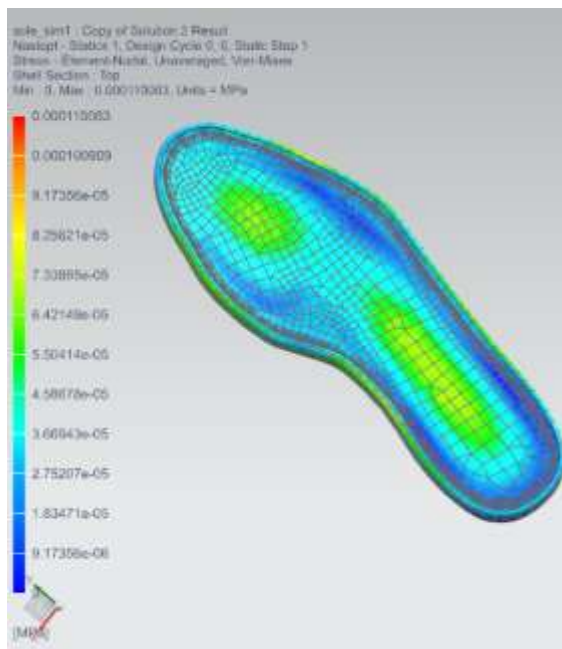


Solution - BCC

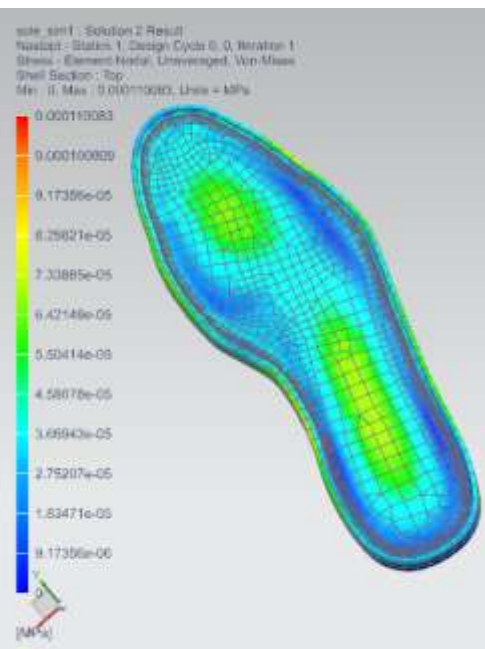


Stress – Element – Nodal

Copy of Solution - BCC



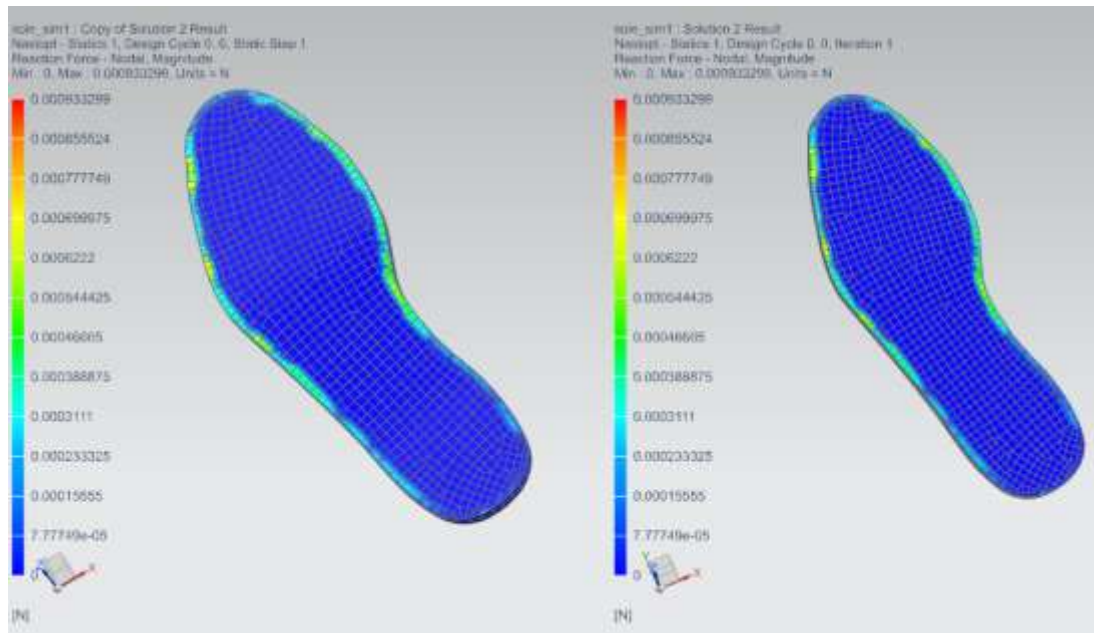
Solution - BCC



Reaction Force – Nodal

Copy of Solution - BCC

Solution - BCC



Reaction Moment – Nodal

Copy of Solution - BCC

Solution - BCC

