

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

**Σχεδιασμός και χύτευση ακριβείας μεταλλικών  
κυλινδρικών πλεγματοειδών δομικών στοιχείων**

Επιμέλεια: Δ. Βλαγκούλης

Επίβλεψη: Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα  
Ιούλιος 2012



National Technical University of Athens  
School of Mechanical Engineering  
Section of Manufacturing Technology

**Design and Precision casting of metallic  
cylindrical mesh-like structural elements**

Author: D. Vlagkoulis

Supervision : G.-C. Vosniakos, Associate Professor NTUA

Athens  
July 2012





### **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας οφείλω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Γ. Βοσνιάκο για τις συμβουλές και την καθοδήγηση του. Την διδάκτορα Α. Βασιλείου για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια κατασκευής της διπλωματικής αυτής εργασίας. Επιπλέον, στην εταιρία PV-engineering για την δωρεάν κατασκευή του καλουπιού το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και στον καθηγητή κ. Δ. Παντελή για την παραχώρηση του εργαστηρίου στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της χύτευσης. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την υπομονή και την έμπρακτη συμπαράσταση τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Βλαγκούλης Δημήτρης

## Περίληψη

Η ανάγκη για την κατασκευή προϊόντων τα οποία θα είναι ανταγωνιστικά τόσο ως προς την ποιότητα όσο και ως προς την τιμή καθιστά απαραίτητη την ανάγκη για σχεδιασμό και κατασκευή νέων δομικών στοιχείων τα οποία θα ανταποκρίνονται σε αυτές τις απαιτήσεις. Έτσι, χωρίζοντας την μελέτη για τέτοια δομικά στοιχεία σε 3 διαφορετικά μέρη έχουμε κατά σειρά το σχεδιασμό και την μελέτη, την προσομοίωση της χύτευσης ακριβείας με την οποία θα κατασκευαστούν τα δομικά στοιχεία και τέλος την κατασκευή πρωτοτύπων πλεγματοικών στοιχείων με χρήση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσα από τις προηγούμενες αναλύσεις.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας θα δούμε τον τρόπο σχεδιασμού των πλεγματοικών δομικών στοιχείων, τους βαθμούς ελευθερίας από τους οποίους αποτελούνται, καθώς επίσης και την ανάλυση που γίνεται ώστε να εξακριβωθεί η ακριβής μηχανική τους αντοχή. Μέσα από την μελέτη με πεπερασμένα μπορούμε να εντοπίσουμε την ακριβή αντοχή της κάθε γεωμετρίας, καθώς επίσης και την συγκέντρωση τάσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας αυτά τα δεδομένα είναι δυνατή η πραγματοποίηση παραμετρικής μελέτης με βάση την οποία μπορούμε να διαπιστώσουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή κάθε βαθμού ελευθερίας στο τελικό αποτέλεσμα.

Το δεύτερο μέρος αποτελείται από την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της διαδικασίας της χύτευσης και τον εντοπισμό των παραμέτρων που απαιτούνται ώστε να έχουμε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα κατά τη χύτευση της βέλτιστης γεωμετρίας, όπως αυτή προέκυψε από την προηγούμενη ανάλυση. Μέσα από την προσομοίωση της χύτευσης μπορούμε να εντοπίσουμε τα ελαττώματα τα οποία παρουσιάζονται κατά τη χύτευση όπως για παράδειγμα το πορώδες το οποίο αναπτύσσεται ή ακόμα τις παραμένουσες τάσεις και την πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται το χυτό.

Στο τρίτο μέρος της εργασίας θα δούμε τους τρόπους κατασκευής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρής κλίμακας τεμάχια. Θα ακολουθήσουμε όλη τη διαδικασία της χύτευσης ακριβείας, από την κατασκευή του κέρινου μοντέλου, μέχρι και την χύτευση του μετάλλου. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να κατασκευαστεί το μοντέλο, υιοθετώντας έναν modular τρόπο κατασκευής για την χύτευση του κεριού συνδυάζοντας το μικρό κόστος με την σχετικά καλή ακρίβεια.

## Abstract

The need for more competitive products in terms of price and quality is making necessary the need of design and manufacturing new mesh-like structural elements that will meet these demands. The current essay is dividing the study of these elements in three major parts the design and analysis, the simulation of the investment casting method, with which the elements are going to be manufactured and finally the manufacture of prototype structural elements based on the findings of the previous analysis

In the first part of this essay we will find out the design methods of the mesh-like elements, the degrees of freedom that are consisted of, as well as the analysis method that is going to be used in order to find out the mechanical resistibility of the structures. Through the finite element analysis of the structure we can find out, not only the resistibility, but also the stress concentration of the design. Subsequently, using that data through designing appropriate the following experiments we can find out the exact effect of each degree of freedom in the final result.

The second part includes the finite element simulation of the investment casting process and the discover of the optimal values of the casting parameters in order to achieve a perfect result of the best geometry as it emerged through the previous analysis. Through the casting simulation it becomes possible to identify possible flaws such as the developing porosity or even the effective stress and mesh deformation that occurs to the cast.

In the third part we are going to discover ways of manufacturing that could be used to create small scale parts. We will see the entire process of the investment casting from the creation of the wax model to the metal casting. Special emphasis will be given in the ways that the wax model can be created adopting a modular way of creating small parts combining the low cost with the relatively good quality.



## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	11
1.1. Γενικά.....	11
1.2. Design of Experiment (DOE).....	14
1.2.1. Ιστορική αναδρομή .....	15
1.2.2. Βασικές αρχές σχεδιασμού πειραμάτων .....	15
1.2.3. Βαθμοί Ελευθερίας (Degrees of freedom).....	17
1.2.4. Αλληλεπίδραση (Confounding) .....	17
1.3. Χρησιμοποιούμενο Υλικό.....	18
1.3.1. Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	18
1.3.2. Ιδιότητες .....	19
1.3.3. Κράματα Χύτευσης Αλουμινίου .....	20
1.4. Περιοχές συγκέντρωσης τάσης .....	25
2. Σχεδιασμός και ανάλυση .....	27
2.1. Σχεδιασμός .....	27
2.2. Ανάλυση.....	32
2.2.1. Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία .....	32
2.2.2. Συσχετισμός Τάσης – Παραμόρφωση.....	33
2.2.3. Παραδοχές του γραμμικού ελαστικού μοντέλου .....	33
2.2.4. Μοντελοποίηση.....	34
2.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης .....	36
2.4. Παραμετρική ανάλυση .....	50
3. Χύτευση.....	65
3.1. Εισαγωγή.....	65
3.1.1. Ιστορική Αναδρομή .....	65
3.2. Τεχνικές Χύτευσης.....	66
3.2.1. Χύτευση Χαμένου Κεριού.....	67
3.2.2. Χύτευση εν Κενώ .....	67
3.3. Αριθμητική Προσομοίωση Χύτευσης.....	71

3.3.1.	Εισαγωγή στο ProCast .....	75
3.3.2.	Προσομοίωση πλήρωσης .....	79
3.3.3.	Ο μηχανισμός της στερεοποίησης .....	94
3.3.3.1.	Στερεοποίηση κατά τη χύτευση σε καλούπι .....	94
3.3.3.2.	Ελαττώματα κατά τη στερεοποίηση .....	97
3.3.4.	Προσομοίωση στερεοποίησης .....	98
3.4.	Ανάλυση τάσεων (stress analysis) .....	106
3.4.1.	Παραμένουσες τάσεις .....	109
3.4.2.	Θερμή ρωγμάτωση .....	113
3.4.3.	Παραμόρφωση .....	118
4.	Κατασκευή .....	121
4.1.	Γενικά .....	121
4.2.	Κατασκευή μοντέλου .....	121
4.2.1.	Κατασκευή με το χέρι .....	122
4.2.2.	Κατασκευή με ταχεία προτυποποίηση .....	127
4.3.	Κατασκευή γύψινου καλουπιού .....	135
4.4.	Αποκέρωση – Ψήσιμο .....	139
4.5.	Χύτευση .....	141
4.6.	Καθαρισμός Χυτού .....	142
4.7.	Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	143
5.	Συμπεράσματα .....	150
5.1.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	151
	Παράρτημα Α .....	153
	Βιβλιογραφία .....	159

# 1. Εισαγωγή

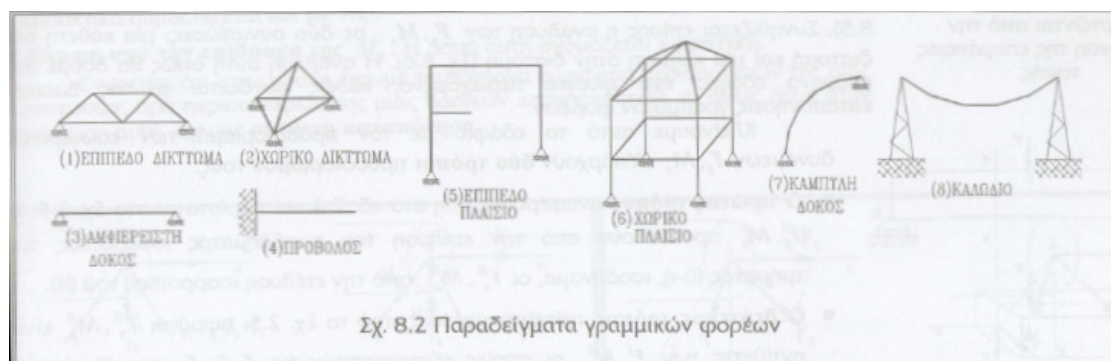
## 1.1. Γενικά

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο της το σχεδιασμό και την κατασκευή δομικών στοιχείων τύπου πλέγματος τα οποία θα μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών με στόχο την αντικατάσταση των υπαρχόντων ολόσωμων φορέων. Απώτερος σκοπός είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή μηχανολογικών ή άλλου είδους κατασκευών οι οποίες θα προσφέρουν καλύτερη αναλογία αντοχής προς βάρος. Με άλλα λόγια, σκοπός είναι τα δομικά στοιχεία που θα προκύψουν από αυτή τη διαδικασία να είναι ελαφρύτερα από τα υπάρχοντα, προσφέροντας ταυτόχρονα μεγαλύτερη αντοχή στις καταπονήσεις.

*Κάθε στερεό σώμα που, όντας στηριγμένο κατάλληλα, μπορεί να «φέρει», σε ισορροπία, ορισμένα εξωτερικά φορτία ονομάζεται φορέας.*

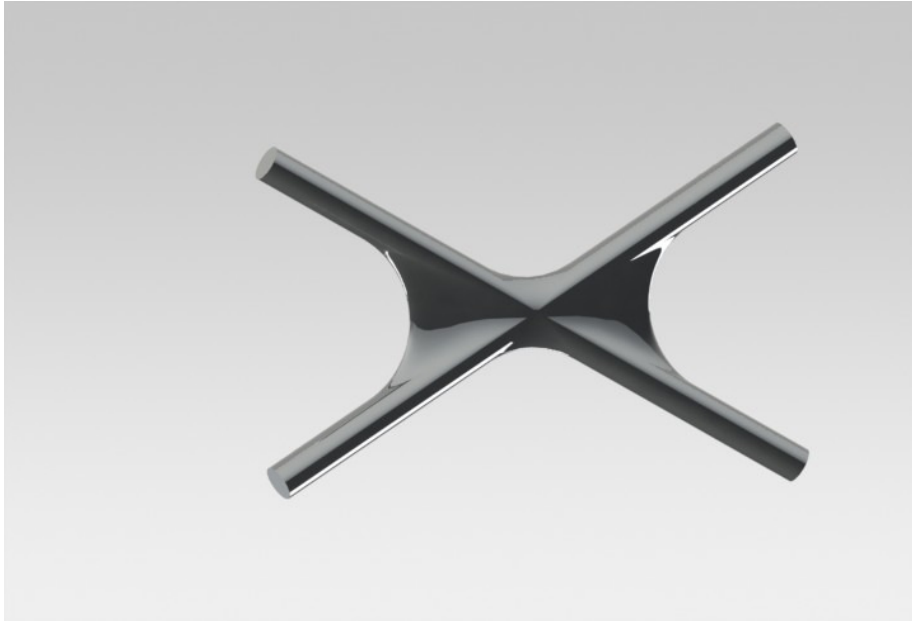
Το σύνολο των φορέων αποτελείται από :

- **Γραμμικοί φορείς:** έχουν το σχήμα ευθύγραμμου ή καμπύλου τμήματος.
- **Επιφανειακοί φορείς:** δίσκοι, πλάκες και κελύφη
- **Τρισδιάστατοι φορείς:** τρισδιάστατο σώμα οποιουδήποτε σχήματος



Εικόνα 1: Παραδείγματα γραμμικών φορέων

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα ασχοληθούμε με τους γραμμικούς φορείς και κατά πόσο αυτοί μπορούν να αντικατασταθούν με δομικά στοιχεία τύπου πλέγματος.



Εικόνα 2: Παράδειγμα δομικού πλέγματος

Πέρα από το πλεονέκτημα του βάρους που αναφέρθηκε προηγουμένως η χρησιμοποίηση αυτών έναντι ολόκληρων κυλίνδρων παρέχει επιπλέον πλεονεκτήματα όπως είναι η ύπαρξη «τρυπών» από τις οποίες μπορούν να περάσουν



Εικόνα 3: Σκελετός ποδηλάτου από στοιχεία τύπου πλέγματος

καλώδια, απαραίτητα για την τροφοδότηση ρεύματος ή για τη σύνδεση διαφόρων ηλεκτρονικών μονάδων, για παράδειγμα τα μέρη από τα οποία αποτελείτε ένας ρομποτικός βραχίονας. Ή ακόμα, μικρότερη αεροδυναμική αντίσταση, καθιστώντας

τα κατάλληλα για εφαρμογές όπως ελαφριά μεταφορικά μέσα π. χ. ποδήλατα ή μεγάλες κατασκευές (γέφυρες).

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την εργασία αυτή χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη:

A. Το σχεδιασμό της γεωμετρίας η οποία θα αντικαταστήσει τους γραμμικούς φορείς (CAD) και διερεύνηση της μηχανικής της αντοχής (CAE). Καθώς και σύγκριση της με τα υπάρχοντα δομικά στοιχεία.

B. Την προσομοίωση της διαδικασίας της χύτευσης για την βέλτιστη δυνατή γεωμετρία και διερεύνηση των παραμέτρων της χύτευσης που πρέπει να χρησιμοποιηθούν με στόχο την κατασκευή του τελικού δοκιμίου το οποίο δεν θα φέρει αστοχίες και ατέλειες από την χύτευση (CAE).

C. Την κατασκευή με χύτευση ενός πρωτοτύπου δοκιμίου βάση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση της χύτευσης.



Εικόνα 4: Κύλινδρος κατασκευασμένος από δομικά στοιχεία τύπου πλέγματος

## 1.2. Design of Experiment (DOE)

Ο όρος Design of experiments αναφέρεται στις διαδικασίες του προγραμματισμού, σχεδιασμού και ανάλυσης ενός πειράματος έτσι, ώστε να προκύψουν αξιόπιστα και αντικειμενικά αποτελέσματα. Για να επιτευχθούν στατιστικά σημαντικά στοιχεία από ένα πείραμα, είναι απαραίτητο στη διαδικασία του πειράματος να ενσωματωθούν απλές αλλά σημαντικές στατιστικές διαδικασίες.

Κατά το σχεδιασμό ενός πειράματος, ο ερευνητής συχνά ενδιαφέρεται για την επίδραση που έχουν ορισμένες διαδικασίες ή επιδράσεις (μεταβλητές) σε ορισμένα αντικείμενα (πειραματικές μονάδες), οι οποίες μπορεί να είναι π.χ. μεμονωμένα άτομα, ομάδες ατόμων, φυτά, ζώα, υλικά. Είναι, επομένως, εμφανές ότι ο σχεδιασμός ενός πειράματος αποτελεί μια διαδικασία με μεγάλο εύρος εφαρμογής σε όλα τα φυσικά και επιστημονικά πεδία.

Για να κατανοήσουμε πλήρως το τι σημαίνει ο σχεδιασμός ενός πειράματος, είναι απαραίτητο να αποκτήσουμε μία πλήρη εικόνα της διαδικασίας που ακολουθείται. Η διαδικασία αυτή είναι ο μετασχηματισμός μιας σειράς εισόδων σε εξόδους. Στα πλαίσια της μηχανολογίας, εισόδοι είναι παράγοντες οι μεταβλητές όπως άνθρωποι, υλικά, μεθοδολογίες, περιβαλλοντολογικοί παράγοντες, μηχανές κ.τ.λ. και έξοδοι μπορεί να είναι επιδόσεις, χαρακτηριστικά ή η ποιότητα ενός προϊόντος. Σε μερικές περιπτώσεις, ως έξοδος, μπορεί να ληφθούν αντιδράσεις σε μία κατάσταση.

Όταν πραγματοποιούμε ένα σχεδιασμένο πείραμα, μεταβάλλουμε τις μεταβλητές εισόδου με σκοπό να παρατηρήσουμε τις αντίστοιχες μεταβολές στις μεταβλητές εξόδου. Οι πληροφορίες που αποκομίζονται από αυτή τη διαδικασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση της απόδοσης των προϊόντων, τη μείωση του μετάλλου που αποβάλλεται από τις κατεργασίες, το χρόνο διάρκειας των κατεργασιών, τη μείωση του κύκλου ανάπτυξης και βελτίωσης ενός προϊόντος, τη μείωση των διαφορών μεταξύ των προϊόντων κ.τ.λ. .

### 1.2.1. Ιστορική αναδρομή

Το 1747, ο χειρουργός του πλοίου HMS Salisbury, James Lind εκτέλεσε μία σειρά ελεγχόμενων πειραμάτων με σκοπό την ανάπτυξη θεραπείας για το σκορβούτο. Ο Lind επέλεξε 12 άτομα από το καράβι, τα οποία υπέφεραν όλα από σκορβούτο. Ο Lind περιόρισε την επιλογή του σε άτομα τα οποία «ήταν όσο το δυνατόν πιο όμοια», εφάρμοσε δηλαδή αυστηρά κριτήρια έτσι, ώστε να αποφύγει τις μεγάλες διαφορές. Χώρισε τα άτομα σε 6 ομάδες των 2, και έδωσε στο κάθε ζευγάρι διαφορετικά συμπληρώματα διατροφής επί πλέον της συνηθισμένης τους δίαιτας για 2 εβδομάδες.

Τα άτομα τα οποία πήραν τα εσπεριδοειδή φρούτα συνήλθαν σημαντικά μέσα σε διάστημα μιας εβδομάδας. Ένας από αυτούς επέστρεψε στα καθήκοντα του μέσα σε έξι μέρες. Οι υπόλοιποι παρουσίασαν κάποια βελτίωση, αλλά τίποτα σε σύγκριση με τα εσπεριδοειδή φρούτα, τα οποία αποδείχτηκαν σημαντικά ανώτερα από τις υπόλοιπες θεραπείες.

### 1.2.2. Βασικές αρχές σχεδιασμού πειραμάτων

Οι βασικές αρχές του σχεδιασμού πειραμάτων είναι η σύγκριση (comparison), η τυχαιότητα (randomization) και η επαναληψιμότητα (replication). Αυτές οι αρχές χρησιμοποιούνται κατά το σχεδιασμό πειραμάτων έτσι ώστε να περιορίσουν ή και να εξαλείψουν αν είναι δυνατόν τις προκαταλήψεις που δημιουργούνται κατά την εκτέλεση ενός πειράματος. Είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι οι προκαταλήψεις μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένα βέλτιστα αποτελέσματα ή σε μερικές περιπτώσεις να επικαλύψουν την επίδραση που μπορούν να έχουν μερικές πολύ σημαντικές παράμετροι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μη σωστή κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας καθώς και την παράβλεψη των βασικών στοιχείων τα οποία θα μπορούσαν να επιφέρουν βελτίωση στην διαδικασία.

➤ *Σύγκριση*

Σε ορισμένα επιστημονικά πεδία δεν είναι δυνατόν να υπάρχουν ανεξάρτητες μετρήσεις που να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένα στάνταρντ. Συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων λύσεων είναι πολύ πιο αξιόλογες και συχνά προτιμούνται. Συχνά οι συγκρίσεις γίνονται με βάση κάποιον επιστημονικό πρότυπο ή κάποια άλλη εφαρμογή η οποία χρησιμοποιείται ως βάση σύγκρισης.

➤ *Τυχειότητα*

Κατά το σχεδιασμό πειραμάτων, υπάρχουν μεταβλητές, όπως για παράδειγμα μεταβολές της τάσης του ρεύματος, λάθη των χειριστών, διακυμάνσεις στην θερμοκρασία και την υγρασία κ.τ.λ. οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα ενός πειράματος καθώς είναι συχνά ακριβό ή δύσκολο να ελεγχθούν. Τέτοιοι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς τα πειραματικά αποτελέσματα και επομένως πρέπει είτε να περιοριστούν είτε να εξαλειφτούν τελείως. Η τυχειότητα που εφαρμόζεται σε ένα πείραμα, αποτελεί μία μέθοδο στην οποία μπορούμε να βασιστούμε έτσι, ώστε να μειώσουμε την επίδραση αυτών των προκαταλήψεων. Με τη σωστή τυχαιοποίηση του πειράματος, μπορούμε να εξισορροπήσουμε την επίδραση των μεταβλητών που προκαλούν θόρυβο.

➤ *Επαναληψιμότητα*

Επαναληψιμότητα είναι η διαδικασία της εκτέλεσης των πειραματικών διαδικασιών με τυχαία σειρά. Επαναληψιμότητα σημαίνει την επανάληψη ολόκληρου ή ενός μέρος ενός πειράματος με μεταβολή ενός ή περισσότερων παραγόντων. Η επαναληψιμότητα περιλαμβάνει δύο βασικές ιδιότητες. Η πρώτη ιδιότητα αφορά την δυνατότητα που παρέχεται στον πειραματιστή να κάνει μία καλή εκτίμηση της επίδρασης του σφάλματος που επήλθε λόγω του θορύβου. Η δεύτερη ιδιότητα επιτρέπει στον πειραματιστή να αποκτήσει μία πιο σαφή εικόνα της σχέσης παραγόντων/αλληλεπίδρασης. Εάν ο αριθμός των επαναλήψεων του πειράματος είναι μία, τότε δεν είμαστε σε θέση να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των μεταβλητών πάνω σε αυτό. Μόνο με αρκετά μεγάλο πλήθος



επαναλήψεων μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της σχέσης παραγόντων/αλληλεπίδρασης.

Όμως, οι πολλές επαναλήψεις συμβάλουν σημαντικά στο χρόνο διεξαγωγής ενός πειράματος. Επιπλέον, εάν τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση του πειράματος είναι ακριβά, τότε η επαναληψιμότητα μπορεί να οδηγήσει σε απαγορευτικά κόστη.

### **1.2.3. Βαθμοί Ελευθερίας (Degrees of freedom)**

Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας σε ένα σύστημα είναι το πλήθος των μεταβλητών του τελικού υπολογισμού οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν ελεύθερα. Ειδικότερα, στα μαθηματικά βαθμοί ελευθερίας είναι οι διαστάσεις ενός τυχαίου διανύσματος ή κατ' ουσίαν ο αριθμός των ελεύθερων στοιχείων: πόσα στοιχεία πρέπει να είναι γνωστά ώστε το διάνυσμα να είναι πλήρως καθορισμένο.

### **1.2.4. Αλληλεπίδραση (Confounding)**

Με τον όρο αλληλεπίδραση εννοούμε την συνδυαστική επιρροή που έχουν δύο ή περισσότερες μεταβλητές στο μετρούμενο αποτέλεσμα. Με άλλα λόγια, ο παρατηρητής δεν μπορεί να εκτιμήσει την επίδραση κάθε μεταβλητής ανεξάρτητα.

Μείωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων παραγόντων μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση του αριθμού και των ειδών σύγκρισης που πραγματοποιούνται σε μία ανάλυση. Τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης είναι απίθανο να συμβούν και να συμπεριφερθούν παρόμοια σε διάφορες δοκιμές και περιβάλλοντα. Τέλος, είναι δυνατόν να γίνει μελέτη σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του πειράματος και του περιβάλλοντος. Οι πληροφορίες που αφορούν τις περιβαλλοντολογικές μεταβλητές μπορούν να προσδιοριστούν και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν ώστε να βρεθεί η επίδραση των μεταβλητών που εξετάζουμε.

### 1.3. Χρησιμοποιούμενο Υλικό

Το **αργίλιο** ή **αλουμίνιο** (Aluminium) είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο **Al** και ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο στοιχείο που ανήκει στην ομάδα III<sub>A</sub> (13) του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο (3<sup>ο</sup>) πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού. Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου είναι ο βωξίτης.

Το μεταλλικό αλουμίνιο έχει (φαινομενικά) μεγάλη ικανότητα στο να αντιστέκεται στη διάβρωση. Αυτό στην ουσία συμβαίνει γιατί με την έκθεση του μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου του, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης). Επίσης, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων, έγινε στρατηγικό μέταλλο για την αεροδιαστημική (και όχι μόνο) βιομηχανία. Είναι, επίσης, εξαιρετικά χρήσιμο στη χημική βιομηχανία, τόσο αυτούσιο ως καταλύτης, όσο και με τη μορφή διαφόρων ενώσεών του.

#### 1.3.1. Σύντομη ιστορική αναδρομή

Οι αρχαίοι Έλληνες και Ρωμαίοι γνώριζαν τη στυπτηρία (διπλό θεικό άλας αργιλίου και καλίου) και την χρησιμοποιούσαν. Επίσης, χρησιμοποιούσαν αργιλοπυριτικές ενώσεις στην κεραμική. Το 1761 ο Γκιτόν ντε Μορβό (Guyton de Morveau) πρότεινε το όνομα «αλουμίνα» για το οξείδιο του αργιλίου (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Το αργίλιο ανακαλύφθηκε, ως στοιχείο, το 1808 από τον Σερ Χάμφρεϊ Ντέιβι, ο οποίος και του έδωσε το όνομα, αρχικά «αλούμιο» και αργότερα «αλουμίνιο», αφού το στοιχείο προερχόταν από το οξείδιό του, την αλουμίνα. Το 1825 ο Δανός επιστήμονας Χανς Κρίστιαν Έρστεντ (Hans Christian Ørsted) απομόνωσε πρώτη φορά το αργίλιο, όταν κατεργάστηκε άνυδρο χλωριούχο αργίλιο με αμάλαμα καλίου<sup>[2]</sup>. Το 1827 περιγράφηκε αναλυτικά από τον Βέλερ (Woehler) μία

μέθοδος παρασκευής του αργιλίου σε σκόνη από άνυδρο χλωριούχο αργίλιο και κάλιο<sup>[2]</sup>.

Ο Βέλερ γενικά πιστώνεται την απομόνωση του αργιλίου, αλλά επίσης και ο Έρστεντ πρέπει επίσης ν' αναφερθεί ως αυτός που το ανακάλυψε. Επιπλέον ο Pierre Berthier ανακάλυψε ότι περιέχεται αλουμίνιο στο βωξίτη και κατόρθωσε επιτυχημένα την εξόρυξη του μετάλλου από το ορυκτό. Το 1854 ο Ανρί Σεν-Κλερ Ντεβίλ (Henri St-Claire Deville), βασισμένος στις εργασίες του Βέλερ επινοεί την πρώτη εμπορική μέθοδο παραγωγής του. Αρχικά, το κόστος του αργιλίου ήταν υψηλότερο από αυτό του χρυσού και του λευκόχρυσου. Γι' αυτό το λόγο σε γεύματα του Ναπολέοντος Γ' της Γαλλίας, οι πιο σημαντικοί καλεσμένοι έτρωγαν σε πιάτα από αργίλιο.

Το 1886 ήρθε η μεγάλη επανάσταση στην παραγωγή αλουμινίου, οπότε εφευρέθηκε η μέθοδος Hall-Heroult. Σε αυτή τη μέθοδο, τήγμα μίγματος κρυολίθου (φθοριούχο άλας του νατρίου και του αργιλίου:  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) αργιλίου και οξειδίου του αργιλίου (αλουμίνα:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ηλεκτρολύεται με συνεχές ρεύμα. Το τηγμένο αργίλιο συγκεντρώνεται στο βυθό του ηλεκτρολυτικού λουτρού. Όλο το αλουμίνιο που παράγεται στον κόσμο παράγεται με αυτή τη μέθοδο.

Το 1889 ο Bayer επινόησε μία μέθοδο καθαρισμού του βωξίτη προς παρασκευή αλουμίνας, με τη χρήση καυστικού νατρίου. Έτσι, άνοιξε ο δρόμος για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αλουμινίου. Το 1900 η παγκόσμια παραγωγή αλουμινίου ήταν 8000 τόνοι. Έκτοτε αυξήθηκε με πολύ μεγάλους ρυθμούς, για να φτάσει το 1999 τα 24 εκατομμύρια τόνους.

### 1.3.2. Ιδιότητες

Οι ιδιότητες που κάνουν το αλουμίνιο τόσο σημαντικό για την βιομηχανία είναι το χαμηλό του ειδικό βάρος, η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις και η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παθητικοποίησης. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Με την προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνονται κατά πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες. Το αλουμίνιο υφίσταται εύκολα κατεργασία με χύτευση και με αφαίρεση υλικού. Παρουσιάζει, επίσης, πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα.

### 1.3.3. Κράματα Χύτευσης Αλουμινίου

Η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά ενός κράματος χύτευσης διαφέρουν από εκείνα των κραμάτων διαμόρφωσης. Τα χυτά εξαρτήματα έχουν οριστική και καθορισμένη μορφή και δεν υφίστανται πλέον καμία πλαστική παραμόρφωση.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξασφαλίζει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι: η καλή χυτευσιμότητα, η απουσία ρωγματώσεων και η ομοιογενής κατανομή του πορώδους (ατέλειες που μπορεί να προκληθούν λόγω της συστολής του μετάλλου κατά τη στερεοποίηση), η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων, η καλή αντοχή εν θερμώ και η καλή αντοχή σε διάβρωση.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες τήξης των κραμάτων του αλουμινίου, επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των καλουπιών χύτευσης που πραγματοποιείται με τρεις τρόπους:

- Χύτευση σε άμμο. Η μέθοδος εφαρμόζεται για την παραγωγή μικρής ποσότητας ομοίων χυτών αντικειμένων, πολύπλοκων εξαρτημάτων ή αντικειμένων ιδιαίτερης δομής.
- Χύτευση σε μεταλλικό τύπο. Το κράμα χυτεύεται με τη βοήθεια της βαρύτητας ή χαμηλής πίεσης. Με τη μέθοδο αυτή, τα παραγόμενα χυτά παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο χύτευσης. Ωστόσο, η μέθοδος αντενδείκνυται στην περίπτωση κατασκευής εξαρτημάτων, εργαλείων ή αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας.
- Χύτευση υπό πίεση. Με τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται λεπτόκοκκα χυτά, με λείες επιφάνειες και γεωμετρική ακρίβεια.

Γενικά, οι επιτυγχανόμενες μικροδομές και, κατ' επέκταση, οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών εξαρτώνται, κυρίως, από την ταχύτητα στερεοποίησης, άρα και από τη μέθοδο χύτευσης.

Τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες στοιχείων κραμάτωσης, απ' ό,τι τα κράματα διαμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά σχηματίζουν ευτηκτικά, μειώνοντας έτσι, τις θερμοκρασίες χύτευσης. Τα κυριότερα κράματα χύτευσης αλουμινίου είναι:

### **Κράματα αλουμινίου της σειράς 2xx.x**

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, τα οποία χρησιμοποιούνται, πλέον, σπάνια, λόγω της χαμηλής μηχανικής τους αντοχής και της κακής αντοχής σε διάβρωση.

### **Κράματα αλουμινίου της σειράς 3xx.x**

Πρόκειται για κράματα Al-Si, κράματα Al-Si-Mg και κράματα Al-Si-Cu. Τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα είναι τα πρώτα. Αυτά περιέχουν πυρίτιο, σε ποσοστό 5-20%, αν και τις περισσότερες φορές προτιμούνται αυτά που έχουν ευτηκτική ή υποευτηκτική σύσταση, όπως για παράδειγμα το κράμα ALPAX, με 13%Si. Τα κράματα αυτά χυτεύονται εύκολα και έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση.

Προσθήκη Mg, σε ποσοστό 0.3-1%, ή Cu, σε ποσοστό 3-5%, βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al-Si. Κράματα Al-Si-Cu, η περιεκτικότητα των οποίων σε Si είναι γειτονική της ευτηκτικής σύστασης (12.7%Si), παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά εν θερμώ και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εμβόλων στις μηχανές εσωτερικής καύσης.

Η ρύθμιση των ιδιοτήτων των κραμάτων αυτών επιτυγχάνεται με συνδυασμό διαφόρων μηχανισμών: με τη δημιουργία στερεού διαλύματος, α φάσης, με τη διασπορά φάσης β και με τη ρύθμιση των συνθηκών στερεοποίησης (επίδραση στο μέγεθος των κόκκων και στο είδος των σχηματιζόμενων ευτηκτικών). Βιομηχανικά, η εκλέπτυνση των κόκκων γίνεται με την προσθήκη  $TiB_2$ , ενώ η μεταβολή των ευτηκτικών, με προσθήκη Na, με τη μορφή NaF, ή Sr.

### **Κράματα αλουμινίου της σειράς 5xx.x**

Πρόκειται για κράματα Al-Mg. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η εξαιρετική τους αντοχή σε θαλάσσιο περιβάλλον, - στην ατμόσφαιρα ή μέσα σε θαλασσινό νερό. Έχουν καλή κατεργασιμότητα, αλλά μέτρια χυτευσιμότητα.

### **Κράματα αλουμινίου της σειράς 6xx.x**

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με μαγνήσιο και πυρίτιο τα οποία εξελίχθηκαν γύρω στο 1935. Τέτοιου είδους κράματα είναι κατάλληλα για συγκολλήσεις, διελάσεις και σφυρηλατήσεις. Έχουν ευρεία χρήση, ιδιαίτερα στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική τεχνολογία, αλλά το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορούν να επεξεργαστούν μέσα από τη διαδικασία της χύτευσης.

### Κράματα αλουμινίου της σειράς 7xx.x

Πρόκειται για κράματα Al-Zn και κράματα Al-Zn-Mg. Αυτά χυτεύονται δύσκολα, αλλά έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Επιπλέον, υφίστανται φυσική γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι αυτό και οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μετά από 1 μέχρι 2 μήνες. Η ταχύτητα απόψυξης λίγο επηρεάζει τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλο το πάχος των χυτών αντικειμένων.

Η μελέτη και η ανάλυση της αντοχής τόσο των δομικών στοιχείων, όσο και των ολόσωμων φορέων θα γίνει με το ίδιο υλικό, αφού σκοπός της εργασίας δεν είναι η μείωση του βάρους με χρήση ενός διαφορετικού υλικού, όπως για παράδειγμα ανθρακονήματα, αλλά η ανακατάταξη του ίδιου υλικού στο χώρο έτσι, ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Έτσι, για την μελέτη και την κατασκευή των δομικών στοιχείων τύπου πλέγματος θα χρησιμοποιήσουμε αλουμίνιο της σειράς 6000, ενώ για την μελέτη της χύτευσης θα χρησιμοποιήσουμε τις ιδιότητες του αλουμινίου 3000. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν τις καλύτερες δυνατές ιδιότητες για την κάθε περίπτωση.

Οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

Μέτρο Ελαστικότητας	$6.90 \cdot 10^{10}$	N/m <sup>2</sup>
Λόγος Poisson	0.33	
Μέτρο Διάτμησης	$2.60 \cdot 10^{10}$	N/m <sup>2</sup>
Πυκνότητα	2700	kg/m <sup>3</sup>
Αντοχή σε εφελκυσμό	124084000	N/m <sup>2</sup>
Όριο Διαρροής	55148500	N/m <sup>2</sup>

και θεωρούμε ότι είναι γραμμικό ελαστικό και ιστροπικό.

Η χημική σύσταση του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη (αλουμίνιο 6061) είναι:

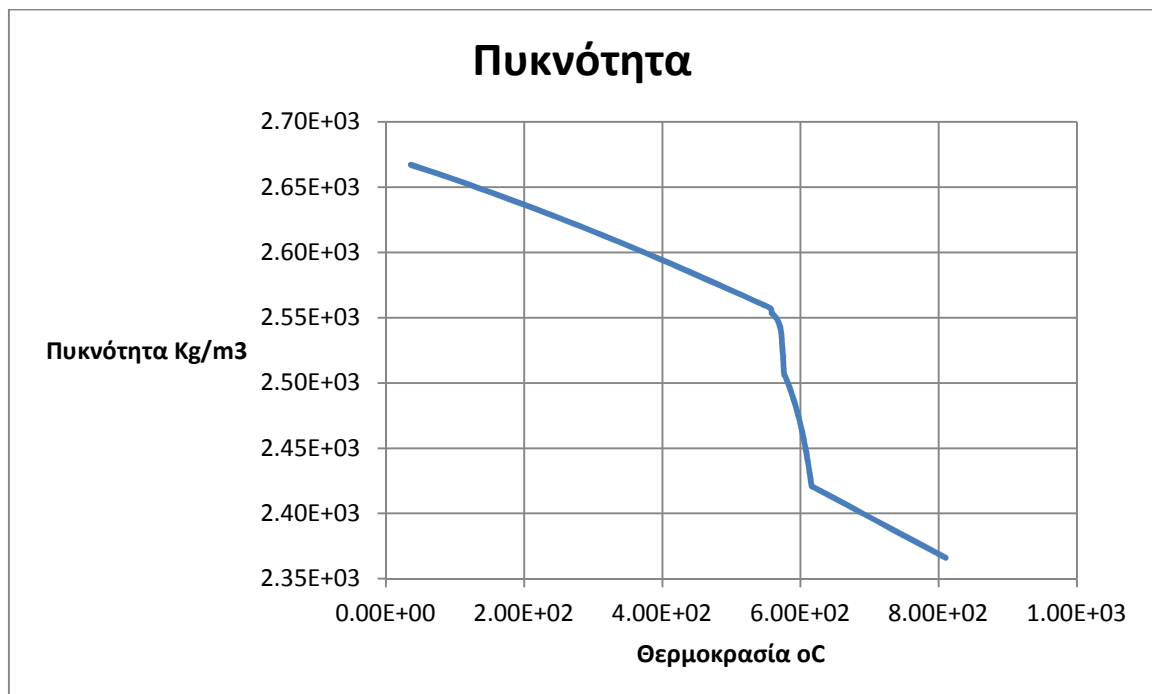
υλικό	ελάχιστο %	μέγιστο %
Αλουμίνιο	95.85	98.56
πυρίτιο	0.40	0.80
σίδηρος	-	0.70
χαλκός	0.15	0.40
μαγγάνιο	-	0.15
μαγνήσιο	0.80	1.20
χρώμιο	0.04	0.35
ψευδάργυρος	-	0.25
τιτάνιο	-	0.15
άλλα στοιχεία	-	0.15



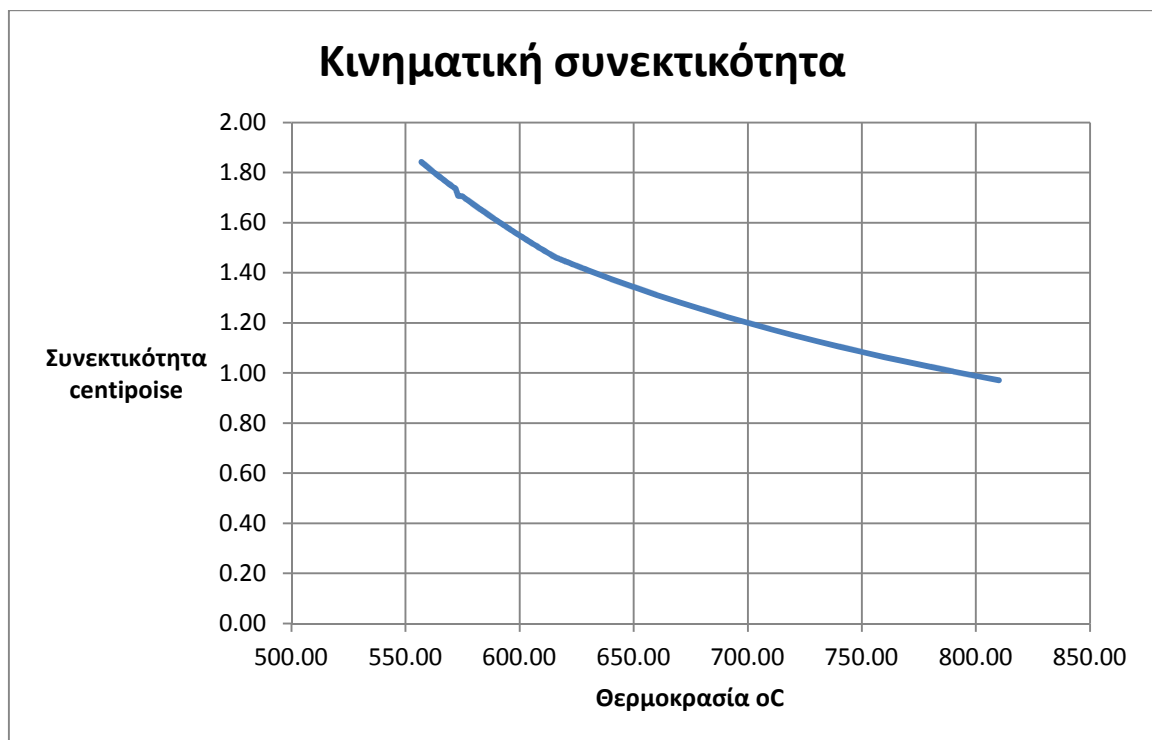
Εικόνα 5: Αλουμίνιο 6061

Επιπλέον για το αλουμίνιο A356:

- Liquidus : 616°C
- Solidus : 556°C







#### 1.4. Περιοχές συγκέντρωσης τάσης

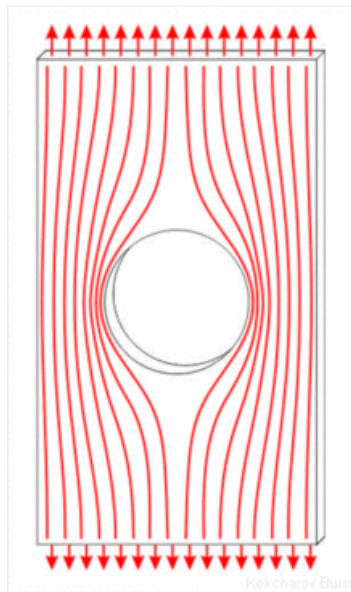
Περιοχές συγκέντρωσης τάσης υπάρχουν σε όλες τις κατασκευές. Αποτελούν ένα σημαντικό θέμα τόσο για τα ισότροπα όσο και για τα ανισότροπα υλικά διότι από τη γειτονιά αυτών των περιοχών ξεκινάει συνήθως η βλάβη, η οποία, βαθμιαία, οδηγεί στην τελική αστοχία της κατασκευής. Εξαιτίας της σημασίας του προβλήματος της συγκέντρωσης τάσης, οι μηχανικοί πρέπει να γνωρίζουν να το αναλύουν, να προβλέπουν την αστοχία και την αντοχή και να αναπτύσσουν μεθόδους περιορισμού της επίδρασης του φαινομένου στη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

Η συγκέντρωση τάσης σε μια κατασκευή μπορεί να οφείλεται στους ακόλουθους λόγους:

1. Τομές, εντομές και ανοίγματα
2. Ασυνέχεια στη γεωμετρία (άκρα)
3. Σύνδεσμοι (ηλώσεις, κολλήσεις και άλλοι μηχανικοί τρόποι σύνδεσης)
4. Ασυμβατότητα των ελαστικών ιδιοτήτων ανάμεσα σε δύο στοιχεία ή σε γειτονικές στρώσεις του ίδιου του στοιχείου (επίδραση άκρων)

## 5. Ατέλειες, εγκλείσματα και βλάβη εκ κατασκευής

Η συγκέντρωση τάσεων σε μία οπή ή μία ασυνέχεια παρουσιάζεται με γραφικό τρόπο στη επόμενη εικόνα όπου οι τάσεις που αναπτύσσονται σε μία κατασκευή, λόγω φόρτισης αυτής, προσομοιάζονται με ευθείες γραμμές. Η συγκέντρωση των τάσεων όπως φαίνονται στη διπλανή εικόνα, είναι αυτή που καθιστά την συγκεκριμένη διατομή «επικίνδυνη» προς θραύση.



**Εικόνα 6: Παράδειγμα συγκέντρωσης τάσεων**

Η ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε μία κατασκευή όταν υφίσταται οποιαδήποτε μορφής φόρτιση, είναι καίριας σημασίας για την περαιτέρω πορεία της μελέτης και του σχεδιασμού. Μπορεί να γίνει πειραματικά, με τη χρήση αναλυτικών ακριβών ή προσεγγιστικών μεθόδων καθώς και με αριθμητικές λύσεις από προσομοιώσεις και μοντέλα.

## 2. Σχεδιασμός και ανάλυση

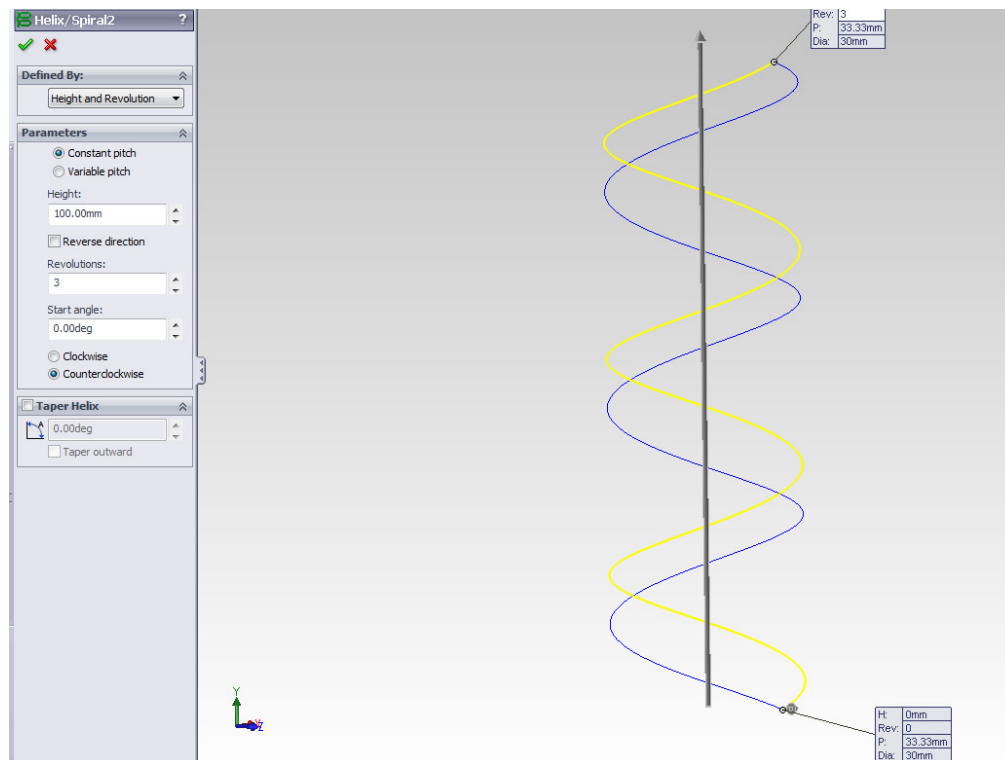
### 2.1. Σχεδιασμός

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ποιοτικά προϊόντα κατασκευασμένα στο άκρως ανταγωνιστικό περιβάλλον της μοντέρνας βιομηχανίας έχει καθιερώσει την ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων στην πρώτη γραμμή των συστημάτων CAE. Αρχικά η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούταν με σκοπό να ελαφρύνει το βάρος από την κατασκευή και μελέτη πρωτοτύπων από διάφορες μηχανολογικές κατασκευές. Τελευταία, όμως υπάρχει μία καθαρή τάση να πάει ακόμα μακρύτερα, ενσωματώνοντας τα πεπερασμένα στοιχεία σε τεχνικές δοκιμής και λάθους στην προσπάθεια για βελτίωση των επιθυμητών πτυχών της απόδοσης ενός προϊόντος, κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του. Έτσι, πραγματοποιείται η έννοια της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού προϊόντων, συνδυάζοντας μαθηματικές μεθόδους βελτιστοποίησης μαζί με προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων, με στόχο να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα γρήγορα και με σχετικά μικρό κόστος.

Ο βασικός σκοπός της εργασίας αυτής είναι η αντικατάσταση των γραμμικών φορέων, και ειδικότερα των σωληνωτών φορέων, με δομικά στοιχεία τύπου πλέγματος τα οποία θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια πλειάδα εφαρμογών. Η γενίκευση αυτού του προβλήματος, το γεγονός δηλαδή ότι δεν θέλουμε να κατασκευάσουμε κάποια συγκεκριμένη γεωμετρία, η οποία θα υπόκειται σε κάποιες γνωστές καταπονήσεις, μας αναγκάζει να διατηρήσουμε κάποια δεδομένα του αρχικού φορέα σταθερά. Συγκεκριμένα, καθώς δεν γνωρίζουμε το πως θα τοποθετηθεί η νέα γεωμετρία που θα σχεδιάσουμε, απαιτείται να υπάρχει συμμετρία ως προς το κέντρο της έτσι, ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτησης της με οποιοδήποτε προσανατολισμό. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να διατηρήσουμε την αξονοσυμμετρία που έχει κύλινδρος ο οποίος χρησιμοποιείται ως γραμμικός φορέας με σκοπό να καθίσταται δυνατή η παραλαβή φορτίων από κάθε κατεύθυνση.

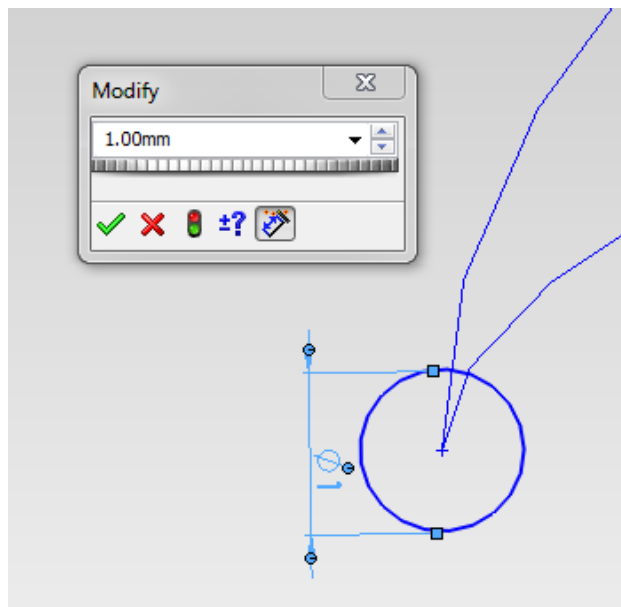
Ξεκινώντας το σχεδιασμό της νέας γεωμετρίας ορίζουμε τη διάμετρο την οποία θα έχουν τα πλεγματικά στοιχεία. Έτσι, σχεδιάζουμε ένα κύκλο και ορίζουμε τη διάμετρο του. Στη συνέχεια, με βάση αυτόν τον κύκλο ορίζουμε μία έλικα η οποία θα αποτελέσει τον βασικό οδηγό για την κατασκευή των πλεγματικών στοιχείων. Την

έλικα αυτή μπορούμε να την ορίσουμε με 3 διαφορετικά μεγέθη το ύψος, το βήμα και τον αριθμό των περιστροφών. Για κάθε έλικα μπορούμε να επιλέξουμε 2 από αυτά τα μεγέθη ως ανεξάρτητες μεταβλητές και η τρίτη γίνεται αυτομάτως εξαρτημένη. Όπως φαίνεται και από την παρακάτω φωτογραφία, ως ανεξάρτητες μεταβλητές επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το ύψος και τον αριθμό των περιστροφών της έλικας. Επομένως ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας της έλικας είναι δύο.



Εικόνα 7: Σχεδιασμός ελίκων

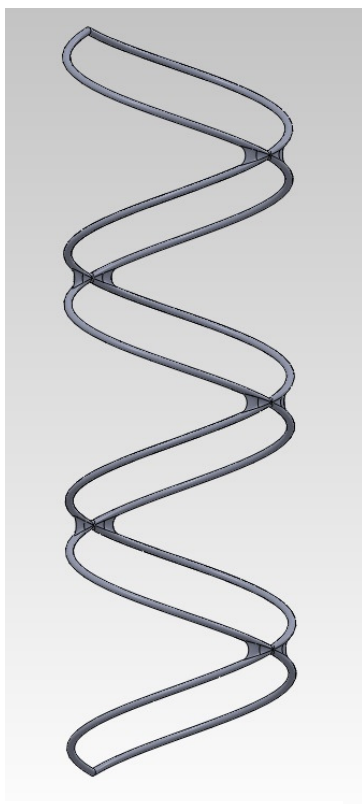
Τέλος, μία επιπλέον δυνατότητα που έχουμε είναι η επιλογή της φοράς περιστροφής της έλικας. Αυτή μπορεί να είναι είτε με τη φορά των δεικτών του ρολογιού είτε αντίθετη από αυτή. Για τη δημιουργία των πλεγματικών στοιχείων θα κατασκευάσουμε 2 τέτοιες έλικες οι οποίες θα έχουν τα ίδια στοιχεία αλλά αντίθετες φορές περιστροφής, έτσι ώστε να τέμνονται μεταξύ τους σε διάφορα σημεία όπως φαίνεται και στην εικόνα.



Εικόνα 8: Σχεδιασμός προφίλ γεωμετρίας

Έχοντας της έλικες αυτές οι οποίες θα αποτελέσουν τους οδηγούς της γεωμετρίας που θα κατασκευάσουμε, πλέον πρέπει να φτιαχτεί και το προφίλ της γεωμετρίας που θέλουμε. Το προφίλ αυτό θα είναι κύκλος διαμέτρου ενός χιλιοστού του οποίου το κέντρο θα είναι στη μία άκρη της έλικα που κατασκευάστηκε

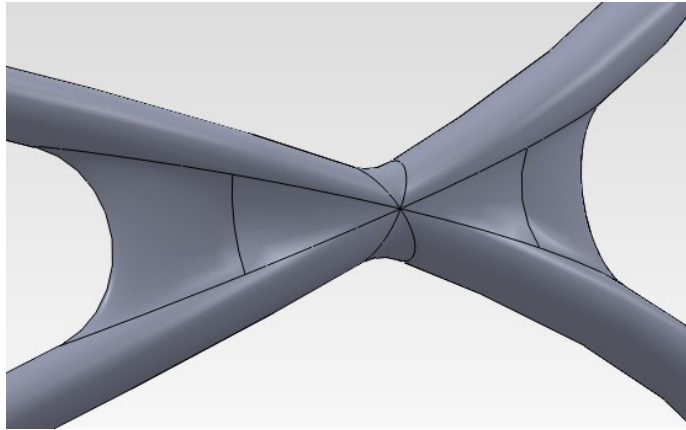
προηγουμένως



Εικόνα 9: Δομικός φορέας τύπου πλέγματος

Έτσι, κατασκευάζεται η γεωμετρία που φαίνεται στην διπλανή εικόνα. Τέλος, είναι απαραίτητο να προσθέσουμε καμπύλες εξομάλυνσης (fillets) στις γωνίες που σχηματίζονται. Αυτές αποτελούν σημαντικό κομμάτι της γεωμετρίας, αφού όχι μόνο συνεισφέρουν στην αποφυγή σημείων συγκέντρωσης τάσεων, αλλά καθιστούν και την κατασκευή των πλεγμάτων αρκετά πιο εύκολη απομακρύνοντας τις απότομες γωνίες.

Όμως, για την κατασκευή των fillets υπάρχουν μερικά όρια, τα οποία περιορίζουν το μέγεθος της ακτίνας που μπορούν να πάρουν. Πρώτα απ' όλα, η ακτίνα καμπυλότητας που θα πάρει η γωνία δεν μπορεί να

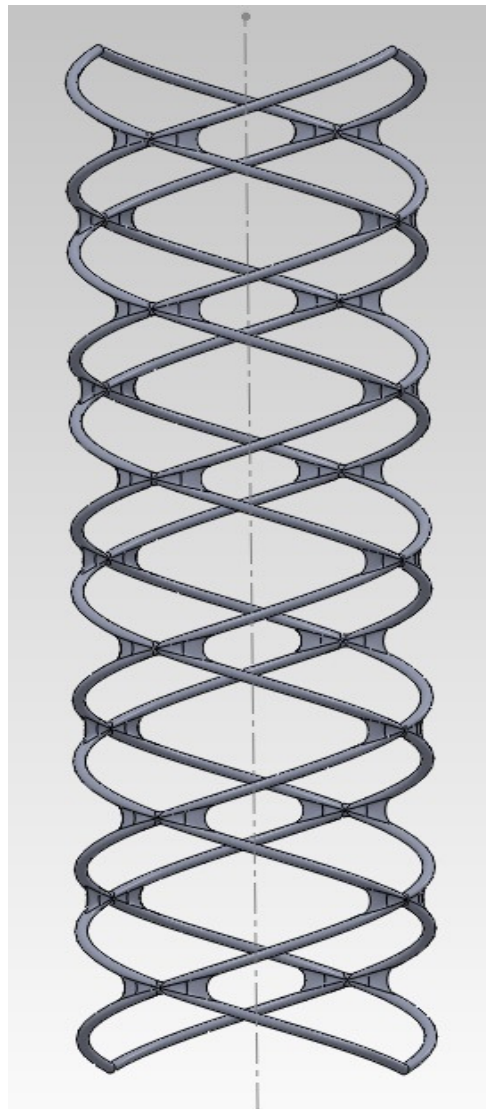


Εικόνα 10: Fillets

είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διάμετρο του κύκλου που αποτελεί το προφίλ της κατασκευής. Οι σύνηθες τιμές που μπορεί να πάρει είναι περίπου 1,5 φορές μεγαλύτερη της διαμέτρου του κύκλου. Αυτό συμβαίνει διότι ένα μέρος του κυλίνδρου που έχει ήδη σχηματιστεί θα μετατραπεί σε fillet.

Αυτή η γεωμετρία αποτελεί το βασικό στοιχείο που θα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή των πλεγματικών στοιχείων. Συνοψίζοντας λοιπόν, κάθε τέτοια γεωμετρία ορίζεται από τα εξής δεδομένα:

1. Διάμετρος κύκλου έλικας
2. Ύψος έλικας
3. Αριθμός περιστροφών έλικας
4. Διάμετρος προφίλ κύκλου
5. fillet



Εικόνα 11: Παράδειγμα γεωμετρίας από πλεγματικά στοιχεία

Το τελευταίο βήμα που απομένει, είναι να ορίσουμε το πλήθος τέτοιων γεωμετριών οι οποίες θα αποτελούν τα πλεγματικά στοιχεία. Αυτό γίνεται πολύ εύκολα με τη χρήση ενός κυλινδρικού μοτίβου γύρω από τον άξονα συμμετρίας ο οποίος περνάει από το κέντρο της έλικας.

#### 6. Πλήθος ελίκων

Στη συνέχεια, αυτά τα στοιχεία θα αποτελούν την ταυτότητα της κάθε γεωμετρίας που μελετάμε και ταυτόχρονα τους βαθμούς ελευθερίας αυτής. Έτσι, πρέπει σε κάθε μία γεωμετρία να καθορίζονται αυτά τα στοιχεία ώστε οι κατασκευές να είναι πλήρως ορισμένες, αλλά αποτελούν και τα δεδομένα τα οποία θα πρέπει να μεταβάλλουμε ώστε, να επιτύχουμε καλύτερα αποτελέσματα από άποψη βάρους και αντοχής.

## 2.2. Ανάλυση

### 2.2.1. Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία

Έχοντας πλέον έτοιμη τη γεωμετρία την οποία θα εξετάσουμε μπορούμε να υπολογίσουμε τα βασικά μεγέθη τα οποία είναι απαραίτητα για την σύγκριση των διαφόρων σχεδιαστικών λύσεων. Έτσι, τα πρώτα στοιχεία τα οποία μπορούμε να βρούμε είναι το βάρος της κατασκευής και η ροπή αδρανείας που παρουσιάζει. Όσο αφορά το βάρος συγκεκριμένα, αν και έχουμε ορίσει ως συγκεκριμένο υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε το αεροπορικό αλουμίνιο, η μελέτη αυτή ισχύει και για οποιοδήποτε άλλο υλικό αποφασίσουμε να χρησιμοποιήσουμε. Για αυτό το λόγο, αντί να αναφερόμαστε στο βάρος της κατασκευής θα αναφερόμαστε στον όγκο αυτής.

Επιπλέον, πρέπει να γίνει ανάλυση ώστε να βρεθεί η μηχανική αντοχή, η μέγιστη τάση δηλαδή που μπορεί να μεταφερθεί χωρίς να σπάσει. Σε αυτή την φάση μας ενδιαφέρουν 2 κυρίως νούμερα, η μέγιστη παραμόρφωση που υφίσταται η εκάστοτε κατασκευή και –κυρίως- η μέγιστη τάση η οποία αναπτύσσεται

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε για την προσομοίωση είναι ελαστικό γραμμικό ιστροπικό (elastic linear isotropic). Αυτό σημαίνει ότι οι ιδιότητες αυτού του υλικού δεν μεταβάλλονται ανάλογα με την διεύθυνση του υλικού. Επομένως, τα ιστροπικά υλικά έχουν πανομοιότυπα μέτρα ελαστικότητας, λόγο Poisson, συντελεστή θερμικής διαστολής, θερμική αγωγιμότητα κ.τ.λ. προς κάθε κατεύθυνση.

Ο ορισμός των ιστροπικών ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού προϋποθέτει τον ορισμό του μέτρου ελαστικότητας  $E$ . Το όριο διαρροής  $G_{xy}$  υπολογίζεται εσωτερικά από το SolidWorks ακόμα και αν αυτό καθορίζεται από το υλικό.

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Ο πίνακας δυσκαμψίας για ένα ιστροπικό υλικό περιλαμβάνει μόνο 2 ανεξάρτητους συντελεστές.



### 2.2.2. Συσχετισμός Τάσης – Παραμόρφωση

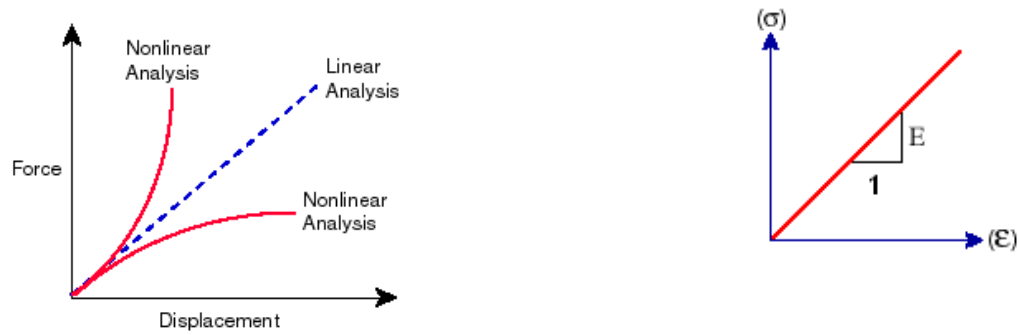
Η πιο συνηθισμένη μορφή του πίνακα συσχετισμού τάσεων με φορτίσεις είναι αυτή που φαίνεται στη συνέχεια.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} - (T - T_o) \begin{Bmatrix} \alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

### 2.2.3. Παραδοχές του γραμμικού ελαστικού μοντέλου

Τα ελαστικά γραμμικά μοντέλα ακολουθούν τις παρακάτω παραδοχές:

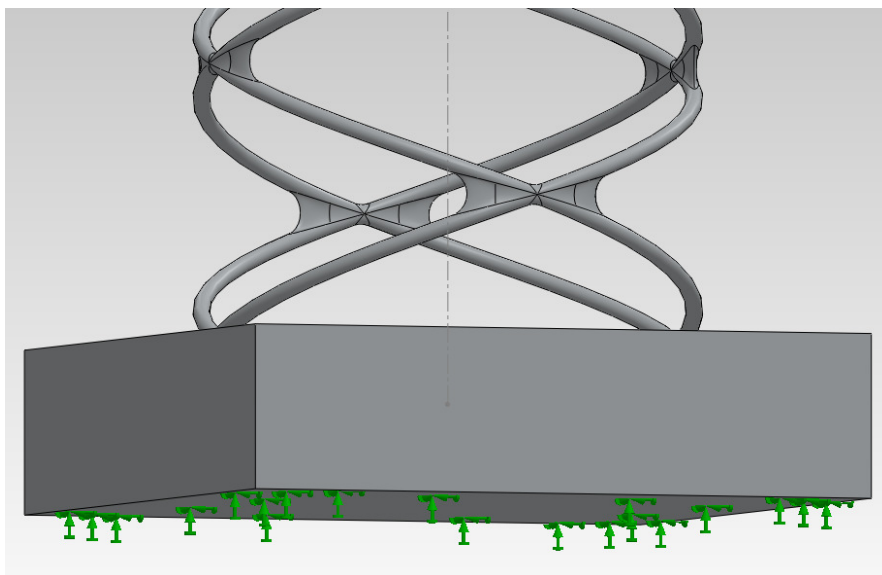
- Παραδοχή στατικότητας. Όλα τα φορτία εφαρμόζονται σταδιακά μέχρι να φτάσουν την μέγιστη τιμή τους. Αφού φτάσουν στη μέγιστη τιμή, τα φορτία παραμένουν σταθερά (χρόνος- αμετάβλητος). Αυτή η παραδοχή μας επιτρέπει να αμελούμε αδρανειακές δυνάμεις και αποσβέσεις θεωρώντας αμελητέες μικρές επιταχύνσεις και ταχύτητες.
- Παραδοχή γραμμικότητας Η αντίδραση που αναπτύσσει ένα μοντέλο είναι απευθείας ανάλογη με τα φορτία που εφαρμόζονται Για παράδειγμα, εάν διπλασιαστεί το μέγεθος των φορτίσεων, η ανάδραση του μοντέλου (μετατόπιση, τάση, παραμόρφωση) θα διπλασιαστεί επίσης.



- Παραδοχή ελαστικότητας. Τα φορτία που εφαρμόζονται δεν προκαλούν μόνιμη παραμόρφωση στο μοντέλο. Με άλλα λόγια, το μοντέλο θεωρείται ότι είναι τέλεια ελαστικό. Ένα τέλεια ελαστικό μοντέλο επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα όταν απομακρυνθούν τα φορτία.

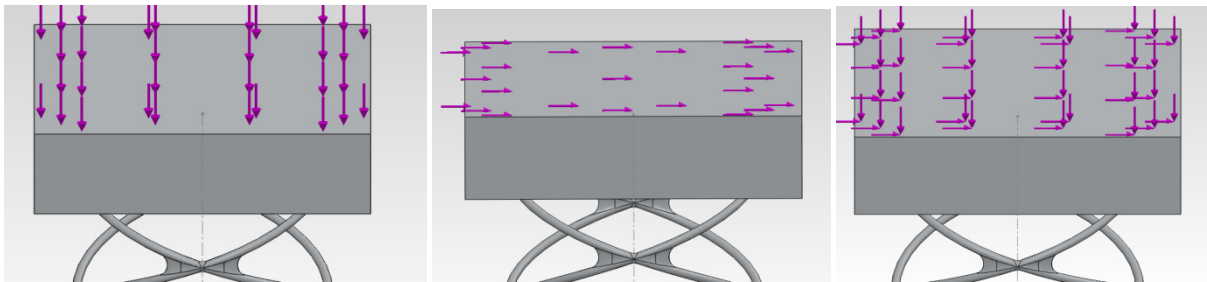
#### 2.2.4. Μοντελοποίηση

Για να πραγματοποιήσουμε αυτή την ανάλυση θα κατασκευάσουμε 2 πλάκες εκατέρωθεν της γεωμετρίας, με αρκετά μεγάλο πάχος ώστε να θεωρούνται απαραμόρφωτες. Αυτό το βήμα είναι απαραίτητο προκειμένου να εξασφαλίσουμε ότι όλες οι περιπτώσεις οι οποίες θα εξετάσουμε καταπονούνται από τις ίδιες δυνάμεις. Έτσι, κατασκευάζουμε 2 πλάκες όπως αυτή που φαίνεται στη φωτογραφία, διαστάσεων 40x40x10 mm.



Εικόνα 12: Πλάκα πακτωμένη στην κάτω πλευρά

Στη συνέχεια ορίζουμε το υλικό όπως αυτό περιγράφηκε προηγουμένως, καθορίζουμε το που θα είναι οι στηρίξεις της κατασκευής, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση θα είναι στην κάτω μεριά της κάτω πλάκας η οποία θεωρούμε ότι είναι πλήρως πακτωμένη, και τα εξωτερικά φορτία, τα οποία θα ασκούνται στην επάνω μεριά της επάνω πλάκας. Για την περίπτωση που εξετάζουμε, θα χρησιμοποιήσουμε τριών ειδών φορτίσεις. Ένα διατμητικό φορτίο μεγέθους 10Nt με το οποίο θα προσομοιώσουμε την κάμψη που υφίσταται ο φορέας, μία κάθετη δύναμη μέτρου 1500 Nt, με την οποία θα προσομοιώσουμε την θλίψη του φορέα, και τον συνδυασμό των 2 αυτών φορτίων όπως φαίνεται στις εικόνες στη συνέχεια.



Εικόνα 13: Θλίψη, Κάμψη, Συνδυασμένο φορτίο

Στη συνέχεια, το μόνο που μένει είναι η κατασκευή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων και η επίλυση του προβλήματος. Είναι σημαντικό η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται να είναι μικρότερη από την τάση διαρροής του υλικού. Σε περίπτωση που την ξεπεράσει αυτή την τάση τότε θεωρούμε ότι έχουμε θραύση του μοντέλου, παρ' όλο που το πρόγραμμα συνεχίζει την προσομοίωση ανεξάρτητα από το αν υπάρχει θραύση ή όχι.

## 2.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει ώστε να σχεδιαστεί ένα αποτελεσματικό δομικό πλέγμα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχουμε θέσει, είναι να σχεδιάσουμε ένα κύλινδρο, το οποίο σκοπεύουμε να αντικαταστήσουμε και να τον αναλύσουμε. Με αυτόν τον τρόπο θα έχουμε ένα πρώτο μέτρο σύγκρισης με βάση το οποίο θα κρίνουμε όλα τα υπόλοιπα αποτελέσματα. Έτσι, σχεδιάζουμε ένα κύλινδρο εσωτερικής διαμέτρου 29mm και εξωτερικής διαμέτρου 31mm. Τα βασικά στοιχεία του κυλίνδρου αυτού φορτίο είναι τα εξής :

	Εσωτερική διάμετρος mm	Εξωτερική διάμετρος mm	Όγκος mm <sup>2</sup>	Ροπή Αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
Κύλινδρος	29	31	9424,78	Px	2122,93
				Py	8915,45
				Pz	8915,45

Μέγιστη παραμόρφωση mm	Μέγιστη Τάση MPa	Μέγιστη παραμόρφωση mm	Μέγιστη Τάση MPa	Μέγιστη παραμόρφωση mm	Μέγιστη Τάση MPa
Fx=10 Nt		Fy=1500 Nt		Fx=10 Nt Fy=1500 Nt	
0.007275	1.643	0.02424	17.327	0.02693	18.627

Έχοντας αναλύσει προηγουμένως την γραμμικότητα των προβλημάτων που επιλύονται, γίνεται αμέσως εμφανές ότι δεν χρειάζεται να βρούμε τη μέγιστη τάση που μπορεί να μεταφερθεί από το φορέα σε κάθε περίπτωση, αλλά αρκεί να καταπονήσουμε όλες τις πιθανές γεωμετρίες με το ίδιο φορτίο. Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τις τάσεις που αναπτύσσονται, μπορούμε να βγάλουμε τα αντίστοιχα συμπεράσματα Το δοκίμιο που αναπτύσσει μικρότερη τάση από ένα άλλο μπορεί να μεταφέρει μεγαλύτερο φορτίο. Για παράδειγμα, έστω 2 διαφορετικά δοκίμια στα οποία ασκούμε 100 Nt δύναμη. Στο πρώτο αναπτύσσεται μέγιστη τάση περίπου 25

MPa και στο δεύτερο 80 MPa. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι το πρώτο δοκίμιο μπορεί να μεταφέρει μέγιστο φορτίο 2 φορές μεγαλύτερο, ενώ το δεύτερο το μισό από αυτό το οποίο εφαρμόστηκε, με δεδομένο ότι το όριο διαρροής είναι περίπου 55 MPa.

Με στόχο την απλοποίηση του προβλήματος, όλες οι γεωμετρίες που θα κατασκευάσουμε από εδώ και πέρα, συμπεριλαμβανομένου και του κυλίνδρου που μελετήσαμε προηγουμένως, θα έχουν ύψος 100mm.

Κατά τη διαδικασία της σχεδίασης των πλεγματικών δομικών στοιχείων, μπορούμε να κάνουμε 2 επιλογές. Η πρώτη είναι να χρησιμοποιήσουμε πολλούς κλάδους- έλικες αλλά με μικρή διάμετρο προφίλ, και η δεύτερη το ανάποδο, δηλαδή λίγες έλικες με μεγάλο πάχος. Οι 2 αυτές περιπτώσεις αναλύονται στη συνέχεια.

Η πρώτη γεωμετρία που θα μελετήσουμε, της οποίας η «ταυτότητα» φαίνεται στη συνέχεια, ανήκει στην πρώτη από αυτές τις 2 κατηγορίες. Έχει δηλαδή πολλούς κυλίνδρους με μικρή, σχετικά, διάμετρο.

Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Αριθμός περιστροφών έλικας	Διάμετρος προφίλ κύκλου mm	fillet mm	Πλήθος ελίκων	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	2	2	2	6	7,380.34	Px=	1668.05
						Py=	6,970.79
						Pz=	6,970.79

μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
Fx=10Nt		Fy=1500Nt		Fx=10Nt Fy=1500Nt	
0.05811	30.056	0.2007	324.739	0.2250	351.151

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα, αν και η γεωμετρία που κατασκευάσαμε αντέχει την καταπόνηση σε κάμψη, οι τάσεις που αναπτύσσονται σε σχέση με τον αρχικό κύλινδρο είναι πολύ μεγαλύτερες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να μεταφέρει χωρίς να σπάσει είναι αρκετά μικρότερη από την

αντίστοιχη δύναμη του κυλίνδρου. Στη θλίψη, αντίθετα από την κάμψη, ακόμα και με αυτή τη δύναμη έχουμε ξεπεράσει το όριο διαρροής του υλικού και επομένως την μέγιστη δύναμη που μπορούμε να μεταφέρουμε.

Τα πράγματα γίνονται ακόμα χειρότερα αν κατασκευάσουμε μία γεωμετρία με λίγες έλικες αλλά με προφίλ μεγάλης διαμέτρου, καταλήγουμε στο ακόλουθο δοκίμιο:

Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Αριθμός περιστροφών έλικας	Διάμετρος προφίλ κύκλου mm	fillet mm	Πλήθος ελίκων	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	2	3	2.5	2	8,092.58	Px=	1834.54
						Pγ=	7,650.00
						Pz=	7,653.18

μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
Fx=10Nt		Fy=1500Nt		Fx=10Nt Fy=1500Nt	
0.5047	77.48	2.16	1,835.63	3.531	2,177.47

Σε αυτό το τεμάχιο όπως φαίνεται αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες τάσεις από το πρώτο. Αυτό συμβαίνει γιατί οι φορείς που μεταφέρουν τις δυνάμεις είναι λιγότεροι σε αριθμό αν και μεγαλύτερη σε μέγεθος. Έτσι, οδηγούμαστε σε μεγαλύτερες ασυνέχειες τις γεωμετρίας, και κατ' επέκταση σε μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων στα fillet.

Αυτό που μπορούμε να δούμε μια πρώτη ματιά, είναι ότι λιγότεροι φορείς στη γεωμετρία, οδηγούν σε χειρότερη κατανομή του υλικού στο χώρο. Κάτι τέτοιο γίνεται αμέσως εμφανές όταν σκεφτούμε ότι η επιφάνεια ενός κυλίνδρου δίνεται από τον τύπο  $A=\pi r^2$ . Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας τις μισές έλικες με διπλάσια διάμετρο θα οδηγούμασταν σε τέσσερις φορές μεγαλύτερο όγκο τις κατασκευής. Παρ' όλα αυτά, δεν είναι δυνατή η χρήση πολύ μεγάλου αριθμού ελίκων με μικρή διάμετρο γιατί αυτό θα οδηγούσε αντίστοιχα σε αρκετά μικρή ακτίνα fillet, με αποτέλεσμα να παρατηρείτε μεγάλη συγκέντρωση τάσεων.

Δοκιμάζουμε την κατασκευή ενός μοντέλου του οποίου η έλικα θα πραγματοποιεί μόνο μία περιστροφή. Με αυτόν τον τρόπο καταναλώνεται λιγότερο υλικό στην έλικα και επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερη διάμετρο προφίλ. Επιπλέον, λόγω του ότι οι έλικες είναι κατακόρυφες και σχετικά πιο ομαλές, με λιγότερες καμπύλες δηλαδή, πραγματοποιείται καλύτερη μεταφορά των δυνάμεων. Έτσι για την γεωμετρία με την παρακάτω ταυτότητα:

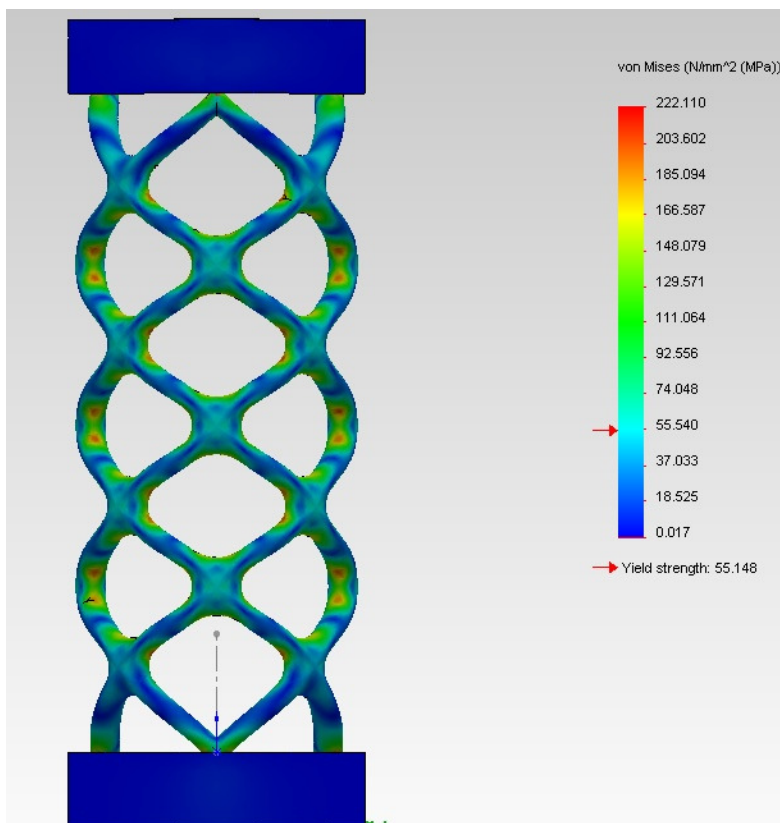
Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Αριθμός περιστροφών έλικας	Διάμετρος προφίλ κύκλου mm	fillet mm	Πλήθος ελίκων	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	1	4	4	4	9,961.74	Px=	2263.47
						Pγ=	9,345.99
						Pz=	9,345.99

προκύπτουν οι ακόλουθες τάσεις:

μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
Fx=10Nt		Fy=1500Nt		Fx=10Nt Fy=1500Nt	
0.08495	17.46	0.3209	222.11	0.3505	221.87

Παρατηρούμε αμέσως μία μεγάλη βελτίωση ως προς τις μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται, όμως και πάλι το δοκίμιο δεν αντέχει στην θλίψη και στην καταπόνηση του συνδυασμένου φορτίου.

Παράλληλα, όπως φαίνεται από την φωτογραφία, η μέγιστη τάση παρατηρείται στα fillets, εκεί δηλαδή όπου υπάρχουν τα πιο λεπτά κομμάτια της κατασκευής. Είναι το ίδιο σημείο στο οποίο αναμέναμε να παρατηρηθεί συγκέντρωση τάσεων, λόγω της απότομης αλλαγής της γεωμετρίας. Έτσι, σε μια προσπάθεια να μειώσουμε το πρόβλημα, δοκιμάζουμε την ίδια γεωμετρία με μεγαλύτερη, αυτή τη φορά, διάμετρο fillet. Προκύπτει, τελικά, η γεωμετρία με την παρακάτω «ταυτότητα»:



Εικόνα 14: Ανάπτυξη τάσεων σε θλίψη

Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Αριθμός περιστροφών έλικας	Διάμετρος προφίλ κύκλου mm	fillet mm	Πλήθος ελίκων	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	1	4	6	4	11254.22	Px=	2542.94
						Pγ=	10314.15
						Pz=	10314.16



μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
F <sub>x</sub> =10Nt		F <sub>y</sub> =1500Nt		F <sub>x</sub> =10Nt F <sub>y</sub> =1500Nt	
0.05275	14.19	0.1896	179.71	0.2085	178.67

Όπου αμέσως παρατηρείται βελτίωση ως προς τις μέγιστες τάσεις, ιδικά στις περιπτώσεις της θλίψης και του συνδυασμένου φορτίου. Όμως, αφ' ενός εξακολουθούν να παραμένουν αρκετά μεγάλες σε σχέση με τον κύλινδρο που θέλουμε να αντικαταστήσουμε και αφετέρου δεν μπορούμε να μεγαλώσουμε κι άλλο τη διάμετρο του fillet. Ο χώρος που υπάρχει μεταξύ 2 γωνιών όπου απαιτείται να γίνει fillet έχει αρχίσει να εξαντλείται. Επιπλέον, βρισκόμαστε ήδη στις 1,5 φορές μεγαλύτερη διάμετρο fillet από τη διάμετρο του κύκλου, στο όριο δηλαδή όπως το έχουμε ορίσει στην εισαγωγή.

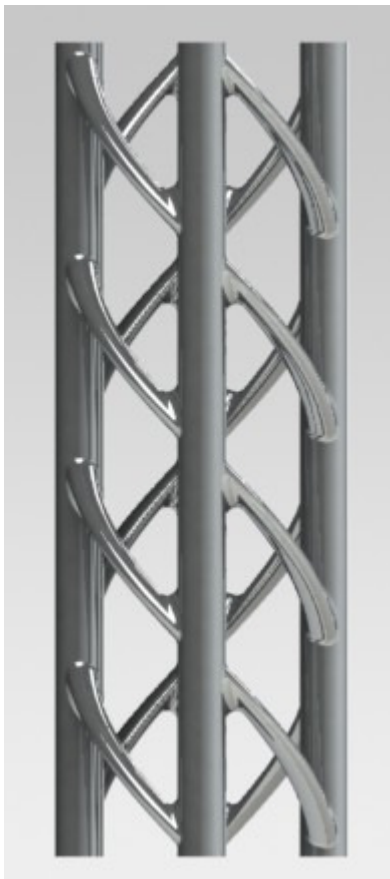
Ακολουθώντας την ίδια βελτίωση που υπήρξε όταν αυξήσαμε το βήμα της έλικας κατά την προηγούμενη δοκιμή, το αυξάνουμε εκ νέου. Το νέο βήμα της έλικας θα είναι 150mm δηλαδή, θα πραγματοποιεί μισή μόνο περιστροφή. Έτσι προκύπτει η ακόλουθη γεωμετρία:

Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Αριθμός περιστροφών έλικας	Διάμετρος προφίλ κύκλου mm	fillet mm	Πλήθος ελίκων	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	0.5	4.5	6	4	10506.97	P <sub>x</sub> =	2350.93
						P <sub>y</sub> =	9661.18
						P <sub>z</sub> =	9661.41

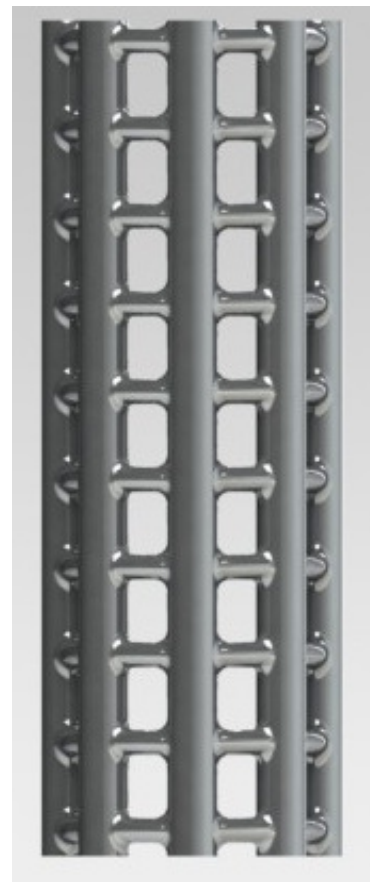
Και οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι ελάχιστα μικρότερες από την προηγούμενη.

μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
F <sub>x</sub> =10Nt		F <sub>y</sub> =1500Nt		F <sub>x</sub> =10Nt F <sub>y</sub> =1500Nt	
0.03941	10.62	0.1084	167.84	0.1237	167.03

Περαιτέρω αύξηση του βήματος της έλικας θα οδηγήσει σε κατακόρυφους φορείς. Έτσι, παίρνοντας ως παράδειγμα τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζονται οι κολόνες στις οικοδομές, κατασκευάζουμε μία γεωμετρία η οποία αποτελείται από κατακόρυφους σωλήνες μικρής διαμέτρου και οι οποίοι ενώνονται μεταξύ τους με ελικοειδής ή κυκλικούς φορείς. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουμε καλύτερη μεταφορά των φορτίων μέσα από την κατασκευή προς τις στηρίξεις.



Εικόνα 15: Συνδυασμός κατακόρυφων και ελικοειδών φορέων



Εικόνα 16: Συνδυασμός κατακόρυφων και οριζόντιων φορέων

Πλέον, μας ενδιαφέρει το πλήθος των κατακόρυφων και των ελικοειδών ή κυκλικών φορέων, η διάμετρος τους, καθώς και το βήμα των ελίκων και η ακτίνα των fillets όπως πριν.

Έτσι, προκύπτει η ακόλουθη γεωμετρία:

Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Πλήθος κατακόρυφων φορέων	Διάμετρος κατακόρυφων φορέων mm	Πλήθος ελικοειδών φορέων	Διάμετρος ελικοειδών φορέων mm	βήμα έλικας	fillet mm	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	4	4	4	3.5	100	1.4	8281.9	Px=	1880.66
								Py=	7823.17
								Pz=	7823.27

Όσον αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται, υπάρχει σημαντική βελτίωση σε ότι αφορά την αντοχή σε θλίψη, αλλά και μια ελαφρά αύξηση στα νούμερα που παρατηρούνται στην κάμψη. Η αύξηση αυτή έχει να κάνει και με το μειωμένο βάρος της κατασκευής, αφού μικρότερο βάρος σημαίνει και λιγότερο υλικό, άρα μικρότερη αντοχή.

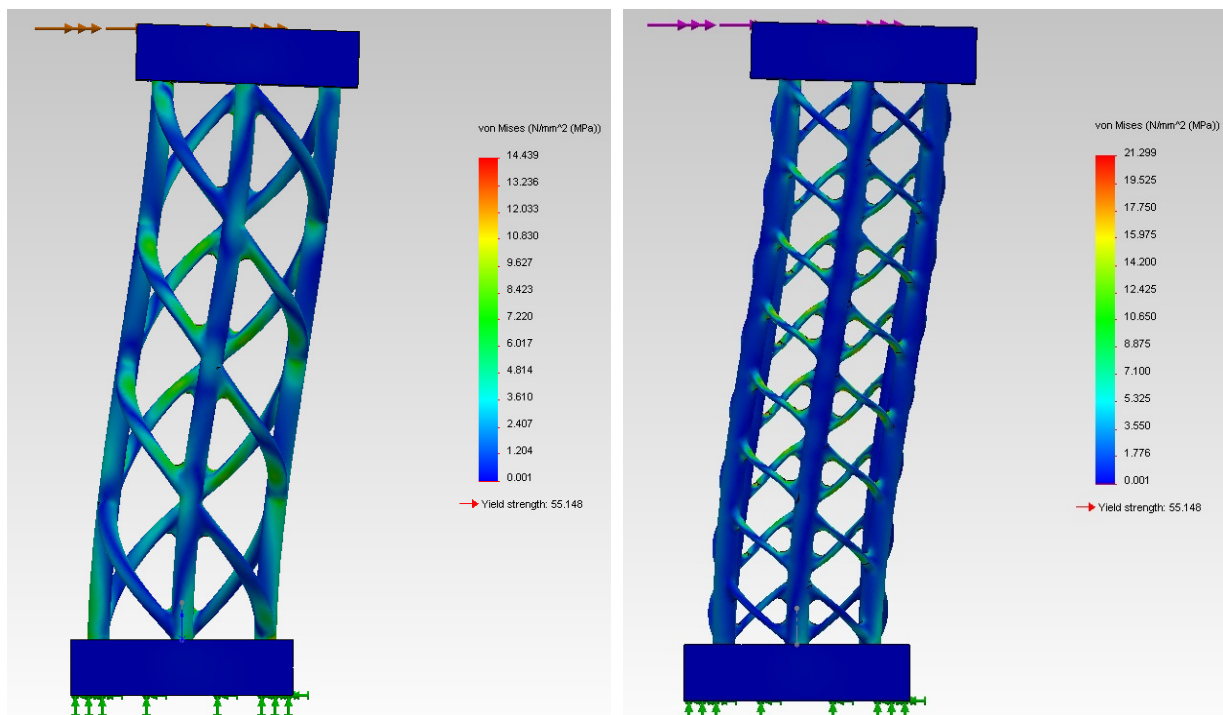
μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
Fx=10Nt		Fy=1500Nt		Fx=10Nt Fy=1500Nt	
0.05087	14.44	0.05849	97.17	0.09524	101.31

Χρησιμοποιώντας και πάλι μεγαλύτερο πλήθος κατακόρυφων και ελικοειδών φορέων με μειωμένη, όμως, διάμετρο, παρατηρούμε αμέσως μία αρκετά μεγάλη βελτίωση όσον αφορά την αντοχή του δοκιμίου σε καταπόνηση σε θλίψη και σε συνδυασμένο φορτίο, όμως ταυτόχρονα, παρατηρούμε και μία αύξηση της μέγιστης τάσης που αναπτύσσεται στην κάμψη.

Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Πλήθος κατακόρυφων φορέων	Διάμετρος κατακόρυφων φορέων mm	Πλήθος ελικοειδών φορέων	Διάμετρος ελικοειδών φορέων mm	βήμα έλικας	fillet mm	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	6	4	6	2	75	1.5	9276.89	Px=	2102.63
								Pγ=	8774.80
								Pz=	8775.00

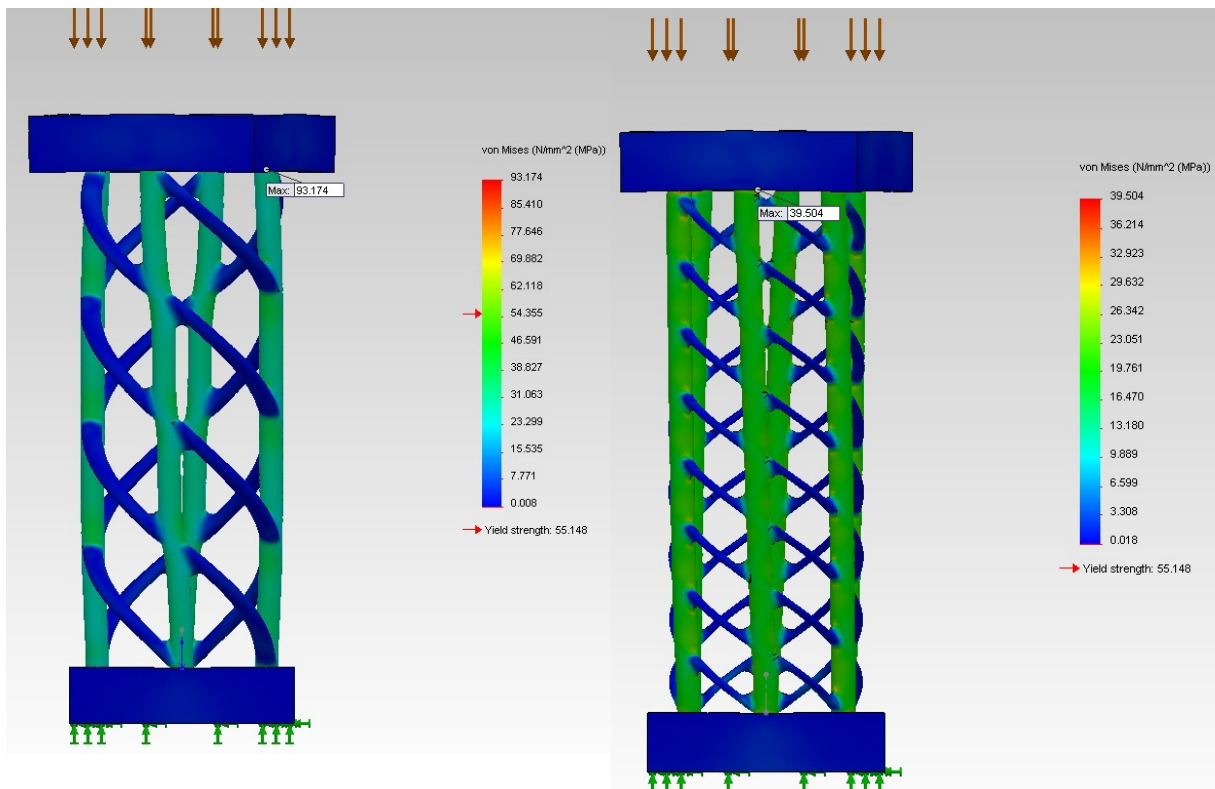
μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
Fx=10Nt		Fy=1500Nt		Fx=10Nt Fy=1500Nt	
0.0496	21.30	0.03412	39.50	0.0701	41.77

Γίνεται αμέσως εμφανές ότι με μία μικρή αύξηση του βάρους κατά 10% περίπου, οι τάσεις σε θλίψη και στο συνδυασμένο φορτίο μειώθηκαν περίπου στο μισό. Όμως, λόγω της μείωσης της διαμέτρου των ελικοειδών φορέων, παρατηρείται μία αύξηση των τάσεων στην κάμψη κατά 47,5%.



Εικόνα 17: Αναπτυσσόμενες τάσεις σε κάμψη

Όπως φαίνεται από την προηγούμενη φωτογραφία οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στους ελικοειδής φορείς, για αυτό και μείωση της διαμέτρου τους οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης τάσης.

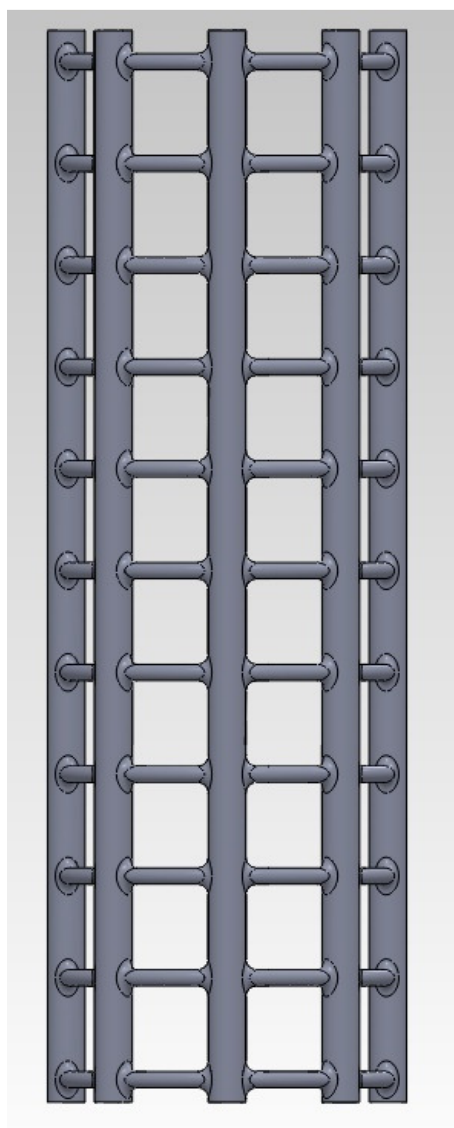


Εικόνα 18: Αναπτυσσόμενες τάσεις σε θλίψη

Αντίθετα, στην θλίψη, η μέγιστη τάση παρατηρείται στο σημείο όπου οι κατακόρυφοι φορείς συναντούν την επίπεδη πλάκα. Αυτό σε πρώτη ανάγνωση θα μπορούσε να θεωρηθεί ως λάθος, αφού η μέγιστη τάση δεν εμφανίζεται στην γεωμετρία που μας ενδιαφέρει, αλλά στην ένωση αυτής. Αλλά, όπως φαίνεται από τις εικόνες, αφ' ενός και στους φορείς εντός της γεωμετρίας οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι μικρότερες, αφ' ετέρου μπορούμε να θεωρήσουμε και το σημείο της ένωσης ως σημαντικό, αφού και σε κάποια πραγματική κατασκευή η γεωμετρία αυτή θα πρέπει να ενώνεται με κάτι και να μεταφέρει τα εφαρμοζόμενα φορτία.

Στη συνέχεια, καταργούμε τελείως τους ελικοειδείς φορείς όπως φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία. Στη θέση τους τοποθετούμε οριζόντιους, κυκλικούς φορείς οι οποίοι ενώνουν μεταξύ τους κατακόρυφους. Η γεωμετρία που προκύπτει είναι η ακόλουθη:

Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Πλήθος κατακόρυφων φορέων	Διάμετρος κατακόρυφων φορέων mm	Πλήθος οριζόντιων φορέων	Διάμετρος οριζόντιων φορέων mm	fillet mm	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	8	3.5	11	1.5	1	9106.71	Px=	2061.06
							Pγ=	8717.78
							Pz=	8717.91

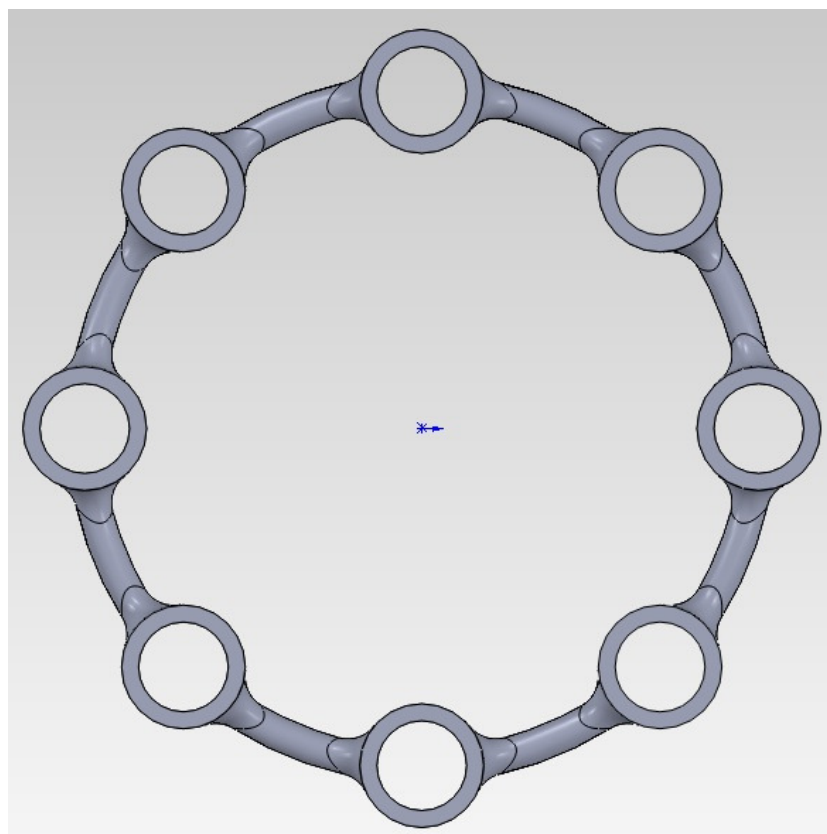


Εικόνα 19: Εξεταζόμενη γεωμετρία

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή είναι οι ακόλουθες:

μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
F <sub>x</sub> =10Nt		F <sub>y</sub> =1500Nt		F <sub>x</sub> =10Nt F <sub>y</sub> =1500Nt	
0.0428	19.64	0.02946	34.36	0.05334	39.56

Και στις τρεις περιπτώσεις υπάρχει μία –μικρή- βελτίωση των τάσεων που εμφανίζονται. Αυτό οφείλεται τόσο στην αλλαγή των ελικοειδών σε οριζόντιων φορέων, όσο και στην αύξηση του πλήθους των κατακόρυφων φορέων από έξι σε οχτώ. Παρ' όλα αυτά όμως, λόγω της μικρής βελτίωσης, το επόμενο βήμα που ακολουθούμε είναι η κατασκευή κατακόρυφων κυλινδρικών φορέων, δηλαδή κούφια από μέσα. Έτσι, έχουμε τη γεωμετρία που φαίνεται σε κάτοψη στη συνέχεια.



Εικόνα 20: Κάτοψη Γεωμετρίας



Διάμετρος κύκλου έλικας mm	Πλήθος κατακόρυφων φορέων	Εξωτερική Διάμετρος κατακόρυφω ν φορέων mm	Εσωτερική Διάμετρος κατακόρυφω ν φορέων mm	Πλήθος οριζόντιων φορέων	Διάμετρος οριζόντιων φορέων mm	fillet mm	όγκος mm <sup>2</sup>	ροπή αδρανείας gr*mm <sup>2</sup>	
30	8	5.5	4	10	1.5	1.5	10134.28	Px=	2331.29
								Pγ=	9701.34
								Pz=	9701.34

μετατόπιση κάμψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση θλίψη mm	Μέγιστη τάση Mpa	μετατόπιση εφελκυσμός mm	Μέγιστη τάση Mpa
F <sub>x</sub> =10Nt		F <sub>y</sub> =1500Nt		F <sub>x</sub> =10Nt F <sub>y</sub> =1500Nt	
0.01848	11.34	0.02488	27.43	0.03249	30.70

Υπάρχει βελτίωση τόσο στην κάμψη όσο και στη θλίψη και στο συνδυασμένο φορτίο. Παρ' όλο που υπάρχει μία αύξηση του συνολικού όγκου κατά 11,28%, η μείωση της μέγιστης τάσης στη θλίψη είναι 20% ενώ στην κάμψη φτάνει μέχρι και 42%. Αν και μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η καλύτερη γεωμετρία, με τα μέχρι τώρα δεδομένα, είναι η τελευταία, είναι απαραίτητη περαιτέρω ανάλυση έτσι, ώστε να βρούμε την συμπεριφορά της κάθε γεωμετρίας καθώς αλλάζουν οι διάφορες μεταβλητές οι οποίες την απαρτίζουν.

Για αυτόν τον λόγο θα χρησιμοποιήσουμε πειραματική ανάλυση στις τέσσερις τελευταίες γεωμετρίες καθώς επίσης και στον αρχικό κύλινδρο με σκοπό να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

## 2.4. Παραμετρική ανάλυση

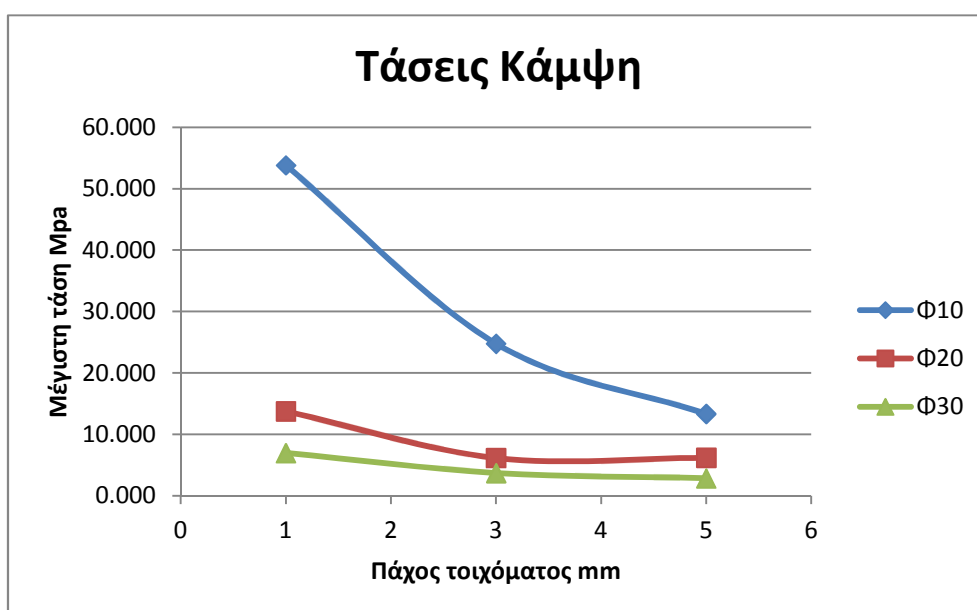
Στην παραμετρική ανάλυση που θα ακολουθήσει θα εξετάσουμε τις καλύτερες γεωμετρίες, που προέκυψαν από τη μελέτη του σχεδιασμού, πώς συμπεριφέρονται όταν κάποια από τις παραμέτρους αλλάζει. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την επίδραση της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά και το πώς επηρεάζει την γεωμετρία όταν αυτή μεταβάλλεται. Έτσι μπορούμε να υπολογίζουμε κάθε φορά, ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης που επικρατούν σε κάθε κατασκευή, τη βέλτιστη τιμή της κάθε παραμέτρου ώστε να πετύχουμε τη μέγιστη αντοχή με το ελάχιστο δυνατό βάρος.

Για αρχή θα εξετάσουμε τον κύλινδρο τον οποίο επιθυμούμε και το πώς συμπεριφέρεται αυτός στις διάφορες μεταβολές των παραμέτρων του. Έτσι θα εξετάσουμε την αντοχή του κυλίνδρου στις προηγούμενες φορτίσεις αυξάνοντας σταδιακά τόσο την εξωτερική διάμετρο του, όσο και το πάχος του. Με αυτόν τον τρόπο θα πάρουμε αξιόπιστα αποτελέσματα με τα οποία θα μπορούμε να τα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που θα προκύψουν για τα πλεγματικά στοιχεία.

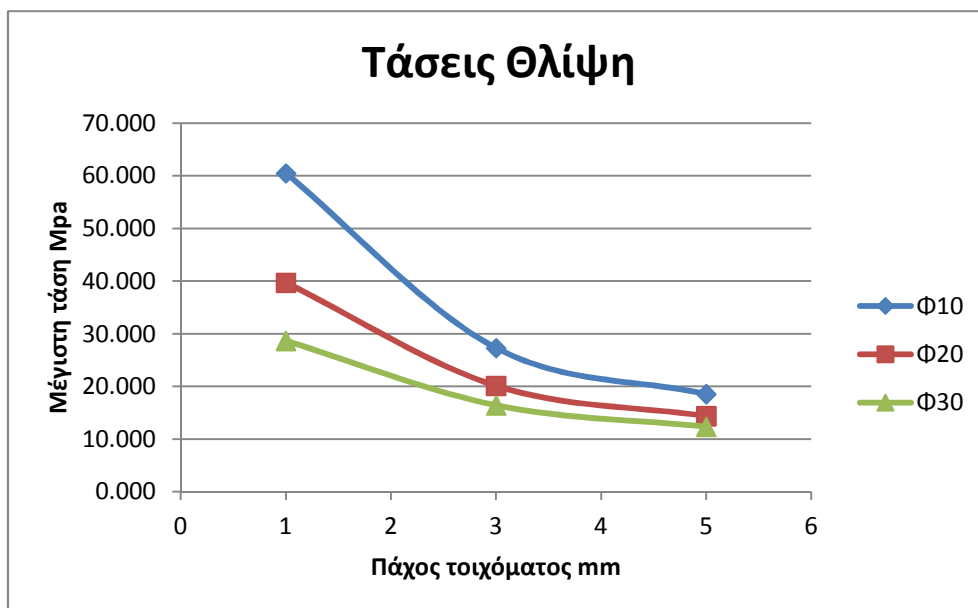
Στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε την ίδια μελέτη και για τα πλεγματικά στοιχεία, μεταβάλλοντας όμως πολύ περισσότερες μεταβλητές, αφού είναι και πολύ περισσότερες αυτές οι οποίες καθορίζουν την αντοχή τους. Έτσι, κατά τη διάρκεια της παραμετρικής μελέτης θα μεταβάλλουμε όχι μόνο την διάμετρο των πλεγμάτων που θα κατασκευάσουμε αλλά επιπλέον τη διάμετρο των κατακόρυφων και των ελικοειδών ή οριζόντιων, ανά περίπτωση, φορέων. Η μόνη διαφοροποίηση θα υπάρξει στην τελευταία κατά σειρά γεωμετρία όπου πέραν των άλλων μεταβλητών θα μεταβάλλουμε και το πάχος των κατακόρυφων φορέων. Μία σύνοψη των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στη συνέχεια, ενώ τα συνολικά αποτελέσματα μπορούν να βρεθούν στο παράρτημα Α στο τέλος της παρούσας εργασίας.

## ➤ Κύλινδρος

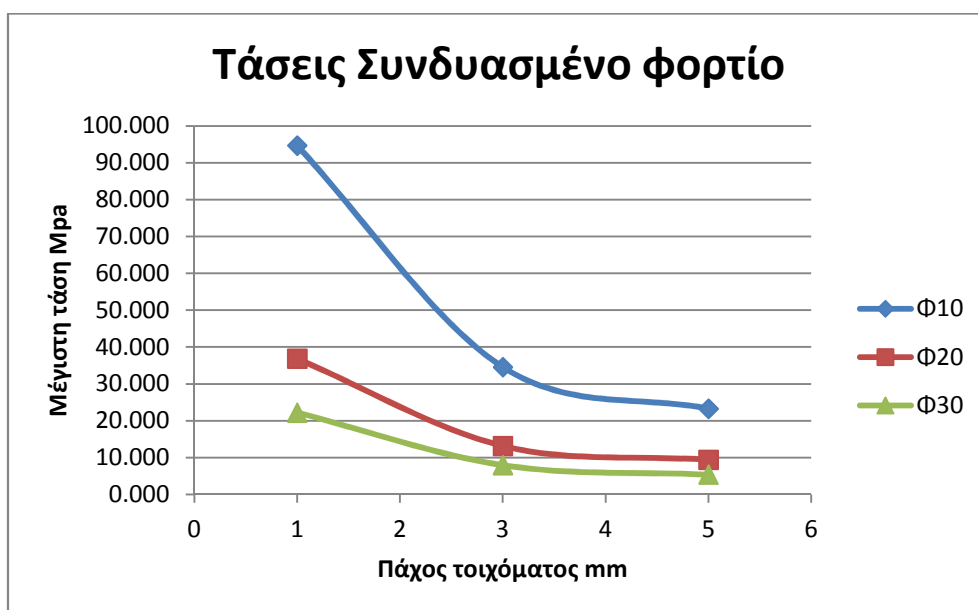
Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν και οι δύο μεταβλητές που επηρεάζουν την κατασκευή του κυλίνδρου έχουν εξίσου σημαντικό ρόλο στη μεταφορά των φορτίων. Όσο οι τιμές τους όμως μεγαλώνουν τότε φαίνεται ότι η επίδραση τους μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα οι τιμές των τάσεων στην κάμψη να παρουσιάζουν αμελητέες μεταβολές όσον αφορά τους κυλίνδρους με μεγάλες διαμέτρους, ενώ στη μικρή διάμετρο των 10mm οι τάσεις είναι αρκετά μεγάλες ώστε να καθιστούν τον κύλινδρο μη χρησιμοποιήσιμο.



Στην θλίψη, αντίθετα, είναι εμφανές ότι η επίδραση του πάχους διατηρείται αναλλοίωτη ανεξάρτητα από τη μεταβολή της εξωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου. Παράλληλα, φαίνεται ότι μία μεταβολή του πάχους μπορεί να έχει την ίδια ή και καλύτερη επίδραση στη μεταφορά των τάσεων από ότι η αύξηση της εξωτερικής διαμέτρου. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή μηχανολογικών κατασκευών οι οποίες δεν θα είναι ογκώδης και δύσχρηστες.



Οι τάσεις στο συνδυασμένο φορτίο αποτελούν μία υπέρθεση των δύο προηγούμενων περιπτώσεων όπου απλώς επιβεβαιώνεται ότι το πάχος του κυλίνδρου παίζει σημαντικό ρόλο μέχρι τα 3 χιλιοστά περίπου. Από εκεί και πάνω είναι εμφανές ότι οι τάσεις έχουν συγκλίνει σε μία περίπου σταθερή τιμή.

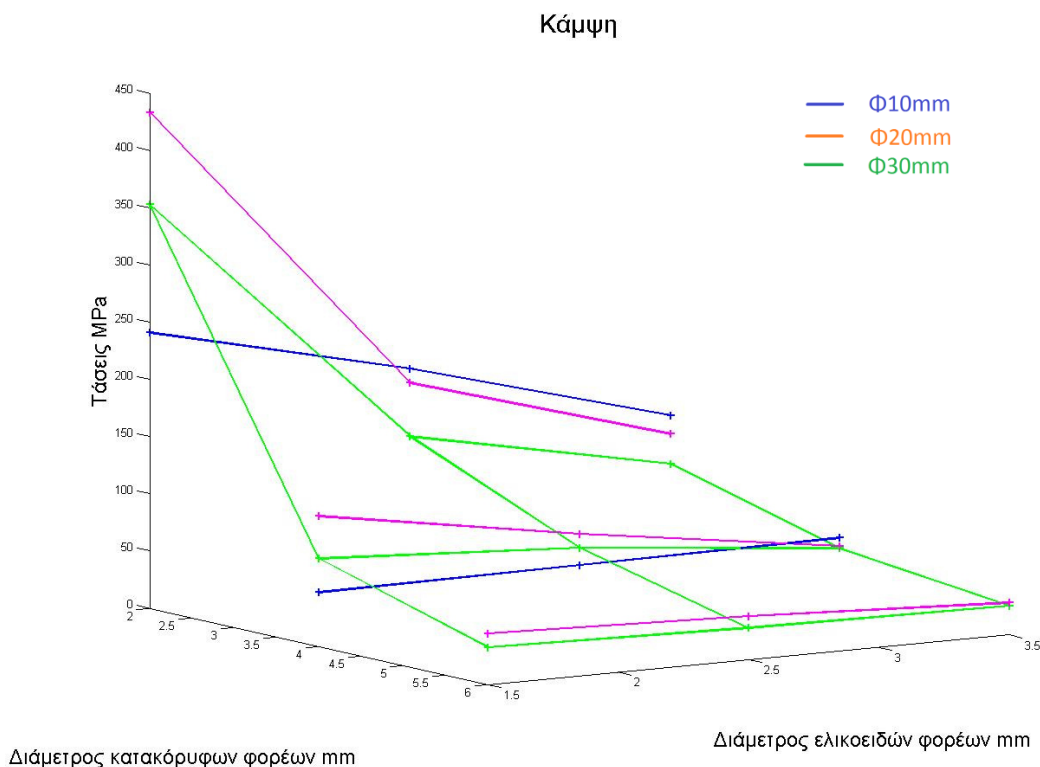


Ως συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι το πάχος του κυλίνδρου δεν αποτελεί τόσο σημαντικό παράγοντα στην κάμψη όσο αποτελεί στην θλίψη. Ταυτόχρονα, παρατηρώντας τα αποτελέσματα του πίνακα που βρίσκεται στο Παράρτημα Α βλέπουμε ότι το συνολικό βάρος του κυλίνδρου με διάμετρο 10mm και πάχος 3mm είναι το ίδιο με τον κύλινδρο διαμέτρου 20mm και πάχους 1mm. Έτσι, γίνεται εμφανές ότι η επιλογή των μεταβλητών εξαρτάται από το είδος της φόρτισης.

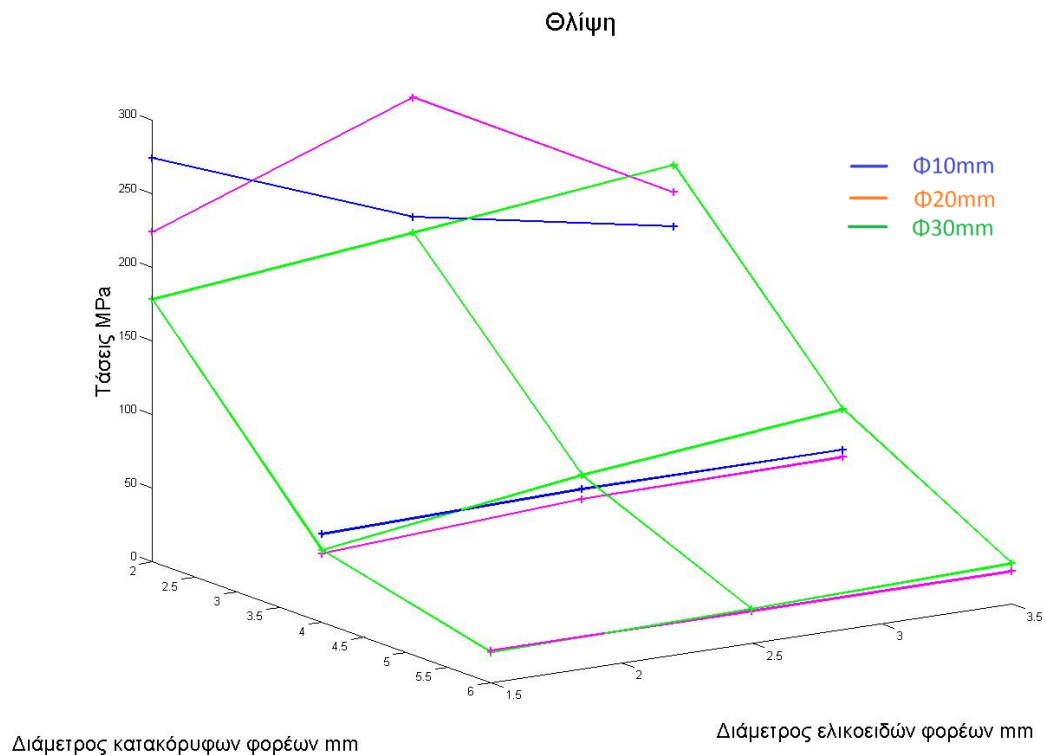
### ➤ Περίπτωση 1

Πλέον, λόγω του πλήθους των παραμέτρων που εξετάζονται τα διαγράμματα που πρέπει να κατασκευαστούν είναι τρισδιάστατες επιφάνειες. Στον κατακόρυφο άξονα εμφανίζονται πάντα οι τάσεις ενώ στους 2 επίπεδους παρατηρούμαι τις μεταβολές των διαμέτρων των φορέων. Έτσι, σχηματίζονται επιφάνειες οι οποίες δείχνουν την μεταβολή των τάσεων ανάλογα με το πια διαδρομή θα ακολουθηθεί. Το ίδιο ισχύει και για τις 3 διαμέτρους για τις οποίες έγινε η μελέτη, αν και σχεδιάστηκε μόνο μία επιφάνεια πλήρως έτσι, ώστε να είναι δυνατό το διάγραμμα να διαβαστεί χωρίς σύγχυση.

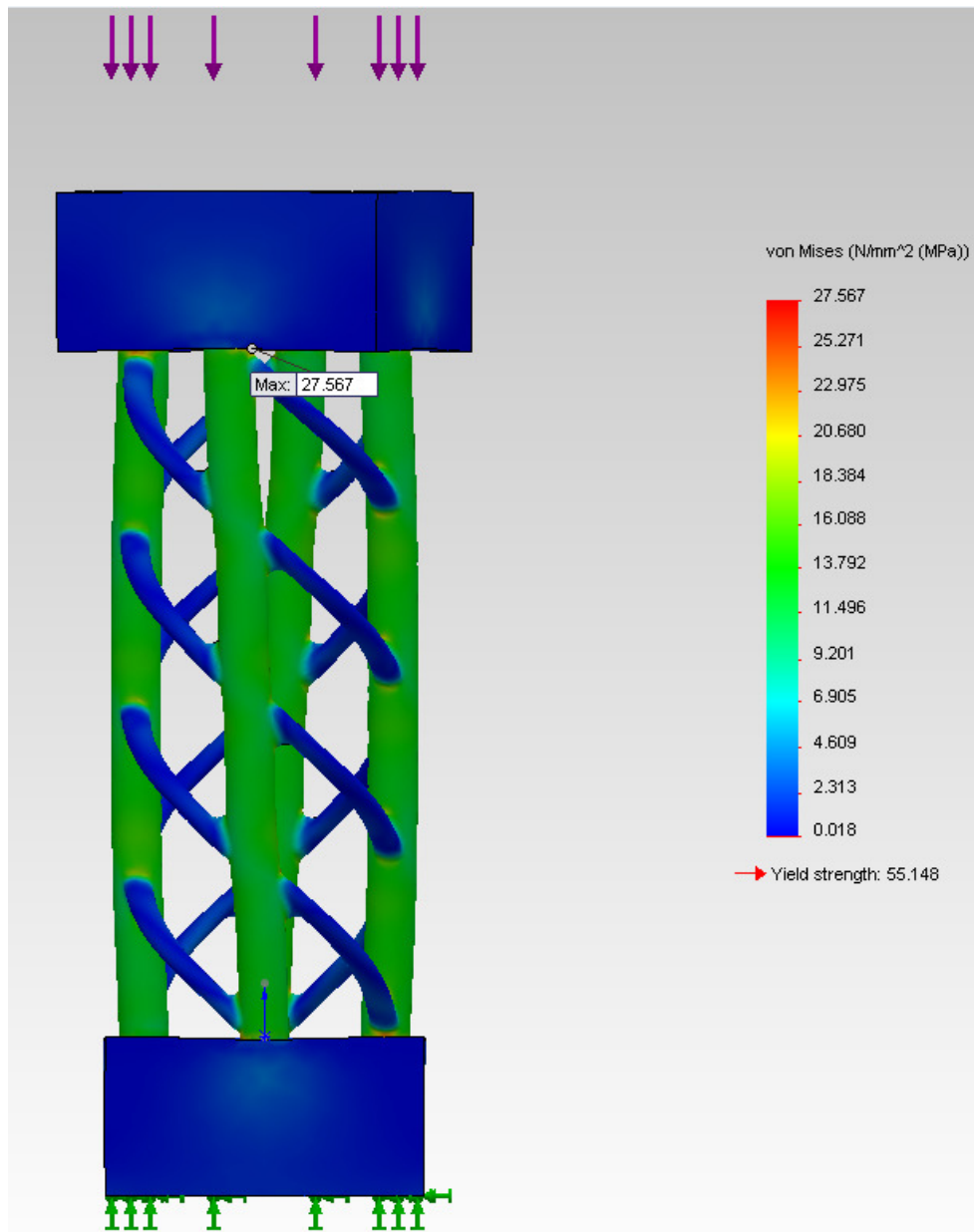
Το πρώτο πράγμα που παρατηρούμε σε αυτή τη γεωμετρία είναι ότι αύξηση της εξωτερική διαμέτρου δεν συνεπάγεται απαραίτητα μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται. Ούτε όμως και αυξάνεται συνέχεια. Συγκριμένα φαίνεται ότι από τα 10 στα 20 χιλιοστά οι τάσεις αυξάνονται αρκετά, και στη συνέχεια μειώνονται, όχι όμως κάτω από τα αρχικά επίπεδα. Αυτό, όμως, παρατηρείτε μόνο για μικρή διάμετρο ελικοειδών φορέων. Όσο η διάμετρος αυτή αυξάνεται, οι τάσεις τείνουν να εξομαλύνονται, ακλουθώντας μία παρόμοια πορεία με την περίπτωση του κυλίνδρου.



Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή γρήγορα συγκλίνουν προς μία σταθερή τιμή ανεξάρτητα από το πόσο αυξάνονται οι διάφορες μεταβλητές. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι υπάρχει μία μεγάλη αύξηση του βάρους χωρίς να παίρνουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα.



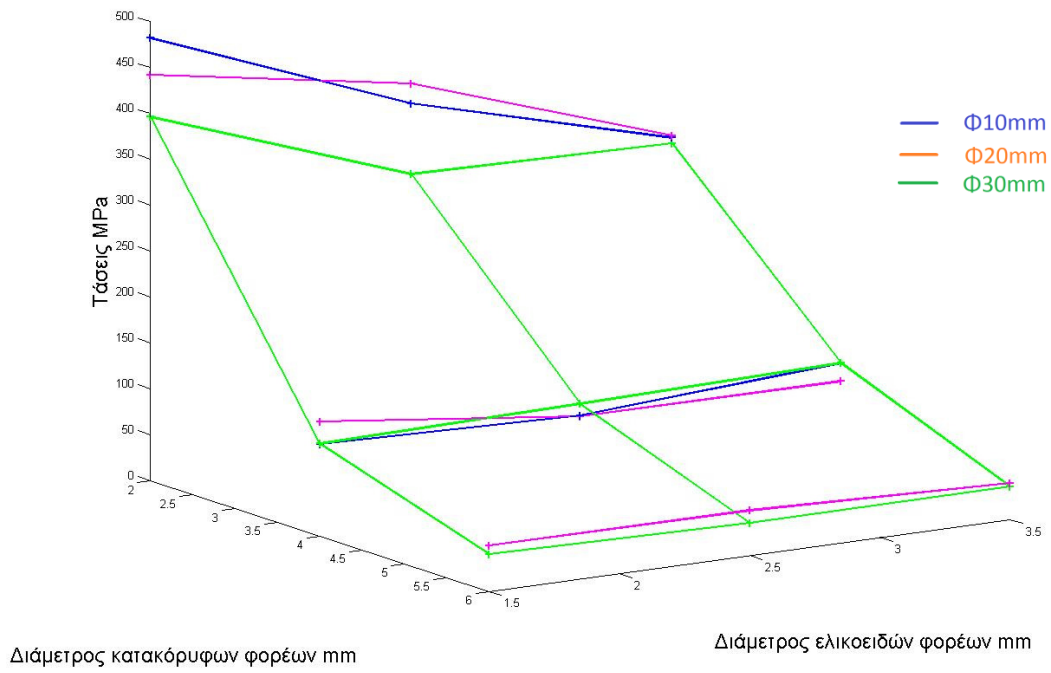
Κατά τη θλίψη της κατασκευής, παρατηρούμε ότι αύξηση της διαμέτρου των ελικοειδών φορέων δεν συνεπάγεται και μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται. Αυτό έχει να κάνει διότι, όπως φαίνεται και από την εικόνα που ακολουθεί, οι ελικοειδής φορείς μεταφέρουν ελάχιστα έως καθόλου φορτία κατά τη θλίψη, και επομένως είναι περισσότερο εμπόδιο παρά διευκόλυνση.



Εικόνα 21: Θλίψη

Παράλληλα, και από την καμπύλη του συνδυασμένου φορτίου, παρατηρούμε την γωνία που σχηματίζεται στα 2,5mm διαμέτρου των ελικοειδών φορέων, γεγονός που σημαίνει ότι μάλλον δεν πρόκειται για κάποιο αριθμητικό λάθος. Η εξήγηση του μπορεί να βρίσκεται στην γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των φορέων και της επίπεδης πλάκας που προσομοιώνει την ένωση των πλεγματικών δομικών υλικών με την υπόλοιπη κατασκευή και όπου συνήθως εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις.

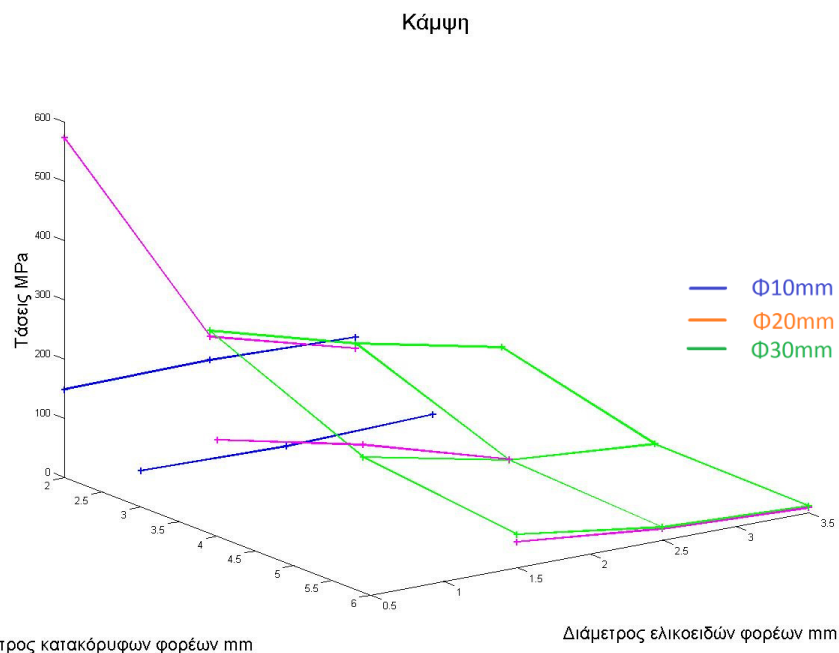
## Συνδυασμένο Φορτίο





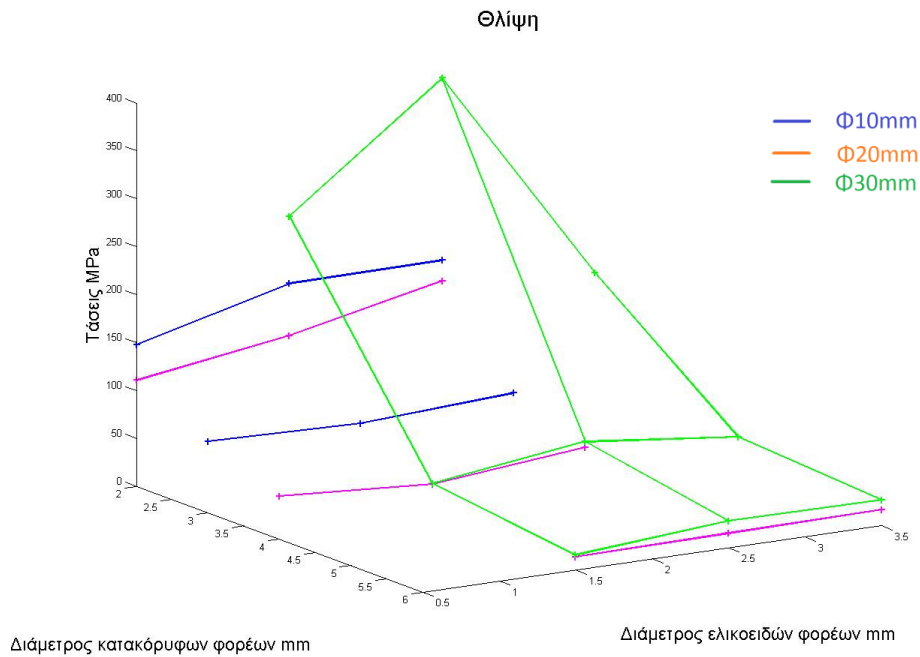
## ➤ Περίπτωση 2

Κατά το σχεδιασμό της δεύτερης αυτής περίπτωσης προτιμούμε για την διάμετρο των 30mm να αυξήσουμε την διάμετρο των ελικοειδών φορέων αφού πιο μικρή από αυτή δεν θα είχε ιδιαίτερο νόημα λόγω των πολύ μεγάλων τάσεων που αναπτύσσονται. Επιπλέον λόγω της μικρής περιφέρειας που σχηματίζεται σε μικρές διαμέτρους δεν είναι δυνατόν να σχεδιάσουμε κατακόρυφους φορείς με διάμετρο μεγαλύτερη από 4 χιλιοστά για αυτό και δεν εμφανίζονται στο επόμενο διάγραμμα.

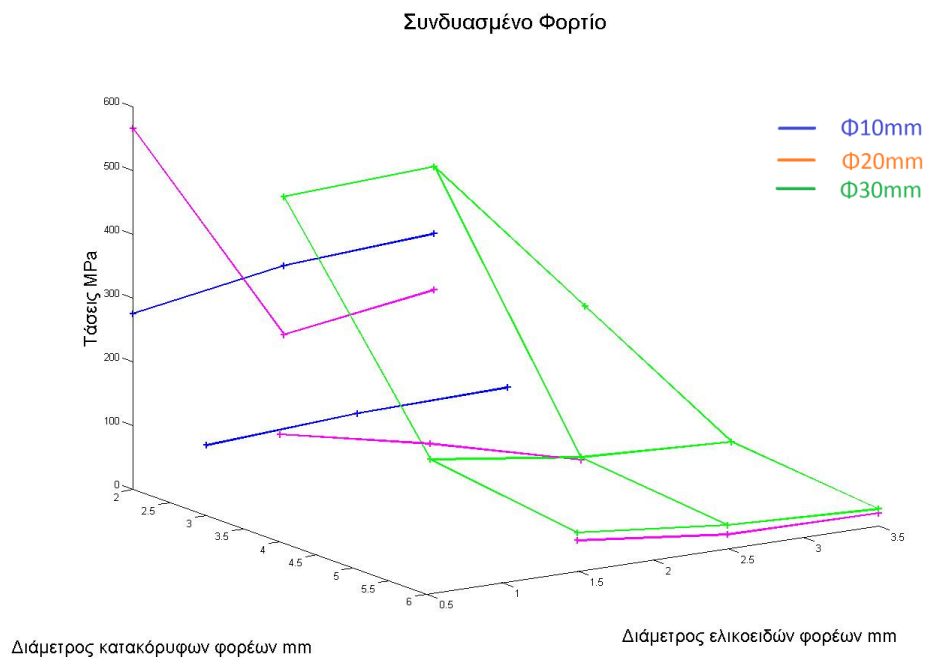


Όσο αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται, αν και υπάρχει μία σταδιακή μείωση αυτών όσο αυξάνονται τόσο οι κατακόρυφοι όσο και οι ελικοειδής φορείς, η τιμή στην οποία συγκλίνουν φαίνεται να είναι αρκετά μεγάλη και όχι ιδιαίτερα ικανοποιητική.

Αντίθετα, τα περίεργα φαινόμενα παρατηρούνται κατά την θλίψη της συγκεκριμένης γεωμετρίας. Συγκεκριμένα, στη μεγαλύτερη από τις τρεις διαμέτρους αναπτύσσονται, συνήθως, οι μεγαλύτερες τάσεις, εξαιτίας του γεγονότος ότι υπάρχουν πολύ μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των φορέων.



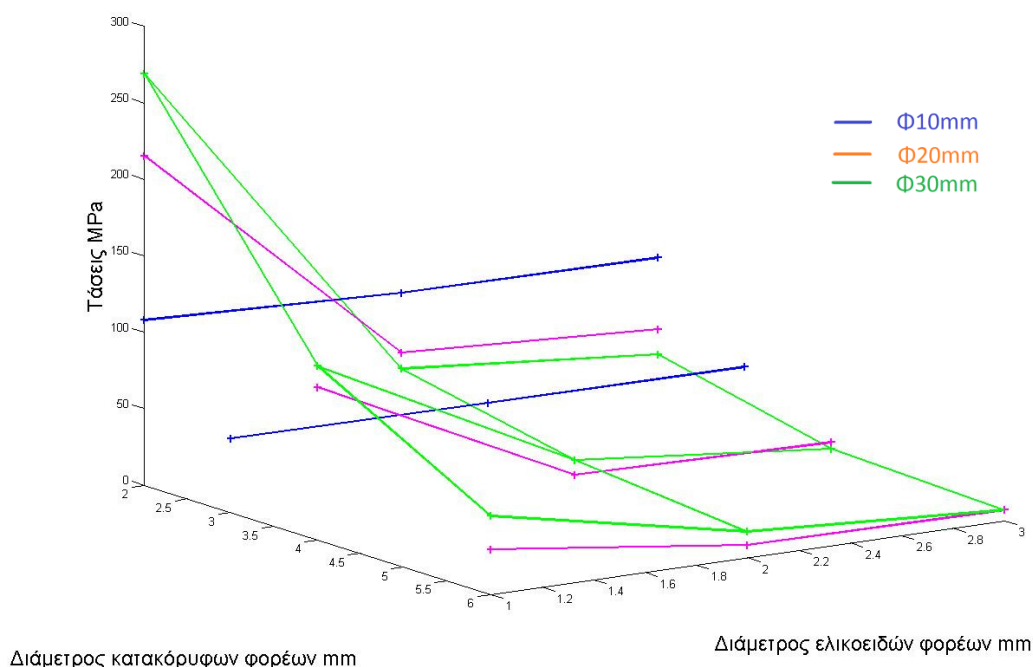
Παρ' όλα αυτά, όταν μεγαλώνει η διάμετρος των κατακόρυφων φορέων, οι τάσεις μεταφέρονται καλύτερα δια-μέσου της κατασκευής και δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές σε αυτές. Στις μεγάλες αυτές διαμέτρους είναι ιδιαίτερα εμφανές ο πολύ μικρός ρόλος των ελικοειδών φορέων στη θλίψη.



### ➤ Περίπτωση 3

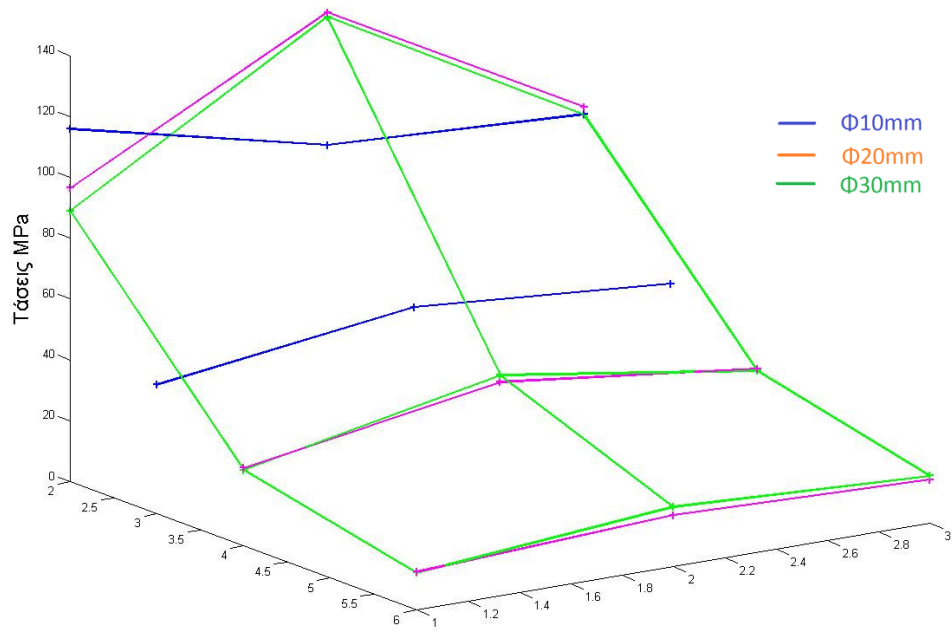
Από την μελέτη της τρίτης περίπτωσης μπορούμε να εξάγουμε τα ίδια, περίπου, συμπεράσματα με την ιδιαιτερότητα ότι στη διάμετρο των 10 χιλιοστών η αύξηση της διαμέτρου των οριζόντιων, πλέον, φορέων δεν επιφέρει καμία, πρακτικά, μεταβολή στις αναπτυσσόμενες τάσεις. Ενώ, ακόμα και στις άλλες διαμέτρους η μείωση που επιφέρει είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την επίδραση των κατακόρυφων φορέων.

#### Κάμψη



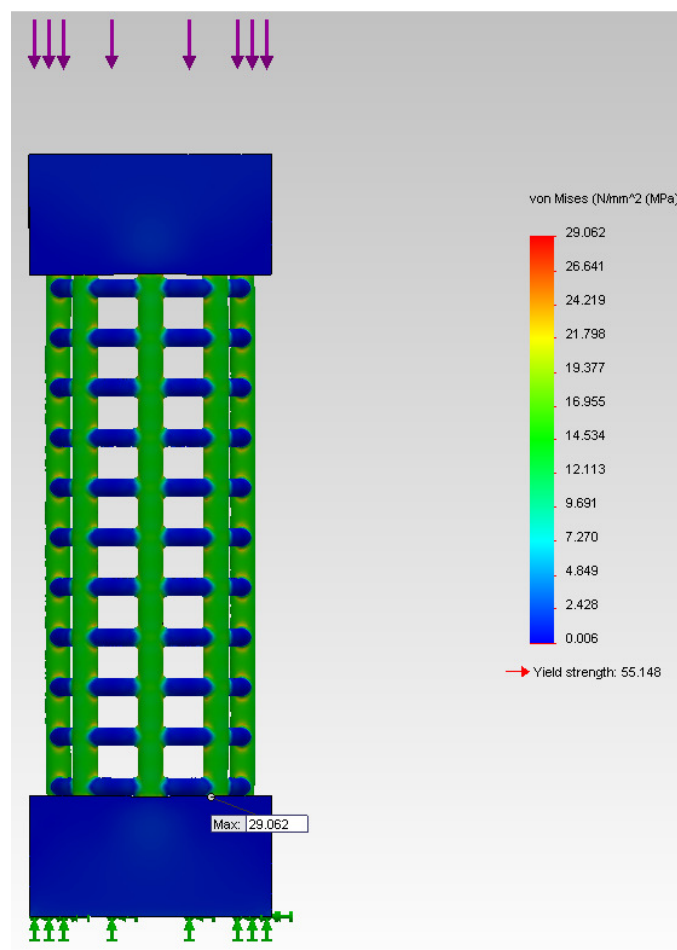
Ακόμα, στην θλίψη, πέρα από την ενίσχυση του προηγούμενου συμπεράσματος, είναι εμφανές ότι αύξηση της διαμέτρου περὶν ἀπὸ τὰ 20 χιλιοστά δεν επιφέρει καμία μεταβολή στις τάσεις. Αυτό έχει να κάνει με τον τρόπο που συμπεριφέρονται οι κατακόρυφοι φορείς, αφού πρακτικά ο κάθε ένας δρα ανεξάρτητα ἀπὸ τὸν ἄλλον, χωρὶς νὰ λαμβάνεται υπ' ὄψιν ἡ μεταξὺ τους ἀπόσταση.

## Θλίψη



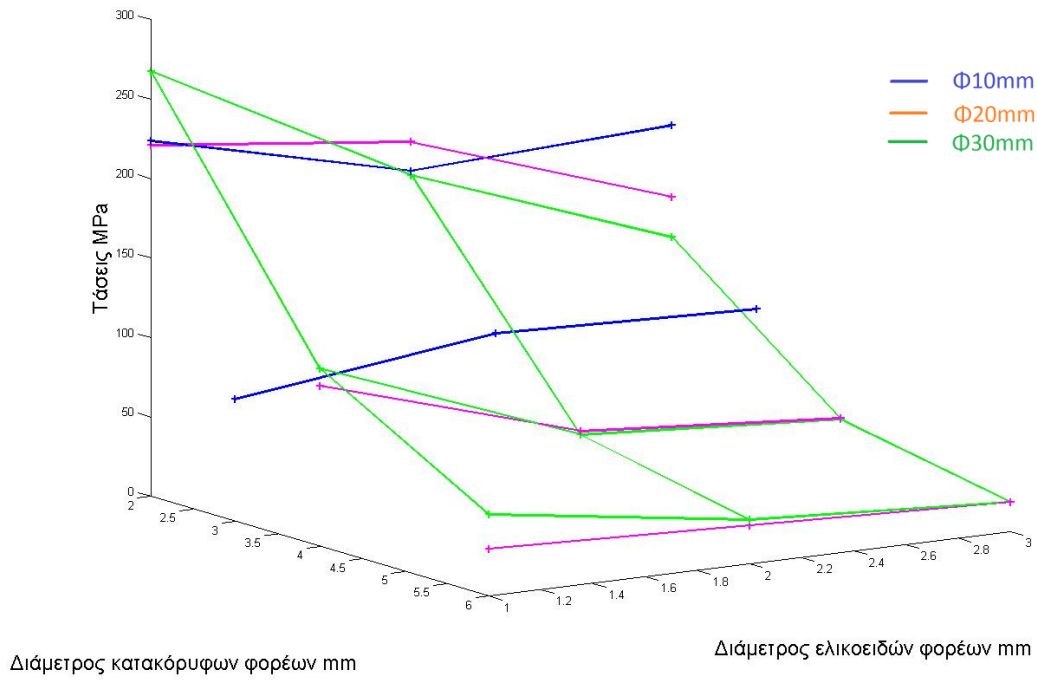
Διάμετρος κατακόρυφων φορέων mm

Διάμετρος ελικοειδών φορέων mm



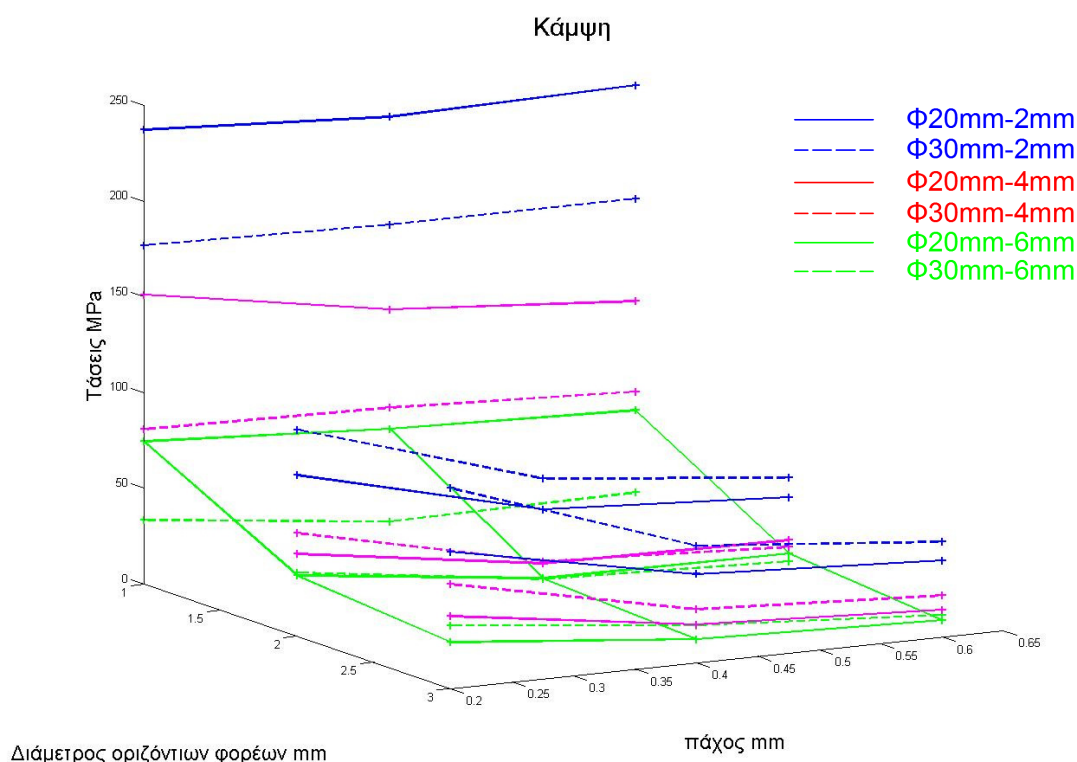
Εικόνα 22: Θλίψη, τάσεις στους κατακόρυφους φορείς

## Συνδυασμένο Φορτίο



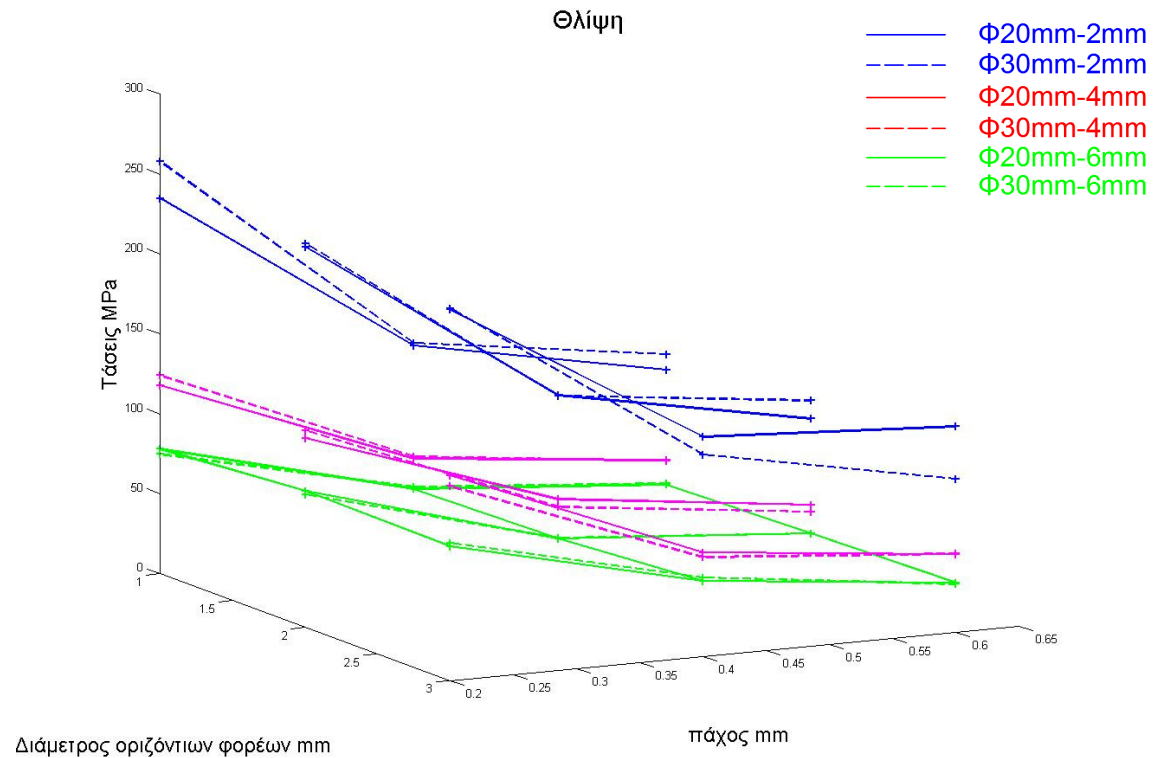
#### ➤ Περίπτωση 4

Κατά την παραμετρική μελέτη της τέταρτης και τελευταίας αυτής περίπτωσης μία επιπλέον μεταβλητή εισέρχεται στην έρευνα. Συγκεκριμένα, εκτός από τις προηγούμενες μεταβλητές που εξετάσαμε προηγουμένως υπάρχει επιπλέον η παράμετρος του πάχους των κατακόρυφων φορέων. Έτσι, λόγω της έκτασης που λαμβάνει πλέον το πρόβλημα, θα εξετάσουμε για δύο μόνο διαμέτρους της κατασκευής, 20 και 30 χιλιοστά αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν, όπου πλέον στον έναν οριζόντιο άξονα βρίσκεται η διάμετρος των οριζόντιων φορέων, ενώ στον δεύτερο το πάχος των κατακόρυφων. Όπως φαίνεται και από το υπόμνημα με συνεχείς γραμμές παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διάμετρο 20 χιλιοστά, ενώ με διακεκομμένες τα αντίστοιχα αποτελέσματα για 30 χιλιοστά. Επιπλέον, με μπλε χρώμα αντιπροσωπεύεται η εξωτερική διάμετρος των κατακόρυφων φορέων που αντιστοιχεί στα 2 χιλιοστά, με κόκκινο στα 4 και με πράσινο στα 6 χιλιοστά.



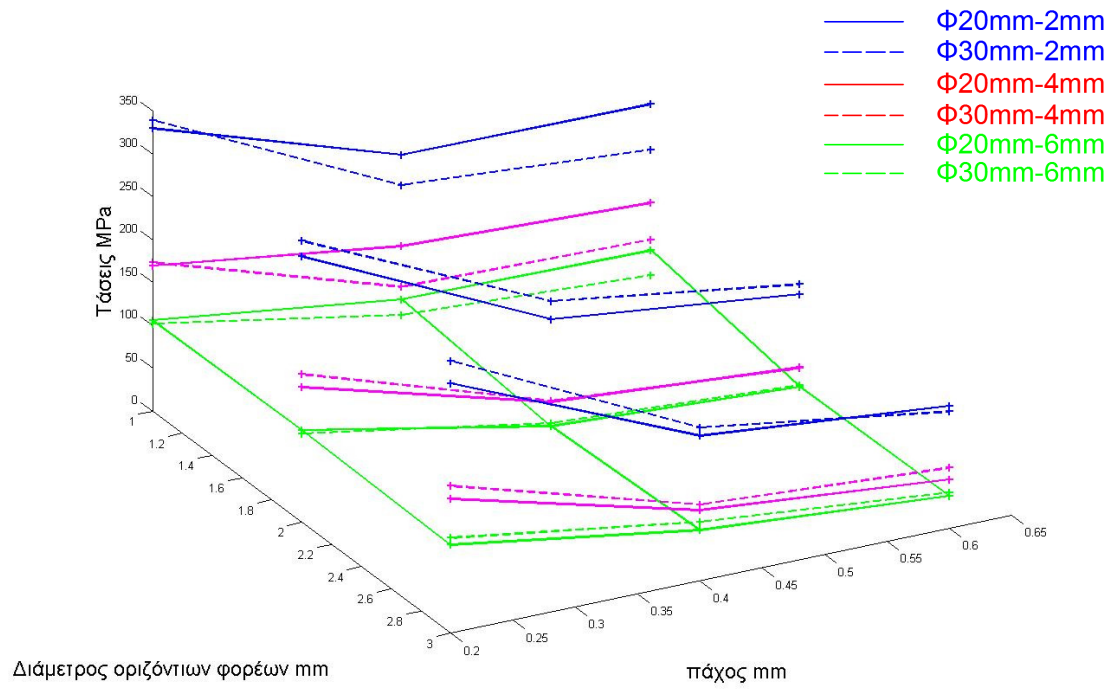
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, το πάχος των κατακόρυφων φορέων δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη μεταφορά των φορτίων, ενώ αύξηση των

διαμέτρων των οριζόντιων φορέων έχει μικρή επίδραση σε αυτό. Είναι εμφανές ότι οι πιο σημαντικοί παράγοντες είναι η διάμετρος της κατασκευής, και η εξωτερική διάμετρος των κατακόρυφων φορέων. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε σχεδόν επίπεδες επιφάνειες κάθετες στον άξονα των τάσεων.



Αντίθετα, κατά τη θλίψη το πάχος των κατακόρυφων φορέων φαίνεται να έχει κάποια επίδραση στην αντοχή της κατασκευής, αντίθετα από τη διάμετρο των οριζόντιων φορέων, η οποία δεν μεταβάλλει σχεδόν καθόλου τις τάσεις που αναπτύσσονται. Επιπλέον, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, η διάμετρος της κατασκευής δεν έχει καμία επίδραση στην αντοχή της κατασκευής αφού συνεχείς και διακεκομμένες γραμμές σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους. Και πάλι, η πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το μέγεθος των τάσεων είναι η εξωτερική διάμετρος των κατακόρυφων φορέων, γεγονός που γίνεται ακόμα πιο έντονο και από τα αποτελέσματα του συνδυασμένου φορτίου.

## Συνδυασμένο Φορτίο





## 3. Χύτευση

### 3.1. Εισαγωγή

Η χύτευση αποτελεί κατεργασία διατήρησης της μάζας, κατά την οποία το υλικό, που βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση, διοχετεύεται (αποχέεται), μέσω αγωγών, σε κατάλληλα προετοιμασμένη-διαμορφωμένη κοιλότητα υποδοχής (τύπος, καλούπι), όπου και στερεοποιείται.

#### 3.1.1. Ιστορική Αναδρομή

Η χύτευση πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 3,500 π.Χ. στη Μεσοποταμία και χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή χάλκινων εξαρτημάτων, κυρίως επίπεδων, με καλούπια από πέτρα ή ψημένο πηλό. Γύρω στο 2,000 π.Χ. η χύτευση εξελίχθηκε περισσότερο. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκαν πυρήνες από ψημένο πηλό (αντίστοιχες με τις σημερινές «καρδιές»), για να φτιάχνονται εσωτερικές κοιλότητες μέσα στα χυτά.

Η τεχνολογία της χύτευσης εξελίχθηκε στη συνέχεια από τους Κινέζους γύρω στο 1,500 π.Χ.. Οι Κινέζοι, παρά το ότι δεν είχαν χρησιμοποιήσει μέχρι τότε τη χύτευση, την υιοθέτησαν και την ανέπτυξαν, ιδιαίτερα στον τομέα του καλουπιού. Η αρχαιολογική σκαπάνη έχει ανακαλύψει καλούπια κατασκευασμένα με ξεχωριστή τέχνη. Οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν διαιρητά καλούπια με πολλά εξαρτήματα που προσδένονταν μεταξύ τους (μέχρι και τριάντα). Εκτός από τους Κινέζους, ιδιαίτερη τέχνη στη χύτευση παρουσίασαν και οι Ινδοί, που χύτευαν χαλκό και μπρούντζο για εργαλεία, όπλα, σκεύη κ.λπ.. Τέλος, η χύτευση του σιδήρου πρωτοεμφανίστηκε γύρω στα 1000 π.Χ. στη Συρία και στην Περσία.

Στη Δύση παρόλο που σαν τεχνική η χύτευση ήταν γνωστή από παλιά, η χρήση της στη μορφοποίηση μεταλλικών αντικειμένων δεν ήταν διαδεδομένη. Στις αρχές του 13ου αιώνα, το κύριο ενδιαφέρον των τεχνιτών περιοριζόταν στην εφαρμογή της μεθόδου για την παραγωγή καμπαρών. Το 1313 χυτεύεται το πρώτο κανόνι. Ο Vannoccio Biringuccio που έγινε επικεφαλής του παπικού χυτηρίου στη Ρώμη το 1538 και κατέγραψε λεπτομερώς την τεχνική της χύτευσης αναγορεύεται πατέρας της βιομηχανίας χυτηρίων. Στην Αμερική το πρώτο χυτήριο λειτούργησε το 1642.

## 3.2. Τεχνικές Χύτευσης

Οι τεχνικές χύτευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ποικιλοτρόπως. Έτσι άλλες φορές κατηγοριοποιούνται με το είδος του καλουπιού, άλλες με τον τρόπο τροφοδοσίας του τήγματος, άλλες με τις εφαρμοζόμενες πιέσεις κ.ά.. Προφανώς ένα είδος μπορεί να ανήκει σε παραπάνω από μία κατηγορίες.

Με βάση το **είδος καλουπιού** διακρίνονται χυτεύσεις

- a) μόνιμου καλουπιού, όπου τα καλούπια χρησιμοποιούνται για πολλές συνεχόμενες χυτεύσεις και
- b) μη μόνιμου καλουπιού (άμμο, γύψο, κεραμικό καλούπι κλπ), όπου τα καλούπια σε αυτή την περίπτωση καταστρέφονται για να αποκαλυφθεί το χυτό.

Με βάση τον **τρόπο έγχυσης** διακρίνονται

- a) η εκ των άνω ή κατευθείαν χύτευση, όπου η απόθεση πραγματοποιείται από πάνω,
- b) η εν αναρροή ή πηγαία χύτευση, όπου η ελεύθερη επιφάνεια του τήγματος πραγματοποιεί ανοδική πορεία καθώς το τηγμένο μέταλλο διοχετεύεται από τη βάση του. Σε αυτή την περίπτωση προφανώς υπάρχει υποβοήθηση υπερπίεσης από κάτω ή υποπίεσης από πάνω,
- c) φυγοκεντρική χύτευση, όπου λόγω της φυγοκέντρου δυνάμεως το τήγμα ρέει προς το καλούπι.

Επίσης ανάλογα με το **ρυθμό απόχυσης του τήγματος** γίνεται διάκριση σε

- a) συνεχείς και
- b) ασυνεχείς τεχνικές χύτευσης, οι οποίες πραγματοποιούνται σε μόνιμα (μεταλλικά) ή μη μόνιμα καλούπια (γύψινα, από άμμο κτλ).

### 3.2.1. Χύτευση Χαμένου Κεριού

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα ασχοληθούμε με ασυνεχείς κατευθείαν χύτευση σε μη μόνιμο καλούπι. Η τεχνική που θα χρησιμοποιήσουμε ονομάζεται χύτευση ακριβείας ή χύτευση χαμένου κεριού. Το όνομα της έγκειται αφ' ενός στο ότι μπορούμε να πετύχουμε πολύ μικρές γεωμετρίες με αρκετά καλή ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας, γεγονός που εξηγεί και την ευρεία χρήση αυτής της τεχνικής. Αφ' ετέρου ονομάζεται χύτευση χαμένου κεριού εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο κατασκευάζεται το γύψινο καλούπι. Συγκεκριμένα, πρώτα κατασκευάζεται ένα μοντέλο από κεριό το οποίο αναπαριστά τη γεωμετρία που θέλουμε να κατασκευάσουμε και έπειτα το εμβαπτίζουμε σε γύψο. Αφήνουμε τον γύψο να στερεοποιηθεί και στη συνέχεια ζεσταίνουμε το κεριό, με αποτέλεσμα αυτό να λιώνει και να φεύγει από το γύψο αφήνοντας ελεύθερη την κοιλότητα η οποία θα καλυφθεί με ρευστό μέταλλο.

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για μικρά χυτά, αλλά έχει χρησιμοποιηθεί για κατασκευή εξ ολοκλήρου αεροπορικών διαχωριστικών θυρών, για χαλύβδινα χυτά και αλουμινίου βάρους μεγαλύτερου από 300 kg και 30 kg αντίστοιχα. Έχει υψηλότερο κόστος ανά μονάδα από χυτεύσεις σε μεταλλικό καλούπι ή καλούπι άμμου αλλά με μικρότερο κόστος εξοπλισμού. Μπορεί ωστόσο να αναπαράγει σχήματα και γεωμετρίες που είναι δύσκολο ή αδύνατο να αναπαραχθούν σε μεταλλικά καλούπια. Επίσης το χυτό εξαγόμενο έχει την τελική του σχεδόν μορφή και χρειάζεται ελάχιστη έως καθόλου επιπλέον επεξεργασία φινιρίσματος.

### 3.2.2. Χύτευση εν Κενώ

Η χύτευση εν κενώ είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος και αφορά τεμάχια σύνθετης γεωμετρίας, βάρους έως και 50 kg. Η τεχνική αυτή είναι το ίδιο εφαρμόσιμη για χύτευση μικρών τεμαχίων (κοσμήματα) και μεγάλων χυτών της βαριάς βιομηχανίας.

Το εύρος των συνθηκών λειτουργίας κατά τη διαδικασία χύτευσης δημιουργεί ποικιλία στις δομές που σχηματίζονται κατά τη στερεοποίηση. Οι δομικές παράμετροι όπως για παράδειγμα το μέγεθος των κόκκων και τα διαδενδριτικά κενά επηρεάζονται αρκετά από τη θερμική συμπεριφορά του συστήματος

μετάλλου/καλουπιού κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης, με αποτέλεσμα μία στενή συσχέτιση μεταξύ του περιγραφόμενου συστήματος και της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν. Το μέγεθος των κόκκων, τα διαδενδριτικά κενά, το πορώδες, τα προϊόντα διαχωρισμού/κατακρήμνισης και άλλες φάσεις θα προσδιορίσουν τη μηχανική συμπεριφορά του κράματος, η οποία αντιπροσωπεύεται από τις τάσεις και/ή τις παραμορφώσεις. Οι μηχανικές ιδιότητες του χυτού μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω, εάν είναι απαραίτητο, με θερμική επεξεργασία. Για παράδειγμα, εάν απαιτούνται μέγιστες μηχανικές ιδιότητες, η θερμική επεξεργασία περιλαμβάνει ζέσταμα σε υψηλή θερμοκρασία ακολουθούμενη από απότομη ψύξη και στη συνέχεια φυσική ή τεχνητή γήρανση σε περίπτωση ελαφριών κραμάτων.

Χύτευση βαρύτητας σε μη μόνιμο καλούπι με σχετικά μικρή ταχύτητα πλήρωσης οδηγεί σε σχετικά χαμηλό ρυθμό στερεοποίησης και ως επακόλουθο θα έχουμε μειωμένες μηχανικές ιδιότητες. Η λύση βρίσκεται είτε στην υιοθέτηση μόνιμων καλουπιών, συνήθως μεταλλικών, είτε στην υιοθέτηση υψηλών ταχυτήτων πλήρωσης σε αναλώσιμα αλλά και λεπτών καλουπιών. Η χύτευση υψηλής πίεσης και τα ήμι-μόνιμα καλούπια είναι εξαιρετικά παραδείγματα της πρώτης εναλλακτικής μεθόδου με αρκετά υψηλό κόστος απόκτησης της χυτόπρεσσας και για τα μόνιμα καλούπια/μήτρες, τα οποία γίνονται απαγορευτικά για οποιοδήποτε κομμάτι μεγαλύτερο του μικρού ή μεσαίου μεγέθους χυτού. Η χύτευση ακριβείας και οι παραλλαγές αυτής που βασίζονται σε κελύφη αποτελούν το παράδειγμα της δεύτερης εναλλακτικής λύσης, όπου τα κόστη είναι αρκετά μικρότερα αλλά ο σχεδιασμός του συστήματος τροφοδοσίας απαιτεί μεγάλη εμπειρία και, επιπρόσθετα, για μη συνηθισμένες χυτεύσεις, αριθμητική προσομοίωση.

Η χύτευση ακριβείας με χρήση κενού ή/και πίεσης χρησιμοποιείται για την παραγωγή γενικά μικρότερων κομματιών με περίπλοκη γεωμετρία. Η εφαρμογή κενού έχει ως στόχο την αύξηση της πλήρωσης του καλουπιού και την παροχή μίας προστατευτικής ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια της τήξης του μετάλλου για την αποφυγή της δημιουργίας οξειδίων. Επιπλέον, η εφαρμογή της πίεσης κατευθείαν μετά την ολοκλήρωση της τήξης χρησιμοποιείται ως ένας επιπλέον τρόπος για την βελτίωση της πλήρωσης ακόμα και στις πιο μικρές λεπτομέρειες του δέντρου χύτευσης. Η κατασκευή άρτιων κομματιών χωρίς κανένα ελάττωμα είναι απαραίτητη για την αποφυγή ακριβών επιδιορθωτικών κατεργασιών μετά τη χύτευση όπως για

παράδειγμα λείανση επιφανειών, επιδιόρθωση με συγκόλληση των κοιλιοτήτων και τρυπών ή ακόμα και επαναχύτευση.

Ένας αριθμός από πρόσφατες μελέτες αξιολογεί κυρίως τις μηχανικές ιδιότητες των κατασκευαστικών κομματιών που παράγονται από διάφορες τεχνικές χύτευσης. Τα υλικά που εξετάζονται είναι κυρίως κράματα και μόνο σε μερικές περιπτώσεις χάλυβας [8]. Η τεχνικές χύτευσης που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν χύτευση υψηλής πίεσης, φυγόκεντρη χύτευση, χύτευση σε καλούπι κελύφους, χύτευση συμπίεσης και χύτευση βαρύτητας η οποία χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο σύγκρισης για της υπόλοιπες. Οι ιδιότητες που μας ενδιαφέρουν περιλαμβάνουν στατική αντοχή, ψευδοστατική συμπεριφορά [9], ολκιμότητα και αντοχή σε κόπωση [10]. Αυτές οι ιδιότητες σχετίζονται με την κατανομή του μεγέθους των κόκκων, την μικροδομή και το πορώδες καθώς και με άλλα ελαττώματα τα οποία εμφανίζονται σε μεγάλο βαθμό εξαιτίας των χαρακτηριστικών της διαδικασίας στερεοποίησης. Για παράδειγμα, η φυγόκεντρη δύναμη μπορεί να αυξήσει το όριο ελαστικότητας κατά 35%, το όριο διαρροής κατά 160% και την αντοχή σε κόπωση κατά περίπου 1500% περισσότερο από την τεχνική της χύτευσης σε βαρύτητα για τα δομικά κράματα τύπου Al-Si [11]. Προτάσεις που συσχετίζουν την μηχανική συμπεριφορά με τις παραμέτρους της μικροδομής είναι αρκετά σύνηθες κατά τη διαδικασία σχεδιασμού της χύτευσης μέσω των συνθηκών της στερεοποίησης [12], αλλά η μόνη ευρέως χρησιμοποιούμενη συσχέτιση αναφέρεται στο όριο αντοχής του υλικού και στο μέγεθος των κόκκων (εξίσωση Hall-Petch).

Οι σχετικές παράμετροι της κατεργασίας και των σύγχρονων μηχανών και τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε τόσο στην προσομοίωση όσο και στην κατασκευή του τεμαχίου είναι:

- το ποσοστό του εφαρμοζόμενου κενού,
- η εφαρμογή υπερπίεσης αμέσως μετά την έγχυση του τήγματος στο καλούπι,
- η παρουσία προστατευτικού αερίου (Ar ή N),
- η θερμοκρασία του τήγματος και η θερμοκρασία του καλουπιού.

Η αρχή λειτουργίας των μηχανών χύτευσης με υποβοήθηση κενού είναι η εξής:

Για να επιτευχθεί καλή πλήρωση των καλουπιών κατά τη χύτευση υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα μέσα στο αεροστεγές δοχείο έχει βρεθεί ότι είναι απαραίτητο να υπάρχει μεγάλη διαφορά πίεσης ανάμεσα στο θάλαμο τήξης και το θάλαμο χύτευσης.

Η διάτρητη φλάσκα τοποθετείται ανάποδα, με το κάτω μέρος της να εφάπτεται στην έξοδο του τηγμένου μετάλλου. Η συσκευή αποτελείται από δύο κυλινδρικούς θαλάμους, το θάλαμο τήξης και το θάλαμο χύτευσης. Ο θάλαμος χύτευσης έχει μέγεθος τέτοιο ώστε να χωράει και τις μεγαλύτερες χρησιμοποιούμενες φλάσκες. Είναι επίσης κατάλληλα διαμορφωμένος ώστε να είναι στεγανά διαχωρισμένος από τον θάλαμο τήξης όλο το χρόνο, εκτός των λίγων δευτερολέπτων της έγχυσης. Μερικό κενό δημιουργείται μέσα στο θάλαμο και γύρω από το καλούπι, αλλά όχι εντός του, και το μέταλλο εγχέεται στο εκτεθειμένο (στον αέρα) άνοιγμα του καλουπιού

Το κενό διατηρείται μέχρι να συμβεί πλήρης στερεοποίηση των χυτών τεμαχίων. Με τον τρόπο αυτό, συν τοις άλλοις, απομακρύνονται και τυχόν εγκλωβισμένα αέρια, που θα δημιουργούσαν ελαττώματα στο χυτό. Λόγω του γεγονότος ότι η φλάσκα είναι διάτρητη, μία πολύ μεγαλύτερη περιοχή του μούφλου είναι εκτεθειμένη στο κενό, καταλήγοντας σε μία μεγαλύτερη και πιο όμορφα κατανεμημένη διαφορά πίεσης.

Τα μειονεκτήματα των μηχανών αυτών είναι το κόστος των ειδικά σχεδιασμένων φλασκών και η δυσκολία της τοποθέτησης με ακρίβεια των φλασκών στη μηχανή, όταν βρίσκονται σε θερμοκρασία πάνω από 700°C. Μεγάλης σημασίας είναι η επίτευξη ταυτόχρονης έγχυσης μετάλλου και εφαρμογής κενού, γι' αυτό και οι περισσότερες μηχανές του είδους λειτουργούν αυτόματα, ώστε να δημιουργείται κενό στο θάλαμο χύτευσης πριν την έγχυση του μετάλλου. Επίσης, οι μηχανές αυτές παρέχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης επιβολής υψηλής πίεσης και χρήσης αδρανούς αερίου στο θάλαμο τήξης.

### 3.3. Αριθμητική Προσομοίωση Χύτευσης

Η επιλογή των παραμέτρων χύτευσης εν γένει (π.χ. αρχική θερμοκρασία μετάλλου, θερμοκρασία καλουπιού, ατμόσφαιρα και πίεση χύτευσης) για την απόκτηση ποιοτικών χυτών δεν αποτελεί μία τετριμμένη διαδικασία. Οι κατάλληλες παράμετροι χύτευσης μπορούν να προσδιοριστούν είτε με τη διεξαγωγή ενός μεγάλου αριθμού πειραμάτων (πειραματική προσέγγιση), είτε με χρήση ενός προγράμματος προσομοίωσης της χύτευσης (υπολογιστική προσέγγιση) [13]. Η πειραματική προσέγγιση εξαρτάται άμεσα από την εμπειρία, περιλαμβάνοντας τόσο υψηλό κόστος όσο και δυσκολία στην διερεύνηση των ελαττωμάτων με χρήση μικροσκοπίου ή/και καταστροφικών μεθόδων. Η υπολογιστική προσέγγιση, από την άλλη μεριά, προσφέρει όχι μόνο την δυνατότητα να δοκιμαστεί κάθε πιθανή παράμετρος της χύτευσης όσο και εύκολη παρακολούθηση της διαδικασίας σε κάθε στάδιο αυτής.

Η προσομοίωση της χύτευσης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας μεθόδων χύτευσης μόνιμου, αλλά και μη μόνιμου καλουπιού. Είναι ο τρόπος να προβλεφθούν τα διάφορα ελαττώματα χυτών με ακρίβεια, χωρίς απώλεια αναλωσίμων και σε ελάχιστο συγκριτικά χρόνο. Η μεγάλη πολυπλοκότητα πειραματικών δοκιμών σε χυτεύσεις υψηλής πίεσης και τα συνεπαγόμενα κόστη σε συνδυασμό με τους τεχνικούς περιορισμούς των διαδικασιών αυτών, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη εργαλείων για την προσομοίωση των διαφόρων παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας αποτελούν βασική προτεραιότητα για τις βιομηχανίες.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί υπό την προϋπόθεση ότι οι αρχικές συνθήκες, οι οριακές συνθήκες, οι ιδιότητες του υλικού και οι παράμετροι της αριθμητικής προσομοίωσης είναι σωστά προσδιορισμένες [14]. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση αφορούν την διαδικασία γέμισης του καλουπιού συμπεριλαμβανομένου την ταχύτητα και την πίεση και την διαδικασία στερεοποίησης συμπεριλαμβανομένου της θερμοκρασίας του χυτού, όπως επίσης και το πορώδες που σχηματίζεται.

Η ποιότητα της χύτευσης μπορεί να αξιολογηθεί μέσα από τέσσερις βασικούς παράγοντες:

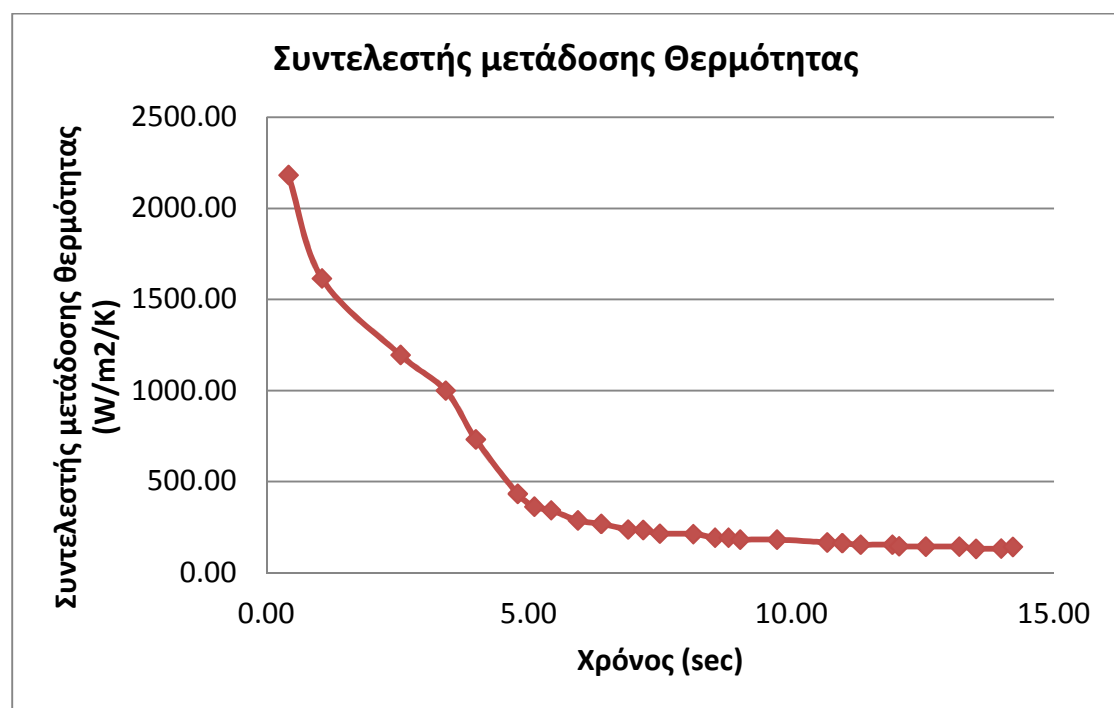
- τον πιο μεγάλο χρόνο στερεοποίησης στο χυτό που αποτελεί το τελικό προϊόν οποία στερεοποιήθηκε πρώτη. Γενικά, μικρός χρόνος στερεοποίησης είναι επιθυμητός ώστε να επιτευχθεί καλή μικροδομή κατά τη χύτευση.
- Το εύρος του χρόνου στερεοποίησης, αφορά την διαφορά στο χρόνο στερεοποίησης σε δύο περιοχές, σε αυτή που ξεκινά και σε αυτή που τελειώνει η διαδικασία της στερεοποίησης. Γενικά, μικρό εύρος στους χρόνους στερεοποίησης οδηγεί σε υψηλή ομοιογένεια και στην αποφυγή ελαττωμάτων όπως θερμές ρωγματώσεις και πόρους.
- Το πορώδες το οποίο είναι το ποσοστό του όγκου του χυτού το οποίο είναι κενό. Γενικά, χαμηλό ποσοστό πορώδους είναι δείγμα υψηλής ποιότητας χυτού.
- Το χρόνο πλήρωσης, αφορά το χρόνο που απαιτείται ώστε το καλούπι να γεμίσει πλήρως με μέταλλο. Συνήθως, μικρός χρόνος πλήρωσης είναι προαπαιτούμενο για ομοιογενή στερεοποίηση.

Μία παράμετρος είσοδος-κλειδί στην προσομοίωση οποιαδήποτε διαδικασίας χύτευσης είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (HTC) στην διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του καλουπιού [15]. Ο καθορισμός του κατάλληλου συντελεστή μετάδοσης θερμότητας είναι ένα πρακτικό πρόβλημα επειδή αυτός δεν αποτελεί μία ιδιότητα του υλικού, αλλά μία παράμετρος οι οποία εξαρτάτε σε μεγάλο βαθμό από τις υπάρχοντες συνθήκες: τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών που έρχονται σε επαφή, του μετάλλου, το σχήμα και το μέγεθος του καλουπιού, τις τεχνικές επεξεργασίας, την τραχύτητα του καλουπιού στη διεπιφάνεια του, τις επικαλύψεις του καλουπιού, την πίεση, την θερμοκρασία τήξης του μετάλλου, όπως και την αρχική θερμοκρασία του καλουπιού [14]. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ρυθμίζει την ροή της θερμότητας καθώς και το εύρος της ροής της θερμότητας σε όλο το μήκος των περιοχών του χυτού και του καλουπιού, επηρεάζει την πρόοδο της στερεοποίησης και τις ιδιότητες της μικροδομής του χυτού. Μία ειδική τεχνική έχει επινοηθεί τελευταία για τον προσδιορισμό του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας βασισμένη σε προσομοιώσεις της διαδικασίας της χύτευσης με χρήση μίας τυχαίας αρχικής τιμής του HTC και με σταδιακή βελτίωση της τελευταίας μέσω σύγκρισης



των τιμών της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο που προκύπτουν από την προσομοίωση και από πειράματα σε διάφορα σημεία του χυτού.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιήσουμε έναν συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατάλληλο για αλουμίνιο. Ο συγκεκριμένος συντελεστής, συναρτήσει του χρόνου, προέκυψε μέσα από κατάλληλα πειράματα χύτευσης για συγκεκριμένες συνθήκες και γεωμετρία. Αν και δεν θα χρησιμοποιήσουμε τις ίδιες συνθήκες χύτευσης, οι τιμές αυτές αποτελούν, ίσως, τις πιο αντιπροσωπευτικές τιμές του συντελεστή θερμότητας, οι οποίες πλησιάζουν τις τιμές του συντελεστή θερμότητας και σε αυτό το πείραμα. Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία, συναρτήσει του χρόνου φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



Στην πραγματικότητα, είναι απαραίτητο να μελετηθούν μέσω προσομοίωσης όσα περισσότερα σενάρια είναι δυνατόν για όσες τον δυνατόν περισσότερες σημαντικές παραμέτρους με σκοπό να σχηματιστεί μία συγκεκριμένη λογική σχετικά με την διαδικασία σχεδιασμού της χύτευσης η οποία θα καθοδηγείται από τα χαρακτηριστικά του υλικού τα οποία σχετίζονται με την γεωμετρία του (μέγεθος,

σχήμα, περιπλοκότητα, πάχος, κ.τ.λ.), την ποιότητα του (τραχύτητα, ανοχές, μέγιστο μέγεθος κενών) και την παραγωγή (απαιτούμενη ποσότητα, ρυθμός παραγωγής, χρόνος ολοκλήρωσης). Τόσο τεχνικές ποιοτικού σχεδιασμού πολλαπλών απαντήσεων όσο και έμπειρα συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστούν οι καλύτερες τιμές για τις παραμέτρους της χύτευσης οι οποίες, σε πολλές περιπτώσεις, είναι ανακριβείς σε κάποιο βαθμό και επιφέρουν ανακριβή λειτουργικές συσχετίσεις [16,17]. Τελευταία, έξυπνα μοντέλα βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες χύτευσης όπως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα [18] εκπαιδευμένα μέσα από πραγματικά ή υπολογιστικά μοντέλα και αλγόριθμοι προσομοιωμένης απόκτησης ή γενετικοί αλγόριθμοι [19].

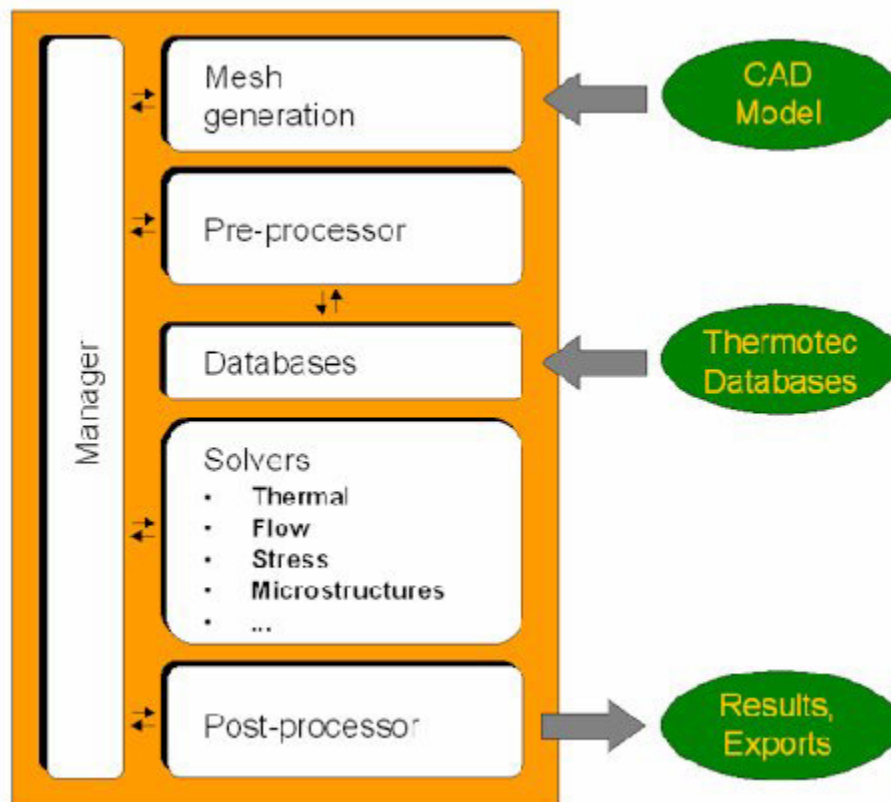
Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης, κατά συνέπεια, είναι τα εξής: οικονομία ενέργειας, βελτίωση στην ποιότητα του προϊόντος, μείωση του χρόνου διαδικασίας, μείωση της επανειλημμένης χρήσης των ίδιων υλικών και αύξηση της παραγωγής.

### 3.3.1. Εισαγωγή στο ProCast

Το Procast χρησιμοποιεί τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων για τη μοντελοποίηση διαδικασιών χύτευσης και των φαινομένων που τις συνοδεύουν. Πιο συγκεκριμένα είναι δυνατή η προσομοίωση του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας, της ροής του ρευστού, του τρόπου πλήρωσης το καλουπιού καθώς και στοιχείων της μικροδομής του χυτού, όπως το πορώδες και οι εσωτερικές τάσεις.

Η δομή του προγράμματος βασίζεται γύρω από ένα κύριο διαχειριστή, ο οποίος περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποπρογράμματα (modules) :

- MeshCast: όπου δημιουργείται η γεωμετρία του μοντέλου
- PreCast: στο οποίο προσθέτουμε στο μοντέλο, το είδος των υλικών, τις οριακές και συνοριακές συνθήκες
- DataCast: όπου ελέγχεται συνολικά το μοντέλο
- ProCast: στο οποίο γίνεται η επεξεργασία
- ViewCast: απεικονίζει και εξετάζει τα αποτελέσματα



Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση του ProCast

Πιο αναλυτικά για την έκδοση 2004.1 του PROCAST που χρησιμοποιήσαμε, έχουμε τα ακόλουθα:

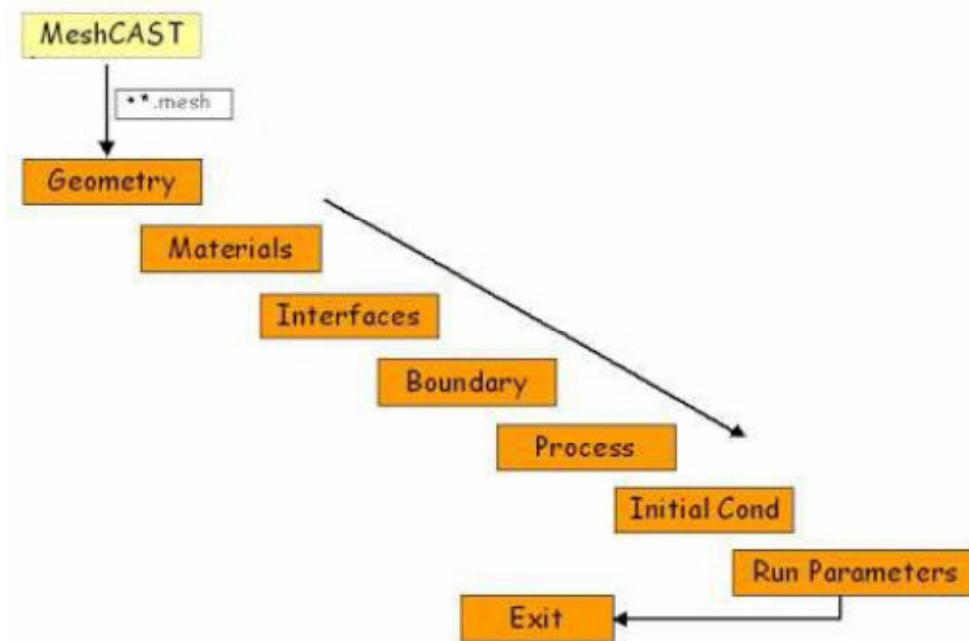
### **MeshCast**

Στο module αυτό γίνεται ορισμός της γεωμετρίας του αντικειμένου που θέλουμε να χυτεύσουμε καθώς και το καλούπι του. Είναι δυνατή η σχεδίαση του με τις εντολές που παρέχει το πρόγραμμα αλλά και η εισαγωγή του κατάλληλου αρχείου που προέρχεται από κάποιο CAD λογισμικό ( CATIA, AUTOCAD κτλ). Σε εφαρμογές απλής γεωμετρίας συνηθίζεται η σχεδίαση τους στο MeshCast ενώ για πιο σύνθετες μορφές η σχεδίαση πρέπει να γίνεται σε κατάλληλα προγράμματα και να εισάγονται στο MeshCast για διορθώσεις και πλεγματοποίηση. Σε κάθε περίπτωση, το μοντέλο ελέγχεται για την ύπαρξη σφαλμάτων, το πλήθος των σχηματισμένων επιφανειών και ακμών, ανάλογα με την προκαθορισμένη ακρίβεια.

Αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα ορίζονται τα επιφανειακά πλέγματα με την επιθυμητή πυκνότητα καθώς και τα ογκικά πλέγματα σε άλλη λειτουργία του MeshCast. Να σημειώσουμε πως ο αριθμός των τετράεδρων που ορίζουν ένα πλέγμα δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλος καθώς επηρεάζει την ταχύτητα και την ακρίβεια των υπολογισμών.

### **PreCast**

Στο υποπρόγραμμα PreCast ορίζουμε τα υλικά αντικειμένου και καλουπιού, τις αρχικές συνθήκες, τις οριακές συνθήκες και τις παραμέτρους τρεξίματος. Όλα αυτά τα στοιχεία προέρχονται από τις βάσεις δεδομένων του PROCAST και οφείλονται στην καταγραφή των αποτελεσμάτων πειραματικών διαδικασιών.



Εικόνα 24: Ακολουθούμενη διαδικασία στο PreCast

Η διαδικασία της προ-επεξεργασία έχει ως εξής:

Αρχικά γίνεται επανέλεγχος της γεωμετρίας του μοντέλου και ορίζουμε το κατάλληλο υλικό για το χυτό ( χάλυβας, αλουμίνιο, μπρούντζος κτλ) και το καλούπι ( άμμος, γύψος κτλ ). Κάθε υλικό που επιλέγουμε από τη βάση δεδομένων προσδιορίζεται αναλυτικά με πίνακες και μεγέθη για τις θερμικές, χημικές και μηχανικές του ιδιότητες. Επιπλέον μπορεί ο χρήστης να ορίσει νέο υλικό με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Μετά ακολουθεί ο ορισμός του διανύσματος βαρύτητας σε οποιονδήποτε από τους τρεις άξονες και η εισαγωγή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών, όπως πίεση χυτού, καλουπιού, διεπιφάνειας, θερμοκρασία. Έπειτα καθορίζουμε τις παραμέτρους τρεξίματος οι οποίες καθορίζουν το συνολικό χρόνο προσομοίωσης, τον αριθμό των βημάτων, τον υπολογισμό πορώδους καθώς και τον τρόπο πλήρωσης του καλουπιού και τον τρόπο επίλυσης του ροϊκού προβλήματος. Αφού καθορίσουμε όλα τα παραπάνω ανοίγουμε το DataCast.

### **DataCast**

Σκοπός του DataCast είναι η συνολική επισκόπηση του μοντέλου, ο εκτεταμένος έλεγχος σφαλμάτων και η μετατροπή όλων των μονάδων στο πρότυπο CGS. Κατά την εκτέλεση του, εμφανίζει στο παράθυρο ελέγχου την πιθανή ύπαρξη

ελαττωμάτων, τα οποία πρέπει να διορθωθούν για να συνεχιστεί η προσομοίωση. Μια ακόμα λειτουργία του DataCast είναι η δημιουργία αρχείων που περιέχουν την περίληψη του προβλήματος και τη γεωμετρία με τις ιδιότητες του μοντέλου.

### **ProCast**

Στο module του ProCast γίνονται όλοι οι υπολογισμοί της διαδικασίας της προσομοίωσης, σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουμε ορίσει στα προηγούμενα υποπρογράμματα. Επίσης γίνεται η επίλυση του θερμικού και ροϊκού προβλήματος και δημιουργούνται αρχεία αναγνωρίσιμα από το ViewCast. Στο παράθυρο ελέγχου που ανοίγεται φαίνεται αν «τρέχει» η διαδικασία και μόλις ολοκληρωθεί εμφανίζει το ανάλογο μήνυμα. Τέλος στο ProCast περιλαμβάνεται και το υποπρόγραμμα PostCast που επιτρέπει την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

### **ViewCast**

Στο ViewCast πραγματοποιείται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται είτε με εικόνες, σταδιακά, ανάλογα με τον αριθμό των εκτελεσμένων βημάτων, είτε με γραφικές παραστάσεις.

Οι υπολογισμοί αφορούν τα εξής:

- Τη θερμοκρασία
- Το ποσοστό στερεοποίησης
- Το χρόνο στερεοποίησης
- Το ποσοστό πορώδους
- Τη συνισταμένη ταχύτητα του ρευστού μετάλλου

### **Status**

Τέλος στον manager του PROCASΤ διακρίνουμε το module Status, το οποίο εμφανίζει την εξέλιξη της διαδικασίας, το χρόνο και τον αριθμό των βημάτων.

### 3.3.2. Προσομοίωση πλήρωσης

Για τη μελέτη του ροϊκού προβλήματος, τον τρόπο δηλαδή με τον οποίο γεμίζει το καλούπι με ρευστό μέταλλο, θα εξετάσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση θα έχουμε την ίδια γεωμετρία, με διαφορετικές οριακές συνθήκες πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο θα προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε τις βέλτιστες συνθήκες που πρέπει να επικρατούν ώστε να έχουμε πλήρη και γρήγορη κάλυψη ολόκληρης της κοιλότητας του καλουπιού.

Οι περιπτώσεις που θα εξετάσουμε είναι οι εξής:

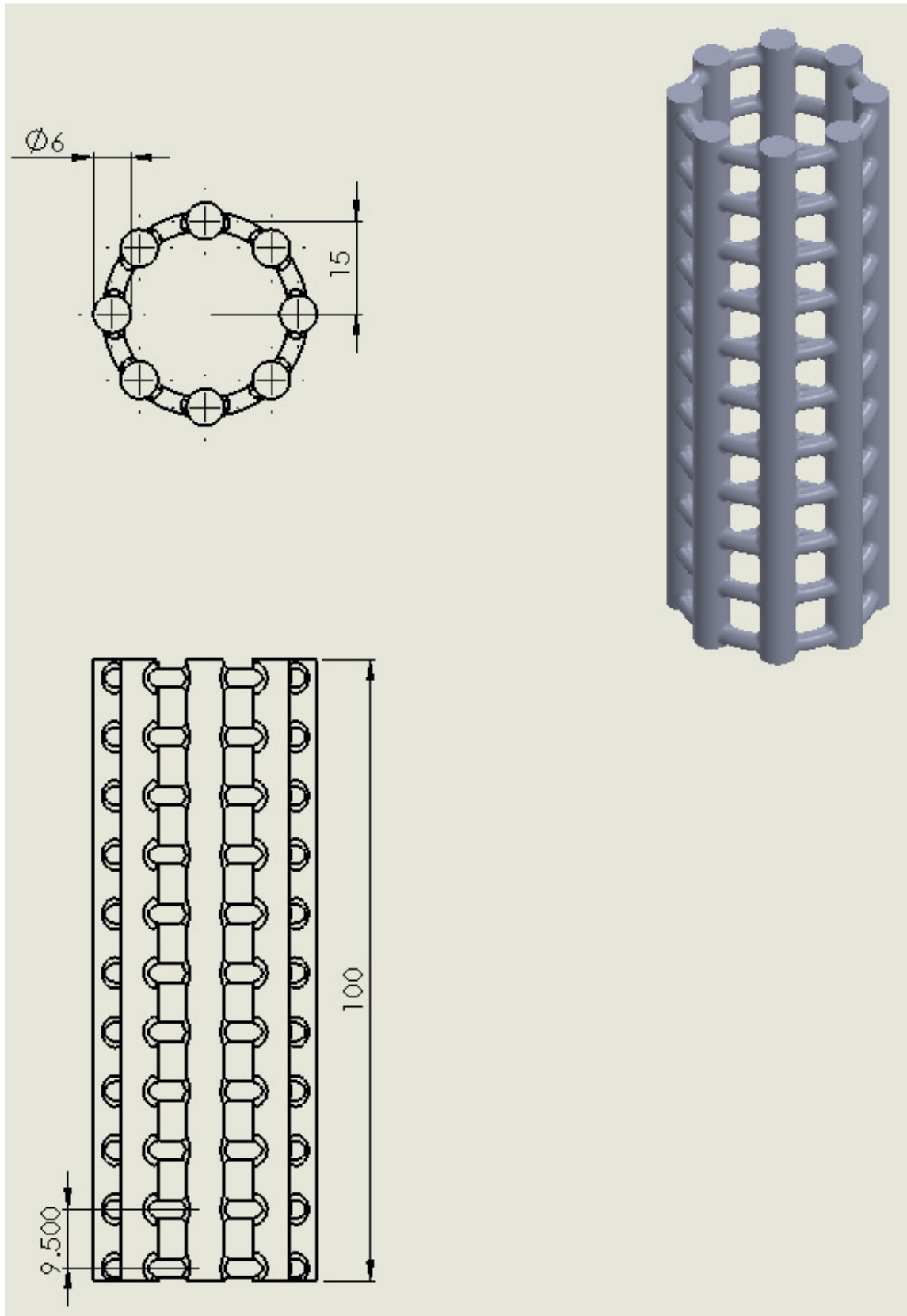
1. Χύτευση σε βαρύτητα
2. Χύτευση σε κενώ

Παράλληλα, θα εξετάσουμε και τις 2 καλύτερες γεωμετρίες από αυτές που προέκυψαν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Solidworks. Έτσι, θα προσομοιώσουμε τη χύτευση στις 2 τελευταίες γεωμετρίες που σχεδιάστηκαν, αφού είναι αυτές που εμφάνισαν την καλύτερη αναλογία τάσεις ανά βάρος.

Παράλληλα, θα εξετάσουμε τις περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία προθέρμανσης του καλουπιού είναι η πιο χαμηλή, συγκεκριμένα 250°C αφού αυτή είναι και η περίπτωση κατά την οποία το ρευστό μέταλλο αποβάλλει ταχύτερα θερμότητα και επομένως πιο πιθανή να παρουσιάσει ελαττώματα κατά τη χύτευση. Μέσα από πειραματικά και υπολογιστικά πειράματα έχει βρεθεί ότι ο καλύτερος τρόπος για να προσομοιωθεί αυτή η θερμοκρασία του καλουπιού είναι ως οριακή συνθήκη θερμοκρασίας. Στην προκειμένη περίπτωση ορίσαμε ως εξωτερική θερμοκρασία καλουπιού τους 150°C, η οποία διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Με αυτόν τον τρόπο η καμπύλη της θερμοκρασίας του καλουπιού και του χυτού όπως αυτή προσδιορίστηκε από την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έρχεται πιο κοντά σε σχέση με αυτή που προκύπτει από τη χρήση θερμοστοιχείων κατά τη διάρκεια μίας πραγματικής χύτευσης.

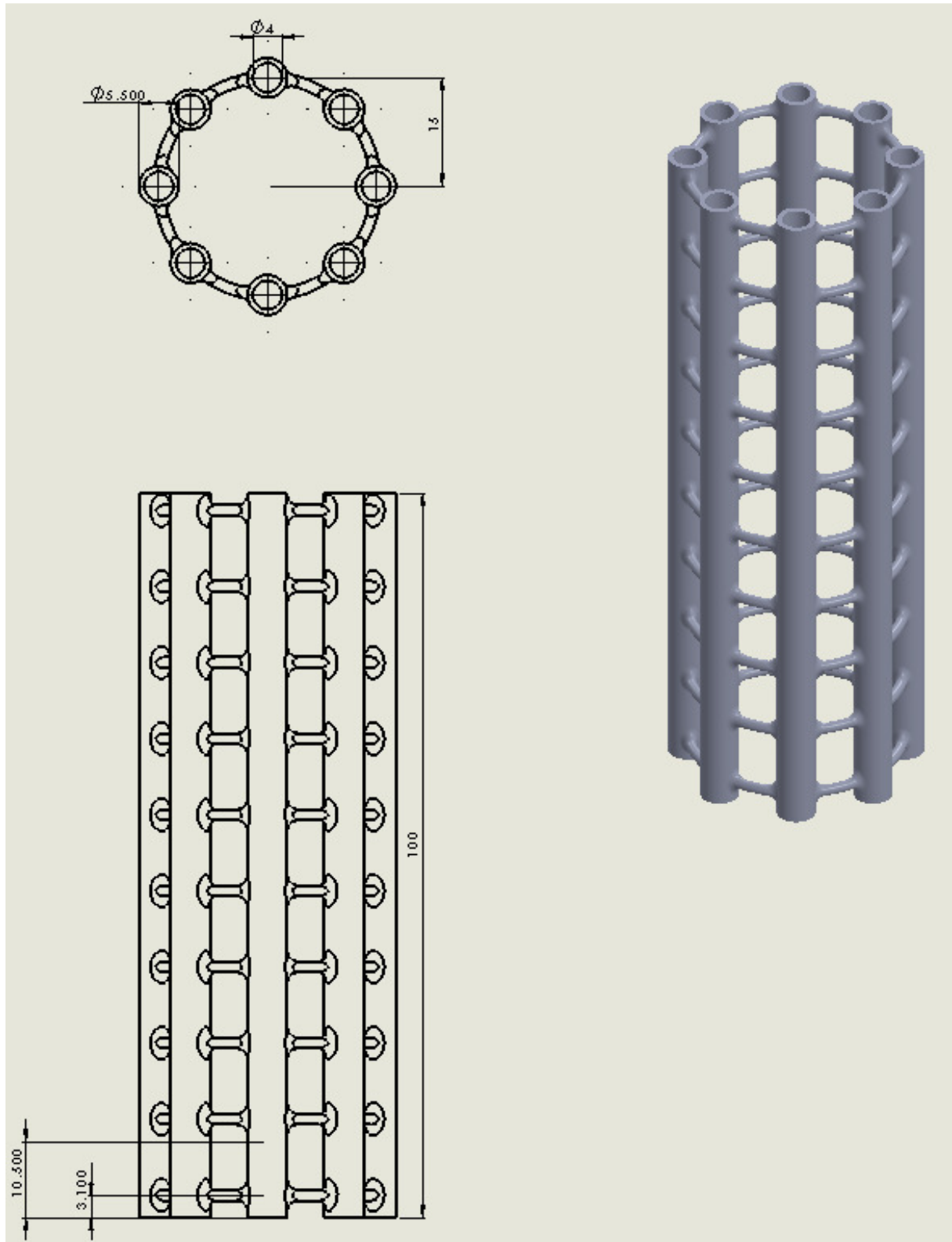
Τα κατασκευαστικά σχέδια της κάθε γεωμετρίας φαίνονται στη συνέχεια:

## ➤ Α' γεωμετρία





## ➤ Β' γεωμετρία



Παράλληλα, για την 1<sup>η</sup> γεωμετρία θα χρησιμοποιήσουμε δύο πλάκες εκατέρωθεν αυτής ως προσεπιχωνεύματα 40mm διαμέτρου ενώ στην 2<sup>η</sup>, λόγω των στενών αγωγών που σχηματίζονται θα έχουμε πάλι δύο πλάκες διαμέτρου 70mm προς αποφυγή υπερχειλίσεων.

Η μεταφορά του υγρού μετάλλου από το θάλαμο τήξης στο καλούπι, είναι ένα ιδιαίτερα κρίσιμο σημείο σε κάθε χύτευση. Το πιο πιθανό είναι ότι τα περισσότερα ελαττώματα των χυτών, προκύπτουν σε αυτά τα λίγα δευτερόλεπτα.

Η φύση της ροής του μετάλλου επηρεάζεται από τη δημιουργία ισοθερμοκρασιακών επιφανειακών στρωμάτων, καθώς και από το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας. Με διαφορετικούς αντίστοιχα τρόπους, οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν την απόσταση που μπορεί να διανύσει το μέταλλο, μέχρι να στερεοποιηθεί.

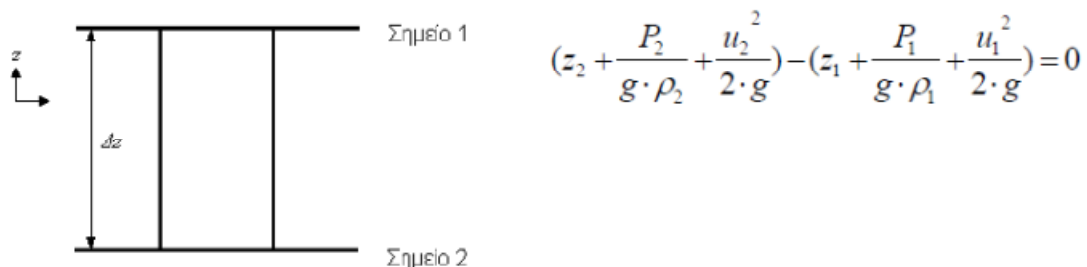
Προβλήματα ροής συναντά κανείς στις μικρές διατομές, όπου το μέταλλο ενδεχομένως στερεοποιείται απότομα στα τοιχώματα του αγωγού εισόδου, δημιουργώντας ένα επιφανειακό στρώμα. Στη συνέχεια το πάχος του στρώματος συνεχώς αυξάνεται και μετατρέπεται σε μηχανικό εμπόδιο, εμποδίζοντας τη ροή του υπόλοιπου υγρού. Κατά συνέπεια, το εισερχόμενο μέταλλο καλύπτει πρώτα τις μεγαλύτερες διατομές, όπου δεν υπάρχουν αντίστοιχα εμπόδια. Ταυτόχρονα, στις εισόδους των λεπτότερων διατομών, το εν λόγω στρώμα μεγαλώνει συνεχώς. Όταν και οι μεγαλύτερες διατομές γεμίσουν, τότε το υγρό μέταλλο συμπιέζεται κι έτσι οι λεπτότερες διατομές χρειάζονται επιπλέον επιφανειακή τάση για να υπερνικήσουν τη δύναμη του στρώματος. Όταν πια αρχίσει και πάλι το υγρό μέταλλο να κινείται στη λεπτή διατομή, δημιουργείται συνεχώς νέα επιφάνεια, καθώς η παλιά επιφάνεια πιέζεται προς τα τοιχώματα του καλουπιού, μέχρις ότου ολοκληρωθεί η δημιουργία της εξωτερικής επιφάνειας του χυτού. Συνεπώς, από αυτό το σημείο και έπειτα, το δημιουργημένο στρώμα συνεχώς διαλύεται και αντικαθίσταται. Το παχύ στρώμα πλέον μετατρέπεται σε επιπλέοντα υπολείμματα στην επιφάνεια του χυτού.

Συχνά υπάρχουν αντικρουόμενες τάσεις: από τη μία, σε λεπτά τοιχώματα χυτού, η ροή πρέπει να είναι γρήγορη για να αποφευχθεί η πρόωρη στερεοποίηση. Από την άλλη υπερβολικά ταχεία ροή μπορεί να οδηγήσει σε τύρβη με συνεπακόλουθα ελαττώματα. Κατά τη διάρκεια της τυρβώδους πλήρωσης του καλουπιού, η θεώρηση δυναμικής επιφανειακής τάσης είναι η μόνη εφαρμόσιμη, δεδομένου ότι συνεχώς δημιουργείται νέα επιφάνεια χυτού, με πολύ μεγάλη ταχύτητα.

Για την πραγματοποίηση του προβλήματος και την επίλυση του με χρήση πεπερασμένων στοιχείων στο ProCast είναι απαραίτητο να ορίσουμε τις απαραίτητες οριακές συνθήκες καθώς και να ενεργοποιήσουμε τους αλγόριθμους για την προσομοίωση της ροής. Συγκεκριμένα, η οριακή συνθήκη που απαιτείται ονομάζεται inlet και αφορά την είσοδο του ρευστού μετάλλου στην κοιλότητα του καλουπιού. Για την ενεργοποίηση αυτής της οριακής συνθήκης είναι απαραίτητο να ορίσουμε δύο δεδομένα, την θερμοκρασία εισόδου του μετάλλου και την παροχή μάζας του μετάλλου. Ως αρχική θερμοκρασία εισόδου ορίζουμε κάθε φορά την θερμοκρασία στην οποία έχουμε ζεστάνει το μέταλλο. Για την μελέτη του ροϊκού προβλήματος θα επιλέξουμε ως θερμοκρασία εισόδου την ελάχιστη θερμοκρασία που θα χρησιμοποιήσουμε, αφού αυτή η θερμοκρασία αντιπροσωπεύει και την δυσχερέστερη περίπτωση πλήρωσης. Αυτό συμβαίνει διότι όσο πιο κοντά είναι η αρχική θερμοκρασία του μετάλλου στην θερμοκρασία liquidus τόσο πιο γρήγορα θα αρχίσει η στερεοποίηση αυτού πριν το καλούπι γεμίσει πλήρως.

Όσο αφορά την παροχή μάζα του ρευστού μετάλλου μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της εξίσωσης Bernoulli ως εξής:

Η γενικευμένη εξίσωση Bernoulli για ρευστό που ρέει από το σημείο 1 στο σημείο 2, αν θεωρήσουμε ότι δεν έχουμε απώλειες τριβής, δίνεται από τον τύπο:



$$\left(z_2 + \frac{P_2}{g \cdot \rho_2} + \frac{u_2^2}{2 \cdot g}\right) - \left(z_1 + \frac{P_1}{g \cdot \rho_1} + \frac{u_1^2}{2 \cdot g}\right) = 0$$

Όπου:

$Z_1, P_1, u_1$  : το ύψος, η πίεση, η πυκνότητα και η ταχύτητα του ρευστού αντίστοιχα στο Σημείο 1

$Z_2, P_2, u_2$  : το ύψος, η πίεση, η πυκνότητα και η ταχύτητα του ρευστού αντίστοιχα στο Σημείο 2

$\Delta z$  : η απόσταση που διανύει το ρευστό

Η ταχύτητα του ρευστού στο σημείο 1 είναι ίση με 0. Άρα:  $u_1=0$

Ακόμη, για την πυκνότητα του ρευστού έχουμε:  $\rho_1=\rho_2=\gamma$

Άρα έχουμε:

$$u_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\gamma} \cdot g + 2 \cdot g \cdot \Delta z}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ογκομετρική παροχή από τον τύπο:

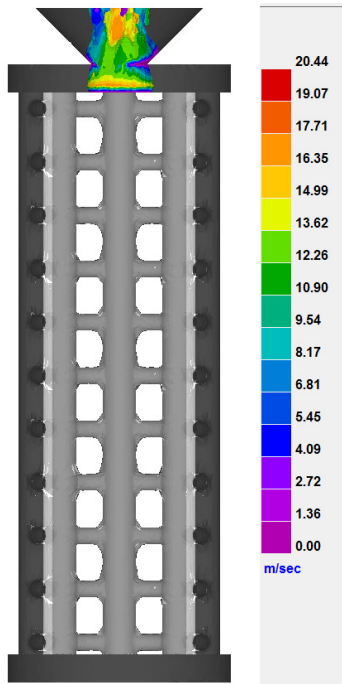
$$\dot{Q} = E \cdot u_2, \text{ όπου } E = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Τέλος, η παροχή μάζας υπολογίζεται από τον τύπο:  $\dot{m} = \dot{Q} \cdot \gamma$

Με βάση τα δεδομένα του προβλήματος που έχουμε προκύπτει ότι η παροχή μάζας στη χύτευση σε βαρύτητα είναι 1,14kg/s για αρχική θερμοκρασία 650°C. Παρ' όλο που η παροχή μάζας στη χύτευση εν κενώ είναι λίγο μεγαλύτερη λόγω της διαφοράς πίεσης που εφαρμόζεται μπορούμε να κάνουμε την παραδοχή ότι είναι περίπου ίση με αυτή της χύτευσης σε κενώ.

Στον επόμενο πίνακα εμφανίζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της πλήρωσης. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε, η κοιλότητα του καλουπιού γέμισε πλήρως και σε αρκετά μικρό χρόνο. Λόγο της ταχύτητας της πλήρωσης μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας στα διάφορα μέρη του χυτού είναι πρακτικά αμετάβλητη, και επομένως όλες τις υπόλοιπες προσομοιώσεις να τις εκκινήσουμε από το σημείο μετά την πλήρωση του καλουπιού.

α/α	γεωμετρία	συνθήκες χύτευσης	χρόνος πλήρωσης
1	A	Βαρύτητα	0,4997
2	B	Βαρύτητα	0,676
3	A	κενό	0,091
4	B	κενό	0,1206



Στην διπλανή φωτογραφία φαίνονται οι ταχύτητες που αναπτύσσει το ρευστό κατά την πλήρωση. Το στιγμιότυπο το οποίο παρουσιάζεται είναι η στιγμή κατά την οποία αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες ταχύτητες. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης πτώσης από τον αγωγό εισόδου. Παρ' όλα αυτά η ταχύτητα αυτή δεν κρίνεται επικίνδυνη για τη δομική ακεραιότητα του καλουπιού αφού το σημείο στο οποίο προσκρούει είναι αρκετά παχύ ώστε να αντέχει στην πρόσκρουση.

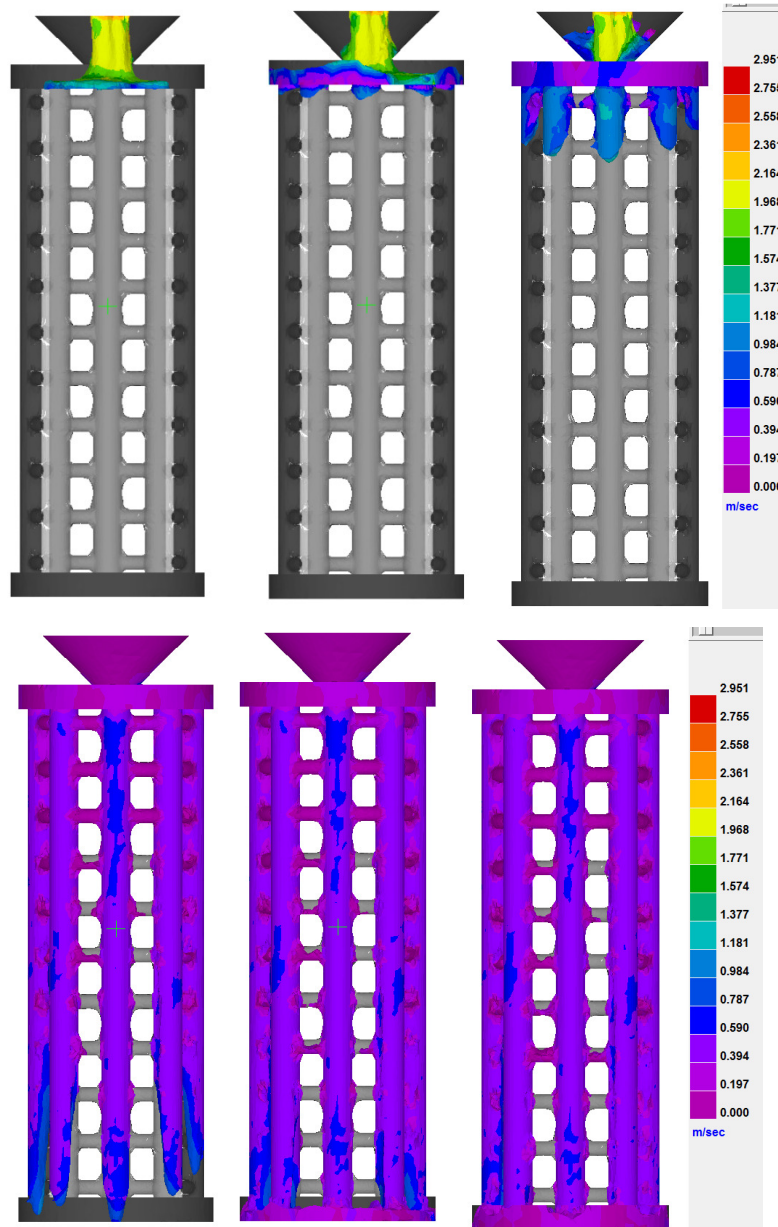
Εικόνα 25: στιγμιότυπο κατά τη χύτευση

Στην συνέχεια φαίνονται αναλυτικές φωτογραφίες από κάθε περίπτωση κατά τη διάρκεια της χύτευσης καθώς και οι χρόνοι πλήρωσης κάθε περιοχής του καλουπιού ανά περίπτωση.

## Χύτευση σε βαρύτητα

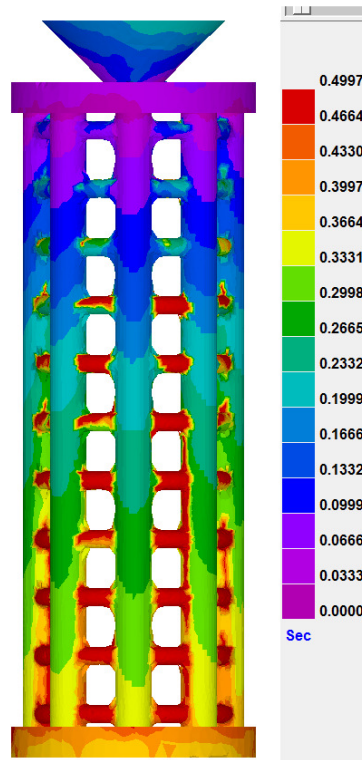
➤ Α' γεωμετρία

### Φάσεις πλήρωσης



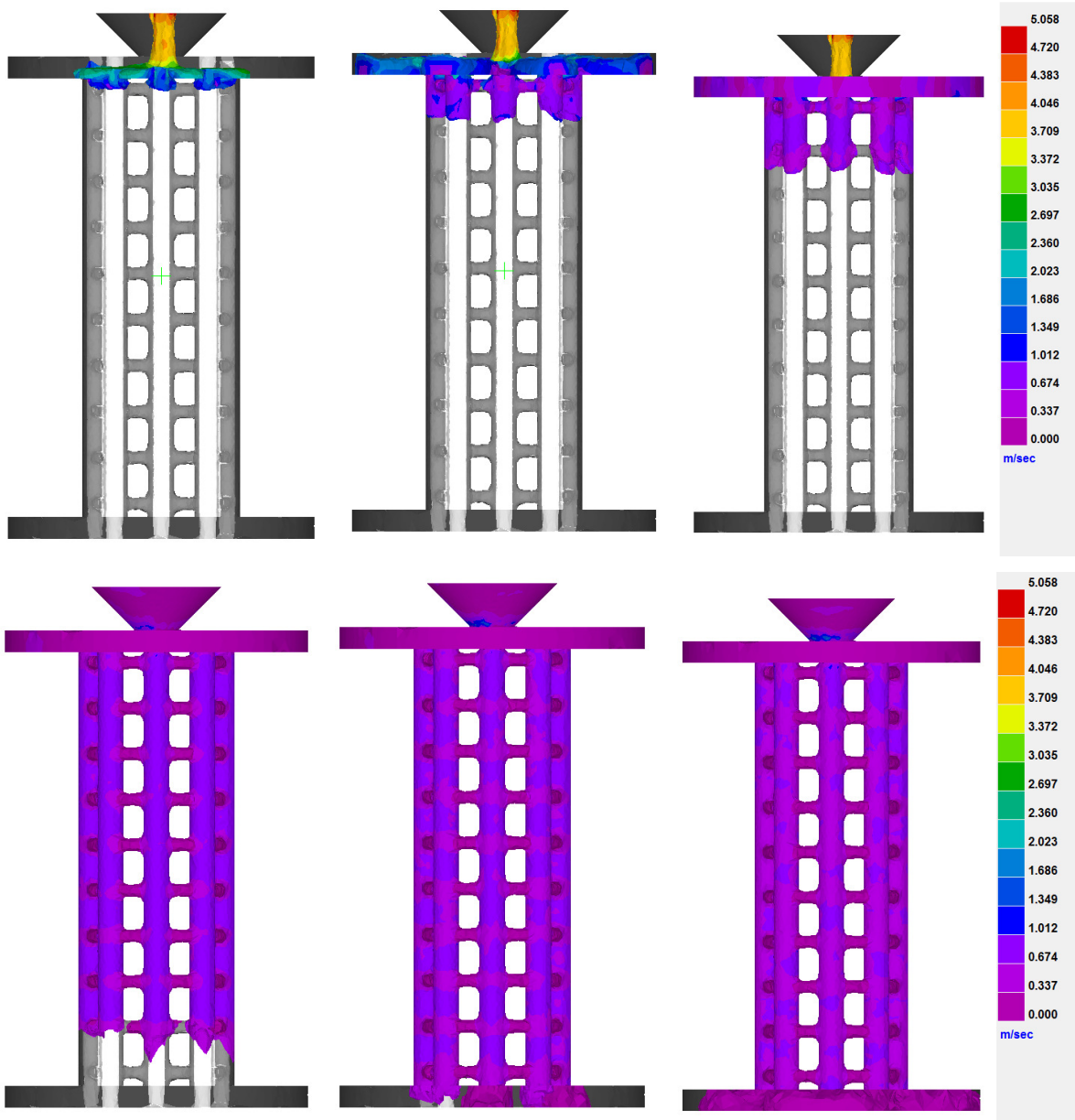
Εικόνα 26: Στιγμιότυπα από τη φάση πλήρωσης

### Χρόνος Πλήρωσης



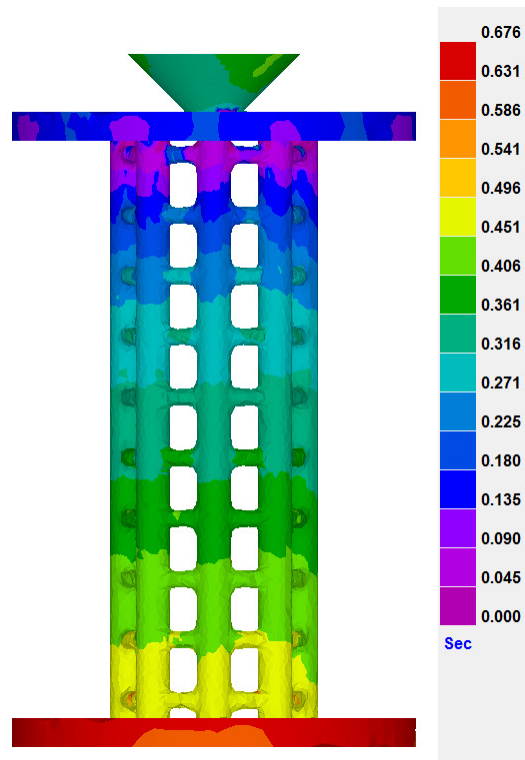
➤ Β' γεωμετρία

Φάσεις πλήρωσης





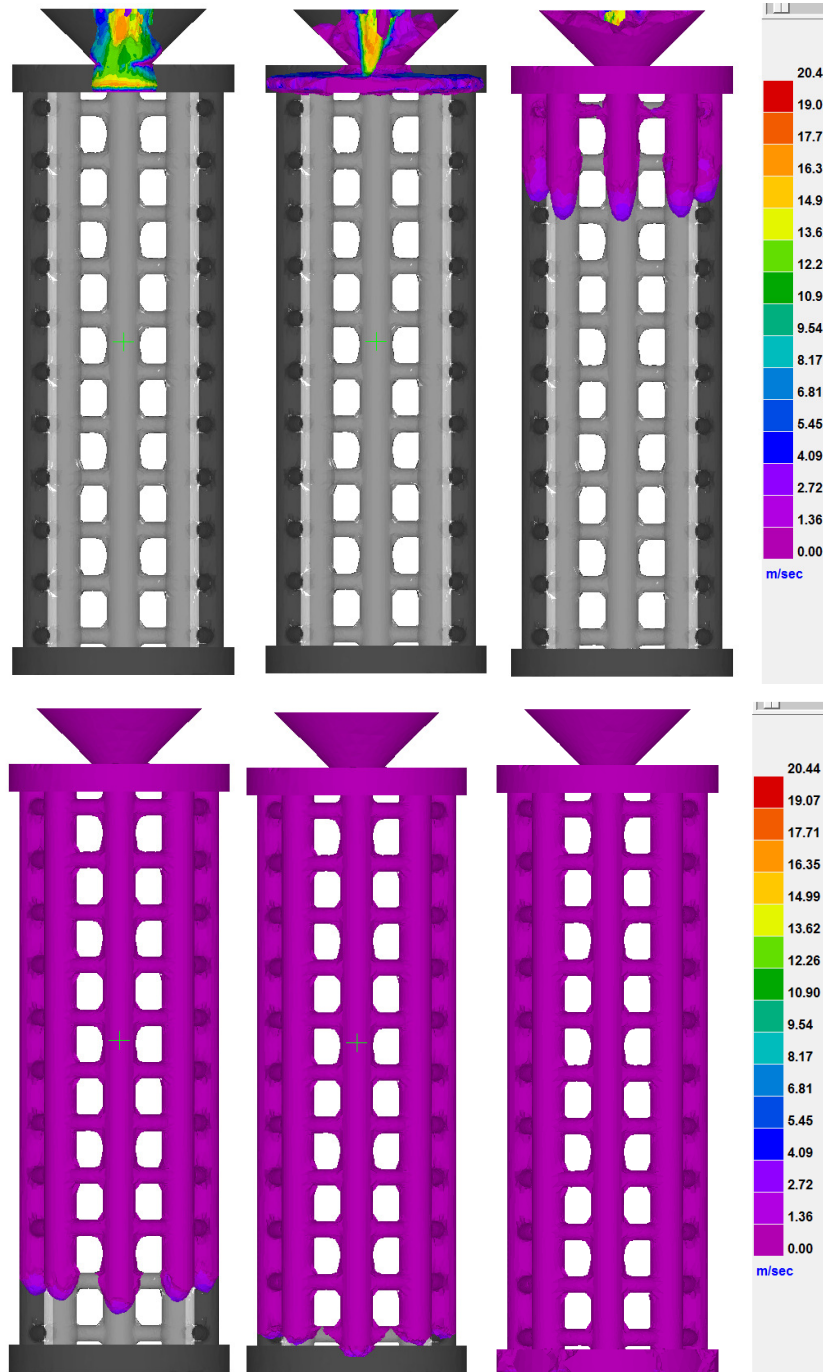
### Χρόνος Πλήρωσης



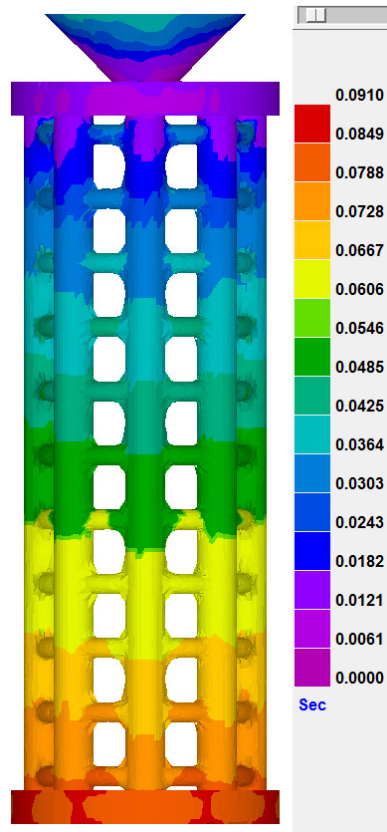
## Χύτευση εν κενώ

➤ Α' γεωμετρία

### Φάσεις πλήρωσης

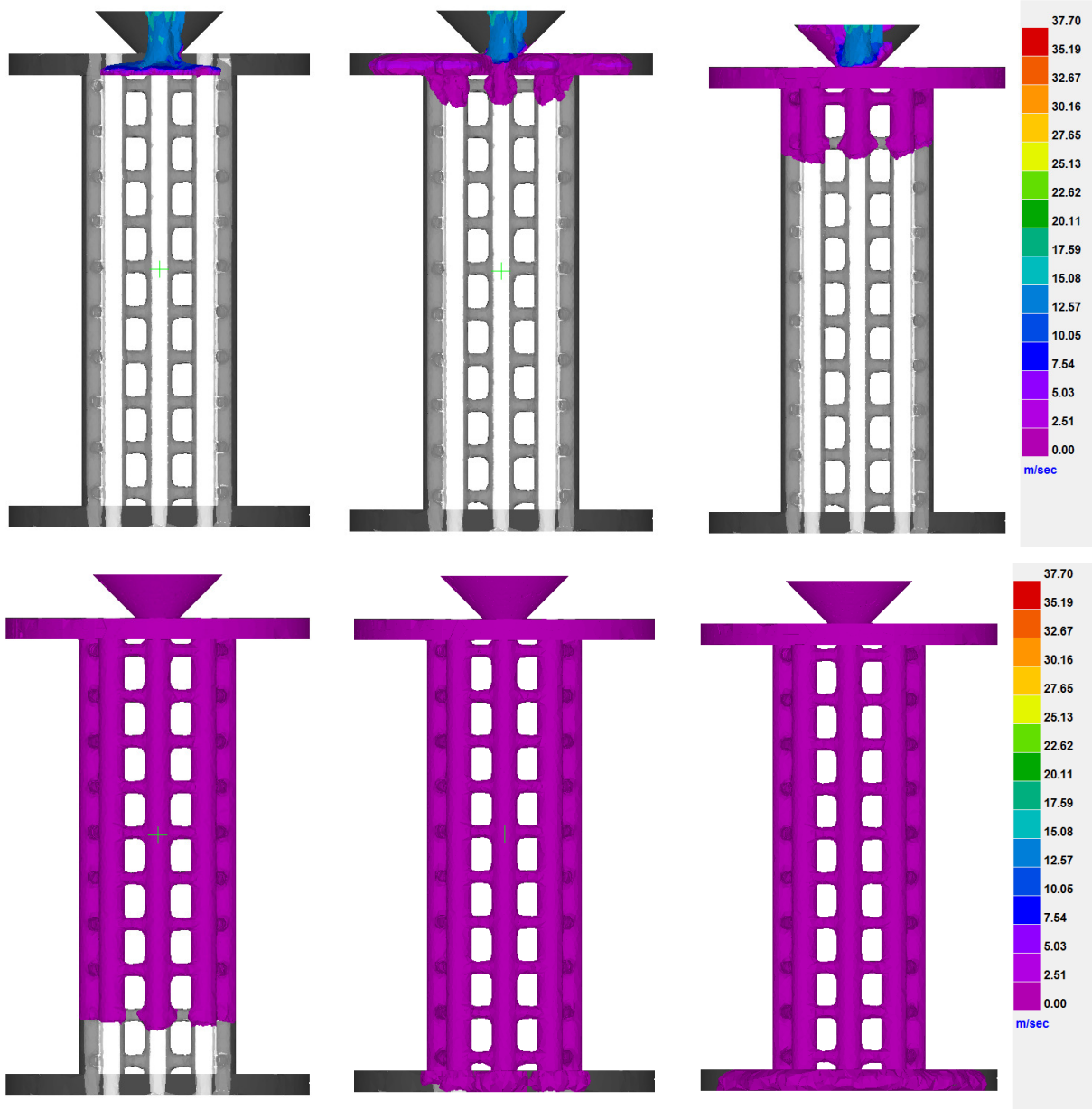


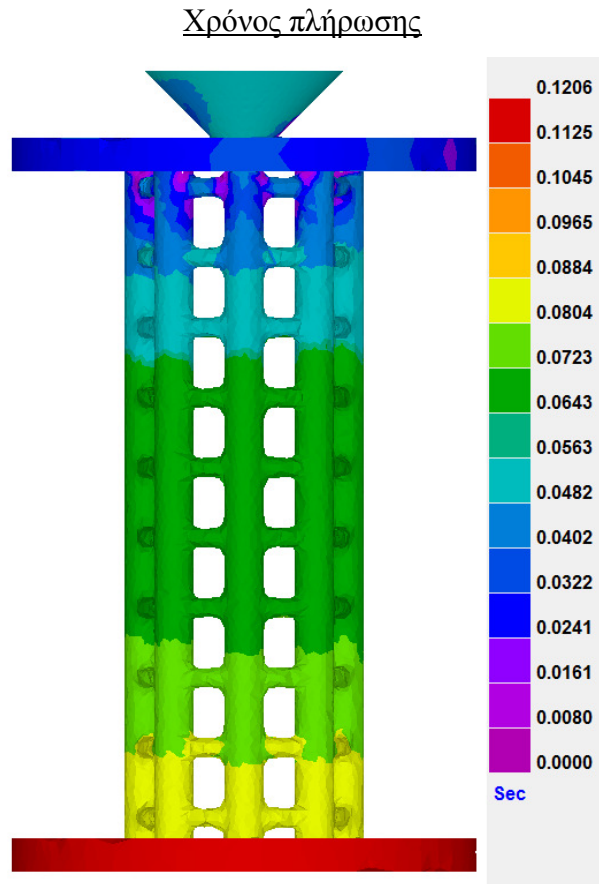
### Χρόνος πλήρωσης



➤ Β' γεωμετρία

Φάσεις πλήρωσης





Μέσα από την ανάλυση που προηγήθηκε μπορούμε να πούμε ότι ανεξάρτητα από τις συνθήκες που θα χρησιμοποιήσουμε για την χύτευση, το αποτέλεσμα της πλήρωσης του καλουπιού θα είναι πλήρως ικανοποιητικό. Τόσο το ποσοστό πλήρωσης αγγίζει το 100% του καλουπιού, όσο και οι ταχύτητες που αναπτύσσονται μέσα στο καλούπι είναι αρκετά μικρές ώστε να μην δημιουργήσουν θραύση του καλουπιού. Επομένως, οι συνθήκες που θα χρησιμοποιήσουμε για τη χύτευση εξαρτώνται αποκλειστικά από την διαδικασία της στερεοποίησης του χυτού και από τα ελαττώματα που αναπτύσσονται λόγω αυτής.

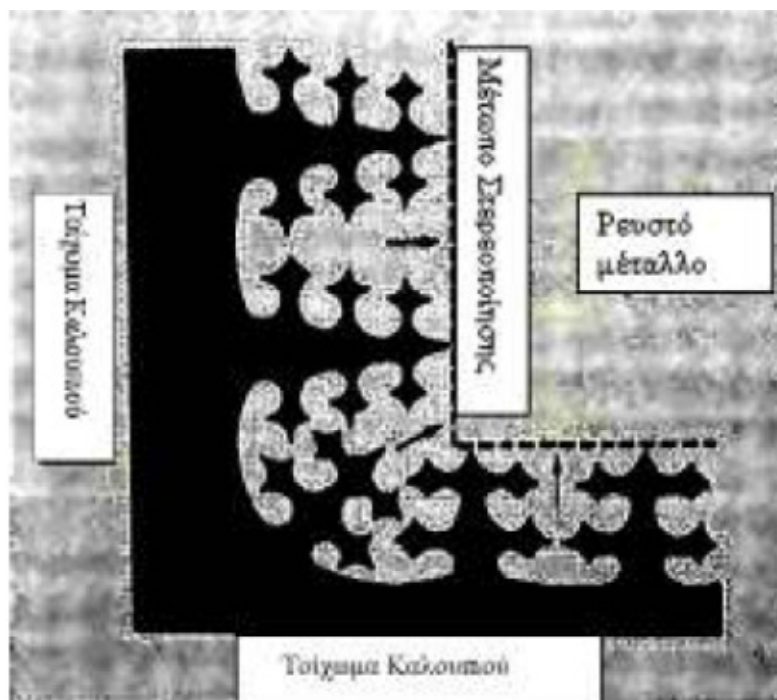
### 3.3.3. Ο μηχανισμός της στερεοποίησης

Στερεοποίηση είναι το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα , όταν ψύξουμε τη διεπιφάνεια στερεάς- υγρής φάσης, σε θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας τήξης ( $T_m$ ).

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της στερεοποίησης, θα πρέπει να συγκεντρωθεί μία ομάδα ατόμων, για να δημιουργηθεί ένα σώμα ομοειδών (cluster), που θα είναι σταθερό και θα έχει τη δυνατότητα να αναπτυχθεί σε κρύσταλλο, όταν ενωθεί με γειτονικά του ίδια σώματα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται πυρηνοποίηση και χωρίζεται σε ομογενή και ετερογενή. Η ομογενής πυρηνοποίηση είναι ο σχηματισμός ενός στερεού πυρήνα που περιβάλλεται από υγρή φάση. Στην ετερογενή πυρηνοποίηση, ο πυρήνας στερεού μετάλλου σχηματίζεται γύρω από μία ξένη ουσία, είτε του καλουπιού, είτε του περιβάλλοντος τοιχώματος, είτε στην επιφάνεια κάποιας αδιάλυτης ακαθαρσίας.

#### 3.3.3.1. Στερεοποίηση κατά τη χύτευση σε καλούπι

Όταν ένα τηγμένο μέταλλο ή κράμα εγχέεται στο καλούπι, η στερεοποίηση ξεκινά από έξω προς τα μέσα, όπως φαίνεται και στο σχήμα

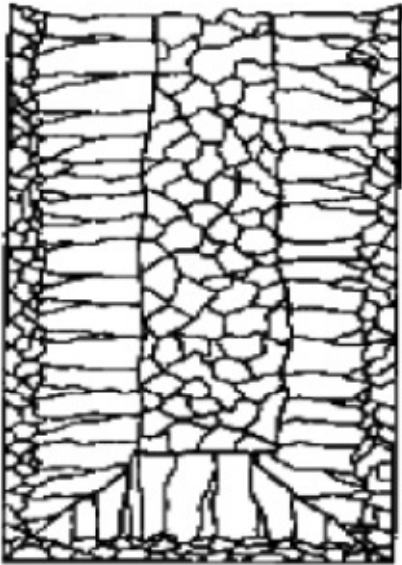


Εικόνα 27: Το μέτωπο στερεοποίησης κατά τη χύτευση

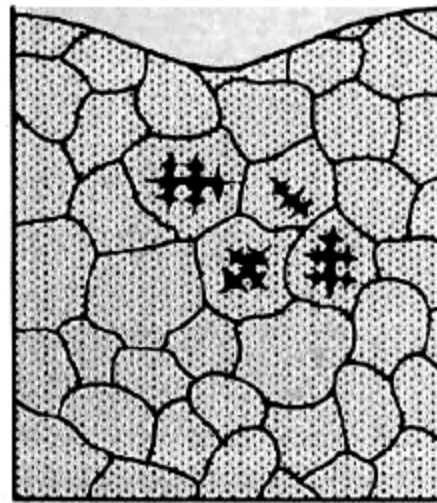
Αυτό φυσικά συμβαίνει αφού η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του καλουπιού είναι πολύ μικρότερη από αυτή του τήγματος. Παρατηρείται ετερογενής πυρηνοποίηση στη διεπιφάνεια του μετάλλου. Εάν το μέταλλο του καλουπιού είναι ψυχρό, τότε ο ρυθμός απαγωγής θερμότητας είναι μεγάλος, εξαιτίας της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των μετάλλων κι έτσι αρχικά σχηματίζεται μία ζώνη μικροσκοπικών κρυστάλλων (μικροκρυσταλλική ζώνη).

Στη συνέχεια αναπτύσσονται ευμεγέθης, κολονοειδούς μορφής, δενδριτικοί κρύσταλλοι, με επιμήκη ανάπτυξη, αντίθετα προς την κατεύθυνση της ροής θερμότητας (βασαλτική ζώνη). Οφείλονται στην επιλεκτική ανάπτυξη ορισμένων κρυστάλλων της μικροκρυσταλλικής ζώνης. Το μέγεθος ανάπτυξης των κολονοειδών κρυστάλλων, εξαρτάται από τη θερμοκρασία που είχε το τήγμα κατά την έγχυσή του στο καλούπι. Εάν η θερμοκρασία αυτή είναι αρκετά υψηλή, τότε η βασαλτική ζώνη θα εκτείνεται ως το κέντρο του χυτού, διαφορετικά στην κεντρική αυτή περιοχή θα λάβει χώρα πυρηνοποίηση (κεντρική – ισοαξονική ζώνη), πριν οι κολονοειδείς κρύσταλλοι προλάβουν να φτάσουν ως εκεί.

Όσον αφορά όμως στη μέθοδο χαμένου κεριού, η στερεοποίηση είναι αρκετά πιο πολύπλοκη, ενώ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση διαφόρων παραγόντων. Εδώ, η θερμική αγωγιμότητα του καλουπιού είναι πολύ μικρότερη και γι' αυτό η απαγωγή της θερμότητας είναι πολύ πιο αργή. Κατά συνέπεια, συνήθως δεν παρατηρείται βασαλτική ζώνη (κολονοειδείς κρύσταλλοι) και τελικά προκύπτει ισοαξονική δομή την κόκκων.



Εικόνα 28: Οι τρεις ζώνες στερεοποίησης: μικροκρυσταλλική-βασαλτική-ισοαξονική



Εικόνα 29: Απεικόνιση της ισοαξονικής δομής σε χύτευση χαμένου κεριού

Η πλήρωση του καλουπιού, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, ο βαθμός πυρηνοποίησης, το μέγεθος των κόκκων και η μικροδομή και η έκταση του δενδριτικού σχηματισμού, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα παρακάτω:

- Μέθοδος χύτευσης (φυγοκεντρική κενού, βαρύτητας, υψηλής πίεσης)
- Θερμοκρασία έγχυσης και βαθμός υπερθέρμανσης (θέρμανση πάνω από τη liquidus τιμή)
- Αρχική θερμοκρασία καλουπιού
- Υλικό καλουπιού
- Διαπερατότητα από αέρια του ομοιώματος (gas permeability of the investment)
- Περιβάλλον χύτευσης (ατμόσφαιρα, κενό, χρήση αδρανούς αερίου)
- Ενέργεια διεπιφάνειας και επιφανειακή τάση του τήγματος
- Λόγος επιφάνειας προς όγκο του χυτού
- Σχήμα και μέγεθος του χυτού



### 3.3.3.2. Ελαττώματα κατά τη στερεοποίηση

Μετά την πλήρωση της κοιλότητας του καλουπιού με ρευστό μέταλλο ακολουθεί η ψύξη του και κατ' επέκταση η στερεοποίησή του χυτού. Επειδή όμως η στερεοποίηση αρχίζει από την επιφάνεια του χυτού που είναι σε επαφή με το καλούπι και συνεχίζει προς το εσωτερικό του χυτού, πραγματοποιείται μια σταδιακή συστολή του μετάλλου σε στρώματα (από το εξωτερικό προς το εσωτερικό του χυτού). Όσο υπάρχει διαθέσιμο ρευστό να καλύπτει τον όγκο που δημιουργείται από την συστολή του στερεοποιημένου όγκου του χυτού δεν δημιουργούνται προβλήματα. Σε περίπτωση όμως που δεν υπάρχει διαθέσιμο ρευστό ή δεν υπάρχει δυνατότητα να φτάσει (το ρευστό) στο σημείο της συστολής, τότε θα δημιουργηθεί πορώδες ή μεγαλύτερες διακενώσεις στο σημείο αυτό (σπηλαίωση).

Πορώδες είναι ο λόγος του κενού όγκου μέσα σε ένα υλικό προς τον όγκο του υλικού. Όταν η διακένωση είναι πολύ μεγάλη το φαινόμενο ονομάζεται σπηλαίωση. Οι διακενώσεις συμβάλουν σημαντικά τόσο στη μείωση της αντοχής του μετάλλου σε καταπονήσεις, όσο και στην επιτάχυνση της διάβρωσης του μετάλλου. Η παρουσία των διακενώσεων γίνεται εμφανής με χρήση ακτινών X όπως φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία.



Εικόνα 30: Πορώδες στην επιφάνεια του χυτού

Οι διακενώσεις συνήθως σχηματίζονται στα σημεία αυτά τα οποία στερεοποιούνται τελευταία αφού εκεί δεν υπάρχει επιπλέον μέταλλο για να καλύψει τα κενά που δημιουργούνται. Για το λόγο αυτό καθίσταται αναγκαία η ομοιόμορφη

στερεοποίηση του χυτού, απαίτηση που καθιστά τόσο δύσκολη την εξάλειψη του πορώδους.

Σηπλαιώση μπορεί να δημιουργηθεί και από αέρια που έχουν παγιδευτεί στο μέταλλο, όμως η περίπτωση αυτή δεν θα μας απασχολήσει διότι η προσομοίωσή μας γίνεται υπό ιδανικές συνθήκες.

Με την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος στο ProCast μπορούν να προβλεφτούν με αρκετή ακρίβεια τα πιο πάνω ελαττώματα. Ταυτόχρονα, παρέχει την επιλογή της παρουσίασης των αποτελεσμάτων είτε αριθμητικά, είτε γραφικά. Ο γραφικός τρόπος ενδείκνυται σε μεγάλα μοντέλα, στα οποία είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και το νούμερο το οποίο αντιπροσωπεύει το κάθε ένα.

### 3.3.4. Προσομοίωση στερεοποίησης

Για την προσομοίωση της στερεοποίησης θα χρησιμοποιήσουμε διάφορες οριακές και αρχικές συνθήκες έτσι, ώστε να βρούμε τις βέλτιστες δυνατές τιμές των παραμέτρων που θα οδηγήσουν στην κατασκευή χυτού χωρίς ελαττώματα. Έτσι, θα εξετάσουμε χύτευση υπό δύο διαφορετικές πιέσεις, όπως ακριβώς εξετάσαμε και την διαδικασία της πλήρωσης, υπό δύο διαφορετικές θεοκρασίες εισόδου, 650°C και 700°C, δύο διαφορετικές θερμοκρασίες καλουπιού, 250°C και 400°C. Παράλληλα, θα εξετάσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις για κάθε γεωμετρία, μία με προσεπιχώνευμα πάνω και κάτω από το χυτό και μία μόνο επάνω έτσι, ώστε να βρεθεί η χρησιμότητα της κάθε πλάκας. Η επάνω πλάκα δεν είναι δυνατόν να καταργηθεί, αφού εκτός από τον ρόλο του προσεπιχωνεύματος, έχει και τον ρόλο του αγωγού εισόδου αφού το μέταλλο πριν γεμίσει την κοιλότητα του χυτού, συγκεντρώνεται σε αυτήν.

Οι περιπτώσεις που θα εξεταστούν φαίνονται συνοπτικά στον επόμενο πίνακα. Για κάθε μία περίπτωση θα υπολογίσουμε τον ρυθμό στερεοποίησης, το πορώδες που σχηματίζεται, καθώς και οποιοδήποτε άλλο σφάλμα τυχόν προκύψει. Τέλος, για τα μοντέλα με τα καλύτερα αποτελέσματα θα υπολογίσουμε και τις παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται καθώς και τυχόν παραμορφώσεις που προκύπτουν.

Τύπος	Κάτω πλάκα	τύπος χύτευσης	θερμοκρασία μετάλλου	θερμοκρασία καλουπιού	
<b>γεωμετρία Α</b>	ΝΑΙ	βαρύτητας	650	250	
			400		
		700	250		
		400			
		Εν κενώ	650	250	
			400		
	700	250			
	400				
	<b>γεωμετρία Α</b>				
	ΌΧΙ	βαρύτητας	650	250	
			400		
		700	250		
		400			
		Εν κενώ	650	250	
400					
700	250				
400					
<b>γεωμετρία Β</b>	ΝΑΙ	βαρύτητας	650	250	
			400		
		700	250		
		400			
		Εν κενώ	650	250	
			400		
	700	250			
	400				
	<b>γεωμετρία Β</b>				
	ΌΧΙ	βαρύτητας	650	250	
			400		
		700	250		
		400			
		Εν κενώ	650	250	
400					
700	250				
400					

Για να εξετάσουμε όλες τις περιπτώσεις θα ακολουθήσουμε το υποτυπώδες δενδρόγραμμα που σχηματίζεται στον πίνακα. Έτσι, στην αρχή θα εξετάσουμε την

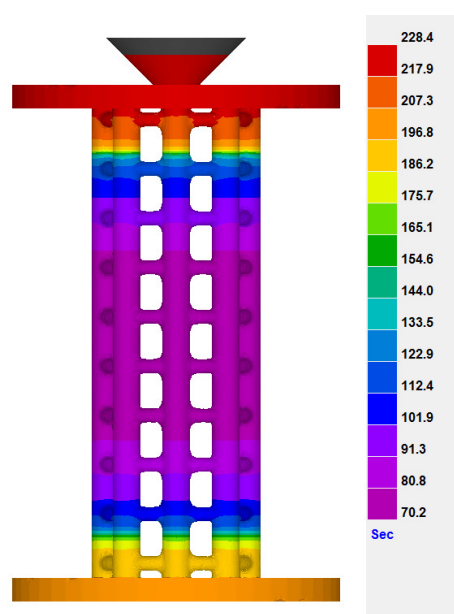
πρώτη γεωμετρία με δύο προσεπιχωνεύματα σε βαρύτητα, στη συνέχεια εν κενώ κ.τ.λ. μέχρις ότου να συμπληρώσουμε ολόκληρο τον πίνακα.

Στη συνέχεια εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της διαδικασίας στερεοποίησης. Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο ProCast όλες οι τιμές πάνω από 0,01 μπορούν να θεωρηθούν ως μακρο-πορώδες, ενώ αντίθετα με τιμές κάτω από 0,01 εμφανίζεται το μικρο-πορώδες. Ως ανώτερο αποδεκτό όριο του σχηματιζόμενου πορώδους θεωρούμε το 0,2.

➤ **Γεωμετρία Α με δύο προσεπιχωνεύματα**

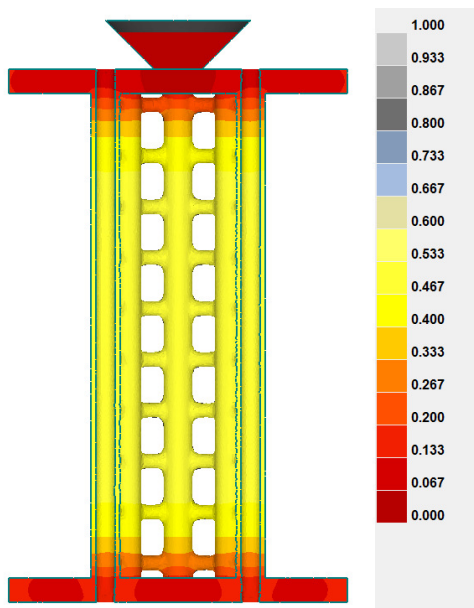
τύπος χύτευσης	θερμοκρασία μετάλλου	θερμοκρασία καλουπιού	Χρόνος στερεοποίησης (sec)	Πορώδες
βαρύτητας	650	250	236	0.011
		400	544	0.218
	700	250	268	0.012
		400	588	0.52
Εν κενώ	650	250	234	Αμελητέο
		400	526	Αμελητέο
	700	250	268	Αμελητέο
		400	575	Αμελητέο

Η δημιουργία του πορώδους οφείλεται στην ανομοιομορφή και απότομη στερεοποίηση στα διάφορα σημεία του χυτού. Αυτή η ανομοιομορφία εμφανίζεται στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζοντας στιγμιότυπα κατά τη φάση της στερεοποίησης καθώς και το συνολικό χρόνο που χρειάζεται κάθε σημείο του χυτού ώστε να στερεοποιηθεί πλήρως. Η απότομη στερεοποίηση στο κεντρικό τμήμα του χυτού είναι η αιτία που προκαλεί τη δημιουργία πορώδους για αυτό και το μεγαλύτερο μέρος

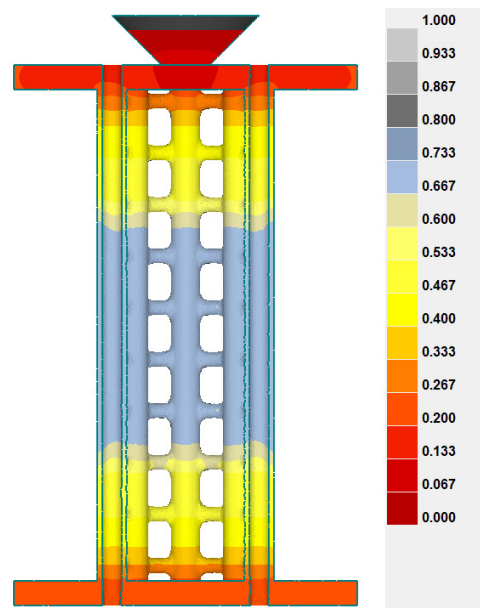


Εικόνα 31: Χρόνοι στερεοποίησης χυτού

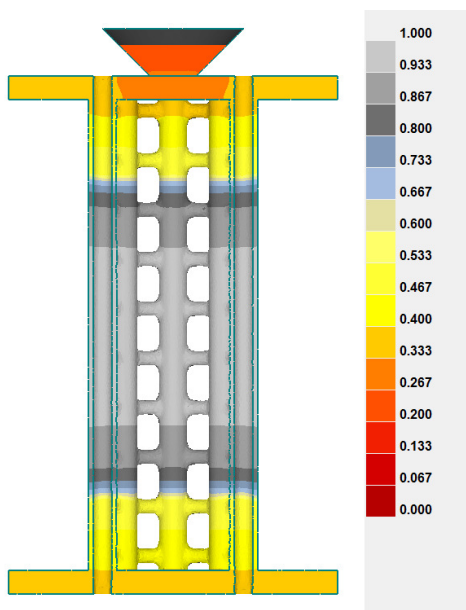
του πορώδους είναι συγκεντρωμένο σε αυτό το σημείο.



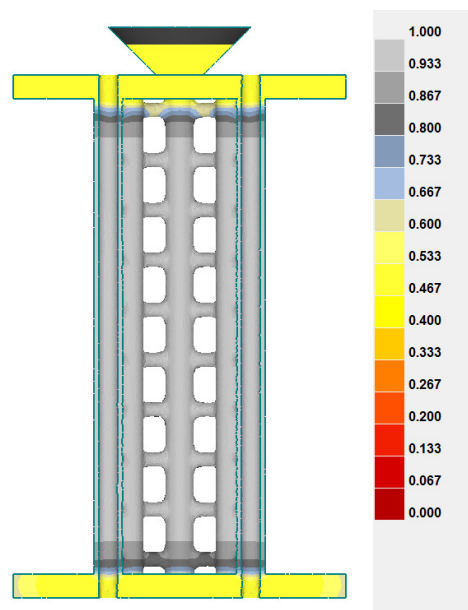
Εικόνα 32:20 sec



Εικόνα 33:30sec



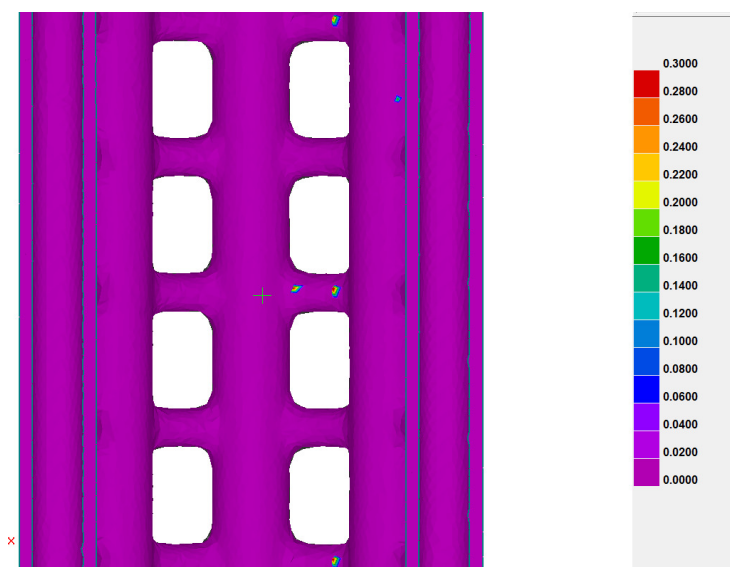
Εικόνα 34:60 sec



Εικόνα 35:110 sec

Επιπλέον, όταν μιλάμε για πορώδες της τάξης του 0,3 ή 0,4 δεν σημαίνει ότι ολόκληρο το χυτό είναι γεμάτο πόρους. Αντίθετα, πόροι εμφανίζονται σε μεμονωμένα σημεία, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Συχνά, οι πόροι αυτοί δεν βρίσκονται στην επιφάνεια αυτού, αλλά εσωτερικά, καθιστώντας τον εντοπισμό τους ιδιαίτερα δύσκολο, ιδίως όταν πρόκειται για πραγματική χύτευση και

όχι κάποια προσομοίωση. Παρ' όλα αυτά, συνήθως γύρω από τους μεγάλους πόρους που έχουν σχηματιστεί υπάρχει πάντα μικρο-πορώδες το οποίο συχνά δεν ξεπερνάει σε τιμή το 0,02.



Εικόνα 36: Επιφανειακό πορώδες

➤ Γεωμετρία Α με ένα προσεπιχόνευμα

τύπος χύτευσης	θερμοκρασία μετάλλου	θερμοκρασία καλουπιού	Χρόνος στερεοποίησης (sec)	Πορώδες
βαρύτητας	650	250	224	0.012
		400	682	0.343
	700	250	251	0.011
		400	717	0.52
Εν κενώ	650	250	221	Αμελητέο
		400	655	Αμελητέο
	700	250	251	Αμελητέο
		400	696.45	Αμελητέο

➤ Γεωμετρία Β με δύο προσεπιχωνεύματα

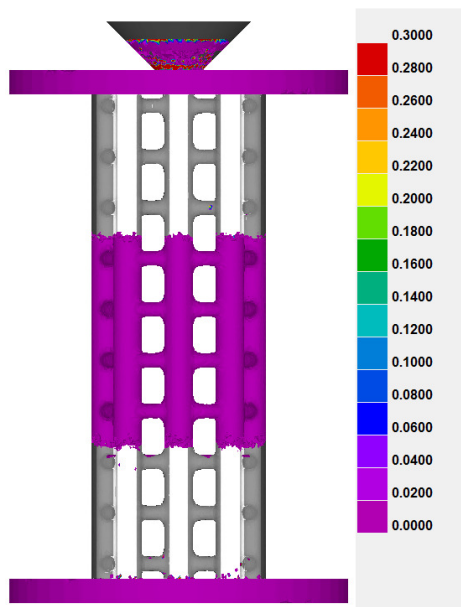
τύπος χύτευσης	θερμοκρασία μετάλλου	θερμοκρασία καλουπιού	Χρόνος στερεοποίησης (sec)	Πορώδες
βαρύτητας	650	250	178	0.202
		400	395	0.01
	700	250	228	0.3
		400	465.85	>0.5
Εν κενώ	650	250	186	Αμελητέο
		400	405	Αμελητέο
	700	250	ς214	Αμελητέο
		400	444	Αμελητέο

➤ Γεωμετρία Β με ένα προσεπιχώνευμα

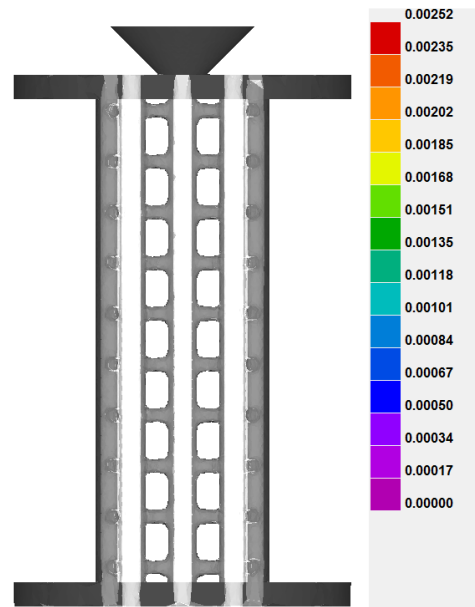
τύπος χύτευσης	θερμοκρασία μετάλλου	θερμοκρασία καλουπιού	Χρόνος στερεοποίησης (sec)	Πορώδες
βαρύτητας	650	250	170	0.23
		400	388.5	0.012
	700	250	195	0.1
		400	411.6	0.011
Εν κενώ	650	250	167	Αμελητέο
		400	372	Αμελητέο
	700	250	191	Αμελητέο
		400	401	Αμελητέο

Μέσα από αυτά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο ProCast παρατηρούμε ότι η πιο σημαντική παράμετρος κατά τη διάρκεια της χύτευσης είναι η παρουσία ή όχι κενού σε αυτή. Σε όλες τις περιπτώσεις χύτευση σε βαρύτητα, ανεξάρτητα από τις τιμές των υπολοίπων μεταβλητών δημιουργείται μάκρο-πορώδες, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις χύτευση εν κενώ όπου δημιουργείτε αποκλειστικά μικρο-πορώδες.

Η διαφορά των δύο αυτών χυτεύσεων φαίνεται στις φωτογραφίες που ακολουθούν. Μέσα από αυτές μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα τη διαφορά στο πορώδες που δημιουργείται, αφού στην χύτευση σε βαρύτητα πρόκειται για μάκρο-πορώδες, ενώ αντίθετα στη χύτευση εν κενώ για μικρο-πορώδες. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι αν και το ProCast υπολογίζει και τις δύο περιπτώσεις πορώδους, στα αποτελέσματα εμφανίζει αυτόματα μόνο τα σημεία στα οποία εμφανίζεται μάκρο-πορώδες, ενώ τα υπόλοιπα τα αφήνει κενά. Σε περίπτωση όμως που επιθυμούμε μπορούμε να δούμε το πορώδες σε όλα τα σημεία. Αυτή η διαφορά φαίνεται στις 2 φωτογραφίες που ακολουθούν.



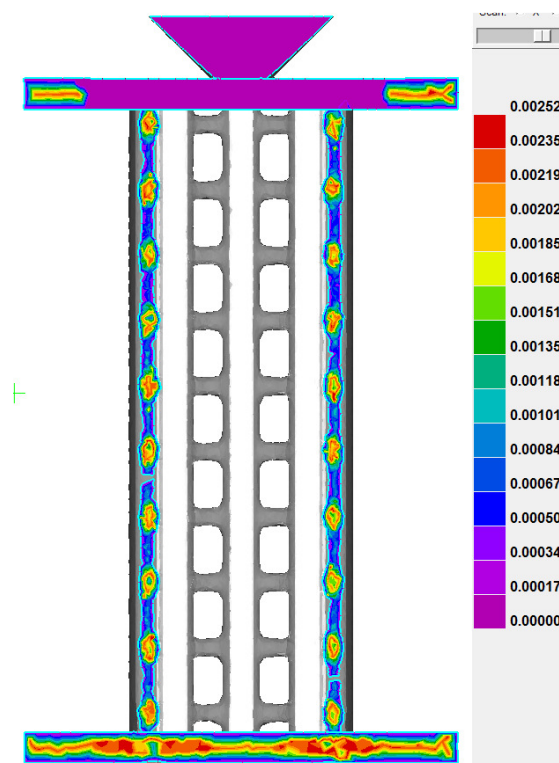
Εικόνα 37: Μάκρο-πορώδες σε χύτευση βαρύτητας



Εικόνα 38: Μίκρο-πορώδες σε χύτευση κενού

Αυτή η διαφορά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων μας επιτρέπει των γρήγορο εντοπισμό των σφαλμάτων σε ένα τεμάχιο. Το μικρο-πορώδες που αναπτύσσεται κατά τη χύτευση κενού εμφανίζεται αναλυτικά στην επόμενη φωτογραφία.





Εικόνα 39: Μίκρο-πορώδες σε χύτευση κενού

Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους, δεν φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά την χύτευση ή και πως την επηρεάζουν. Σε άλλες περιπτώσεις μεταβολή τους επιφέρει μείωση του πορώδους που εμφανίζεται, ενώ σε άλλες επιφέρει αύξηση. Έτσι, δεν είναι δυνατό να εξάγουμε κάποιο ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την επίδραση τους επάνω στην διαδικασία της χύτευσης. Τέλος, η παρουσία της κάτω πλάκας μπορεί να θεωρηθεί πλεονασμός αφού δεν φαίνεται να έχει καμία ουσιαστική επίδραση στα αποτελέσματα που προέκυψαν. Ταυτόχρονα, απουσία αυτής σημαίνει πιο γρήγορη στερεοποίηση και εξοικονόμηση υλικού και χρόνου κατεργασιών, αφού μειώνονται τα κομμάτια τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν από το τελικό αποτέλεσμα.

Μέσα από αυτή την ανάλυση γίνεται εμφανής η πεποίθηση ότι η διαδικασία της χύτευσης, και ειδικότερα η διαδικασία της στερεοποίησης είναι αρκετά περίπλοκες ώστε να μπορέσουν να προσομοιωθούν και να προβλεφτούν με ακρίβεια. Αυτό το γεγονός θα γίνει ιδιαίτερα σαφές κατά τη διαδικασία της κατασκευής του δοκιμίου, όπου πλέον θα φανούν όλες οι ατέλειες της χύτευσης και θα μπορέσουν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

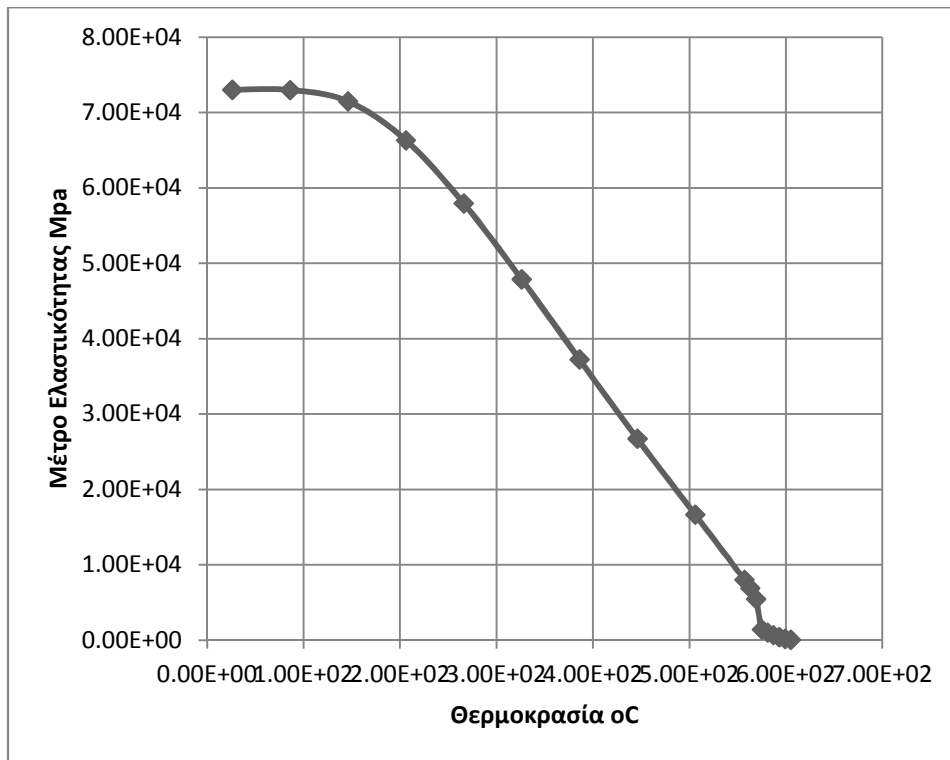
### 3.4. Ανάλυση τάσεων (stress analysis)

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της χύτευσης στο ProCast, δίνεται η δυνατότητα του υπολογισμού των τάσεων που αναπτύσσονται στο χυτό, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων που υφίσταται, την πιθανότητα δημιουργίας θερμών ρωγματώσεων ή ακόμα και την κόπωση που υφίσταται. Για να γίνει εφικτός αυτός ο υπολογισμός είναι απαραίτητο τα υλικά που θα προσδιοριστούν να έχουν τις κατάλληλες ιδιότητες περασμένες στη βάση δεδομένων του.

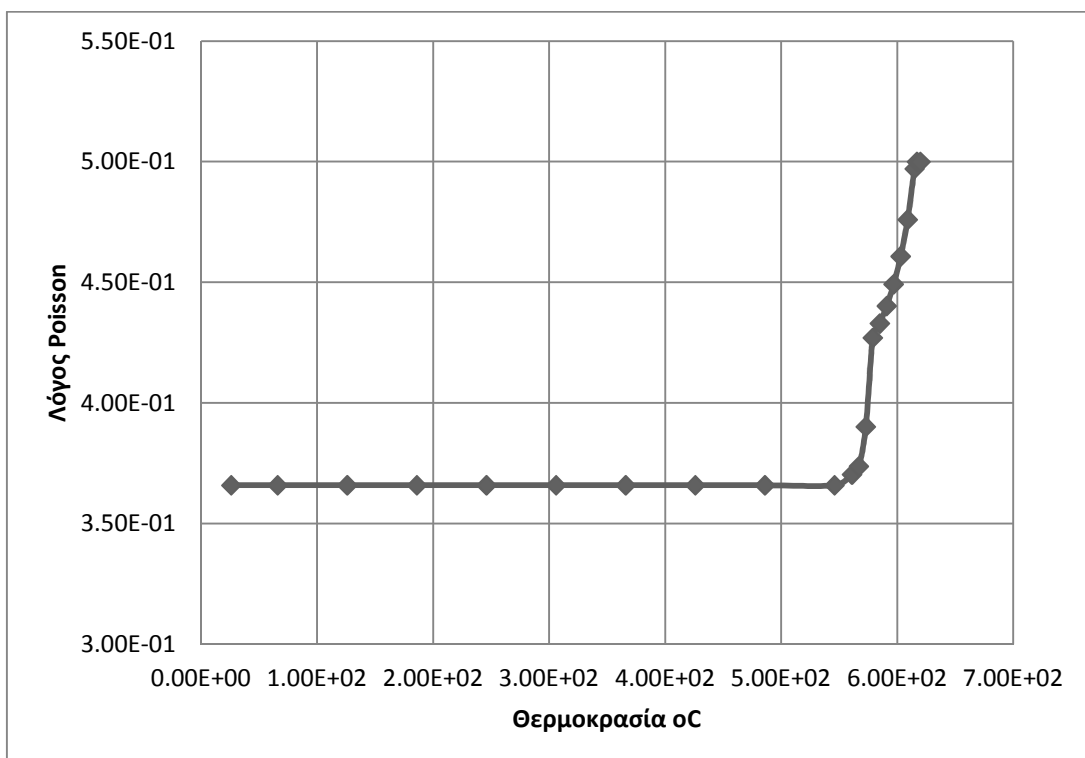
Έτσι το πρώτο βήμα που πρέπει να κάνουμε είναι να ορίσουμε το κατάλληλο υλικό για τον υπολογισμό των καταπονήσεων, επιπλέον από το υλικό με της θερμικές ιδιότητες που έχουμε ορίσει. Για το καλούπι θα ορίσουμε rigid (απαραμόρφωτο) σώμα, αφού δεν μας ενδιαφέρει ο υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων σε αυτό. Αντίθετα, το θεωρούμε ιδανικό υλικό, δηλαδή απαραμόρφωτο σε σχέση με την πίεση που του ασκείται.

Αντίθετα, στο χυτό, αυτό δηλαδή στο οποίο επικεντρώνεται το ενδιαφέρον μας, ορίζουμε υλικό αντίστοιχο με το κράμα αλουμινίου που έχουμε ορίσει στις θερμικές ιδιότητες. Έτσι, από τη βάση δεδομένων του ProCast και τη διεθνή βιβλιογραφία επιλέγουμε το «A356» το οποίο έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

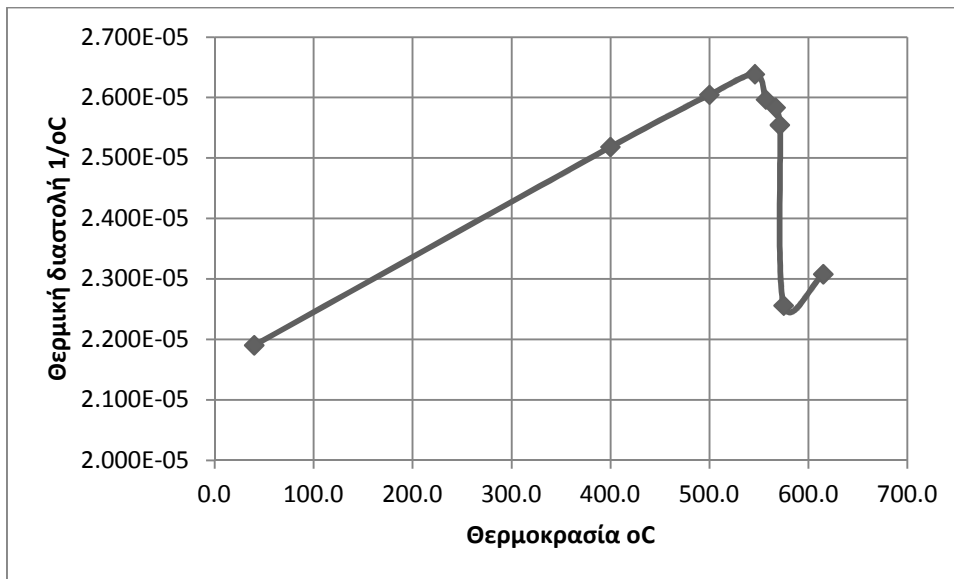
- Μέτρο Ελαστικότητας



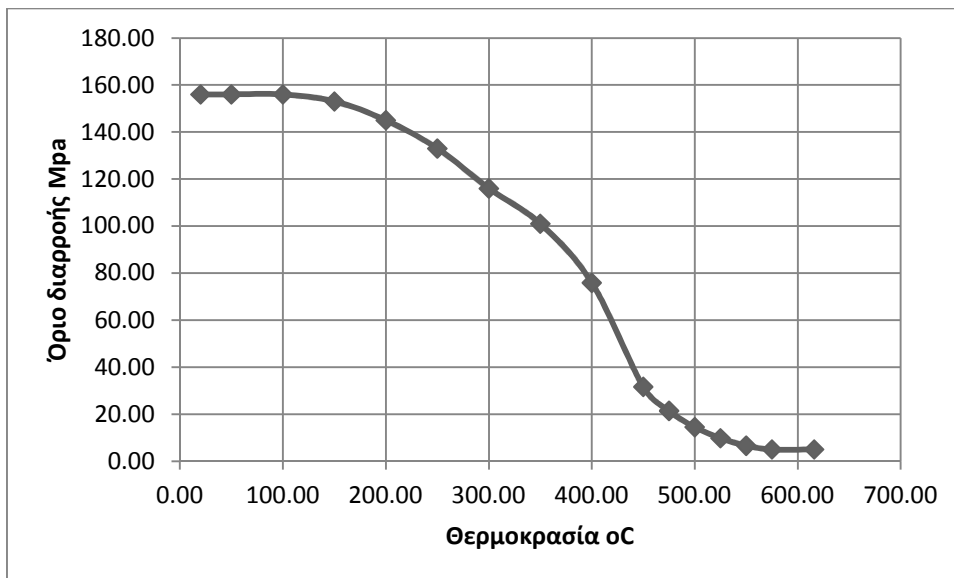
- Λόγος Poisson



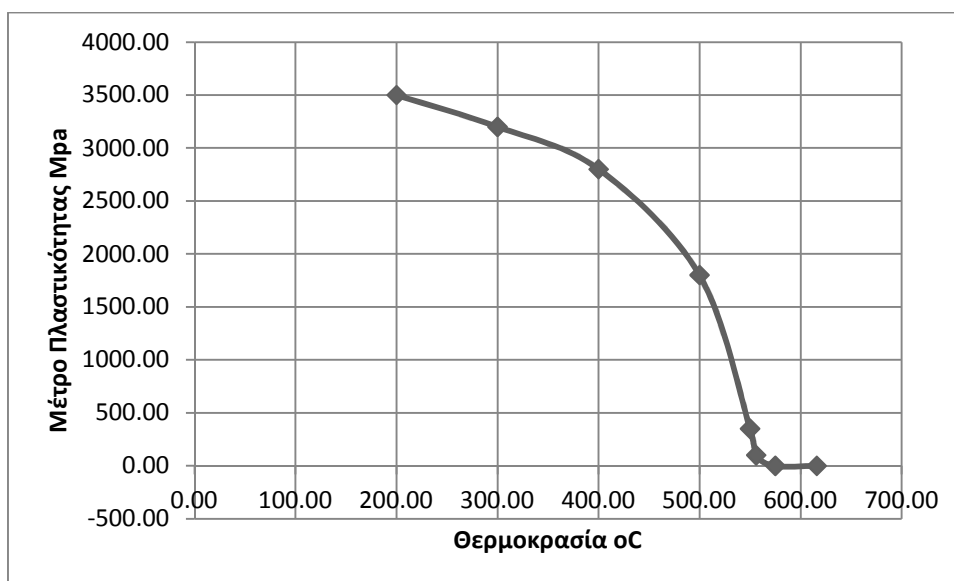
- Θερμική διαστολή



- Όριο διαρροής



- Μέτρο Πλαστικότητας



Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται, θα πραγματοποιήσουμε τέτοιου είδους μελέτη μόνο σε τέσσερα από τα μοντέλα που έχουμε στη διάθεση μας. Συγκεκριμένα, θα υπολογίσουμε τις σχετικές τάσεις στα ακόλουθα μοντέλα.

α/α	Τύπος	Κάτω πλάκα	τύπος χύτευσης	θερμοκρασία μετάλλου	θερμοκρασία καλουπιού
1	Γεωμετρία Α	Ναι	Εν κενώ	650	250
2	Γεωμετρία Α	ΌΧΙ	Εν κενώ	650	250
3	Γεωμετρία Β	Ναι	Εν κενώ	650	250
4	Γεωμετρία Β	ΌΧΙ	Εν κενώ	650	250

### 3.4.1. Παραμένουσες τάσεις

Παραμένουσες μηχανικές τάσεις καλούνται αυτές οι τάσεις, οι οποίες εμφανίζονται σε ένα μεταλλικό υλικό χωρίς την παρουσία εξωτερικών δυνάμεων. Αυτές οι τάσεις βρίσκονται σε στατική ισορροπία μέσα στο μεταλλικό υλικό.

Η εμφάνιση των παραμενουσών μηχανικών τάσεων σε ένα χυτό μεταλλικό υλικό οφείλεται σε έναν από τους ακόλουθους παράγοντες:

- στη μετατροπή του υλικού από την υγρή στη στερεή φάση.
- Στη μεταβολή του υλικού από μια στερεή φάση π.χ. ωστενιτική σε μια άλλη στερεή φάση π.χ. μαρτενσιτική, η οποία συνοδεύεται από μεταβολή στον όγκο του υλικού.
- Στην κατακρήμνιση μιας στερεής φάσης στο χυτό υλικό.
- Στη θερμική συστολή του υλικού κατά τη στερεοποίηση του.
- 

Η επίδραση των παραμενουσών μηχανικών τάσεων στη συμπεριφορά των χυτών μεταλλικών υλικών μπορεί να έχει πολλές και διάφορες συνέπειες: αναπτύσσονται εύκολα ρωγμές, οπότε μειώνεται η μηχανική των αντοχή, οι διαστάσεις των καθίστανται ασταθείς, κατά τη διάρκεια της χρήσης των υφίστανται εύκολα οξείδωση, διάβρωση και εργοδιάβρωση καθώς επίσης η ευλυγισία των μειώνεται δραστικά.

Λόγω των παραπάνω συνεπειών των παραμενουσών μηχανικών τάσεων στα χυτά μεταλλικά υλικά αναγκαίο είναι να υποβάλλονται αυτά, μετά τη στερεοποίηση των, σε μια διαδικασία απομάκρυνσης αυτών των τάσεων.

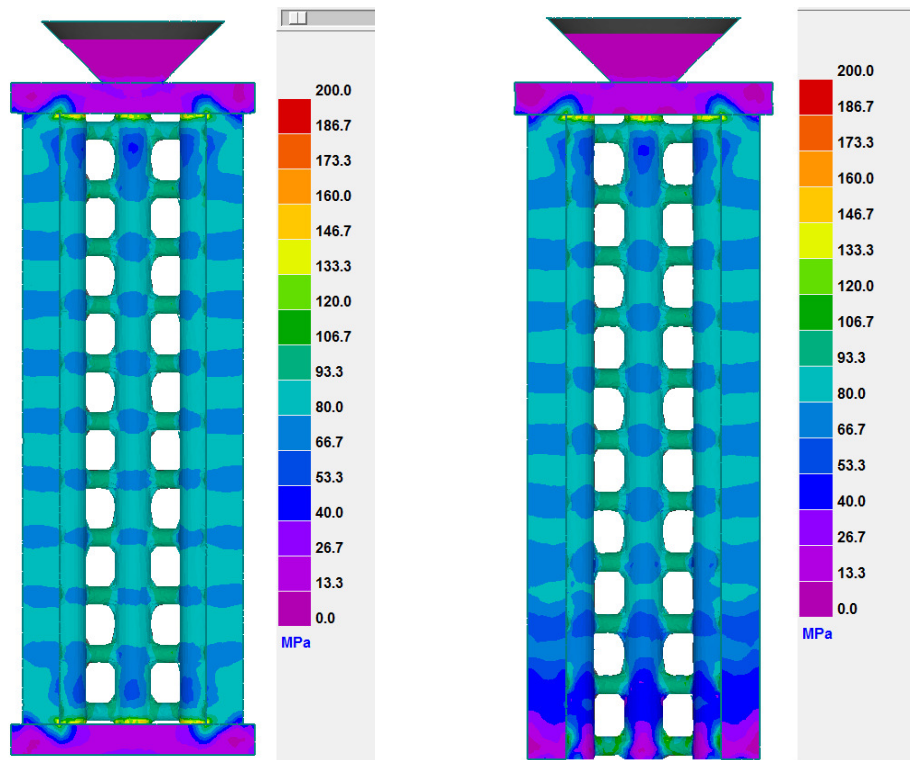
Υπάρχουν πολλοί τρόποι να υπολογιστούν οι τοπικές παραμένουσες και να πάρουμε ως αποτέλεσμα μία μόνο τιμή. Το ProCast χρησιμοποιεί το κριτήριο VonMisses ώστε να υπολογίσει την ισοδύναμη τάση.

$$\sigma_{effective} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}$$

Φυσικά, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι σε MPa και δείχνει μόνο κατά απόλυτη τιμή τις τάσεις που αναπτύσσονται. Δεν δείχνει, δηλαδή, κατά πόσο είναι εφελκύστηκες ή θλιπτικές. Για να διαπιστωθεί κάτι τέτοιο πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού των παραμενουσών τάσεων.

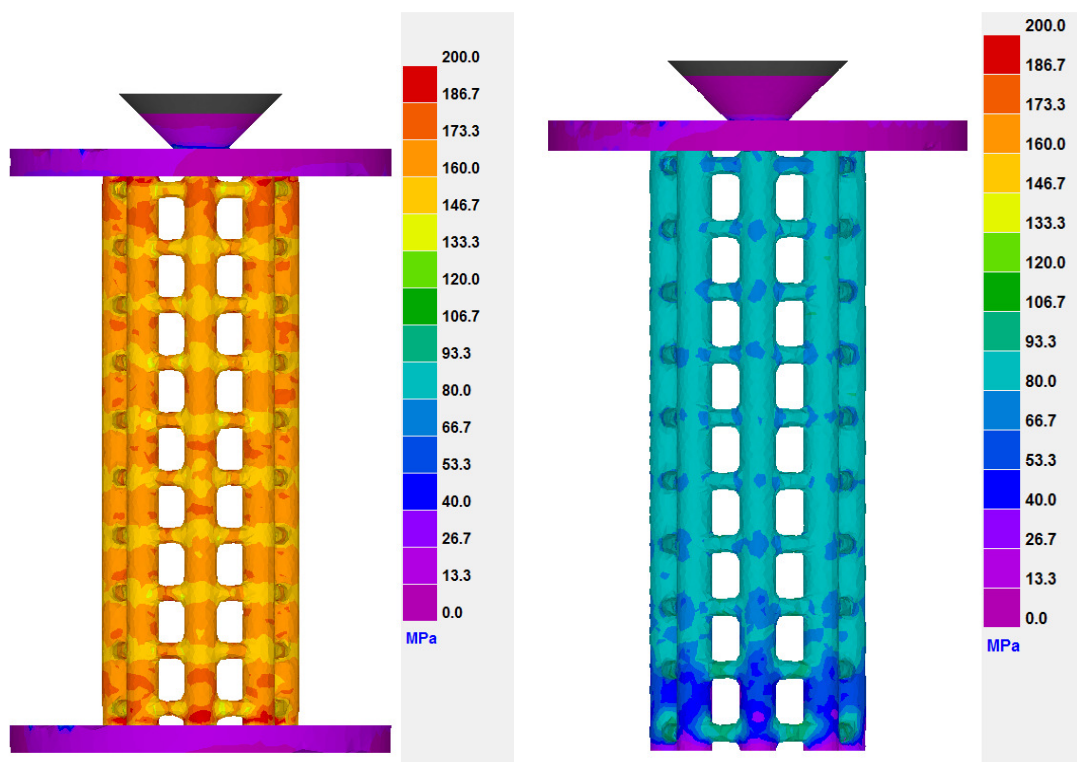
Οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε μοντέλο είναι ως εξής:

## ❖ Γεωμετρία Α



Εικόνα 40: Παραμένουσες τάσεις

## ❖ Γεωμετρία Β

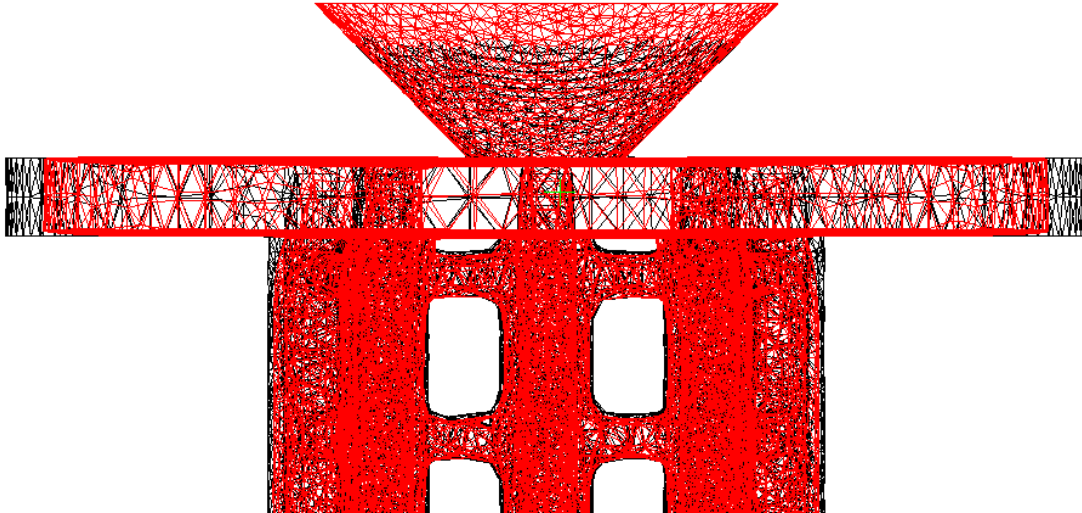


Εικόνα 41: Παραμένουσες τάσεις

Μέσα από τα αποτελέσματα αυτά παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τάσεις αναπτύσσονται στα σημεία όπου γίνεται η ένωση των κυλίνδρων με τις επίπεδες πλάκες. Αυτό συμβαίνει κυρίως, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, γιατί σε αυτά τα σημεία παρατηρείται η μεγαλύτερη παραμόρφωση του χυτού. Η επίπεδη πλάκα, έχοντας αρκετά μεγαλύτερο όγκο, σε σχέση με τα σημεία του χυτού με τα οποία είναι σε επαφή, υφίσταται και αρκετά μεγαλύτερη συρρίκνωση. Ταυτόχρονα, όμως, εμποδίζει την παραμόρφωση του χυτού, την συρρίκνωση δηλαδή που υφίσταται λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας. Η μη δυνατή παραμόρφωση του χυτού, η παρεμπόδιση δηλαδή να φτάσει σε αυτό που θα ονομάζαμε φυσιολογικές διαστάσεις σε θερμοκρασία δωματίου είναι η αιτία που προκαλεί την αύξηση των παραμενουσών τάσεων. Από την επόμενη εικόνα, όπου μπορούμε να δούμε αυτή την παραμόρφωση, μεγεθυμένη δέκα φορές σε σχέση με την πραγματική, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η απότομη γωνία που σχηματίζεται δεν λειτουργεί θετικά ως προς την απομάκρυνση αυτών των τάσεων.

Επιπλέον, λόγω της απότομης εναλλαγής της γεωμετρίας σε αυτά τα σημεία παρατηρούνται οι μεγαλύτερες διαφορές στο χρόνο στερεοποίησης. Αυτή η ανομοιόμορφη στερεοποίηση είναι που προκαλεί μεγάλη αύξηση των παραμενουσών τάσεων αφού, ενώ οι κύλινδροι έχουν ήδη στερεοποιηθεί, η πλάκες παραμένουν σε ρευστή κατάσταση και στη συνέχεια κατά την στερεοποίηση του μειώνεται ο όγκος τους με αποτέλεσμα ολόκληρη η κατασκευή να παραμορφώνεται ώστε να διατηρηθεί η συνέχεια του υλικού. Αυτές οι παραμένουσες τάσεις αποτελούν και μία από τις βασικές αιτίες που δημιουργούνται ρωγμές κατά τη χύτευση.





Εικόνα 42: Παραμορφωμένο και απαραμόρφωτο πλέγμα 10x

Τέλος, αυτό που πρέπει να επισημάνουμε για να γίνει πιο κατανοητό το φαινόμενο αυτό, είναι ότι στον επάνω κώνο, όπου το χυτό μπορεί να κινείται ελεύθερα και χωρίς περιορισμούς στον κατακόρυφο άξονα, δεν αναπτύσσονται παραμένουσες τάσεις.

### 3.4.2. Θερμή ρωγμάτωση

Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης ενός μεταλλικού υλικού ή μετά το πέρας αυτής, παρατηρούνται πολλές φορές μικρό-ρωγμές στο υλικό. Αυτές οι μικρό-ρωγμές είναι το αποτέλεσμα μεγάλων εφελκυστικών ή διατμητικών τάσεων στο στερεοποιούμενο υλικό. Οι ρωγμές αυτές είναι δύο τύπων.

Εξωτερικές ρωγμές που αρχίζουν από την επιφάνεια του χυτού μεταλλικού υλικού και κινούνται προς το εσωτερικό του. Αυτές οι ρωγμές εμφανίζονται σε επιφανειακά σημεία του υλικού, τα οποία έχουν υψηλή συγκέντρωση μηχανικών τάσεων π.χ. επιφανειακές ανωμαλίες, απότομες γωνίες.

Εσωτερικές ρωγμές, οι οποίες εμφανίζονται σε περιοχές του χυτού υλικού, που στερεοποιήθηκαν τελευταίες. Η κύρια αιτία εμφάνισης αυτών των ρωγμών είναι μη-τέλεια πλήρωση του καλουπιού με το χυτό μεταλλικό υλικό.

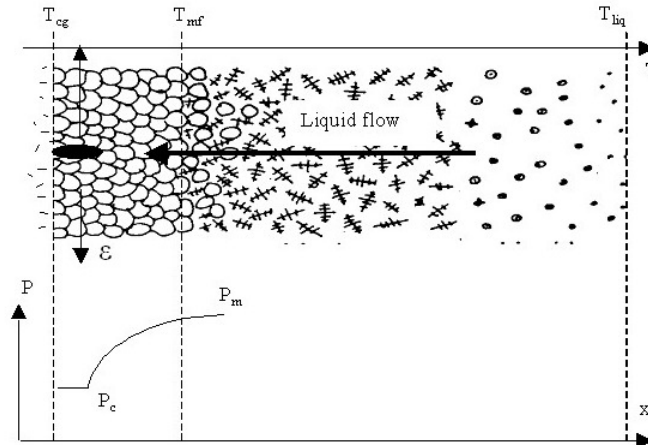
Σε πολλές περιπτώσεις χύτευσης, η εμφάνιση θερμών ρωγμών έχει επιζήμια επίδραση πάνω στην παραγωγικότητα, ειδικά σε περιπτώσεις πολύ ευαίσθητων κραμάτων. Για τον υπολογισμό αυτών των θερμών ρωγματώσεων εφαρμόζεται η ακόλουθη στρατηγική: Όταν η θερμοκρασία μιας περιοχής έρθει σε σταθερή

κατάσταση προσδιορίζεται η θερμοκρασία καθώς και η μεταβολή της θερμοκρασίας στα σημεία στα οποία ενώνονται οι κόκκοι. Στη συνέχεια υπολογίζεται η πιθανότητα να δημιουργηθεί ρήγμα εφαρμόζοντας το κριτήριο των Rappaz, Drezet και Gremaud (RDG) για κάθε ένα από αυτά τα σημεία.

Μία σύνοψη του RDG κριτηρίου δίνεται στη συνέχεια. Στην επόμενη φωτογραφία φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα της αύξησης των δενδριτικών κρυστάλλων που δημιουργούνται στο μέταλλο όπως παρατηρούνται στα κράματα αλουμινίου. Σε αυτήν την περίπτωση υποθέτουμε ότι οι δενδρίτες πολλαπλασιάζονται πάνω σε μία συγκεκριμένη μεταβολή της θερμοκρασίας  $G$ , και υπό μία συγκεκριμένη ταχύτητα  $V_T$ . Πάνω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό κόκκων, η παροχή μάζας δεν μπορεί να αντισταθμίσει την συστολή του μετάλλου, καθώς η μάζα του στερεού μετάλλου είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερη από αυτή του ρευστού μετάλλου. Επομένως, το μέταλλο είναι αναγκασμένο να ρέει από τα δεξιά προς τα αριστερά.

Εάν το δίκτυο των δενδριτών υποβληθεί σε εφελκυστική παραμόρφωση κάθετη στο διάνυσμα της θερμότητας, η ροή θα πρέπει να αντισταθμίσει και αυτήν την παραμόρφωση ώστε να μην δημιουργηθούν θερμές ρωγματώσεις. Η πίεση του δενδριτικού υγρού φαίνεται σχηματικά στο κάτω μέρος της εικόνας: μειώνεται από την μεταλλοστατική πίεση,  $p_m$ , μέχρι το τέλος της παροχής μάζας.

Πάνω από τη θερμοκρασία της παροχής ρευστού μετάλλου,  $T_{mf}$ , οι κόκκοι δεν έχουν ακόμα συγχωνευτεί μεταξύ τους και είναι ελεύθεροι να κινηθούν μαζί με το ρευστό. Από την άλλη μεριά, κάτω από τη θερμοκρασία στην οποία οι κόκκοι συγχωνεύονται,  $T_{cg}$ , όλοι οι κόκκοι σε μία στερεή περιοχή η οποία μπορεί να μεταφέρει της θερμικές καταπονήσεις δημιουργούνται λόγω ψύξης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία στην οποία συγχωνεύονται δύο γειτονικοί κόκκοι εξαρτάται από τον προσανατολισμό αυτών. Μεταξύ των  $T_{mf}$  και  $T_{cg}$ , η ροή του μετάλλου μπορεί να αντισταθεί μόνο στην πίεση μιας κοιλότητας στην οποία έχει παγιδευτεί κενός χώρος και μπορεί να εξελιχθεί σε θερμή ρωγμάτωση. Οποιαδήποτε ασυνέχεια του διαδενδριτικού υγρού στρώματος στη δημιουργία των κόκκων δύσκολα μπορεί να αντισταθμιστεί με τροφοδοσία από το επάνω μέρος της λόγω του υψηλού ποσοστού στερεοποίησης του μετάλλου (δηλαδή λόγω της χαμηλής διαπερατότητας).



*Schematic of the formation of a hot tear between equiaxed grains as a result of a localized strain transmitted by the coalesced dendrites below. The pressure drop in the interdendritic liquid is also indicated.*

#### Εικόνα 43

Το κριτήριο RDG βασίζεται επομένως στην πτώση πίεσης που προκαλείται λόγω της παραμόρφωσης και της συρρίκνωσης. Για να γίνει αυτό, πραγματοποιείται ένας ισολογισμός μάζας σε μία μικρή περιοχή.

Θεωρώντας ότι δεν έχει σχηματιστεί πορώδες, το ποσοστό στερεοποίησης του ρευστού,  $f_l$ , είναι ίσο με  $1-f_s$ , και οι μάζες των δύο φάσεων,  $r_s$  και  $r_l$ , θεωρούνται σταθερές, αλλά όχι ίσες μεταξύ τους (παράγοντας συρρίκνωσης στερεοποίησης  $b$ ). Η ταχύτητα του ρευστού σχετίζεται με το διάνυσμα της πίεσης του ρευστού μέσω της σχέσης του Darcy και η διαπερατότητα της διφασικής περιοχής από την προσεγγιστική σχέση των Carman-Kozeny.

Γνωρίζονται ότι το ρευστό κινείται πάνω στο διάνυσμα της θερμότητας, ενώ αντίθετα η παραμόρφωση λόγω στερεοποίησης γίνεται στην εγκάρσια κατεύθυνση, μπορούμε να υπολογίσουμε την πίεση στη διφασική περιοχή με την παρακάτω εξίσωση.

$$p = p_a + \rho gh - \Delta p_{sh} - \Delta p_{mec} \quad (1)$$

Όπου  $p_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση,  $\rho gh$  η στατική πίεση.  $\Delta p_{sh}$  και  $\Delta p_{mec}$  είναι η πτώση πίεσης στη διφασική περιοχή η οποία σχετίζεται με την συρρίκνωση λόγω στερεοποίησης και της παραμόρφωσης που προκαλείται από τη ροή του ρευστού, αντίστοιχα. Σε σταθερή κατάσταση και υποθέτοντας έναν ομοιόμορφο ρυθμό μηχανικής παραμόρφωσης,  $\dot{\epsilon}$ , οι δύο αυτές συνεισφορές στην πτώση πίεσης υπολογίζονται από την εξίσωση 2:

$$\Delta p_{sh} + \Delta p_{mec} = \frac{180\mu}{G\lambda^2} \left[ v_T \beta A + \frac{(1+\beta)B\dot{\epsilon}}{G} \right]$$

$$\text{with } A = \int_{T_{cg}}^{T_{mf}} \frac{f_s^2 dT}{(1-f_s)^2}, \quad B = \int_{T_{cg}}^{T_{mf}} \frac{f_s \cdot F_s(T)}{(1-f_s)^3} dT \quad \text{and} \quad F_s(T) = \int_{T_{cg}}^T f_s dT$$

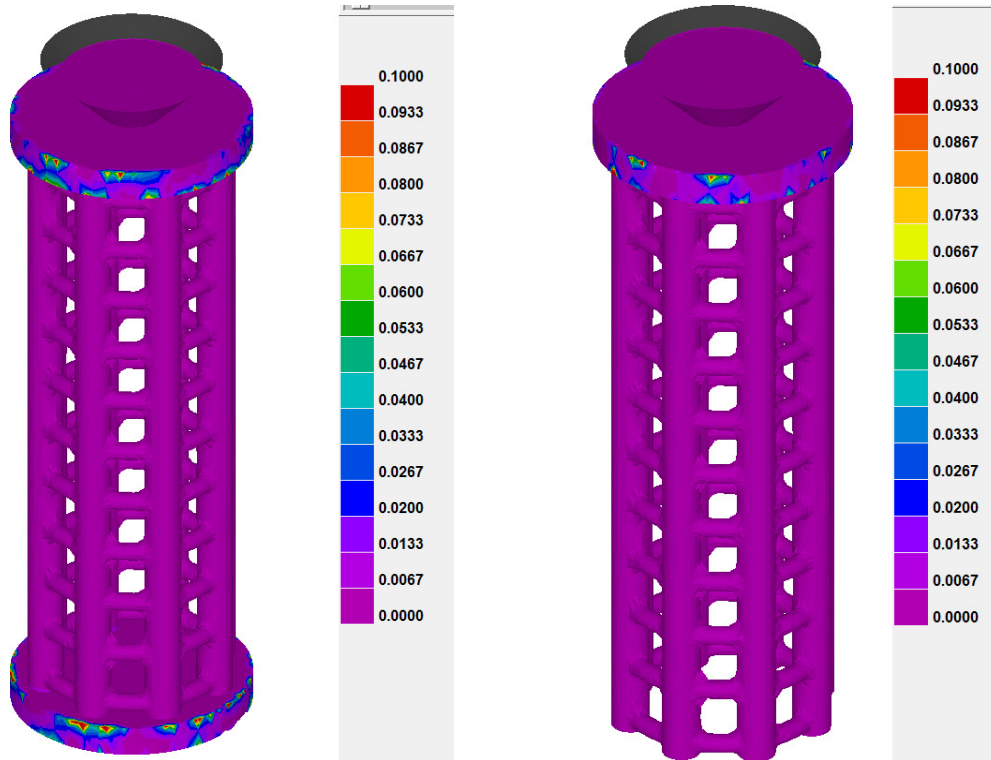
Όπου,  $T_{cg}$  είναι η θερμοκρασία στην οποία γίνεται συνένωση (στερεή γεφύρωση) των δενδριτών και  $m$  το ιξώδες του ρευστού και  $\lambda$  είναι το μέσο μέγεθος των κόκκων. Οι δύο παράμετρος  $A$  και  $B$  εξαρτώνται μόνο από τη φύση του κράματος και από τον τρόπο με τον οποίο στερεοποιείται. Από την εξίσωση 2 φαίνεται ότι η συνεισφορά της συρρίκνωσης στην πτώση πίεσης είναι ανάλογη της ταχύτητας των ισόθερμων μεταβολών, ενώ η μηχανική συνεισφορά είναι ανάλογη του ρυθμού παραμόρφωσης. Και οι δύο συνεισφορές είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου του μεγέθους των κόκκων. Τελικά, εάν η πίεση,  $P$ , που προκύπτει από τις εξισώσεις (1) και (2), πέσει κάτω από την ελάχιστη πίεση,  $P_c$ , σχηματίζεται θερμή ρωγμάτωση. Αυτός ο περιορισμός εκφράζεται μαθηματικά ως εξής (εξίσωση 3):

$$\Delta p = p_a - p = \Delta p_{sh} + \Delta p_{mec} - \rho gh < \Delta P_c$$

Όπου η ελάχιστη επιτρεπόμενη πίεση εκφράζεται ως  $\Delta p_c = p_a - p_c$ . Αυτή η συνθήκη επιτρέπει τον υπολογισμό του μέγιστου ρυθμού παραμόρφωσης στη διαφασική περιοχή,  $\dot{\epsilon}_{max}$ , και πλέον μπορεί να οριστεί η ευαισθησία σε θερμή ρωγμάτωση, HCS, ως  $1/\dot{\epsilon}_{max}$  [s]. Όσο πιο υψηλή η τιμή του HCS, τόσο πιο ευπαθές το κράμα. Σε περίπτωση που η τιμή του  $\dot{\epsilon}_{max}$  [1/s] είναι αρνητική, η διαφασική περιοχή δεν μπορεί να πάρει καμία παραμόρφωση, επομένως σχηματίζεται ρωγμή και ο δείκτης HCS παίρνει μία πολύ μεγάλη τιμή ( $10^6$ ). Όσο δηλαδή πιο μεγάλη η τιμή του HCS τόσο πιο μεγάλη η πιθανότητα δημιουργίας θερμής ρωγμάτωσης.

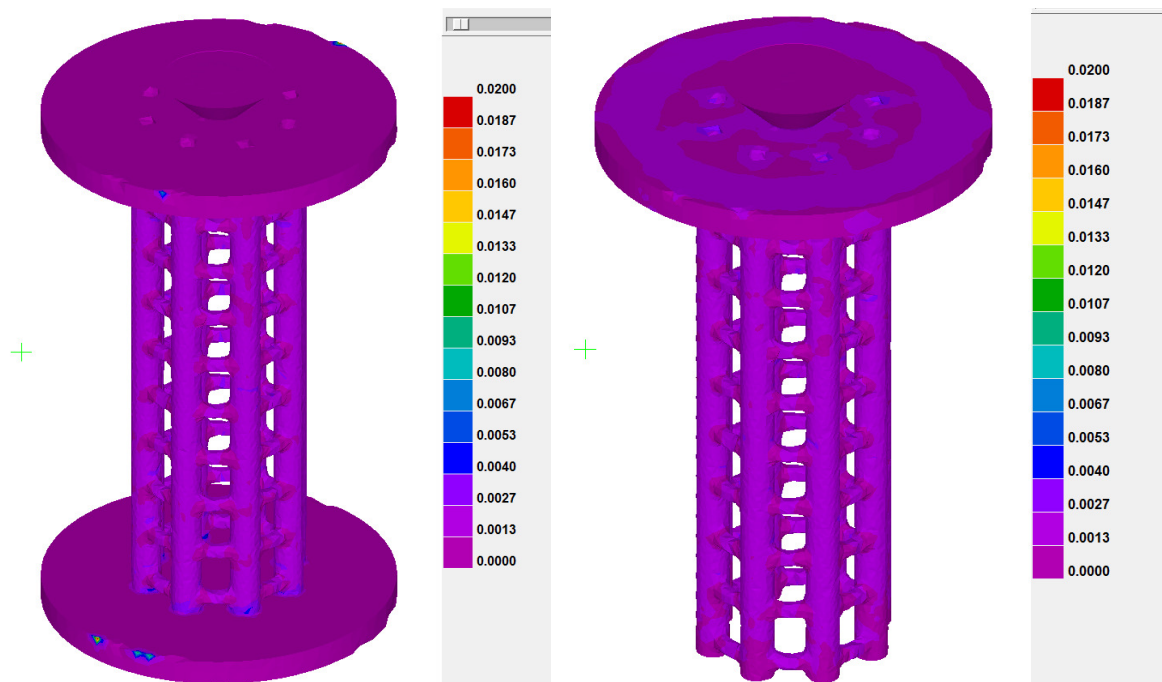
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση αυτή φαίνονται στη συνέχεια.

## ❖ Γεωμετρία Α



Εικόνα 44: Ευαισθησία σε θερμή ρωγμάτωση

## ❖ Γεωμετρία Β



Εικόνα 45: Ευαισθησία σε θερμή ρωγμάτωση

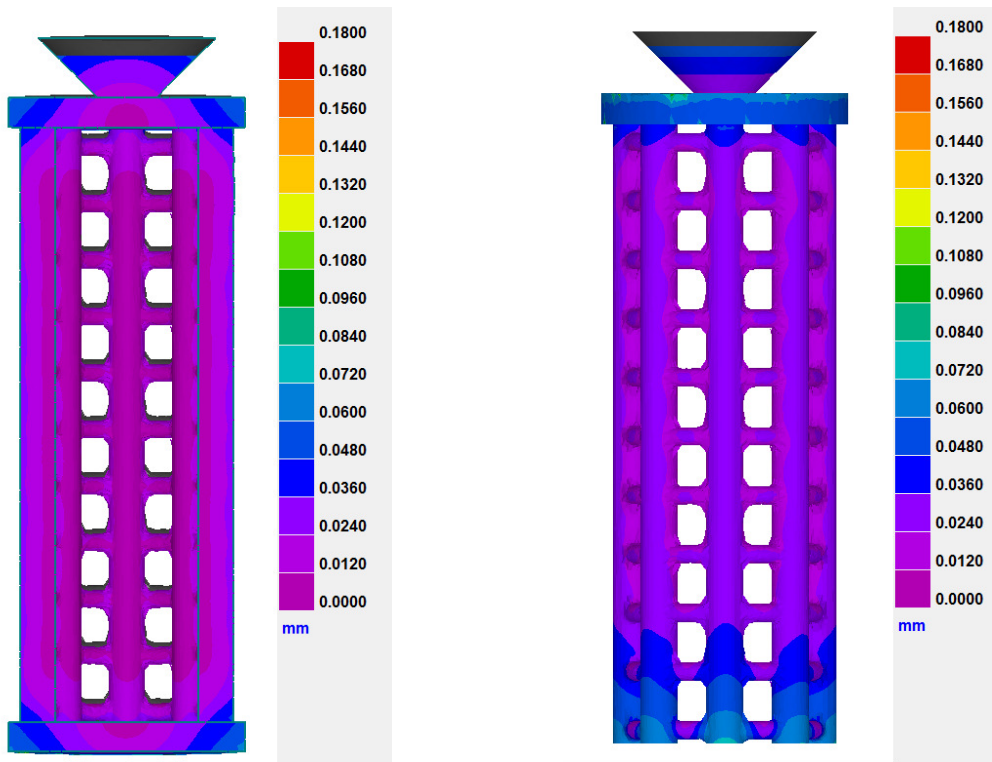
Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, γενικά δεν παρατηρούνται μεγάλοι κίνδυνοι για δημιουργία θερμής ρωγμάτωσης. Τα πιο επικίνδυνα σημεία, τα σημεία δηλαδή στα οποία θα δημιουργηθεί ρωγμή πρώτα, είναι η γωνίες των επίπεδων πλακών. Κίνδυνος, όμως, υπάρχει και στα σημεία στα οποία ενώνονται οι επίπεδες πλάκες με το τεμάχιο το οποίο θέλουμε να κατασκευάσουμε.

### **3.4.3. Παραμόρφωση**

Η συρρίκνωση του μετάλλου κατά τη χύτευση αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις αλλαγές στις διαστάσεις του τεμαχίου που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε. Για κομμάτια τα οποία δεν έχουν κάποιο περιορισμό στις διαστάσεις τους (δηλαδή όταν δεν υπάρχει κάποιο μέρος του καλουπιού ή πυρήνες που να περιορίζουν την συρρίκνωση), οι προβλέψεις που αφορούν τις διαστάσεις του τελικού τεμαχίου πρέπει να βασίζονται αποκλειστικά στις ιδιότητες του υλικού που αφορούν την θερμική διαστολή του. Όμως, τα περισσότερα κομμάτια τα οποία κατασκευάζονται με χύτευση ακριβείας είναι αρκετά περίπλοκα και έχουν αρκετούς περιορισμούς στις διαστάσεις τους [7].

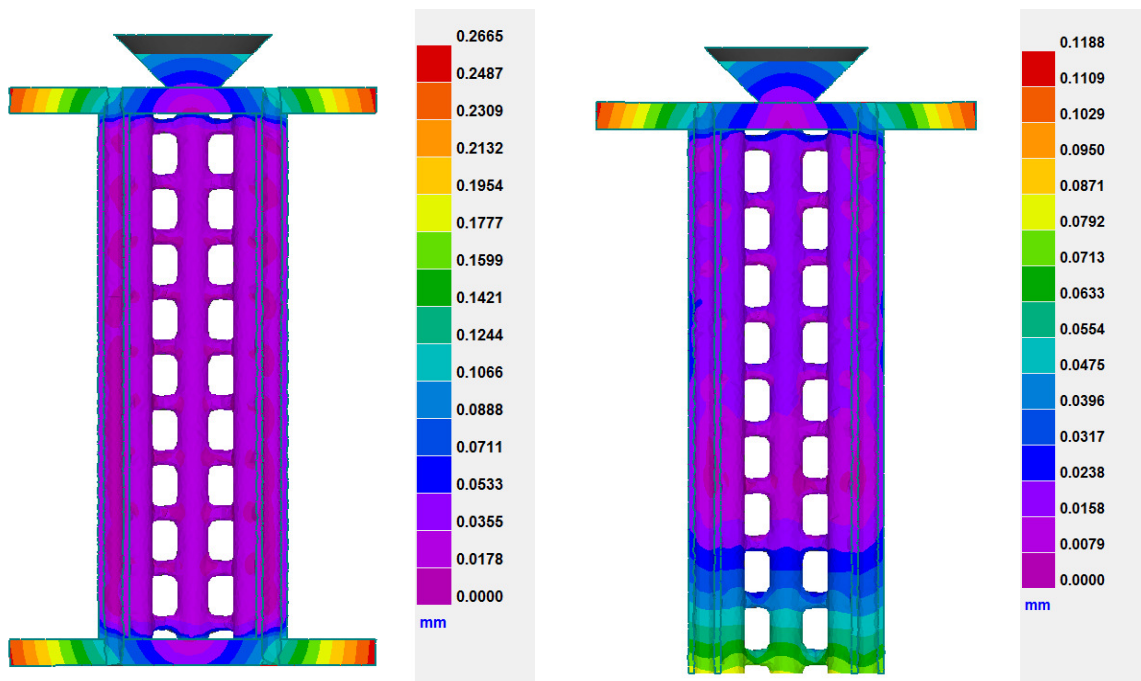
Μέσα από την ανάλυση τάσεων μπορεί το ProCast δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού αυτής της παραμόρφωσης που υφίσταται το τεμάχιο κατά τη χύτευση, και επομένως των τελικών διαστάσεων του χυτού.

❖ Γεωμετρία Α



Εικόνα 46: Συνολική παραμόρφωση

❖ Γεωμετρία Β



Εικόνα 47: : Συνολική παραμόρφωση

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στις προηγούμενες εικόνες δείχνουν την απόκλιση του χυτού από την επιθυμητή γεωμετρία, όπως αυτή είχε σχεδιαστεί στην αρχή, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση στην οποία εμφανίζεται. Η μεγαλύτερη παραμόρφωση εμφανίζεται στις επίπεδες πλάκες, όπως αναμέναμε, αφού εκεί υπάρχει περισσότερος όγκος μετάλλου και επομένως υπόκειται σε μεγαλύτερη συρρίκνωση.

Μέσα όμως από την σύγκριση των μοντέλων της ίδιας γεωμετρίας παρατηρούμε ότι, η ύπαρξη αυτή των προσεπιχωνευμάτων, εμπόδιζε τη μεγάλη παραμόρφωση του χυτού. Είναι χαρακτηριστική η διαφορά, όπου στην πρώτη περίπτωση υπάρχει σχεδόν μηδενική μετατόπιση, ενώ στην δεύτερη, στο κάτω ελεύθερο άκρο του χυτού, πλησιάζει ακόμα και τα 0,1 χιλιοστά.

Για να αποφύγουμε και την ελάχιστη παραμόρφωση που παρατηρείται στο χυτό κοντά στις επίπεδες πλάκες, και να παραλάβουμε ένα γεωμετρικά άρτιο αποτέλεσμα, θα μπορούσαμε να μεγαλώσουμε ελάχιστα το μήκος των κατακόρυφων κυλίνδρων, και στη συνέχεια το παραμορφωμένο κομμάτι να αφαιρεθεί μαζί με τα προσεπιχωνεύματα.



## 4. Κατασκευή

### 4.1. Γενικά

Η κατασκευή του μοντέλου θα γίνει με την τεχνική χύτευση εν κενώ με τη μέθοδο του χαμένου κεριού. Όπως γίνεται εμφανές και από το όνομα της μεθόδου το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει είναι να κατασκευαστεί το κέρινο ομοίωμα. Με βάση αυτό το ομοίωμα θα φτιαχτεί το καλούπι από γύψο στο οποίο θα γίνει η χύτευση του μετάλλου.

Στη συνέχεια το καλούπι θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του κεριού, το κερί μέσα στο γύψο λιώνει και φεύγει από την κοιλότητα αφήνοντας την άδεια. Έπειτα, το καλούπι τοποθετείται στην ειδική μηχανή χύτευσης η οποία δημιουργεί συνθήκες κενού και επιπλέον περιλαμβάνει ιδική κοιλότητα για να λιώνει το μέταλλο που θα χρησιμοποιηθεί.

### 4.2. Κατασκευή μοντέλου

Η κατασκευή του κέρινου ομοιώματος αποτελεί την πιο σημαντική και ταυτόχρονα την πιο δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία για την πραγματοποίηση της χύτευσης. Κατά την κατασκευή του κέρινου ομοιώματος είναι απαραίτητο να προσέξουμε το αποτέλεσμα που θα προκύψει καθώς οποιαδήποτε ατέλεια υπάρχει στο κερί, τότε αυτή η ατέλεια θα περάσει και στο τελικό αποτέλεσμα.

Όσο αφορά τα είδη κεριού που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία αυτή, θα λέγαμε ότι υπάρχει μεγάλη ποικιλία στην ποιότητα, στις θερμοκρασίες τήξης και στις ιδιότητες. Έτσι, αν το κριτήριο είναι η εύκολη απομάκρυνση του κεριού από το καλούπι, ιδανικά είναι τα μαλακά κεριά, ενώ αν απαιτείται καλή ποιότητα επιφάνειας, ιδανικά είναι τα σκληρά κεριά.

Στις πιο συνήθεις εφαρμογές στην αργυροχρυσοχοΐα χρησιμοποιούνται κεριά γενικής χρήσης, ενώ συνήθως το κερί που χρησιμοποιείται για τον κεντρικό κορμό είναι διαφορετικής ποιότητας από αυτό που χρησιμοποιείται για τα κέρινα ομοιώματα.

Για την κατασκευή του κέρινου ομοιώματος υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως. Μπορεί να κατασκευαστεί είτε με ταχεία προτυποποίηση είτε να κατασκευαστεί από το μηδέν με το χέρι από έτοιμους κυλίνδρους και πλάκες κεριού τα οποία πρέπει να κοπούν και να κολληθούν στο σχήμα που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε.

#### 4.2.1. Κατασκευή με το χέρι

Για την κατασκευή με το χέρι χρησιμοποιούνται έτοιμες κέρινες πλάκες και ράβδοι οι οποίες είναι διαθέσιμες στο εμπόριο. Για τον προσδιορισμό του σχήματος που θέλουμε χρησιμοποιείται ένα κοπίδι με το οποίο κόβουμε το κεριό καθώς και ένα κολλητήρι το οποίο χρησιμεύει στο να λιώνει τοπικά το κεριό και να κολλάει με αυτόν τον τρόπο τα διάφορα κομμάτια μεταξύ τους. Η κατασκευή της επιθυμητής γεωμετρίας αποτελεί σε κάθε περίπτωση δύσκολη και κοπιαστική δουλειά, ενώ το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό τόσο από τη δεξιοτεχνία του ατόμου το οποίο το κατασκευάζει όσο και από τα εργαλεία που έχει στη διάθεση του.

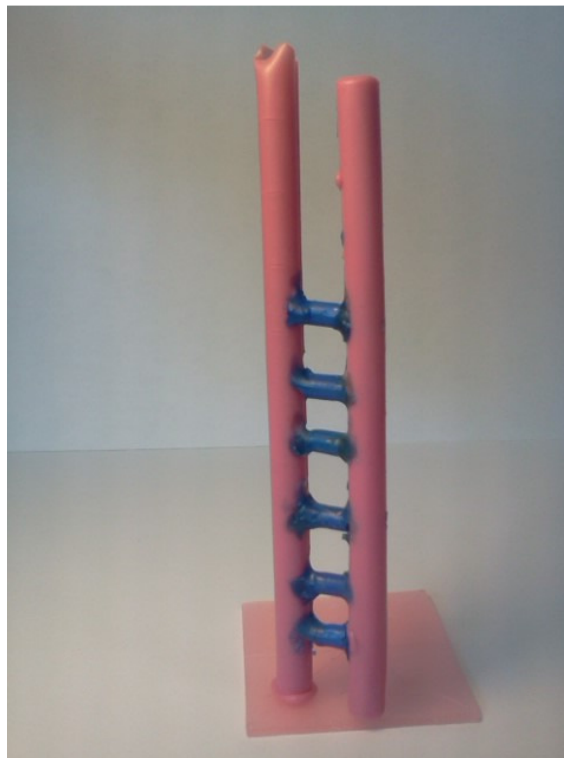


Εικόνα 48: Το κολλητήρι

Ο τρόπος που κατασκευάστηκε το μοντέλο σε αυτήν την περίπτωση είναι ο εξής:

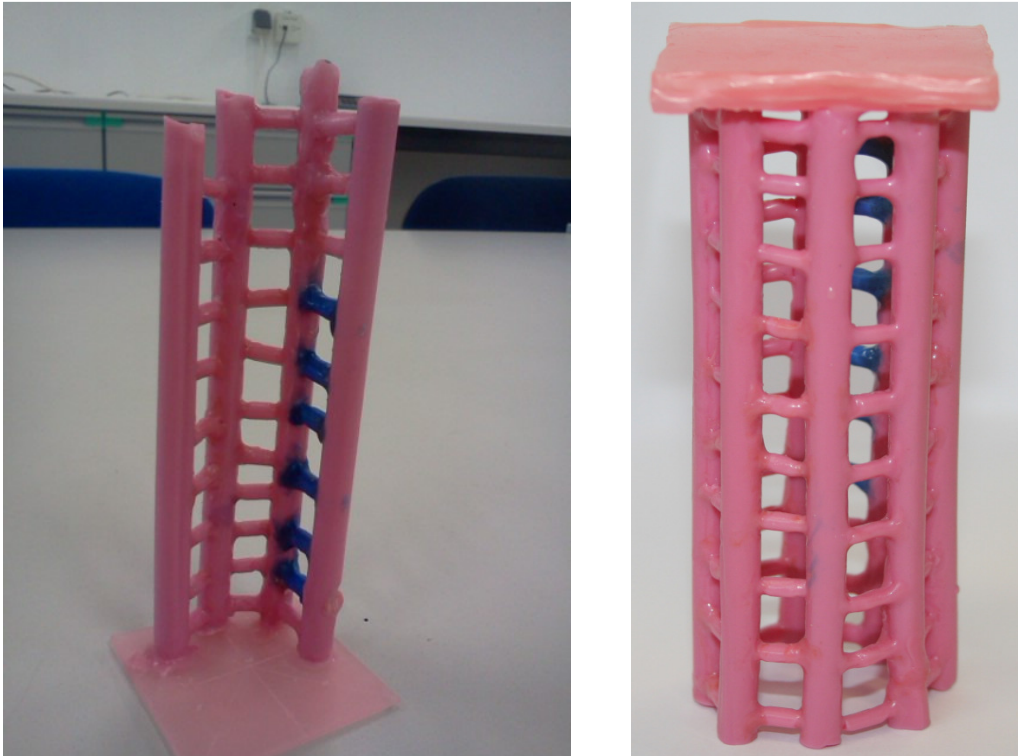
- a) Γύρω από μεταλλικούς κυλίνδρους με διάμετρο 6 και 3 χιλιοστά τυλίχτηκε αλουμινόχαρτο έτσι ώστε να κατασκευαστούν μη μόνιμα καλούπια για να χυτευτεί μέσα σε αυτά κεριό. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάσαμε κυλίνδρους στη διάμετρο που επιθυμούμε.

- b) Στη συνέχεια, δύο μεγάλες ράβδοι κολλήθηκαν σε μία επίπεδη βάση από κερί η οποία αποτελεί την επίπεδη πλάκα που απαιτείται για να γίνει η χύτευση.
- c) Έπειτα, ανάμεσα στους δύο αυτούς κυλίνδρους κολλήθηκαν οι μικρής διαμέτρου οριζόντιοι κύλινδροι. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε το 1/8 της επιθυμητής γεωμετρίας.



Εικόνα 49: Το 1/8 του τεμαχίου

- d) Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκε κυκλικά από αυτό και το υπόλοιπο τεμάχιο.



Εικόνα 50: α)Μισό τεμάχιο από κερί β)Ολόκληρο το τεμάχιο

Όπως παρατηρούμε και από τις φωτογραφίες υπάρχουν πολλά σημεία στα οποία το κέρινο μοντέλο δεν ανταποκρίνεται στο σχέδιο που έγινε στο SolidWorks. Το πρώτο στοιχείο που πρέπει να επισημάνουμε είναι η διαφορά της πρώτης κολόνας που δημιουργήθηκε με την τελευταία. Στην εικόνα 38-α φαίνονται οι τρεις πρώτες κολώνες που δημιουργήθηκαν σε αντίθεση με την εικόνα 38-β όπου είναι οι δύο τελευταίες. Είναι εμφανές ότι οι οριζόντιοι φορείς είναι αρκετά πιο «ίσοι» σε σχέση με τους πρώτους, ενώ επίσης και οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι αρκετά πιο ομοιόμορφες. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην εμπειρία που αποκτά κανείς καθώς προσπαθεί να κατασκευάσει ένα τέτοιο τεμάχιο. Είναι λογικό, με τις προσπάθειες και την εξάσκηση η δεξιότητα κάποιου να αυξάνεται.

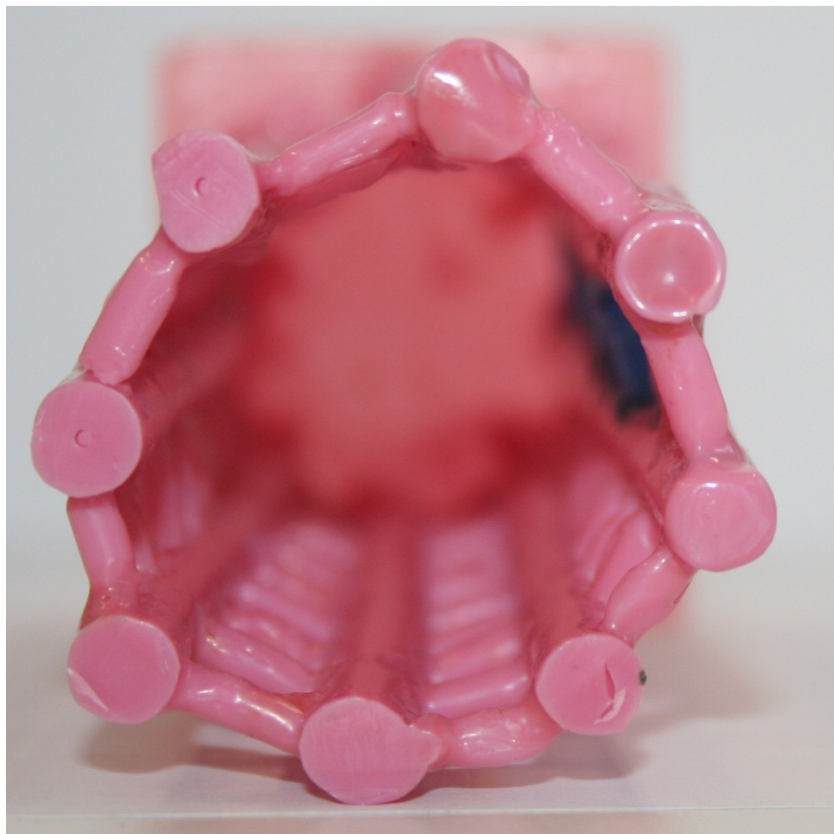
Επιπλέον, με μία πιο προσεκτική ματιά είναι δυνατόν να εντοπιστούν και άλλα ελαττώματα, πιο μικρής φύσεως. Όπως για παράδειγμα οι ατέλειες που δημιουργήθηκαν στους κυλίνδρους λόγω της χύτευσης του κεριού σε καλούπια από αλουμινόχαρτο, ενώ επιπλέον φαίνεται και η παραμόρφωση που υφίστανται οι μικρή κύλινδροι λόγω της μεγάλου μεγέθους και θερμοκρασίας του κολλητηριού.



Εικόνα 51: Τεμάχιο σε οριζόντιο προσανατολισμό

Θα ήθελα να επισημάνω μία πιο απροσδόκητη ατέλεια που αφορά της μεγάλες κατακόρυφες κολόνες. Ενώ έγινε κάθε δυνατή προσπάθεια να τοποθετηθούν πάνω σε έναν ιδεατό κύκλο διαμέτρου 30 χιλιοστών και όσο το δυνατόν πιο κάθετα στην βάση, κάτι τέτοιο στάθηκε πρακτικά αδύνατον. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι ενώ στο σημείο στο οποίο είναι κολλημένοι οι κύλινδροι αποτελούν σχεδόν σημεία κύκλου, η απέναντι πλευρά αυτών, όπως φαίνεται και στην κάτοψη του δοκιμίου, απέχει αρκετά από το να τη θεωρήσουμε κύκλο.

Αυτό συμβαίνει διότι με την κόλληση των κατακόρυφων κυλίνδρων στη βάση αυτών εισήχθησαν παραμένουσες τάσεις οι οποίες δεν επέτρεψαν στους κυλίνδρους να διατηρήσουν την καθετότητα τους.



Εικόνα 52: Κάτοψη δοκιμίου



Εικόνα 53: Ατέλειες λόγω της κόλλησης του κεριού

Τέλος μια πιο προσεκτική μελέτη τόσο του κέρινου ομοιώματος όσο και του τεμαχίου από αλουμίνιο που κατασκευάστηκε φανερώνει διάφορες μικρο-ατέλειες, κυρίως στα σημεία όπου οι κύλινδροι ενώθηκαν μεταξύ τους. Τέτοιες ατέλειες μπορεί να είναι είτε κάποιο κύλινδροι που δεν έχουν κολληθεί καλά, είτε κάποιες ρωγμές που μπορεί να εμφανίστηκαν στην πορεία.

#### 4.2.2. Κατασκευή με ταχεία προτυποποίηση

Η κατασκευή με ταχεία προτυποποίηση αποτελεί μία εύκολη μέθοδο αλλά εξαιρετικά ακριβή και επομένως δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο αριθμό τεμαχίων. Αντίθετα με την κατασκευή στο χέρι, η μέθοδος της ταχείας προτυποποίησης δεν παρουσιάζει τα ελαττώματα που εμφανίστηκαν προηγουμένως.

Το μόνο που απαιτείται για την κατασκευή με αυτή την μέθοδο είναι η αποθήκευση της γεωμετρίας σε αρχεία κατάλληλου τύπου ώστε να διαβαστεί από τα αντίστοιχα μηχανήματα τα οποία πραγματοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση. Επιπλέον, τα μηχανήματα αυτά μπορούν τυπώσουν τόσο συνθετικές ρητίνες, όσο και κατευθείαν κεριά.

Με τις συνθετικές ρητίνες μπορούμε να κατασκευάσουμε το καλούπι για να χυτεύσουμε μέσα κεριά και να του δώσουμε τη γεωμετρία που επιθυμούμε. Η εκτύπωση απευθείας σε κεριά εξασφαλίζει ότι δεν θα εμφανιστούν ατέλειες στο κέρινο ομοίωμα καθώς και ότι θα είναι πιστό αντίγραφο της γεωμετρίας.

Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, σε συνάρτηση με το μεγάλο κόστος ανά περίπτωση, είναι η ανάλυση στην οποία γίνεται η εκτύπωση, αφού συχνά παρατηρούνται «σκαλοπάτια» από τα επίπεδα στα οποία τυπώνει η μηχανή. Για καλύτερη ποιότητα επιφάνειας, επομένως, πρέπει είτε να λειανθεί το τεμάχιο το οποίο θα προκύψει από την προτυποποίηση, είτε να ψεκαστεί με κατάλληλο σπρέι το οποίο θα καλύψει τις ατέλειες και θα αποδώσει λεία επιφάνεια.

Η κατασκευή του καλουπιού επιτρέπει την χύτευση πολλαπλών τεμαχίων σε κεριά, και επομένως με το ίδιο σχετικά κόστος μπορούμε να κατασκευάσουμε πολλά αντίγραφα του χυτού. Προκειμένου να κατασκευαστεί το καλούπι με τη μέθοδο της ταχείας προτυποποίησης είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο αυτού στο SolidWorks, και στη συνέχεια να αποθηκευτεί σε μορφή .stl ώστε να διαβαστεί από την μηχανή ταχείας προτυποποίησης. Η κατασκευή του καλουπιού αποτελεί, για άλλη μια φορά, περίπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Για την κατασκευή του πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν όλες οι παράμετροι της χύτευσης, ίσως δίνοντας ακόμα μεγαλύτερη προσοχή, αφού η χύτευση του κεριού παρουσιάζει όλα τα συνηθισμένα ελαττώματα που υπάρχουν και κατά τη χύτευση των μετάλλων, αλλά σε μεγαλύτερο βαθμό.

Έτσι, το πρώτο και βασικό που πρέπει να προσέξουμε είναι το σύστημα τροφοδοσίας του καλουπιού και το κατά πόσο αυτό θα γεμίζει πλήρως. Για τον σκοπό αυτόν πρέπει να συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι για την χύτευση του κεριού θα χρησιμοποιηθεί μία κεριέρα, η οποία θα αναλάβει τόσο την αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το σημείο τήξης του κεριού, περίπου 85°C, όσο και την αύξηση της πίεσης για την έγχυση του στο καλούπι. Η κεριέρα αυτή φαίνεται στη συνέχεια.



Εικόνα 54: Κεριέρα

Παρ' όλα αυτά, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την αύξηση της πίεσης καθώς αν είναι αρκετά μεγάλη τότε το λιωμένο κεριό θα «εκτιναχθεί» από το ακροφύσιο σε πολύ μεγάλη ταχύτητα με αποτέλεσμα να προσκρούσει στο εσωτερικό του καλουπιού και να επιστρέψει προς τα πίσω. Αν όμως η πίεση είναι αρκετά μικρή τότε το κεριό δεν θα φτάσει μέχρι το βάθος του καλουπιού με αποτέλεσμα να έχουμε ανεπαρκή πλήρωση. Για να αποφύγουμε και τα δύο αυτά προβλήματα πρέπει η γεωμετρία του καλουπιού να περιλαμβάνει όσο το δυνατόν λιγότερες απότομες γωνίες. Η γεωμετρία του καλουπιού, όπως αυτή σχεδιάστηκε στο SolidWorks, φαίνεται στη συνέχεια.

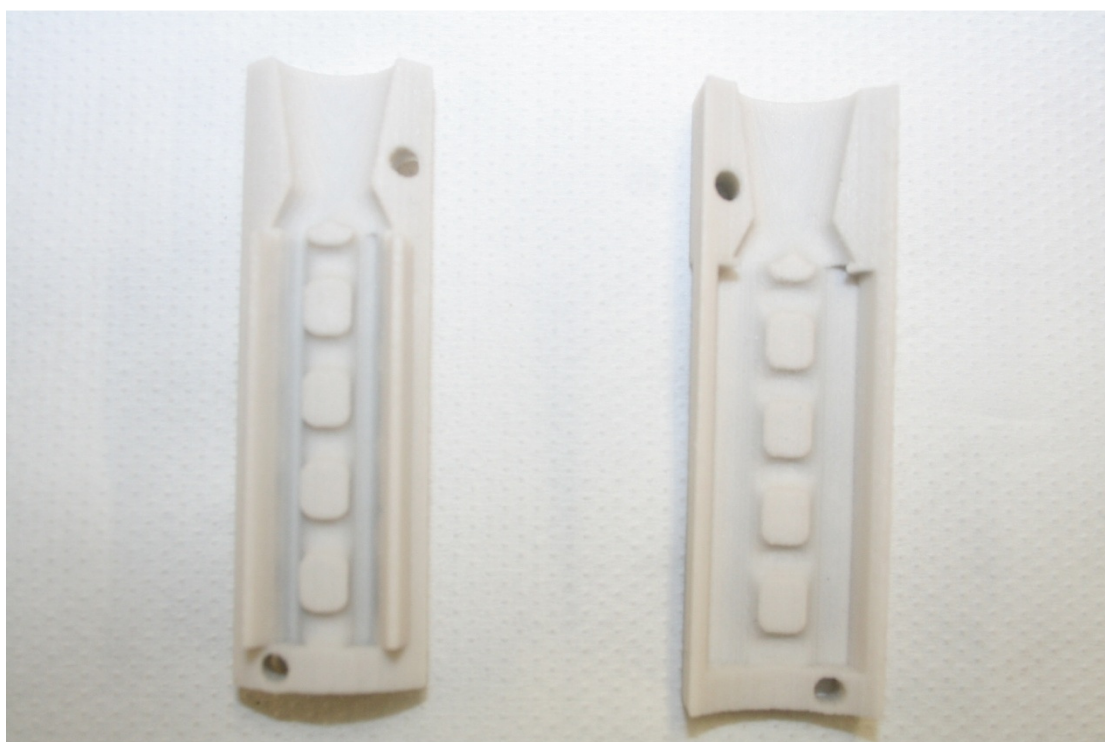
Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το καλούπι στην κεριέρα βρέθηκε ότι οι ιδανικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ώστε να γεμίζει πλήρως το καλούπι, είναι 0,25bar και 85°C περίπου. Με αυτές τις συνθήκες επιτυγχάνουμε ομαλή ροή του ρευστού από την κεριέρα στο καλούπι και μέσα σε αυτό με αποτέλεσμα να μην δημιουργούνται κοιλότητες στο τελικό αποτέλεσμα. Σε περίπτωση που επιλέξουμε μεγαλύτερη πίεση, τότε δημιουργούνται στροβιλισμοί και αποκολλήσεις στο ρευστό κεριό, οι οποίοι με τη σειρά δεν επιτρέπουν την ομαλή πλήρωση της κοιλότητας. Τα δοκίμια που εμφανίζουν τέτοιες ατέλειες δεν κρίνονται



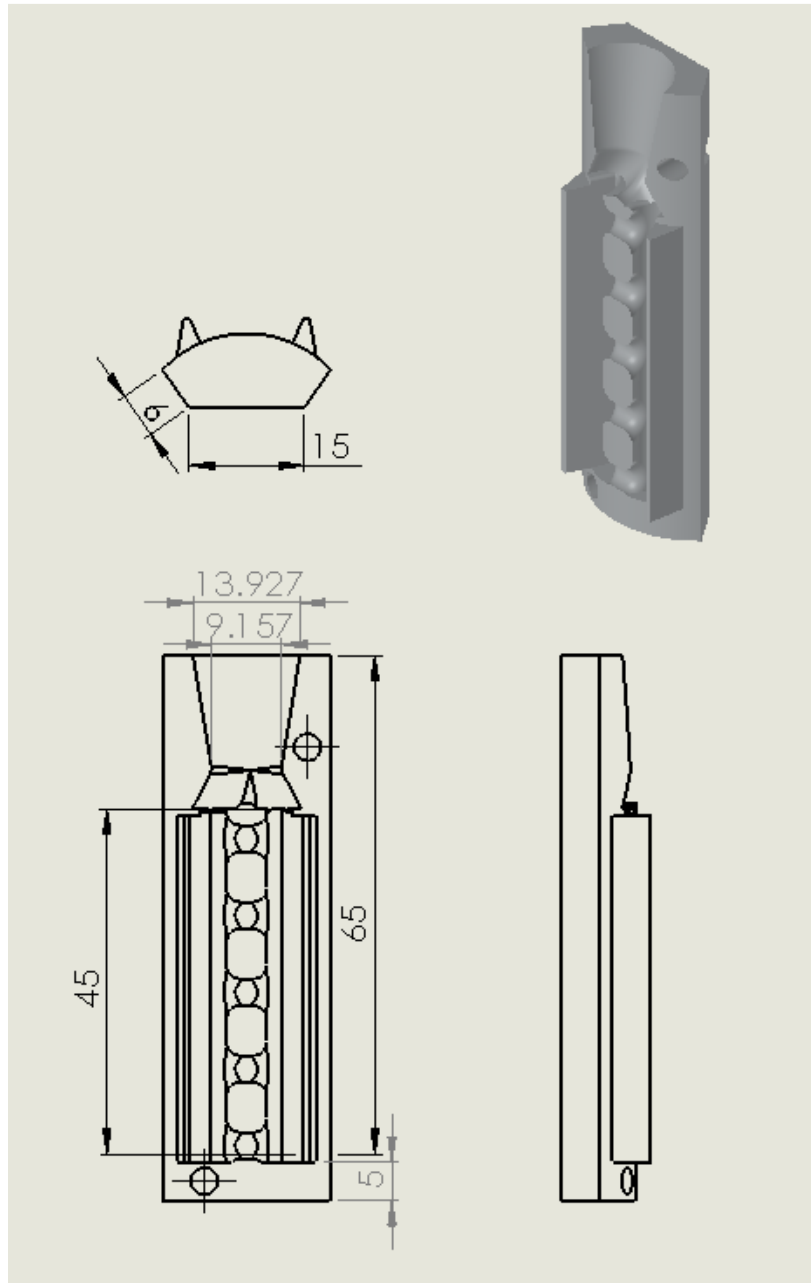
ικανά για να χρησιμοποιηθούν και τοποθετούνται μέσα στην κεριέρα ώστε να θερμανθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν.



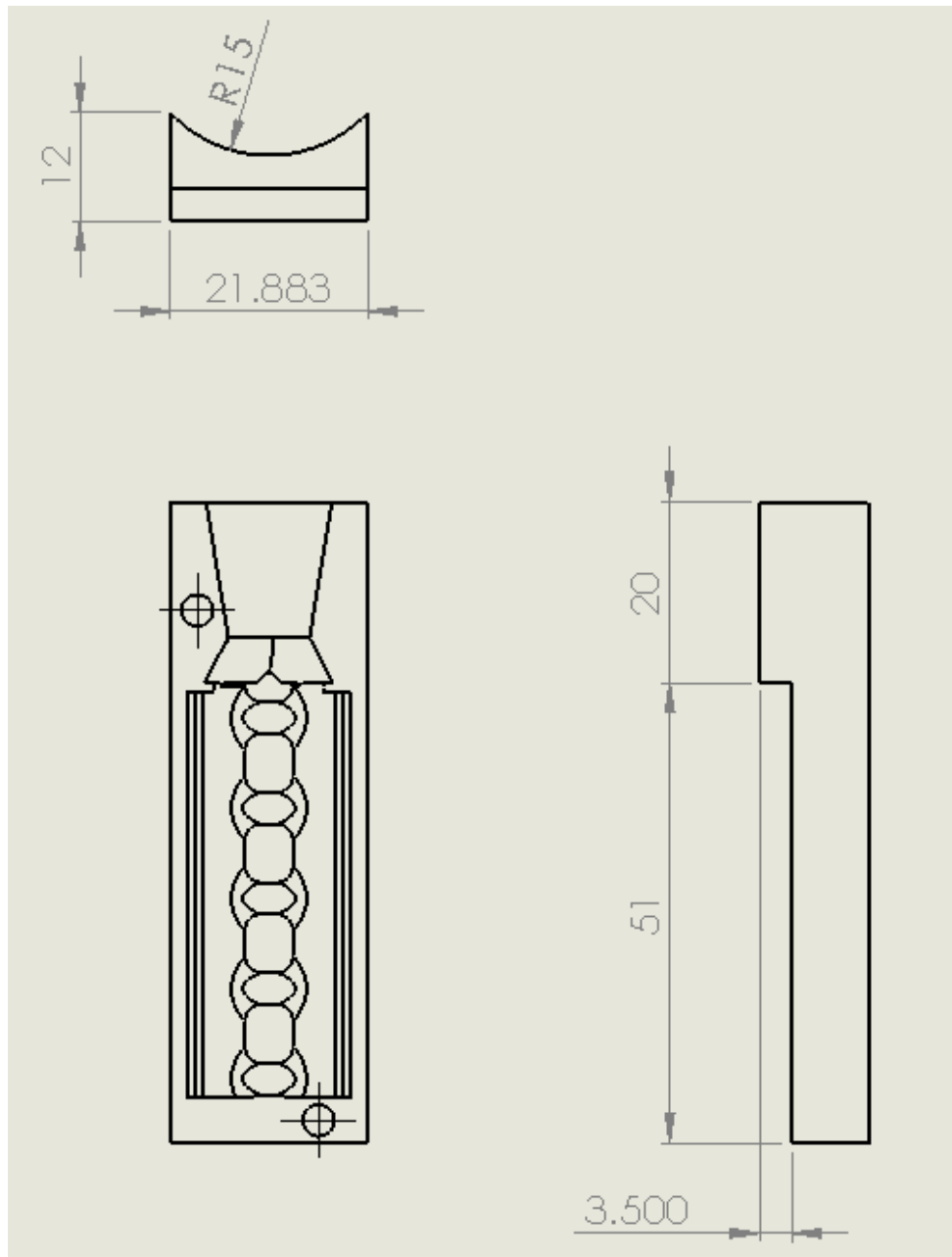
Εικόνα 55: Τεμάχιο με ατελή πλήρωση



Εικόνα 56: Τα 2 μισά του καλουπιού κατασκευασμένα από συνθετική πούδρα και ρητίνη



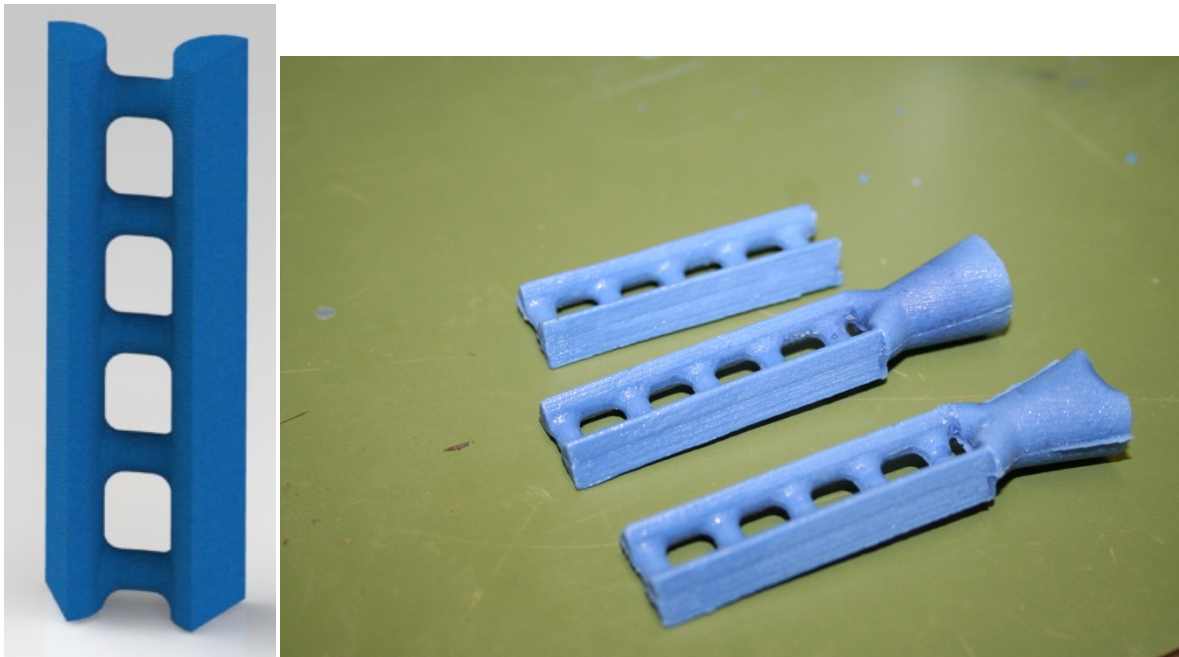
Εικόνα 57: Το πάνω μισό του καλουπιού



Εικόνα 58: Το κάτω μισό του καλουπιού

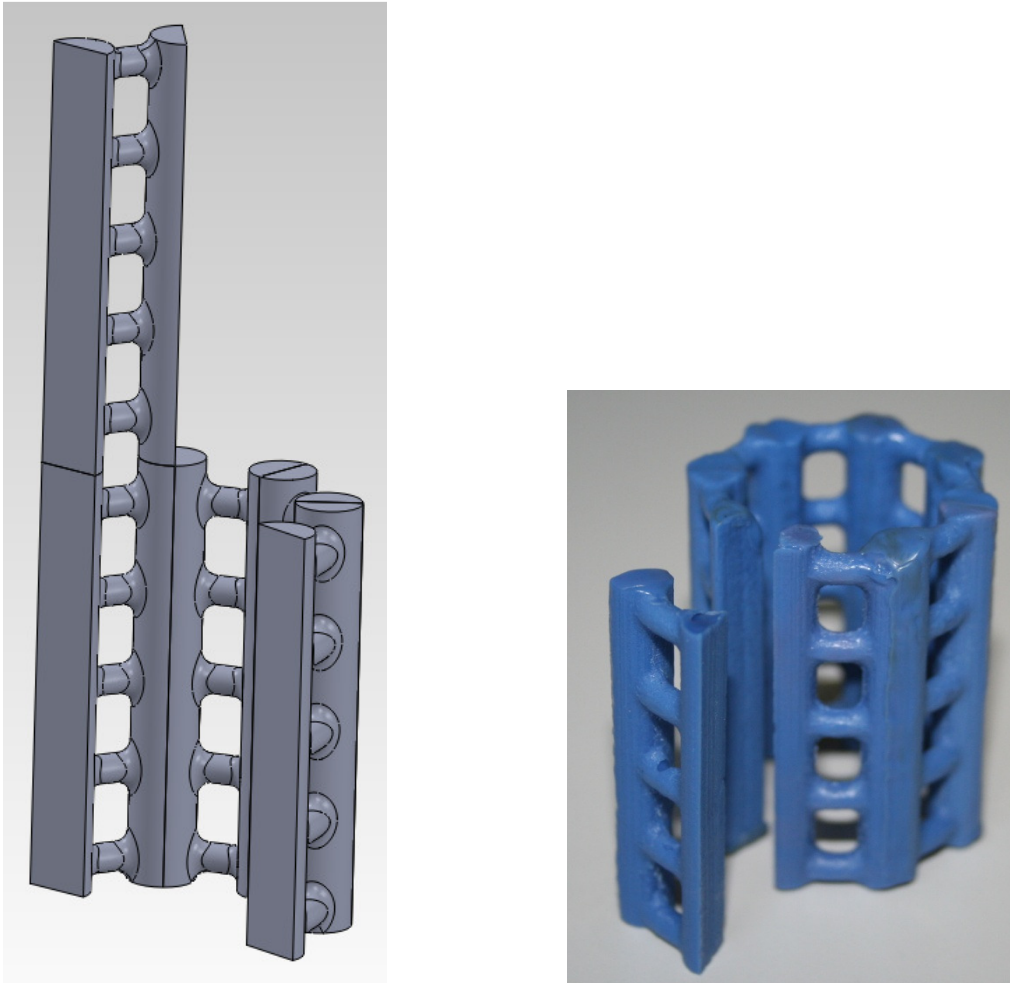
Από τα σχέδια του καλουπιού βλέπουμε ότι δεν θα προκύψει ολόκληρη η γεωμετρία που επιθυμούμε αλλά ένα πολύ μικρό κομμάτι αυτής. Με αυτόν τον τρόπο εξυπηρετούμε δύο πολύ βασικούς σκοπούς. Πρώτον, με ένα μικρότερο καλούπι, όπως αυτό, επιτυγχάνουμε συγκριτικά αρκετά μικρότερο κόστος. Ο δεύτερος λόγος είναι η απλότητα στη γεωμετρία του καλουπιού που επιτυγχάνουμε. Εάν κατασκευάζαμε ένα καλούπι από το οποίο θα προέκυπτε ολόκληρη η επιθυμητή γεωμετρία τότε θα έπρεπε

να γίνει αρκετά περίπλοκο, αποτελούμενο από αρκετά κομμάτια τα οποία θα ενώνονταν μεταξύ τους.

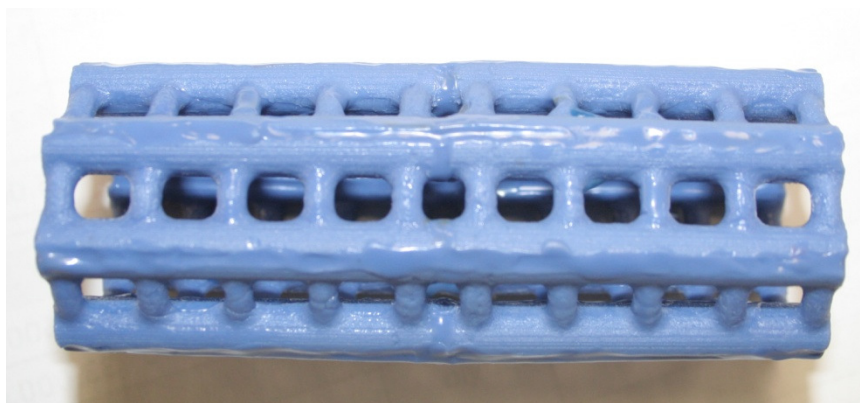


Εικόνα 59: κέρινο ομοίωμα κατασκευασμένο στο SolidWorks, κέρινο ομοίωμα

Τέλος, με χρήση ενός τέτοιου μόνιμου καλουπιού είναι δυνατόν να κατασκευάσουμε μία αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής από την οποία θα προκύπτουν δομικά πλέγματα όσο μεγάλου μήκους επιθυμούμε. Αυτό γίνεται εφικτό χάρη στον απλό τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα κομμάτια μεταξύ τους, όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες. Στην εικόνα 51 φαίνεται ο τρόπος ένωσης των μοντέλων ώστε να δημιουργηθεί ένας πλήρης κύλινδρος, ενώ στην εικόνα 52 μπορούμε να δούμε έναν κύλινδρο με το διπλάσιο ύψος.



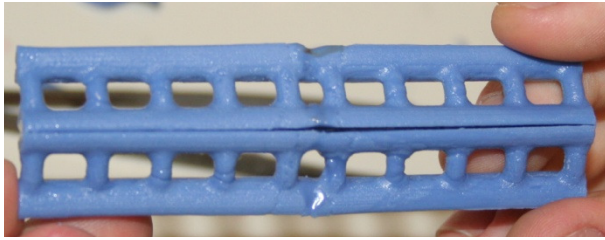
Εικόνα 60: Τρόπος ένωσης των μοντέλων, κυλινδρικό πλέγμα 45 χιλιοστών



Εικόνα 61: Διπλάσιο πλέγμα ύψους 90 χιλιοστών

Κατά την κατασκευή των κυλινδρικών πλεγματικών στοιχείων είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το μήκος του κυλίνδρου που θέλουμε να κατασκευάσουμε. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε πρώτα να ενώσουμε τα πλεγματικά

στοιχεία κατά μήκος του κυλίνδρου και στη συνέχεια μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθεί ο κύλινδρος.



**Εικόνα 62:** Πλεγματικά στοιχεία ενωμένα πρώτα κατακόρυφα

Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουμε ότι όλα τα κομμάτια θα ενωθούν σωστά μεταξύ τους, και το τελικό αποτέλεσμα θα έχει τις απαραίτητες διαστάσεις. Παράλληλα, με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να διαμορφώσουμε καλύτερα το εσωτερικό του κυλίνδρου. Σε περίπτωση που ενώσουμε δύο μικρότερα πλεγματικά στοιχεία έτσι, ώστε να φτιάξουμε έναν κύλινδρο διπλάσιου μήκους, θα συναντήσουμε αρκετές δυσκολίες στην διαμόρφωση των σημείων που ενώνονται εσωτερικά, με αποτέλεσμα να μην πάρουμε το επιθυμητό σχήμα. Το αποτέλεσμα που θα προκύψει από μία τέτοια προσπάθεια θα έχει, όχι μόνο μειωμένες μηχανικές ιδιότητες, αλλά και αρκετές ατέλειες κατά τη χύτευση, αφού η διάμετρος του καλουπιού θα είναι αισθητά μειωμένη στο σημείο στο σημείο στο οποίο παρατηρούνται ατελείς κολλήσεις του κεριού.

### 4.3. Κατασκευή γύψινου καλούπιού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το καλούπι θα κατασκευαστεί από γύψο, ο οποίος θα στερεοποιηθεί γύρω από το κέρινο ομοίωμα που έχουμε κατασκευάσει.

Ο γύψος αποτελεί ένα διαδομένο υλικό, γνωστό για τις πυρίμαχες και θερμομονωτικές του ιδιότητες. Για το συγκεκριμένο είδος που χρησιμοποιήθηκε της εταιρίας Ransom & Randolph, τύπου Argentum Jewelry Investment, δεν υπάρχουν δεδομένες συγκεκριμένες θερμικές ιδιότητες, αλλά από γύψο σε γύψο αυτές δεν πρέπει να αλλάζουν πολύ. Τα συστατικά του και οι ιδιότητες που παρέχονται από την εταιρεία φαίνονται παρακάτω.

Chemical Name (Ingredients)	CAS #	%	TLV mg/m <sup>3</sup>	OSHA PEL mg/m <sup>3</sup>
Silica (quartz)	14808-60-7	<50	0.05** 10.0**	0.10* 0.30**
Silica (cristobalite)	14464-46-1	<50	0.05* 5.0**	0.05* 0.15**
Calcium Sulfate	7778-18-9	<50	10.0**	5.0* 15.0**

\* Respirable Dust  
\*\*Total Dust

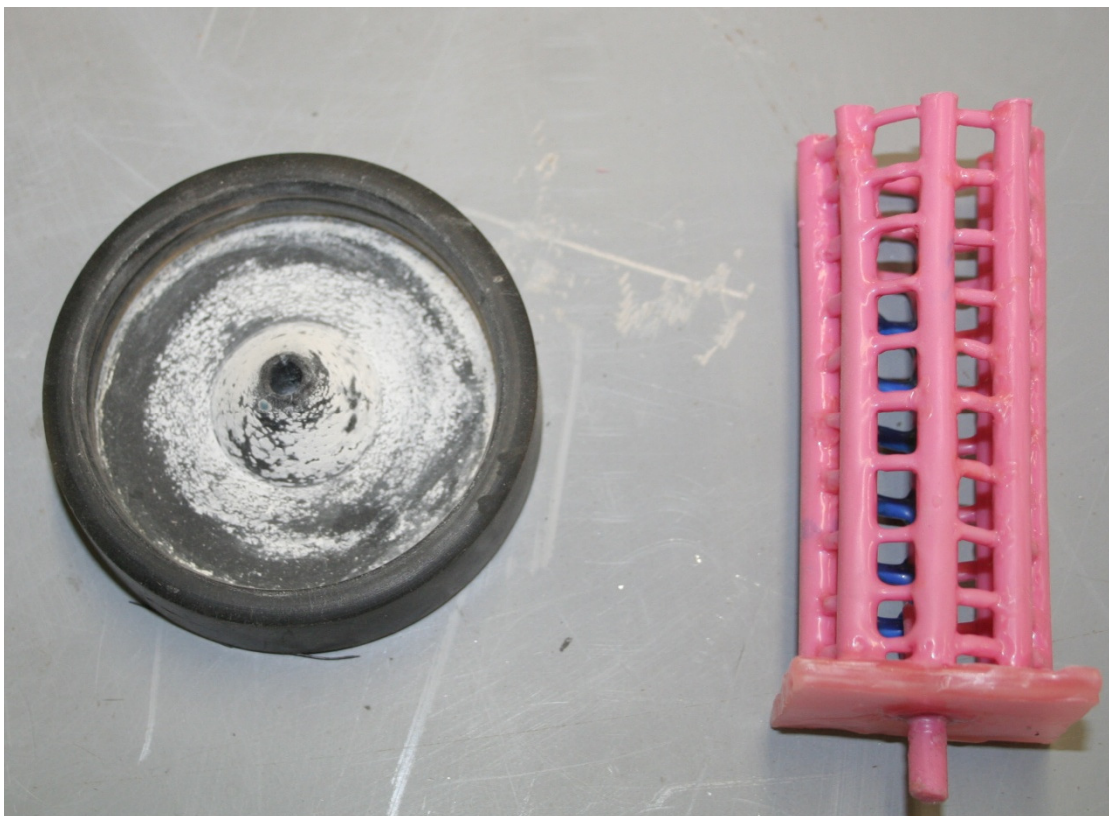
Boiling Point	N/A	Specific Gravity	2.5
Vapor Pressure	N/A	pH	6-8
Vapor Density	N/A	Evaporation Rate	N/A
Critical Temperature	N/A	Viscosity	N/A
Decomposition Temperature	N/A	% Volatile by Volume	None
Melting/Freezing Point	N/A	Magnetism	N/A
Solubility in Water	1.5% by wt.	Autoignition Temperature	N/A
Critical Pressure	N/A	Corrosion Rate	N/A
Permeable Exposure Limit	N/A	Molecular Weight	Mixture
Appearance and Odor	White powder, no odor		

Στη βιβλιοθήκη υλικών του ProCast υπάρχει και γύψος και δίδονται οι παρακάτω θερμικές ιδιότητες :

- Θερμική αγωγιμότητα: 0.2637 W/mK
- Πυκνότητα: 1100 kg/m<sup>3</sup>
- Ειδική θερμοχωρητικότητα: 0.83736 kJ/kgK

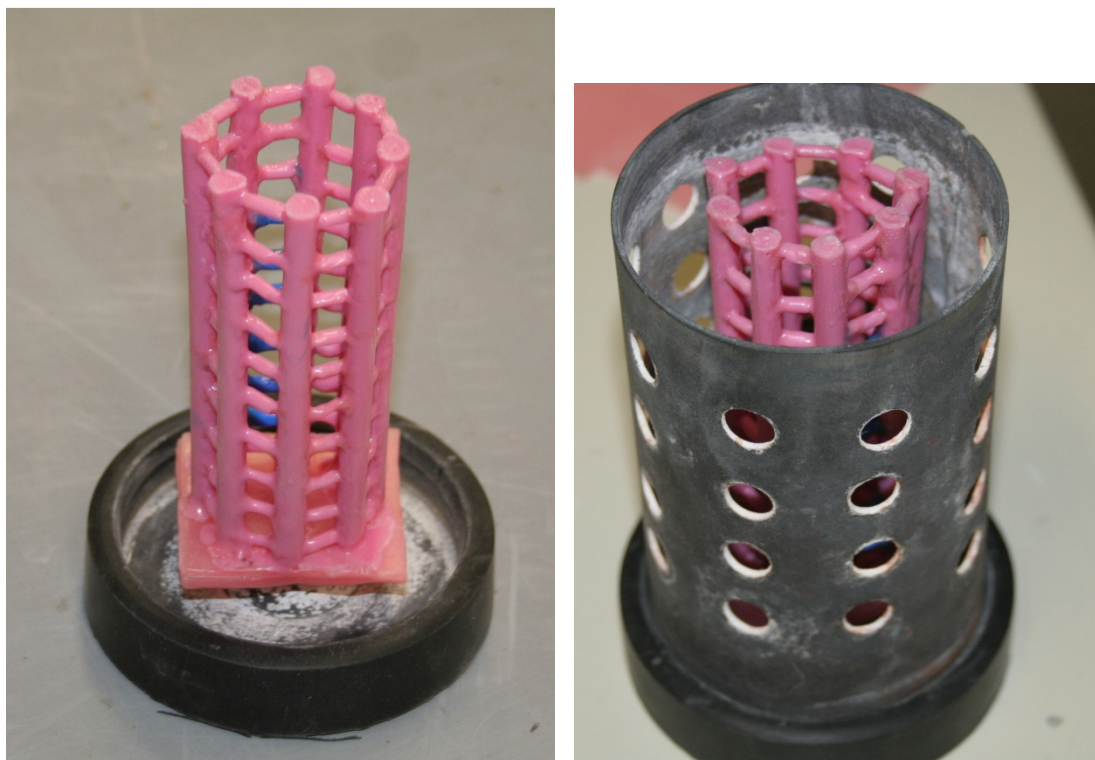
Μία ιδιότητα που χρησιμεύει στη μελέτη είναι και ο συντελεστής θερμικής διαστολής ο οποίος εντοπίστηκε για ονομασία υλικού “plaster” ίσως προς  $16,4 \cdot 10^{-6}$  m/mK. Ξε γίνεται να εξακριβωθεί κατά πόσον θερμική διαστολή συντελείται σε θερμοκρασίες τόσο υψηλές ή η διαστολή αποδίδεται σε μικρότερες θερμοκρασίες. Από σχετική εργασία εντοπίστηκε για κάποια είδη γύψου το παρακάτω διάγραμμα που ίσως συνηγορεί ότι ο γύψος παραμένει μη διαστελλόμενος κατά τη διαδικασία αυτής καθ’ αυτής της χύτευσης καθώς η θερμοκρασία του κινείται πάνω από τους  $600^{\circ}\text{C}$ . Συνολικά στο εύρος  $0 - 900^{\circ}\text{C}$  προφανώς και υπάρχει συστολή κατά περίπου 1,6%.

Για να κατασκευάσουμε το καλούπι από γύψο τοποθετούμε το κέρινο ομοίωμα μέσα σε ένα μεταλλικό κύλινδρο με μία βάση από λάστιχο. Είναι απαραίτητο να στερεώσουμε το μοντέλο πάνω στην λαστιχένια βάση, αφού αυτή η βάση θα σχηματίσει την κωνική μπουκαδούρα από την οποία θα εισέλθει το ρευστό μέταλλο. Έτσι, όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες που ακολουθούν, κολλάμε έναν μικρό κύλινδρο στο κέντρο της βάσης του μοντέλου και στη συνέχεια σφηνώνουμε αυτόν τον κύλινδρο στη λαστιχένια βάση.



Εικόνα 63: Μοντέλο και λαστιχένια βάση





Εικόνα 64: το μοντέλο α) στερεωμένο πάνω στη λαστιχένια βάση β) μέσα στη φλάσκα

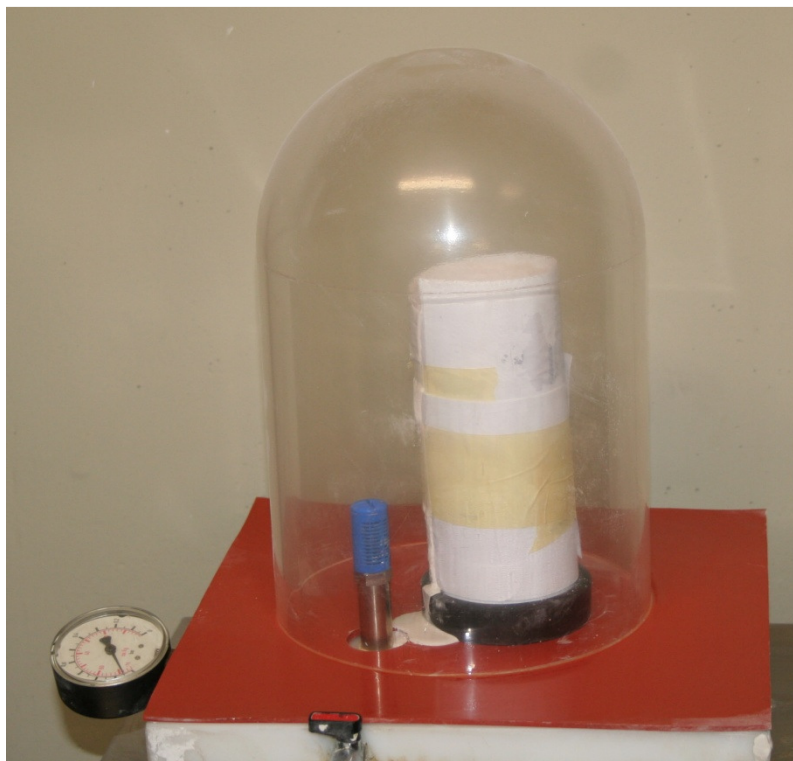
Οι τρύπες που υπάρχουν στη φλάσκα μέσα στην οποία θα ρίξουμε τον γύψο χρησιμεύουν ώστε κατά τη διάρκεια του ψησίματος του γύψου να είναι πιο εύκολη η αποβολή της υγρασίας από αυτόν. Παρ' όλα αυτά, οι τρύπες αυτές πρέπει να καλυφθούν προκειμένου να τοποθετήσουμε τον γύψο, σε αντίθετη περίπτωση όλος ο γύψος θα έπεφτε έξω από τον κύλινδρο. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούμε, συνήθως, ένα κυκλικό λάστιχο, το οποίο τοποθετείται γύρω από την φλάσκα εμποδίζοντας τον γύψο να διαφύγει (μπορούμε και αντί για το λάστιχο να την τυλίξουμε και με απλό χαρτί το οποίο θα κολλήσουμε με ταινία).



Εικόνα 65: Φλάσκα, λαστιχένια βάση, λαστιχένιο περιτύλιγμα, λαστιχένιο δοχείο ανάμιξης

Ο γύψος βρίσκεται σε μορφή σκόνης, και επομένως πρέπει να τον ανακατέψουμε με νερό και να τον αφήσουμε να στερεοποιηθεί μέσα στη φλάσκα. Η ανάμιξη αυτή γίνεται μέσα στο λαστιχένιο δοχείο που φαίνεται στην εικόνα. Το λαστιχένιο δοχείο χρησιμοποιείται έτσι, ώστε να είναι εύκολη η απομάκρυνση του γύψου που θα παραμείνει μέσα σε αυτό.

Καθώς ανακατεύεται ο γύψος με το νερό, φυσαλίδες αέρα εγκλωβίζονται στο μίγμα. Οι φυσαλίδες αυτές είναι επικίνδυνες τόσο για την δομική ακεραιότητα του γύψου, όταν αυτός στερεοποιηθεί, όσο και για την επιφάνεια του χυτού, αφού μπορεί να μεταφερθούν προς την κοιλότητα και να δημιουργήσουν ατέλειες. Για να αποφευχθεί ένα τέτοιο ενδεχόμενο τοποθετούμε δύο, τουλάχιστον, φορές τον γύψο πριν στερεοποιηθεί σε κενό, έτσι ώστε να απομακρυνθεί (τραβηχτεί) όλος ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί σε αυτόν. Η πρώτη φορά είναι όταν ο γύψος βρίσκεται ακόμα στο ελαστικό δοχείο ανάμιξης, ενώ η δεύτερη όταν έχει τοποθετηθεί στην φλάσκα.



Εικόνα 66: Μηχανή παραγωγής κενού



Εικόνα 67: Ατέλειες λόγω φυσαλίδων

Αφού αφαιρεθούν όλες οι φυσαλίδες από τον γύψο, τότε αφήνεται να στερεοποιηθεί και στη συνέχεια περνάμε στη φάση της αποκέρωσης και του ψησίματος.

#### 4.4. Αποκέρωση – Ψήσιμο

Τοποθετούμε τη φλάσκα-καλούπι στον αποκερωτή, ο οποίος είναι ένα είδος φούρνου με ειδικά διαμορφωμένη βάση για να ρεύσει το κερί. Το ρυθμίζουμε σε θερμοκρασία 200°C, και αφήνουμε τη φλάσκα τοποθετημένη αντίστροφα απ' ότι στη διαδικασία χύτευσης για 90 λεπτά. Το κερί κάποια στιγμή λιώνει και το μεγαλύτερο μέρος αυτού, αφού ρεύσει στο κάτω μέρος του θαλάμου θέρμανσης, εξατμίζεται.



Εικόνα 68: Αποκερωτής

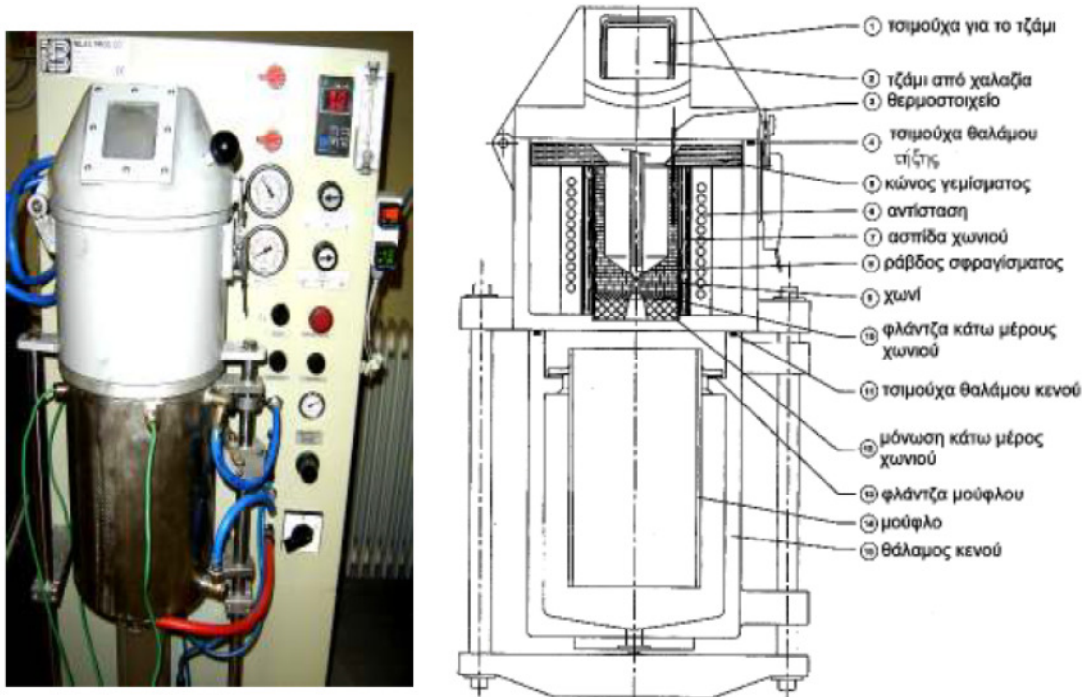
Μετά το πέρας της θέρμανσης στον αποκερωτή τοποθετούμε τη φλάσκα σε ειδικό φούρνο υψηλών θερμοκρασιών όπου ακολουθείται κύκλος ψησίματος του καλουπιού για 8 ώρες, με μέγιστη θερμοκρασία τους 730°C, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή (Ransom & Randolph). Ο κύκλος ψησίματος καταλήγει στη θερμοκρασία στην οποία είναι επιθυμητή η προθέρμανση του καλουπιού (μούφλου), η οποία παραμένει σταθερή για 1.5 ώρα.. Το ψήσιμο κατ' αυτό το χρονικό διάστημα ισχυροποιεί το γύψο, καθιστώντας τον όσο σκληρότερο γίνεται, καθώς θα εισχωρήσει σε αυτόν υλικό ακόμα υψηλότερης θερμοκρασίας. Σε καμία περίπτωση δε θερμαίνουμε το γύψο σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, διότι μπορεί αυτός εσωτερικά να καταρρεύσει.



Εικόνα 69: Φούρνος ψησίματος

## 4.5. Χύτευση

Αφού το καλούπι ολοκληρώσει τον κύκλο ψήσιματος τότε είναι έτοιμο ώστε να γίνει η χύτευση. Για το σκοπό αυτόν το πρέπει να τοποθετηθεί στην ειδική μηχανή χύτευσης η οποία λιώνει το μέταλλο και δημιουργεί τις συνθήκες κενού που έχουμε ορίσει ως απαραίτητες παραμέτρους για να γίνει η χύτευση. Η μηχανή τη χύτευσης καθώς και σκαρίφημα αυτής φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 70: Μηχανή χύτευσης

Πραγματοποιώντας το ψήσιμο του καλουπιού κάποια στιγμή, περίπου 45 λεπτά προτού πραγματοποιήσουμε το πείραμα, θέτουμε σε λειτουργία τη χυτόπρεσσα. Ρυθμίζουμε την τιμή στην οποία θα ανέλθει η θερμοκρασία του θαλάμου τήξης, όπου για αλουμίνιο ορίζουμε τη θερμοκρασία περίπου στους 700°C, και ρίχνουμε μέσα το μέταλλο που θα χυτεύσουμε, αφού πρώτα με βάση τον όγκο της μορφής, του κορμού και της διαμόρφωσης εισαγωγής που θέλουμε να παράγουμε, έχουμε υπολογίσει το βάρος του μετάλλου που αντιστοιχεί σε αυτόν.

Φέρνουμε σε επαφή το θάλαμο τήξης και χύτευσης οι οποίοι κλείνουν αεροστεγώς και δεν υπάρχει επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον.

Το μέταλλο λιώνει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα πράγμα που μπορούμε να διαπιστώσουμε μερικώς, οπτικά, από θυρίδα που υπάρχει στο θάλαμο τήξης. Λίγο πριν πατήσουμε το κομβίο που σηκώνει τον πείρο που κρατά παγιδευμένο το λιωμένο

μέταλλο ρίχνουμε στο θάλαμο βόρακα σε σκόνη ή ανοίγουμε την παροχή αερίου Αργού αν υπάρχει, στοιχεία που βοηθούν στον εξευγενισμό του μετάλλου(δηλαδή τη μετατροπή τυχόντων δημιουργηθέντων οξειδίων ξανά σε καθαρό μέταλλο). Επιπλέον, το αργό, ως ευγενές αέριο, βοηθάει στην απομάκρυνση του οξυγόνου από το μέταλλο εμποδίζοντας την διαδικασία της οξείδωσης.

Επίσης ρυθμίζουμε λοιπές παραμέτρους-απαιτήσεις που θέλουμε κατά τη διάρκεια της χύτευσης, δηλαδή την επιβολή κενού στον κάτω θάλαμο ή/και υπερπίεσης στον πάνω.

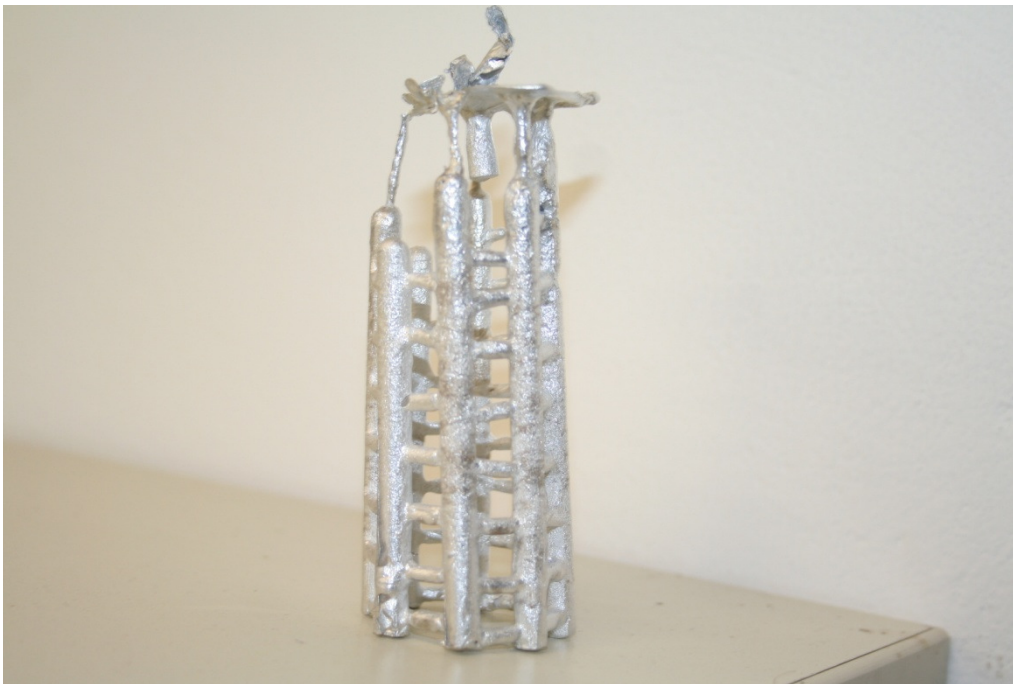
Πατάμε το κομβίο του πείρου και πραγματοποιείται η χύτευση αν δε συντρέχει κάποιος ανασταλτικός λόγος. Με την πάροδο ικανού χρονικού διαστήματος κλείνουμε πάλι τον πείρο και πλέον απομακρύνουμε τους δύο θαλάμους και μπορούμε να εξάγουμε το καλούπι με το χυτό εντός αυτού. Στη συνέχεια εμβαπτίζουμε τη φλάσκα με το γύψο και το χυτό, που βρίσκονται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία, σε νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπου ο γύψος υφίσταται θερμικό σοκ και παίρνουμε στα χέρια μας το χυτό.

#### **4.6. Καθαρισμός Χυτού**

Προφανώς το παραγόμενο χυτό χρειάζεται καθαρισμό από εναπομείναντα κομμάτια γύψου. Ο καθαρισμός σε πρώτη φάση γίνεται με περιστρεφόμενο βουρτσάκι. Αν η ποιότητα καθαρισμού δεν είναι καλή με αυτόν τον τρόπο στη συνέχεια αμμοβολίζουμε σε ειδική συσκευή το χυτό, απομακρύνοντας και τις πιο δύσκολες ακαθαρσίες. Παράλληλα με την αμμοβολή βελτιώνουμε την ποιότητα της επιφάνειας του μετάλλου απομακρύνοντας και τυχόν επιφανειακά οξειδία μετάλλου που έχουν δημιουργηθεί.

## 4.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Το πρώτο μεταλλικό δοκίμιο είναι αυτό που φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Σε αυτό το δοκίμιο παρατηρούνται μία περιοχή η οποία αποτελείται από ικανοποιητικής ποιότητα χυτό και αρκετές ατέλειες που προέκυψαν κατά τη χύτευση, και άλλες που μεταφέρθηκαν αυτούσιες ή δημιουργήθηκαν από το κέρινο ομοίωμα. Στο κομμάτι στο οποίο έχει γίνει επιτυχής χύτευση, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες ατέλειες, πέρα από αυτές που δημιουργήθηκαν από το κέρινο ομοίου. Έτσι, το πρώτο πράγμα που γίνεται εντόνως εμφανές είναι ότι, παρά τις αρκετές προσομοιώσεις που προηγήθηκαν, η κοιλότητα του καλουπιού δεν γέμιζε πλήρως. Στη μέση του χυτού, στο κομμάτι δηλαδή που έχουμε πλήρη πλήρωση, παρατηρείται αρκετά κακή ποιότητα επιφάνειας, με μεγάλες τιμές τραχύτητας.

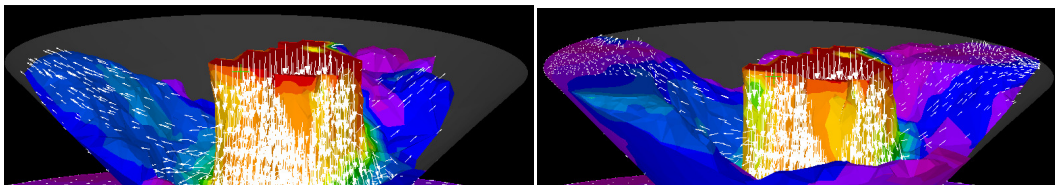


Εικόνα 71: Το πρώτο μεταλλικό δοκίμιο

Ο βασικός λόγος για τον οποίο πήραμε ένα τέτοιο αποτέλεσμα, αφορά στην φθορά την οποία έχει υποστεί η μηχανή. Λόγω αυτής της φθοράς δεν ήταν δυνατόν να δημιουργήσουμε συνθήκες κενού στο θάλαμο του καλουπιού και ταυτόχρονα να διατηρήσουμε την ατμοσφαιρική πίεση στον θάλαμο όπου γίνεται η τήξη του μετάλλου. Έτσι, δεν είχαμε την απαραίτητη διαφορά πίεσης με την οποία θα πετυχαίναμε τις απαραίτητες συνθήκες ώστε να έχουμε ικανοποιητική πλήρωση. Το μέταλλο που φαίνεται να λείπει από το χυτό έμεινε έξω από το καλούπι, αφού το

ρευστό στην μπουκαδούρα στερεοποιήθηκε προτού προλάβει να ολοκληρωθεί η πλήρωση.

Και επιπλέον, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της πλήρωσης στο ProCast η ροή του υλικού είναι συνεχής μέχρις ότου να γεμίσει πλήρως η κοιλότητα του καλούπιού, χωρίς να προσομοιώνεται τυχόν υπερχειλίση που μπορεί να υπάρχει. Αντίθετα, στην πράξη η ποσότητα του μετάλλου που μπορούμε να διαθέσουμε σε κάθε χύτευση είναι πεπερασμένη και περίπου ίση με την συνολική μάζα που απαιτείται για την συγκεκριμένη γεωμετρία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όταν ρευστό μέταλλο θα βρεθεί έξω από το καλούπι εξαιτίας υπερχειλίσης, η εναπομείνουσα ποσότητα μετάλλου να μην επαρκεί ώστε να πάρουμε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.



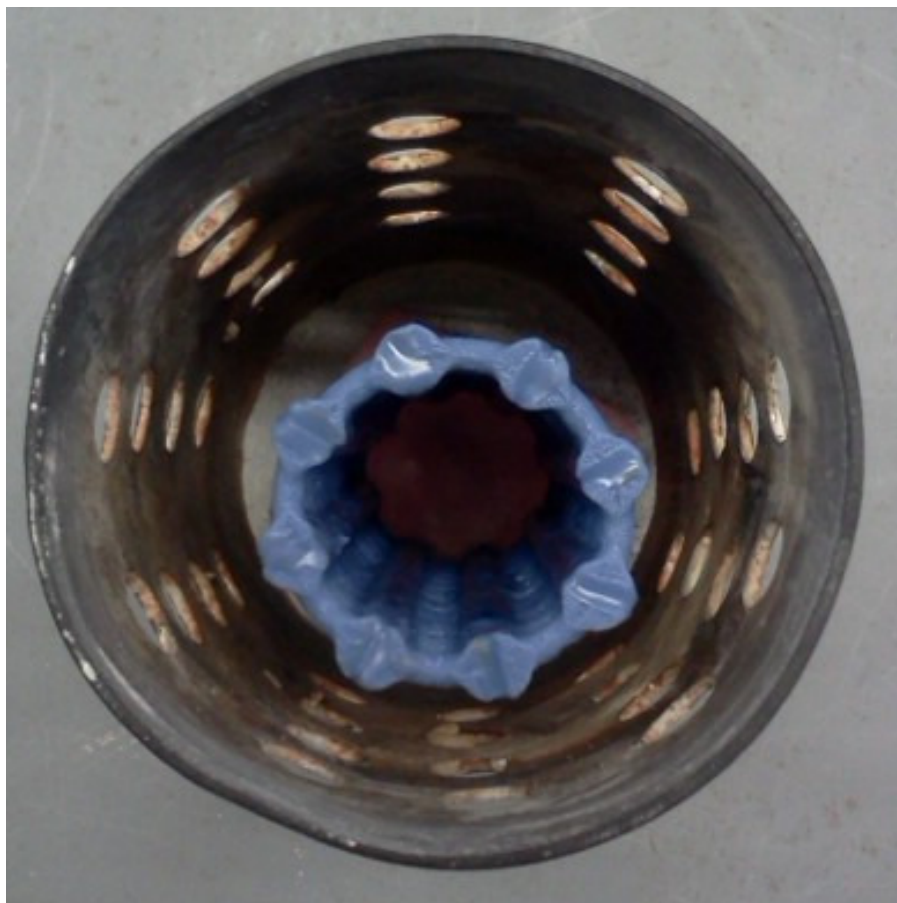
Εικόνα 72: Στιγμιότυπο πλήρωσης - άποψη από το σύστημα τροφοδοσίας

Στα δύο στιγμιότυπα που φαίνονται στην εικόνα 71 μπορούμε να δούμε τα διανύσματα των ταχυτήτων του ρευστού κατά τη φάση της πλήρωσης. Φαίνεται ότι το μέταλλο έχει ταχύτητα προς τα πάνω, αλλά λόγω της μη ύπαρξης πεπερασμένων στοιχείων πάνω από το καλούπι η προσομοίωση σε αυτό το σημείο δεν συνεχίζεται.

Θεωρητικά, μπορούμε να πούμε ότι εάν είχαμε μεγαλύτερη ποσότητα μετάλλου και επιπλέον, και επιπλέον ήμασταν προετοιμασμένοι για μία αρκετά μεγάλη ποσότητα μετάλλου η οποία θα βρισκόταν έξω από το καλούπι, τότε τα αποτελέσματα που θα παίρναμε θα συνέπιπταν με αυτά της προσομοίωσης.

Επιπλέον, είναι πρακτικά αδύνατον να πετύχουμε όλες τις άλλες παραμέτρους της χύτευσης ακριβώς όπως προσδιορίστηκαν κατά τη φάση της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, αν και κατά την προσομοίωση θεωρήσαμε ότι η γεωμετρία που μελετάμε είναι απόλυτα συμμετρική και ταυτόχρονα παράλληλη προς

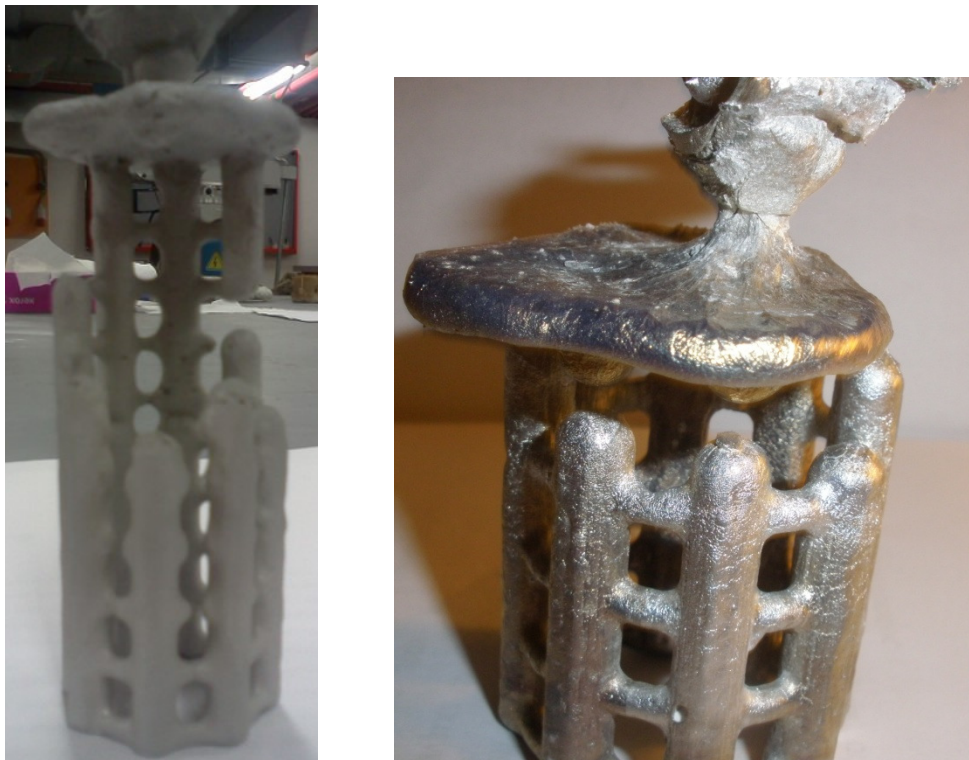




Εικόνα 73: Κέρινο ομοίωμα μέσα στη φλάσκα

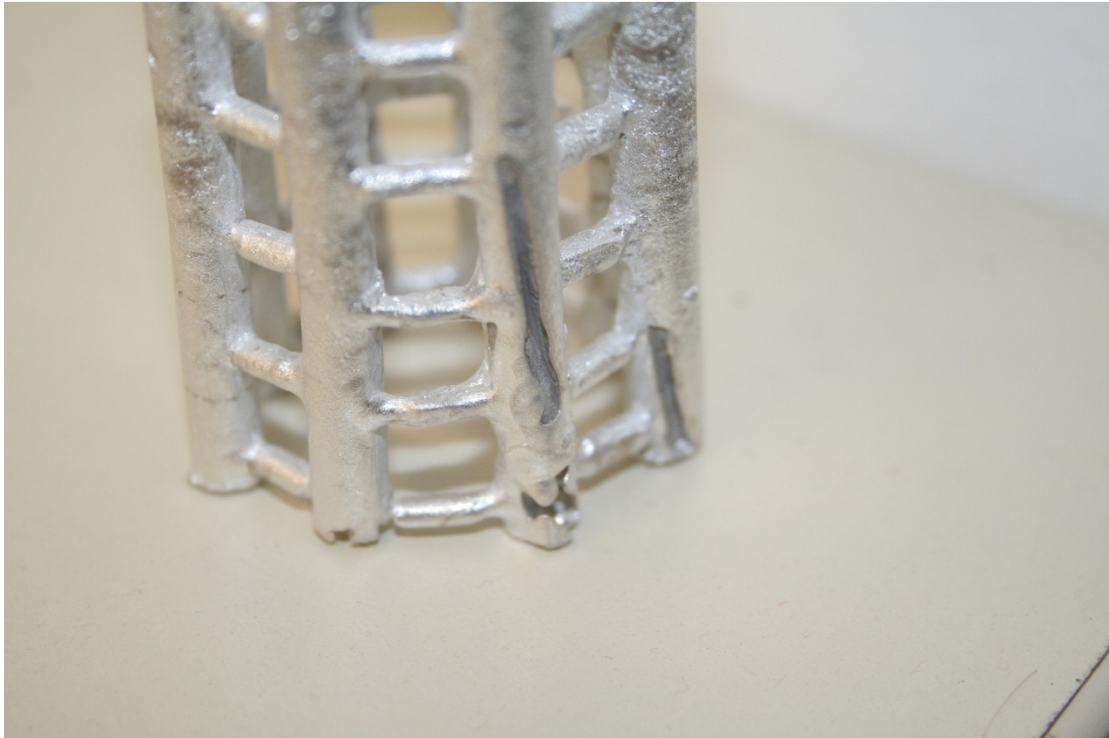
το διάλυμα της βαρύτητας, κατά την πράξη η τοποθέτηση της γεωμετρίας στην λαστιχένια βάση προκαλεί κλίση της γεωμετρίας. Λόγω αυτής της κλίσης, σε συνδυασμό με την μειωμένη παροχή ρευστού λόγω της μη ικανοποιητικής διαφοράς πίεσης των δύο θαλάμων παίρνουμε το αποτέλεσμα που φαίνεται και στις επόμενες φωτογραφίες.

Μετά τη χύτευση του πρώτου τεμαχίου, θεωρήσαμε ότι με ποιοτικότερη κατασκευή της γεωμετρίας και ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας του τήγματος θα μπορούσαμε να υπέρ-καλύψουμε τέτοιου είδους προβλήματα. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν το τεμάχιο που προέκυψε από το μόνιμο καλούπι κατασκευάσαμε μία γεωμετρία με λιγότερες ατέλειες, και με καλύτερες αποστάσεις μεταξύ των αγωγών τους οποίους θα γέμιζε το ρευστό μέταλλο. Παράλληλα, αυξήσαμε τη θερμοκρασία του μετάλλου σταδιακά πρώτα στους 730°C και στη συνέχεια στους 750°C.



Εικόνα 74: Τα τεμάχια από χύτευση

Παράλληλα, μπορούμε να δούμε και άλλες κοιλότητες που έχουν δημιουργηθεί στη βάση του χυτού. Αυτές οι κοιλότητες δεν οφείλονται σε ατελή πλήρωση, αλλά στην κατάρρευση του κέρινου ομοιώματος κατά τη δημιουργία του γύψινου καλουπιού.



Εικόνα 75: Ατέλειες που προέκυψαν από το κέρινο ομοίωμα

Συγκεκριμένα, κατά τη χύτευση του κεριού ώστε να πάρει κυλινδρικό σχήμα, θυμίζουμε ότι αυτό είναι το μοντέλο το οποίο κατασκευάστηκε από κυλίνδρους στο χέρι, πολλοί κέρινοι κύλινδροι εμφάνισαν εσωτερικές κοιλότητες και παγίδευσαν μέσα αέρα. Κατά την τοποθέτηση του γύψου στο κενό, ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας που ήταν παγιδευμένος σε αυτόν, απομακρύνθηκε επίσης και ο αέρας εντός των κοιλοτήτων του κεριού. Τη θέση αυτού του αέρα την πείρε ο γύψος με αποτέλεσμα να μην δημιουργήσει την κοιλότητα όπως εμείς την επιθυμούσαμε. Αυτό το πρόβλημα γίνεται αντιληπτό, λόγω της μεγάλης ποσότητας γύψου που υπήρχε μέσα στο μεταλλικό μοντέλο.

Άλλες ατέλειες, όπως πορώδες ή ρωγμές, επίσης δημιουργήθηκαν κατά τη χύτευση. Τέτοιου είδους ατέλειες γίνονται ιδιαίτερα εμφανές μετά από την αμμοβολή που έγινε στο δεύτερο δοκίμιο.



Εικόνα 76: Ατέλειες χυτού

Επιπλέον, επιφανειακές ατέλειες που στη βάση του χυτού είναι επίσης εμφανές στα αποτελέσματα της χύτευσης. Τέτοιου είδους ατέλειες είναι πιθανό να οφείλονται είτε σε ατέλειες που προήλθαν από το κέρινο ομοίωμα είτε σε μη σωστή πλήρωση κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Συνήθως τέτοια ελαττώματα δημιουργούνται μετά από έναν συνδυασμό των δύο προηγούμενων αιτιών.



Εικόνα 77: Επιφανειακές ατέλειες

Τέλος στο τεμάχιο το οποίο φαίνεται στην συνέχεια, το τρίτο κατά σειρά στο οποίο έγινε χύτευση, μπορούμε να δούμε ότι το αλουμίνιο έχει πάρει ένα κίτρινο-χρυσωπό χρώμα. Αυτό οφείλεται στην προσπάθεια που έγινε να ξεπεραστεί η μη ικανοποιητική διαφορά πίεσης ανεβάσαμε αρκετά την θερμοκρασία του μετάλλου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να υποστεί έντονη επιφανειακή οξείδωση το αλουμίνιο και να πάρει αυτό το χρώμα. Παρ' όλα αυτά, η ατέλεια αυτή είναι συνήθως επιφανειακή και μέσα από τις κατάλληλες επιφανειακές κατεργασίες όπως αυτή της λείανσης και της αμμοβολής μπορεί να απομακρυνθεί.



Εικόνα 78: τελικό αποτέλεσμα χύτευσης

## 5. Συμπεράσματα

Η ανάλυση που προηγήθηκε μας δείχνει με τον καλύτερο τρόπο την δυσκολία που υπάρχει στο σχεδιασμό, τη μελέτη και την κατασκευή νέων μηχανολογικών εφαρμογών. Το πλήθος των διαφορετικών μεταβλητών και παραγόντων που υπεισέρχονται κατά τη μελέτη αυτή καθιστά την πλήρη πρόβλεψη της συμπεριφοράς που ενδέχεται να υπάρξει σχεδόν αδύνατη.

Η παραμετρική ανάλυση που έγινε στο σχεδιασμό των δοκιμίων, που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, δείχνει ξεκάθαρα την αλληλεπίδραση των διαφόρων μεταβλητών καθώς και την αδυναμία που επιφέρουν για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό ενός προϊόντος, το οποίο θα ικανοποιεί πλήρως τις προδιαγραφές που έχουμε θέσει. Αυτή η δυσκολία οδηγεί όλους τους μελετητές στην θέσπιση λιγότερο αυστηρών κριτηρίων με βάση τα οποία θα αξιολογείτε το τελικό αποτέλεσμα.

Παράλληλα, η σύγκριση της θεωρίας, προσομοίωση χύτευσης, με την πράξη, κατασκευή μεταλλικών δοκιμίων, καθιστά εμφανές με τον πιο emphaticό τρόπο την αδυναμία υπολογισμού και της πιο μικρής λεπτομέρειας η οποία, τελικά, θα επηρεάσει σε πολύ μεγάλο βαθμό την προσομοίωση. Επομένως, επαληθεύεται για άλλη μια φορά η ρήση ότι είναι τόσα πολλά τα σημεία στα οποία μπορεί κάτι να πάει διαφορετικά. «στραβά», από ότι το έχουμε υπολογίσει ώστε, είναι σχεδόν αδύνατο να πούμε ότι, τελικά, τα έχουμε λάβει «όλα» υπ' όψιν μας.

Παράλληλα, τα τεμάχια τα οποία κατασκευάστηκαν, καθώς επίσης και οι ατέλειες που παρουσίασαν μια ο τρόπος με τον οποίο προέκυψαν, δείχνει την αδυναμία που υπάρχει στην πράξη να έχουμε όλες τις παραμέτρους ακριβώς όπως τις σχεδιάσαμε. Έτσι, οι διαστάσεις του τεμαχίου που κατασκευάστηκαν είναι, λίγο ως πολύ, διαφορετικές από τα μοντέλα που υπολογίστηκαν, η επίπεδη πλάκα έχει διαφορετικό πάχος, ενώ ταυτόχρονα τόσο η πλάκα ως προς το τεμάχιο όσο και η μπουκαδούρα ως προς την πλάκα δεν είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένα. Επιπλέον, αντίθετα από το μοντέλο που μελετήθηκε η κοιλότητα του καλουπιού δεν είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένη με το διάνυσμα της βαρύτητας. Ακόμα, η θερμοκρασία του καλουπιού δεν υπολογίζεται με ακρίβεια, αφού από τη στιγμή που βγαίνει από το φούρνο μέχρι την στιγμή που γίνεται η χύτευση η θερμοκρασία του μεταβάλλεται.

Παρ' όλα αυτά, θα ήταν λάθος να ισχυριστούμε ότι η προσομοίωση μιας κατεργασίας είναι, εν τέλει, χωρίς όφελος. Ακόμα και αν η πραγματικότητα δεν

ταιριάζει απόλυτα με αυτό το οποίο προκύπτει στην οθόνη ενός υπολογιστεί, η χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων θα συνεχίσει να αυξάνεται με αλματώδεις ρυθμούς αφού προσφέρει, όχι μόνο μία γενική εικόνα ως προς την εξέλιξη του φαινομένου, αλλά και μια ικανοποιητική πρόβλεψη ως προς τα πιο συνηθισμένα σφάλματα τα οποία παρουσιάζονται κατά τη χύτευση.

Όσον αφορά την παρούσα εργασία, μπορούμε να πούμε ότι η ποιότητα του τελικού δοκιμίου που κατασκευάζεται, εξαρτάτε σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του κέρινου ομοιώματος από το οποίο προέρχεται. Εάν αυτό το ομοίωμα δεν παρουσιάζει ελαττώματα, τόσο επιφανειακά, όσο και εσωτερικά, τότε μπορούμε να πούμε ότι και το μεταλλικό δοκίμιο το οποίο θα κατασκευαστεί θα έχει εξίσου καλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

## **5.1. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν την εργασία σε πρώτη ανάγνωση μπορούν να κριθούν ως άκρως ενδιαφέροντα. Μέσα από αυτά μπορούμε να δούμε τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, μελετώνται και κατασκευάζονται δομικά στοιχεία τύπου πλέγματος. Πριν όμως βιαστούμε να τα κρίνουμε ως επιτυχημένα ή αποτυχημένα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας ότι το παρών πόνημα δεν αποτελεί πλήρη έρευνα πάνω σε αυτά. Είναι απαραίτητο, πρώτα από όλα, να γίνει βελτιστοποίηση πάνω στο σχέδιο που μελετήθηκε.

Όπως είδαμε, το σχέδιο το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό, συχνά αντικρουόμενων μεταξύ τους, μεταβλητών και παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν τόσο το συνολικό βάρος της κατασκευής όσο και την μέγιστη μηχανική της αντοχή. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει ένα πλήθος διαθέσιμων μεθόδων για την βελτιστοποίηση τέτοιου είδους κατασκευών.

Εξελικτικοί Αλγόριθμοι και μέθοδοι ευφυΐας σμήνους είναι μεταξύ των πιο διάσημων όταν αντιμετωπίζονται πολύπλοκα προβλήματα που εμπεριέχουν πολλαπλές σχεδιαστικές παραμέτρους. Εφαρμόζονται, επίσης, πιο παραδοσιακές τεχνικές όπως η Gauss-Newton ή κατάβαση κλίσης. Για απλές κατασκευές οι οποίες περιέχουν λίγες αλληλεπιδρώσες παραμέτρους οι στόχοι της βελτιστοποίησης μπορούν να υπολογιστούν απευθείας μέσα από τις προσομοιώσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, για όλες τις επαναλήψεις που απαιτούνται μέσα από την μέθοδο που ακολουθείται. Σε περιπτώσεις όπου μία μόνο προσομοίωση

πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα για να ολοκληρωθούν, υπάρχει η ανάγκη για μείωση των αριθμών των επαναλήψεων που απαιτούνται ώστε να φτάσουμε στο βέλτιστο αποτέλεσμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις ένας μικρός αριθμός επαναλήψεων χρησιμοποιείται ώστε να προσδιορισθεί ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο συνήθως μέσα από επιφανειακές αποκρίσεις, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα ή Kriging, τα οποία επιτρέπουν γρήγορη εκτίμηση των στόχων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Όταν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της σχεδίασης έχουν προσδιορισθεί, κανονικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται ώστε να προβλεφθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά της μηχανολογικής κατασκευής.

Επιπλέον, η γεωμετρία που μελετήθηκε αφορά μονάχα στην αντικατάσταση κυλινδρικών φορέων. Περαιτέρω μελέτη απαιτείται, τόσο στη γενική περίπτωση φορέων, όπως για παράδειγμα επίπεδοι φορείς, όσο και στην κατασκευή συγκεκριμένων μηχανολογικών εξαρτημάτων, όπως για παράδειγμα ποδήλατα ή ρομποτικοί βραχίονες, όπου οι απαιτήσεις σε βάρος, σχήμα, όγκο, αντοχή λαμβάνουν συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Παράλληλα, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή πειραμάτων έτσι, ώστε να προσδιορισθεί με ακρίβεια ο, άμεσα εξαρτώμενος από τη γεωμετρία και το υλικό, συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (HTC) κατά τη χύτευση. Ο ακριβής προσδιορισμός του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, της πιο σημαντικής, ίσως, παραμέτρου κατά τη χύτευση θα επιτρέψει τον ακριβή υπολογισμό των ατελειών που δημιουργούνται κατά τη χύτευση ακόμα και σε μεγαλύτερη κλίμακα, σε κομμάτια, δηλαδή, με πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις, διευκολύνοντας έτσι και την μαζική παραγωγή τέτοιων γεωμετριών.



## Παράρτημα Α

μέση διάμετρος (mm)	πάχος (mm)	όγκος (mm <sup>2</sup> )	ροπή αδρανείας (gr*mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση κάμψη (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	μετατόπιση θλίψη (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	μετατόπιση θλίψη (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)
				F=30Nt		F=1500Nt		Fx=30Nt Fy=1500Nt	
10	1	3,141.59	Py= 2657.66	0.5165	53.824	0.07217	60.481	0.6921	94.674
	3	9,424.78	Py= 7982.39	0.1654	24.782	0.02531	27.296	0.222	34.558
	5	15,707.96	Py= 13335.41	0.08857	13.352	0.01567	18.550	0.2219	23.264
20	1	6283.19	Py= 5550.93	0.06935	13.777	0.03792	39.697	0.1027	36.863
	3	18,849.56	Py= 16671.65	0.0235	6.179	0.01429	20.112	0.03554	13.154
	5	31,415.93	Py= 27848.91	0.01383	6.207	0.009255	14.368	0.02146	9.409
30	1	9,424.78	Py= 8915.45	0.02194	6.974	0.02436	28.646	0.04048	22.220
	3	28,274.33	Py= 26774.62	0.007545	3.713	0.008706	16.414	0.01437	7.968
	5	47,123.89	Py= 44718.61	0.004563	2.863	0.005459	12.352	0.009008	5.417

μέση διάμετρος έλικας mm	διάμετρος κατακόρυφων φορέων (mm)	διάμετρος ελικοειδών φορέων (mm)	όγκος (mm <sup>2</sup> )	ροπή αδρανείας (gr*mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση κάμψη (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	μετατόπιση Θλίψη (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)	μετατόπιση συνδυασμένο φορτίο (mm)	Μέγιστη τάση (MPa)
					F <sub>χ</sub> =30Nt		F <sub>γ</sub> =1500Nt		F <sub>χ</sub> =30Nt F <sub>γ</sub> =1500Nt	
10.00	2	1.5	2104.08	Py= 1755.57	1.5580	240.932	1.2720	274.107	2.6200	482.143
10.00	2	2.5	3254.48	Py= 2714.97	1.1470	187.727	0.9863	207.610	1.9710	371.856
10.00	2	3.5	5840.36	Py= 4219.84	0.7272	125.137	0.5502	174.812	1.1840	295.532
10.00	4	1.5	5803.40	Py= 4882.30	0.3863	47.184	0.0577	59.741	0.4251	100.030
10.00	4	2.5	6577.37	Py= 5516.33	0.3518	49.380	0.0675	63.654	0.4003	92.374
10.00	4	3.5	7795.94	Py= 6523.29	0.3069	51.701	0.0645	63.941	0.3554	110.149
20.00	2	1.5	1792.41	Py= 1583.33	2.4730	433.424	0.2793	223.819	2.6450	442.033
20.00	2	2.5	2575.36	Py= 2278.22	1.0000	175.110	0.3303	288.645	1.2440	393.588
20.00	2	3.5	3753.81	Py= 3327.08	0.6044	109.074	0.3108	197.761	0.8481	297.842
20.00	4	1.5	5546.09	Py= 4896.97	0.4194	113.734	0.0547	46.419	0.4468	124.591
20.00	4	2.5	6227.50	Py= 5493.38	0.2632	76.715	0.0683	57.136	0.3090	91.420
20.00	4	3.5	7876.42	Py= 6390.66	0.1814	44.508	0.0817	59.035	0.2438	90.213
20.00	6	1.5	11799.98	Py= 10435.75	0.1261	44.365	0.0222	21.546	0.1354	49.658
20.00	6	2.5	12391.39	Py= 10948.22	0.0955	37.946	0.0249	21.854	0.1101	48.873
20.00	6	3.5	13251.28	Py= 11702.29	0.0744	28.099	0.0292	22.399	0.0952	39.483
30.00	2	1.5	1948.28	Py= 1827.72	2.9040	352.607	0.2177	178.244	3.0070	396.065
30.00	2	2.5	3118.54	Py= 2955.85	0.9186	128.485	0.202	196.922	1.0230	294.841
30.00	2	3.5	4871.72	Py= 4626.10	0.4470	82.839	0.1839	216.450	0.5545	289.087
30.00	4	1.5	5700.35	Py= 5393.60	0.4402	76.755	0.0488	48.908	0.5700	100.652
30.00	4	2.5	6749.23	Py= 6385.30	0.2681	64.303	0.0536	73.104	0.2953	104.798
30.00	4	3.5	8281.99	Py= 7823.17	0.1630	42.286	0.0580	91.357	0.1992	110.195
30.00	6	1.5	9328.84	Py= 11269.22	0.1223	32.526	0.0214	20.413	0.1285	40.573
30.00	6	2.5	12855.59	Py= 12148.08	0.0939	27.896	0.0225	23.340	0.1037	35.484
30.00	6	3.5	14267.00	Py= 13480.71	0.0394	25.317	0.0240	27.567	0.0827	36.088

μέση διάμετρος (mm)	διάμετρος κατακόρυφων φορέων (mm)	διάμετρος ελικοειδών φορέων mm	όγκος (mm <sup>2</sup> )	ροπή αδρανείας (gr*mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση κάμψη (mm)	Μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση θλίψη (mm)	Μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση συνδυασμένο φορτίο (mm)	Μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )
					F <sub>x</sub> =30Nt		F <sub>y</sub> =1500Nt		F <sub>x</sub> =30Nt F <sub>y</sub> =1500Nt	
10.00	2.00	0.50	2114.77	Py= 1787.12	1.19	148.50	0.40	147.84	1.51	275.60
10.00	2.00	1.50	2840.92	Py= 2400.00	0.98	151.99	0.51	188.75	1.39	315.40
10.00	2.00	2.50	4385.15	Py= 3700.06	0.72	144.06	0.38	189.85	1.02	329.89
10.00	3.00	0.50	4475.67	Py= 3784.61	0.51	60.85	0.06	74.44	0.53	110.22
10.00	3.00	1.50	5053.46	Py= 4269.19	0.45	56.18	0.06	70.06	0.49	124.87
10.00	3.00	2.50	6125.91	Py= 5170.19	0.39	63.18	0.06	78.91	0.43	129.81
20.00	2.00	0.50	2617.32	Py= 2313.29	3.03	573.77	0.10	110.60	3.06	565.28
20.00	2.00	1.50	3293.53	Py= 2914.77	0.59	190.95	0.16	134.27	0.71	207.47
20.00	2.00	2.50	4710.29	Py= 4146.64	0.29	125.06	0.18	168.60	0.44	242.04
20.00	4.00	0.50	7692.63	Py= 6802.25	0.43	162.81	0.03	44.85	0.44	168.38
20.00	4.00	1.50	8276.81	Py= 7321.28	0.18	108.16	0.04	34.30	0.20	118.36
20.00	4.00	2.50	9378.78	Py= 8308.07	0.10	37.02	0.05	49.93	0.14	57.60
20.00	6.00	1.50	17555.28	Py= 15547.02	0.05	43.25	0.02	13.72	0.06	48.59
20.00	6.00	2.50	18254.52	Py= 16178.30	0.04	19.10	0.02	15.21	0.05	22.23
20.00	6.00	3.50	19546.64	Py= 17349.45	0.04	8.34	0.02	17.01	0.05	20.59
30.00	2.00	1.50	3153.78	Py= 2990.92	0.84	201.24	0.15	258.72	1.75	423.55
30.00	2.00	2.50	5375.48	Py= 5106.37	0.27	133.69	0.13	380.09	0.34	435.56
30.00	2.00	3.50	8804.15	Py= 8371.66	0.16	80.94	0.11	153.67	0.23	181.54
30.00	4.00	1.50	8665.45	Py= 8209.87	0.22	87.10	0.03	35.06	0.23	93.69
30.00	4.00	2.50	10515.09	Py= 9944.01	0.09	35.51	0.04	55.87	0.11	61.85
30.00	4.00	3.50	13417.90	Py= 12777.69	0.05	16.59	0.04	37.80	0.08	50.12
30.00	6.00	1.50	17929.76	Py= 16999.49	0.07	55.81	0.01	15.46	0.07	60.68
30.00	6.00	2.50	19494.04	Py= 18497.26	0.04	21.92	0.02	28.30	0.05	36.84
<b>30.00</b>	6.00	3.50	21865.38	Py= 20790.66	0.03	11.35	0.02	27.09	0.04	27.19

μέση διάμετρος (mm)	διάμετρος κατακόρυφων φορέων (mm)	διάμετρος οριζόντιων φορέων mm	όγκος (mm <sup>2</sup> )	Ροπή αδρανείας (gr*mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση κάμψη (mm)	Μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση θλίψη (mm)	Μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση συνδυασμένο φορτίο (mm)	Μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )
					F <sub>χ</sub> =30Nt		F <sub>γ</sub> =1500Nt		F <sub>χ</sub> =30Nt F <sub>γ</sub> =1500Nt	
10.00	2.00	1.00	2718.79	Py= 2313.79	0.92	107.82	0.09	115.94	0.94	223.69
10.00	2.00	2.00	3220.55	Py= 2773.62	0.81	101.68	0.08	96.34	0.84	184.37
10.00	2.00	3.00	4287.79	Py= 3745.76	0.71	100.67	0.08	92.22	0.74	192.73
10.00	3.00	1.00	5801.60	Py= 4920.79	0.39	48.35	0.04	42.43	0.40	76.95
10.00	3.00	2.00	6068.32	Py= 5166.11	0.37	47.55	0.04	53.67	0.38	98.01
10.00	3.00	3.00	6642.52	Py= 5691.02	0.35	47.16	0.04	47.08	0.36	92.94
20.00	2.00	1.00	2989.26	Py= 2673.71	0.63	215.18	0.09	96.45	0.65	220.91
20.00	2.00	2.00	4305.30	Py= 3929.24	0.28	62.70	0.08	139.93	0.30	202.60
20.00	2.00	3.00	6732.85	Py= 6245.41	0.21	53.80	0.07	94.58	0.24	147.84
20.00	4.00	1.00	10418.70	Py= 9238.61	0.13	99.76	0.02	25.65	0.14	100.95
20.00	4.00	2.00	11293.06	Py= 10072.22	0.07	18.47	0.02	39.63	0.08	52.13
20.00	4.00	3.00	12801.38	Py= 11512.70	0.06	15.59	0.02	29.77	0.07	39.86
20.00	6.00	1.00	22865.74	Py= 20265.80	0.03	29.22	0.01	12.63	0.04	29.81
20.00	6.00	2.00	23326.70	Py= 20705.13	0.03	8.22	0.01	16.99	0.03	24.25
20.00	6.00	3.00	24099.19	Py= 21442.69	0.03	6.99	0.01	14.48	0.03	18.64
30.00	2.00	1.00	3259.46	Py= 3134.84	0.92	269.01	0.09	88.87	0.92	267.67
30.00	2.00	2.00	5390.21	Py= 5300.17	0.20	52.10	0.08	138.54	0.23	181.73
30.00	2.00	3.00	9175.99	Py= 9149.08	0.12	37.43	0.07	92.14	0.15	122.38
30.00	4.00	1.00	10687.43	Py= 10163.10	0.22	113.56	0.03	25.01	0.22	111.84
30.00	4.00	2.00	12377.05	Py= 11879.04	0.06	28.08	0.02	41.81	0.07	49.95
30.00	4.00	3.00	15244.06	Py= 14795.14	0.04	11.33	0.02	29.06	0.04	39.19
30.00	6.00	1.00	23134.60	Py= 21967.80	0.06	51.10	0.01	12.28	0.06	51.27
30.00	6.00	2.00	24410.74	Py= 23263.85	0.02	16.96	0.01	19.67	0.03	27.72
30.00	6.00	3.00	26542.56	Py= 25431.73	0.02	6.97	0.01	15.66	0.02	18.46

μέση διάμετρος (mm)	διάμετρος κατακόρυφων φορέων (mm)	πάχος (mm)	διάμετρος οριζόντιων φορέων (mm)	όγκος (mm <sup>3</sup> )	ροπή αδρανείας (gr*mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση κάμψη (mm)	Μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση θλίψη (mm)	Μέγιστη τάση (N/mm <sup>2</sup> )	μετατόπιση συνδυασμένο φορτίο (mm)	Μέγιστη (N/mm <sup>2</sup> )	τάση
							F=30Nt	F=1500Nt		Fx=1500Nt Fy=30Nt		
20.00	2	0.20	1	1409.4	P <sub>y</sub> =	1282.71	0.9783	177.019	0.2244	257.757	1.0340	339.116
20.00	2	0.40	1	2113.11	P <sub>y</sub> =	1904.51	0.6849	174.359	0.1304	129.205	0.7115	202.397
20.00	2	0.60	1	2615.77	P <sub>y</sub> =	2348.59	0.5945	174.511	0.10100	107.246	0.61160	182.516
20.00	2	0.20	2	2631.13	P <sub>y</sub> =	2458.05	0.6086	107.798	0.20460	239.793	0.68060	327.779
20.00	2	0.40	2	3334.85	P <sub>y</sub> =	3079.86	0.3795	68.938	0.12060	129.580	0.41880	196.337
20.00	2	0.60	2	3837.5	P <sub>y</sub> =	3523.94	0.3068	55.986	0.09441	111.416	0.33680	155.178
20.00	2	0.20	3	4867.12	P <sub>y</sub> =	4606.12	0.4704	104.693	0.17360	232.782	0.53560	317.625
20.00	2	0.40	3	5569.57	P <sub>y</sub> =	5224.97	0.2953	61.165	0.10580	126.052	0.33340	178.707
20.00	2	0.60	3	6072.22	P <sub>y</sub> =	5669.09	0.2388	49.701	0.08402	95.806	0.26840	136.099
20.00	4	0.20	1	2354.86	P <sub>y</sub> =	2117.85	0.3709	80.875	0.11010	124.041	0.40350	173.099
20.00	4	0.40	1	4063.89	P <sub>y</sub> =	3629.98	0.2106	78.778	0.05969	58.257	0.22760	83.410
20.00	4	0.60	1	5571.85	P <sub>y</sub> =	4963.72	0.1622	73.594	0.04300	40.635	0.17400	77.316
20.00	4	0.20	2	3194.09	P <sub>y</sub> =	2922.86	0.2889	53.852	0.10200	122.873	0.31330	172.512
20.00	4	0.40	2	4903.28	P <sub>y</sub> =	4435.28	0.1562	25.783	0.05745	59.955	0.17650	80.478
20.00	4	0.60	2	6411.24	P <sub>y</sub> =	5769.03	0.1151	19.826	0.04167	41.932	0.12990	57.024
20.00	4	0.20	3	4593.59	P <sub>y</sub> =	4267.35	0.2496	54.475	0.09756	121.447	0.28620	171.988
20.00	4	0.40	3	6302.62	P <sub>y</sub> =	5779.49	0.1381	27.866	0.05431	61.930	0.15920	89.134
20.00	4	0.60	3	7810.58	P <sub>y</sub> =	7113.25	0.1017	21.670	0.03964	48.861	0.11690	70.445
20.00	6	0.20	1	3274.96	P <sub>y</sub> =	2932.52	0.1752	33.437	0.06849	74.754	0.20150	102.078
20.00	6	0.40	1	5989.29	P <sub>y</sub> =	5340.09	0.0964	19.241	0.03776	39.180	0.11090	50.704
20.00	6	0.60	1	8502.57	P <sub>y</sub> =	7568.02	0.0716	20.904	0.02747	26.430	0.08178	35.669
20.00	6	0.20	2	3747.85	P <sub>y</sub> =	3386.54	0.1698	33.273	0.06969	82.840	0.19750	103.463
20.00	6	0.40	2	6462.18	P <sub>y</sub> =	5794.12	0.0887	16.385	0.03682	40.522	0.10260	53.969
20.00	6	0.60	2	8975.46	P <sub>y</sub> =	8022.05	0.0658	12.187	0.02694	28.411	0.07637	37.438
20.00	6	0.20	3	4492.22	P <sub>y</sub> =	4100.09	0.1572	32.845	0.06629	85.899	0.18380	111.137
20.00	6	0.40	3	7206.56	P <sub>y</sub> =	6507.64	0.0843	19.570	0.03566	49.312	0.09822	68.883
20.00	6	0.60	3	9719.83	P <sub>y</sub> =	8735.57	0.0617	11.532	0.02603	30.124	0.07205	41.690

30.00	2	0.20	1	1656.23	Py=	1622.18	1.1200	237.342	0.2247	234.589	1.1550	329.804
30.00	2	0.40	1	2359.95	Py=	2287.97	0.9159	230.798	0.1301	127.500	0.9295	237.570
30.00	2	0.60	1	2862.6	Py=	2763.47	0.8521	233.696	0.10060	97.502	0.85890	235.183
30.00	2	0.20	2	3616.97	Py=	3631.05	0.3900	84.183	0.20350	237.829	0.46490	309.755
30.00	2	0.40	2	4320.68	Py=	4296.86	0.2615	52.919	0.12020	129.767	0.30000	175.530
30.00	2	0.60	2	4823.34	Py=	4772.38	0.2211	45.847	0.09398	100.140	0.24930	143.594
30.00	2	0.20	3	7087.46	Py=	7181.41	0.2573	71.408	0.17310	231.903	0.33500	291.490
30.00	2	0.40	3	7791.17	Py=	7847.24	0.1678	46.279	0.10530	137.271	0.21180	169.140
30.00	2	0.60	3	8293.83	Py=	8322.77	0.1387	40.012	0.08357	128.445	0.17250	142.512
30.00	4	0.20	1	2595.56	Py=	2511.75	0.4259	151.269	0.10990	117.780	0.44590	169.275
30.00	4	0.40	1	4304.59	Py=	4130.69	0.2876	130.001	0.05941	56.973	0.29640	130.904
30.00	4	0.60	1	5812.55	Py=	5558.68	0.2443	120.826	0.04269	40.693	0.24990	120.296
30.00	4	0.20	2	4175.55	Py=	4126.57	0.1908	42.981	0.10470	118.086	0.22990	157.439
30.00	4	0.40	2	5884.58	Py=	5745.55	0.1088	24.538	0.05713	64.839	0.12900	78.960
30.00	4	0.60	2	7392.55	Py=	7173.56	0.0848	23.309	0.04136	46.143	0.09880	57.967
30.00	4	0.20	3	6812.07	Py=	6823.99	0.1360	37.741	0.09536	128.121	0.17920	156.945
30.00	4	0.40	3	8521.1	Py=	8442.99	0.0791	19.892	0.05421	64.837	0.10330	82.145
30.00	4	0.60	3	10029.06	Py=	9871.03	0.0590	14.166	0.03953	48.597	0.07636	57.123
30.00	6	0.20	1	3521.81	Py=	3389.07	0.1832	74.492	0.07217	78.102	0.20320	105.721
30.00	6	0.40	1	6236.15	Py=	5966.29	0.1080	67.633	0.03768	38.039	0.11720	69.000
30.00	6	0.60	1	8749.42	Py=	8351.30	0.0869	63.829	0.02712	25.716	0.09300	64.920
30.00	6	0.20	2	4736.81	Py=	4631.96	0.1194	31.693	0.07075	85.043	0.14750	107.514
30.00	6	0.40	2	7451.15	Py=	7209.21	0.0608	16.797	0.03678	40.120	0.07533	50.583
30.00	6	0.60	2	9964.42	Py=	9594.23	0.0457	16.382	0.02664	28.380	0.05619	35.250
30.00	6	0.20	3	6716.62	Py=	6656.43	0.0892	24.188	0.06485	83.821	0.11840	103.038
30.00	6	0.40	3	9430.95	Py=	9233.70	0.0487	12.283	0.03574	47.109	0.06554	59.250
30.00	6	0.60	3	11944.23	Py=	11618.74	0.0358	8.858	0.02585	30.947	0.04771	37.764

## Βιβλιογραφία

1. Χρυσάκης, Α., *Στατική: Μηχανική του απαραμόρφωτου στερεού*, Αθήνα 1999
2. Κατερέλος, Δ., *Μηχανική συμπεριφορά σε στατική και δυναμική καταπόνηση σύνθετων υλικών με παρουσία συγκέντρωσης τάσης*, Πάτρα 2004
3. Jiju, A., *Design of Experiments for engineers and scientists*, Oxford Elsevier Ltd. 2003
4. Ατσαλάκης, Α., *Μελέτη χύτευσης ακριβείας εν κενώ*, Αθήνα 2010
5. Πελεκάνος, Ε., *Έμμεσος προσδιορισμός του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας κατά τη Χύτευση Ακριβείας*, Αθήνα 2009
6. Αρβανιτάκη, Ε., *Προσδιορισμός του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας μέσω πειραμάτων και προσομοίωσης κατά τη χύτευση ακριβείας, με εφαρμογή διαφοράς πίεσης*, Αθήνα 2010
7. SABAU, A., *Alloy Shrinkage Factors for the Investment Casting Process*, 2006
8. M. Simsir, L.C. Kumruoglu, A. Ozer, *An investigation into stainless-steel/structural-alloy-steel bimetal produced by shell mould casting*, *Materials and Design* 30 (2009) 264–270.
9. C. Dørum, H.I. Laukli, O.S. Hopperstad, M. Langseth, *Structural behaviour of Al–Si die-castings: Experiments and numerical simulations*, *European Journal of Mechanics A/Solids*, *European Journal of Mechanics A/Solids* 28 (2009) 1–13
10. F. Cay, S. C. Kurnaz, *Hot tensile and fatigue behaviour of zinc–aluminum alloys produced by gravity and squeeze casting*, *Materials and Design* 26 (2005) 479–485.
11. G. Chirita, D. Soares, F.S. Silva, *Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al–Si alloys*, *Materials and Design* 29 (2008) 20–27.
12. W.R. Osório, C.A. Santos, J.M.V. Quaresma, A. Garcia, *Mechanical properties as a function of thermal parameters and microstructure of Zn–Al castings*, *Journal of Materials Processing Technology* 143–144 (2003) 703–709.

13. A. N. Vassiliou, D. I. Pantelis and G. -C. Vosniakos, *Experimental and Numerical Investigation of Vacuum Investment Casting on Heat Transfer and Part Quality of Brass*, Chapter 7, pp. 24, in *Advances in Mechanical Engineering Research Vol. 2*, Nova Publishers, 2010.
14. N. Pagratis, N. Karagiannis, G.-C. Vosniakos Pantelis and P. Benardos, *A holistic approach to the exploitation of simulation in solid investment casting*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 2007, Vol. 221, No 6, 967-979.
15. Nayak and S. Sundarraj, *Selection of Initial Mold–Metal Interface Heat Transfer Coefficient Values in Casting Simulations—A Sensitivity Analysis*, *Metallurgical and Materials Trans. B*, 2010, Vol.41B,151-160.
16. Moumoulidou K, Giannakakis T, Vosniakos G-C, Theoharidis P. *An advisory knowledge-based system for the design of pressure die-casting gating systems*. *Proc. International Conference on Virtual Engineering Applications for Design and Product Development 2003*, Dublin, Ireland, 125-134.
17. Giannakakis T, Mylhäuser S, Vosniakos, G-C. *Intelligent systems for evaluation of gravity casting quality*. *Proc. International Conference on Virtual Engineering Applications for Design and Product Development 2003*, Dublin, Ireland, 216-225.
18. Krimpenis A, Benardos P, Vosniakos G-C, Koukouvitaki A. *Simulation-based selection of optimum pressure die casting process parameters using neural nets and genetic algorithms*. *IntJnlAdv Manufacturing Technology* 2006; 27/5-6, 509-517.
19. Karagiannis NK, Pagratis ND, Pantelis DI, Vosniakos G-C. *Optimisation of flask initial temperature and alloy melt temperature in investment casting*. *Proc. 2nd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN) 2005*; Kassandra, Greece, 273-282.