



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

**ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ  
ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΥΤΟΥ ΜΕ ΤΗ  
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

---

**ΕΚΠΟΝΗΤΗΣ: ΚΛΩΤΣΙΚΑΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΑΓΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ (Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός)**

**ΣΕΡΡΕΣ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016**



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>- 4 -</b>
<b>I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>- 6 -</b>
1. Γενικά .....	- 6 -
2. Ιστορική αναδρομή στην παραγωγή των μεταλλικών αφρών .....	- 8 -
3. Μέθοδοι παραγωγής .....	- 11 -
3.1 LM foams: Αφροί μεταλλικών τηγμάτων .....	- 11 -
3.2 PM foams: Αφροί από μεταλλικές πούδρες .....	- 13 -
4. Ιδιότητες αφρών αλουμινίου .....	- 17 -
4.1 Μηχανικές ιδιότητες .....	- 17 -
4.2 Αντοχή των δομών σάντουιτς – απορρόφησης ενέργειας .....	- 19 -
4.3 Μέτρο ελαστικότητας .....	- 20 -
4.4 Φυσικές ιδιότητες .....	- 21 -
5. Κατεργασίες αφρών .....	- 22 -
6. Εφαρμογές .....	- 23 -
6.1 Εφαρμογές στα αυτοκίνητα .....	- 23 -
6.2 Εφαρμογές στην αεροδιαστημική .....	- 25 -
6.3 Εφαρμογές στη ναυσιπλοΐα .....	- 25 -
6.4 Εφαρμογές στις κατασκευές .....	- 25 -
7. Ανακύκλωση .....	- 26 -
<b>II. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ</b> .....	<b>- 27 -</b>
1. Γενικά .....	- 27 -
2. Λογισμικά .....	- 29 -
2.1 Rhinoceros 3D .....	- 29 -
2.2 Grasshopper 3D .....	- 30 -
3. Μοντελοποίηση .....	- 32 -
2.1 Βασικό μοντέλο .....	- 33 -
2.2 Συνθετο .....	- 37 -
2.3 Κλειστού τύπου με κενά Voronoi .....	- 39 -
2.4 Ανοιχτού τύπου Voronoi .....	- 42 -
2.5 Κλειστού τύπου Voronoi .....	- 44 -
2.6 Οργανικό .....	- 46 -
2.7 Τυχαίας μορφής .....	- 52 -
Συγκεντρωτικά .....	- 57 -
2.7 * Επιπλέον μέσω κώδικα από matlab & Inventor .....	- 58 -
<b>III. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</b> .....	<b>- 63 -</b>
1. Περιγραφή ανάλυσης .....	- 63 -
2. Δεδομένα εξομοίωσης .....	- 66 -
3. Αποτελέσματα εξομοίωσης .....	- 84 -
4. Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	- 93 -
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>- 97 -</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>- 98 -</b>

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ...**

*Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της.*

*Ευχαριστώ ιδιαίτερω τον επιβλέπων καθηγητή Δρ. Σαγρή Δημήτρη για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το συγκεκριμένο θέμα, για την καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης και την υπομονή που υπέδειξε.*

*Επίσης, ευχαριστώ θερμά την ΒΕΤΑ CAE που μου επέτρεψε να χρησιμοποιήσω το υλισμικό και τα λογισμικά της, όσο και τις άδειες από τρίτα λογισμικά και τον Δρ. Δαυίδ Κων/νο για την αμέριστη βοήθειά του.*

*Ευχαριστώ θερμά όλους τους φίλους και συναδέλφους μηχανικούς Βασίλη Παυλίδη, Έλλη Ξόνογλου, Γρηγόρη Καλαμπούκα, Μιχάλη Περόνη και Γιώργο Χρυσανθόπουλο που με βοήθησαν ο καθένας ξεχωριστά με τον τρόπο του.*

*Σέρρες, Οκτώβριος 2016*

**ΚΛΩΤΣΙΚΑΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ**

## Περίληψη

Η πτυχιακή αυτή εργασία γίνεται πάνω στο μάθημα των πεπερασμένων στοιχείων και παίρνει στοιχεία από τη σχεδίαση μέσω Η/Υ.

Σκοπός της είναι η δημιουργία διαφόρων ψηφιακών μοντέλων μεταλλικού αφρού, τα οποία να είναι παραμετροποιήσιμα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες οποιασδήποτε μελλοντικής μελέτης.

Τα μοντέλα αυτά θα πρέπει να καλύπτουν διάφορες κατηγορίες μεταλλικών αφρών. Επίσης γίνεται και η πλήρης εξήγηση του τρόπου με τον οποίο δημιουργήθηκαν ώστε να μπορούν να βελτιωθούν και από τρίτους στο μέλλον.

Ταυτόχρονα θα γίνει ενδεικτικά και η εξομοίωση μερικών μοντέλων από αυτά σε ένα πείραμα θλίψης με τρεις διαφορετικούς επιλυτές, έτσι ώστε να μπορέσουμε να δούμε το πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ψηφιακές εξομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

## **English Summary (Αγγλική Περίληψη)**

### **Thesis Title:**

*Methods of numerical modeling of metal foam alloy and finite element analysis of the model*

### **Abstract**

*The present Thesis deals with the creation of digital models of metal foam, which are configurable in order to be used in any future study.*

*These models should cover variable metal foam categories. Also there is a feral illustration of each model creation, so it can be farther more improvements.*

*Indicative, includes the simulation of three models in a compression test, with three separate solvers, in order to observe how the models behave in finite elements solving simulation.*

# I. Εισαγωγή

## 1. Γενικά

Οι μεταλλικοί αφροί είναι μια κατηγορία πορώδη υλικών με εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα και με συνδυασμό μηχανικών, ηλεκτρικών, θερμικών ακουστικών και αντiekρηκτικών ιδιοτήτων. Προσφέρουν μια μεγάλη ποικιλία από ελαφρού βάρους κατασκευές υψηλής μηχανικής αντοχής, αποσβεστήρες ενέργειας και διαχείρισης θερμότητας.

Οι μέθοδοι παρασκευής μεταλλικών αφρών είναι γνωστοί από τη δεκαετία του πενήντα. Υπάρχουν δύο λόγοι για τους οποίους δεν έχουν ακόμη εξαπλωθεί εκτεταμένα:

Δυσκολία στον έλεγχο παρασκευής και υψηλό κόστος.

Οι διάφορες κατασκευαστικές διαδικασίες, κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κατασκευή που παρασκευάζεται το μέταλλο, στερεά, υγρή, αεριώδης ή ιονισμένη.

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τους μεταλλικούς αφρούς έχει αυξηθεί ιδιαίτερα. Ο κυριότερος λόγος για αυτή την αύξηση είναι κυρίως για εφαρμογές όπου χρειαζόμαστε μειωμένο βάρος υλικών.

Γενικά τα τελευταία 40 χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να φτιαχτούν δομές μεταλλικών αφρών, οι οποίες όμως δεν βρήκαν εφαρμογή λόγω του υψηλού κόστους. Επίσης ένα άλλο πρόβλημα ήταν το ότι δεν μπορούσαν να παραχθούν δομές με αναπαραγόμενες ιδιότητες. Αυτό μπορεί να οφειλόταν παραδείγματος χάριν στην χαμηλή αφριστικότητα του λειωμένου μετάλλου, στην μεγάλη διασπορά, στο μέγεθος των πόρων ή στην συρρίκνωση κατά την στερεοποίηση. Μετά από εκτεταμένη έρευνα, ανακαλύφθηκαν καινούργιες τεχνολογίες παραγωγής μεταλλικών αφρών οι οποίες έχουν μειώσει στο ελάχιστο ή έχουν εξαλείψει αυτά τα προβλήματα, με αποτέλεσμα την παραγωγή αφρών υψηλής ποιότητας.

Οι μεταλλικοί αφροί έχουν χαρακτηριστικές ιδιότητες όπως, χαμηλό βάρος, ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ήχου, επίσης είναι άφλεκτοι. Υπάρχουν φυσικά πολλές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται οι μεταλλικοί αφροί,

όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία στη μηχανολογία, στις οικοδομές, στις οικιακές συσκευές και στην βιομηχανία των χημικών.

Προς το παρόν οι αφροί αλουμινίου παράγονται από λίγες εταιρίες ανά τον κόσμο, σε μικρή κλίμακα και για συγκεκριμένες εφαρμογές.



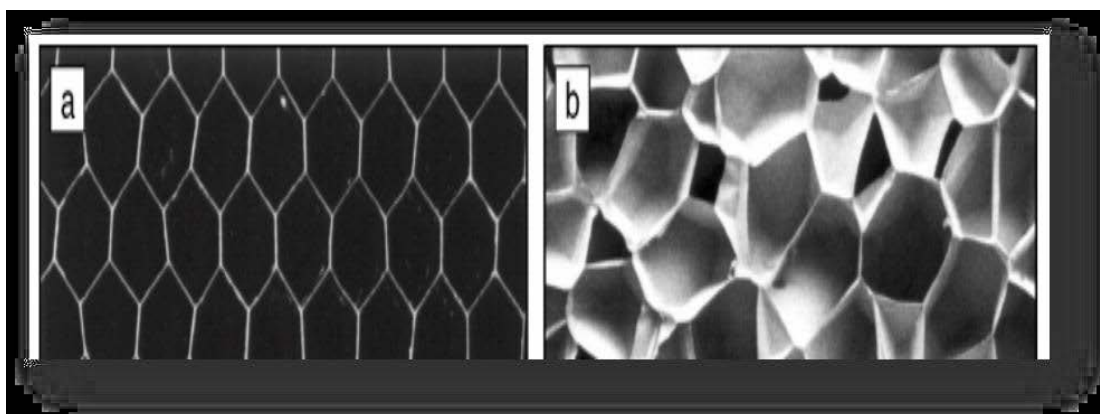
## **2. Ιστορική αναδρομή στην παραγωγή των μεταλλικών αφρών**

Η παραγωγή μεταλλικών αφρών έγινε για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1940 από τον Benjamin Sosnicki. Η μέθοδος του εκμεταλλευόταν το γεγονός ότι σε κράματα που οι διαφορετικές φάσεις έχουν μεγάλη διαφορά στο σημείο τήξης και βρασμού, οι φάσεις μπορούν να τακούν και να βράσουν ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Η διαδικασία έχει ως εξής: ένα πολυφασικό κράμα θερμαίνεται, με την σύσταση του κράματος να είναι τέτοια ώστε το ένα συστατικό να βράζει ενώ το άλλο μόλις έχει αρχίσει να λιώνει. Το κράμα κατά την διάρκεια της θέρμανσης βρίσκεται μέσα σε ένα αυτόκλειστο( εφαρμογή υψηλής πίεσης), έτσι ώστε το μέταλλο στην αέρια φάση να μην μπορεί να φύγει από το υγρό μέταλλο. Μείωση της πίεσης οδηγεί σε ξαφνικό βρασμό του κράματος, το οποίο στην συνέχεια μπορεί να ψυχθεί και να δώσει ένα στερεό γεμάτο από κλειστούς πόρους. Οι προτεινόμενες χρήσεις αξιοποιούσαν την βελτιωμένη αντοχή σε κρούση του κράματος καθώς και την θερμομόνωση και ηχομόνωση. Προφανώς μόνο λίγα κράματα ήταν κατάλληλα για αυτή τη διαδικασία, αφού μια από τις φάσεις έπρεπε να έχει εξαιρετικά χαμηλό σημείο βρασμού με αποτέλεσμα η σύνθεση του κράματος να περιλαμβάνει στοιχεία όπως ο ψευδάργυρος, το κάδμιο και ο υδράργυρος, στοιχεία σχετικά πτητικά και εκρηκτικά. Η όλη διαδικασία ήταν αρκετά δαπανηρή και έδινε μικρή ποσότητα μη κανονικού αφρού που περιείχε μερικά επικίνδυνα μέταλλα ίσως για αυτούς τους λόγους αυτή η διαδικασία δεν χρησιμοποιήθηκε ποτέ ευρέως. Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 έγινε και η παραγωγή μεταλλικών αφρών με ανοιχτούς πόρους. Το 1959 έγινε μια μεγάλη καινοτομία στην παραγωγή των μεταλλικών αφρών από τους ερευνητές της United Aircraft Corporation. Στην καινούργια αυτή μέθοδο αναμιγνύουμε ένα κονιοποιημένο μέταλλο μαζί με ένα υλικό σε σκόνη που χρησιμεύει στην παραγωγή αερίων. Το υλικό που θα παράγει το αέριο πρέπει να το διαλέξουμε προσεκτικά ώστε κοντά στην θερμοκρασία τήξης του μετάλλου να αποσυντίθεται και να παράγει μεγάλη ποσότητα αερίου. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου αυτής ήταν ότι παρουσίαζε προβλήματα κατά την διαδικασία της ψύξης του αφρού. Το 1963 οι Hardy και Peisker παρουσίασαν μια καινούργια μέθοδο στην οποία προσθέτανε κατευθείαν τον αφριστικό

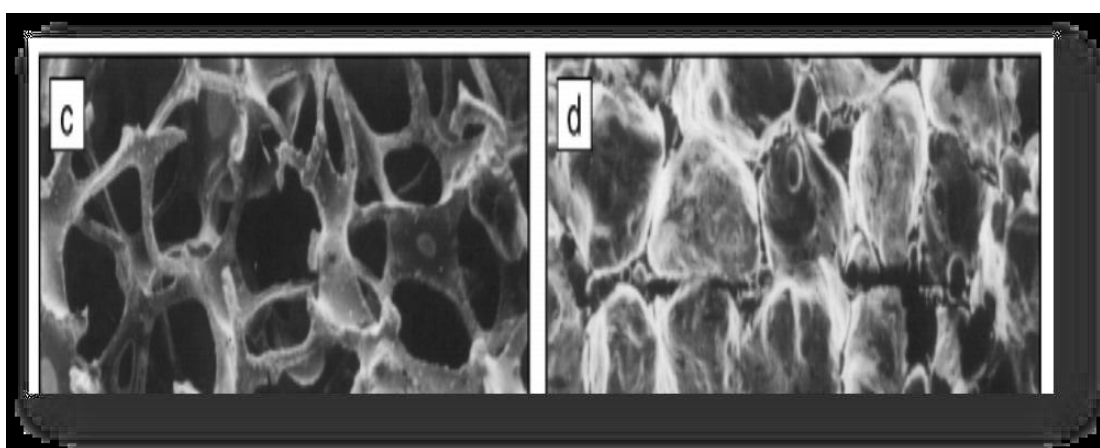
παράγοντα στο τήγμα του μετάλλου. Αυτή η μέθοδος ήταν πολύ πιο φθηνή από εκείνη που χρησιμοποιούσε κονιοποιημένο μέταλλο.

Σε γενικές γραμμές όμως η παραγωγή των μεταλλικών αφρών ήταν ακριβή, μη αξιόπιστη και γινόταν περισσότερο στα εργαστήρια των Πανεπιστημίων για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Οι προερχόμενοι από τήξη αφροί επικράτησαν στην εμβρυακή αγορά με διάφορες εταιρίες ανά τον κόσμο να προσφέρουν καινοτόμα προϊόντα. Ακόμα και σήμερα η αγορά των μεταλλικών αφρών είναι περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής αφρών υψηλής ποιότητας. Σήμερα σχεδόν όλη η ερευνητική δραστηριότητα επικεντρώνεται στους αφρούς αλουμινίου (λόγω της χαμηλής πυκνότητας, της αντίστασης σε διάβρωση και ενός σχετικά χαμηλού σημείου τήξης το οποίο τους δίνει υψηλή κατεργασιμότητα). Παρ' όλα αυτά έχουν κατασκευαστεί και αφροί από σίδηρο, νικέλιο και μόλυβδο. Οι αφροί του νικελίου χρησιμοποιούνται σαν χημικά φίλτρα ενώ οι άλλοι έχουν αμφίβολη ποιότητα και απασχολούν τους ερευνητές πιο πολύ ερευνητικά.



Εικόνα 1 : Κυψελωτά υλικά στο μικροσκόπιο. α) Κυψελωτό αλουμίνιο, β) Αφρός πολυαιθυλενίου με κλειστές κυψέλες



Εικόνα 2: Κυψελωτά υλικά στο μικροσκόπιο. c) Αφρός νικελίου με ανοιχτές κυψέλες, d) Αφρώδες γυαλί με κλειστές κυψέλες.

### 3. Μέθοδοι παραγωγής

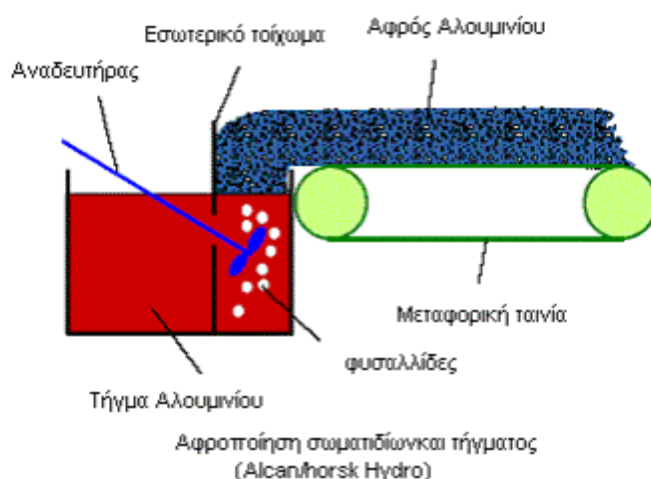
Αν και πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή των μεταλλικών αφρών, δεν είναι όλες κατάλληλες για βιομηχανική παραγωγή. Οι τεχνολογίες παραγωγής των μεταλλικών αφρών μπορούν λοιπόν να χωριστούν σε αυτές που ξεκινάνε με το μέταλλο σε υγρή μορφή ή σε σκόνη.

#### 3.1 LM foams: Αφροί μεταλλικών τηγμάτων

Οι παρακάτω μέθοδοι έχουν σαν κοινό γνώρισμα το ότι ξεκινάνε με την τήξη του

μετάλλου που θέλουμε να αφοροποιήσουμε.

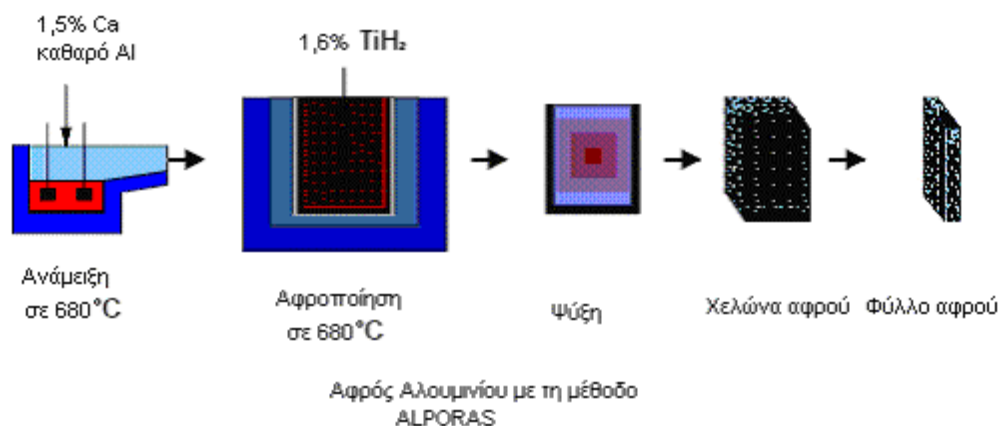
α) Τεχνολογία παραγωγής Alcan/Norsk Hydro



Εικόνα 3

Στο πιο πάνω σχήμα φαίνεται η μέθοδος παραγωγής Alcan/Norsk Hydro, η οποία εισάγει αέρια άμεσα στο υγρό μέταλλο. Στην αρχή προστίθεται στο υγρό Al, SiC ή Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10 με 15%) για να αυξήσει το ιξώδες του. Στη συνέχεια ένα αέριο (άζωτο ή αργό) εισάγεται στο τήγμα υπό ανάδευση χρησιμοποιώντας μια περιστρεφόμενη προπέλα. Τέλος το επιπλέον υγρό απομακρύνεται συνεχώς από την επιφάνεια του τήγματος. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να παραχθούν χελώνες αφρού σημαντικού μεγέθους (π.χ. 0,1x1x10m). Με αυτή την τεχνολογία το τελικό προϊόν είναι ένα πορώδες φύλλο με πορώδες που κυμαίνεται από 80% έως 97%.

## β) Τεχνολογία παραγωγής Alporas



Εικόνα 4

Η εταιρία Shinko Wire (Osaka, Japan) έχει αναπτύξει μια άλλη μέθοδο, η οποία περιλαμβάνει την προσθήκη ασβεστίου (1,5%) στο τήγμα του αλουμινίου για την αύξηση του ιξώδους. Το ασβέστιο εισάγεται στο τήγμα του αλουμινίου στους 680°C, στην συνέχεια το τήγμα αναδεύεται για έξι λεπτά σε κανονικό περιβάλλον. Το πυκνότερο τήγμα του αλουμινίου μεταγγίζεται σε ένα καλούπι χύτευσης και αναδεύεται μαζί με ένα πρόσθετο σκόνης TiH<sub>2</sub> (αφριστικός παράγοντας) χρησιμοποιώντας μια περιστρεφόμενη προπέλα. Ο αφριστικός παράγοντας αποσυντίθεται κάτω από την επίδραση της θερμοκρασίας και εκλύει αέρια υδρογόνου (μια ικανοποιητική ποσότητα υδριδίου είναι συνήθως 1,6%). Ως εκ τούτου, ο αφρός διαστέλλεται και γεμίζει το καλούπι μέσα σε 15 λεπτά. Ψύχεται με την βοήθεια ανεμιστήρων μέσα στο καλούπι και στερεοποιείται σαν χελώνα με πορώδες που κυμαίνεται από 89% έως 93%. Μία χυτή χελώνα Alporas έχει διαστάσεις mm<sup>2</sup> και βάρος 160 kg. Η χελώνα κόβεται σε φύλλα με το επιθυμητό πάχος.

## γ) Άλλες τεχνολογίες παραγωγής

Η διαδικασία GASAR βασίζεται στην σχέση της διαλυτότητας του υδρογόνου με την πίεση. Το μέταλλο τήκεται σε ένα αυτόκλειστο, στην συνέχεια αυξάνουμε την πίεση με αποτέλεσμα ένα υψηλό ποσό υδρογόνου να διαλύεται στο τήγμα. Αυτό το υπέρκορο τήγμα μεταγγίζεται σε καλούπι το οποίο βρίσκεται μέσα στο αυτόκλειστο. Στην συνέχεια κάνουμε κατευθυνόμενη στερεοποίηση σε χαμηλή πίεση. Το αέριο υδρογόνο

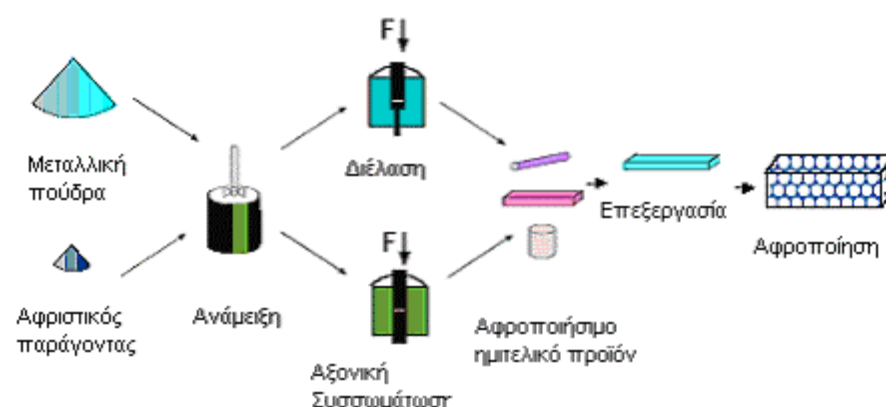
παγιδεύεται σε μακρόστενους πόρους στο μέτωπο της στερεοποίησης. Το μέγιστο πορώδες είναι χαμηλό (5-75%).

Άλλες τεχνολογίες βασίζονται στην δημιουργία αντιγράφου. Για να φτιάξουν ένα καλούπι αυτές οι τεχνολογίες ξεκινάνε με ένα δικτυωμένο αφρό πολυουρεθάνης, που βυθίζεται σε ένα πολύ θερμοανθεκτικού υλικού. Μετά από ξήρανση αφαιρείται το πολυμερές και το χυτό μέταλλο εκχύνεται στο τελικό καλούπι. Στην συνέχεια παίρνουμε τον παραγόμενο αφρό αφαιρώντας το από το καλούπι χρησιμοποιώντας νερό υπό πίεση. Ο μεταλλικός αφρός που παίρνουμε έχει ακριβώς την ίδια δομή με τον αρχικό αφρό πολυουρεθάνης. Ένα τυπικό πορώδες κυμαίνεται μεταξύ 80% έως 97%. Αυτή η διαδικασία διαφέρει από τις προηγούμενες γιατί παράγει αφρό με ανοιχτούς πόρους. Επίσης είναι δυνατή η παραγωγή αφρών με την έκχυση του τήγματος σε έναν όγκο πληρωτικού υλικού με την μορφή ανόργανων κόκκων ή κούφιων σφαιρών.

### 3.2 PM foams: Αφροί από μεταλλικές πούδρες

Σε αυτές τις τεχνολογίες η διαδικασία παραγωγής έχει μεγάλη σημασία και βασίζεται στην χρήση αφριστικού παράγοντα. Στην θέση του αφριστικού παράγοντα μπορούν να παγιδευτούν στο πρόδρομο υλικό και αδρανή αέρια.

α) Διαστολή με ένα αέριο που εκλύεται από έναν αφριστικό παράγοντα (IF AM, MEPUA)

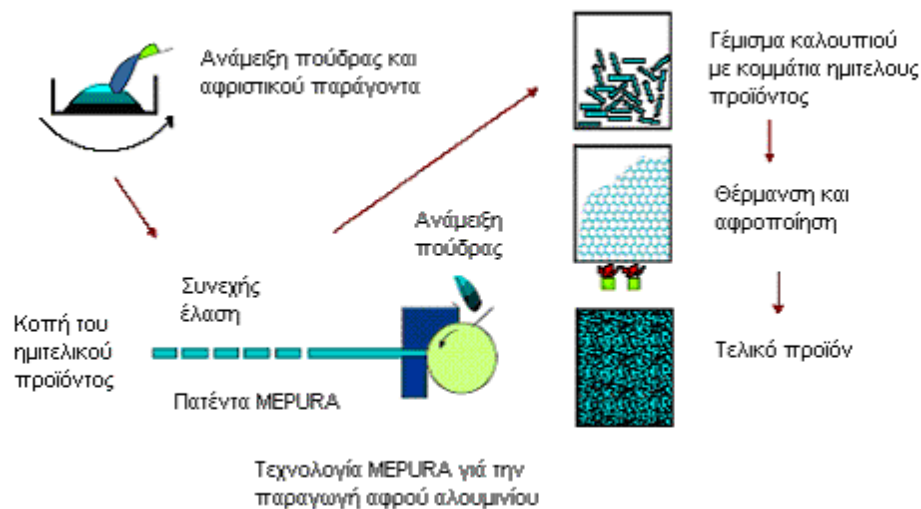


Εικόνα 5

Οι τεχνολογίες που βασίζονται στην χρήση αφριστικού παράγοντα (όπως φαίνεται και στο πιο πάνω σχήμα: (παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία IF AM) ξεκινούν με την μίξη μιας μεταλλικής σκόνης (καθαρό μέταλλο, κράμα ή μείγμα πούδρας) με έναν αφριστικό παράγοντα (για το αλουμίνιο και τα κράματά του συνήθως 0,4-0,6% κατά βάρος TiH<sub>2</sub>). Τα πιο συνηθισμένα κράματα που χρησιμοποιούμε για να ψτιάξουμε αφρούς είναι τα κατεργάσιμα κράματα της σειράς lxxx (καθαρό αλουμίνιο), 2xxx (Al-Cu) και 6xxx (Al-Mg-Si) ή τα κράματα χύτευσης π.χ. AlSi<sub>7</sub> και AlSi<sub>12</sub>. Τα τελευταία έχουν εξαιρετική αφριστικότητα λόγω του χαμηλού σημείου τήξης και των καλών ιδιοτήτων αφροποίησης. Το μείγμα συμπιέζεται σε ένα πυκνό, ημιτελικό προϊόν. Στην IF AM-διαδικασία το υλικό συμπιέζεται με μονοαξονική συμπίεση, χρησιμοποιώντας έλαση ή διέλαση ανάλογα με το απαιτούμενο σχήμα. Η διαδικασία MEPURA χρησιμοποιεί μια τεχνολογία συνεχούς διέλασης για την συμπίεση του μίγματος. Το επόμενο βήμα είναι μια θερμική κατεργασία κοντά στο σημείο τήξης της μεταλλικής μήτρας και πάνω από την θερμοκρασία αποσύνθεση του αφριστικού παράγοντα. Σε αυτή την θερμοκρασία ο παράγοντας αφροποίησης αποσυντίθεται και εκλύει αέριο υδρογόνο. Το αέριο οδηγεί στην διόγκωση του υλικού με αποτέλεσμα μια δομή με υψηλό πορώδες και κλειστούς πόρους. Η διαδικασία της αφροποίησης σταματάει με ψύξη αρκετά κάτω από το σημείο τήξης. Το πορώδες κυμαίνεται από 60% έως 85%.

Η ποιότητα του τελικού αφρού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες π.χ. συνθήκες συμπίεσης (τεχνολογία, βαθμός παραμόρφωσης, θερμοκρασία, πίεση, χρόνος), ποιότητα της πούδρας (τύπος και μέγεθος κόκκων, κράμα, συνθήκες μίξης), παράμετροι αφροποίησης (θερμοκρασία, ρυθμός θέρμανσης, χρόνο ψύξης, ατμόσφαιρα) και την γεωμετρία του ημιτελούς προϊόντος. Η πυκνότητα του αφρού ελέγχεται με την μεταβολή της περιεκτικότητας σε αφριστικό παράγοντα, της θερμοκρασίας και του ρυθμού θέρμανσης.

β) Παραγωγή αφρού αλουμινίου με την τεχνολογία MEPURA



Εικόνα 6

Για να επιτύχουμε το επιθυμητό σχήμα του αφρού είναι απαραίτητο να εισάγουμε το πρόδρομο (ημιτελικό) υλικό μέσα σε ένα καλούπι. Διαφορετικά το αποτέλεσμα θα ήταν ένα κομμάτι μεταλλικού αφρού με ακαθόριστο σχήμα, Κάνοντας την αφροποίηση μέσα σε κλειστά καλούπια μπορούμε να πάρουμε σχεδόν όλα τα σχήματα. Κατά την διαδικασία της αφροποίησης μπορούν να ενωθούν κομμάτια αφρού με κομμάτια μετάλλου Π.χ. μπορούμε να γεμίσουμε σωλήνες με αφρό αλουμινίου με διάφορους τρόπους,

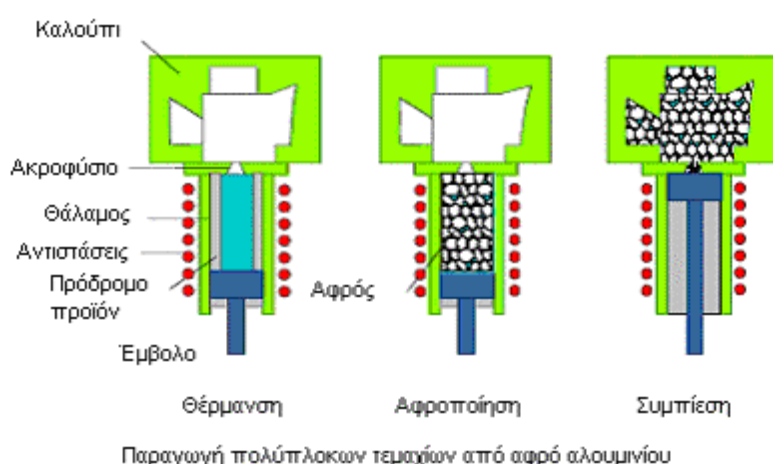
Μια άλλη μέθοδος είναι η παραγωγή φύλλων σάντουιτς που περιέχουν αφροποιημένο μέταλλο στο εσωτερικό τους. Μπορούμε να παράγουμε τα σάντουιτς κολλώντας τα φύλλα σε ένα φύλλο αφρού ή με έλαση φύλλων αλουμινίου ή σιδήρου που έχουν τοποθετηθεί πάνω και κάτω από ένα αφροποιημένο πρόδρομο υλικό. Με την τελευταία μέθοδο παράγουμε σάντουιτς με μεταλλικούς δεσμούς στις επαφές μετάλλου-αφρού. Το πρόδρομο σάντουιτς μπορεί να μορφοποιηθεί πριν από την αφροποίηση Π.χ. με βαθιά κοίλανση.

γ) Παραγωγή αφρού αλουμινίου με αρκετά πολύπλοκο σχήμα.

Αρκετά πολύπλοκα σχήματα μπορούν να παραχθούν αν εισάγουμε ένα διογκωμένο, υγρό αφρό σε ένα κατάλληλο καλούπι και κάνουμε εκεί τη τελική διόγκωση. Τα τελικά προϊόντα έχουν πυκνότητες μεταξύ 0,5 gr/cm<sup>3</sup> και 1 gr/cm<sup>3</sup>. Το πρώτο βήμα αυτής της τεχνολογίας μπορεί να συγκριθεί με αυτό της διαδικασίας MEPURA π.χ. μίξη πούδρας αλουμινίου με τον αφριστικό



παράγοντα και συνεχής διέλαση σε ένα συμπαγές αφροποιήσιμο πρόδρομο υλικό. Μόνο που σε αυτή την περίπτωση το πρόδρομο υλικό θερμαίνεται σε ένα θάλαμο αφροποίησης έως το σημείο τήξης του κράματος. Αυτό οδηγεί στην δημιουργία υγρού αφρού, ο οποίος χυτεύεται με ένα ελεγχόμενο τρόπο σε ένα μεταλλικό καλούπι ή σε ένα καλούπι άμμου. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή σε μεγάλη ή σε μικρή κλίμακα και την δημιουργία πρωτοτύπων σε ικανοποιητικό κόστος. Τέτοια κομμάτια αφρού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πυρήνες στην χύτευση υπό πίεση του αλουμινίου.



Εικόνα 7

#### δ) Τεχνολογίες παραγωγής που χρησιμοποιούν ένα παγιδευμένο αέριο

Σε αυτή την τεχνολογία ένας θάλαμος που κλείνει ερμητικά γεμίζεται με την πούδρα του αλουμινίου. Στην συνέχεια ένα αέριο π.χ. αργό εισέρχεται υπό πίεση στην πούδρα και γεμίζει όλα τα κενά ανάμεσα στους κόκκους της. Όταν θερμανθεί το πιο πάνω μίγμα, οι κόκκοι της πούδρας λιώνουν και κολλάνε μεταξύ τους και παγιδεύουν ανάμεσά τους το υπάρχον αέριο. Η παραχθείσα χελώνα υφίσταται έλαση και θερμαίνεται, έτσι το παγιδευμένο αέριο εκτονώνεται και παράγει ένα μεταλλικό αφρό (McDonell Douglas).

#### 4. Ιδιότητες αφρών αλουμινίου

Οι αφοί αλουμινίου είναι ισοτροπικά αφρώδη υλικά με αρκετά ασυνήθιστες ιδιότητες, που τους κάνουν κατάλληλους για ειδικές εφαρμογές. Χάρη στην χαμηλή τους πυκνότητα 0,3 gr/cm<sup>3</sup>-0,8 gr/cm<sup>3</sup> οι αφοί μπορούν να επιπλέουν στο νερό (στην περίπτωση που έχουμε κλειστούς πόρους).

Οι αφοί παρουσιάζουν χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η αντοχή τους είναι χαμηλότερη από την αντοχή του συμπαγούς αλουμινίου και μειώνεται με την μείωση της πυκνότητας. Οι αφοί είναι σταθεροί σε θερμοκρασίες μικρότερες από το σημείο τήξης του μετάλλου από το οποίο αποτελούνται. Επίσης είναι άφλεκτοι και μη τοξικοί.

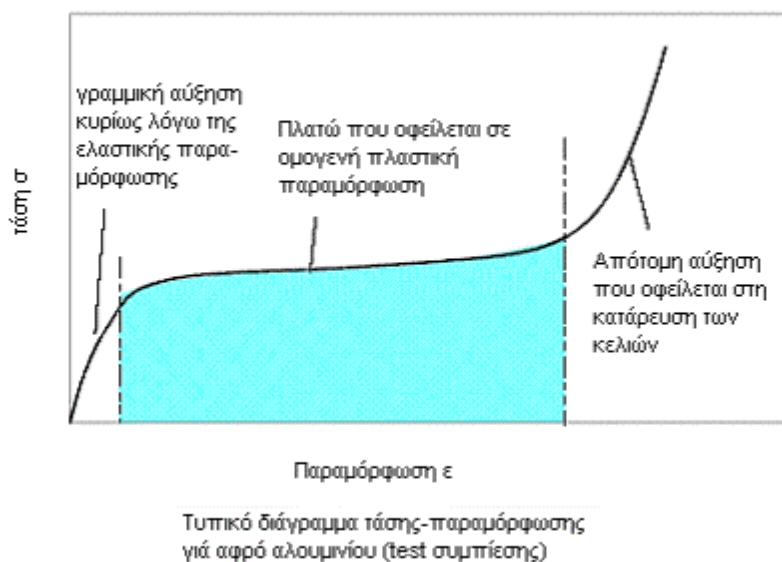
Στις περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής αφρών οι ιδιότητες τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό και εξαρτώνται από τις παραμέτρους της παραγωγής. Δίνονται μερικά παραδείγματα στον παρακάτω πίνακα.

Κράμα	Al 99,5%	Al99,5%	AlSi12	
Αφριστικός παράγοντας	-	TiH <sub>2</sub>	TiH <sub>2</sub>	
Πυκνότητα gr/cm <sup>3</sup>	2,7	0,4	0,54	0,84
Αντοχή στην θλίψη Mpa	-	3	7	15
Απορρόφηση ενέργειας για 30% συμπίεση				
MJ/m <sup>3</sup>	-	0,74	2	4
kJ/kg	-	1,8	3,7	4,8
Μέτρο ελαστικότητας Gra	67	2,4	5	14
Ηλεκτρική αγωγιμότητα m/(Ω mm)	34	2,1	-	-
Θερμική αγωγιμότητα W/(m*K)	235	12	13	24

##### 4.1 Μηχανικές ιδιότητες

Εξαιτίας της κυβελωτής δομής οι αφοί έχουν διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα μέταλλα. Αυτό έχει σαν άμεση συνέπεια να μην μπορούν να ελεγχθούν με τα γνωστά συμβατικά τεστ, π.χ. τεστ εφελκυσμού. Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα τα δίνει η δοκιμή θλίψης που μας δίνει ένα τυπικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης που χωρίζεται σε 3 μέρη. Έχει βρεθεί ότι αυτή η συμπεριφορά είναι τυπική για τους αφοί με ανοιχτούς ή κλειστούς πόρους. Το διάγραμμα δείχνει μια γραμμική αύξηση της παραμόρφωσης στην

αρχή της επιβολής της τάσης και ένα κομμάτι σχεδόν αμετάβλητης τάσης στην μέση, που ακολουθείται από μια απότομη αύξηση της τάσης παραμόρφωσης



Εικόνα 8

Το πρώτο στάδιο δεν είναι συνέπεια μόνο της ελαστικής παραμόρφωσης, όπως στην περίπτωση των μετάλλων, αλλά και της πλαστικής παραμόρφωσης. Στους αφρούς μη αντιστρεπτή παραμόρφωση μπορεί να συμβεί και σε χαμηλή τάση.

Το σχεδόν ευθύγραμμο κομμάτι εμφανίζεται λόγω μιας ομογενούς πλαστικής παραμόρφωσης.

Το τρίτο στάδιο οφείλεται στην κατάρρευση των κελιών. Οι απέναντι τοίχοι των κελιών αρχίζουν να αγγίζουν ο ένας τον άλλο. Η τάση που οι αφροί με ανοιχτούς και με κλειστούς πόρους εμφανίζουν "πλατό" είναι περίπου η ίδια όταν συγκρίνουμε αφρούς με την ίδια πυκνότητα και με την ίδια μήτρα.

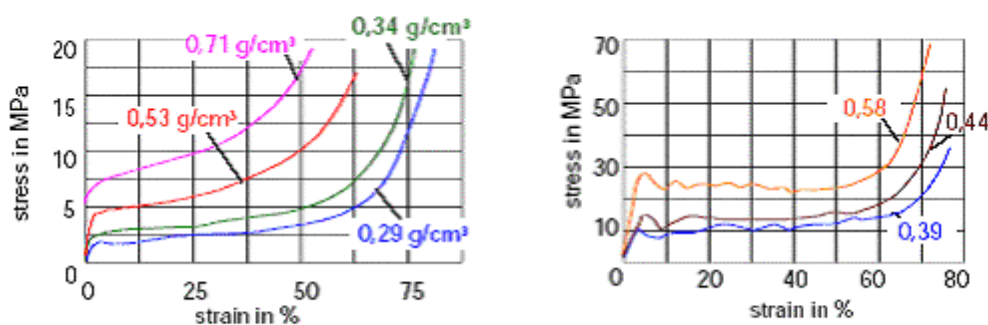
Οι ιδιότητες των αφρών επηρεάζονται επίσης και από την επιφάνειά τους. Οι αφροί που δοκιμάζονται χωρίς την πιο πυκνή εξωτερική επιφάνεια (π.χ, έχει αφαιρεθεί με κοπή) έχουν χαμηλότερη αντοχή, Η εξήγηση για αυτή την συμπεριφορά είναι ότι η εξωτερική επιφάνεια λειτουργεί σαν μέσο σκλήρυνσης όπως και στην δομή του σάντουιτς, Η ίδια συμπεριφορά

χαρακτηρίζει και τους σωλήνες που στο εσωτερικό τους έχουν αφρό αλουμινίου. Η κατεύθυνση του αφρού δεν παίζει κάποιο ρόλο, γιατί ουσιαστικά οι αφροί είναι ιστροπικά υλικά. Στους μεταλλικούς αφρούς μπορούμε να κάνουμε θερμικές κατεργασίες αλλά είναι δύσκολο και υπάρχουν αρκετά προβλήματα με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να αυξήσουμε σημαντικά την αντοχή. Μερικά προβλήματα είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και το ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί ο ίδιος ρυθμός ψύξης σε όλο το υλικό. Σαν μέσο ψύξης χρησιμοποιείται πεπιεσμένος αέρας που δίνει όμως αργούς ρυθμούς ψύξης σε σχέση με το νερό, το οποίο όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέσο ψύξης γιατί καταστρέφει τα κελιά.

#### 4.2 Αντοχή των δομών σάντουιτς – απορρόφησης ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε η εξωτερική επιφάνεια αυξάνει την αντοχή των αφρών. Χρησιμοποιώντας μεταλλικά φύλλα σιδήρου ή αλουμινίου που περιβάλλουν τον αφρό μπορούμε να αυξήσουμε την αντοχή του αφρού δημιουργώντας μια δομή σάντουιτς.

Επίσης μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία στους σωλήνες αν τους γεμίσουμε με αφρό αλουμινίου.



AI99,5-foam (MEPURA; TU Wien)

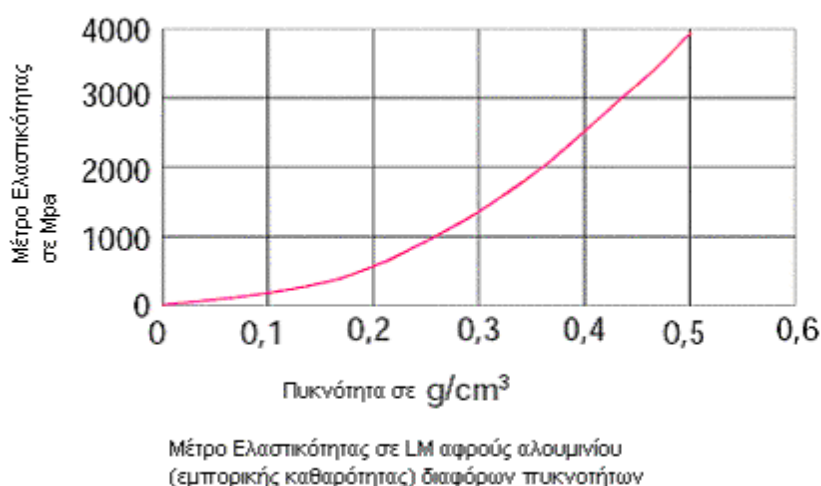
AISi6Cu-foam (IFAM, Germany)

Διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης για αφρούς αλουμινίου με κλειστά κελιά (διαφορετικές πυκνότητες και διαφορετικά κράματα)

Εικόνα 9

Στο προηγούμενο σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης σε διάφορους σωλήνες που περιέχουν ή δεν περιέχουν αφρό αλουμινίου στο εσωτερικό τους. Στην περίπτωση των σωλήνων με τον αφρό αλουμινίου η τάση του “πλατό” είναι μεγαλύτερη, όπως επίσης και η περιοχή κάτω από το “πλατό”. Αυτό σημαίνει ότι αυτοί οι σωλήνες είναι καλύτεροι για εφαρμογές που απαιτείται απορρόφηση ενέργειας κρούσης. Μπορούν δηλαδή να χρησιμοποιηθούν σαν απορροφητές ενέργειας σύγκρουσης στα αυτοκίνητα. Γεμάτοι σωλήνες με μικρότερη διάμετρο μπορούν να απορροφήσουν την ίδια ενέργεια με σωλήνες με μεγαλύτερη διάμετρο, δηλαδή μπορούμε να έχουμε το ίδιο όφελος καταλαμβάνοντας λιγότερο χώρο. Αυτό ενδιαφέρει ιδιαίτερα την αυτοκινητοβιομηχανία. Ο αφρός του αλουμινίου προστατεύει τον σωλήνα από μια πρόωρη κατάρρευση ή πλαστική παραμόρφωση. Αν στην συνέχεια ο σωλήνας λυγίσει ή παραμορφωθεί με κάποιο τρόπο ο αφρός συμπιέζεται - με αποτέλεσμα να μετριάξει την περαιτέρω παραμόρφωση. Μερικά παραδείγματα σωλήνων με γέμιση αφρού αλουμινίου φαίνονται στο παραπάνω σχήμα.

#### 4.3 Μέτρο ελαστικότητας



Εικόνα 10

Το μέτρο ελαστικότητας, σε συνδυασμό με την γεωμετρία είναι ένα σημαντικό μέσο χαρακτηρισμού ενός τελικού προϊόντος, από το οποίο μπορούμε να

εκτιμήσουμε την αντοχή του. Το ειδικό μέτρο ελαστικότητας ( $E/\rho$ ) του αφρού αλουμινίου είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό του “πυκνού” αλουμινίου. π.χ. το ειδικό μέτρο ελαστικότητας για ένα αφρό A1 99,5% είναι  $6\text{GPa cm}^3/\text{gr}$  (δηλαδή  $E=2,4\text{GPa}$  για μια πυκνότητα αφρού  $d=0,4\text{gr}/\text{cm}^3$  ενώ το ειδικό μέτρο ελαστικότητας για το “πυκνό” αλουμίνιο είναι  $25\text{GPa cm}^3/\text{gr}$  (δηλαδή  $E = 67\text{GPa}$  για μια πυκνότητα  $d=2,7\text{gr}/\text{cm}^3$ ).

Όπως φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα το μέτρο ελαστικότητας των αφρών αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας. Αυτό ισχύει για όλους τους αφρούς ανεξαρτήτως από το αν έχουμε ξεκινήσει από τήγμα ή πούδρα. Άρα μπορούμε να προσαρμόσουμε το μέτρο ελαστικότητας ανάλογα με την εφαρμογή μεταβάλλοντας την πυκνότητα του αφρού,

#### **4.4 Φυσικές ιδιότητες**

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των αφρών διαφέρουν από αυτές των “πυκνών” μετάλλων. Αυτό όμως μπορεί να λειτουργήσει θετικά σε κάποιες περιπτώσεις ανάλογα με την εφαρμογή.

α) Αγωγιμότητα. Η ηλεκτρική και η θερμική αγωγιμότητα των αφρών είναι γενικά χαμηλότερη από αυτή των “πυκνών” μετάλλων. Ο λόγος είναι ότι το μεταλλικό κομμάτι του αφρού (τοιχώματα κελιών) καταλαμβάνει πολύ μικρότερο όγκο σε σύγκριση με τους γεμάτους αέρια πόρους. Επίσης τα τοιχώματα των κελιών είναι επικαλυμμένα με ένα στρώμα οξειδίου, το οποίο όπως είναι γνωστό δεν είναι αγωγίμο. Είναι λογικό λοιπόν η αγωγιμότητα να αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας του αφρού.

Η θερμική αγωγιμότητα εκτιμάται ότι είναι δέκα φορές μικρότερη στους αφρούς απ' ό τι στα “πυκνά” μέταλλα. Επίσης με μια κατεργασία οξειδωσης η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να μειωθεί κι άλλο. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι ίδιος για τους αφρούς όπως και για τα “πυκνά” μέταλλα, δηλαδή οι αφροί σε υψηλές θερμοκρασίες δεν χάνουν το σχήμα τους απλά διογκώνονται ελάχιστα. Εξαιτίας της χαμηλής θερμικής τους αγωγιμότητας οι αφροί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μονωτικά υλικά.

β) Ηχομονωτικές ιδιότητες Ένα άλλο πλεονέκτημα των αφρών είναι η εξαιρετική ικανότητά τους να απορροφούν τον ήχο. Στους αφρούς τα ηχητικά

κύματα ανακλώνται από την ακανόνιστη δομή των πόρων. Η κυματική τους ενέργεια προκαλεί κάποιες μικρές παραμορφώσεις στα τοιχώματα των κελιών και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ένταση των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων. Τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών έχουν δείξει ότι η απορρόφηση (ηχομονωτική ικανότητα) αυξάνεται όταν έχουμε ομογενείς πόρους. Επίσης βελτίωση παρατηρείται όσο αυξάνουν οι συνδέσεις μεταξύ των πόρων. Φαίνεται ότι οι αφροί με ανοιχτούς πόρους είναι πιο αποτελεσματικοί στην απορρόφηση των ήχων. Οι μελέτες του συντελεστή απορρόφησης ήχου του Alrogas δείχνουν ότι το Alrogas που έχει γίνει με έλαση έχει ένα υψηλό συντελεστή απορρόφησης ήχου, ισοδύναμο με αυτό του γυαλιού ή του ξύλου.

## **5. Κατεργασίες αφρών**

Οι αφροί αλουμινίου μπορούν να υποστούν διάφορες κατεργασίες χωρίς πρόβλημα. Οι παραγόμενες χελώνες αφρού μπορούν να κοπούν και να τρυπηθούν. Σε ένα αφρό είναι εύκολο να ανοίξουμε τρύπες ή να τον καρφώσουμε. Εξαίρεση αποτελούν οι αφροί που περιέχουν σωματίδια SiC ή Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> λόγω της σκληρότητας αυτών των σωματιδίων. Οι αφροί αλουμινίου εύκολα χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα υλικά. Χρησιμοποιώντας χημικές κόλλες μπορούμε να κολλήσουμε τους αφρούς αλουμινίου μεταξύ τους ή με άλλα υλικά. Οι αφροί μπορούν να συνδεθούν με πυκνά υλικά με μηχανικό τρόπο. Η συγκόλληση είναι δυνατή, αλλά μπορεί να προκαλέσει προβλήματα διάβρωσης εξαιτίας της απομάκρυνσης του πυκνού στρώματος του οξειδίου. Επίσης μπορούμε να κάνουμε συγκόλληση με λέιζερ. Αυτή η τεχνολογία είναι συμφέρουσα γιατί εισάγει χαμηλό ποσοστό ενέργειας στον αφρό, με άμεση συνέπεια η δομή του αφρού να είναι σταθερή. Το πληρωτικό υλικό τοποθετείται μπροστά από την κεφαλή του λέιζερ κατά μήκος της διεύθυνσης της συγκόλλησης. Ειδικά για τις συγκολλήσεις αφρών έχουμε καλύτερα αποτελέσματα όταν δουλεύουμε με παλμικό λέιζερ και με λέιζερ συνεχόμενης ακτινοβολίας. Τα πειράματα δείχνουν ότι αυτή η συγκόλληση έχει καλά αποτελέσματα για την συνένωση αφρών αλουμινίου με φύλλα μετάλλου. Συγκριτικά με δείγματα, στα οποία η συνένωση έγινε με χρήση κόλλας η ανθεκτικότητα της συγκόλλησης ήταν μεγαλύτερη. Μπορούμε να

βάψουμε τους αφρούς αλουμινίου με οργανικές ή ανόργανες βαφές. Η βαφή δεν θα επηρεάσει την ικανότητα του αφρού να απορροφά τους ήχους.

## **6. Εφαρμογές**

Υπάρχουν πολλές πιθανές εφαρμογές για τους μεταλλικούς αφρούς όπως ελαφριές κατασκευές, ηχομόνωση, θερμομόνωση και εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας. Όπως αναφέρεται και πιο πάνω, οι αφροί αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροδιαστημική, αλλά και στην εφαρμοσμένη μηχανική και σε κατασκευές. Η χρήση αφρών μπορεί να ικανοποιήσει την απαίτηση πολλών κλάδων της βιομηχανίας για ελαφριές κατασκευές. Συγκριτικά με τα συνθετικά υλικά (πλαστικά, αφρούς πολυουρεθάνης) οι αφροί αλουμινίου έχουν κάποια ιδιαίτερα προτερήματα: την καλή αντοχή στην θερμότητα, μεγαλύτερη αντοχή, είναι άφλεκτοι και μπορούν να ανακυκλωθούν εύκολα. Έως τώρα οι αφροί αλουμινίου έχουν μικρή εφαρμογή, κυρίως για επίδειξη και δοκιμές, αλλά διάφορες ιδέες εξετάζονται και μερικές εμπορικές χρήσεις γίνονται ήδη. Επειδή οι μεταλλικοί αφροί είναι σχετικά ακριβοί, η χρήση τους παρακινείται από το άθροισμα των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους. Βέβαια αναμένεται ότι η τιμή τους θα πέσει στα επόμενα χρόνια όσο θα αυξάνει η μαζική παραγωγή.

### **6.1 Εφαρμογές στα αυτοκίνητα**

Σήμερα υπάρχει μια τάση για την μείωση του βάρους των αυτοκινήτων. Κυρίως οφείλεται στις ανησυχίες για την προστασία του περιβάλλοντος και τις καινούργιες νομοθετικές ρυθμίσεις που απαιτούν λιγότερη μόλυνση του περιβάλλοντος. Μια άλλη τάση είναι η βελτίωση της παθητικής προστασίας των αυτοκινήτων, που κυρίως επηρεάζεται από την επιλογή των υλικών και τον σχεδιασμό. Επίσης σημαντικός παράγοντας είναι και η ανακύκλωση των υλικών.

Έχοντας υπόψη αυτά, τις καλές ηχομονωτικές ιδιότητες και την δυνατότητα απορρόφησης της ενέργειας οι αφροί αλουμινίου μπορούν κάλλιστα να



χρησιμοποιηθούν στα επιβατικά αυτοκίνητα. Τρεις είναι οι κύριες εφαρμογές των μεταλλικών αφρών στα αυτοκίνητα: Η απορρόφηση ενέργειας, οι ελαφριές κατασκευές και η μόνωση.

1. Η πρώτη εφαρμογή γίνεται κατανοητή στην περίπτωση των μπροστινών και πλαγίων προφυλακτήρων. Είναι γεγονός πως πολλά από τα σημερινά αυτοκίνητα περιέχουν παραμορφώσιμα εξαρτήματα στην δομή τους. Αυτά τα εξαρτήματα που βρίσκονται στην περιοχή πρόσκρουσης, πρέπει να απορροφήσουν την ενέργεια κρούσης έτσι ώστε η κρούση να μην φτάσει στον θάλαμο των επιβατών. Αυτές οι κατασκευές προστασίας (π.χ. μπροστινός ή πλαϊνός προφυλακτήρας, φτερά, κατασκευές των τόξων ασφαλείας δίπλα στην πόρτα ή άλλα εξαρτήματα που κινδυνεύουν να παραμορφωθούν ή να συνθλιβούν σε μια κρούση ή που πρέπει να απορροφήσουν μεγάλα ποσά ενέργειας) μπορούν να γεμίσουν με αφρό αλουμινίου. Στα φορτηγά οι αφροί αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την ακαμψία των προστατευτικών μερών της κάτω πλευράς. Με την βοήθεια αυτών των εξαρτημάτων μπορούμε να δημιουργήσουμε μια ελεγχόμενη, προγραμματισμένη παραμόρφωση στην ζώνη κρούσης των αυτοκινήτων με την μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό ιδίως στην περίπτωση των καινούριων, μικρών αυτοκινήτων της πόλης, όπου τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση ενέργειας πρέπει να καταλαμβάνουν το μικρότερο δυνατό όγκο.

2. Η καλή σχέση ανάμεσα στο βάρος και την σκληρότητα στους αφρούς, τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν και στο αμάξωμα ή σε άλλα δομικά μέρη, σε περιοχές του αυτοκινήτου που απαιτούν μεγάλη σταθερότητα. Μερικά παραδείγματα είναι τα μη οργανικά εξαρτήματα πάνω στον κινητήρα και οι οροφές. Όλα αυτά τα μέρη δεν πρέπει να υφίστανται καμία ελαστική παραμόρφωση από τα αέρια ρεύματα. Οι δονήσεις πρέπει να αποφεύγονται. Οι αφροί αλουμινίου λόγω των καλών μονωτικών τους ιδιοτήτων είναι μια καλή λύση για αυτά τα μέρη του αυτοκινήτου.

3. Στην τρίτη ομάδα ανήκουν εφαρμογές που χρησιμοποιούν τις καλές ηχοθερμομονωτικές ιδιότητες των αφρών αλουμινίου. Οι ηχομονωτικές ιδιότητες κάνουν τους αφρούς χρήσιμους για την ηχομόνωση του τμήματος της

μηχανής του αυτοκινήτου. Ο στόχος σε αυτή την περίπτωση είναι να μην έχουμε μεταφορά των θορύβων στον θάλαμο των επιβατών και στο περιβάλλον.

### **6.2 Εφαρμογές στην αεροδιαστημική**

Χάρη στο χαμηλό τους βάρος οι αφροί αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αεροδιαστημική. Παραδείγματος χάριν φύλλα σάντουιτς ή αφρού αλουμινίου μπορούν να αντικαταστήσουν τις δομές “honeycomb”. Αυτό θα είχε πολλά πλεονεκτήματα, όπως μειωμένο κόστος, απουσία κολλήσεων, η οποία θα βοηθούσε ώστε να παραμείνει η δομή ακέραια σε περίπτωση φωτιάς. Παρόλα αυτά αναμένονται πολλά αποτελέσματα από την έρευνα που γίνεται πάνω στην συμπεριφορά των αφρών στην κόπωση.

### **6.3 Εφαρμογές στη ναυσιπλοΐα**

Στην ναυσιπλοΐα η ανάγκη για μείωση του βάρους είναι επίσης σημαντική. Αλλά σε σχέση με την αυτοκινητοβιομηχανία, χρειάζεται και υψηλή ευελιξία στην παραγωγή των υλικών, επειδή τα πλοία δεν κατασκευάζονται σε γραμμή παραγωγής με τυποποιημένα μέρη. Γι’ αυτό τα πάνελ αφρού αλουμινίου πλεονεκτούν. Προϋπόθεση όμως για την χρήση τους, αποτελεί η ανάπτυξη κατάλληλων στοιχείων σύνδεσης και η έρευνα της διάβρωσης των αφρών αλουμινίου σε θαλασσινό νερό. Έρευνες που βρίσκονται σε αρχικό στάδιο έχουν δείξει ότι στους PM-αφρούς αλουμινίου με κλειστούς πόρους, διάλυμα χλωριούχου νατρίου μπορεί να εισχωρήσει μόνο επιφανειακά χωρίς να προκαλεί ατέλειες στην δομή του υλικού.

### **6.4 Εφαρμογές στις κατασκευές**

Στα κτήρια και στις κατασκευές υπάρχει μια μεγάλη πιθανότητα χρήσης των αφρών αλουμινίου, κυρίως εξαιτίας της καλής αντίστασης στην διείσδυση της φωτιάς και των θερμομονωτικών ιδιοτήτων. Παραδείγματος χάριν προφίλ από αφρό αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εξωτερικές προσόψεις

κτηρίων ή σαν καλύμματα των εσωτερικών τοίχων. Και στις δυο περιπτώσεις οι αφροί βοηθάνε στην εξοικονόμηση ενέργειας χάριν στις καλές θερμομονωτικές τους ιδιότητες. Μια άλλη ιδιότητα των αφρών αλουμινίου που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε στις κατασκευές είναι η ηχομόνωση. Οι αφροί αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ηχοαπορροφητικά υλικά σε σιδηροδρομικά τούνελ, κάτω από γέφυρες στις εθνικές οδούς ή μέσα σε κτήρια.

## **7. Ανακύκλωση**

Οι αφροί αλουμινίου ανακυκλώνονται με την ίδια ευκολία όπως και το “πυκνό” αλουμίνιο. Σε κάποιες περιπτώσεις όταν έχουμε πολύ χαμηλή πυκνότητα ή πολύ μεγάλα κομμάτια είναι καλύτερα αυτά να συμπιεστούν πριν την τήξη. Η ανακύκλωση γίνεται όχι μόνο για περιβαλλοντολογικούς λόγους αλλά και γιατί είναι μια επικερδής διαδικασία για την βιομηχανία του αλουμινίου.

## II. Μοντελοποίηση μεταλλικών αφρών

### 1. Γενικά

Η μοντελοποίηση των μεταλλικών αφρών μέσω αριθμητικής μεθόδου πραγματοποιείται μέσω γεννήτριας τυχαίων αριθμών, πάνω στην οποία μπορούμε να ορίσουμε ένα συγκεκριμένο εύρος των τιμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση της δομής σε σχέση με ένα πραγματικό μοντέλο.

Η διάταξη των κόμβων ανάμεσα στα στοιχεία γίνεται είτε με καθορισμένα γεωμετρικά σχήματα, όπως σφαίρα τυχαίας ακτίνας ή με την μέθοδο διαγράμματος Voronoi.

### Διαγράμματα Voronoi

Το παραπάνω πρόβλημα πρώτα μελετήθηκε συστηματικά από τον Ρώσο μαθηματικό Georgy Feodosevich Voronoi, γι' αυτό και τα διαγράμματα που το επιλύουν ονομάζονται διαγράμματα Voronoi.

Το πρόβλημα στο επίπεδο ορίζεται ως εξής: Δοθέντων  $n$  σημείων στο επίπεδο  $K = \{κ_1, κ_2, \dots, κ_n\}$  (τα οποία ονομάζονται κέντρα) ορίζουμε μία μη κενή περιοχή σημείων  $R_i$  γύρω από κάθε  $κ_i$ . Ορίζουμε επίσης την απόσταση  $d_i$  των σημείων της περιοχής  $R_i$  από το κέντρο  $κ_i$ . Η περιοχή  $R_i$  ονομάζεται κελί Voronoi όταν τα σημεία της βρίσκονται πλησιέστερα στο  $κ_i$  από κάθε άλλο κέντρο. Το κελί Voronoi δηλαδή ορίζεται ως η περιοχή σημείων για την οποία ισχύει:  $R_i = \{x \in R^2 | d(x, κ_i) \leq d(x, κ_j) \forall i \neq j\}$ . Να βρεθεί για κάθε  $κ_i$  ένα κελί Voronoi.

Τα διαγράμματα Voronoi έχουν κάποιες πολύ χρήσιμες ιδιότητες, τρεις εκ των οποίων είναι:

1. Ένα διάγραμμα Voronoi με  $n$  κέντρα ( $n \geq 3$ ) έχει το πολύ  $3n-6$  ακμές και  $2n-5$  κορυφές.
2. Κάθε κορυφή ενός διαγράμματος Voronoi αποτελεί κέντρο κύκλου ο οποίος διέρχεται από 3 κέντρα και στο εσωτερικό του δεν υπάρχει κανένα κέντρο.

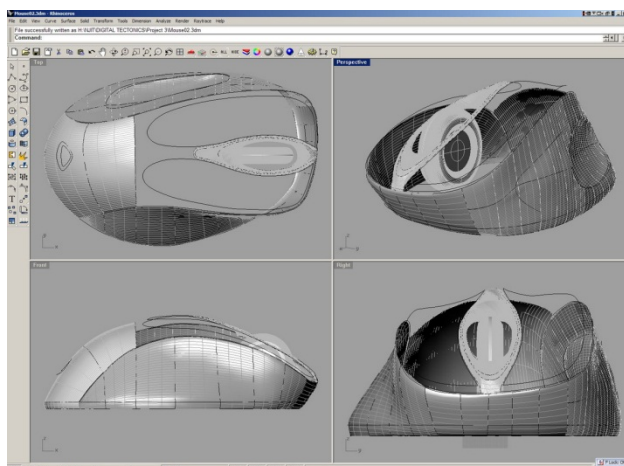
3. Κάθε σημείο μιας ακμής ενός διαγράμματος Voronoi είναι κέντρο κύκλου που διέρχεται από 2 κέντρα και στο εσωτερικό του δεν υπάρχει κανένα κέντρο.



## 2. Λογισμικά

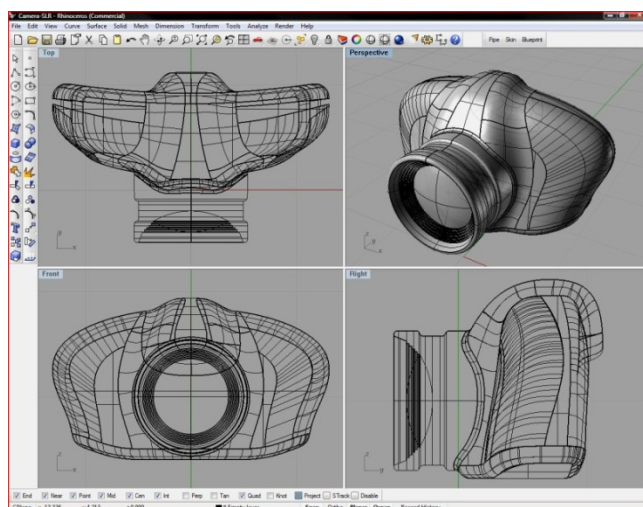
### 2.1 Rhinoceros 3D

Το Rhinoceros είναι ένα εμπορικό λογισμικό γραφικών και σχεδιασμού CAD. Η βάση σχεδιασμού είναι το μαθηματικό μοντέλο των NURBS το οποίο εστιάζει στην ακριβής μαθηματική αναπαράσταση καμπυλών, σε αντίθεση με τις εφαρμογές γεωμετρικών τύπων polygon mesh.



Εικόνα 11: Rhino 3D

Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές CAD – CAM, 3D printing, αντίστροφη μηχανική, βιομηχανικό σχεδιασμό, multimedia και graphic design.

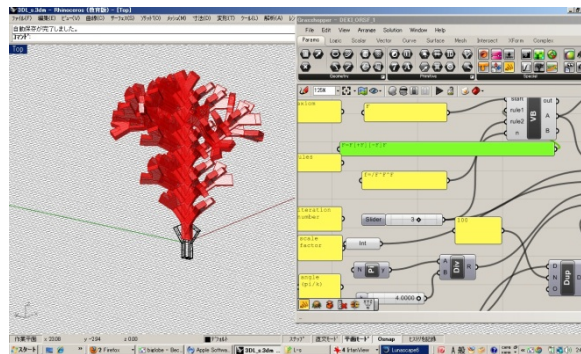


Εικόνα 12: Rhino 3D

Χρησιμοποιεί για το σχεδιασμό το μοντέλο ελεύθερης μορφής επιφανειών (free form surface modeler) και το βασικό του πλεονέκτημα είναι η ανοικτή αρχιτεκτονική (open SDK) που επιτρέπει την ανεξάρτητη δημιουργία επιπροσθέτων προγραμμάτων πάνω του με τη μορφή plug-in , από ανεξάρτητους τρίτους δημιουργούς.

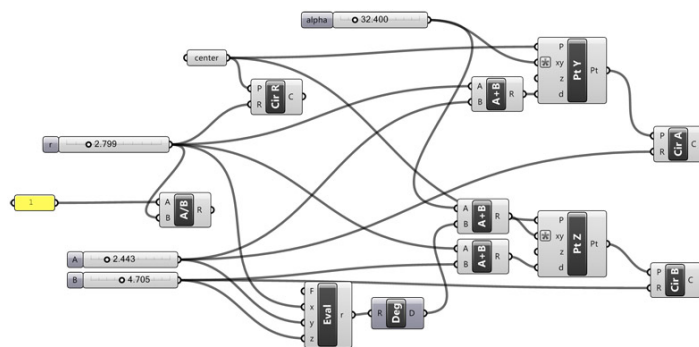
## 2.2 Grasshopper 3D

Το Grasshopper 3d είναι ένα δωρεάν ανεξάρτητο plug-in του Rhinoceros που χρησιμοποιεί τη μέθοδο της γλώσσας οπτικού προγραμματισμού (visual programming language) δημιουργίας αλγορίθμων.



Εικόνα 13: Grasshopper 3D

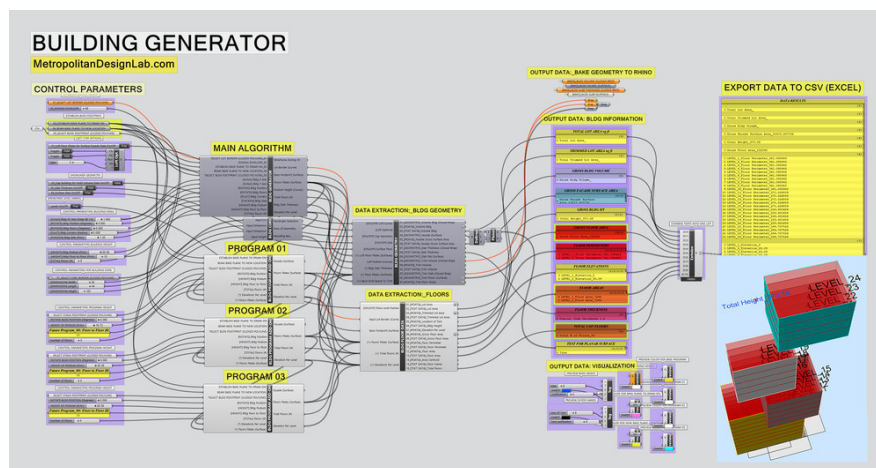
Οι αλγόριθμοι δημιουργούνται σύροντας προκαθορισμένα αντικείμενα πάνω στον καμβά σχεδίασης του γραφικού περιβάλλοντος του προγράμματος. Οι έξοδοι των αντικειμένων αυτών συνδέονται με τις εισόδους άλλων σειριακών αντικειμένων.



Εικόνα 14: Grasshopper Nodes

Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή γενικής μορφής αλγορίθμων, οι οποίοι μπορούν να μεταφραστούν και σε τρισδιάστατη γεωμετρία.

Ο πυρήνας του προγράμματος αυτού είναι η επεξεργασία βασισμένη σε κόμβους (node base editor). Τα δεδομένα το ενός αντικειμένου συνδέονται μέσω απλών ή πολλαπλών συνδέσεων στην είσοδο ενός άλλου προκαθορισμένου αντικειμένου. Τα δεδομένα αποθηκεύονται με τη μορφή παραμέτρων δυναμικά ή μπορούν να ορισθούν στατικά από τον χρήστη.



Εικόνα 15: Grasshopper Output

Η τελική έξοδος των παραγόμενων αλγορίθμων δίνονται γραφικά στο Rhinoceros.

Το πλεονέκτημά του είναι εκτός από τη δυναμική σχεδίαση των αλγορίθμων, η μεγάλη online κοινότητα με βάσεις δεδομένων και τεχνογνωσία που το υποστηρίζει.



### 3. Μοντελοποίηση

Για την αλγοριθμική μοντελοποίηση θα χρησιμοποιηθεί το Grasshopper το οποίο είναι ένα plug-in του προγράμματος Rhinoceros όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Αυτό θα μας επιτρέψει να χειριζόμαστε δυναμικά το μοντέλο και να μπορούν να πραγματοποιηθούν αλλαγές πάνω σε αυτό κατά την εξέλιξη ή την αλλαγή στοιχείων του εκάστοτε μοντέλου.

Η σύνθεση των μοντέλων είναι απλή. Κάθε τμήμα του αλγορίθμου θεωρείται ως αντικείμενο, ξεχωριστός αλγόριθμος, το οποίο παίρνει διάφορες τιμές ως εισόδους και δίνει άλλες ως εξόδους. Οι τιμές αυτές μπορούν να οριστούν χειροκίνητα ή ως οι τιμές εξόδου από ένα προηγούμενο αντικείμενο.

Η σύνδεση αυτή είναι οπτική από κάθε είσοδο και έξοδο των αντικειμένων. Το grasshopper έχει μια μεγάλη βιβλιοθήκη από αυτούς τους αλγόριθμους - αντικείμενα, και το κάθε ένα από αυτά που χρησιμοποιούνται για το μοντέλο περιγράφονται διεξοδικά.

Επίσης οι συνδέσεις μεταξύ τους παρουσιάζονται και σε εικόνες για την διευκόλυνση της μοντελοποίησης.

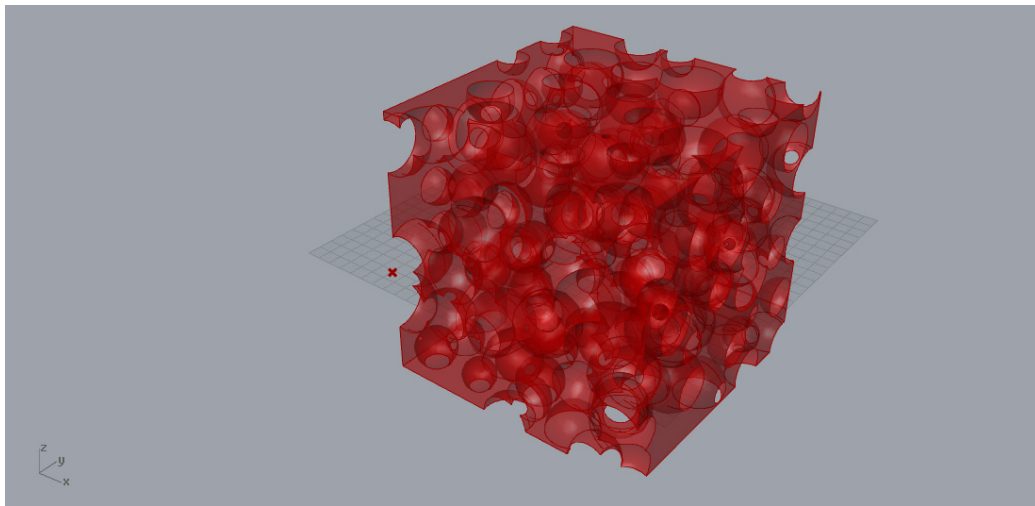
Θα αναπτυχθούν αναλυτικά επτά βασικά μοντέλα, όπως επίσης και η πλήρης επεξήγηση της κατασκευής τους.

### 3.1 Βασικό μοντέλο

(basic\_01)

Αποτελεί ένα απλό μοντέλο με τις κοιλότητες σε γεωμετρικό σχήμα σφαίρας τυχαίας ακτίνας. Είναι ένα μοντέλου κλειστού τύπου.

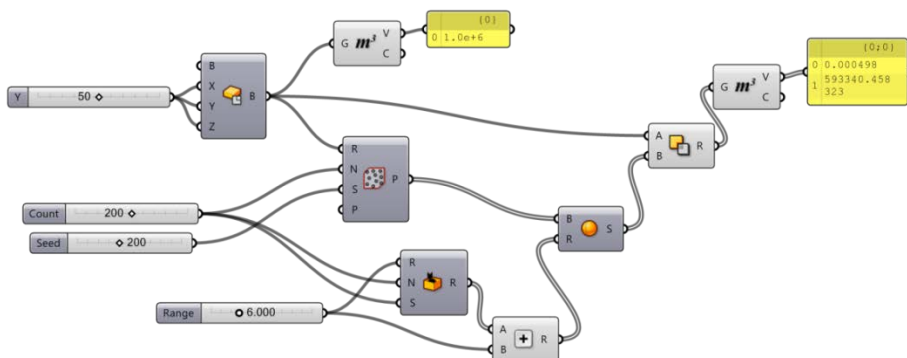
Αυτό είναι και βάση πάνω στην οποία μπορούμε να παραμετροποιήσουμε και τα υπόλοιπα μοντέλα.



Εικόνα 16: Basic\_01


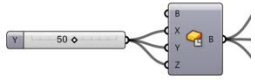
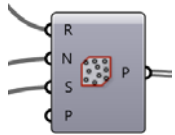
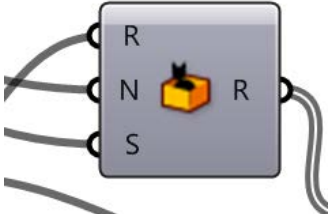

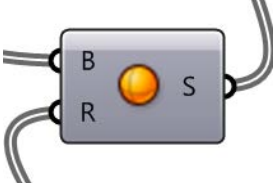

Περιγραφή μοντέλου:


Σε ένα συγκεκριμένο όγκο ορίζουμε τυχαία σημεία. Πάνω σε κάθε σημείο δημιουργούμε από μια σφαίρα με τυχαίο εύρος ακτίνας (αλλά ελάχιστης ορισμένης) και κατόπιν αφαιρούμε τον όγκο των σφαιρών από αυτόν του αρχικού όγκου.



Εικόνα 17: Basic\_01 nodes

Επεξήγηση στοιχείων διαγράμματος:

	<p>Slider</p> <p>Ορίζουμε μια συγκεκριμένη τιμή</p>
	<p>Center Box</p> <p>Ορίζουμε ένα σχήμα με τις διαστάσεις που επιθυμούμε.</p> <p>X,Y,Z: διαστάσεις</p>
	<p>Populate 3d</p> <p>Ορίζει τυχαία σημεία</p> <p>R: χώρος των σημείων N: αριθμός σημείων S: τυχαία διασπορά εισαγωγής</p>
	<p>Random</p> <p>Γεννήτρια τυχαίων αριθμών</p> <p>R: εύρος N: ποσότητα τυχαίων αριθμών S: διασπορά</p>
	<p>Addition</p> <p>Πρόσθεση</p> <p>A&amp;B: τιμές που προσθέτουμε</p>
	<p>Sphere</p> <p>Σφαίρα</p> <p>B: βασικό επίπεδο R: ακτίνα</p>
	<p>Solid Intersection</p> <p>Διαφορά στερεών</p> <p>A, B: στερεά</p>

	<p>Volume Όγκος</p> <p>G: γεωμετρία V: όγκος αντικειμένου</p>
---	---

Παραμετροποιήσεις που μπορούν να γίνουν.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο ορίσαμε σαν αρχικό σχήμα ένα παραλληλόγραμμο τις διαστάσεις του οποίου μπορούμε να αλλάξουμε σε κάθε διεύθυνση. Επίσης το αρχικό σχήμα μπορεί να είναι κάποιο άλλο (όπως κυλινδρος, σφαίρα ή ακόμα και ένα άλλο σχήμα που σχεδιάσαμε.

Ο αριθμός των σημείων εξαρτάται από το αρχικό σχήμα όπως επίσης και από την αρχική ακτίνα και το εύρος αυτής, στις σφαίρες εσωτερικά. Αυτό θα μας δώσει και την αλληλοκάλυψη που θα έχουν οι σφαίρες.

Επίσης αν δεν ορίσουμε μια ελάχιστη ακτίνα θα έχουμε πολλές μικρές σφαίρες σχεδόν μηδενικού όγκου, κάτι που θα παρουσιάσει πρόβλημα στην εξαγωγή του αρχείου για περαιτέρω ανάλυση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Γενικότερα αυτό που ισχύει και στα επόμενα μοντέλα, είναι ότι μπορούν να παραμετροποιηθούν με καλύτερο αποτέλεσμα αν αλλάξουμε τις τιμές στα slider έτσι ώστε να πάρουμε την επιθυμητή γεωμετρία του μοντέλου.

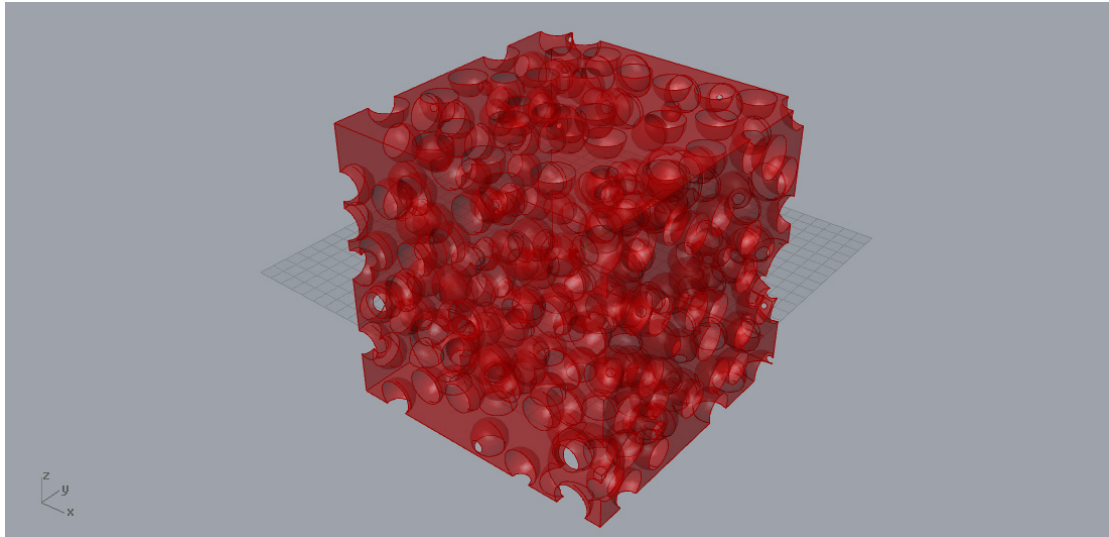
Το επόμενο μοντέλο αποτελεί αυτό το παράδειγμα.

Είναι διατεταγμένο με την ίδια μέθοδο αλλά έχουν αλλάξει ορισμένοι παράμετροι, κάνοντάς το πιο σύνθετο γεωμετρικά.

### 3.2 Συνθετο

(complex\_01)

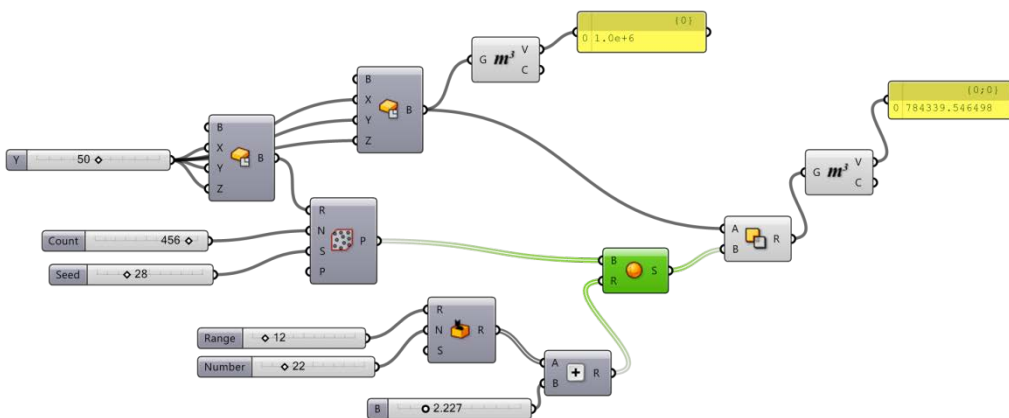
Η ίδια διάταξη με το βασικό αλλά με τελική πιο σύνθετη γεωμετρία.



Εικόνα 18: Complex\_01

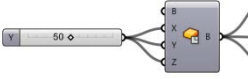
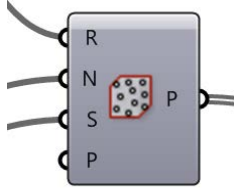
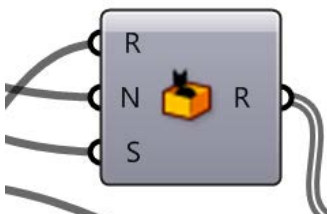
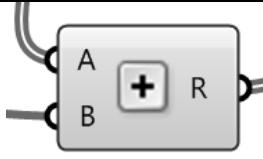
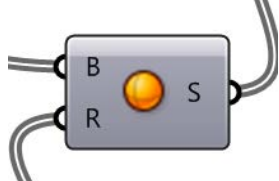
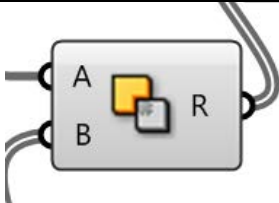

Περιγραφή μοντέλου:

Πλέον ο βαθμός αλληλοκάλυψης είναι μεγαλύτερος αφού ο αριθμός των σφαιρών είναι μεγαλύτερος, αλλά ταυτόχρονα και είναι μικρότερη και η ελάχιστη ακτίνα της κάθε σφαίρας.



Εικόνα 19: Complex\_01 nodes

Επεξήγηση στοιχείων διαγράμματος:

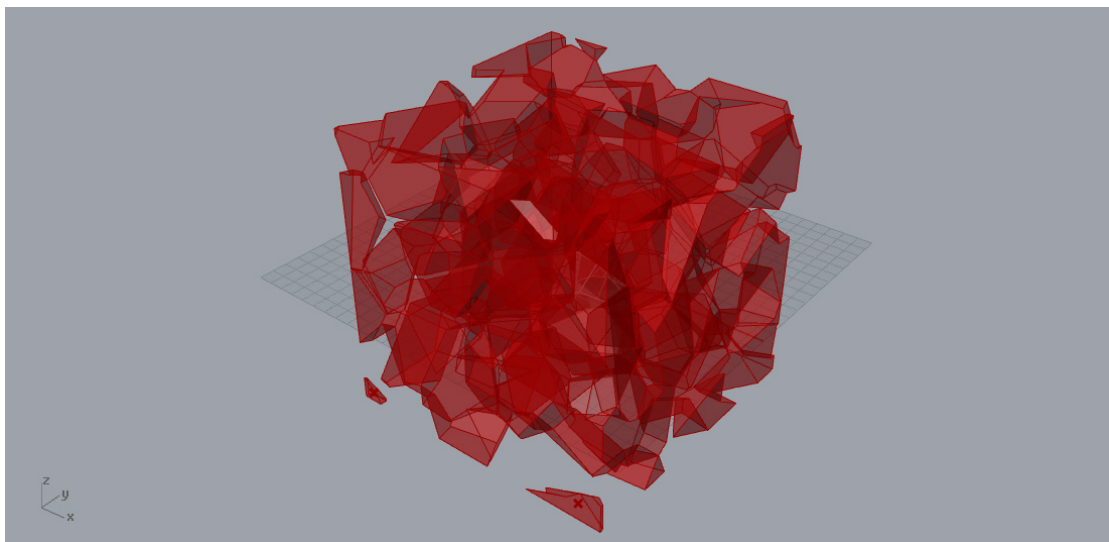
	<p>Center Box Ορίζουμε ένα παραλληλεπίπεδο με τις διαστάσεις που επιθυμούμε.</p> <p>X,Y,Z: διαστάσεις</p>
	<p>Populate 3d Ορίζει τυχαία σημεία</p> <p>R: χώρος των σημείων N: αριθμός σημείων S: τυχαία διασπορά εισαγωγής</p>
	<p>Random Γεννήτρια τυχαίων αριθμών</p> <p>R: εύρος N: ποσότητα τυχαίων αριθμών S: διασπορά</p>
	<p>Addition Πρόσθεση</p> <p>A,B: τιμές που προσθέτουμε</p>
	<p>Sphere Σφαίρα</p> <p>B: βασικό επίπεδο R: ακτίνα</p>
	<p>Solid Intersection Διαφορά στερεών</p> <p>A, B: στερεά</p>
	<p>Volume Όγκος</p> <p>G: γεωμετρία V: όγκος αντικειμένου</p>

### 3.3 Κλειστού τύπου με κενά Voronoi

(voronoi\_sphere)

Σε αυτή την περίπτωση, σε σχέση με το βασικό μοντέλο, η διαφορά είναι ότι αντί για σφαίρες έχουμε τυχαίους όγκους μοντελοποιημένους κατά Voronoi.

Έτσι προκύπτει ένα μοντέλο κλειστού τύπου, με τα κενά του να είναι διαμορφωμένα με μεγαλύτερο βαθμό τυχειότητας που προσεγγίζει καλύτερα ρεαλιστικά μοντέλα. Στο συγκεκριμένο έχουμε ένα σχετικά απλό μοντέλο, λόγω περιορισμένης υπολογιστής ικανότητας του υπολογιστή.

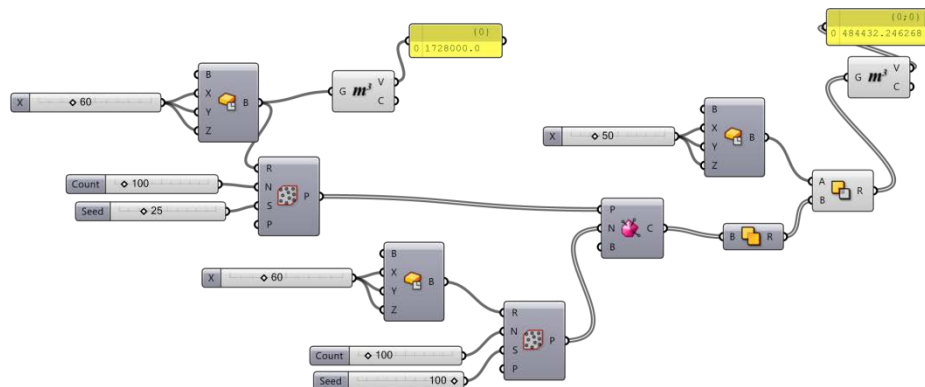


Εικόνα 20: Voronoi\_sphere

Περιγραφή μοντέλου:

Σε ένα συγκεκριμένο όγκο ορίζουμε τυχαία σημεία. Επαναλαμβάνουμε αλλάζοντας την διασπορά στο δεύτερο όγκο. Τροφοδοτούμε με αυτά τα σημεία έναν όγκο Voronoi και ενώνουμε όλους τους όγκους που δημιουργήθηκαν. Δημιουργούμε ένα τρίτο όγκο ελάχιστα μικρότερο από τους αρχικούς και αφαιρούμε από αυτόν τους όγκους Voronoi.

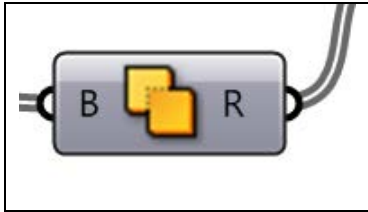




Εικόνα 21: Voronoi\_sphere nodes

Επεξήγηση στοιχείων διαγράμματος:

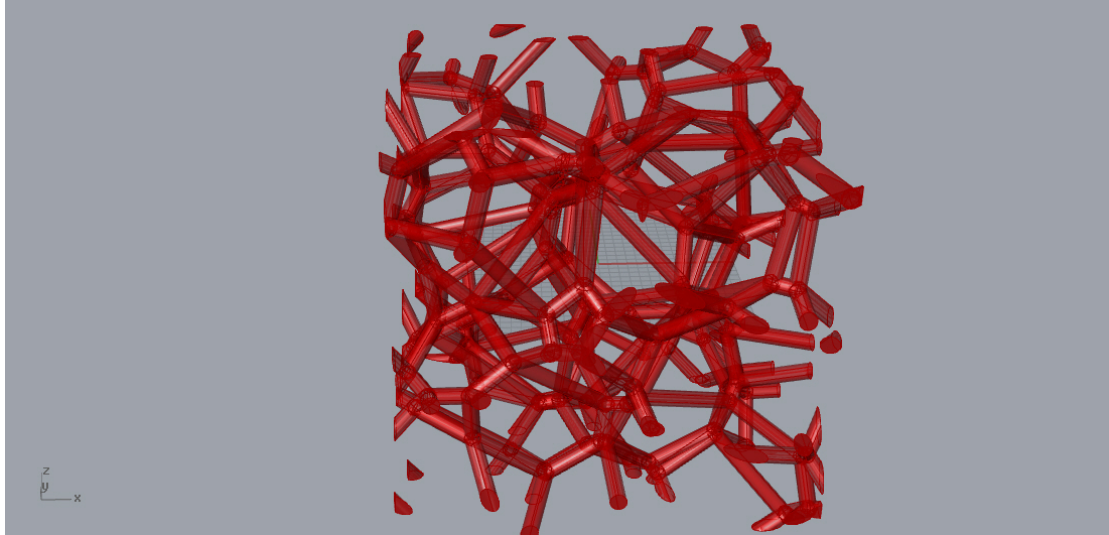
	<p>Center Box Ορίζουμε ένα παραλληλεπίπεδο με τις διαστάσεις που επιθυμούμε.</p> <p>X,Y,Z: διαστάσεις</p>
	<p>Populate 3d Ορίζει τυχαία σημεία</p> <p>R: χώρος των σημείων N: αριθμός σημείων S: τυχαία διασπορά εισαγωγής</p>
	<p>Solid Intersection Διαφορά στερεών</p> <p>A, B: στερεά</p>
	<p>Volume Όγκος</p> <p>G: γεωμετρία V: όγκος αντικειμένου</p>
	<p>Voronoi cell Όγκος Voronoi</p> <p>P: σημεία «κεντρου» N: γειτονικά σημεία ακμών</p>

	<p>Solid Union Ένωση στερεών όγκων</p> <p>B: στερεά</p>
---	---

### 3.4 Ανοιχτού τύπου Voronoi

(voronoi\_open)

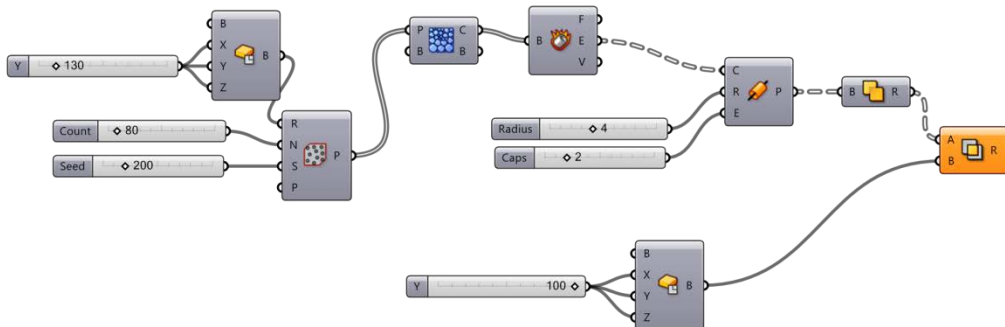
Μοντέλο τύπου δικτυώματος , ανοιχτού τύπου. Έχει ελάχιστη πυκνότητα για τον όγκο τον οποίο καταλαμβάνει.



Εικόνα 22: Voronoi\_open


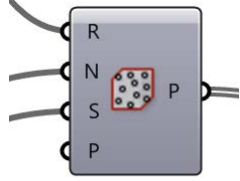
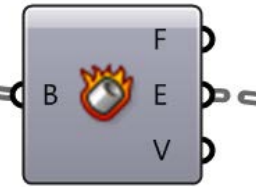

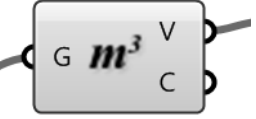

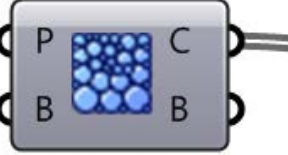
Περιγραφή μοντέλου.

Σε ένα αρχικό ορισμένο όγκο δημιουργούμε τυχαία διασπορά σημείων τα οποία ενώνουμε με τη μέθοδο Voronoi. Από αυτά τα κρατούμε μόνο τις ακμές (edges) στις οποίες δημιουργούμε σωλήνωση με ορισμένη ακτίνα. Κατόπιν από το αυτό το σχήμα αφαιρούμε το εξωτερικό μέσω ενός όγκου ελάχιστα μικρότερου του αρχικού.



Εικόνα 23: Voronoi\_open nodes

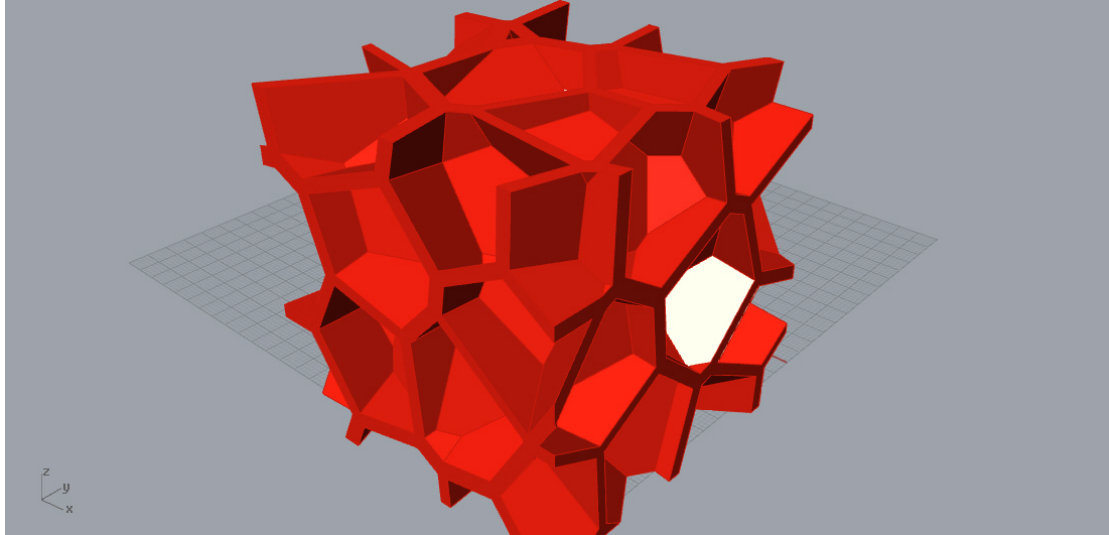
Επεξήγηση στοιχείων διαγράμματος:

	<p><b>Center Box</b>                  Ορίζουμε ένα παραλληλεπίπεδο με τις διαστάσεις που επιθυμούμε.</p> <p>X,Y,Z: διαστάσεις</p>
	<p><b>Populate 3d</b>                  Ορίζει τυχαία σημεία</p> <p>R: χώρος των σημείων                  N: αριθμός σημείων                  S: τυχαία διασπορά εισαγωγής</p>
	<p><b>Deconstruct Brep</b>                  Αποδόμηση στερεού</p> <p>B: αρχικό στερεό                  F: face                  E: edges                  V: vertices</p>
	<p><b>Solid Intersection</b>                  Διαφορά στερεών</p> <p>A, B: στερεά</p>
	<p><b>Volume</b>                  Όγκος</p> <p>G: γεωμετρία                  V: όγκος αντικειμένου</p>
	<p><b>Solid Union</b>                  Ένωση στερεών όγκων</p> <p>B: στερεά</p>
	<p><b>Voronoi 3D</b>                  Τρισδιάστατο Voronoi</p> <p>P: σημεία                  B: όρια όγκου κατασκευής Voronoi                  C: όγκοι που δημιουργήθηκαν</p>

### 3.5 Κλειστού τύπου Voronoi

(voronoi\_closed)

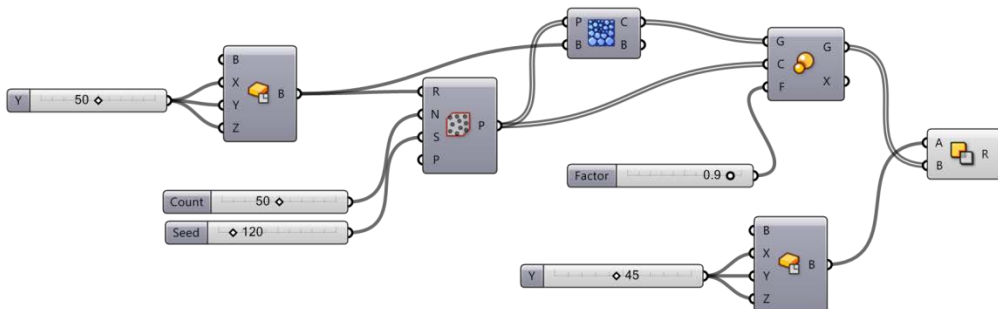
Το αντίστροφο μοντέλο από το προηγούμενο. Είναι τελείως κλειστού τύπου φυσαλίδες voronoi αλλά με το ίδιο μικρή πυκνότητα.



Εικόνα 24: Voronoi\_closed

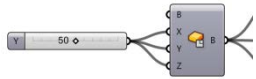
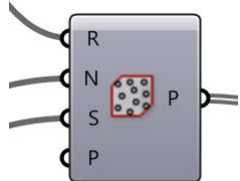
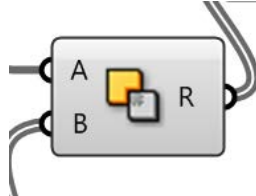

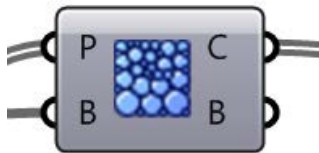
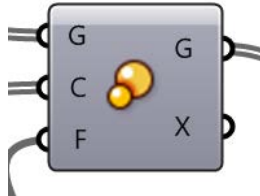
Περιγραφή μοντέλου.

Σε ένα αρχικό ορισμένο όγκο δημιουργούμε τυχαία διασπορά σημείων τα οποία ενώνουμε με τη μέθοδο Voronoi. Μειώνουμε τους όγκους που δημιουργήσαμε σε κλίμακα που ορίζουμε. Κατόπιν από το αυτό το σύνολο των όγκων, αφαιρούμε το εξωτερικό μέσω ενός όγκου ελάχιστα μικρότερου του αρχικού ορισμένου.



Εικόνα 25: Voronoi\_closed nodes

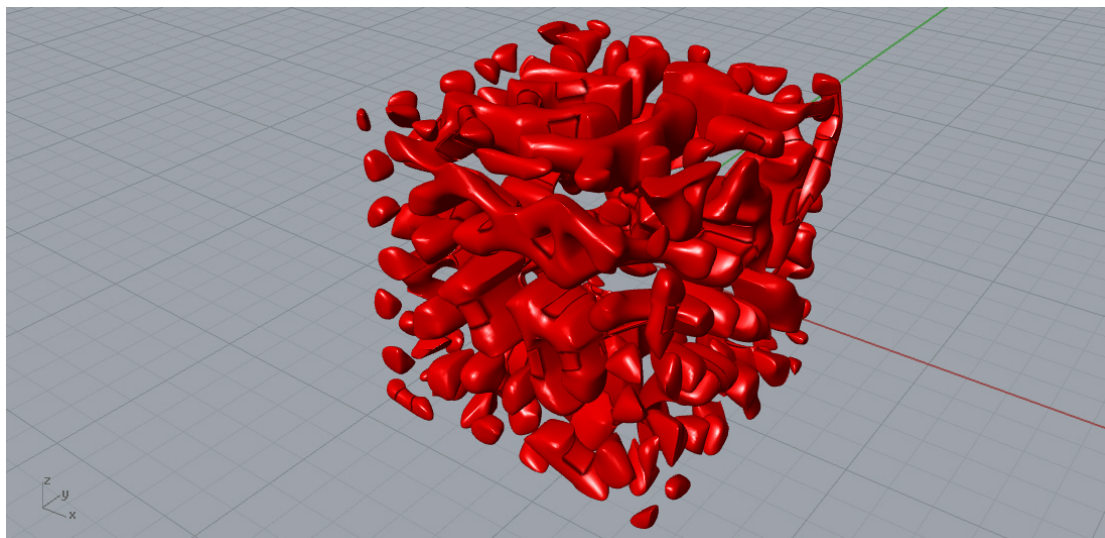
Επεξήγηση στοιχείων διαγράμματος:

	<p>Center Box Ορίζουμε ένα παραλληλεπίπεδο με τις διαστάσεις που επιθυμούμε.</p> <p>X,Y,Z: διαστάσεις</p>
	<p>Populate 3d Ορίζει τυχαία σημεία</p> <p>R: χώρος των σημείων N: αριθμός σημείων S: τυχαία διασπορά εισαγωγής</p>
	<p>Solid Intersection Διαφορά στερεών</p> <p>A, B: στερεά</p>
	<p>Volume Όγκος</p> <p>G: γεωμετρία V: όγκος αντικειμένου</p>
	<p>Voronoi 3D Τρισδιάστατο Voronoi</p> <p>P: σημεία B: όρια όγκου κατασκευής Voronoi C: όγκοι που δημιουργήθηκαν</p>
	<p>Scale Κλίμακα</p> <p>G: αρχική γεωμετρία C: κέντρο κλίμακας F: ποσοστό G: τελική γεωμετρία</p>

### 3.6 Οργανικό

(organic)

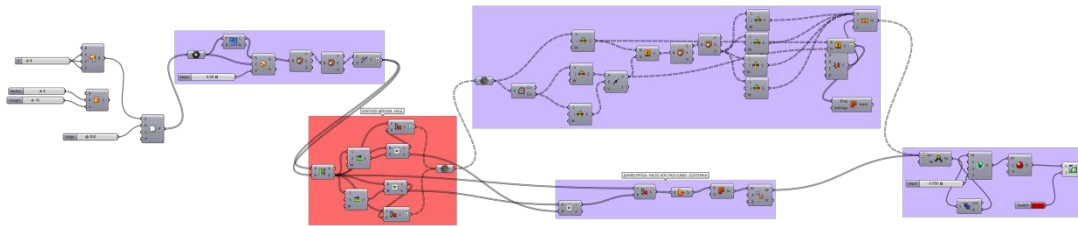
Οργανική δομή γεωμετρίας. Μπορεί να προσομοιάσει οργανικά μοντέλα όπως συνθετικά οστά.



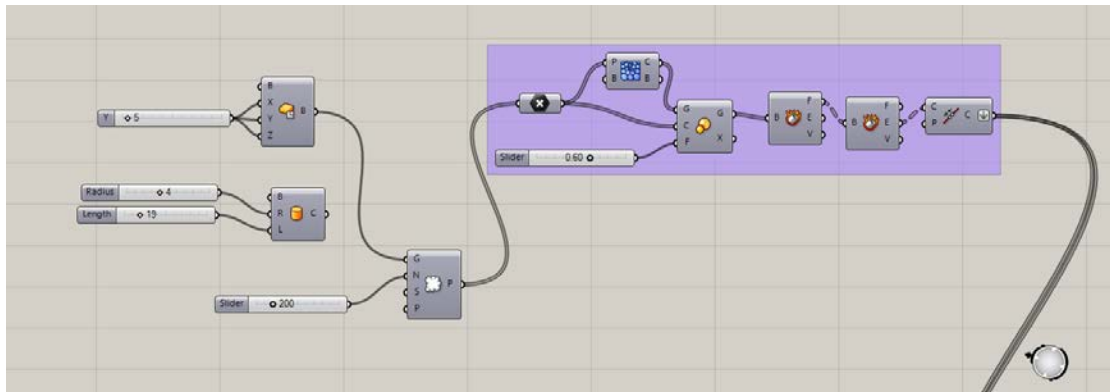
Εικόνα 26: Organic

Περιγραφή μοντέλου.

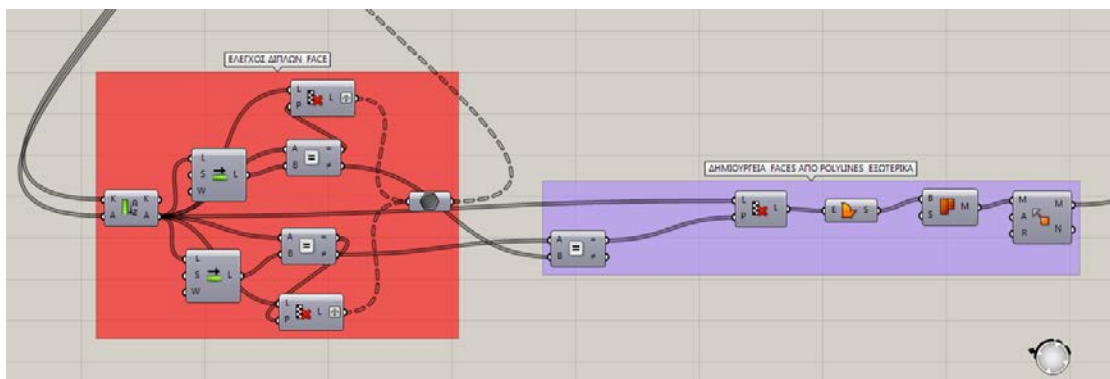
Ορίζουμε έναν αρχικό όγκο, στον οποίο τοποθετούμε τυχαία σημεία. Σε αυτά τα σημεία δημιουργούμε μια διάταξη Voronoi την οποία σμικρύνουμε και αποδομούμε. Αποδομούμε τα πρόσωπα που δημιουργήθηκαν και ενώνουμε τις ακμές τους με καμπύλη σε νέες επιφάνειες. Εξαλείφουμε τα διπλότυπα που δημιουργήθηκαν και από τα κέντρα των επιφανειών αυτών εξάγουμε τις ακμές των άκρων τους. Τις αποδομούμε και εξάγουμε τις κορυφές των ακμών εκ νέου, απ' όπου και δημιουργούμε ένα πλέγμα από αυτές. Από τις επιφάνειες που δημιουργήσαμε με τη μέθοδο Voronoi εξάγουμε καινούριες επιφάνειες εξωτερικά από τις οποίες δημιουργούμε και εκεί ένα νέο πλέγμα. Ενώνουμε τα δυο mesh και τα ομαλοποιούμε και με τη βοήθεια ενός μικρού script κατόπιν τα υποδιαιρούμε.



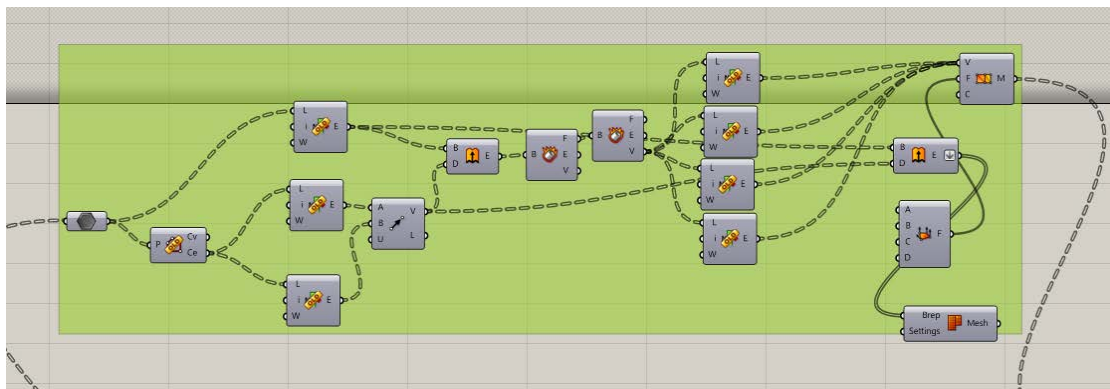
Εικόνα 27: Organic nodes



Εικόνα 28: Organic nodes (a)

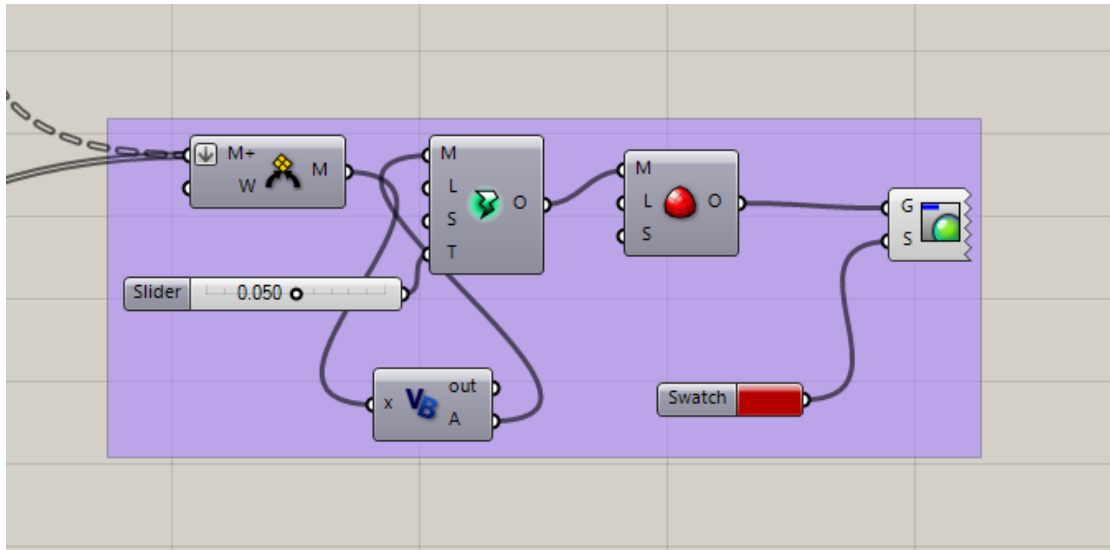


Εικόνα 29: Organic nodes (b)



Εικόνα 30: Organic nodes (c)

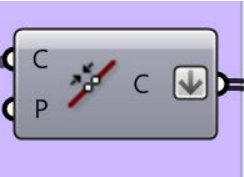
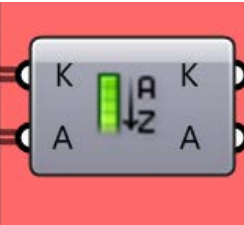
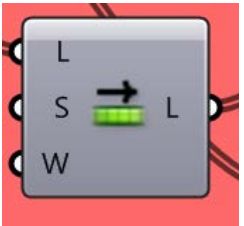
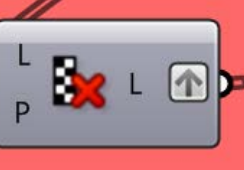
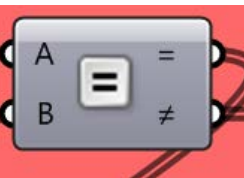

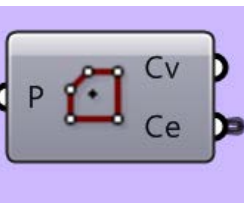
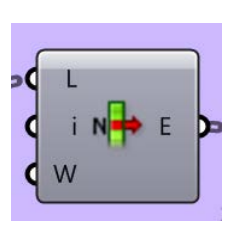


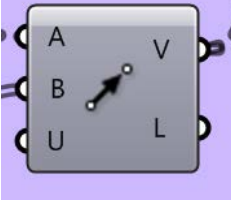

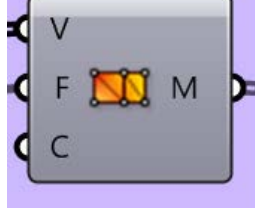
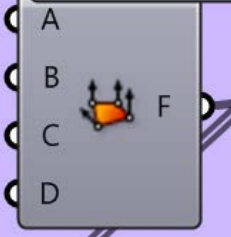

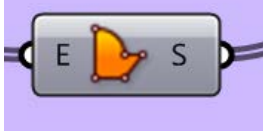
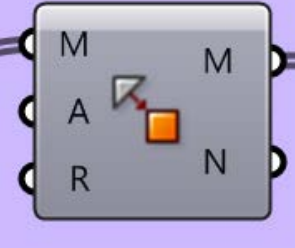





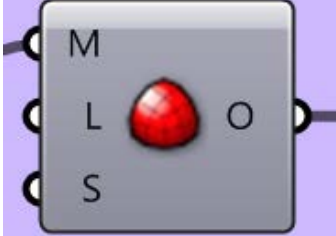

Εικόνα 31: Organic nodes (d)

Επεξήγηση στοιχείων διαγράμματος:

	<p>Center Box Ορίζουμε ένα παραλληλεπίπεδο με τις διαστάσεις που επιθυμούμε.</p> <p>X,Y,Z: διαστάσεις</p>
	<p>Populate geometry Γεμίζουμε με σημεία μια γεωμετρία</p> <p>G: γεωμετρία N: αριθμός σημείων</p>
	<p>Point Σύνολο σημείων</p>
	<p>Scale Κλίμακα</p> <p>G: αρχική γεωμετρία C: κέντρο κλίμακας F: ποσοστό G: τελική γεωμετρία</p>
	<p>Deconstruct Brep Αποδόμηση στερεού</p> <p>B: αρχικό στερεό F: face E: edges V: vertices</p>

	<p>Join curves Ένωση καμπυλών</p> <p>C: αρχική καμπύλη P: διατήρηση κατεύθυνσης C: εξαγόμενη καμπύλη</p>
	<p>Sort list Διάταξη λίστας</p> <p>K: τιμές προς διάταξη A: επιπλέον τιμές K: διατεταγμένες τιμές A: διατεταγμένες τιμές αθροιστικά</p>
	<p>Shift list Εναλλαγή λίστας</p> <p>L: Λίστα προς εναλλαγή S: μετατόπιση W: επικάλυψη τιμών L: εξαγόμενη λίστα</p>
	<p>Cull pattern Διαγραφή ομοίων τιμών από λίστα</p> <p>L: αρχική λίστα P: μοτίβο τιμών για διαγραφή L: εξαγόμενη λίστα</p>
	<p>Equal Ισότητα</p> <p>A,B: τιμές =: ίσες τιμές ≠ : διάφορες τιμές</p>
	<p>Data Δεδομένα</p> <p>συγκέντρωση δεδομενων</p>
	<p>Polygon center Κέντρο πολυγώνου</p> <p>P: πολύγωνο Cv: μέσος όρος κορυφών Ce: μέσος όρος ακμών</p>
	<p>List items Αντικείμενα ως λίστα</p> <p>L: βασική λίστα I: περιεχόμενα αντικείμενα W: επικάλυψη E: εξαγωγή αντικειμένων</p>

	<p>Vector to point Διάνυσμα από σημεία</p> <p>A: αρχικό σημείο B: σημείο κατεύθυνσης, τελικό V: διάνυσμα L: μήκος διανύσματος</p>
	<p>Extrude Εξώθηση</p> <p>B: περίγραμμα προς εξώθηση D: κατεύθυνση ως διάνυσμα E: αποτέλεσμα</p>
	<p>Mesh Πλέγμα</p> <p>V: κορυφές αντικειμένου F: τύπος πλέγματος ως λίστα C: χρωματισμός M: πλέγμα</p>
	<p>Mesh Quad Πλέγμα από τετράεδρα</p>
	<p>Mesh Brep Πλέγμα όγκου</p>
	<p>Planar Srf Δημιουργία επιφάνειας από μια συλλογή ακμών</p> <p>E: ακμές S: εξαγόμενη επιφάνεια</p>
	<p>Quadrangulate Τετραγωνισμός</p> <p>M: πλέγμα A: γωνία R: αναλογία M: τελικό πλέγμα N: αριθμός τετραέδρων</p>
	<p>Join meshes and weld (wavebird plug-in) Ένωση πλεγμάτων</p> <p>M: αρχικά πλέγματα M: τελικό πλέγμα</p>

	<p>Laplacian smoothing (wavebird plug-in) Εξομάλυνση μεθόδου laplace</p> <p>M: αρχικό πλέγμα T: λεπτότητα O: τελικό πλέγμα</p>
	<p>VB Script Κώδικας Visual Basic</p> <p>X: μεταβλητή Out: έξοδος A: έξοδος παραμέτρου A</p>
	<p>Catmull Clark Subdivision (wavebird plug-in) Υποπλέγμα Catmull Clark</p> <p>M: αρχικό πλέγμα L: αριθμός υποδιαιρέσεων S: ομαλοποίηση O: τελικό πλέγμα</p>
	<p>Custom preview Χρωματισμός αντικειμένου</p> <p>G: γεωμετρία S: χρώμα</p>

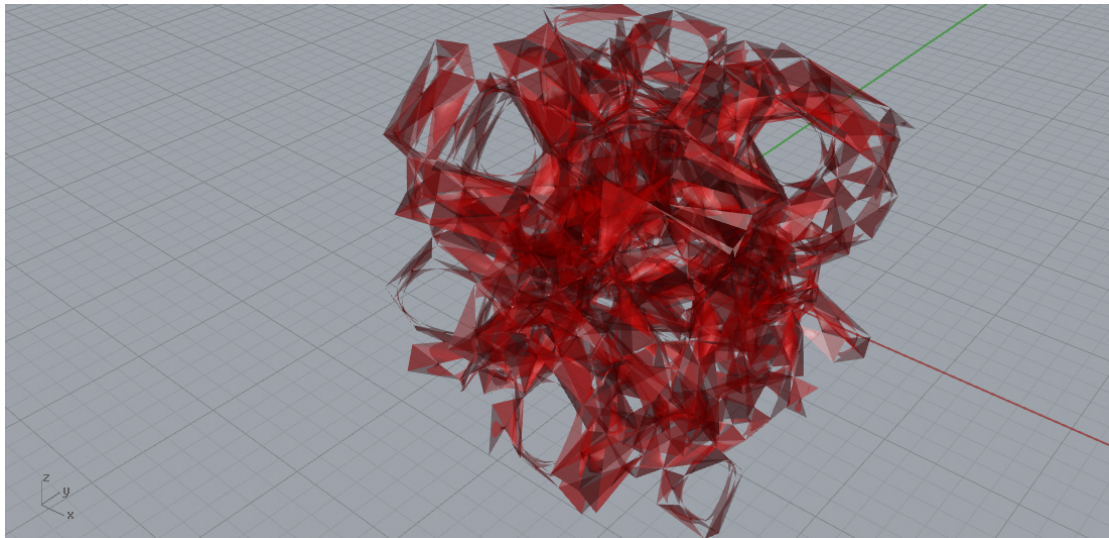
Ο κώδικας σε VB είναι ενσωματωμένος μαζί με το αρχείο του grasshopper ;

Organic.gh

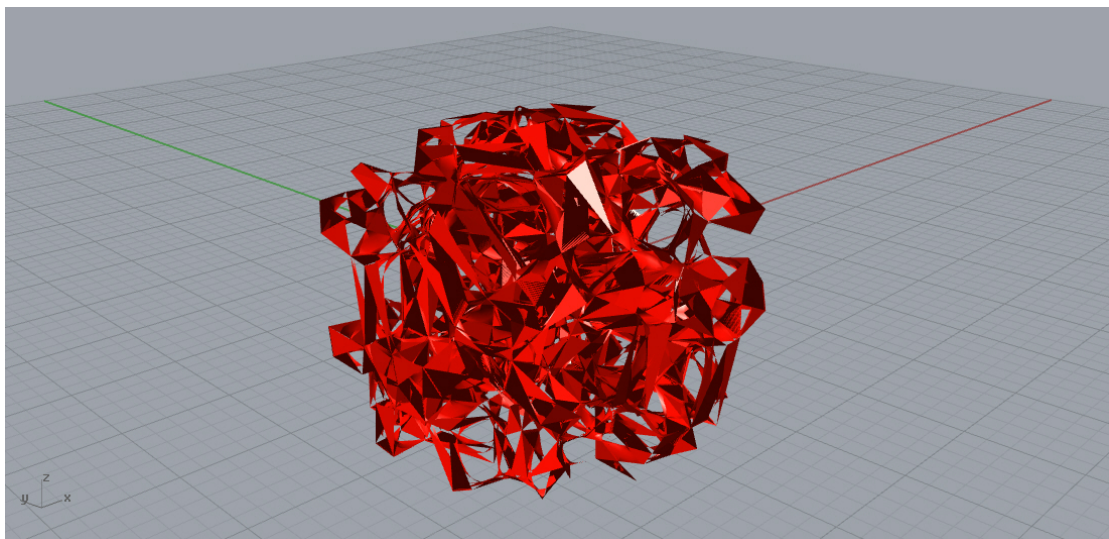
### 3.7 Τυχαίας μορφής

(random)

Αποτελεί το πιο τυχαίο μοντέλο που μπορεί να αναπαραχθεί. Η παραμετρική του σχεδίαση του επιτρέπει να αλλάζει ολοκληρωτικά την μορφή της γεωμετρίας.



Εικόνα 32: Random (a)

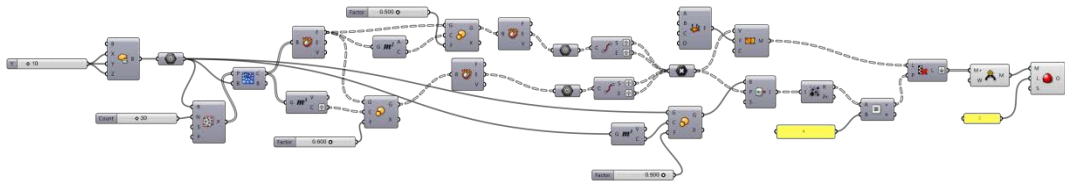


Εικόνα 33: Random (b)

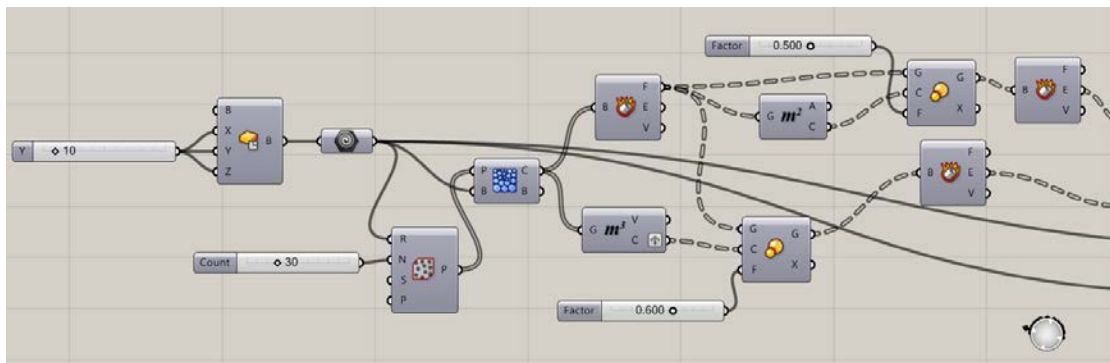
Περιγραφή μοντέλου.

Σε έναν αρχικό όγκο τοποθετούμε τυχαία σημεία. Από αυτά κατασκευάζουμε ένα δικτύωμα με τη μέθοδο Voronoi το οποίο αποδομούμε κρατώντας μόνο τις επιφάνειες. Κατόπιν σμικρύνουμε σε κλίμακα αυτές τις επιφάνειες, όσο και

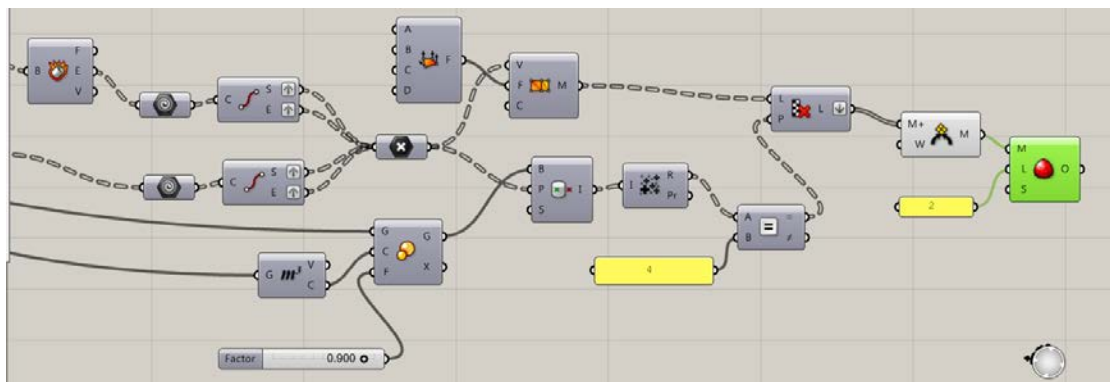
τους όγκους που δημιούργησε το πλέγμα Νοηοποι. Αποδομούμε και αυτά τα στοιχεία και κρατούμε μόνο τις ακμές όπου και τις εξάγουμε μόνο τα σημεία αυτών. Δημιουργούμε ένα πλέγμα από τα παραπάνω σημεία και αφαιρούμε από αυτό τα σημεία που αλληλεπιδρούν με τον αρχικό ορισμένο όγκο. Κατόπιν δημιουργούμε ένα νέο πλέγμα από τα παραπάνω.



Εικόνα 34: Random nodes (all)

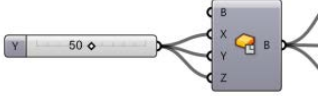

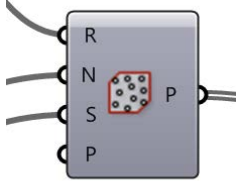

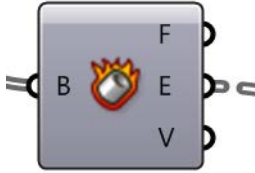

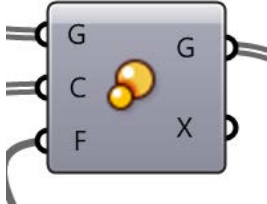



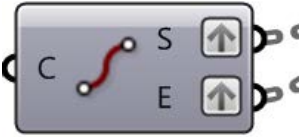
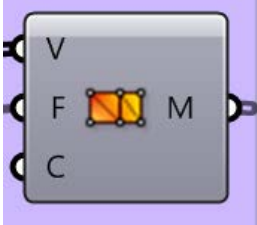
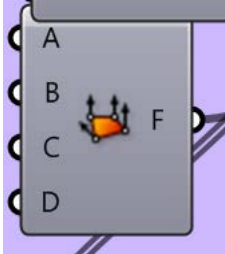
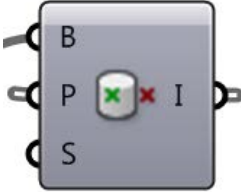

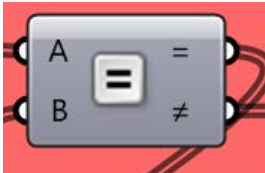
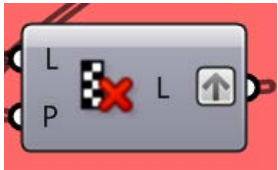
Εικόνα 35: Random nodes (a)




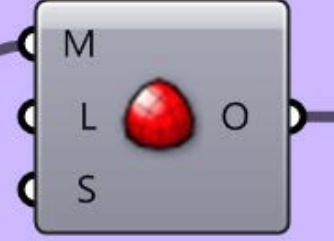
Εικόνα 36: Random nodes (b)

Επεξήγηση στοιχείων διαγράμματος:

	<p>Center Box Ορίζουμε ένα παραλληλεπίπεδο με τις διαστάσεις που επιθυμούμε.</p> <p>X,Y,Z: διαστάσεις</p>
	<p>Geometry Γεωμετρικό ορισμένο αντικείμενο</p>
	<p>Populate 3d Ορίζει τυχαία σημεία</p> <p>R: χώρος των σημείων N: αριθμός σημείων S: τυχαία διασπορά εισαγωγής</p>
	<p>Voronoi 3D Τρισδιάστατο Voronoi</p> <p>P: σημεία B: όρια όγκου κατασκευής Voronoi C: όγκοι που δημιουργήθηκαν</p>
	<p>Deconstruct Brep Αποδόμηση στερεού</p> <p>B: αρχικό στερεό F: face E: edges V: vertices</p>
	<p>Volume Όγκος</p> <p>G: γεωμετρία V: όγκος αντικειμένου</p>
	<p>Scale Κλίμακα</p> <p>G: αρχική γεωμετρία C: κέντρο κλίμακας F: ποσοστό G: τελική γεωμετρία</p>
	<p>Area Επιφάνεια</p> <p>A: επιφάνεια C: κέντρο επιφάνειας</p>

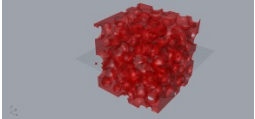
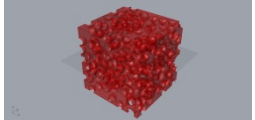
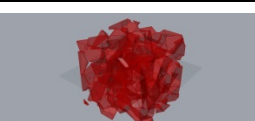

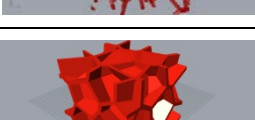
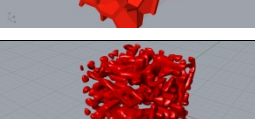
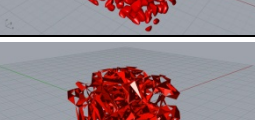
 <p>A block diagram for 'End points' with inputs C, S, and E. A red curved line connects S and E. Two upward-pointing arrows are on the right side.</p>	<p>End points Ακραία σημεία καμπύλης</p> <p>C: καμπύλη S: αρχικό σημείο E: τελικό σημείο</p>
 <p>A block diagram for 'Mesh' with inputs V, F, and C. A yellow square with a grid pattern is shown between F and M. An upward-pointing arrow is on the right side.</p>	<p>Mesh Πλέγμα</p> <p>V: κορυφές αντικειμένου F: τύπος πλέγματος ως λίστα C: χρωματισμός M: πλέγμα</p>
 <p>A block diagram for 'Mesh Quad' with inputs A, B, C, and D. A yellow square with four vertices is shown between C and F. An upward-pointing arrow is on the right side.</p>	<p>Mesh Quad Πλέγμα από τετράεδρα</p>
 <p>A block diagram for 'Point in brep' with inputs B, P, and S. A green 'x' and a red 'x' are shown between P and I. An upward-pointing arrow is on the right side.</p>	<p>Point in brep Σημεία στη γεωμετρία</p> <p>B: γεωμετρία P: σημεία ένταξης S: περιορισμός I: εξαγόμενα σημεία</p>
 <p>A block diagram for 'Mass addition' with inputs I, R, and Pr. A cluster of black plus signs is shown between I and R. An upward-pointing arrow is on the right side.</p>	<p>Mass addition Μαζικό άθροισμα</p> <p>I: εισαγωγή R: αποτέλεσμα Pr: μερικό αποτέλεσμα</p>
 <p>A block diagram for 'Equal' with inputs A and B. An equals sign (=) is shown between A and B. An upward-pointing arrow is on the right side.</p>	<p>Equal Ισότητα</p> <p>A,B: τιμές =: ίσες τιμές ≠ : διάφορες τιμές</p>
 <p>A block diagram for 'Cull pattern' with inputs L and P. A red 'x' is shown between L and L. An upward-pointing arrow is on the right side.</p>	<p>Cull pattern Διαγραφή ομοίων τιμών από λίστα</p> <p>L: αρχική λίστα P: μοτίβο τιμών για διαγραφή L: εξαγόμενη λίστα</p>



	<p>Join meshes and weld (wavebird plug-in) Ένωση πλεγμάτων</p> <p>M: αρχικά πλέγματα M: τελικό πλέγμα</p>
	<p>Catmull Clark Subdivision (wavebird plug-in) Υποπλέγμα Catmull Clark</p> <p>M: αρχικό πλέγμα L: αριθμός υποδιαίρεσεων S: ομαλοποίηση O: τελικό πλέγμα</p>

## Συγκεντρωτικά

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται όλα τα μοντέλα που παρήχθησαν.

Ονομασία	Εικόνα	Περιγραφή	Ιδιαιτερότητες
Βασικό μοντέλο (basic_01)		Βασική μορφή ελέγχου	Εύκολη προσομοίωση
Συνθετο (complex_01)		Όπως το βασικό αλλά με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα.	Εξαγωγή τύπου solid
Κλειστού τύπου με κενά Voronoi (voronoi_sphere)		Με κενά τύπου voronoi	Εξαγωγή τύπου solid
Ανοιχτού τύπου Voronoi (voronoi_open)		Τύπου δικτυώματος, ανοικτό	Εξαγωγή τύπου surface και όχι solid
Κλειστού τύπου Voronoi (voronoi_closed)		Αντίστροφο του ανοικτού τύπου παραπάνω	Εξαγωγή τύπου mesh και όχι solid
Οργανικό (organic)		Εξομοίωση οργανικών υλικών	Εξαγωγή τύπου mesh και όχι solid
Τυχαίας μορφής (random)		Μεγάλη δυνατότητα τυχαιότητας γεωμετρίας	Εξαγωγή τύπου mesh και όχι solid

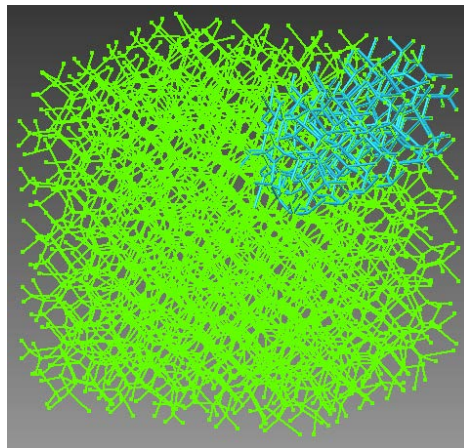
Από τα παραπάνω μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα τρία πρώτα μιας και το εξαγωγή αρχείο igs μετα από το bake στο grasshopper είναι solid και μπορεί να εισαχθεί απ ευθείας στο solidworks για ανάλυση . Τα υπόλοιπα μοντέλα εξάγονται ως surface ή mesh και απαιτούν περεταίρω plug-in από το rhino έτσι ώστε να μπορούν να αναλυθούν.

Μπορούν όμως εύκολα να ενσωματωθούν σε μια άλλη γεωμετρία και να εξαχθούν μαζί με αυτή σε περίπτωση που θέλουμε να προσομοιάσουμε συνολικά τη συμπεριφορά ενός μοντέλου.

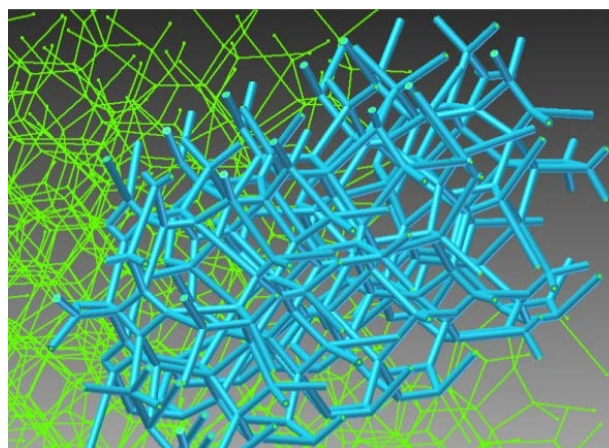
### 3.8 \* Επιπλέον μέσω κώδικα από matlab & Inventor

Επιπλέον των παραπάνω μοντέλων παρουσιάζεται και η δημιουργία ενός νέου μέσω κώδικα από το Matlab. Κατόπιν η εισαγωγή του κώδικα αυτού γίνεται ως αντικείμενο στο Inventor.

Ο κώδικας περιλαμβάνει την παραγωγή τυχαίων σημείων στο χώρο, τη δημιουργία διαγράμματος Voronoi, την διάταξη των σημείων στο εσωτερικό ενός κύβου, καθώς και την διατάραξη των σημείων σε μία καθορισμένη διάταξη.



Εικόνα 37: Extra model



Εικόνα 38: Extra model (λεπτομέρεια)

## A. Κώδικας για τη δημιουργία τυχαίας διασποράς σε έναν τρισδιάστατο χώρο.

```
% generate the simple inhibition process for a 3D
delta = 0.1;
% Get the vertices for the regions.
rx=[0; 1; 1; 0; 0; 1; 1; 0; 0];
ry=[0; 0; 1; 1; 0; 0; 1; 1; 0];
rz=[0; 0; 0; 0; 1; 1; 1; 1; 0];
n = 500;
D = zeros(n,3);
% Generate the first event.
D(1,:) = csbinproc3d(rx,ry,rz,1);
i = 1;
% Generate the other events.
while i<n
[sx,sy,sz] = csbinproc3d(rx, ry, rz, 1);
xt = [sx sy sz ; D(1:i,:)];
% Find the distance between the events
dist = pdist(xt);
% Find the distance between the candidate event
% and the others that have been generated already.
ind = find(dist(1:i) <= delta);
if isempty(ind)
% Then we keep the event.
i = i+1;
D(i,:) = [sx, sy, sz];
end
end
xx=D(:,1);
yy=D(:,2);
zz=D(:,3);
scatter3(xx,yy,zz,');
%%-----
function [x,y,z] = csbinproc3d(xp, yp, zp, n)
x = zeros(n,1);
y = zeros(n,1);
z = zeros(n,1);
i = 1;
minx = min(xp);
maxx = max(xp);
miny = min(yp);
maxy = max(yp);
minz = min(zp);
149
maxz = max(zp);
cx = maxx-minx;
cy = maxy - miny;
cz = maxz - minz;
while i <= n
xt = rand(1)*cx + minx;
yt = rand(1)*cy + miny;
zt = rand(1)*cz + minz;
k = inhull([xt,yt,zt],[xp,yp,zp]);
if k == 1
x(i) = xt;
y(i) = yt;
z(i) = zt;
i = i+1;
```

```

end
end
%%-----
function in = inhull(testpts,xyz,tess,tol)
p = size(xyz,2);
[n,c] = size(testpts);
if p ~= c
error 'testpts and xyz must have the same number of columns'
end
if p < 2
error 'Points must lie in at least a 2-d space.'
end
if (nargin<3) || isempty(tess)
tess = convhulln(xyz);
end
[nt,c] = size(tess);
if c ~= p
error 'tess array is incompatible with a dimension p space'
end
if (nargin<4) || isempty(tol)
tol = 0;
end
switch p
case 2
nrmls = (xyz(tess(:,1),:) - xyz(tess(:,2),:)) * [0 1;-1 0];
del = sqrt(sum(nrmls.^2,2));
degenflag = (del<(max(del)*10*eps));
if sum(degenflag)>0
warning('inhull:degeneracy',[num2str(sum(degenflag)), ...
'degenerate edges identified in the convex hull'])
nrmls(degenflag,:) = [];
nt = size(nrmls,1);
end
case 3
ab = xyz(tess(:,1),:) - xyz(tess(:,2),:);
ac = xyz(tess(:,1),:) - xyz(tess(:,3),:);
150
nrmls = cross(ab,ac,2);
degenflag = repmat(false,nt,1);
otherwise
nrmls = zeros(nt,p);
degenflag = repmat(false,nt,1);
for i = 1:nt
nullsp = null(xyz(tess(i,2:end),:) -
repmat(xyz(tess(i,1),:),p-1,1));
if size(nullsp,1)>1
degenflag(i) = true;
nrmls(i,:) = NaN;
else
nrmls(i,:) = nullsp;
end
end
if sum(degenflag)>0
warning('inhull:degeneracy',[num2str(sum(degenflag)), ...
'degenerate simplexes identified in the convex hull'])
nrmls(degenflag,:) = [];
nt = size(nrmls,1);
end
end
end
nrmlen = sqrt(sum(nrmls.^2,2));

```

```

nrmls = nrmls.*repmat(1./nrmlen,1,p);
center = mean(xyz,1);
a = xyz(tess(~degenflag,1),:);
dp = sum((repmat(center,nt,1) - a). *nrmls,2);
k = dp<0;
nrmls(k,:) = -nrmls(k,:);
aN = sum(nrmls.*a,2);
in = repmat(false,n,1);
memblock = 1e6;
blocks = max(1,floor(n/(memblock/nt)));
aNr = repmat(aN,1,length(1:blocks:n));
for i = 1:blocks
j = i:blocks:n;
if size(aNr,2) ~= length(j),
aNr = repmat(aN,1,length(j));
end
in(j) = all((nrmls*testpts(j,:) - aNr) >= -tol,1)';
end
151

```

## **B. Κώδικας για τη δημιουργία διαγράμματος Voronoi και εξαγωγή για ένα όγκο.**

```

% Create D.
[c,v] = voronoin(D);
% Create a matrix with the information of each cell
for i = 1:length(v);
nx{i} = c(v{i},:);
end
%%-----
xlswrite('optimusdata.xls',nx{1},'sheet1','A1')

```

## **Γ. Κώδικας δημιουργίας κανονικής διάταξης μέσα σε ένα κύβο.**

```

function [D] = kelvinpermute(l,r)
%kelvin permute
%let us calculate the locations of nuclei points inside a cube
% where, l is the number of cells along one length of the cube
% r is the distance among kelvin cells
%%-----
A=(0:r:l*r);
B=(r/2:r:l*r);
X=npermutek(A,3);
Y=npermutek(B,3);
D=[X;Y];
xx=D(:,1);
yy=D(:,2);
zz=D(:,3);
scatter3(xx,yy,zz,')
end
%%-----
% npermutek available at mathworks.com

```

## **Δ. Κώδικας δημιουργίας διαταραχής σημείων σε έναν τρισδιάστατο ορισμένο χώρο.**

```

function [DD] = perturbatekelvin(l,r,h)
%generate a matrix of regular arrangement of points perturbed

```

```

% a h magnitude.
A=(0:r:l*r);
B=(r/2:r:l*r);
n=(1+1)^3+l^3;
X=npermutek(A,3);
Y=npermutek(B,3);
D=[X;Y];
for i=1:n
152
P(i)=h*(2*rand-1);
end
xx=D(:,1);
xxx=xx+P';
for i=1:n
PP(i)=h*(2*rand-1);
end
yy=D(:,2);
yyy=yy+PP';
for i=1:n
PPP(i)=h*(2*rand-1);
end
zz=D(:,3);
zzz=zz+PPP';
DD=[xxx,yyy,zzz];
scatter3(xxx,yyy,zzz,');
end

```

### III. Στατική ανάλυση

#### 1. Περιγραφή ανάλυσης

Για τη στατική ανάλυση θα χρησιμοποιηθούν τα τρία αρχικά μοντέλα

-Βασικό (basic\_01)

-Σύνθετο (complex\_01)

-Κλειστού τύπου με κενά Voronoi (voronoi\_sphere)

Τα τρία αυτά μοντέλα θα εισαχθούν με τη μορφή αρχείου iges στο Solidworks. Για τη στατική ανάλυση θα εξομοιώσουμε ένα πείραμα θλίψης. Κάθε μοντέλο θα τοποθετηθεί ανάμεσα σε δύο πλάκες τιτανίου μεγάλης στιβαρότητας με τα εξής χαρακτηριστικά:

Ti-10V-2Fe-3Al Solution Treated Bar (SS)

Elastic modulus:  $1.099999999e+011$  N/m<sup>2</sup>

Poisson's ratio: 0.33

Shear modulus:  $4.099999968e+010$  N/m<sup>2</sup>

Mass density : 4650 kg/m<sup>3</sup>

Tensile strength: 1000000016 N/m<sup>2</sup>

Yield strength: 827370875.2 N/m<sup>2</sup>

Thermal expansion coefficient: 1e-005/K

Thermal conductivity: 7.8 W/(m·K)

Specific heat: 525 J/(kg·K)

Ενώ για το ίδιο το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί κράμα αλουμινίου με χαρακτηριστικά:

Aluminum Alloy 1060 Alloy

Elastic Modulus:  $6.9e+010$  N/m<sup>2</sup>

Poissons Ratio: 0.33

Shear Modulus:  $2.7e+010$  N/m<sup>2</sup>



Density: 2700 kg/m<sup>3</sup>

Tensile Strength: 68935600 N/m<sup>2</sup>

Yield Strength: 27574200 N/m<sup>2</sup>

Thermal Expansion Coefficient: 2.4e-005/K

Thermal Conductivity: 200 W/(m·K)

Στην επάνω πλάκα θα ασκηθεί δύναμη 1000N και η κάτω πλάκα θα λειτουργεί ως στήριξη. Τα αποτελέσματα πάνω στην πλάκα δεν θα μετρηθούν.

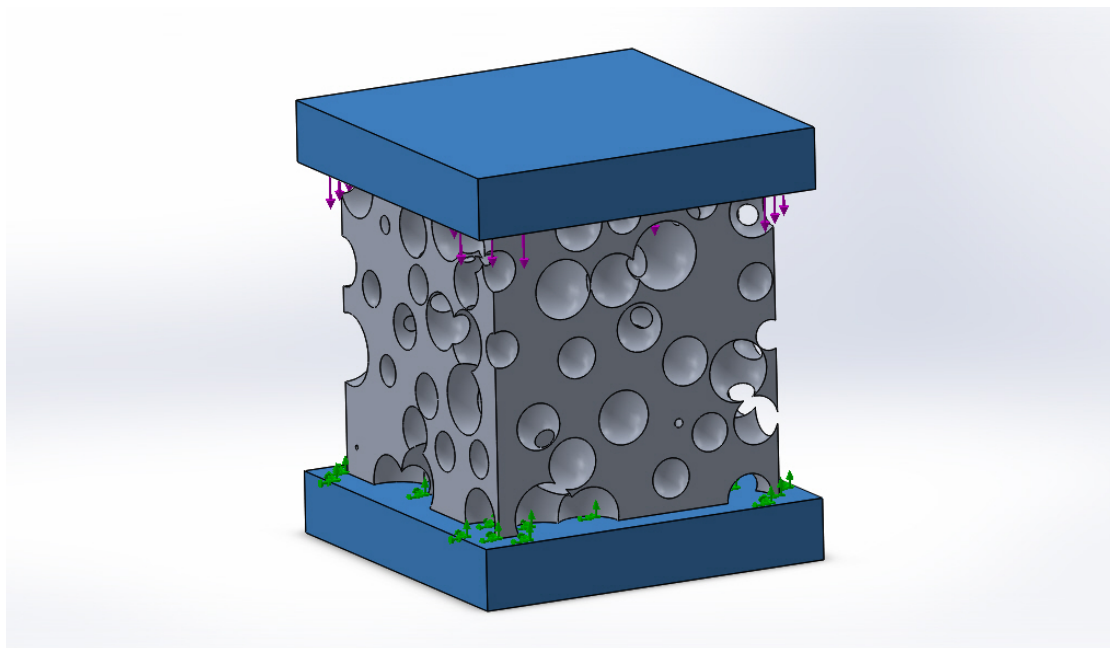
Το πλέγμα θα δημιουργηθεί μέσα από το Solidworks και τα αποτελέσματα που θα ζητήσουμε θα είναι

Τάση (Stress)

Παραμόρφωση (Strain)

Μετατόπιση (Displacement)

Το μοντέλο παρουσιάζεται ως εξής



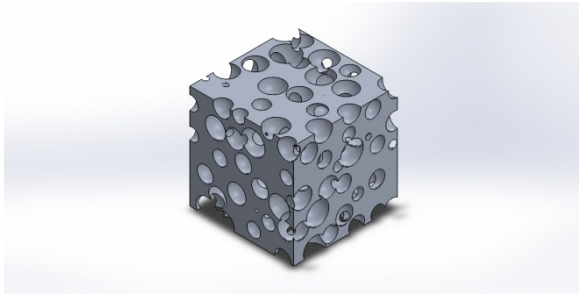
Εικόνα 39: Εξομείωση θλίψης

Κατόπιν θα γίνει εξαγωγή του αρχείου σε μορφή dat και θα εισαχθεί στο πρόγραμμα ANSA απ' όπου και θα γίνουν κατάλληλες παραμετροποιήσεις στο header ώστε να λυθεί το μοντέλο και με τους επιλυτές NASTRAN και Epilysis.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα δεδομένα της εξομοίωσης για τα τρία μοντέλα.

Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων θα γίνει από το μΕΤΑ και τα αυτά θα παρουσιαστούν στη συνέχεια των δεδομένων.

## 2. Δεδομένα εξομοίωσης



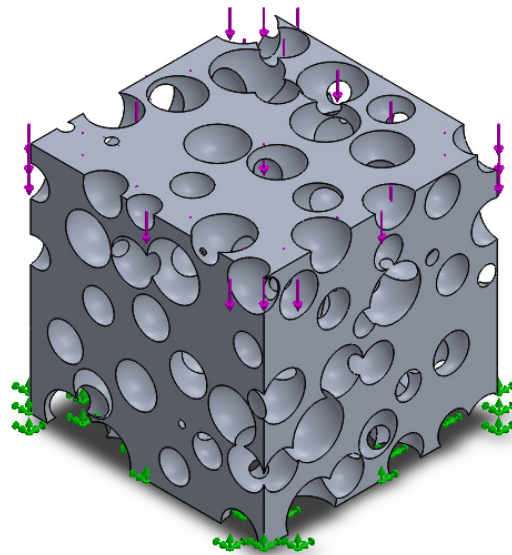
### Simulation of basic\_01

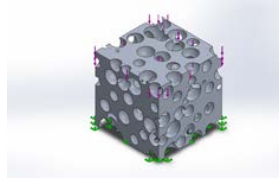
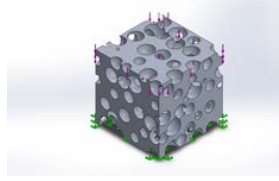
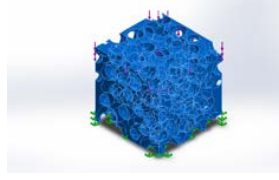
Study name: Study 1  
Analysis type: Static

#### Περιεχόμενα

MODEL INFORMATION .....
STUDY PROPERTIES .....
UNITS .....
MATERIAL PROPERTIES.....
LOADS AND FIXTURES .....
CONTACT INFORMATION .....
MESH INFORMATION.....
MESH INFORMATION – DETAILS .....

## Model Information



Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Boss-Extrude1 	Solid Body	Mass:1.3392 kg Volume:0.000288 m <sup>3</sup> Density:4650 kg/m <sup>3</sup> Weight:13.1242 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\plates.SLDPRT Sep 30 11:53:11 2016
Boss-Extrude2 	Solid Body	Mass:1.3392 kg Volume:0.000288 m <sup>3</sup> Density:4650 kg/m <sup>3</sup> Weight:13.1242 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\plates.SLDPRT Sep 30 11:53:11 2016
Imported1 	Solid Body	Mass:1.60204 kg Volume:0.000593347 m <sup>3</sup> Density:2700 kg/m <sup>3</sup> Weight:15.7 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\sphere_cheese_2.SLDPRT Sep 30 12:49:58 2016

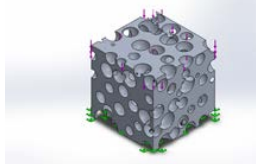
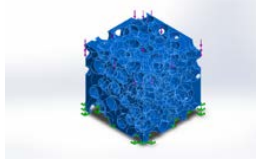
## Study Properties

<b>Study name</b>	Study 1
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Solid Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off
<b>Soft Spring:</b>	Off
<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	Off
<b>Compute free body forces</b>	On
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	Off
<b>Result folder</b>	SolidWorks document (C:\Users\KEO\Desktop\test\assemblies)

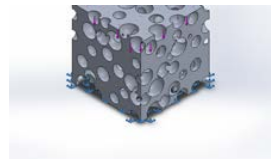
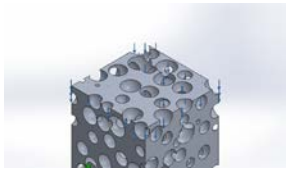
## Units

<b>Unit system:</b>	SI (MKS)
<b>Length/Displacement</b>	mm
<b>Temperature</b>	Kelvin
<b>Angular velocity</b>	Rad/sec
<b>Pressure/Stress</b>	N/m <sup>2</sup>

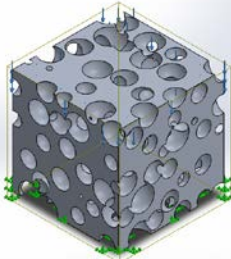
## Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: <b>Ti-10V-2Fe-3Al Solution Treated Bar (SS)</b></p> <p>Model type: <b>Linear Elastic Isotropic</b></p> <p>Default failure criterion: <b>Max von Mises Stress</b></p> <p>Yield strength: <b>8.27371e+008 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Tensile strength: <b>1e+009 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Elastic modulus: <b>1.1e+011 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Poisson's ratio: <b>0.33</b></p> <p>Mass density: <b>4650 kg/m<sup>3</sup></b></p> <p>Shear modulus: <b>4.1e+010 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Thermal expansion coefficient: <b>1e-005 /Kelvin</b></p>	<p><b>SolidBody 1(Boss-Extrude1)(plates-1), SolidBody 2(Boss-Extrude2)(plates-1)</b></p>
Curve Data:N/A		
	<p>Name: <b>1060 Alloy</b></p> <p>Model type: <b>Linear Elastic Isotropic</b></p> <p>Default failure criterion: <b>Unknown</b></p> <p>Yield strength: <b>2.75742e+007 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Tensile strength: <b>6.89356e+007 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Elastic modulus: <b>6.9e+010 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Poisson's ratio: <b>0.33</b></p> <p>Mass density: <b>2700 kg/m<sup>3</sup></b></p> <p>Shear modulus: <b>2.7e+010 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Thermal expansion coefficient: <b>2.4e-005 /Kelvin</b></p>	<p><b>SolidBody 1(Imported1)(sphere_cheese_2-1)</b></p>
Curve Data:N/A		

## Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details	
Fixed-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Fixed Geometry	
<b>Resultant Forces</b>			
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Reaction force(N)</b>	<b>0.00583541</b>	<b>996.483</b>	<b>-0.000309289</b>
<b>Reaction Moment(N·m)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Load name	Load Image	Load Details	
Force-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Apply normal force <b>Value:</b> -1000 N	

## Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties
Global Contact		<b>Type:</b> Bonded <b>Components:</b> 1 component(s) <b>Options:</b> Compatible mesh

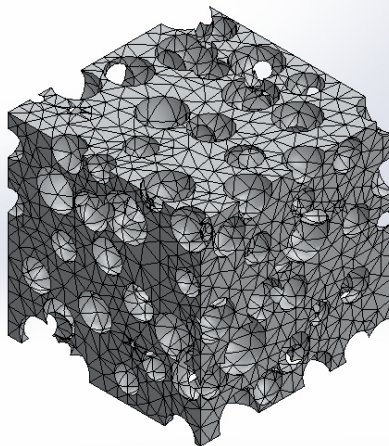
## Mesh Information

<b>Mesh type</b>	Solid Mesh
<b>Mesher Used:</b>	Curvature based mesh
<b>Jacobian points</b>	4 Points
<b>Maximum element size</b>	13.6991 mm
<b>Minimum element size</b>	4.56631 mm
<b>Mesh Quality</b>	High
<b>Remesh failed parts with incompatible mesh</b>	Off

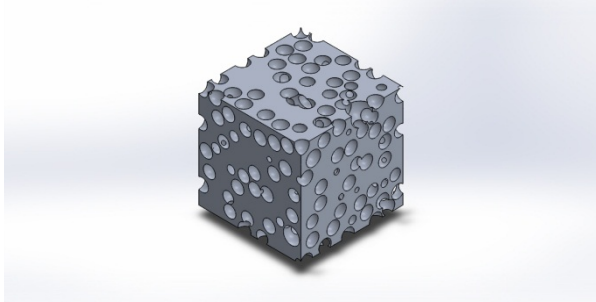
## Mesh Information - Details

<b>Total Nodes</b>	60327
<b>Total Elements</b>	36918
<b>Maximum Aspect Ratio</b>	55.169
<b>% of elements with Aspect Ratio &lt; 3</b>	95.2
<b>% of elements with Aspect Ratio &gt; 10</b>	0.184
<b>% of distorted elements(Jacobian)</b>	0
<b>Time to complete mesh(hh:mm:ss):</b>	00:00:17
<b>Computer name:</b>	KEO-TOSH

Model name: cheese\_sphere  
Study name: Study 1  
Meshtype: Solid mesh







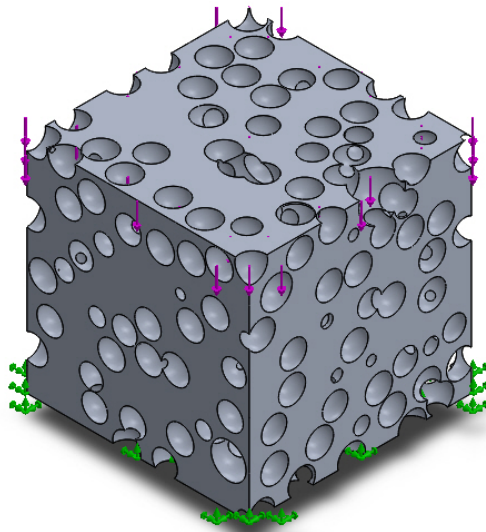
# Simulation of complex\_01

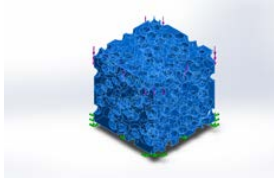
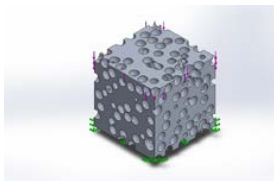

Study name: Study 1  
Analysis type: Static

## Περιεχόμενα

MODEL INFORMATION .....
STUDY PROPERTIES .....
UNITS .....
MATERIAL PROPERTIES.....
LOADS AND FIXTURES .....
CONTACT INFORMATION .....
MESH INFORMATION.....
MESH INFORMATION – DETAILS .....

## Model Information



Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Imported1 	Solid Body	Mass:2.11774 kg Volume:0.000784348 m <sup>3</sup> Density:2700 kg/m <sup>3</sup> Weight:20.7539 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\complex_01.SLDPRT T Sep 30 11:33:10 2016
Boss-Extrude1 	Solid Body	Mass:1.3392 kg Volume:0.000288 m <sup>3</sup> Density:4650 kg/m <sup>3</sup> Weight:13.1242 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\plates.SLDPRT Sep 30 11:53:11 2016
Boss-Extrude2 	Solid Body	Mass:1.3392 kg Volume:0.000288 m <sup>3</sup> Density:4650 kg/m <sup>3</sup> Weight:13.1242 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\plates.SLDPRT Sep 30 11:53:11 2016

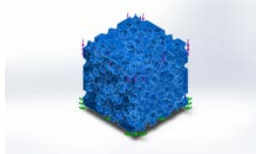
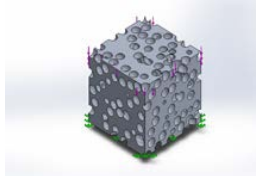
## Study Properties

<b>Study name</b>	Study 1
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Solid Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off
<b>Soft Spring:</b>	Off
<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	Off
<b>Compute free body forces</b>	On
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	Off
<b>Result folder</b>	SolidWorks document (C:\Users\KEO\Desktop\test\assemblies)

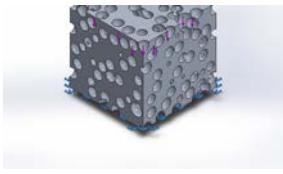
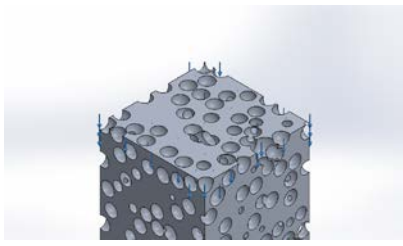
## Units

<b>Unit system:</b>	SI (MKS)
<b>Length/Displacement</b>	mm
<b>Temperature</b>	Kelvin
<b>Angular velocity</b>	Rad/sec
<b>Pressure/Stress</b>	N/m <sup>2</sup>

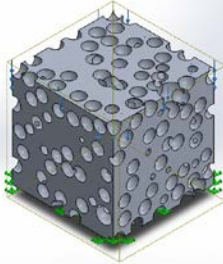
## Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	Name: <b>1060 Alloy</b> Model type: <b>Linear Elastic Isotropic</b> Default failure criterion: <b>Unknown</b> Yield strength: <b>2.75742e+007 N/m<sup>2</sup></b> Tensile strength: <b>6.89356e+007 N/m<sup>2</sup></b> Elastic modulus: <b>6.9e+010 N/m<sup>2</sup></b> Poisson's ratio: <b>0.33</b> Mass density: <b>2700 kg/m<sup>3</sup></b> Shear modulus: <b>2.7e+010 N/m<sup>2</sup></b> Thermal expansion coefficient: <b>2.4e-005 /Kelvin</b>	<b>SolidBody 1(Imported1)(complex_01-1)</b>
Curve Data:N/A		
	Name: <b>Ti-10V-2Fe-3Al Solution Treated Bar (SS)</b> Model type: <b>Linear Elastic Isotropic</b> Default failure criterion: <b>Max von Mises Stress</b> Yield strength: <b>8.27371e+008 N/m<sup>2</sup></b> Tensile strength: <b>1e+009 N/m<sup>2</sup></b> Elastic modulus: <b>1.1e+011 N/m<sup>2</sup></b> Poisson's ratio: <b>0.33</b> Mass density: <b>4650 kg/m<sup>3</sup></b> Shear modulus: <b>4.1e+010 N/m<sup>2</sup></b> Thermal expansion coefficient: <b>1e-005 /Kelvin</b>	<b>SolidBody 1(Boss-Extrude1)(plates-1), SolidBody 2(Boss-Extrude2)(plates-1)</b>
Curve Data:N/A		

## Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details	
Fixed-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Fixed Geometry	
<b>Resultant Forces</b>			
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Reaction force(N)</b>	<b>0.00162502</b>	<b>996.796</b>	<b>0.00249082</b>
<b>Reaction Moment(N-m)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Load name	Load Image	Load Details	
Force-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Apply normal force <b>Value:</b> -1000 N	

## Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties
Global Contact		<b>Type:</b> Bonded <b>Components:</b> 1 component(s) <b>Options:</b> Compatible mesh

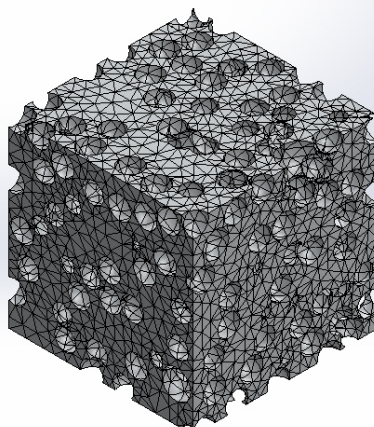
## Mesh Information

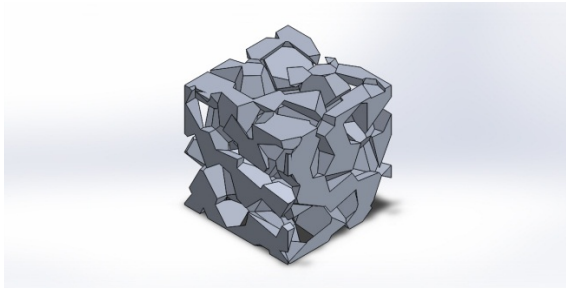
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Maximum element size	22.1654 mm
Minimum element size	4.43309 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off

## Mesh Information - Details

Total Nodes	125608
Total Elements	83191
Maximum Aspect Ratio	57.037
% of elements with Aspect Ratio < 3	95.9
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.118
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:26
Computer name:	125608

Model name: cheese\_good  
Study name: Study 1  
Mesh type: Solid mesh





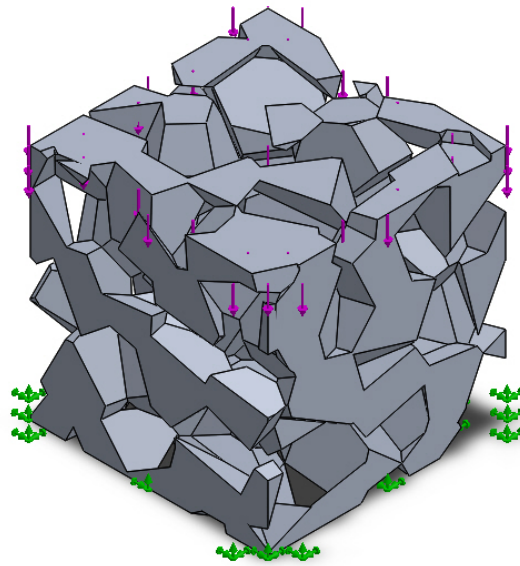
## Simulation of voronoi\_sphere

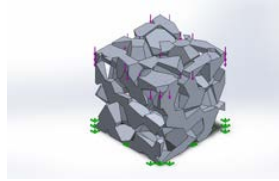
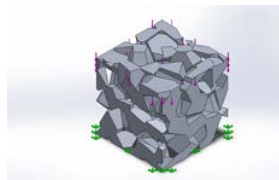
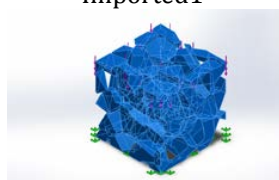
Study name: Study 1  
Analysis type: Static

### Περιεχόμενα

MODEL INFORMATION .....
STUDY PROPERTIES .....
UNITS .....
MATERIAL PROPERTIES.....
LOADS AND FIXTURES .....
CONTACT INFORMATION .....
MESH INFORMATION.....
MESH INFORMATION – DETAILS .....

## Model Information



Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Boss-Extrude1 	Solid Body	Mass:1.3392 kg Volume:0.000288 m <sup>3</sup> Density:4650 kg/m <sup>3</sup> Weight:13.1242 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\plates.SLDPRT Sep 30 11:53:11 2016
Boss-Extrude2 	Solid Body	Mass:1.3392 kg Volume:0.000288 m <sup>3</sup> Density:4650 kg/m <sup>3</sup> Weight:13.1242 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\plates.SLDPRT Sep 30 11:53:11 2016
Imported1 	Solid Body	Mass:1.30797 kg Volume:0.000484432 m <sup>3</sup> Density:2700 kg/m <sup>3</sup> Weight:12.8181 N	C:\Users\KEO\Desktop\test\solidworks\voronoi_sphere.SLDPRT Sep 30 12:32:48 2016



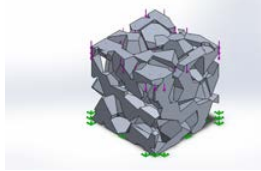
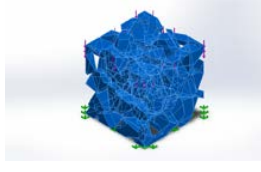
## Study Properties

<b>Study name</b>	Study 1
<b>Analysis type</b>	Static
<b>Mesh type</b>	Solid Mesh
<b>Thermal Effect:</b>	On
<b>Thermal option</b>	Include temperature loads
<b>Zero strain temperature</b>	298 Kelvin
<b>Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation</b>	Off
<b>Solver type</b>	FFEPlus
<b>Inplane Effect:</b>	Off
<b>Soft Spring:</b>	Off
<b>Inertial Relief:</b>	Off
<b>Incompatible bonding options</b>	Automatic
<b>Large displacement</b>	Off
<b>Compute free body forces</b>	On
<b>Friction</b>	Off
<b>Use Adaptive Method:</b>	Off
<b>Result folder</b>	SolidWorks document (C:\Users\KEO\Desktop\test\assemblies)

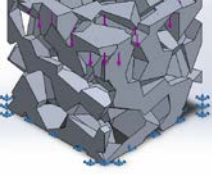
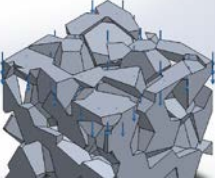
## Units

<b>Unit system:</b>	SI (MKS)
<b>Length/Displacement</b>	mm
<b>Temperature</b>	Kelvin
<b>Angular velocity</b>	Rad/sec
<b>Pressure/Stress</b>	N/m <sup>2</sup>

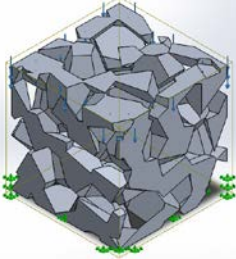
## Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	Name: <b>Ti-10V-2Fe-3Al Solution Treated Bar (SS)</b> Model type: <b>Linear Elastic Isotropic</b> Default failure criterion: <b>Max von Mises Stress</b> Yield strength: <b>8.27371e+008 N/m<sup>2</sup></b> Tensile strength: <b>1e+009 N/m<sup>2</sup></b> Elastic modulus: <b>1.1e+011 N/m<sup>2</sup></b> Poisson's ratio: <b>0.33</b> Mass density: <b>4650 kg/m<sup>3</sup></b> Shear modulus: <b>4.1e+010 N/m<sup>2</sup></b> Thermal expansion coefficient: <b>1e-005 /Kelvin</b>	<b>SolidBody 1(Boss-Extrude1)(plates-1), SolidBody 2(Boss-Extrude2)(plates-1)</b>
Curve Data:N/A		
	Name: <b>1060 Alloy</b> Model type: <b>Linear Elastic Isotropic</b> Default failure criterion: <b>Unknown</b> Yield strength: <b>2.75742e+007 N/m<sup>2</sup></b> Tensile strength: <b>6.89356e+007 N/m<sup>2</sup></b> Elastic modulus: <b>6.9e+010 N/m<sup>2</sup></b> Poisson's ratio: <b>0.33</b> Mass density: <b>2700 kg/m<sup>3</sup></b> Shear modulus: <b>2.7e+010 N/m<sup>2</sup></b> Thermal expansion coefficient: <b>2.4e-005 /Kelvin</b>	<b>SolidBody 1(Imported1)(voronoi_sphere-1)</b>
Curve Data:N/A		

## Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details	
Fixed-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Fixed Geometry	
<b>Resultant Forces</b>			
<b>Components</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Reaction force(N)</b>	<b>-0.00442447</b>	<b>1000.01</b>	<b>0.00511789</b>
<b>Reaction Moment(N·m)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Load name	Load Image	Load Details	
Force-1		<b>Entities:</b> 1 face(s) <b>Type:</b> Apply normal force <b>Value:</b> -1000 N	

## Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties
Global Contact		<b>Type:</b> Bonded <b>Components:</b> 1 component(s) <b>Options:</b> Compatible mesh

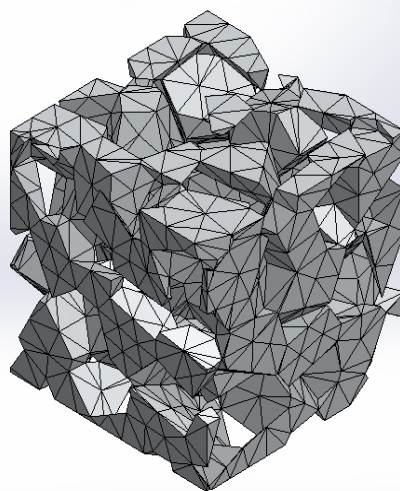
## Mesh Information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Maximum element size	12.4948 mm
Minimum element size	12.4948 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off

## Mesh Information - Details

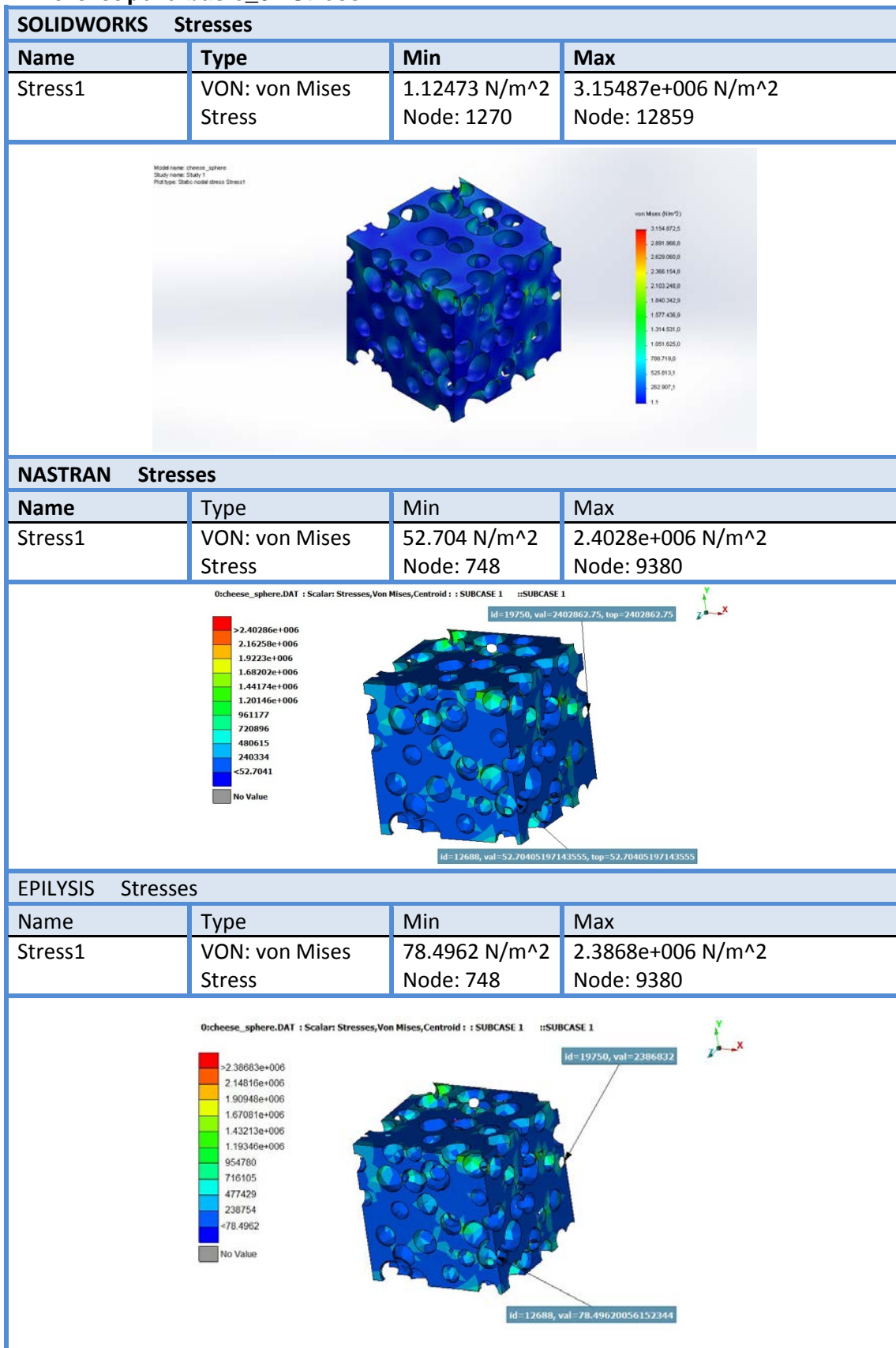
Total Nodes	15690
Total Elements	8661
Maximum Aspect Ratio	70.985
% of elements with Aspect Ratio < 3	80.6
% of elements with Aspect Ratio > 10	2.92
% of distorted elements(Jacobian)	0.0115
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:05
Computer name:	KEO-TOSH

Model name: voronoi\_cheese\_2  
Study name: Study 1  
Meshtype: Solid mesh



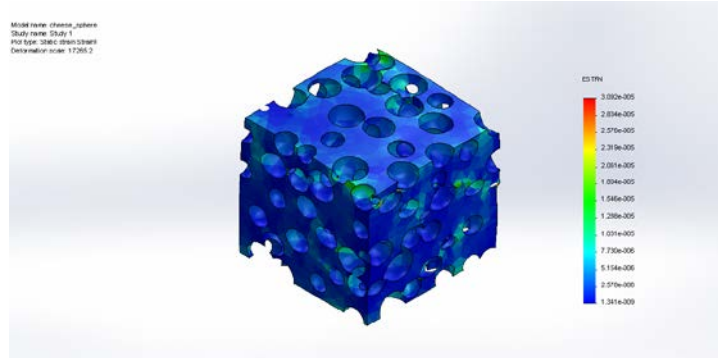
### 3. Αποτελέσματα εξομοίωσης

#### Αποτελέσματα basic\_01 Stress

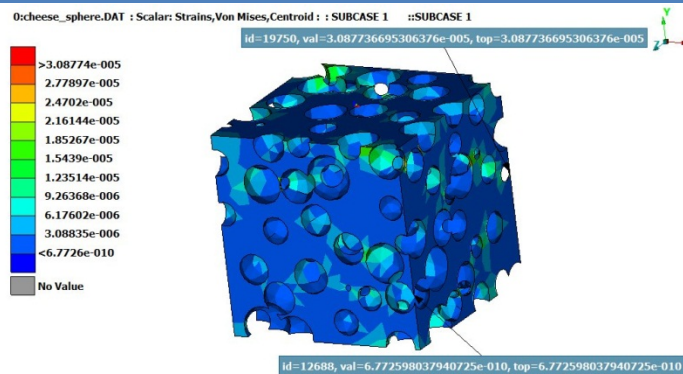


## Αποτελέσματα basic\_01 Strain

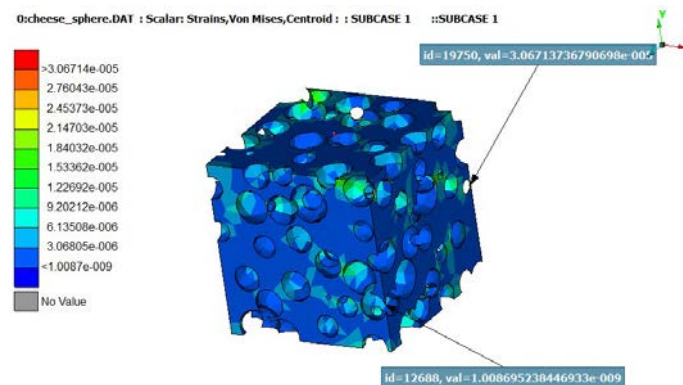
SOLIDWORKS Strains			
Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	8.76244e-012 Element: 2491	3.09164e-005 Element: 18025



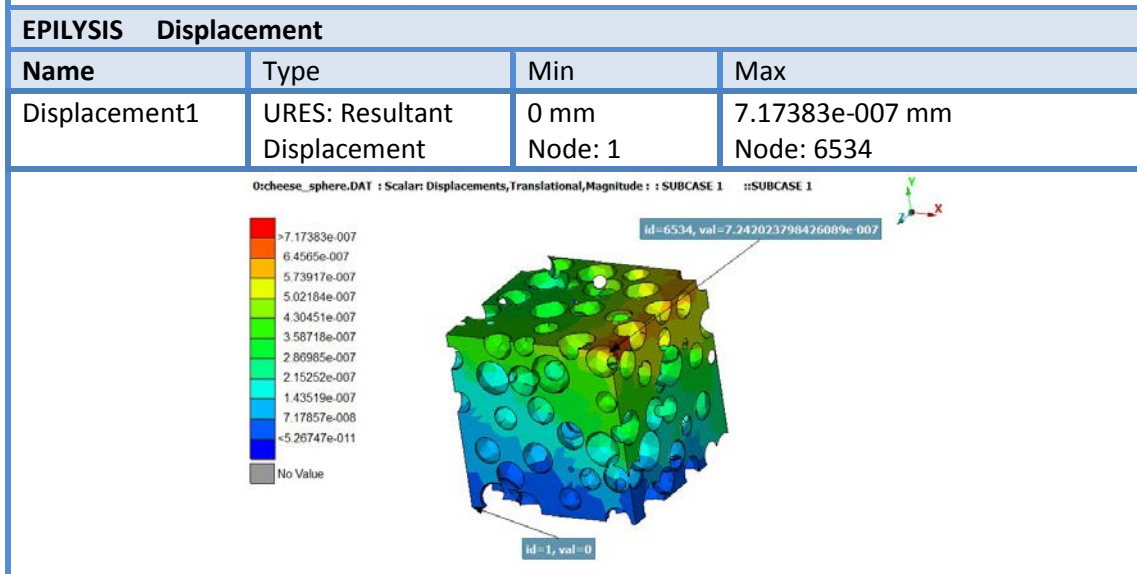
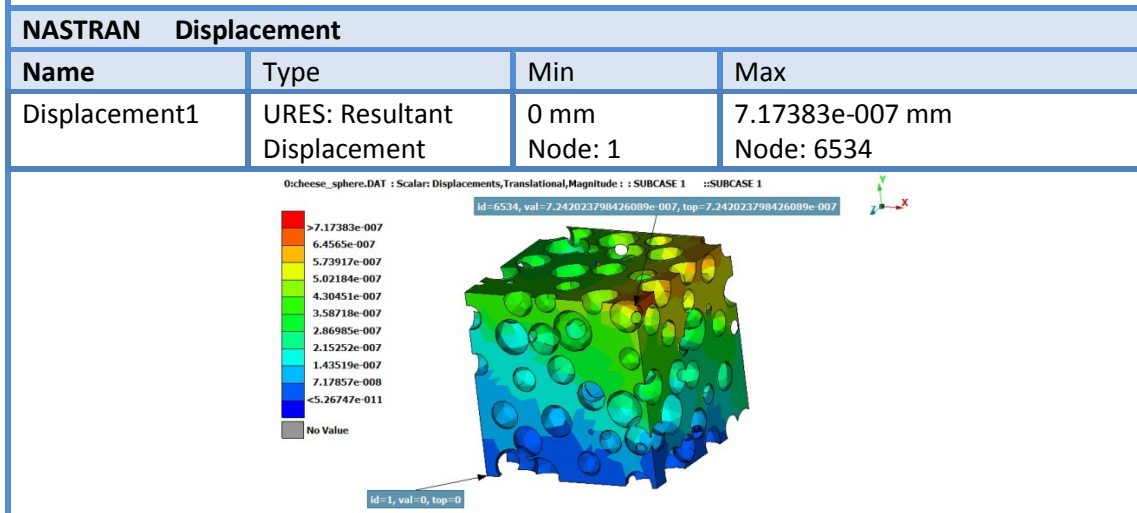
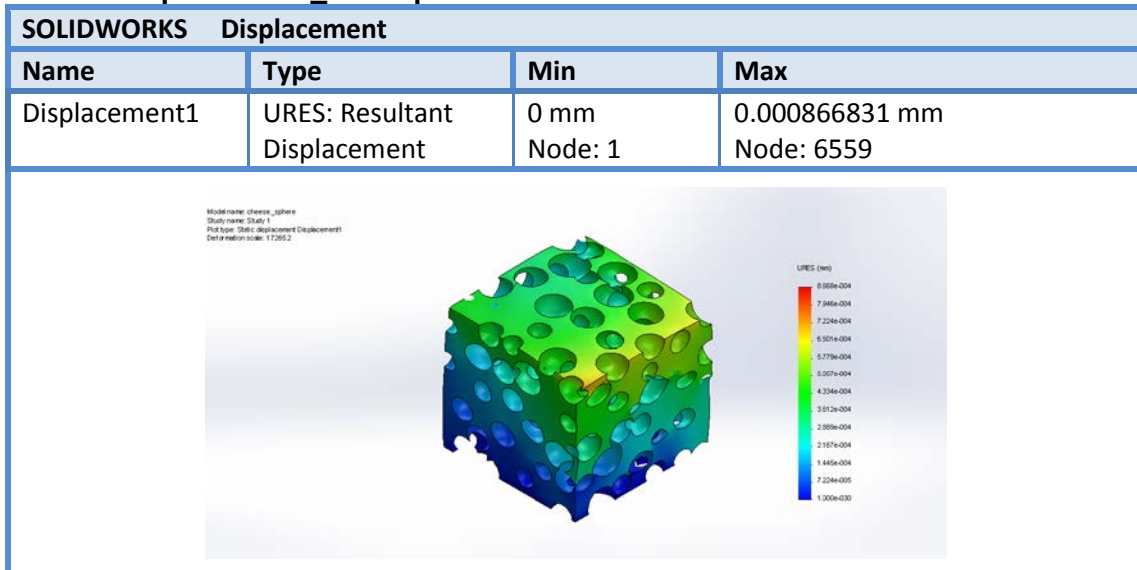
NASTRAN Strains			
Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	6.772e-010 Element: 12688	3.08774e-005 Element: 19750



EPILYSIS Strains			
Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	1.0087e-009 Element: 12688	3.06714e-005 Element: 19750

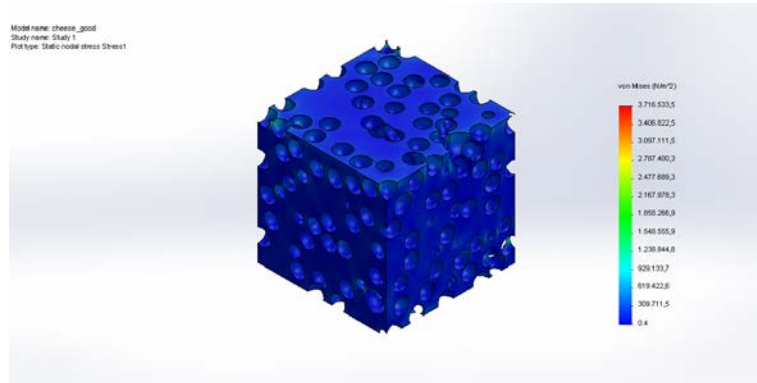


## Αποτελέσματα basic\_01 Displacement

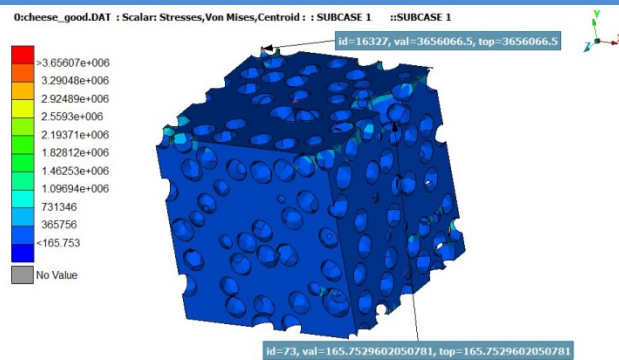


### Αποτελέσματα complex\_01 Stress

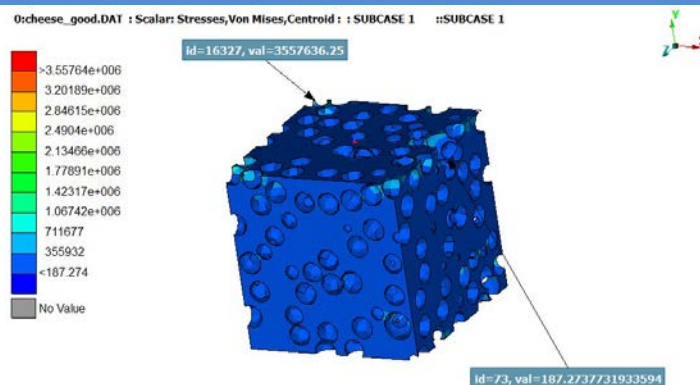
SOLIDWORKS Stresses			
Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0.409167 N/m <sup>2</sup> Node: 116057	3.71653e+006 N/m <sup>2</sup> Node: 16327



NASTRAN Stresses			
Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	165.7529 N/m <sup>2</sup> Node: 73	3.65607e+006 N/m <sup>2</sup> Node: 16327



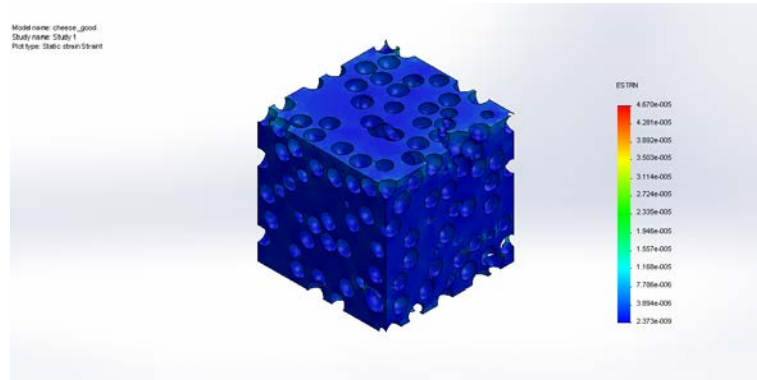
EPILYSIS Stresses			
Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	187.2738 N/m <sup>2</sup> Node: 73	3.55764e+006 N/m <sup>2</sup> Node: 16327



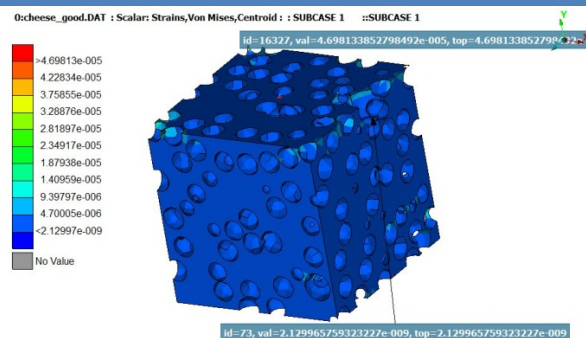


### Αποτελέσματα complex\_01 Strain

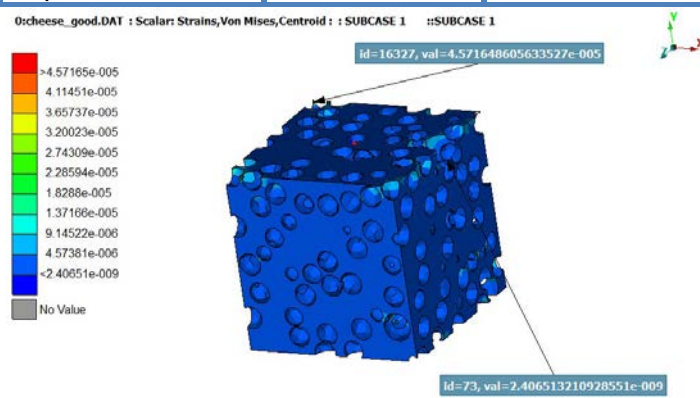
SOLIDWORKS Strains			
Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	1.56568e-012 Element: 78404	4.67021e-005 Element: 11730



NASTRAN Strains			
Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	2.12997e-009 Element: 73	4.69813e-005 Element: 16327

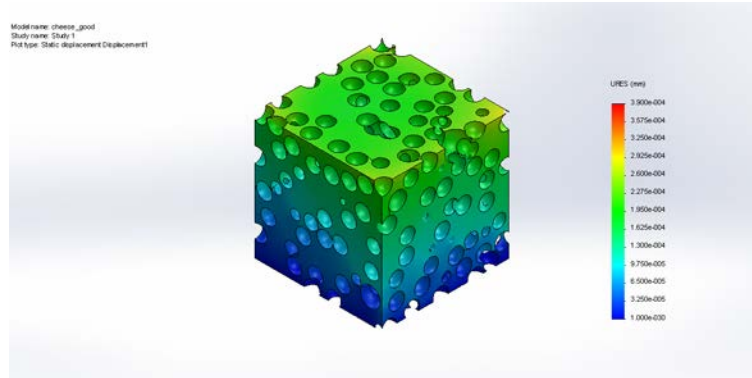


EPILYSIS Strains			
Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	2.40651e-009 Element: 73	4.57165e-005 Element: 16327

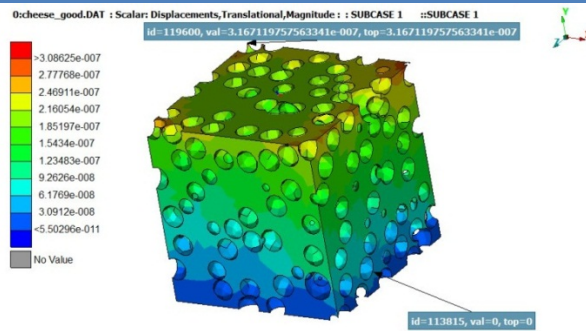


### Αποτελέσματα complex\_01 Displacement

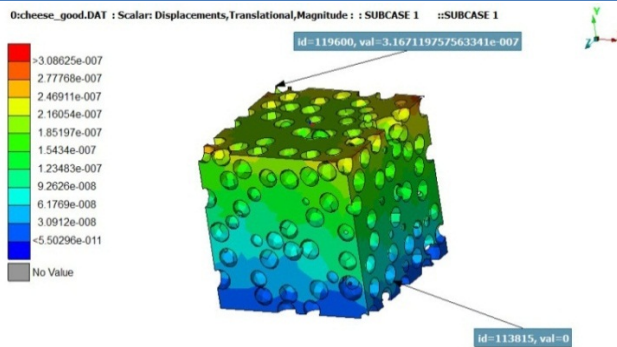
SOLIDWORKS Displacement			
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 113815	0.000390011 mm Node: 119648



NASTRAN Displacement			
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 113815	3.08625e-007 mm Node: 119600



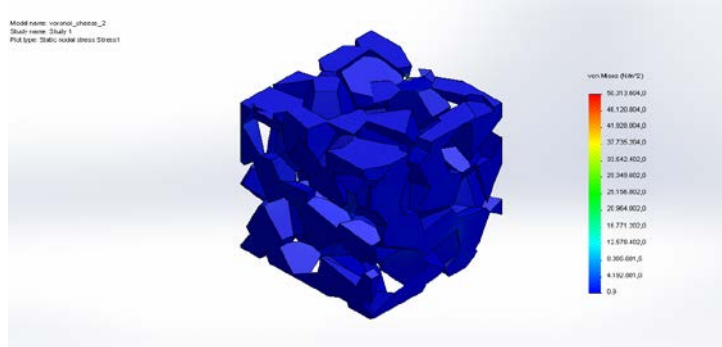
EPILYSIS Displacement			
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 113815	3.08625e-007 mm Node: 6534



## Αποτελέσματα voronoi\_sphere Stress

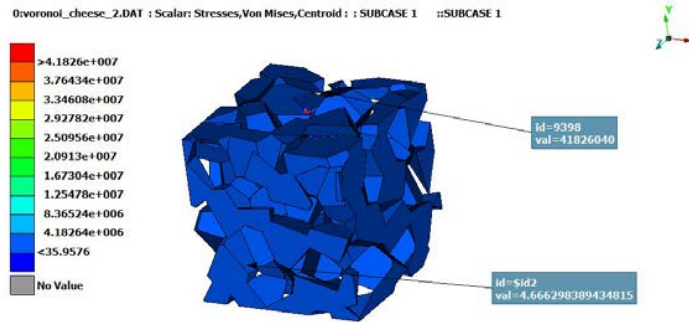
### SOLIDWORKS Stresses

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	0.850512 N/m <sup>2</sup> Node: 748	5.03136e+007 N/m <sup>2</sup> Node: 9380



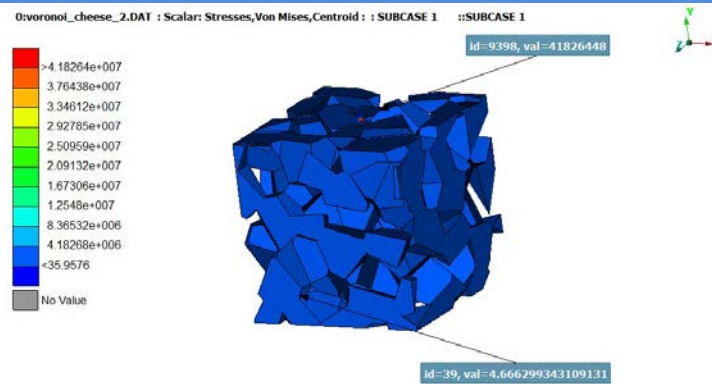
### NASTRAN Stresses

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	35.9576 N/m <sup>2</sup> Node: 39	4.1826e+007 N/m <sup>2</sup> Node: 9398



### EPILYSIS Stresses

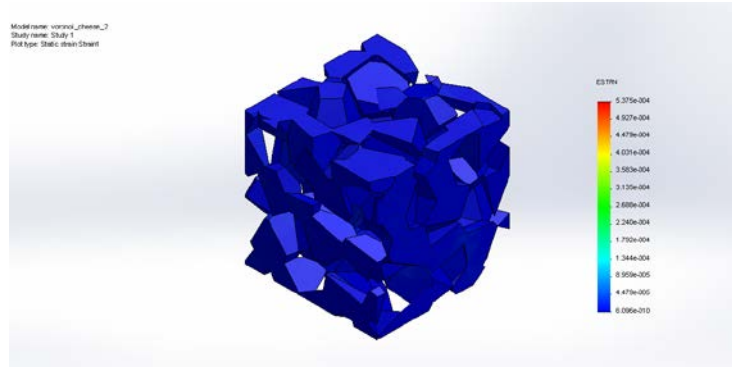
Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	35.9576 N/m <sup>2</sup> Node: 39	4.18624e+007 N/m <sup>2</sup> Node: 9398



### Αποτελέσματα voronoi\_sphere Strain

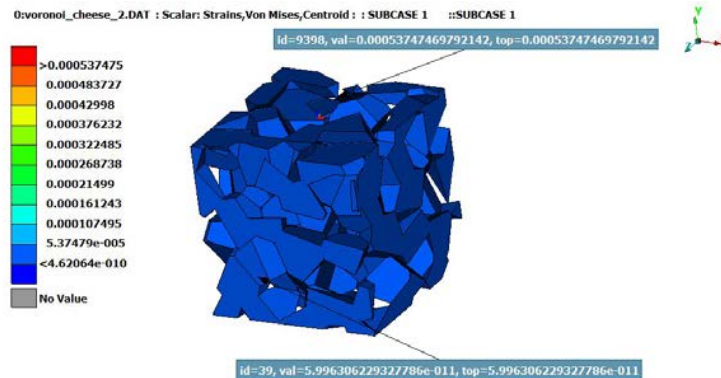
#### SOLIDWORKS Strains

Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	8.17258e-012 Element: 323	0.000537512 Element: 5880



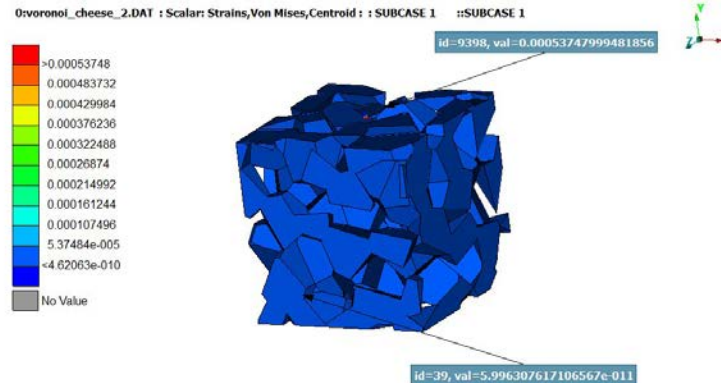
#### NASTRAN Strains

Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	4.62064e-010 Element: 39	0.000537475 Element: 9398



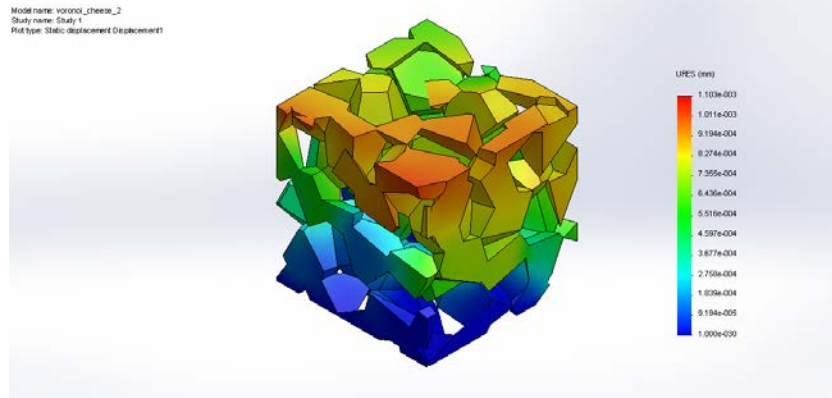
#### EPILYSIS Strains

Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	4.62063e-010 Element: 39	0.00053748 Element: 9398

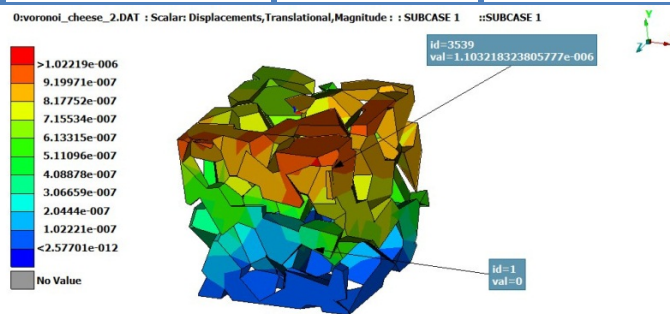


## Αποτελέσματα voronoi\_sphere Displacement

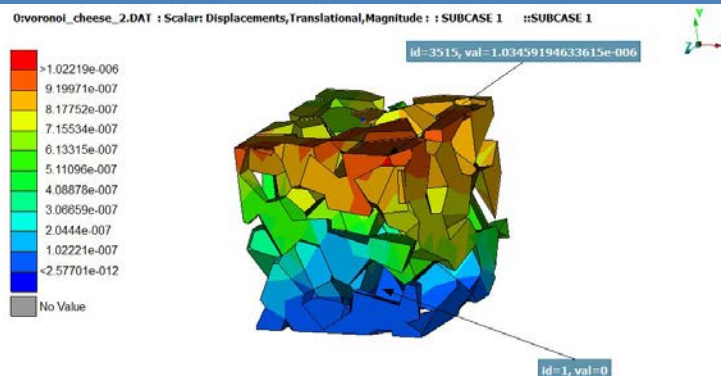
SOLIDWORKS Displacement			
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 1	0.00110324 mm Node: 3539



NASTRAN Displacement			
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 1	1.02219e-006 mm Node: 3539



EPILYSIS Displacement			
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 1	1.02219e-006 mm Node: 3515



#### 4. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα συγκριτικά μεταξύ των επιλυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

basic_01	Stress [N/m <sup>2</sup> ]		Strain		Displacement [mm]	
	min	max	min	max	min	max
Solidworks	1,12E+00	3,15E+06	8,76E-12	3,09E-05	0,00E+00	8,67E-04
NASTRAN	5,27E+01	2,40E+06	6,77E-10	3,09E-05	0,00E+00	7,17E-07
Epilysis	7,85E+01	2,39E+06	1,01E-09	3,07E-05	0,00E+00	7,17E-07

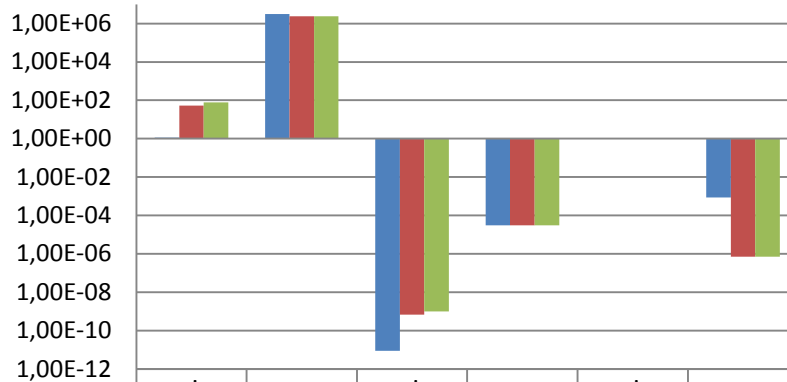
complex_01	Stress [N/m <sup>2</sup> ]		Strain		Displacement [mm]	
	min	max	min	max	min	max
Solidworks	4,09E-01	3,72E+06	1,57E-12	4,67E-05	0,00E+00	3,90E-04
NASTRAN	1,66E+02	3,66E+06	2,13E-09	4,70E-05	0,00E+00	3,09E-07
Epilysis	1,87E+02	3,56E+06	2,41E-09	4,57E-05	0,00E+00	3,09E-07

voronoi_spheere	Stress [N/m <sup>2</sup> ]		Strain		Displacement [mm]	
	min	max	min	max	min	max
Solidworks	8,51E-01	5,03E+07	8,17E-12	5,38E-04	0,00E+00	1,10E-03
NASTRAN	3,60E+01	4,18E+07	4,62E-10	5,37E-04	0,00E+00	1,02E-06
Epilysis	3,60E+01	4,19E+07	4,62E-10	5,37E-04	0,00E+00	1,02E-06

Οι διαφορές μεταξύ των επιλυτών είναι ελάχιστες εκτός από την μετατόπιση αλλά και αυτή κυμαίνεται σε τιμές κάτω από την E-03 σε mm οπότε και η διαφορά τους μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικές μεθόδους επίλυσης που χρησιμοποιεί ο κάθε επιλυτής. Οπότε και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα αποτελέσματα αυτά είναι διασταυρωμένα.

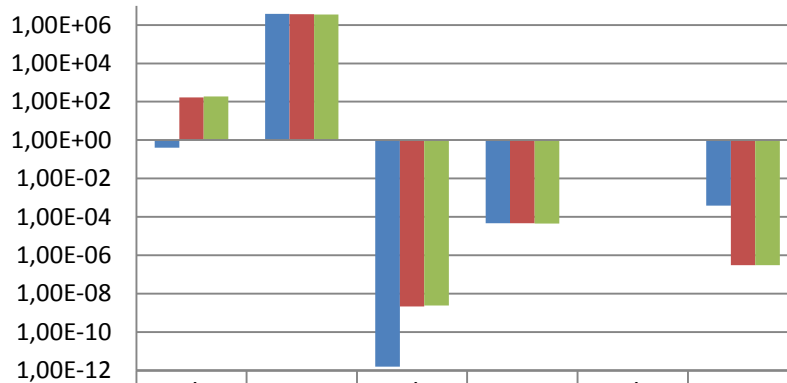
Τα αποτελέσματα φαίνονται και γραφικά παρακάτω.

### basic\_01

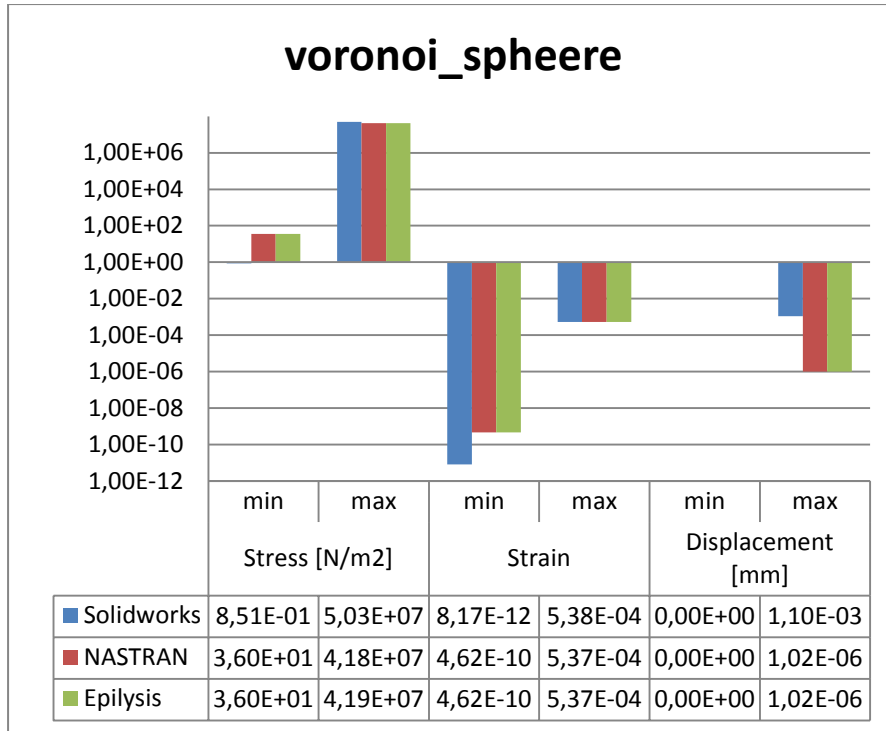


	min	max	min	max	min	max
	Stress [N/m <sup>2</sup> ]		Strain		Displacement [mm]	
■ Solidworks	1,12E+00	3,15E+06	8,76E-12	3,09E-05	0,00E+00	8,67E-04
■ NASTRAN	5,27E+01	2,40E+06	6,77E-10	3,09E-05	0,00E+00	7,17E-07
■ Epilysis	7,85E+01	2,39E+06	1,01E-09	3,07E-05	0,00E+00	7,17E-07

### complex\_01



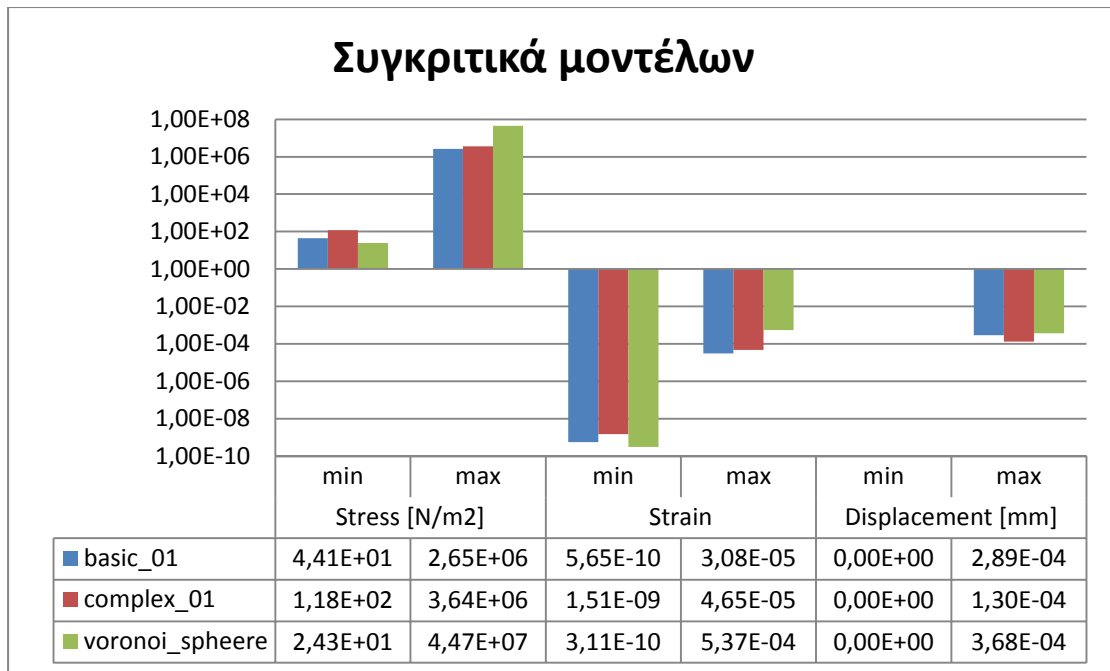
	min	max	min	max	min	max
	Stress [N/m <sup>2</sup> ]		Strain		Displacement [mm]	
■ Solidworks	4,09E-01	3,72E+06	1,57E-12	4,67E-05	0,00E+00	3,90E-04
■ NASTRAN	1,66E+02	3,66E+06	2,13E-09	4,70E-05	0,00E+00	3,09E-07
■ Epilysis	1,87E+02	3,56E+06	2,41E-09	4,57E-05	0,00E+00	3,09E-07



Επίσης μεταξύ των μοντέλων μπορούμε να κάνουμε και μία σύγκριση με μια μέση τιμή μεταξύ των επιλυτών, μιας και οι οριακές συνθήκες ήταν ακριβώς οι ίδιες (φόρτιση και στηρίξεις).

Μέσος όρος	Stress [N/m <sup>2</sup> ]		Strain		Displacement [mm]	
	min	max	min	max	min	max
basic_01	4,41E+01	2,65E+06	5,65E-10	3,08E-05	0,00E+00	2,89E-04
complex_01	1,18E+02	3,64E+06	1,51E-09	4,65E-05	0,00E+00	1,30E-04
voronoi_spheere	2,43E+01	4,47E+07	3,11E-10	5,37E-04	0,00E+00	3,68E-04





Συγκριτικά με ένα συμπαγές κομμάτι αλουμινίου ίδιας πυκνότητας το βάρος κάθε μοντέλου κυμαίνεται στο μισό περίπου.

Συμπαγές : 2,7 Kg

Μοντέλα : 1,3 ~ 1,6 Kg

Άρα με την αρχική αυτή μοντελοποίηση κερδίσαμε αρχικά το μισό σε βάρος χωρίς να υπερβαίνουμε τα όρια θραύσης του υλικού, όπως φαίνεται και από τους πίνακες με τις πληροφορίες.

Όριο θραύσης υλικού :  $8.27371e+008 \text{ N/m}^2$

Μέγιστη τάση εξομοίωσης:  $5,03E+07 \text{ N/m}^2$

## Συμπεράσματα

Η όλη εξομοίωση βέβαια μπορεί να βελτιστοποιηθεί ακόμη περισσότερο χρησιμοποιώντας καλύτερες μεθόδους πλέγματος , (hexas αντί tetras) και ακόμη μικρότερο μήκος στοιχείου (element length).

Επίσης από την παραμετροποίηση των αρχικών μοντέλων θα μπορούσαν να προκύψουν ακόμη πιο ρεαλιστικά μοντέλα προς εξομοίωση με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, τα οποία όμως απαιτούν και πολύ μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ , και αντίστοιχο χρόνο επίλυσης από κάθε επιλυτή.

## Βιβλιογραφία

1. **Παπαδόπουλος, Δημήτριος.** Μεταλλικοί αφροί. *Στρατιωτική Επιθεώρηση*. ΙΑΝ - ΦΕΒ 2004.
2. **SYCH, CLAUDIA LAUTENSACK AND TETYANA.** 3D IMAGE ANALYSIS OF OPEN FOAMS USING RANDOM. *Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik*. 11 Μάιος 2016.
3. **Tomasz Wejrzanowski, Jakub Skibinski, Jacek Szumbariski, K.J. Kurzydowski.** Structure of foams modeled by Laguerre - Voronoi tessellations. *Computational Materials Science*. Φεβρουάριος 2013.
4. **Gálvez, Oscar Efraín Sotomayor.** Numerical Modeling of Random 2D and 3D Structural Foams Using Voronoi Diagrams: A Study of Cell Regularity and Compression Response. *A thesis submitted to the Graduate Faculty of Auburn University*. 2013 Αύγουστος 2013.
5. **REDENBACH, CLAUDIA.** MODELLING FOAM STRUCTURES USING RANDOM TESSELLATIONS. *University of Applied Sciences Darmstadt and Fraunhofer ITWM*. Φεβρουάριος 2009.
6. **Νικόλαος, Καράπας.** Μεταλλικοί Αφροί. *ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ*. Ιούνιος 2015.
7. wikipedia.org. *Rhinoceros 3D*. [Ηλεκτρονικό] 29 Αύγουστος 2016.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros\\_3D](https://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros_3D).
8. wikipedia.org. *Grasshopper 3D*. [Ηλεκτρονικό] 26 Αύγουστος 2016.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Grasshopper\\_3D](https://en.wikipedia.org/wiki/Grasshopper_3D).
9. wikipedia.org. *Voronoi diagram*. [Ηλεκτρονικό] Σεπτέμβριος 2016.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Voronoi\\_diagram](https://en.wikipedia.org/wiki/Voronoi_diagram).
10. **ΚΑΡΑΜΑΝΕΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, ΚΟΡΟΥΛΗΣ ΒΑΣΙΛΗΣ.** ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ,ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ. *ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ*. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ : Μάιος 2005.



**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ**

**ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ &**

**ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**Διευθυντής: Καθηγητής Dr.-Ing. Κ. Δαυίδ**

**ΤΕΡΜΑ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ, 62124, ΣΕΡΡΕΣ**

**Τηλ. +30 23210 49157**