

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ-ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΓΚΛΩΒΙΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΗΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ

ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ : ΔΟΞΑΡΙΩΤΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ
ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ



ΒΟΛΟΣ 2015



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14520/1
Ημερ. Εισ.: 08-03-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ
2015
ΔΟΞ

Εξεταστική Επιτροπή

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Αθανάσιος Παπαθανασίου,
Αναπληρωτής Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος,
Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Παναγιώτης Τσιακάρης,
Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Αθανάσιο Παπαθανασίου, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την βοήθεια, τις γνώσεις, την παρότρυνση αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, για τη βοήθεια σε καίρια σημεία, την υποστήριξη και την παροχή πολύτιμων πληροφοριών θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Νικόλαο Πολυχρονόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος καθώς επίσης και τον μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Αναστάσιο Δροσάτο, για την ανταλλαγή πληροφοριών κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της επίδρασης του αέρα στην ροή ρευστού μέσα σε πορώδες μέσο. Η δημιουργία φυσαλίδας μέσα στο πορώδες είναι δυνατό να επηρεάσει μεγέθη όπως ταχύτητα, πίεση, διαπερατότητα. Το πώς γίνεται αυτή η μεταβολή θα δούμε παρακάτω εξετάζοντας ένα μοναδιαίο κελί(πλέγμα), το οποίο παρουσιάζεται σε μορφή τετραγώνου, που περιέχει μια πορώδης ζώνη σε μορφή κύκλου στην οποία θα τοποθετηθεί σκόπιμα μια φυσαλίδα αέρα σε διαφορετικά μεγέθη. Εξωτερικά του υλικού θα υπάρχει επίσης ένα κενό αέρα το οποίο καταλαμβάνεται από το ρευστό. Πιο συγκεκριμένα, το ρευστό εισέρχεται στο κελί με ταχύτητα και πίεση τις οποίες εμείς έχουμε ορίσει, διέρχεται από το πορώδες υλικό, συγκεκριμένης επίσης αρχικής διαπερατότητας, και εξέρχεται του πλέγματος. Η συμπεριφορά του ρευστού αναλόγως του μεγέθους της φυσαλίδας αέρα που σκόπιμα τοποθετείται στην ροή του, μας δίνει διαφορετικές κατανομές ταχυτήτων, πιέσεων, σε διάφορα σημεία του πλέγματος, καθώς και μεταβολή διαπερατότητας, μεγέθη στα οποία και θα αναφερθούμε. Στην αρχή της παρούσας εργασίας θα γίνει μια αναφορά στην γενική θεωρία του προβλήματος καθώς και στις εξισώσεις που το περιβάλλουν. Επίσης μια πρώτη επαφή με το πώς διαμορφώνονται οι κατανομές πιέσεων και ταχυτήτων στο πλέγμα με την ύπαρξη φυσαλίδας αέρα εσωτερικά του σύνθετου υλικού θα παρουσιασθούν στο αρχικό κομμάτι. Η γεωμετρία του πλέγματος είναι κατασκευασμένη με την βοήθεια του προγράμματος gmsh, κάτι που θα παρουσιασθεί σαν συνέχεια της εργασίας. Στο τελικό κομμάτι αφού έχουν ορισθεί επακριβώς οι

συνθήκες του προβλήματος θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα αριθμητικά καθώς και σε μορφή γραφημάτων για τα εξεταζόμενα μεγέθη. Οι απαραίτητοι υπολογισμοί έχουν γίνει με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος OpenFoam.

Περιεχόμενα

Εξεταστική επιτροπή	1
Ευχαριστίες	2
Περίληψη	2
Λίστα εικόνων	4
Κεφάλαιο 1. Περιγραφή του προβλήματος της εργασίας	7
1.1 Εισαγωγή στο σχήμα του πλέγματος	7
1.2 Προφίλ ταχυτήτων-Πτώση πίεσης.....	9
1.3 Προγράμματα που θα χρησιμοποιηθούν	11
Κεφάλαιο 2. Θεωρία για τα πορώδη υλικά	12
2.1 Γενική αναφορά στα πορώδη υλικά	12
2.2 Το πορώδες πλέγμα	17
2.3 Δημιουργία φυσαλίδων σε πορώδη μέσα	18
2.4 Ταξινόμηση κενών αέρα	19
2.5 Πορώδες (porosity)	21
2.6 Διαπερατότητα (Permeability)	24
2.7 Παρουσίαση του νόμου του Darcy	26
2.8 Τοπολογία του πορώδους πλέγματος	28
2.9 Καθορισμός του μεγέθους του πόρου	29
Κεφάλαιο 3. Δημιουργία του πλέγματος-Gmsh	30

3.1 Τοποθέτηση σημείων στο Gmsh	31
3.2 Δημιουργία γραμμών-κύκλων στο Gmsh	33
3.3 Επιφάνειες στο Gmsh (εντολές Ruled Surface-Recombine Surface)	37
3.4 Δημιουργία 3D επιφανειών στο Gmsh (εντολές Extrude-Physical Surface)	41
Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση της λειτουργίας του OpenFoam	44
4.1 Εισαγωγή στο OpenFoam	44
4.2 Λύτης PorousSimpleFoam	45
4.3 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων	46
4.4 Ορισμός συνθηκών	46
Κεφάλαιο 5. Παρουσίαση αποτελεσμάτων	47
5.1 Παρουσίαση πλεγμάτων	50
5.2 Πρόβλεψη διαπερατότητας	54
5.3 Μεταβολή ταχύτητας	57
5.4 Μεταβολή πίεσης (dp/dx)	60
5.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων	64
Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία	65

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1 : Μοναδιαίο κελί με φυσαλίδα αέρα στο κέντρο του σύνθετου υλικού	8
Εικόνα 2 : Μοναδιαίο κελί χωρίς φυσαλίδα αέρα στο σύνθετο υλικό	9
Εικόνα 3 : Προφίλ ταχυτήτων του ρευστού χωρίς φυσαλίδα αέρα στο πορώδες υλικό.....	10
Εικόνα 4 : Πτώση πίεσης χωρίς φυσαλίδα αέρα στο σύνθετο υλικό	11
Εικόνα 5 : Πορώδη φίλτρα, αριστερά φίλτρο διαλύτης, δεξιά πολυμερές φίλτρο	13
Εικόνα 6 : Ρυθμιστής πίεσης με πορώδες υλικό	14

Εικόνα 7 : Ελεγκτές φλόγας	15
Εικόνα 8 : Πορώδης διασκορπιστήρας	15
Εικόνα 9 : Πορώδεις σιγαστήρες	16
Εικόνα 10 : Δέσμες ινών χωριζόμενες από κενές περιφέρειες σε σύνθετο υλικό	18
Εικόνα 11 : Φυσαλίδα και κενά αέρα σε πορώδη υλικά στο μέτωπο ροής	19
Εικόνα 12 : Ξηρό σημείο, σφαιρικές φυσαλίδες, κυλινδρικές φυσαλίδες σε πορώδη υλικά	20
Εικόνα 13 : Μικρό και μεγάλο κενό στις ινώδεις ενισχύσεις	21
Εικόνα 14 : Πείραμα του Darcy.....	27
Εικόνα 15 : Παραδείγματα δομής πορώδους υλικού	30
Εικόνα 16 : Αποτελέσματα χρήσης σημείων Gmsh	33
Εικόνα 17 : Screen shot από τις γραμμές του σχήματος στο Gmsh	35
Εικόνα 18 : Οι κύκλοι και οι γραμμές στο υπολογιστικό πλέγμα μέσω του Gmsh .	37
Εικόνα 19 : Η τελική μορφή του υπολογιστικού πλέγματος στο Gmsh (3D)	44
Εικόνα 20 : Απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε πορώδες υλικό	50
Εικόνα 21 : Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 0% φυσαλίδα αέρα	51
Εικόνα 22 : Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 8% φυσαλίδα αέρα	51
Εικόνα 23 : Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 20% φυσαλίδα αέρα	52
Εικόνα 24 : Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 32% φυσαλίδα αέρα	52
Εικόνα 25 : Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 50% φυσαλίδα αέρα	53
Εικόνα 26 : Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 80% φυσαλίδα αέρα	53
Εικόνα 27 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 75% του πλέγματος	55

Εικόνα 28 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 70% του πλέγματος	55
Εικόνα 29 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 65% του πλέγματος	56
Εικόνα 30 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 60% του πλέγματος	56
Εικόνα 31 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 50% του πλέγματος	57
Εικόνα 32 : Ο εξεταζόμενος άξονας για την μεταβολή της ταχύτητας στο κέντρο υπολογιστικού πλέγματος	58
Εικόνα 33 : Καμπύλες ταχυτήτων της U_x κατά μήκος του y -άξονα στο κέντρο του σχήματος (50% πορώδες υλικό)	59
Εικόνα 34 : Καμπύλες ταχυτήτων της U_x κατά μήκος του y -άξονα στο κέντρο του σχήματος (50% πορώδες υλικό)	59
Εικόνα 35 : Διάγραμμα μεταβολής πίεσης με τον εξεταζόμενο για μεταβολή πίεσης να περνά μέσα από πορώδες υλικό και φυσαλίδα	60
Εικόνα 36 : Διάγραμμα μεταβολής πίεσης με τον εξεταζόμενο άξονα να περνά μέσα από πορώδες και φυσαλίδα	61
Εικόνα 37 : Απεικόνιση σχήματος με τον εξεταζόμενο άξονα για μεταβολή πίεσης να περνά μόνο μέσα από το πορώδες υλικό	61
Εικόνα 38 : Διάγραμμα μεταβολής πίεσης με τον εξεταζόμενο άξονα για μεταβολή πίεσης να περνά μόνο από το πορώδες υλικό	62
Εικόνα 39 : Απεικόνιση σχήματος με τον εξεταζόμενο άξονα για μεταβολή πίεσης να περνά μόνο από τον ελεύθερο χώρο	63
Εικόνα 40 : Διάγραμμα μεταβολής πίεσης με τον εξεταζόμενο άξονα για μεταβολή πίεσης να περνά μόνο από τον ελεύθερο χώρο	63

Λίστα Πινάκων

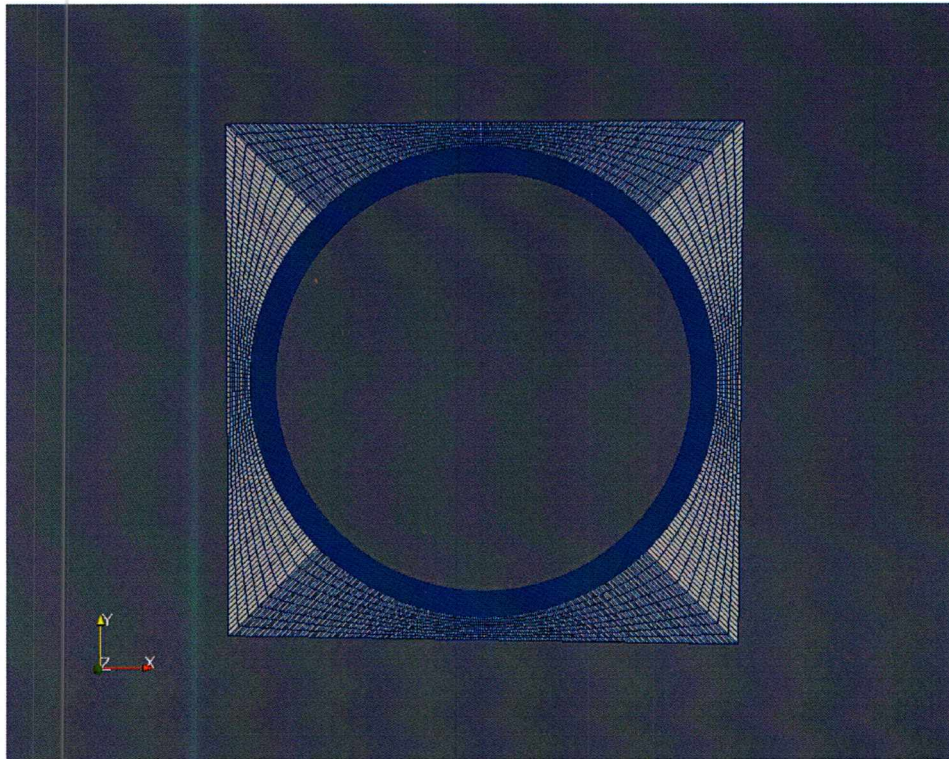
Πίνακας 1 : Πρόβλεψη διαπερατότητας κυκλικού πορώδους υλικού με μεταβολή φυσαλίδας αέρα	54
---	----

Κεφάλαιο 1. Περιγραφή του προβλήματος της εργασίας.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στο πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και στη διαφορά με την ύπαρξη ή μη φυσαλίδας αέρα στο κέντρο του σύνθετου υλικού. Η μελέτη της μεταβολής της διαπερατότητας του πλέγματος αποτελεί τον κύριο στόχο της εργασίας. Μεταβολές πιέσεων και ταχυτήτων σε διάφορα σημεία του θα παρουσιασθούν αναλυτικά. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, με την ύπαρξη δηλαδή αέρα μέσα στο πορώδες υλικό, δεν έχουμε κάποια υπάρχουσα μελέτη στην οποία θα βασιστεί η παρούσα εργασία. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μη πρόβλεψη εκ των προτέρων για την συμπεριφορά της διαπερατότητας καθώς και των πιέσεων, ταχυτήτων στο εξεταζόμενο πλέγμα.

1.1 Εισαγωγή στο σχήμα του πλέγματος

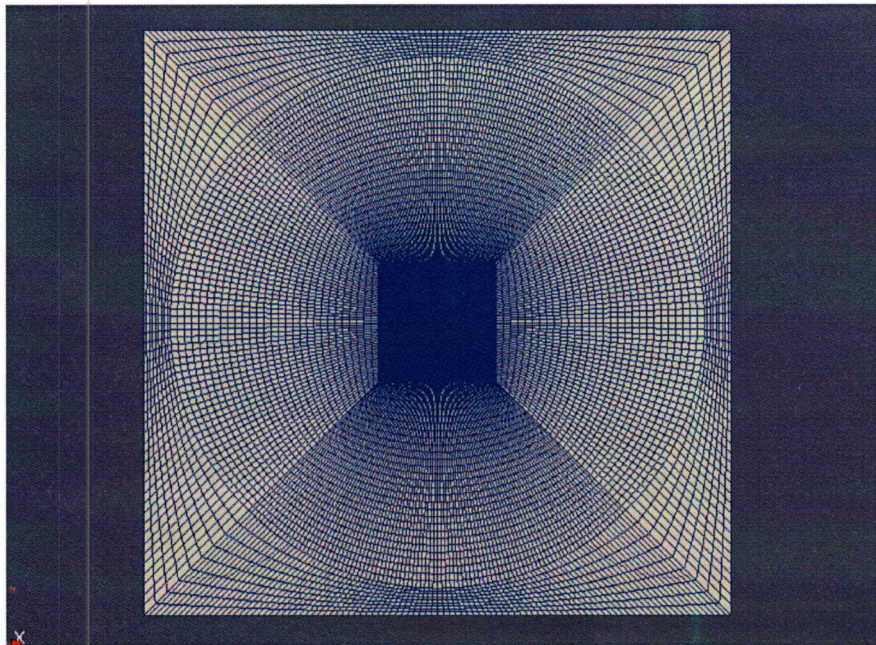
Όπως είναι φυσικό η ύπαρξη φυσαλίδας αέρα στο εσωτερικό ενός σύνθετου υλικού μας δίνει μια χαρακτηριστική μορφή στο γεωμετρικό σχήμα. Βλέποντας μια εικόνα των δύο διαφορετικών σχημάτων(με και χωρίς φυσαλίδα) θα κατανοήσουμε καλύτερα το πως θα επηρεάσουν τα εξεταζόμενα μεγέθη. Με την βοήθεια του Paraview μπορούμε να δούμε την μορφή των υπολογιστικών πλεγμάτων καθώς και την πρώτη εικόνα στην μεταβολή της ταχύτητας και της πτώσης πίεσης του ρευστού, στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει εγκλωβισμός αέρα στο σύνθετο υλικό:



Εικόνα 1: Μοναδιαίο κελί με φυσαλίδα αέρα στο κέντρο του σύνθετου υλικού

Ανάλυση εικόνας

Στο άνωθεν σχήμα διακρίνεται το πορώδες υλικό με μπλε χρώμα σε κυκλικό σχήμα. Το πορώδες υλικό στην συγκεκριμένη απεικόνιση καταλαμβάνει το 65% της συνολικής γεωμετρίας του πλέγματος συμπεριλαμβανομένου της φυσαλίδας αέρα. Στο κέντρο του πορώδους τοποθετήθηκε η φυσαλίδα σε μορφή κύκλου, η οποία καταλαμβάνει το 80% του συνολικού κύκλου. Το υπόλοιπο 35% του σχήματος καταλαμβάνεται από ρευστό. Η ροή του ρευστού γίνεται από την αριστερή πλευρά του σχήματος.



Εικόνα 2: Μοναδιαίο κελί χωρίς φυσαλίδα αέρα στο σύνθετο υλικό. Φαίνεται επίσης το υπολογιστικό πλέγμα όπως αυτό δημιουργήθηκε στο OpenFoam.

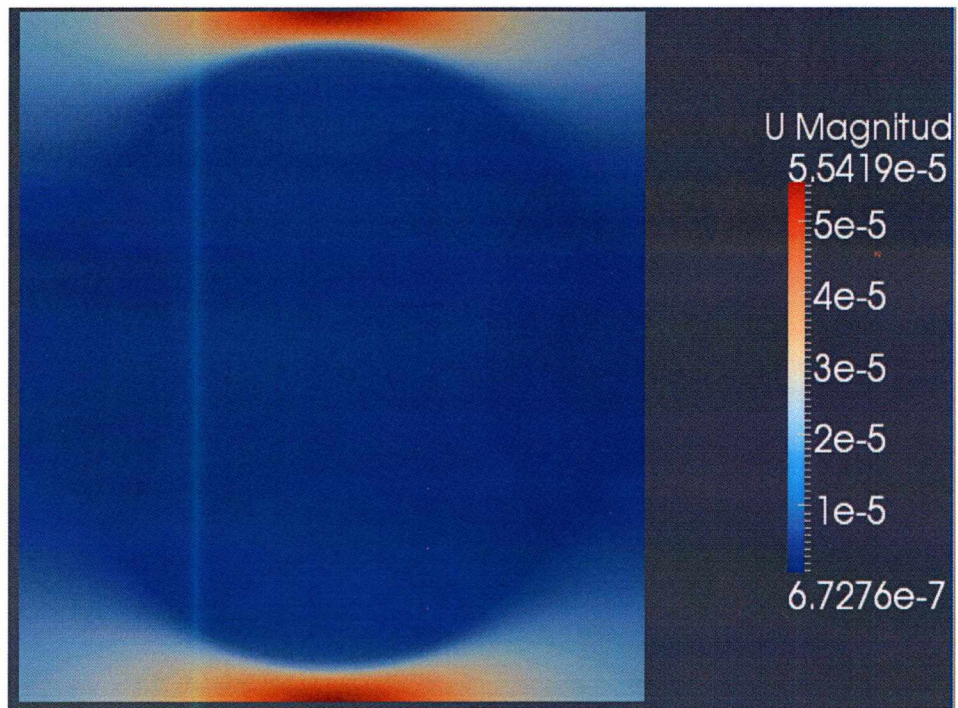
Ανάλυση εικόνας

Στο σχήμα διακρίνεται ξανά το πορώδες υλικό σε κυκλικό σχήμα στο κέντρο του πλέγματος. Οι διαστάσεις του πορώδους υλικού είναι ίδιες με αυτές της προηγούμενης εικόνας. Είναι εμφανής η απουσία φυσαλίδας μέσα στο υλικό, γεγονός που θα επηρεάσει τα μεγέθη που μας απασχολούν όπως θα παρουσιασθούν στην συνέχεια. Ο χώρος που καταλαμβάνει το ρευστό εξωτερικά του υλικού είναι το 35% του συνολικού όγκου του σχήματος, όπως και πριν.

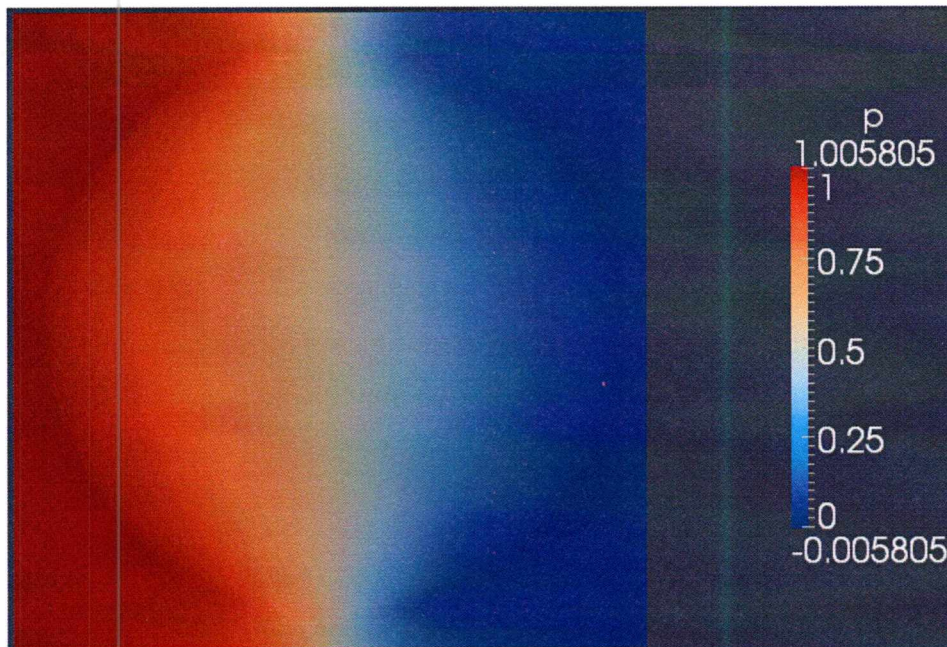
1.2 Προφίλ ταχυτήτων-Πτώση πίεσης

Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται, μέσω του γραφικού προγράμματος Paraview, οι μεταβολές πιέσεων και ταχυτήτων μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα στην περίπτωση όπου στο υπολογιστικό πλέγμα δεν έχει εγκλωβιστεί αέρας. Διαγράμματα με την μεταβολή της πίεσης και

της ταχύτητας στο μοναδιαίο κελί, όταν σε αυτό περιέχεται φυσαλίδα αέρα, θα παρουσιαστούν στην συνέχεια της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 3: Προφίλ ταχυτήτων του ρευστού χωρίς φυσαλίδα αέρα στο πορώδες υλικό



Εικόνα 4: Μεταβολή πίεσης χωρίς φυσαλίδα αέρα στο σύνθετο υλικό

Παρατηρήσεις : Η ταχύτητα της ροής του ρευστού , παίρνει μέγιστη τιμή στο κενό(gap) που υπάρχει μεταξύ εξωτερικής επιφάνειας πορώδους υλικού σε σχέση με τα όρια του συστήματος. Χαρακτηριστικό των αποτελεσμάτων αποτελεί και στις δύο περιπτώσεις η συμμετρία, γεγονός αναμενόμενο λόγω της συμμετρίας του γεωμετρικού σχήματος.

1.3 Προγράμματα που θα χρησιμοποιηθούν

Όσο αναφορά την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος ,αυτή έγινε με την βοήθεια του προγράμματος GMSH. Το GMSH είναι ένα πρόγραμμα που δίνει την δυνατότητα δημιουργίας 3D σχημάτων και τον διαχωρισμό των περιοχών με κελιά για την μελέτη των προβλημάτων. Η τοποθέτηση των σημείων για την δημιουργία του σχήματος γίνεται είτε διαδραστικά με το γραφικό περιβάλλον η σε ASCII αρχεία κειμένου με την χρήση δικής του scripting γλώσσας.

Το υπολογιστικό κομμάτι της εργασίας θα καλυφθεί με τη βοήθεια του OpenFOAM®, (2004). Το OpenFOAM είναι ένα ανοιχτό υπολογιστικό πακέτο που παρέχεται δωρεάν και λειτουργεί στο περιβάλλον των Ubuntu. Είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται από μία μεγάλη ομάδα χρηστών στον τομέα της ρευστό-μηχανικής αλλά και σε άλλους κλάδους της

επιστήμης. Το πακέτο, περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα από υπολογιστικά υπό-πακέτα, τα οποία μπορούν να λύσουν σχεδόν τα πάντα, από μια απλή ροή ρευστών για παράδειγμα, ως και προβλήματα δυναμικής των στερεών σωμάτων και προβλήματα στο τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού. Επιπλέον, περιλαμβάνει μία μεγάλη ομάδα εργαλείων, που παρέχονται στο χρήστη με σκοπό τη κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών και υπολογιστικών πλεγμάτων καθώς και μία πληθώρα άλλων εφαρμογών για επεξεργασία της εκάστοτε γεωμετρίας πριν και μετά την υπολογιστική διαδικασία. Ένα από τα πιο σημαντικά και ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά αυτού του προγράμματος, είναι ότι όλες οι εφαρμογές του έχουν την ικανότητα να τρέχουν παράλληλα, δίνοντας έτσι στο χρήστη την ικανότητα πλήρους εκμετάλλευσης του υπολογιστή που χρησιμοποιεί.

Μέσα από το σχεδιαστικό περιβάλλον Paraview, το οποίο συνοδεύει το OpenFoam, μπορούμε να έχουμε μια εικόνα των σχημάτων καθώς και να δούμε το πώς αναπτύσσεται το προφίλ των ταχυτήτων και πώς δημιουργείται η σχετική πτώση πίεσης.

Κεφάλαιο 2. Θεωρία για τα πορώδη υλικά.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες των πορώδων υλικών και η χρήση τους στην καθημερινή μας ζωή.

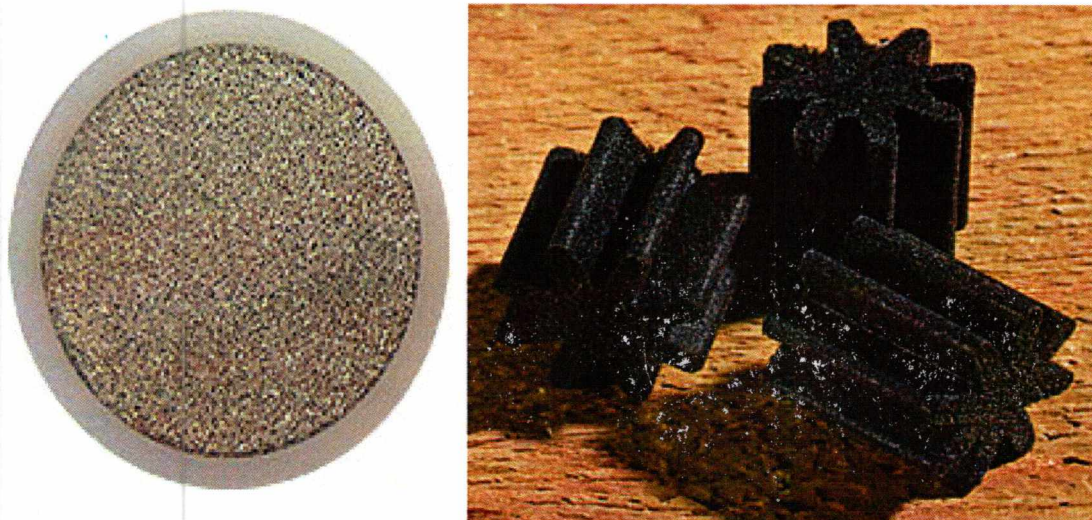
2.1 Γενική αναφορά στα πορώδη υλικά.

Τα πορώδη υλικά αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της βιομηχανίας μας. Χρησιμοποιούνται καθημερινά σε προϊόντα που χρειαζόμαστε για να φέρουμε εις πέρας διάφορες εργασίες που μας απασχολούν. Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η ιδιότητά τους να επιτρέπουν τη ροή υγρών ή αερίων διαμέσου της μάζας τους, ενώ ταυτόχρονα έχουν δομικές ιδιότητες που πλησιάζουν αυτές των στερεών υλικών. Τα πορώδη υλικά είναι ευρέως διαδεδομένα στον τομέα της βιομηχανίας και στο παρόν κεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε εν συντομία τα κυριότερα σημεία εφαρμογής τους.

Φίλτρα: Αυτό είναι το πιο φανερό σημείο χρήσης ενός πορώδους υλικού. Ένα μεγάλο κομμάτι της βιομηχανίας των πορώδων υλικών, ασχολείται αποκλειστικά με την κατασκευή

διαφόρων φίλτρων τόσο για χρήση σε αέρια όσο και σε υγρά. Η αντοχή τους σε μηχανικές κατεργασίες αλλά και η ανθεκτικότητα αυτών στη διάβρωση τα κάνει να είναι κατάλληλα υλικά για επιθετικά περιβάλλοντα όπου επικαλείται η χρήση τους ενώ παρέχουν παράλληλα μεγάλη αποδοτικότητα και διάρκεια ζωής. Παραδείγματα τέτοιου είδους χρήσης:

- Φίλτρα διαλύτες για συστήματα χρωματογραφίας.
- Πολυμερή φίλτρα για χρήση σε επεξεργασία λιωμένου πλαστικού.
- Φίλτρα αερίων για χημικές διαδικασίες καθώς και διαδικασίες εφαρμογής ημιαγωγών.



Εικόνα 5: Πορώδη φίλτρα, αριστερά φίλτρο διαλύτης, δεξιά πολυμερές φίλτρο

Συσκευές ελέγχου ροής, ρυθμιστές πίεσης: Στον τομέα ροής και πίεσης πρέπει να υπογραμμίσουμε τη σημασία των πορωδών υλικών, αφού όπως θα περιγράψουμε και στη συνέχεια, όλη η θεωρία τους αναφέρεται σε περιγραφή πιέσεων και άλλων χαρακτηριστικών ροής. Παραδείγματα:

- Οπές για εξισορρόπηση των πιέσεων σε κατασκευές καθημερινές όπως τα φρένα ενός αυτοκινήτου ως και σε κατασκευές διαστημοπλοίου.

- Οπές για εξισορρόπηση πιέσεων σε αντλίας για νοσοκομειακή φροντίδα.
- Πολλές άλλες εφαρμογές στον τομέα ροής και πίεσης.

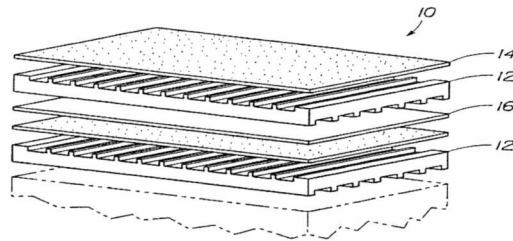


FIG. 1A
(PRIOR ART)

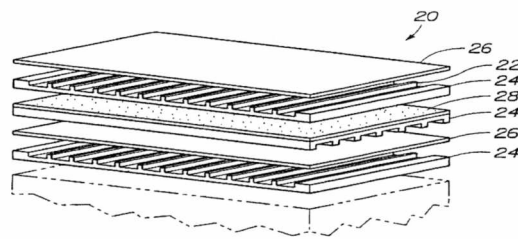


FIG. 1B
(PRIOR ART)

Εικόνα 6: Ρυθμιστής πίεσης με πορώδες υλικό.

Υλικά για έλεγχο της φλόγας: Τα πορώδη επιτρέπουν να τα διαπερνούν αέρια που θα χρησιμοποιηθούν για καύση αλλά όχι να διαπερνούνται από φλόγα, κάτι ιδιαίτερος χρήσιμο με εφαρμογές όπως:

- Αισθητήρες οξυγόνου μέσα σε στροβιλομηχανές.
- Καλύμματα αισθητήρων σε ηλεκτρονικά είδη.



Εικόνα 7: Ελεγκτές φλόγας.

Διασκορπιστήρες: Συσκευές διάλυσης αερίου σε υγρό. Τα πορώδη μπορούν να βοηθήσουν σε αυτή την διαδικασία, αφού καθώς το αέριο περνά διαμέσου του πορώδους υλικού διασκορπίζεται στο χώρο.

- Προσθήκη ανθρακικού σε διάφορα προϊόντα.
- Προσθήκη όζοντος σε ρεύμα νερού για περιποίηση.



Εικόνα 8: Πορώδης διασκορπιστήρας.

Υγροποιητές: Όπως περιγράφηκε και πιο πάνω αέρας ή και άζωτο μπορεί και περνάει μέσα από πορώδες και αν στην έξοδο υπάρχει στερεό υλικό σε μορφή σκόνης μπορεί και αυτό να το κάνει να κινηθεί ως ρευστό.

- Χαλάρωση του ξηρού όγκου χημικών μετά την μεταφορά τους για απόρριψη.
- Μεταφορά ξηρών αγαθών όπως δημητριακών στα στάδια της επεξεργασίας.

Σιγαστήρες: Κατά την κατασκευή εξαρτημάτων για τη μείωση της ηχορύπανση, είναι έντονη η χρήση πορώδους υλικού. Παραδείγματα εφαρμογών:

- Συστήματα αερόφρενων σε τραίνα και αυτοκίνητα.
- Συστήματα εξόδου ήχου σε διάφορες μηχανές.
- Βαλβίδες αέριας ενεργοποίησης σε χημικές διαδικασίες.



Εικόνα 9: Πορώδεις σιγαστήρες

Για να είναι ένα υλικό πορώδες και ικανό να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη μας θα πρέπει να ικανοποιεί δύο χαρακτηριστικά. Αρχικά θα πρέπει να περιέχει πόρους, οι οποίοι είναι πολύ μικρά κενά στο πλέγμα του υλικού. Οι πόροι αυτοί συνήθως περιέχουν κάποιο ρευστό μέσα τους

όπως για παράδειγμα αέρα, νερό, λάδι κ.ά. Το δεύτερο χαρακτηριστικό που θα πρέπει να έχουν είναι η διαπερατότητα. Η ιδιότητα αυτή των πόρων είναι σημαντική για την συνολική μελέτη μας και θα αναλυθεί εκτενέστερα στα επόμενα υποκεφάλαια. Με τον όρο διαπερατότητα, εννοούμε την ικανότητα που έχει το υλικό να επιτρέπει να διαπερνάται από μίας κάποιας μορφής ρευστό υλικό.

Η διαπερατότητα οφείλεται στην ύπαρξη πόρων στο υλικό και για αυτόν ακριβώς το λόγο θα ήταν καλό να αναφερθούμε με περισσότερη λεπτομέρεια στη δομή των πόρων. Ως αποτέλεσμα αυτού, ακολουθεί μία εκτενής περιγραφή στη δομή των πόρων μέσα στο πλέγμα του υλικού αλλά και ανάλυση τόσο μακροσκοπική όσο και μικροσκοπική.

2.2 Το πορώδες πλέγμα

Ξεκινώντας λοιπόν την αναφορά μας στους πόρους, πρέπει να πούμε πως τις περισσότερες φορές αυτοί δεν είναι ορατοί με γυμνό μάτι. Το να ξεχωρίσουμε ένα πορώδες υλικό από κάποιο που δεν είναι, αυτό μπορεί να γίνει μέσα από δοκιμασίες οι οποίες αποκαλύπτουν την πορώδη φύση του υλικού. Το πορώδες υλικό έχει μία ξεχωριστή συμπεριφορά από τα υπόλοιπα υλικά και αυτές τις διαφορές αποκαλύπτουν οι δοκιμασίες που προαναφέραμε.

Κατά τη διαδικασία αναγνώρισης του πορώδους υλικού και ύστερα από συγκεκριμένες πειραματικές διαδικασίες, προσδιορίζονται ορισμένες μακροσκοπικές ιδιότητες οι οποίες τις περισσότερες φορές είναι προσδιορισμένες από το πορώδες πλέγμα που επικρατεί στο εκάστοτε υλικό που εξετάζεται. Παρόμοιες ιδιότητες για να καταλάβουμε τη σημασία των μακροσκοπικών ιδιοτήτων είναι η πυκνότητα και η θερμοκρασία βρασμού που συναντάμε σε άλλα υλικά.

Εκτός όμως της μακροσκοπικής ανάλυσης, μας ενδιαφέρει και ο μικρόκοσμος του υλικού. Παρόλο που παλαιότερα τέτοιου είδους μελέτες ήταν πολύ περιορισμένες, σήμερα μπορούμε να μιλήσουμε με μεγάλη σαφήνεια για τον μικρόκοσμο του κάθε υλικού που μας ενδιαφέρει αλλά διατηρώντας πάντα κάποιες επιφυλάξεις για τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που βγάζουμε. Ολοένα και περισσότερη ανάπτυξη υπάρχει στη μικροσκοπική ανάλυση, κάτι που δείχνει πως σε λίγο θα μπορούμε να συζητάμε με σιγουριά για τα κάθε λογής αποτελέσματα που θα λαμβάνουμε.

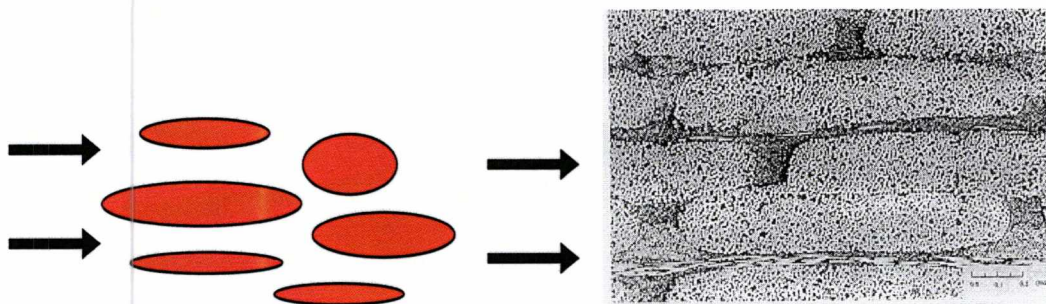
2.3 Δημιουργία φυσαλίδων σε πορώδη μέσα

Στην παρούσα εργασία στόχος είναι η μελέτη της επίδρασης εγκλωβισμένου αέρα σε πορώδες μέσο, και τις μεταβολές που δημιουργούνται σε πίεση, ταχύτητα και διαπερατότητα λόγω της ύπαρξής του. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι φυσαλίδες αέρα στα πλέγματά μας είναι εξ αρχής τοποθετημένες και δεν εμφανίζονται κατά την διάρκεια ροής του υγρού. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν τρόποι δημιουργίας αυτών σε πορώδη σύνθετα υλικά.

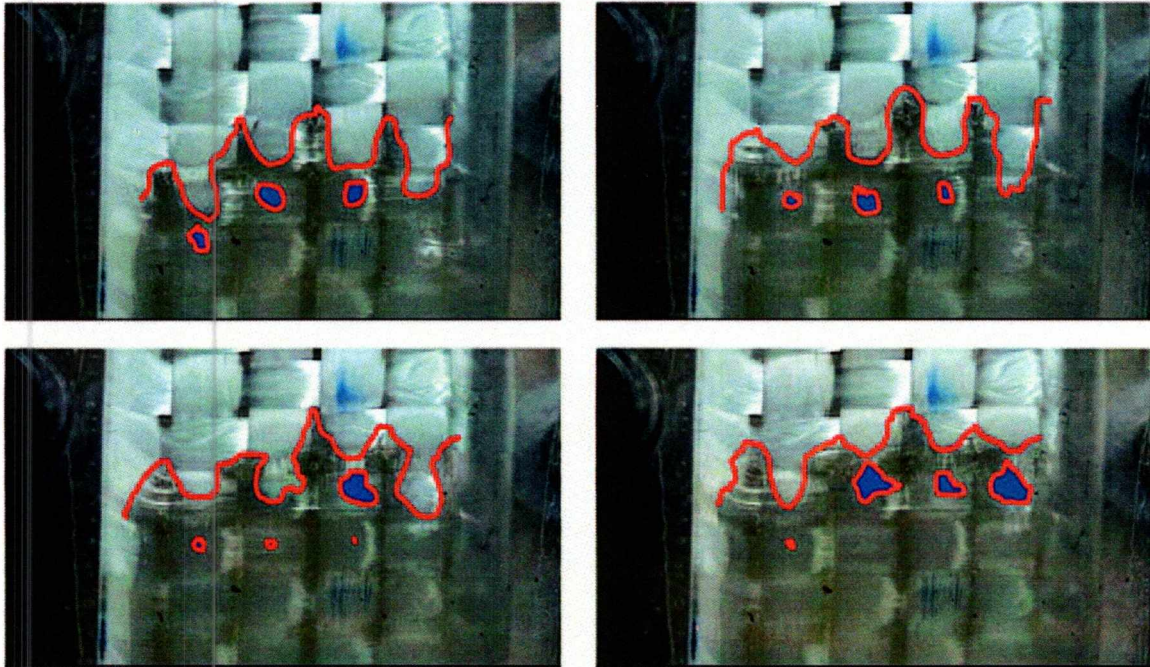
Σε πρόσφατες έρευνες έχουν βρεθεί τρόποι ενίσχυσης των μηχανικών αποδόσεων των σύνθετων υλικών (δηλαδή υφαντών κλπ). Αυτά τα υλικά αποτελούνται υψηλό αριθμό ινών. Τα κενά μεταξύ των ινών ενισχύονται με διάφορα ρευστά (κυρίως ρητίνη) κατά την διαδικασία δημιουργίας του σύνθετου υλικού. Αποτέλεσμα, η ροή του ρευστού (όπως ρητίνη, νερό) όταν γίνεται μη ομοιόμορφη αέρας εγκλωβίζεται με αποτέλεσμα την δημιουργία φυσαλίδων στο μέτωπο ροής. Τα συγκεκριμένα κενού τύπου ελαττώματα μειώνουν τις μηχανικές αποδόσεις των υλικών και επηρεάζουν τη ροή του ρευστού.

Για παράδειγμα είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με σαφήνεια η ροή, αν δημιουργούνται φυσαλίδες η κενά κοντά στο μέτωπο ροής(εικ.12). Εξάλλου, έχει αναφερθεί ότι τα κενά αλλάζουν το γενικό μοντέλο ροής. Μπορεί να είναι η αιτία της διαφοράς μεταξύ κορεσμένης και ακόρεστης διαπερατότητας και του μη γραμμικού προφίλ πίεσης στην μερικώς κορεσμένη ζώνη.

Στην παρακάτω εικόνα είναι δυνατό να διακρίνουμε μικροσκοπικά τις δέσμες ινών χωριζόμενες από κενές περιφέρειες οι οποίες διευκολύνουν τη ροή της ρητίνης. Αυτή η ροή ενδέχεται να γίνει μη ομοιόμορφη δημιουργώντας τον εγκλωβισμό αέρα στα σύνθετα υλικά.



Εικόνα 10: Δέσμες ινών χωριζόμενες από κενές περιφέρειες σε σύνθετο υλικό

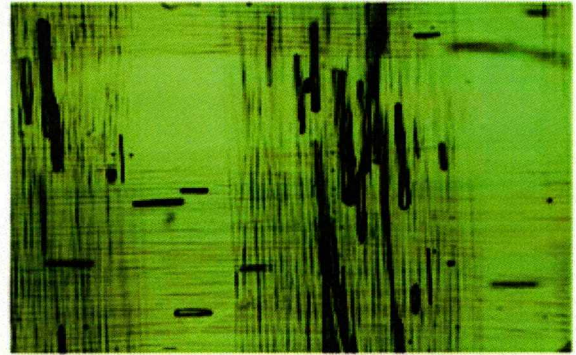
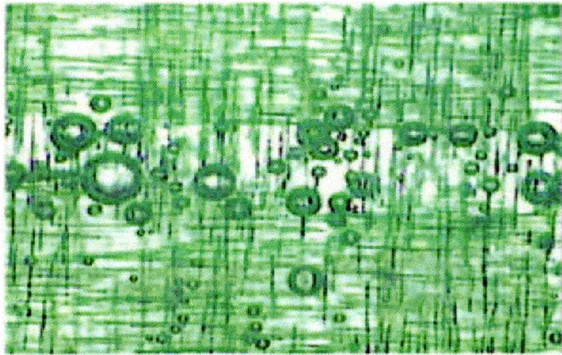
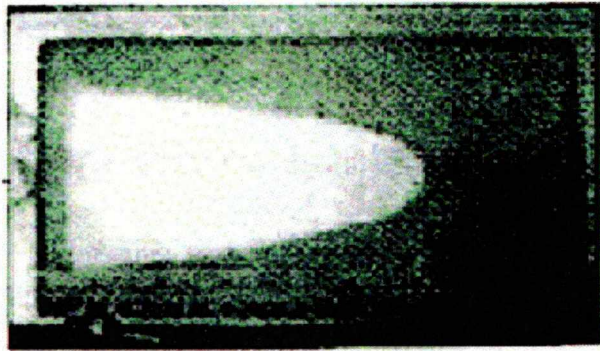


Εικόνα 11: φυσαλίδα και κενά αέρα σε πορώδη υλικά στο μέτωπο ροής

2.4 Ταξινόμηση κενών αέρα

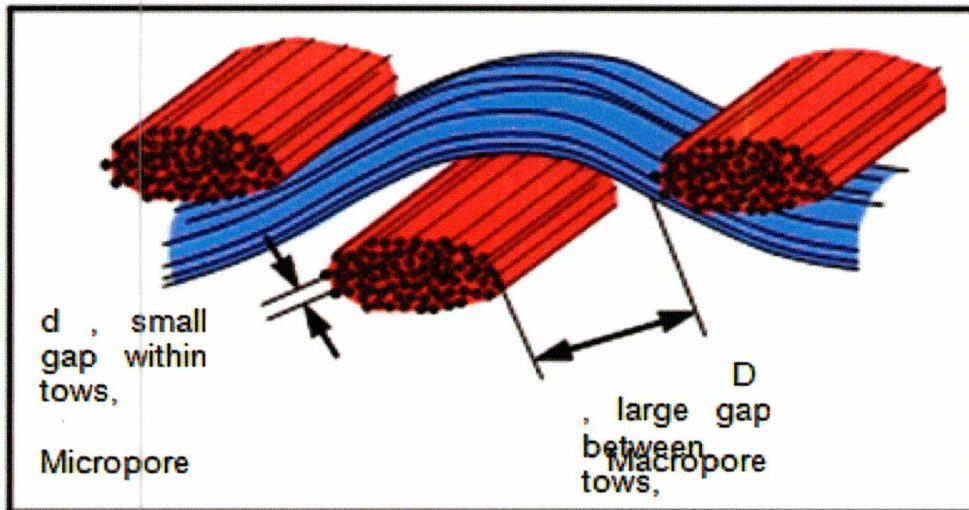
Τα ελαττώματα των κενών δημιουργούνται με ποικίλους τρόπους: εγκλωβισμός αέρα, διαρροή, σπηλαιώση κλπ.

Αν το καλούπι δεν είναι πλήρως γεμάτο δημιουργείται ένα ξηρό σημείο(εικ.13).Ο βασικότερος λόγος γι αυτόν τον σχηματισμό είναι ο εγκλωβισμός αέρα. Συνήθως είναι αρκετά μεγάλο ώστε να είναι ορατό με γυμνό μάτι.



Εικόνα 12: ξηρό σημείο, σφαιρικές φυσαλίδες ,κυλινδρικές φυσαλίδες σε πορώδη υλικά

Ένας άλλος τύπος κενών δημιουργείται στο πλέγμα εξαιτίας της μη ομοιογένειας της μικροδομής των ινών του πλέγματος. Οι ινώδεις ενισχύσεις κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες ανάλογα με το μέγεθος του πόρου. Αυτές οι δύο κατηγορίες δημιουργούν δύο τύπους κενών, ανάλογα με τις διατάξεις των ινών στο υλικό, μικρό και μεγάλο(εικ.3). Το μεγάλο κενό χαρακτηρίζει τον μακρόπορο και το μικρό τον μικρόπορο. Και οι δύο πρέπει να γεμιστούν πλήρως κατά την ροή για να μην υπάρξει εγκλωβισμός αέρα στην διαδικασία.



Εικόνα 13: μικρό και μεγάλο κενό στις ινώδεις ενισχύσεις

Αν ο μακρόπορος είναι γεμάτος και ο μικρόπορος όχι τότε σχηματίζονται κυλινδρικές φυσαλίδες στο πλέγμα των ινών. Από την άλλη αν συμβαίνει το αντίθετο, παρατηρούνται σφαιρικές φυσαλίδες αέρα(εικ.2).

2.5 Πορώδες (porosity)

Το πορώδες συμβολίζεται με ϕ και αποτελεί την αναλογία του όγκου που καταλαμβάνεται από το πορώδες υλικό ή από κενό χώρο. Παρόλο που αυτός ο ορισμός υπάρχει, πολλές φορές ο όρος πορώδες χρησιμοποιείται και με άλλες ανακριβείς ερμηνείες. Επιπροσθέτως, όσον αφορά το πορώδες, αυτό παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα πάντα και με το υλικό και μπορεί να πάρει διαφορετικές ποσοστιαίες τιμές. Θα ήταν καλό σε αυτό το σημείο να αναφερθούμε στους διαφορετικούς τύπους από κενό χώρο που μπορούμε να συναντήσουμε.

Υπάρχουν δύο τύποι από κενό χώρο ή πόρο. Ο πρώτος είναι συνεχής και διασυνδεδεμένος, σε αντίθεση με το δεύτερο τύπο που δεν είναι διασυνδεδεμένος. Χαρακτηριστικό του δευτέρου τύπου, είναι ότι δε μπορεί να συνεισφέρει σε φαινόμενα μεταφοράς μέσα στο πορώδες υλικό.

Άλλο ένα θέμα που απασχολεί, είναι το πώς θα μπορούσαμε να μετρήσουμε το πορώδες του κάθε υλικού. Όλα αυτά τα χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι με σκοπό τέτοιου είδους

μετρήσεις. Παρακάτω λοιπόν, θα αναφερθούμε σε όλες τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί και θα γίνει και η σχετική ανάλυση για το πώς αυτές λειτουργούν σε κάθε περίπτωση.

Άμεση μέθοδος: Εδώ έχουμε απευθείας μέτρηση του όγκου του πορώδους και μετά μέτρηση μόνο του στερεού τμήματος.

Οπτική μέθοδος: Σε αυτή τη μέθοδο θεωρείται πως το πορώδες είναι ανάλογο με το επιφανειακό πορώδες του υλικού. Για να μετρηθεί λοιπόν το επιφανειακό πορώδες, χρησιμοποιούνται στιλβωμένα τμήματα του υλικού και αρκετές φορές χρησιμοποιείται και εμποτισμός των πόρων έτσι ώστε να γίνουν ορατοί και επιπλέον να ξεχωρίσουν οι διασυνδεδεμένοι πόροι από τους μη. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι πως οι πόροι δεν έχουν το ίδιο μέγεθος κάθε φορά, με αποτέλεσμα οι πολύ μικροί πόροι να μην καταμετρούνται και να προκύπτουν λάθος μετρήσεις και αποτελέσματα.

Μέθοδος απορρόφησης: Κατά τη μέθοδο της απορρόφησης, έχουμε την εμβάπτιση του πορώδους υλικού μέσα σε ρευστό και με προσοχή και αργούς ρυθμούς την απορρόφηση του ρευστού. Με μετρήσεις του βάρους του πορώδους υλικού πριν την όλη διαδικασία και μετά την εμβάπτιση του με το ρευστό και συσχέτισμό αυτών με τη πυκνότητα του ρευστού που χρησιμοποιήθηκε, μπορούμε εν τέλει να υπολογίσουμε το πορώδες του υλικού μας. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι εξαιρετική και μπορεί να δώσει τις καλύτερες μετρήσεις από πολλές άλλες, αρκεί βέβαια να γίνει με προσοχή και ακολουθώντας προσεκτικά όλα τα βήματα που πρέπει να γίνουν.

Μέθοδος έγχυσης υδραργύρου: Στην συγκεκριμένη μέθοδο, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η έγχυση υδραργύρου στο πορώδες υλικό. Αλλά όπως γνωρίζουμε, ο υδράργυρος δεν εισχωρεί μέσα στα υλικά σε κανονική πίεση και για αυτό το λόγω ανεβάζοντας την πίεση μπορούμε να πετύχουμε εισόδου του υδραργύρου στους πόρους του υλικού. Έτσι λοιπόν, μετρώντας την στάθμη του υδραργύρου πριν και μετά την παρουσία του πορώδους, μπορούμε να δούμε τη διαφορά και να πάρουμε τις μετρήσεις που θέλουμε. Βέβαια για να έχουμε τέλειο αποτέλεσμα χρειαζόμαστε άπειρη πίεση αλλά αυτό δε μπορεί να γίνει αφού πιθανώς με την αύξηση της πίεσης να έχουμε και αλλαγή στο πορώδες πλέγμα.

Μέθοδος εξάπλωσης αερίου: Με τη μέθοδο του αερίου μετράμε τον όγκο του πορώδους υλικού και μετά το τοποθετούμε σε δοχείο γνωστού όγκου και πίεσης του αερίου που περιέχει. Το δοχείο είναι παράλληλα συνδεδεμένο με διπλανό άδειο δοχείο (κενό). Όταν ανοίξουμε την

πόρτα για τα δύο δοχεία, τότε μέρος του αερίου διοχετεύεται στο κενό δοχείο και η πίεση του αερίου μικραίνει. Κάνοντας χρήση της σχέσης για τα ιδανικά αέρια:

$$V_p = V_B - V_a - V_b \left[\frac{P_2}{(P_2 - P_1)} \right] \quad (2.1)$$

όπου

V_B = συνολικός όγκος (*bulk volume*),

V_a = όγκος δοχείου (*vessel volume*),

V_b = όγκος κενού δοχείου (*evacuated vessel volume*),

P_2 = τελική πίεση (*final pressure*),

P_1 = αρχική πίεση (*initial pressure*) .

υπολογίζουμε τον όγκο του πορώδους V_p .

Μέθοδος των πυκνοτήτων: Στη συγκεκριμένη μέθοδο μετράται η πυκνότητα ολόκληρου του υλικού και μετά η πυκνότητα του στερεού (solid) τμήματος του υλικού. Επιπλέον, αφού η μάζα του πορώδους υπάρχει ολοκληρωτικά μέσα στο στερεό μπορούμε να πούμε ότι:

$$m = \rho_S V_S = \rho_B V_B \quad (2.2)$$

όπου

m = μάζα υλικού ,

ρ_S = πυκνότητα του στερεού ,

ρ_B = συνολική πυκνότητα .

Παράλληλα από τον ορισμό του πορώδους καταλήγουμε ότι:

$$\varphi = 1 - (V_S - V_B) = 1 - (\rho_B/\rho_S) \quad (2.3)$$

2.6 Διαπερατότητα (Permeability)

Με τον όρο (υδραυλική) διαπερατότητα εννοούμε την ικανότητα του υλικού να διαπερνάται από κάποιου είδους ρευστό υλικό. Η διαπερατότητα ενός πορώδους υλικού εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως το είδος του πορώδους πλέγματος, τις ιδιότητες του ρευστού αλλά και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το είδος της μεταφοράς που πραγματοποιείται. Έτσι λοιπόν θα ήταν σωστό αν ξεχωρίζαμε την διαπερατότητα του υλικού από τις ιδιότητες του ρευστού. Η 'ειδική' διαπερατότητα συμβολίζεται με το γράμμα k [m^2] και αφορά την διαπερατότητα του πορώδους υλικού και μόνο.

Μονάδες μέτρησης αυτής, από πρακτικής άποψης, είναι το darcy ((1 darcy = $(1(cm)^3/s) * 1(cP)) / (1(cm)^2) * 1(atm/cm)$))) χάριν του επιστήμονα που ασχολήθηκε και διατύπωσε τον ομώνυμο νόμο για την διαπερατότητα. Ο νόμος του Darcy Darcy's law, (1856) συνδέει την διαπερατότητα του πορώδους με τις διαστάσεις του υλικού, το ιξώδες του ρευστού καθώς και με την πτώση πίεσης που δημιουργείται. Ο παραπάνω νόμος λοιπόν έχει την παρακάτω μορφή:

$$Q = ((kA)/\mu)(\Delta P/L) \quad (2.4)$$

Όπου

Q = ογκομετρική παροχή (volumetric flow rate), [m^3/s]

A = εμβαδόν (normal cross - sectional area), [m^2]

μ = ιξώδες (viscosity) , [$Pa*s$]

ΔP = πτώση πίεσης (pressure drop)

L = μήκος στο οποίο λαμβάνει χώρα η πτώση πίεσης (length)

k = διαπερατότητα (permeability), [m^2]

Ο νόμος του Ντάρσυ (Darcy's law, 1856) που αναφέρθηκε, είναι η βασικότερη αρχή πάνω στην οποία θα στηριχθεί και η εργασία μας. Επιτρέπει τον υπολογισμό της διαπερατότητας k (permeability) γνωρίζοντας την παροχή Q (volumetric flow rate) του συστήματος μας και την πτώση πίεσης ΔP (pressure drop) καθώς και το μήκος στο οποίο λαμβάνει χώρα η συγκεκριμένη πτώση πίεσης. Όσον αφορά τώρα τη διαπερατότητα καλό θα ήταν να αναφερθούμε στον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να την μετρήσουμε.

Μέτρηση διαπερατότητας (measurement of permeability, permeametry): Στην περίπτωση ενός ισοτροπικού μέσου, σε γραμμικές συνθήκες και κυρίως κυλινδρικής μορφής κομμάτια ακολουθείται η παρακάτω πειραματική διαδικασία. Θα πρέπει να προγραμματιστεί ροή του ρευστού είτε οριζόντια είτε κάθετα μέσα στο το δείγμα μας, δίνοντας πάντοτε ιδιαίτερη προσοχή στις συνθήκες που θα γίνεται όλο αυτό ώστε να μην γίνει με λάθος ρυθμό η μεταφορά και υπάρξουν προβλήματα.

Για τέτοιου είδους πειράματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο αέρια όσο και υγρά με μόνη ιδιαιτερότητα αυτή των υγρών, αφού μπορούν μερικές φορές και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες να μεταβάλλουν το πορώδες πλέγμα. Επομένως, αυτό έχει σαν αντίκτυπο πιθανή μεταβολή της διαπερατότητας, κάτι το οποίο φυσικά δεν επιθυμούμε να γίνει.

Γενικά, σε μία μέτρηση που θα γίνει κάτω από σταθερές συνθήκες, η διαπερατότητα μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο του Darcy. Παρόλα αυτά, είναι σίγουρο πως στην μέτρησή μας θα έχουμε κάποιο ποσοστό σφάλματος. Για να περιορίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο το σφάλμα αυτό, μπορούμε να εκτελέσουμε την πειραματική διαδικασία για διάφορες ροές χαμηλές πάντοτε και μετά να ακολουθήσουμε μία διαδικασία επαλήθευσης που δείχνει πως το μοντέλο μας δουλεύει σωστά. Έτσι λοιπόν αφού προσομοιώσουμε τις διάφορες ροές, θα σχεδιάσουμε τα αποτελέσματα σε σχέση με τη πτώση πίεσης που δημιουργείται. Τότε, τα σημεία αυτά θα πρέπει να μπορούμε να τα ενώσουμε με μία ευθεία γραμμή. Αν αυτό δε γίνεται, σημαίνει ότι ο νόμος δεν ισχύει για το δικό μας μοντέλο.

Στη περίπτωση τώρα που έχουμε ροή αερίου, η ογκομετρική παροχή και η ταχύτητα σε σχέση με τη πίεση δεν είναι σταθερές από τη μία μεριά έως την άλλη. Αυτό όμως είναι ένα πρόβλημα για εμάς αφού ο νόμος του Darcy, Darcy's law, (1856) υποθέτει αυτά να είναι σταθερά κατά τη διάρκεια των φαινομένων. Για να το πετύχουμε λοιπόν αυτό, θα αναγκαστούμε να κάνουμε μερικές υποθέσεις που θα προϋποθέτουν ότι σε σταθερή θερμοκρασία και σταθερές

συνθήκες, οι σχέσεις ταχύτητας πίεσης χρόνου μένουν σταθερές. Έτσι λοιπόν ο νόμος του Darcy μεταβάλλεται παίρνοντας την ακόλουθη μορφή:

$$u_2 = -\left(\frac{k}{\mu}\right) \frac{P_2^2 - P_1^2}{2P_2L} = \left(\frac{k}{\mu}\right) \left(\frac{P_m}{P_2}\right) (\Delta P/L) \quad (2.5)$$

Όπου

$$u_2 = Q_2/A,$$

$$P_m = (P_1 + P_2)/2$$

Επιπροσθέτως, έχει αποδειχθεί ότι η διαπερατότητα στα αέρια μεταβάλλεται ανάλογα με την πίεση στην οποία βρίσκονται. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ροή με ολίσθηση. Για να λάβουμε υπόψη μας την ύπαρξη ολίσθησης χρησιμοποιούμε τη παρακάτω σχέση την οποία και πρότεινε ο (Klinkenberg, 1941)

$$u_2 P_2 L \frac{\mu}{\Delta P P_m} = k(1 + (b/P_m)) \quad (2.6)$$

Όπου

b = χαρακτηριστική σταθερά αερίου και πορώδους (constant characteristic).

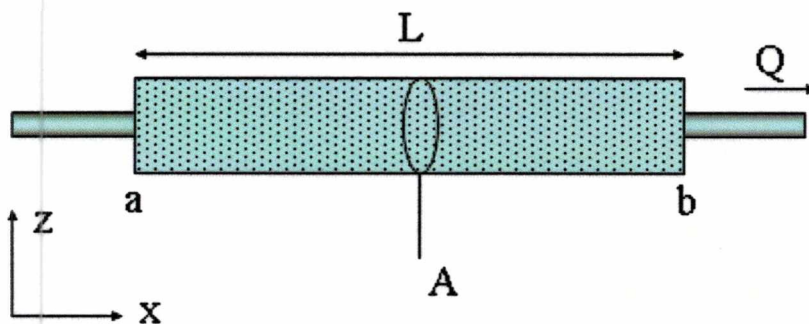
2.7 Παρουσίαση του νόμου του Darcy

Παρόλο που ο νόμος έχει διατυπωθεί αποκλειστικά από τον ίδιο τον Darcy, η ίδια εξίσωση μπορεί να προκύψει και με ομογενοποίηση των Navier-Stokes εξισώσεων. Είναι επίσης ανάλογη και με άλλους νόμους, όπως αυτών των Fourier, Ohm, Fick.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το πώς λειτουργεί ο νόμος του Darcy, μπορούμε να πούμε πως είναι μία συσχέτιση της ροής εξόδου, του ιξώδους του ρευστού και της πτώσης πίεσης σε μία δοσμένη απόσταση. Η μορφή του είναι η ακόλουθη:

$$Q = ((-kA)/\mu)(\Delta P/L) \quad (2.7)$$

όπου τα μεγέθη της εξηγήθηκαν στην εξίσωση (2.4)



Εικόνα 14 : Πείραμα του Darcy

Η γενική ανυσματική μορφή στην οποία θα μπορούσε να γραφτεί η εξίσωσή μας είναι η ακόλουθη:

$$q = \left(-\frac{k}{\mu}\right) \nabla P \quad (2.8)$$

όπου

q = άνυσμα μέσης ταχύτητας ρευστού (flux) , [m/s]

∇P = διαφορικό πίεσης (pressure gradient), $\left[\frac{Pa}{m}\right]$

μ = δυναμικό ιξώδες του ρευστού , [Pa/s]

k = διαπερατότητα , [m^2]

Εδώ να αναφερθούμε και στο συσχετισμό της ταχύτητας με τη συγκεκριμένη ροή ο οποίος έχει τη μορφή:

$$u = q/\varphi \quad (2.9)$$

Όπου με φ αναφερόμαστε στο πορώδες.

Συμπεράσματα που μπορούν να προκύψουν από το νόμο του Darcy είναι τα ακόλουθα:

- Αν δεν υπάρχει το διαφορικό της πίεσης για κάποια ορισμένη απόσταση, τότε λογικό είναι να μην έχουμε και ροή ρευστού.
- Αν υπάρχει το διαφορικό της πίεσης, τότε έχουμε ροή κάποιου ρευστού από την υψηλότερη στη χαμηλότερη πίεση.
- Όσο μεγαλύτερη η διαφορά πίεσης, τόσο μεγαλύτερος και ο ρυθμός ροής εξόδου.
- Ο ρυθμός ροής εξόδου είναι διαφορετικός ανάλογα κάθε φορά με τη μορφολογία του ενδιάμεσου μέσου. Η μορφολογία επηρεάζει την διαπερατότητα του υλικού.

2.8 Τοπολογία του πορώδους πλέγματος

Εδώ θα αναφερθούμε σε μία σειρά παραμέτρων, οι οποίες ορίζουν την τοπολογία του πορώδους πλέγματος. Οι παράμετροι αυτοί είναι το μέγεθος του δικτύου (dimensionality of the net work), η συνδεσιμότητα (connectivity) και το γένος (genus). Πάμε λοιπόν να πούμε λίγα λόγια για το κάθε ένα από αυτά.

Συνδεσιμότητα και γένος (connectivity and genus): Οι δύο αυτές παράμετροι είναι αυτές που ουσιαστικά χαρακτηρίζουν το σχήμα του πορώδους πλέγματος. Έχουν εξεταστεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές, όπως για παράδειγμα από τον Fischmeister (1974).

Η συνδεσιμότητα (Cairns, 1961) είναι εκείνη που μετρά το κατά πόσο το πλέγμα είναι ενωμένο σε πολλαπλά σημεία. Ορίζεται ως τον αριθμό των κλειστών διαδρομών με τις οποίες θα μπορούσε να ερευνηθεί το εσωτερικό του πλέγματος και συμβολίζεται με το γράμμα C .

Το γένος από την άλλη μεριά, είναι ο μεγαλύτερος αριθμός από κοψίματα που είναι εφικτό να υπάρξουν χωρίς να αποσυνδεθεί ολοκληρωτικά το πλέγμα. Συμβολίζεται με το γράμμα G και υποστηρίζεται από τις διάφορες θεωρίες ότι η συνδεσιμότητα συνδέεται με το γένος και μάλιστα είναι ανάλογη με αυτό. Παρακάτω, ακολουθεί πίνακας με παραδείγματα διαφόρων σχημάτων, που παρουσιάζουν πως μπορεί να οριστεί η συνδεσιμότητα και το γένος.

Μία γενική θεωρία αναφέρει πως ισχύει η σχέση:

$$G = C = b - n + N \quad (2.11)$$

όπου το b συμβολίζει τον αριθμό των ξεχωριστών τμημάτων, το n συμβολίζει τον αριθμό των κόμβων και το N είναι ο αριθμός των ξεχωριστών δικτύων.

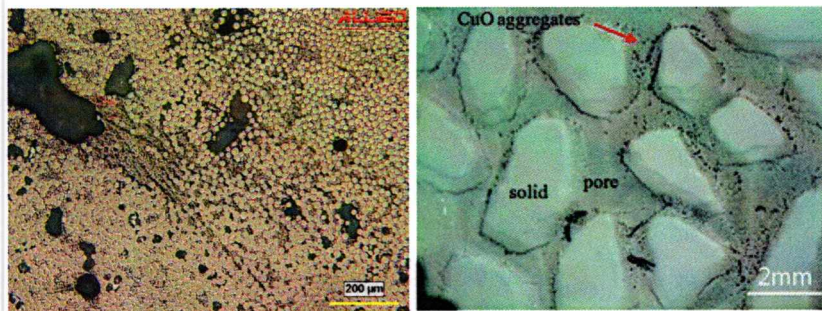
Η διαδικασία του να ξεχωρίσεις βέβαια όλα αυτά τα στοιχεία, μπορεί να είναι αρκετά απλή αν έχουμε ένα τακτικό πλέγμα αφού μπορούμε να επικαλεστούμε τη συμμετρία του σχημάτός μας αλλά μπορεί να γίνει και πολύ περίπλοκη αν το σχήμα μας δεν είναι τόσο τακτικό.

Στη προκειμένη περίπτωση, η διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθηθεί, είναι να χρησιμοποιήσουμε μία σειριακή αναπαράσταση των περιοχών του και προσεκτικά να πάρουμε όποια στοιχεία μας ενδιαφέρουν.

2.9 Καθορισμός του μεγέθους του πόρου

Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενα κομμάτια της εργασίας, με τον όρο πόρο αναφερόμαστε σε μικρά κενά που υπάρχουν διάσπαρτα μέσα στο υλικό και στην επιφάνειά του. Οι πόροι, έχουν τυχαίο σχήμα και προσανατολισμό κάθε φορά, ανάλογα πάντοτε με το πορώδες πλέγμα του κάθε υλικού που εξετάζεται. Έτσι, το να καθορίσεις το μέγεθός του είναι μία διαδικασία μέτρησης ενός μεγέθους με τυχαίο σχήμα. Πάμε να αναφερθούμε με πιο μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση αυτή και να την σχολιάσουμε.

Η γενική διαδικασία μέτρησης, μπορούμε να πούμε πως ακολουθεί τα βήματα μέτρησης μίας φυσικής ποσότητας κάθε φορά, σε σχέση με μία φυσική παράμετρο. Για να κατανοήσουμε καλύτερα το παραπάνω γενικό μοτίβο, καλό είναι να δώσουμε ένα σχετικό παράδειγμα. Για παράδειγμα, μπορούμε να μετρήσουμε και να ορίσουμε το μέγεθος του πόρου μέσα από τη διαδικασία μέτρησης του πορώδους του υλικού με τη μέθοδο του υδραργύρου. Κατά τη μέτρηση του πορώδους με χρήση του υδραργύρου, έχουμε μέτρηση του πόσο διεισδύει ο υδράργυρος σε σχέση με την αλλαγή που παρατηρείται στην πίεση αυτού. Με την πίεση αυτή λοιπόν και κάνοντας χρήση της εξίσωσης του Laplace για την πίεση στους πόρους καθώς επίσης και του μοντέλου του πορώδους πλέγματος, μπορούμε να συνδυάσουμε τον όγκο του υδραργύρου με το μέγεθος του πόρου. Ακολουθούν φωτογραφίες όπου παρουσιάζεται σε μικροσκοπική ανάλυση η δομή ενός πορώδους υλικού:



Εικόνα 15: Παραδείγματα δομής πορώδους υλικού.

Κεφάλαιο 3. Δημιουργία του πλέγματος - GMSH.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήσαμε για την δημιουργία του πλέγματος είναι το Gmsh. Το Gmsh μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε διαδραστικά το σχήμα, τοποθετώντας σημεία και ορίζοντας γραμμές και κύκλους, Στην συνέχεια με την χρήση κατάλληλων εντολών δίνουμε στο σχήμα την μορφή που θέλουμε, για την χρησιμοποίηση του στο περιβάλλον του OPENFOAM ώστε να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί. Για την καλύτερη κατανόηση του πως έχουν δημιουργηθεί τα πλέγματά μας θα χρησιμοποιήσουμε την διαδικασία που ακολουθήσαμε για το τετραγωνικό πλέγμα με 65%

επιφάνεια πορώδους μέσα στο οποίο περιέχεται φυσαλίδα που καταλαμβάνει το 80% του συνολικού του χώρου.

3.1 Τοποθέτηση σημείων στο Gmsh

Αρχικά έχοντας κάνει τους απαραίτητους μαθηματικούς υπολογισμούς για το μέγεθος του σχήματος, τοποθετήσαμε τα σημεία σε κατάλληλες αποστάσεις. Η τοποθέτηση αυτή είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός αρχείου απεικόνισης των σημείων, καθώς και το που αυτά βρίσκονται σε σχέση με το σημείο αναφοράς που βρίσκεται στο κέντρο του πλέγματος.

Η εμφάνιση των σημείων στο αρχείο :

$$\text{Point}(1) = \{0, 0, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(2) = \{0.005, 0, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(3) = \{0.005, 0.005, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(4) = \{0, 0.005, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(5) = \{-0.005, 0.005, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(6) = \{-0.005, 0, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(7) = \{-0.005, -0.005, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(8) = \{0, -0.005, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(9) = \{0.005, -0.005, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(10) = \{0.0045486365, 0, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(11) = \{0, 0.0045486365, 0, 0.001\};$$

$$\text{Point}(12) = \{-0.0045486365, 0, 0, 0.001\};$$

Point(13)= {0,-0.0045486365,0,0.001};

Point(14)= {0.0032163717,0.0032163717,0,0.001};

Point(15)= {-0.0032163717,0.0032163717,0,0.001};

Point(16)= {-0.0032163717,-0.0032163717,0,0.001};

Point(17)= {0.0032163717,-0.0032163717,0,0.001};

Point(18)= {0.0040684242,0,0,0.001};

Point(19)= {0,0.0040684242,0,0.001};

Point(20)= {-0.0040684242,0,0,0.001};

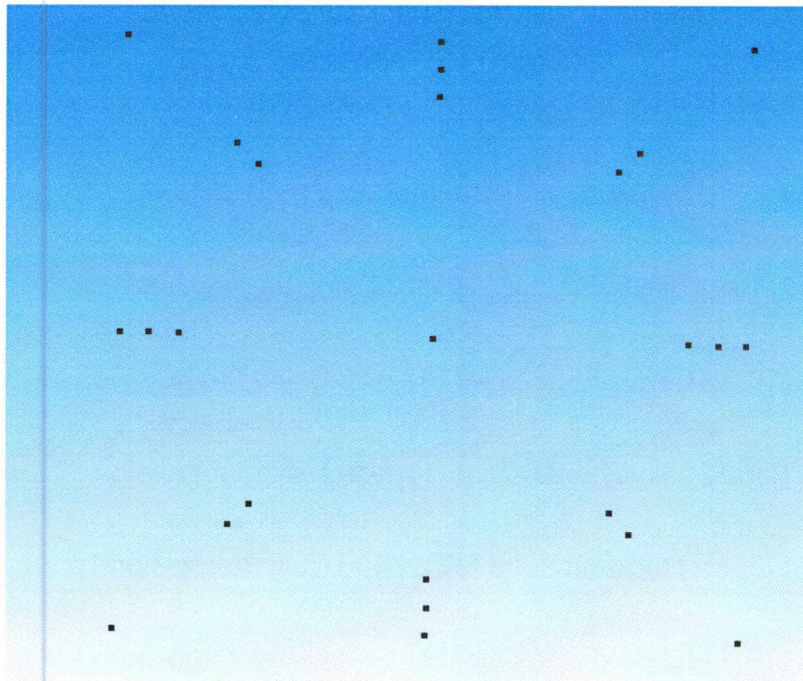
Point(21)= {0,-0.0040684242,0,0.001};

Point(22)= {0.0028768103,0.0028768103,0,0.001};

Point(23)= {-0.0028768103,0.0028768103,0,0.001};

Point(24)= {-0.0028768103,-0.0028768103,0,0.001};

Point(25)= {0.0028768103,-0.0028768103,0,0.001};



Εικόνα 16: Αποτέλεσμα χρήσης σημείων στο GMSH



3.2 Δημιουργία γραμμών-κύκλων στο Gmsh

Με την ένωση των παραπάνω σημείων στο περιβάλλον του Gmsh η εικόνα του πλέγματος είναι πλέον πιο ξεκάθαρη και έχει αποτυπωθεί και στο υπάρχον αρχείο.

Η μορφή του αρχείου πλέον :

Line(1) = {2, 3}; Transfinite Line{1} = 50 Using Progression 1 ;

Line(2) = {3, 4}; Transfinite Line{2} = 100 Using Progression 1 ;

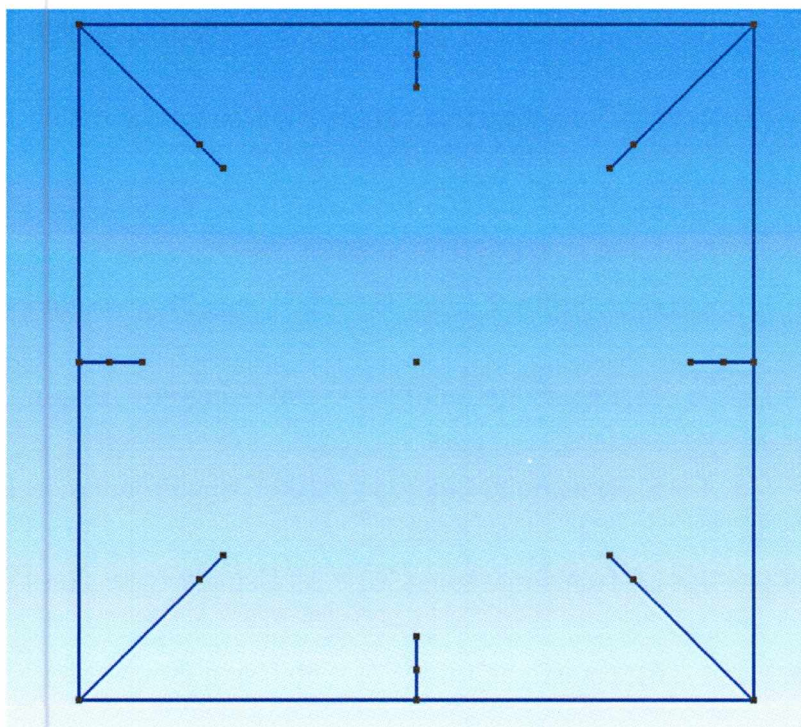
Line(3) = {4, 5}; Transfinite Line{3} = 100 Using Progression 1 ;

Line(4) = {5, 6}; Transfinite Line{4} = 50 Using Progression 1 ;

Line(5) = {6, 7}; Transfinite Line{5} = 50 Using Progression 1 ;

Line(6) = {7, 8};Transfinite Line{6} = 100 Using Progression 1 ;
Line(7) = {8, 9};Transfinite Line{7} = 100 Using Progression 1 ;
Line(8) = {9, 2};Transfinite Line{8} = 50 Using Progression 1 ;
Line(9) = {2, 10};Transfinite Line{9} = 10 Using Progression 1 ;
Line(10) = {10, 18};Transfinite Line{10} = 50 Using Progression 1 ;
Line(11) = {20, 12};Transfinite Line{11} = 50 Using Progression 1 ;
Line(12) = {12, 6};Transfinite Line{12} = 10 Using Progression 1 ;
Line(13) = {19, 11};Transfinite Line{13} = 50 Using Progression 1 ;
Line(14) = {11, 4};Transfinite Line{14} = 10 Using Progression 1 ;
Line(15) = {21, 13};Transfinite Line{15} = 50 Using Progression 1 ;
Line(16) = {13, 8};Transfinite Line{16} = 10 Using Progression 1 ;
Line(17) = {22, 14};Transfinite Line{17} = 50 Using Progression 1 ;
Line(18) = {14, 3};Transfinite Line{18} = 10 Using Progression 1 ;
Line(19) = {23, 15};Transfinite Line{19} = 50 Using Progression 1 ;
Line(20) = {15, 5};Transfinite Line{20} = 10 Using Progression 1 ;
Line(21) = {24, 16};Transfinite Line{21} = 50 Using Progression 1 ;
Line(22) = {16, 7};Transfinite Line{22} = 10 Using Progression 1 ;
Line(23) = {25, 17};Transfinite Line{23} = 50 Using Progression 1 ;
Line(24) = {17, 9};Transfinite Line{24} = 10 Using Progression 1 ;

*Με την χρήση του Transfinite μπορούμε να κόψουμε γραμμές και επιφάνειες σε επιμέρους τμήματα ώστε να είναι δυνατός ο διαχωρισμός του πλέγματος σε κελιά για την καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος.



Εικόνα 17: screen shot απο τις γραμμές του σχήματος στο GMSH

Στην συνέχεια της δημιουργίας του σχήματος έχουμε την ένωση των κατάλληλων σημείων για τον σχηματισμό των κύκλων που θα δημιουργήσουν το κυκλικό πορώδες, καθώς και την φουσαλίδα, σε 2D μορφή.

Η μορφή πλέον του αρχείου :

```
Circle(25) = {18, 1, 22}; Transfinite Line{25} = 50 Using Progression 1 ;
```

Circle(26) = {22, 1, 19};Transfinite Line{26} = 100 Using Progression 1 ;

Circle(27) = {19, 1, 23};Transfinite Line{27} = 100 Using Progression 1 ;

Circle(28) = {23, 1, 20};Transfinite Line{28} = 50 Using Progression 1 ;

Circle(29) = {20, 1, 24};Transfinite Line{29} = 50 Using Progression 1 ;

Circle(30) = {24, 1, 21};Transfinite Line{30} = 100 Using Progression 1 ;

Circle(31) = {21, 1, 25};Transfinite Line{31} = 100 Using Progression 1 ;

Circle(32) = {25, 1, 18};Transfinite Line{32} = 50 Using Progression 1 ;

Circle(33) = {10, 1, 14};Transfinite Line{33} = 50 Using Progression 1 ;

Circle(34) = {14, 1, 11};Transfinite Line{34} = 100 Using Progression 1 ;

Circle(35) = {11, 1, 15};Transfinite Line{35} = 100 Using Progression 1 ;

Circle(36) = {15, 1, 12};Transfinite Line{36} = 50 Using Progression 1 ;

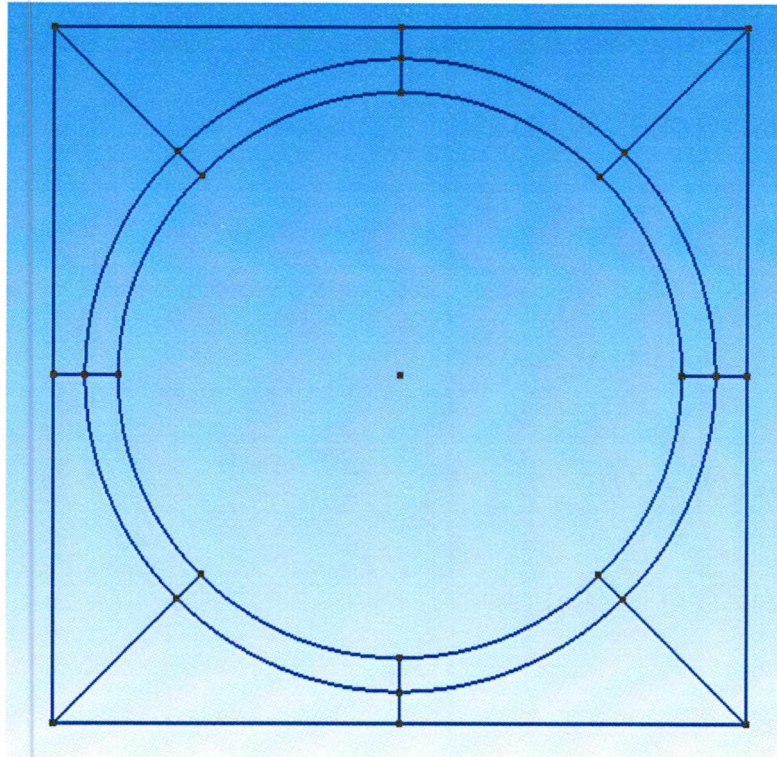
Circle(37) = {12, 1, 16};Transfinite Line{37} = 50 Using Progression 1 ;

Circle(38) = {16, 1, 13};Transfinite Line{38} = 100 Using Progression 1 ;

Circle(39) = {13, 1, 17};Transfinite Line{39} = 100 Using Progression 1 ;

Circle(40) = {17, 1, 10};Transfinite Line{40} = 50 Using Progression 1 ;

*Έχει γίνει χρήση και πάλι της εντολής Transfinite Line



Εικόνα 18: Οι κύκλοι και οι γραμμές στο υπολογιστικό πλέγμα μέσω του GMSH

3.3 Επιφάνειες στο Gmsh (εντολές Ruled Surface-Recombine Surface)

Η ένωση σημείων, γραμμών και κύκλων ορίζουν τις επιφάνειες του πλέγματος. Ο ακριβής καθορισμός γίνεται με την εντολή Ruled Surface. Για τις επιφάνειες επίσης χρησιμοποιείται το Transfinite. Η επανένωση των επιφανειών γίνεται με την εντολή Recombine Surface.

Η μορφή του αρχείου :

```
Line Loop(41) = {9, 33, 18, -1};
```

```
Ruled Surface(42) = {41};
```

```
Line Loop(43) = {18, 2, -14, -34};
```

Ruled Surface(44) = {43};

Line Loop(45) = {14, 3, -20, -35};

Ruled Surface(46) = {45};

Line Loop(47) = {20, 4, -12, -36};

Ruled Surface(48) = {47};

Line Loop(49) = {12, 5, -22, -37};

Ruled Surface(50) = {49};

Line Loop(51) = {22, 6, -16, -38};

Ruled Surface(52) = {51};

Line Loop(53) = {16, 7, -24, -39};

Ruled Surface(54) = {53};

Line Loop(55) = {24, 8, 9, -40};

Ruled Surface(56) = {55};

Line Loop(57) = {33, -17, -25, -10};

Ruled Surface(58) = {57};

Line Loop(59) = {17, 34, -13, -26};

Ruled Surface(60) = {59};

Line Loop(61) = {13, 35, -19, -27};

Ruled Surface(62) = {61};

Line Loop(63) = {19, 36, -11, -28};

Ruled Surface(64) = {63};

Line Loop(65) = {11, 37, -21, -29};

Ruled Surface(66) = {65};

Line Loop(67) = {21, 38, -15, -30};

Ruled Surface(68) = {67};

Line Loop(69) = {15, 39, -23, -31};

Ruled Surface(70) = {69};

Line Loop(71) = {23, 40, 10, -32};

Ruled Surface(72) = {71};

Transfinite Surface {42};

Transfinite Surface {44};

Transfinite Surface {46};

Transfinite Surface {48};

Transfinite Surface {50};

Transfinite Surface {52};

Transfinite Surface {54};

Transfinite Surface {56};

Recombine Surface(42);

Recombine Surface(44);

Recombine Surface(46);

Recombine Surface(48);

Recombine Surface(50);

Recombine Surface(52);

Recombine Surface(54);

Recombine Surface(56);

Transfinite Surface {58};

Transfinite Surface {60};

Transfinite Surface {62};

Transfinite Surface {64};

Transfinite Surface {66};

Transfinite Surface {68};

Transfinite Surface {70};

Transfinite Surface {72};

Recombine Surface(58);

Recombine Surface(60);

Recombine Surface(62);

Recombine Surface(64);

Recombine Surface(66);

Recombine Surface(68);

Recombine Surface(70);

Recombine Surface(72);

3.4 Δημιουργία 3D επιφανειών στο Gmsh (εντολή extrude-physical surface)

Το extrude μετατρέπει το πλέγμα σε 3D μορφή. Με το physical ορίζουμε τις επιφάνειες

Η μορφή του αρχείου :

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{42}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{44}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{46}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{48}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{50}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{52}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{54}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{56}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{58}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{60}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{62}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{64}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{66}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{68}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{70}; Layers{1}; Recombine; }

Extrude {0,0,0.0001} { Surface{72}; Layers{1}; Recombine; }

Coherence;

Coherence;

Coherence;

Physical Surface(425) = {270, 58, 292, 60, 314, 62, 336, 64, 358, 66, 380, 68, 402, 70, 424, 72, 94, 42, 116, 44, 138, 46, 160, 48, 182, 50, 204, 52, 226, 54, 248, 56};

Physical Surface(426) = {151, 173};

Physical Surface(427) = {93, 239};

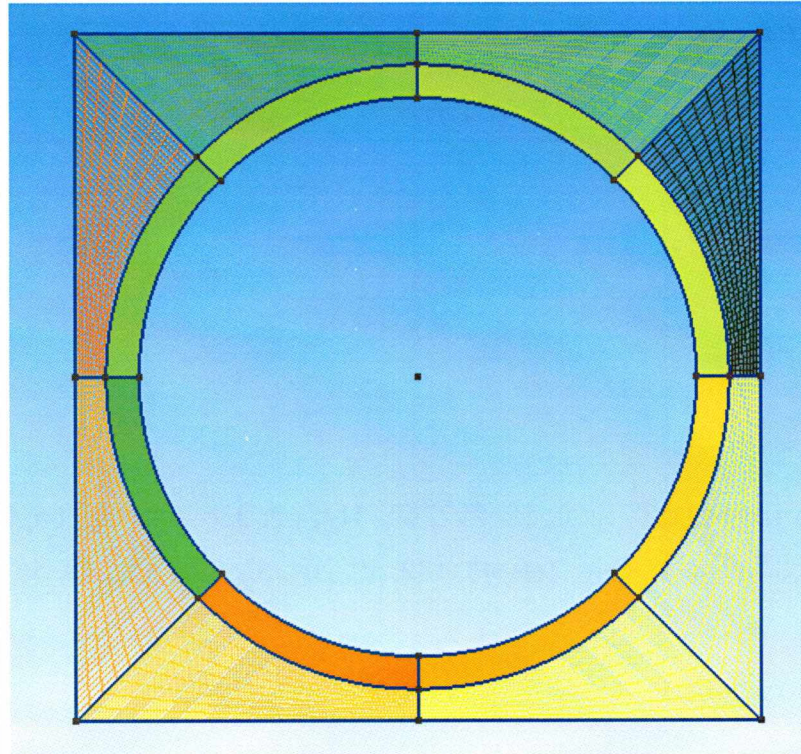
Physical Surface(428) = {129, 107, 195, 217};

Physical Surface(429) = {313, 335, 357, 379, 401, 423, 265, 291};

Physical Volume(430) = {3, 4, 5, 6, 7, 8, 1, 2};

Physical Volume(431) = {11, 12, 13, 14, 15, 16, 9, 10};

Έτσι δημιουργήθηκε η γεωμετρία του μοναδιαίου κελιού στο Gmsh που χρησιμοποιείται αργότερα για τους υπολογισμούς.



Εικόνα 19: Η τελική μορφή του υπολογιστικού πλέγματος στο GMSH (3D)

Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση της λειτουργίας του OpenFoam

Το OpenFoam είναι το υπολογιστικό πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του προφίλ των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν (ταχύτητα, πίεση, διαπερατότητα), όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Παρακάτω θα παρουσιαστούν πληροφορίες για το πρόγραμμα αυτό καθώς και των κυριότερων εντολών που χρησιμοποιήθηκαν.

4.1 Εισαγωγή στο OpenFoam

Το OpenFoam®, (2004) είναι καταρχήν μία βιβλιοθήκη C++ γλώσσας υπολογιστή, η οποία χρησιμοποιείται με τρόπο τέτοιο ώστε να δημιουργηθούν εκτελέσιμες διαδικασίες (executable applications). Αυτές οι διαδικασίες, χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, τους λύτες (solvers), που χρησιμοποιούνται για να λύσουν συγκεκριμένα προβλήματα μηχανικής και τις διαδικασίες-εφαρμογές (utilities), οι οποίες είναι υπεύθυνες για την επεξεργασία των δεδομένων. Το OpenFOAM, περιλαμβάνει μία μεγάλη γκάμα από λύτες (solvers) και διαδικασίες-εφαρμογές (utilities), καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ κομμάτι προβλημάτων που μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Παρακάτω θα αναφερθούμε επιγραμματικά στο εύρος των δυνατοτήτων που έχει το OpenFOAM:

- Βασικούς ρευστό-δυναμικούς λύτες (solvers).

- Ασυμπίεστη ροή με ιδιότητες RANS και LES.
- Συμπιεστή ροή με ιδιότητες RANS και LES.
- Buoyancy-driven flow.
- DNS και LES.
- Ροές πολλών φάσεων.
- Λύτες εντοπισμού σωματιδίων.
- Προβλήματα σχάσης.
- Προβλήματα μεταφοράς θερμότητας με σύζευξη.
- Προβλήματα μοριακής δυναμικής.
- Ηλεκτρομαγνητικής φύσεως προβλήματα.
- Δυναμική των στερεών.

4.2 Λύτης PorousSimpleFoam

Ο λύτης αυτός έχει κάποιες βασικές εξισώσεις, με την βοήθεια των οποίων μπορεί να μας δώσει αποτελέσματα για ροή ρευστού μέσα από πορώδες σώμα.

Ξεκινώντας λοιπόν την ανάλυση του porousSimpleFoam, η εξίσωση που λύνει το υπολογιστικό πακέτο είναι η ακόλουθη:

$$\rho U \nabla U = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + s \quad (4.1)$$

Ο όρος s αναλύεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$s = -\mu D \cdot \bar{U} \quad (4.2)$$

Όπου:

- μ = δυναμικό ιξώδες
- D = όρος αντίστροφος της διαπερατότητας K (m^2)
- \bar{U} = ταχύτητα (m/s)
- τ = τανυστής των τάσεων

Ο όρος (s) αντιστοιχεί στον όρο Νταρσύ. Αποτελεί έναν όρο στη ροή στο πορώδες που μας επιτρέπει να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά ενός ρευστού όταν η διαπερατότητα είναι πολύ μεγάλη, και στην αντίθετη περίπτωση να χρησιμοποιηθεί ο νόμος του Νταρσύ. Η παραπάνω αναφέρεται ως εξίσωση Brinkmann.

4.3 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Το υπολογιστικό πακέτο που επιλέξαμε μέσα σε όλες τις υπολογιστικές του διαδικασίες, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Η μέθοδος αυτή, υποδιαιρεί τον όγκο ελέγχου σε πολλούς άλλους μικρότερους του αρχικού, κάνοντας έτσι πολύ πιο εύκολη τη χρήση αυτών σε υπολογιστικές διαδικασίες. Σε αυτούς τους μικρότερους όγκους ελέγχου, εφαρμόζονται οι μεταφορικές μας εξισώσεις σε κάθε έναν ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας παράλληλα μεθόδους διαφορών για να προσδιορίσουμε τις ιδιότητες της ροής. Οι solvers που θα χρησιμοποιήσουμε, που αναφέρονται σε σταθερές συνθήκες πάντοτε, χρησιμοποιούν την προαναφερθείσα μέθοδο για να μοντελοποιήσουν την ροή μας, χρησιμοποιώντας τις βασικές εξισώσεις που διέπουν το ανάλογο φαινόμενο κάθε φορά.

επιφάνεια της φουσαλίδας. Για την είσοδο δώσαμε ορισμένη τιμή. Η παραδοχή μηδενικής ταχύτητας στην επιφάνεια της φουσαλίδας δεν είναι αναγκαστικά η μόνη δυνατή επιλογή. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να θέσουμε οριακή συνθήκη ολίσθησης, που θα ήταν συμβατή με την ύπαρξη μηδενικών διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια της φουσαλίδας. Επειδή όμως η φουσαλίδα βρίσκεται μέσα σε ένα πορώδες διφασικό (π.χ ινώδες) υλικό, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι μεγάλο τμήμα της επιφάνειας της φουσαλίδας καταλαμβάνεται από στερεά φάση (π.χ ίνες) επομένως η παραδοχή μηδενικής ταχύτητας είναι λογική. Όπως έχει ειπωθεί στην αρχή της εργασίας, δεν υπάρχει σχετική βιβλιογραφική εμπειρία σε αυτό το θέμα. Παρακάτω παρουσιάζουμε το σχετικό απόκομμα:

```
inlet{typefixedValue;valueuniform (0 0 0.078125);}
```

```
outlet{typezeroGradient;}
```

```
walls{typefixedValue;value uniform (0 0 0);}
```

Για την πίεση ορίσαμε γνωστή την τιμή της στην είσοδο και ίση με ατμοσφαιρική (στο πρόγραμμα η ατμοσφαιρική ορίζεται αν θέσουμε ίση με 0) ενώ στα τοιχώματα, τα όρια της φουσαλίδας και την έξοδο, θέσαμε το παράγωγό της ίσο με μηδέν. Παρακάτω βλέπουμε το σχετικό απόκομμα:

```
inlet{typefixedValue;valueuniform 0;}
```

```
outlet{typezeroGradient;}
```

```
walls{typezeroGradient;}
```

Με τον ορισμό των παραπάνω συνθηκών είναι δυνατό να ξεκινήσει η προσομοίωση μας. Ο σχηματισμός του υπολογιστικού πλέγματος και ο προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών που εμείς θέλουμε θα μας δώσει τα αποτελέσματα, που στην συνέχεια, για να γίνουν εμφανή, θα παρουσιαστούν γραφικά μέσα απο το σχεδιαστικό περιβάλλον Paraview.

Κεφάλαιο 5 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Τα προβλήματα που εξετάστηκαν με την βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου OpenFoam είναι τα εξής :

- Ροή ρευστού σε μοναδιαίο κελί, περιεχομένου κυκλικής διατομής πορώδες υλικό
- Ροή ρευστού σε μοναδιαίο κελί, περιεχομένου κυκλικής διατομής πορώδες υλικό με φυσαλίδα 8% της συνολικής διατομής του
- Ροή ρευστού σε μοναδιαίο κελί, περιεχομένου κυκλικής διατομής πορώδες υλικό με φυσαλίδα 20% της συνολικής διατομής του
- Ροή ρευστού σε μοναδιαίο κελί, περιεχομένου κυκλικής διατομής πορώδες υλικό με φυσαλίδα 32% της συνολικής διατομής του
- Ροή ρευστού σε μοναδιαίο κελί, περιεχομένου κυκλικής διατομής πορώδες υλικό με φυσαλίδα 50% της συνολικής διατομής του
- Ροή ρευστού σε μοναδιαίο κελί, περιεχομένου κυκλικής διατομής πορώδες υλικό με φυσαλίδα 80% της συνολικής διατομής του

Στις παραπάνω περιπτώσεις θεωρήθηκαν ως αρχικές συνθήκες τα εξής στοιχεία:

- Διαπερατότητα πορώδους υλικού $K=10^{-8}$
- Πτώση πίεσης $\Delta P=1\text{Kpa}$
- Ιξώδες ρευστού $\mu=1000\text{Pa} \cdot \text{s}$
- Εύρος πορώδους από $\phi=0.75$ έως 0.25
- Αναλογία κύκλου όπου $\lambda=1$
- Χαρακτηριστικό μήκος μοναδιαίου κελιού $Lx = N * \sqrt{K}$ με $N=100$

Για την δημιουργία του εκάστοτε προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις των Frederick R. Phelan Jr, Geoff Wise, (1996) που συνδέουν την διαπερατότητα με το χαρακτηριστικό μήκος του πλέγματος $x=Lx$.

$$Lx = \sqrt{K} * N \quad (5.1)$$

$$Ly = \left(\frac{1}{\lambda}\right) * Lx \quad (5.2)$$

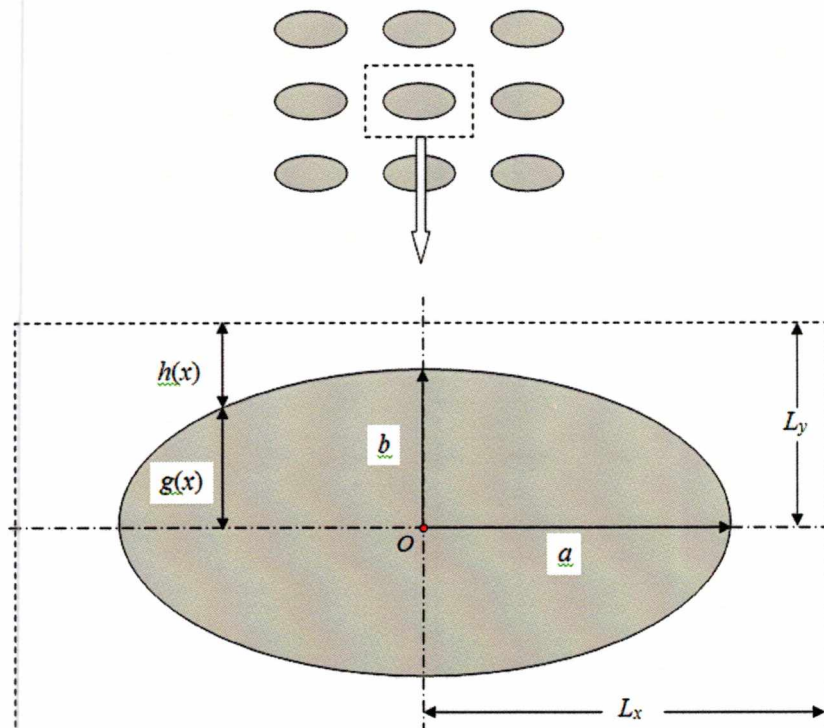
$$\beta = \sqrt{\frac{\varphi * Lx * Ly}{\lambda * \pi}} \quad (5.3)$$

$$\alpha = 2 * \beta \quad (5.4)$$

$$g = \beta \quad (5.5)$$

$$h = \left(\frac{Ly}{2}\right) - g \quad (5.6)$$

Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πορώδους υλικού :



Εικόνα 20 : Απεικόνιση γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε πορώδες υλικό

Τέλος οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος στο υπολογιστικό πακέτο OpenFoam είναι :

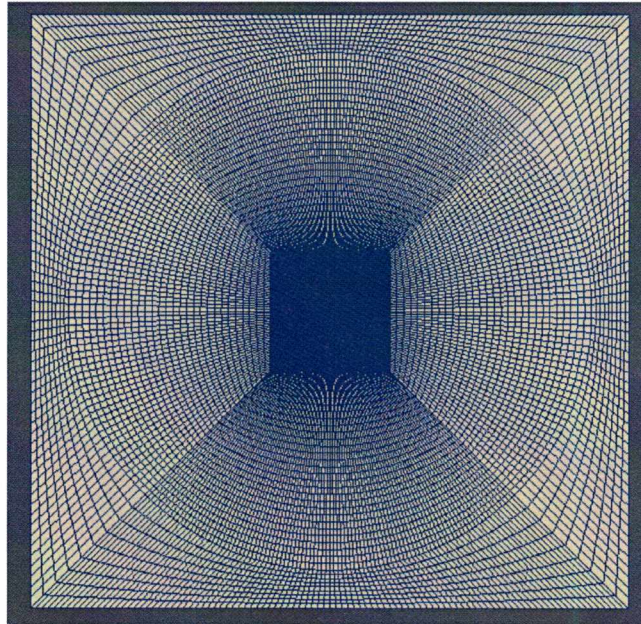
$$Q = A * \int_{-L_y}^{L_y} Ux(y)dy \quad (5.13)$$

$$K_{eff} = (Q * L * \mu) / (\Delta P * A) \quad (5.14)$$

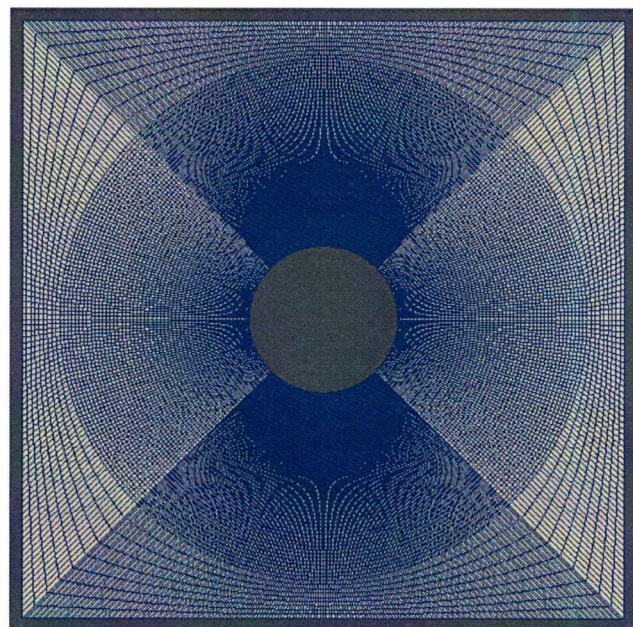
Στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα ταχυτήτων στο δεξί άκρο του πλέγματος δηλαδή στο σημείο $x=Lx$.

5.1 Παρουσίαση εξεταζόμενων υπολογιστικών πλεγμάτων

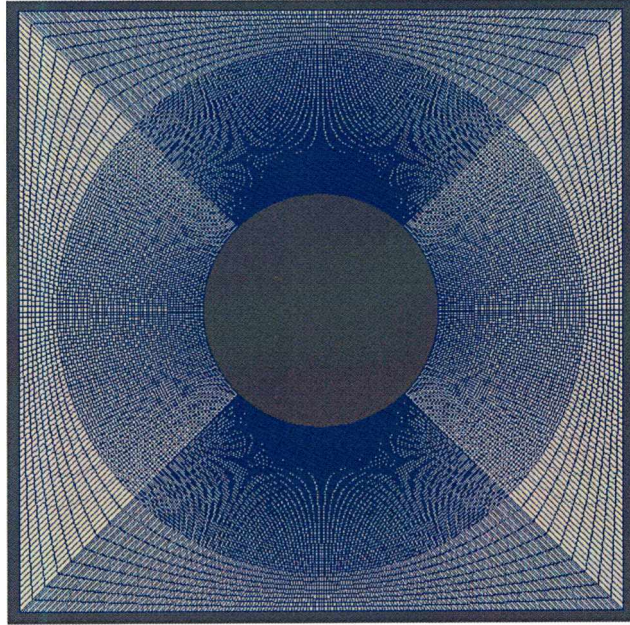
Για τους παρακάτω υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ένας αριθμός υπολογιστικών πλεγμάτων στα οποία κάναμε αλλαγή του όγκου της φυσαλίδας αέρα μέσα στο σύνθετο υλικό. Ο κενός χώρος στο πλέγμα μεταβαλλόταν σε 25,30,35,40,50(%) του συνολικού όγκου του σχήματος. Εδώ θα παρουσιασθεί σε εικόνες η αύξηση της φυσαλίδας αέρα σε ένα συγκεκριμένο όγκο κενού χώρου 40%. Τα υπόλοιπα σχήματα γίνεται κατανοητό ότι θα είναι παρόμοια.



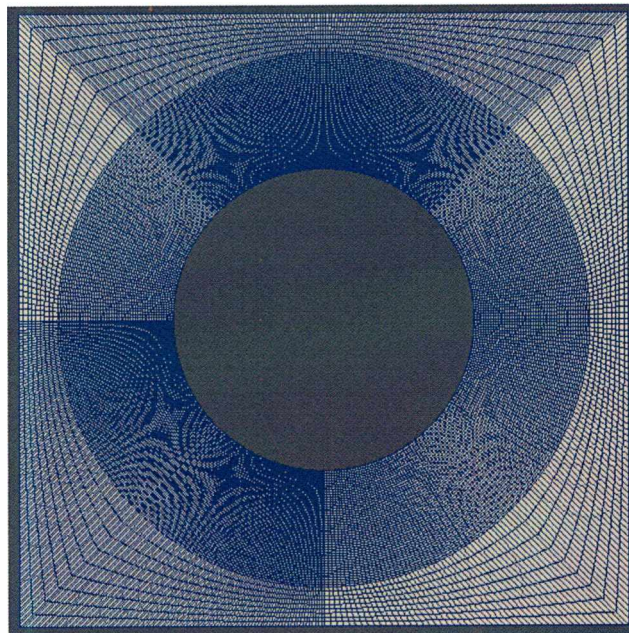
Εικόνα 21: Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 0% φυσαλίδας αέρα



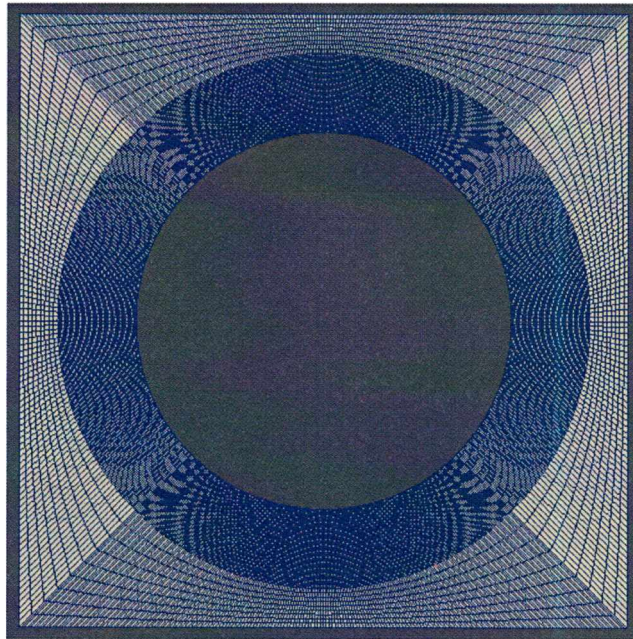
Εικόνα 22: Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 8% φυσαλίδας αέρα



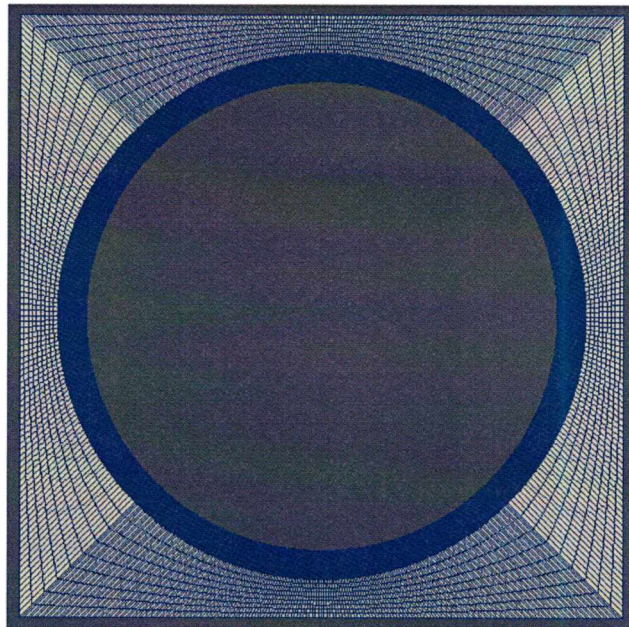
Εικόνα 23: Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 20% φυσαλίδας αέρα



Εικόνα 24: Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 32% φυσαλίδας αέρα



Εικόνα 25: Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 50% φυσαλίδας αέρα



Εικόνα 26: Μοναδιαίο κελί περιεχομένου κύκλου πορώδους υλικού 60% της συνολικής επιφάνειας εκ του οποίου 80% φυσαλίδας αέρα

5.2 Πρόβλεψη διαπερατότητας

Ένας από τους κύριους στόχους της παρούσας εργασίας είναι η πρόβλεψη της διαπερατότητας στη ροή ρευστού και το πως αυτή μεταβάλλεται με την ύπαρξη φυσαλίδας αέρα, στα πορώδη υλικά.

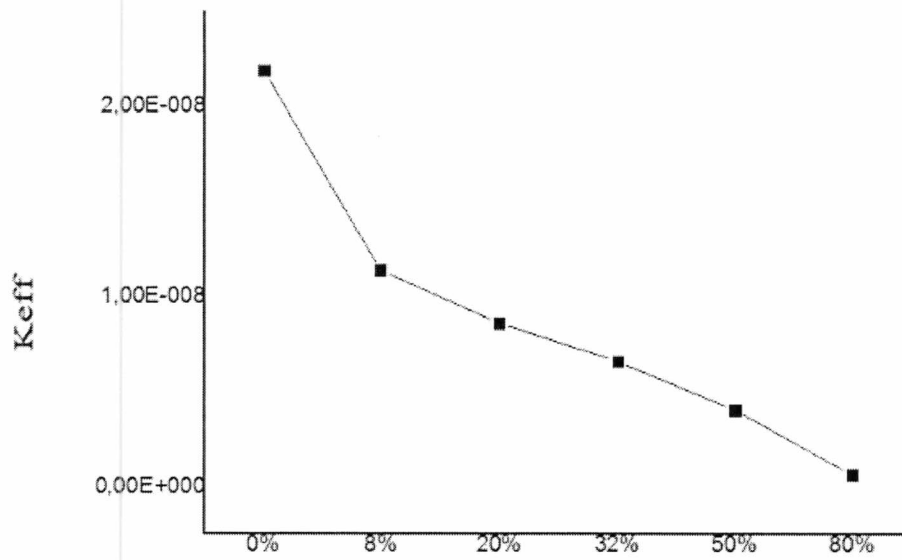
Παρακάτω, παρατίθενται σε σχετικό πίνακα οι τιμές της διαπερατότητας ελεύθερου χώρου(χώρος χωρίς πορώδες υλικό) 25%,30%,35%,40%,50% του συνολικού όγκου του υπολογιστικού μας πλέγματος και φυσαλίδας αέρα 0%,8%,20%,32%,50%,80% του συνολικού όγκου του υλικού.

Bubble (%) / free space (%)	25	30	35	40	50
0	2,19E-008	3,40E-008	5,89E-008	1,00E-007	2,59E-007
8	1,14E-008	2,38E-008	4,88E-008	9,12E-008	2,51E-007
20	8,61E-009	2,07E-008	4,56E-008	8,78E-008	2,47E-007
32	6,61E-009	1,82E-008	4,26E-008	8,51E-008	2,44E-007
50	4,07E-009	1,51E-008	3,92E-008	8,09E-008	2,40E-007
80	6,73E-010	7,47E-009	2,80E-008	6,73E-008	2,25E-007

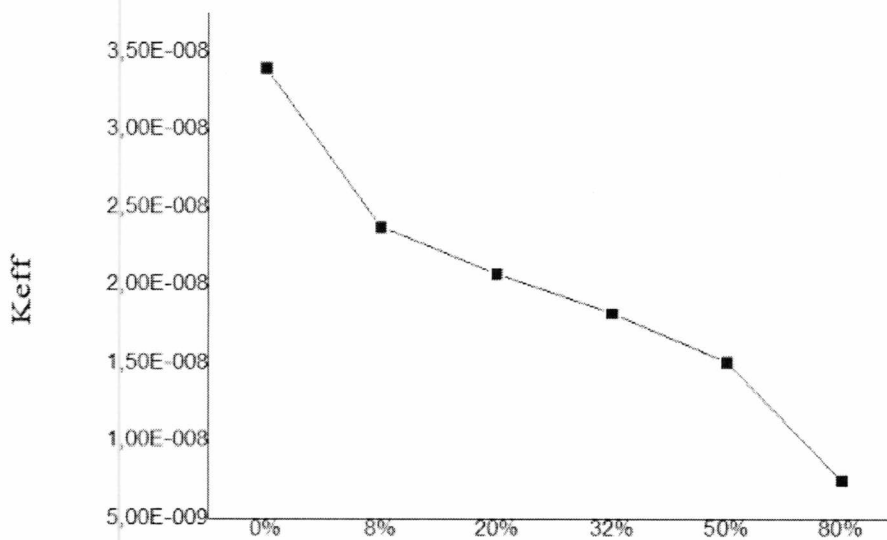
Πίνακας 1: Πρόβλεψη διαπερατότητας κυκλικού πορώδους υλικού με μεταβολή φυσαλίδας αέρα

Σε μία πρώτη ανάγνωση του πίνακα, παρατηρούμε , ότι η συνεχόμενη αύξηση του αέρα στο κέντρο του πλέγματος προκαλεί τη μείωση της διαπερατότητας του. Αυτό είναι ίσως μια αναμενόμενη συνέπεια της παραδοχής μηδενικής ταχύτητας στην επιφάνεια της φυσαλίδας.

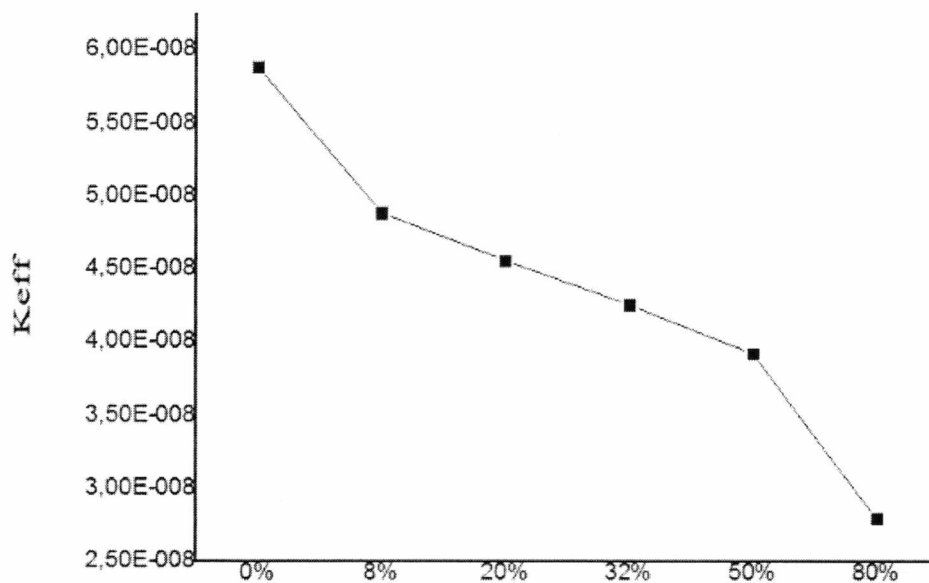
Οι τιμές που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα είναι δυνατό να γίνουν περαιτέρω κατανοητές με τα παρακάτω διαγράμματα όπου ο άξονας -x αναφέρεται στην εκάστοτε φυσαλίδα (χώρος που καταλαμβάνει μέσα στο πορώδες υλικό) και ο άξονας -y στην διαπερατότητα του σύνθετου υλικού.



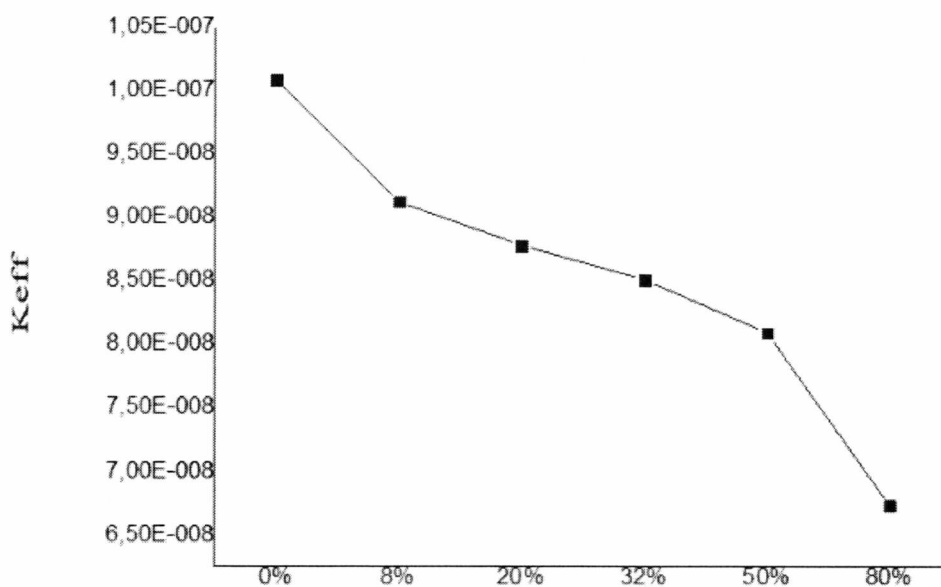
Εικόνα 27 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 75% του πλέγματος



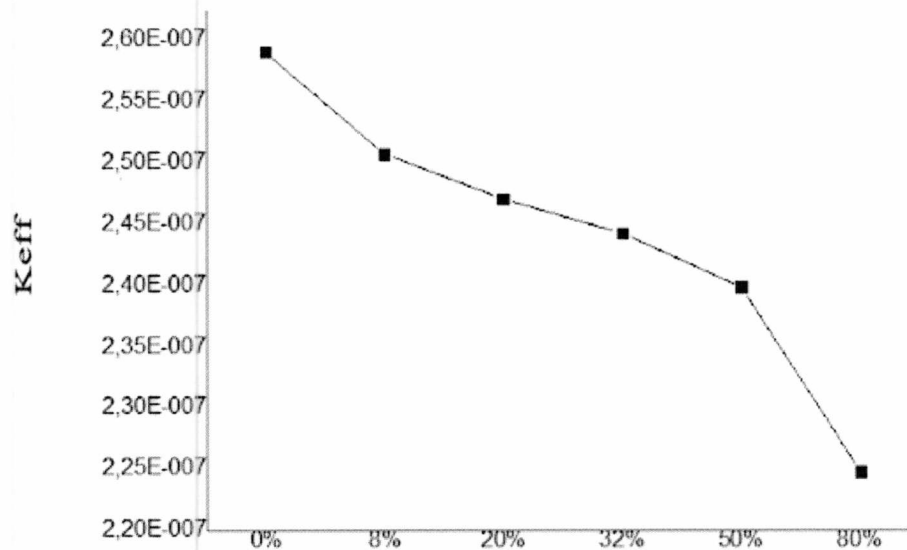
Εικόνα 28 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 70% του πλέγματος



Εικόνα 29 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 65% του συνολικού πλέγματος



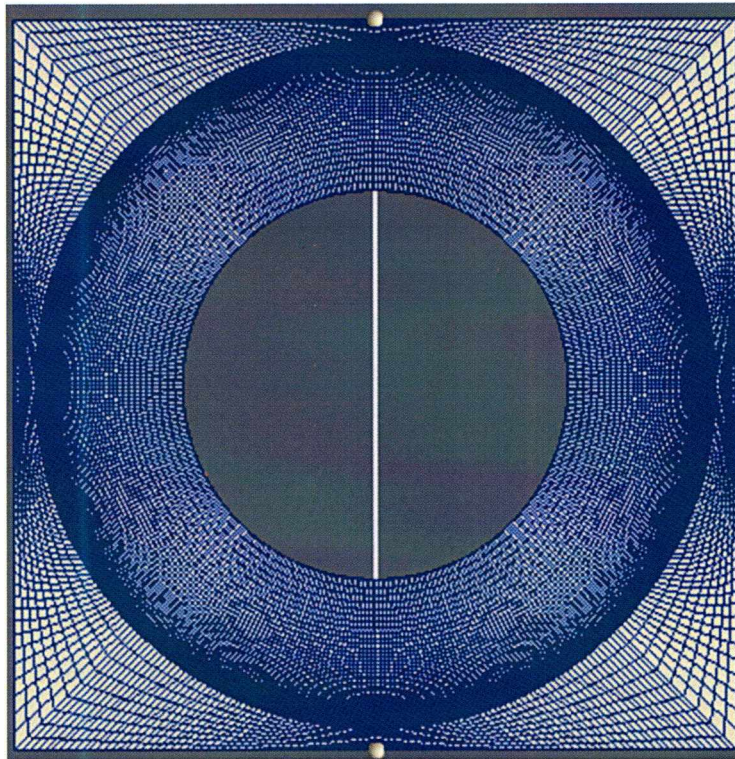
Εικόνα 30 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 60% του συνολικού πλέγματος



Εικόνα 31 : Διάγραμμα διαπερατότητας με αύξηση φυσαλίδας σε πορώδες υλικό 50% του συνολικού πλέγματος

5.3 Μεταβολή ταχύτητας

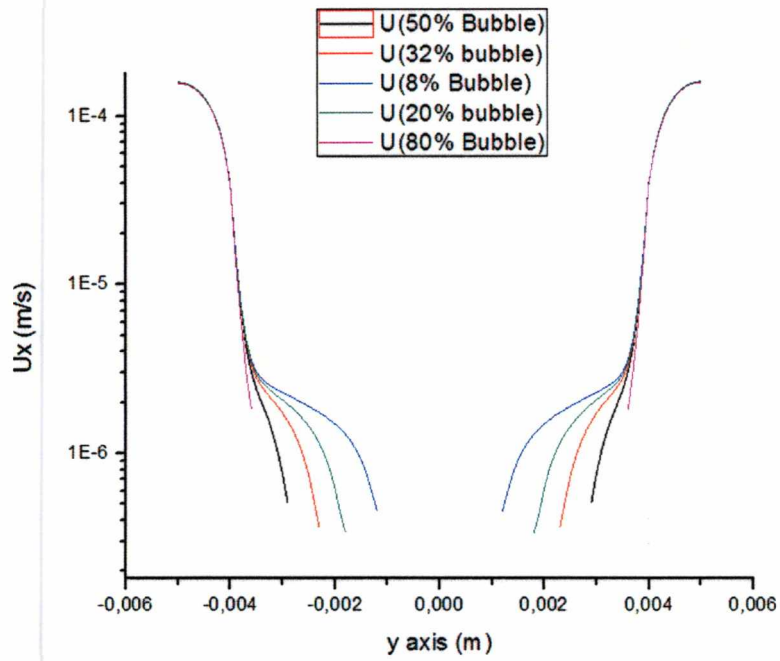
Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί η μεταβολή της ταχύτητας (U_x) κατά μήκος του y -άξονα σε δύο υπολογιστικά πλέγματα. Στα δύο διαγράμματα θα παρουσιαστούν όλες οι καμπύλες των ταχυτήτων ανάλογα με την φυσαλίδα αέρα που εμπεριέχεται μέσα στο πορώδες υλικό, κρατώντας τον όγκο σταθερό. Ο y -άξονας θα βρίσκεται στο κέντρο του σχήματος. Στο διάγραμμα ο y -άξονας αναφέρεται στις τιμές των ταχυτήτων και ο x -άξονας στο μήκος του πλέγματος.



Εικόνα 32 : Ο εξεταζόμενος άξονας για την μεταβολή της ταχύτητας στο κέντρο του υπολογιστικού πλέγματος

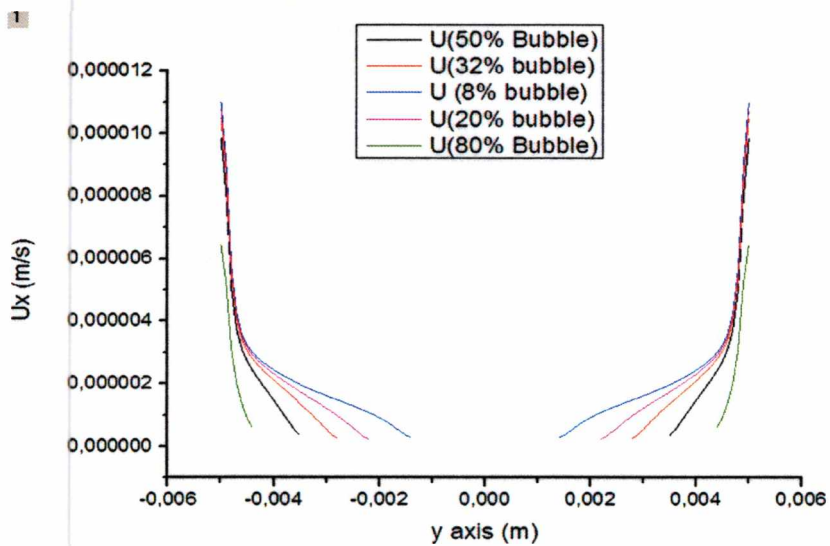
Οι δύο περιπτώσεις :

- Πορώδες υλικό 50% του συνολικού πλέγματος



Εικόνα 33: Καμπύλες ταχυτήτων της U_x κατα μήκος του y -άξονα στο κέντρο του σχήματος (50% πορώδες υλικό)

• Πορώδες υλικό 75% του συνολικού πλέγματος

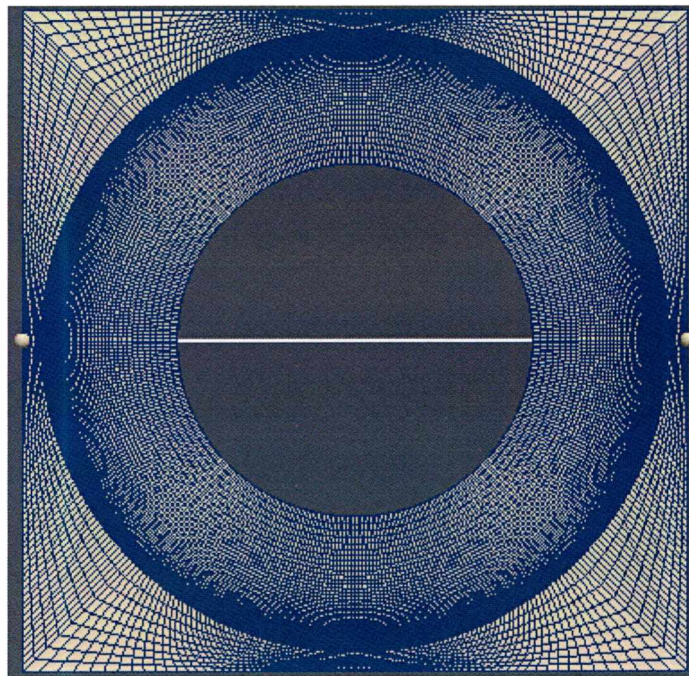


Εικόνα 34: Καμπύλες ταχυτήτων της U_x κατα μήκος του y -άξονα στο κέντρο του σχήματος (75% πορώδες υλικό)

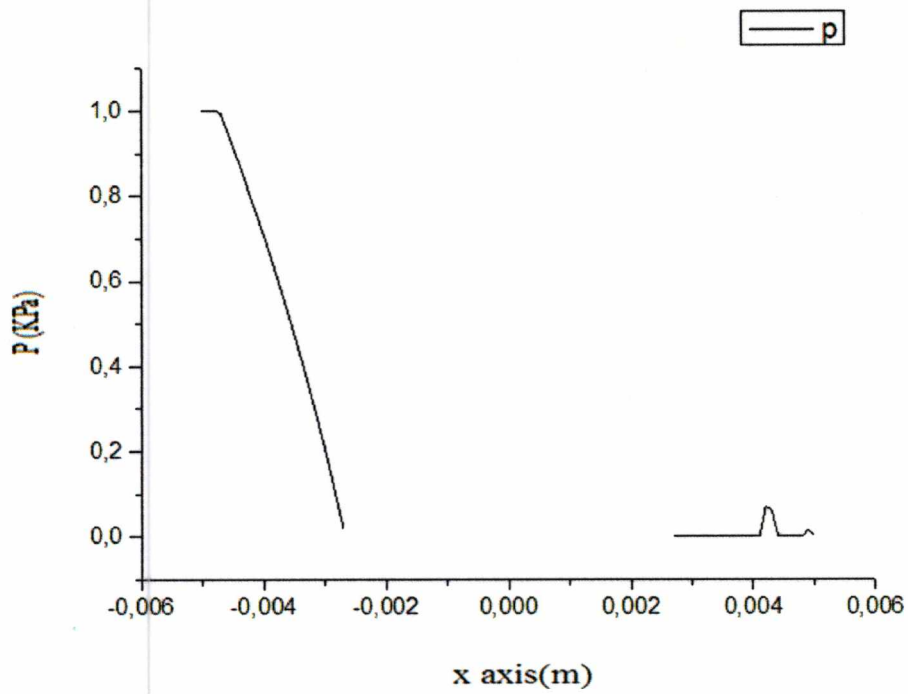
5.4 Μεταβολή πίεσης

Στην παρούσα ενότητα θα εξεταστεί η μεταβολή της πίεσης κατά μήκος του x-άξονα του σχήματος. Στα διαγράμματα ο x-άξονας αναφέρεται στο μήκος (m) του πλέγματος και ο y-άξονας στην πτώση πίεσης (kPa). Θα χρησιμοποιηθεί ένα σχήμα με συγκεκριμένο πορώδες υλικό(70% της συνολικής επιφάνειας) και φυσαλίδα αέρα(32% της συνολικής επιφάνειας του πορώδους υλικού) εξετάζοντας το ζητούμενο μέγεθος σε τρία διαφορετικά μέρη:

- Ο άξονας περνά μέσα από το πορώδες υλικό και μέσα από την φυσαλίδα αέρα

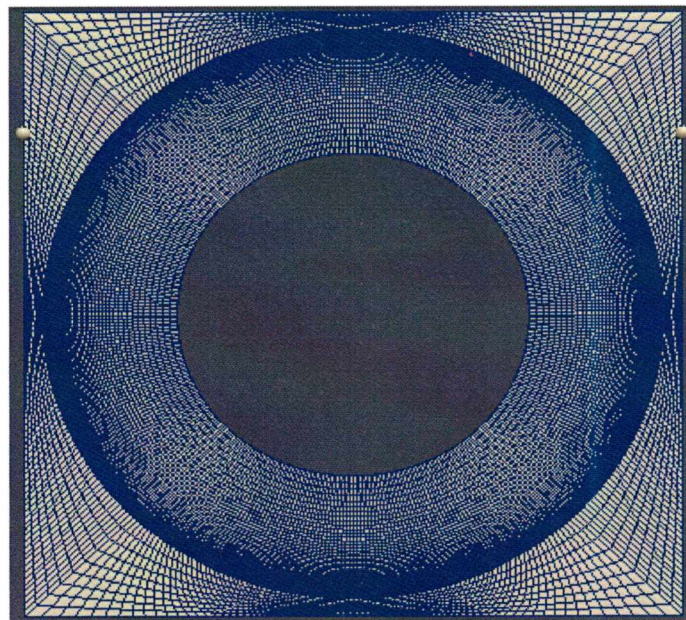


Εικόνα 35: Απεικόνιση σχήματος με τον εξεταζόμενο άξονα για μεταβολή πίεσης να περνά μέσα από πορώδες υλικό και φυσαλίδα

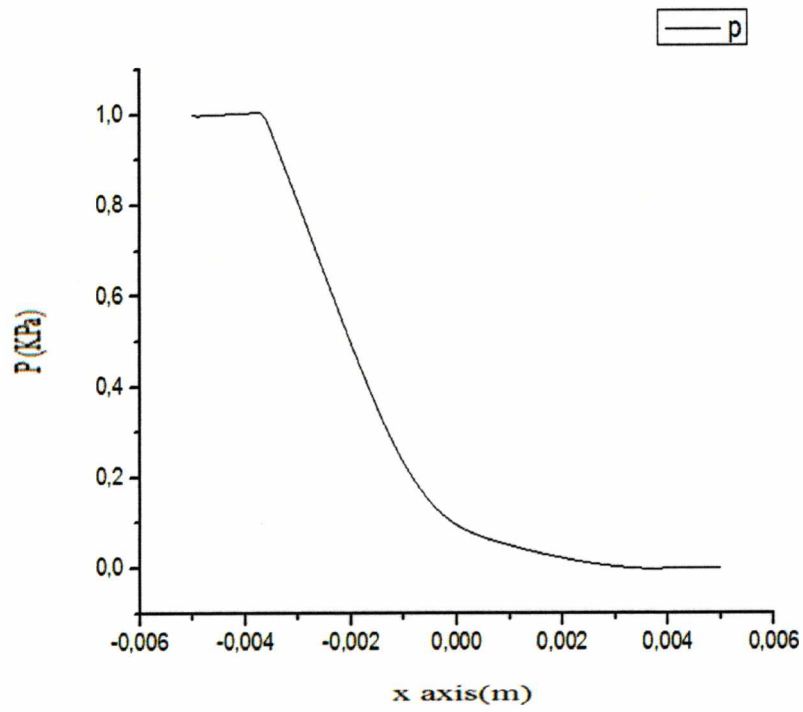


Εικόνα 36 : Διάγραμμα μεταβολής πίεσης με τον εξεταζόμενο άξονα να περνά μέσα από πορώδες και φυσαλίδα

• Ο άξονας περνά μόνο μέσα από το πορώδες υλικό

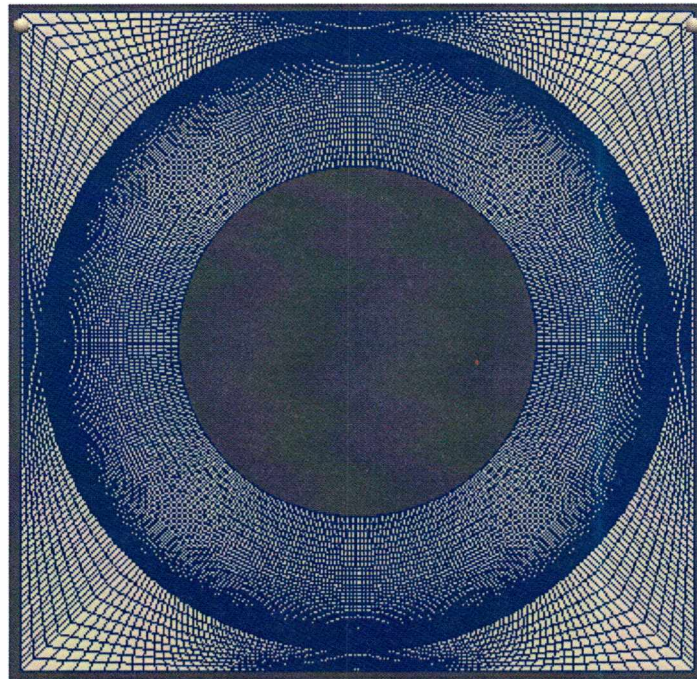


Εικόνα 37 : Απεικόνιση σχήματος με τον εξεταζόμενο άξονα για μεταβολή πίεσης να περνά μόνο μέσα από πορώδες υλικό

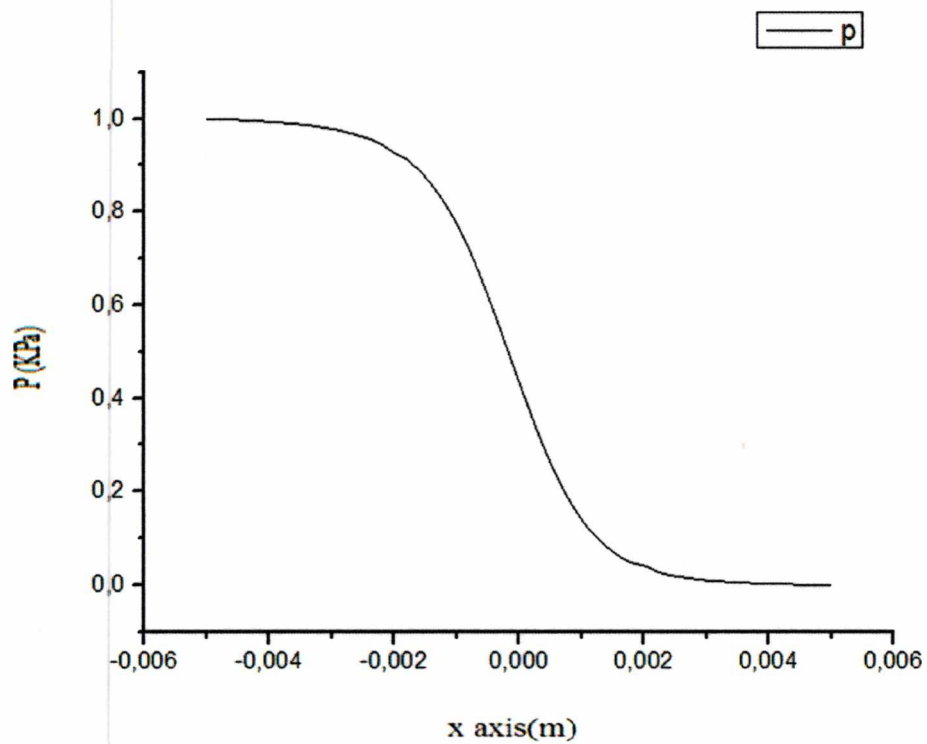


Εικόνα 38 : Διάγραμμα μεταβολής πίεσης με τον εξεταζόμενο άξονα μεταβολής πίεσης να περνά μόνο μέσα από πορώδες υλικό

- Ο άξονας βρίσκεται στον ελεύθερο χώρο



Εικόνα 39 : Απεικόνιση σχήματος με τον εξεταζόμενο άξονα για μεταβολή πίεσης να περνά μόνο από τον ελεύθερο χώρο



Εικόνα 40 : Διάγραμμα μεταβολής πίεσης με τον εξεταζόμενο άξονα μεταβολής πίεσης να περνά μόνο από τον ελεύθερο χώρο

5.5 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου έγινε η παρουσίαση των διαγραμμάτων, σε διάφορες περιπτώσεις του προβλήματος μας στην παρούσα εργασία, στα μεγέθη που μας ενδιέφεραν.

Το πρώτο στοιχείο και το κυριότερο σε σχέση με τους στόχους της μελέτης μας είναι η μείωση της διαπερατότητας του μοναδιαίου κελιού με την αύξηση της εγκλωβισμένης φυσαλίδας αέρα μέσα στο πορώδες υλικό. Το φαινόμενο της μείωσης της διαπερατότητας είναι εμφανές σε όλα τα διαγράμματα ανεξάρτητα από το ποσοστό που καταλαμβάνει το σύνθετο υλικό μέσα στο μοναδιαίο κελί. Η αύξηση αντίθετα του όγκου του εγκλωβισμένου αέρα επιφέρει μεγαλύτερη πτώση διαπερατότητας στο εξεταζόμενο πλέγμα. Το τελευταίο γεγονός που αξίζει να αναφέρουμε, στα παραπάνω διαγράμματα, είναι η μείωση της διαπερατότητας του κελιού όταν σε αυτό αυξάνουμε τον όγκο που καταλαμβάνει το πορώδες υλικό μέσα σε αυτό.

Στα διαγράμματα της ταχύτητας κατά μήκος του x-άξονα αξιοσημείωτο γεγονός είναι οι διαφορετικές μορφές που παρουσιάζονται ανάλογα με το σημείο στο γεωμετρικό μας σχήμα. Η πρώτη παρατήρηση αφορά τις ταχύτητες μέσα στο πορώδες υλικό όπου δίνουν ένα καμπύλο σχήμα στο διάγραμμα. Όσο αναφορά τις ταχύτητες μέσα στο ρευστό αυτές φαίνεται να έχουν ένα πιο γραμμικό προφίλ. Μέσα στο κενό αέρα μπορεί εύκολα κανείς να διακρίνει ότι δεν υπάρχει ταχύτητα, κάτι φυσικά αναμενόμενο. Τέλος, καμπυλότητα διακρίνεται και στα τοιχώματα της φυσαλίδας αέρα μέσα στο πορώδες υλικό.

Για την πτώση πίεσης χαρακτηριστικό αποτελεί το διάγραμμα όπου ο εξεταζόμενος άξονας περνά μέσα από την φυσαλίδα αέρα, δίνοντας ένα πολύ διαφορετικό διάγραμμα από τις υπόλοιπες περιπτώσεις, εμφανίζοντας ανωμαλίες και ασυνέχεια στην μορφή του.

Κλείνοντας, σαν πρόταση για συνέχεια της παρούσας εργασίας θα ήταν δόκιμο να εξεταστούν και άλλες περιπτώσεις με διαφορετικές οριακές συνθήκες, όπως για παράδειγμα στα τοιχώματα της φυσαλίδας, έτσι ώστε να έχουμε μια πιο σφαιρική και καλύτερη εικόνα για το πως επηρεάζεται η διαπερατότητα αλλά και τα υπόλοιπα μεγέθη στο σύνηθες φαινόμενο του εγκλωβισμού αέρα στα σύνθετα υλικά.

Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

Darcy's law. (1856). Ανάκτηση από wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy's_law

OpenFOAM®. (2004). Ανάκτηση από OpenFOAM: <http://www.openfoam.com/>

Dullien. (1992). Macroscopic pore structure parameters. Στο F. DULLIEN, *Fluid Transport and Pore Structure*. San Diego: Academic Press INC.

Foundation, U. G. (n.d.). *User Guide*. Ανάκτηση από <http://www.openfoam.org/docs/user/>

Frederick R. Phelan Jr, Geoff Wise. (1996). Analysis of transverse flow in aligned fibrous porous media. *Elsevier Science Limited*.

Hafsteinsson, H. E. (2009). *Porous Media in OpenFOAM*. Chalmers. Modeling Void Formation and Unsaturated Flow in Liquid Composite Molding Processes : a Survey and Review

Chung- Hae Park.(2011) *Modeling Void Formation and Unsaturated Flow in Liquid Composite Molding Processes : a Survey and Review*





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125702