

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ 2D ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΟΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ
ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α. ΓΙΩΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α. ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ (ΜΠΔ)

ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ. ΙΨΑΚΗΣ (ΜΠΔ)

ΧΑΝΙΑ

ΜΑΪΟΣ, 2025

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μηχανικής Ταμειωτήρων του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2022-2023.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή, κ. Ανδρέα Γιώτη για τη συνεχή καθοδήγηση του και για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αποδίδονται και στα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής: κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την συνεργασία μας και την πολύτιμη συνεισφορά του, καθώς επίσης και τον κ. Δημήτρη Ιψάκη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αξιοσημείωτη ευγνωμοσύνη θα ήθελα να αποδώσω στον κ. Βαγγέλη Νικολιδάκη μεταδιδακτορικό του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη, τον σχεδιασμό και την κατασκευή πορώδους δομής σε δισδιάστατη επιφάνεια, καθώς και στην χρήση αυτής για τη μελέτη διεργασιών εμποτισμού και αποστράγγισης ελαίου-νερού σε διαφορετικές συνθήκες ροής. Ο σχεδιασμός του μικρομοντέλου υλοποιήθηκε με τη χρήση αλγορίθμου στοχαστικής ανακατασκευής πορώδους δομής που επιτυγχάνει την κανονική κατανομή του στερεού στο χώρο με βάση το ζητούμενο μήκος χωρικής συσχέτισης και της τιμής του φαινόμενου πορώδους. Το μικρομοντέλο κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Μικροκοπής της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης με χρήση μίας διάταξης μικροκοπής τεχνολογίας CNC. Στη συνέχεια διεξήχθησαν μία σειρά από πειράματα διφασικής μη-αναμίξιμης ροής με νερό, επτάνιο και ατμοσφαιρικό αέρα που εισπιάστηκαν διαδοχικά διαμέσου της πορώδους δομής με ταυτόχρονη καταγραφή της διαφοράς πίεσης στα άκρα του μικρομοντέλου, της χωρικής κατανομής φάσεων και του συνολικού κορεσμού σε κάθε φάση συναρτήσει του χρόνου. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Ρευστομηχανικής της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων με χρήση διατάξεων μικροροής (microfluidics) για τη ρύθμιση των παραμέτρων της ροής, όπως η συνολική ογκομετρική παροχή και ο λόγος αυτών για κάθε ρευστών (στην περίπτωση ταυτόχρονης εισπίασης δύο φάσεων), καθώς και για τη μέτρηση πιέσεων και οπτικοποίηση των χωρικών κατανομών των φάσεων. Με βάση τα παραπάνω πειράματα υπολογίστηκαν οι καμπύλες σχετικής διαπερατότητας κάθε φάσης με βάση τις συνθήκες ροής (ογκομετρική παροχή και ιστορικό ροής) και μελετήθηκε η επίδρασή τους στην ευστάθεια της διεπιφάνειας μεταξύ των φάσεων και στον τελικό βαθμό ανάκτησης της αρχικής φάσης. Η μελέτη αυτή καταδεικνύει ότι η χρήση δισδιάστατων μικρομοντέλων με στοχαστική κατανομή εμποδίων σε συνδυασμό με διατάξεις ελέγχου και ρύθμισης μικροροής είναι κατάλληλες για τη βαθύτερη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν τις διεργασίες αποστράγγισης και εμποτισμού σε πορώδη μέσα στην κλίμακα του πόρου.

ABSTRACT

The present thesis aims to develop, design and fabricate a porous structure on a two-dimensional surface and use it to study oil-water impregnation and drainage processes under different flow conditions. The design of the micromodel was implemented using a stochastic porous structure reconstruction algorithm that achieves the regular distribution of the solid in space based on the required spatial correlation length and the value of the apparent porosity. The micromodel was fabricated in the Microcutting Laboratory of the School of Manufacturing Engineering and Management using a CNC microcutting device. A series of two-phase non-reciprocal flow experiments were then conducted with water, heptane and atmospheric air injected successively through the porous structure while simultaneously recording the pressure difference at the edges of the micromodel, the spatial phase distribution and the total saturation in each phase as a function of time. The experiments were carried out in the Applied Fluid Mechanics Laboratory of the School of Mineral Resources Engineering using microfluidics devices to adjust the flow parameters, such as the total volumetric flow rate and the ratio of these for each fluid (in the case of simultaneous injection of two phases), as well as to measure pressures and visualize the spatial distributions of the phases. Based on the above experiments, the relative permeability curves of each phase were calculated based on the flow conditions (volumetric flow rate and flow history) and their effect on the stability of the interface between the phases and the final recovery rate of the initial phase was studied. This study demonstrates that the use of two-dimensional micromodels with stochastic obstacle distribution combined with microflow control and regulation devices are suitable for a deeper understanding of the physical mechanisms governing the drainage and impregnation processes in porous media at the resource scale.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Σχηματισμός ιζηματογενών πετρωμάτων.....	11
1.2 Δομή πόρων	13
1.2.1 Μικροσκοπικά χαρακτηριστικά πορώδους δομής.....	13
1.2.1.1 Πόροι και Λαιμοί	13
1.2.1.2 Τοπολογία Πόρων.....	14
1.2.1.3 Κατανομή μεγέθους πόρων	15
1.2.2 Μακροσκοπικές ιδιότητες πορώδους δομής.....	16
1.2.2.1 Πορώδες.....	16
1.2.2.2 Δαιδαλώδες.....	18
1.2.2.3 Διαπερατότητα	18
1.2.2.4 Ειδική Επιφάνεια.....	20
1.2.2.5 Ομοιογένεια και Ετερογένεια	21
1.2.2.6 Ισοτροπία και Ανισοτροπία	21
2. Συνθήκες ροής.....	22
2.1 Γενικευμένη εξίσωση Darcy σε πολυφασική ροή.....	22
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σχετική διαπερατότητα	23
2.3 Διεργασίες Εμποτισμού και Αποστράγγισης.....	24
2.4 Δυναμική της διεπιφάνειας και μέτωπο εκτόπισης (κατά την αποστράγγιση)	24
2.5 Επιδράσεις της ιστορίας στα υπολείμματα μη διαβρεχόμενου ρευστού (Εμποτισμός) και η εξέλιξη του κορεσμού με την ταχύτητα ροής και το ιστορικό.....	25
2.6 Καθεστώς Ροής.....	26
2.7 Καμπύλη τριχοειδούς πίεσης	26
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ.....	29
3.1 Ψηφιακός σχεδιασμός πορώδους δομής.....	29
3.2 Επεξεργασία αρχείου stl και μετατροπή σε κώδικα G/M μηχανής.....	29
3.3 Χάραξη πορώδους δομής.....	30

4. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΜΟΝΤΕΛΟΥ	35
4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης υπολογισμού διαπερατότητας.....	35
4.2 Βαθμονόμηση αντλίας	36
4.3 Υπολογισμός διαπερατότητας κελιού	36
4.4 Θεωρητικός χρόνος πλήρωσης πορώδους κελιού	42
4.5 Σχετική διαπερατότητα κατά τον Εμποτισμό	42
4.6 Σχετική διαπερατότητα κατά την Αποστράγγιση	54
4.7 Συνδυασμός Εμποτισμού και Αποστράγγισης	58
4.8 Αποστράγγιση επτανίου με χρήση νερού	59
4.9 Διαπερατότητα με υπολειμματικό κορεσμό	62
4.10 Αποστράγγιση επτανίου με χρήση νερού και επανεμποτισμός επτανίου	66
4.11 Υπολογισμός κορεσμού	72
4.11.1 Κορεσμός SH2O με βάση τις διαστάσεις του κελιού και την ογκομετρική παροχή του ρευστού	72
4.11.2 Κορεσμός SH2O με οπτική μέθοδο.....	73
4.11.3 Σύγκριση των δύο προσεγγίσεων υπολογισμού του κορεσμού	79
5. Παράρτημα.....	79
1 ^{ος} κώδικας: surf2stl.m	79
2 ^{ος} κώδικας: gen_log_gaussian_pattern_stl_190622.m.....	83
6. Σχόλια	88
7. Βιβλιογραφία – Πηγές	88

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Διαπερατότητα πορώδους δομής

Διάγραμμα 2: Μεταβολή της πτώσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου κατά τον εμποτισμό C₇

Διάγραμμα 3: Καμπύλη σχετικής διαπερατότητας - κορεσμού ($k_r - S$ ή Δt) σε εμποτισμό

Διάγραμμα 4: Μεταβολή της πτώσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου κατά τον εμποτισμό C₇

Διάγραμμα 5: Επιρροή ογκομετρικής παροχής στην σχετική διαπερατότητα

Διάγραμμα 6: Μεταβολή της πτώσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου κατά την αποστράγγιση C₇

Διάγραμμα 7: Καμπύλες αποστράγγισης

Διάγραμμα 8: Εμποτισμός και αποστράγγιση πετρελαιοδιαβρεκτού κελιού

Διάγραμμα 9: Διφασική ροή επτανίου και νερού με ογκομετρική παροχή 9 ml/min

Διάγραμμα 10: Διαπερατότητα με υπολειμματικό κορεσμό πορώδους δομής

Διάγραμμα 11: Αποστράγγιση και εμποτισμός πορώδους δομής

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1: Πειραματικές Μετρήσεις
- Πίνακας 2: Επεξεργασία Μετρήσεων tube
- Πίνακας 3: Επεξεργασία Μετρήσεων cell
- Πίνακας 4: Επεξεργασία Μετρήσεων cell
- Πίνακας 5: Θεωρητικές τιμές για κορεσμό 100%
- Πίνακας 6: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (1^ο πείραμα)
- Πίνακας 7: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (2^ο πείραμα)
- Πίνακας 8: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (3^ο πείραμα)
- Πίνακας 9: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (4^ο πείραμα)
- Πίνακας 10: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (1^ο και 2^ο πείραμα 4 ml/min)
- Πίνακας 11: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (3^ο και 4^ο πείραμα 4 ml/min)
- Πίνακας 12: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (δύο πειράματα των 6 ml/min)
- Πίνακας 13: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας για τα 8 ml/min
- Πίνακας 14: Αποτελέσματα αποστράγγισης C₇ με αέρα και επεξεργασία τους (1^ο πείραμα)
- Πίνακας 15: Αποτελέσματα αποστράγγισης C₇ με αέρα και επεξεργασία τους (2^ο πείραμα)
- Πίνακας 16: Πειραματικά δεδομένα εκτοπισμού C₇ από H₂O (1^ο πείραμα)
- Πίνακας 17: Πειραματικά δεδομένα εκτοπισμού C₇ από H₂O (2^ο πείραμα)
- Πίνακας 18: Πειραματικά δεδομένα εκτοπισμού C₇ από H₂O (3^ο πείραμα) και υπολογισμοί
- Πίνακας 19: Πειραματικές Μετρήσεις
- Πίνακας 20: Επεξεργασία Μετρήσεων tube
- Πίνακας 21: Επεξεργασία Μετρήσεων cell
- Πίνακας 22: Επεξεργασία Μετρήσεων cell
- Πίνακας 23: Δεδομένα για τις πτώσεις πίεσης στα λαστιχάκια σε Pa
- Πίνακας 24: Πειραματικά δεδομένα αποστράγγισης και εμποτισμού στα 30 rpm – 1^ο
- Πίνακας 25: Πειραματικά δεδομένα αποστράγγισης και εμποτισμού στα 45 rpm – 2^ο
- Πίνακας 26: Πειραματικά δεδομένα αποστράγγισης και εμποτισμού στα 90 rpm – 3^ο
- Πίνακας 27: Πειραματικά δεδομένα αποστράγγισης και εμποτισμού στα 180 rpm – 4^ο
- Πίνακας 28: Σύγκριση μεθοδολογιών για κορεσμό

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Διεργασίες σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων.

Εικόνα 2: Χαρακτηριστικές καμπύλες διαγράμματος τριχοειδούς πίεσης σε διεργασίες μηχανικής εκτόπισης σε πορώδες υδατοδιαβρεκτό πέτρωμα.

Εικόνα 3: Αρχείο tif

Εικόνα 4: Ηλεκτρονικό παχύμετρο

Εικόνα 5: Λίμα

Εικόνα 6: Κονδύλι

Εικόνα 7: Μέτσολλα

Εικόνα 8: Χάρακας ορθής γωνίας (για γώνιασμα)

Εικόνα 9: Μετρητικό ρολόι

Εικόνα 10: Τρυπάνι

Εικόνα 11: φρέζα CNC

Εικόνα 12: χώρος εργαλείων φρέζας CNC

Εικόνα 13: Διεπαφή χρήστη με CNC

Εικόνα 14: Μετρητικό UNO 115 eco

Εικόνα 16: Πειραματική διάταξη

Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης

Εικόνα 18: 1^ο σημείο pick (4 sec, 87 Pa)

Εικόνα 19: 2^ο σημείο (27 sec, 168 Pa)

Εικόνα 20: 3^ο σημείο (30 sec , 360 Pa)

Εικόνα 21: 1^ο σημείο (20 sec , 30,50 Pa)

Εικόνα 22: 2^ο σημείο (95 sec , 50,50 Pa)

Εικόνα 23: 3^ο σημείο (140 sec , 105,50 Pa)

Εικόνα 24: 1^ο σημείο (20 sec , 41,26 Pa)

Εικόνα 25: 1^ο σημείο (10 sec , 29,01 Pa)

Εικόνα 26: (41 sec , 387 Pa) ή (41 sec , 384,59 Pa) Το σημείο όπου εισέρχεται ο αέρας

Εικόνα 27: (55 sec , 189 Pa) (55sec , 187,59 Pa) Το σημείο όπου γίνεται το break through

Εικόνα 28: Methyl Blue για χρωματισμό νερού

Εικόνα 29: 1^ο σημείο peak το $t_1 = 25$ sec (1^η σταγόνα H_2O στο cell)

Εικόνα 30: Τυχαία χρονική στιγμή το $t = 35$ sec

Εικόνα 31: 2^ο σημείο peak το $t_2 = 45$ sec (break through H_2O)

Εικόνα 32: 3^ο σημείο peak το $t_3 = 289$ sec (1^η σταγόνα C_7 στο cell)

Εικόνα 33: Τυχαία χρονική στιγμή το $t = 297$ sec

Εικόνα 34: 4^ο σημείο peak το $t_4 = 305$ sec (break through C_7)

Εικόνα 35: Όταν μπαίνει η 1^η σταγόνα νερού στο cell

Εικόνα 36: Κατά το στάδιο της αποστράγγισης του C_7

Εικόνα 37: Κορεσμός S_{H_2O} μετά το break through του νερού = 0,7467 ή 74,67%.

Εικόνα 38: Κατά το στάδιο εμποτισμού του C_7 , τυχαίο σημείο

Εικόνα 39: Υπολειμματικός κορεσμός S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 , $S_{H_2O} = 0,2154$ ή 21,54%.

Εικόνα 40: Κορεσμός S_{H_2O} μετά το break through του νερού = 0,5847 ή 58,47%.

Εικόνα 41: Υπολειμματικός κορεσμός S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 , $S_{H_2O} = 0,1625$ ή 16,25%.

Εικόνα 42: Κορεσμός S_{H_2O} μετά το break through του νερού = 0,6676 ή 66,76%.

Εικόνα 43: Υπολειμματικός κορεσμός S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 $S_{H_2O} = 14,95$ ή 14,95%.

Εικόνα 44: Κορεσμός S_{H_2O} μετά το break through του νερού = 0,6450 ή 64,50%.

Εικόνα 45: Υπολειμματικός κορεσμός S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 $S_{H_2O} = 0,1120$ ή 11,20

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πορωδών μέσων σε μικροσκοπική και μακροσκοπική κλίμακα. Ένα μέσο για να θεωρηθεί πορώδες πρέπει να περιέχει σχετικά μικρά διάκενα, τους λεγόμενους πόρους, τα οποία συνήθως περιέχουν κάποια ρευστή φάση, όπως είναι ο αέρας, το νερό, το λάδι ή πολλές φάσεις ταυτόχρονα. Ακόμη επιδιώκουμε το υλικό να είναι διαπερατό, έτσι ώστε οι πόροι να συνδέονται μεταξύ τους και οι ρευστές φάσεις να μπορούν να ρέουν από τη μία πλευρά του και να εκρέουν από την διαμετρικά απέναντί της. Σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για ένα **διαπερατό πορώδες μέσο**. Η διάκριση μεταξύ ενός πορώδους και ενός συμπαγούς στερεού παραμένει ξεκάθαρη, παρόλο που η διεύθυνση από τον μηχανισμό ιώδους ροής, ορίζεται ως προϋπόθεση για να χαρακτηριστεί το υλικό ως πορώδες μέσο. Ένα πορώδες μέσο επιτρέπει τη διέλευση των ρευστών χωρίς να αλλοιώνεται η εσωτερική του γεωμετρία.

Παραδείγματα πορωδών μέσων στην καθημερινή μας ζωή αλλά και στο περιβάλλον, είναι το λεπτό χαρτί που οφείλει την απορροφητικότητα του, εν μέρει, στην πορώδη δομή του και, εν μέρει, στην ιδιότητά του να διαβρέχεται ισχυρά από το νερό. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι τα δομικά υλικά, όπως τα τούβλα, το σκυρόδεμα και ο ασβεστόλιθος, που θεωρούνται ως οι καλύτεροι θερμομονωτές λόγω της πορώδους φύσης τους. Πιο συγκεκριμένα, τα μονωτικά υλικά οφείλουν τις φυσικές τους ιδιότητες, στο μεγάλο κλάσμα κενού χώρου τους, το οποίο τους δίνει την δυνατότητα να παγιδεύουν μεγάλες ποσότητες αέρα με αμελητέα θερμική αγωγιμότητα. Επιπλέον, το έδαφος διατηρεί τη ζωή των φυτών εξαιτίας της ικανότητάς του να συγκρατεί νερό στους πόρους του, το οποίο στη συνέχεια τα φυτά το απορροφούν με τη βοήθεια των τριχοειδών τους αγγείων.

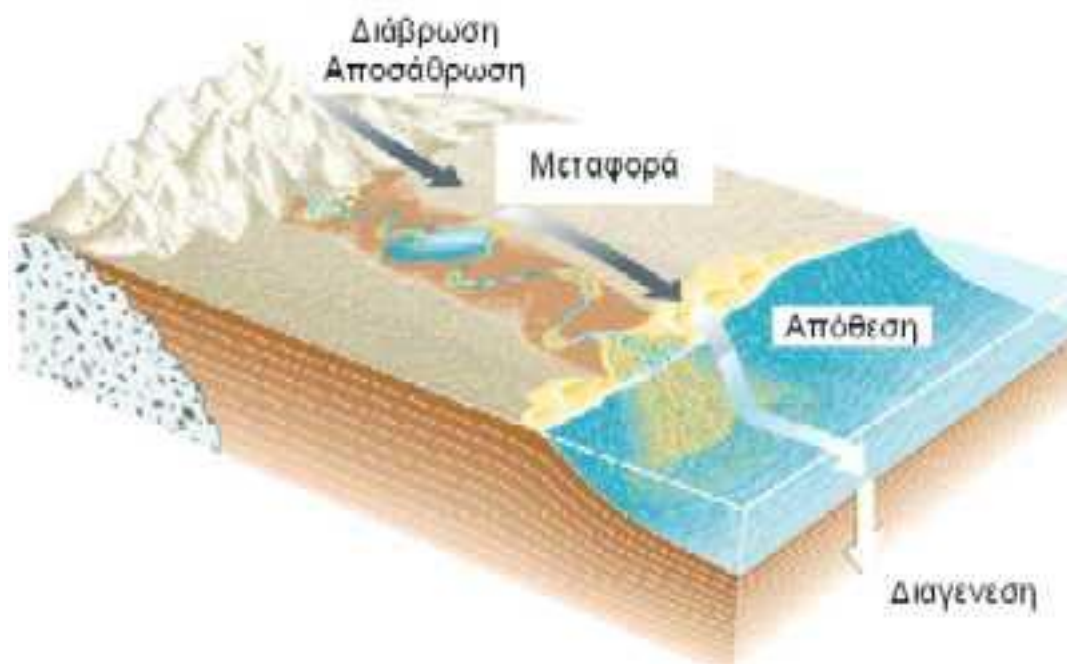
Ακόμη τα πορώδη μέσα απαντώνται (1) στην υδρολογία, όπου λαμβάνει χώρα ροή νερού σε δομές εδάφους και άμμου όπως φράγματα, εισβολή του θαλασσινού νερού σε παράκτιες περιοχές που είχαν γλυκό νερό, φίλτρα για τον καθαρισμό του πόσιμου νερού και των λυμάτων. Ακόμη απαντώνται στην μηχανική πετρελαίου, όπου λαμβάνει χώρα ροή ρευστών Υ/Α διαμέσου των πόρων και των ρωγμών σε υπόγειους ταμιευτήρες. Παρακάτω περιγράφεται η γεωλογική διεργασία σχηματισμού των ιζηματογενών πορωδών πετρωμάτων, όπως αυτά που αποτελούν τους ταμιευτήρες συσσώρευσης ρευστών Υ/Α στο υπέδαφος. Παρουσιάζονται επίσης οι βασικότερες έννοιες σχετικά με τη δομή των πόρων σε μικροσκοπική κλίμακα αλλά και τα χαρακτηριστικά μεταφοράς ορμής, μάζας και θερμότητας διαμέσου της πορώδους δομής σε μακροσκοπική κλίμακα (DULLIEN, 1979).

1.1 Σχηματισμός ιζηματογενών πετρωμάτων

Τα ιζηματογενή πετρώματα άρχισαν να εμφανίζονται στην επιφάνεια της Γης, με τη βοήθεια εξωγενών παραγόντων. Τα χαρακτηρίζει η στρώση (με εξαίρεση ορισμένα, όπως ο δολομίτης που δεν εμφανίζουν) η οποία επιτυγχάνεται στο στάδιο της απόθεσης λόγω της διαβάθμισης των υλικών της αποσάθρωσης. Μερικές φορές εμφανίζεται το φαινόμενο της διασταυρωτής στρώσης, που προκύπτει ως αποτέλεσμα της αλλαγής ροής στην κοίτη του νερού, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μεταφορικής ικανότητας. Ιζηματογενή ονομάζονται τα πετρώματα που προέρχονται από καθίζηση (ιζηματογένεση) ουσιών που βρίσκονται σε αιώρηση ή διάλυση σε ρευστό μέσο και στη συνέχεια μετατρέπονται σε συμπαγές σώμα με συγκόλληση και διαγένεση. Πιο συγκεκριμένα μέχρι τον τελικό σχηματισμό ενός ιζηματογενούς πετρώματος μεσολαβούν κατά σειρά τα εξής τέσσερα στάδια: α) Αποσάθρωση (weathering), β) Μεταφορά (transportation), γ) Απόθεση (deposition) και δ) Διαγένεση (diagenesis).

Τα ιζήματα είναι ασύνδετες, χαλαρές έως ημισυνεκτικές (ελαφρά συγκολλημένες) συγκεντρώσεις στερεών υλικών που προέρχονται από τα πετρώματα, όταν αυτά χάσουν τη συνεκτικότητά τους, δηλαδή αποσαθρωθούν έπειτα από την επίδραση ορισμένων παραγόντων, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία, ο αέρας, το νερό κ.ά. **Αποσάθρωση** ενός πετρώματος καλούμε τις φυσικές ή αλλιώς μηχανικές, τις χημικές και τις βιολογικές καταστροφικές διεργασίες που υφίσταται το πέτρωμα, οι οποίες συντελούν στην αλλαγή του χαρακτήρα του μητρικού πετρώματος (σύσταση, μορφή, ιστός, χρώμα κ.λπ.). Όλες αυτές οι διεργασίες συμβαίνουν σε θερμοκρασίες μικρότερες από 100°C και πιέσεις μέχρι 1Kb. Στη φυσική αποσάθρωση μεταβάλλεται η συνοχή και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος, που συνήθως είναι εντονότερη σε ξηρές περιοχές. Στη χημική αποσάθρωση μεταβάλλεται η χημική σύσταση ενός ή περισσότερων ορυκτών του πετρώματος από το νερό και τα διαλυμένα σε αυτό συστατικά. Αυτή όμως είναι εντονότερη σε υγρές και θερμές περιοχές. Οι βιολογικές αποσαθρωτικές επιδράσεις συνδέονται στενά με τις χημικές. Η βιολογική αποσάθρωση των πετρωμάτων προκαλείται με διάσπαση αυτών από φυτικούς ως επί το πλείστον, αλλά και ζωικούς οργανισμούς που δρουν μηχανικά και χημικά, γι' αυτό και ορίζεται καλύτερα ως βιοχημική αποσάθρωση. Στη συνέχεια, το φαινόμενο που συντελεί στη **μεταφορά** των αποσαθρωμένων υλικών σε χαμηλότερες περιοχές του ανάγλυφου της επιφάνειας της Γης, χαρακτηρίζεται ως διάβρωση. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στη διάβρωση είναι το νερό, ο άνεμος, ο πάγος και η βαρύτητα. Τα υλικά της αποσάθρωσης μεταφέρονται μηχανικά σαν κλαστικά υλικά ή σε διάλυση ή σε κολλοειδή κατάσταση. Στη συνέχεια, στο στάδιο της **απόθεσης** τα υλικά της αποσάθρωσης συσσωρεύονται σε στρώματα ή ανώμαλες μάζες. Οι διεργασίες μέσω των οποίων γίνεται η απόθεση των υλικών της αποσάθρωσης είναι: α)φυσικές, β)χημικές και γ)βιολογικές. Στις φυσικές διεργασίες απόθεσης διακρίνουμε τις εξής πέντε περιπτώσεις: i) χερσαίες και θαλάσσιες αποθέσεις, ii)δελταϊκές αποθέσεις στην εισροή των υδάτων των ποταμών, στο στάσιμο νερό των θαλασσών ή λιμνών, iii) παράκτιες, iv) αιολικές και τέλος v)οι παγετώδεις αποθέσεις. Στις χημικές διεργασίες

απόθεσης διακρίνουμε τις εξής τρεις περιπτώσεις: i) εβαπορίτες, ii) ανόργανες αποθέσεις και τα iii)χημικά υπολείμματα. Ενώ στις βιολογικές διεργασίες απόθεσης διακρίνουμε τις εξής τρεις περιπτώσεις: i) οργανικά υπολείμματα (π.χ. κελύφη μικροοργανισμών), ii)οργανικά πεττώματα (π.χ. γουανό) και iii)οργανικά οικοδομήματα (π.χ. δάση, έλη, ύφαλοι). Τέλος, με τον όρο **διαγένεση** καλείται το φαινόμενο της μετατροπής των ασύνδετων υλικών των ιζημάτων σε συμπαγή πετρώματα. Η διαδικασία αυτή συντελείται στις κοιλότητες του στερεού φλοιού της Γης, στις θαλάσσιες λεκάνες και στους ωκεανούς. Οι διεργασίες της διαδικασίας της διαγένεσης αρχίζουν να υλοποιούνται, ύστερα της απόθεσης του ιζήματος και μέχρι τη στιγμή της αγκιμεταμόρφωσης, χωρίς να υπάρχουν συγκεκριμένα όρια αποπεράτωσης της διαγένεσης και έναρξης της μεταμόρφωσης. Η πίεση των υπερκείμενων στρωμάτων προκαλεί σμίκρυνση των πόρων των υποκειμένων υλικών, απομάκρυνση του νερού και εντέλει οδηγεί σε αύξηση της συνεντικότητας των υλικών των ιζημάτων, υπό την προϋπόθεση όμως ότι υπάρχουν μικρές πιέσεις διότι διαφορετικά θα προκαλούταν μεταμόρφωση. Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία του διαγενετικού περιβάλλοντος πρέπει να είναι μικρότερη των 300°C (Winkler, 1979). Εν κατακλείδι, η συγκόλληση των ιζημάτων συντελείται από τη κυκλοφορία διαλυμάτων στους πόρους του πετρώματος και την απόθεση νέων συστατικών που βρίσκονται σε διάλυση.



Εικόνα 1: Διεργασίες σχηματισμού ιζηματογενών πετρωμάτων. (Τμήμα Γεωλογίας, χ.χ.)

1.2 Δομή πόρων

Στα περισσότερα πορώδη μέσα, οι πόροι δεν είναι ορατοί δια γυμνού οφθαλμού. Η πορώδης φύση ενός υλικού ελέγχεται μέσω μιας σειράς από συγκεκριμένα πειράματα. Δια αυτής της διαδικασίας, γίνεται προσδιορισμός σε διάφορα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά, όπως το πορώδες, η διαπερατότητα, η ομοιογένεια/ετερογένεια, αν-ισοτροπία κλπ., οι οποίες συσχετίζονται με τη μικροσκοπική δομή του μέσου στην κλίμακα των πόρων του δείγματος. Η κατανόηση της δομής των μικροσκοπικών πόρων είναι εξίσου χρήσιμη για την κατανόηση και την ερμηνεία των ιδιοτήτων των πορωδών μέσων.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της μικροσκοπικής δομής των πορωδών μέσων και έπειτα τα χαρακτηριστικά της μακροσκοπικής δομής καθώς και οι κυριότερες πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό τους.

1.2.1 Μικροσκοπικά χαρακτηριστικά πορώδους δομής

Στην παρούσα ενότητα μελετάται η μικροσκοπική δομή των πόρων. Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά περίπλοκη λόγω της μεγάλης ποικιλίας στη γεωμετρία των πόρων. Η τυπική μέση διάσταση των πόρων είναι μια προσεγγιστική απλοποίηση της πραγματικής δομής, λόγω των ακανόνιστων διακυμάνσεων. Παρά τις δυσκολίες στο χαρακτηρισμό της δομής των πόρων, τα αποτελέσματα των μελετών έχουν βοηθήσει στην ερμηνεία της επίδρασης της μικροδομής στις μακροσκοπικές ιδιότητες μεταφοράς σε πορώδη μέσα.

1.2.1.1 Πόροι και Λαιμοί

Η απλή παρατήρηση ενός μακροπορώδους στερεού με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου αποκαλύπτει την ετερογένεια της δομής του στη μικροκλίμακα. Το μέσο αποτελείται από διάκενα, που ονομάζονται πόροι και είναι ορατά στα εξωτερικά τοιχώματα του πετρώματος, αλλά και το στερεό υλικό, που διατηρεί το πέτρωμα συμπαγές. Επιπλέον, με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών απεικόνισης είναι ορατοί και οι εσωτερικοί πόροι, καθώς και ο τρόπος διασύνδεσης μεταξύ τους σε οποιαδήποτε τομή του πετρώματος. Στους πόρους περιέχεται πρακτικά το σύνολο των ρευστών που διαποτίζουν το πέτρωμα. Πέρα όμως από την περιεκτικότητα του πετρώματος σε ρευστά, ο τρόπος με τον οποίο οι πόροι διασυνδέονται μεταξύ τους καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την υδραυλική αγωγιμότητα και την αντίσταση του πετρώματος κατά τη μονοφασική και πολυφασική ροή αντίστοιχα. Με βάση την εργασία του Fatt (Fatt, 1956), η σύνθετη πορώδης δομή μπορεί να περιγραφεί πιο απλά με δύο βασικά στοιχεία: α) τους πόρους (pores) που περιέχουν το σύνολο του ρευστού και αμελητέα αντίσταση στη ροή και β) τους λαιμούς (throats) που αντιστοιχούν στα κανάλια ροής που συνδέουν γειτονικούς πόρους και

έχουν αμελητέα χωρητικότητα αλλά σημαντική συμβολή στην πτώση πίεσης κατά τη ροή. Εδώ αναπτύσσονται κυρίως τα τριχοειδή φαινόμενα κατά την πολυφασική ροή.

1.2.1.2 Τοπολογία Πόρων

Για τον χαρακτηρισμό της τοπολογίας των δικτύων των τριχοειδών χρησιμοποιούνται ορισμένοι παράμετροι, όπως είναι η διάσταση του δικτύου, η συνδεσιμότητα και η μικροσκοπική τοπολογία πόρων. Οι τοπολογικές παράμετροι, που χαρακτηρίζουν τη διασύνδεση σχημάτων ή δομών, είναι η συνδεσιμότητα και το γένος.

Πιο συγκεκριμένα, η **συνδεσιμότητα** (Cairns, 1961) είναι μια παράμετρος που μετρά τον βαθμό στον οποίο μια δομή είναι πολλαπλά συνδεδεμένη. Ορίζεται ως ο αριθμός των μη περιττών διαδρομών κλειστού βρόχου με τις οποίες μπορούν να ελεγχθούν όλες οι περιοχές μέσα στο σχήμα. Οι περιττοί βρόχοι είναι εκείνοι που μπορεί να μετατραπούν λόγω παραμόρφωσης, που μπορεί να συρρικνωθούν σε ένα σημείο χωρίς να περάσουν έξω από την κλειστή επιφάνεια ή που δεν δίνουν πρόσβαση σε κανένα νέο μέρος του σχήματος. Ένα βασικό θεώρημα της τοπολογίας δηλώνει ότι η συνδεσιμότητα C μιας κλειστής επιφάνειας ή σχήματος είναι ίση με το γένος της G . Το «**Genus**» είναι ο μεγαλύτερος αριθμός τομών που μπορεί να γίνει μέσω τμημάτων του σχήματος χωρίς να αποσυνδεθεί εντελώς κανένα μέρος από τα υπόλοιπα.

Ένα γενικό θεώρημα της τοπολογίας δηλώνει ότι:

$$G = C = b - n + N \quad (1.1)$$

όπου b είναι ο αριθμός των διακλαδώσεων, n ο αριθμός των κόμβων και N ο αριθμός των ξεχωριστών δικτύων. Σημειώνεται ότι οι ανοικτοί κλάδοι που δεν συνδέονται με έναν κόμβο δεν θα πρέπει να υπολογίζονται στο b , καθώς μπορεί να συρρικνωθούν χωρίς αλλαγή του γένους.

Για πραγματικά πορώδη μέσα, η μεθοδολογία εύρεσης της συνδεσιμότητας εξαρτάται από το εάν η δομή του μέσου είναι κανονική ή ακανόνιστη. Στην περίπτωση κανονικών συστοιχιών κενών, μπορεί να υπολογιστεί εύκολα ελέγχοντας τη συμμετρία του συστήματος. Ενώ στην περίπτωση ακανόνιστης δομής πόρων, ο μόνος γνωστός τρόπος προσδιορισμού της συνδεσιμότητας είναι με την ανακατασκευή της ανάστροφης παραμόρφωσης ή του «διαγράμματος διακλαδώσεων και κόμβων» της δομής πόρων από μια σειρά παράλληλων τμημάτων που λαμβάνονται με σειριακή τομή. Ωστόσο, οι διαδοχικές παράλληλες τομές πρέπει να είναι κοντά ώστε να επιτρέπεται η παρακολούθηση κάθε τριχοειδούς κλάδου από το ένα τμήμα στο άλλο.

Έχει αποδειχθεί (π.χ. Macdonald et al., 1986) ότι, ενώ η συνδεσιμότητα C είναι μια μοναδική ιδιότητα του μέσου, υπάρχει χώρος για διαφορετικές αναπαραστάσεις διαγραμμάτων διακλάδωσης και κόμβου, με αποτέλεσμα διαφορετικές τιμές των b και n . Σε ένα ομοιογενές, μακροσκοπικό πορώδες μέσο, η αριθμητική τιμή της συνδεσιμότητας είναι ανάλογη με το

μέγεθος του δείγματος, ενώ ο αριθμός συντονισμού z (ο μέσος αριθμός διακλαδώσεων ή δεσμών) που συναντώνται σε έναν κόμβο είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος. Ο Fischmeister (1974) έχει προτείνει η απόλυτη τιμή της συνδεσιμότητας να αναφέρεται σε μια μονάδα όγκου του δείγματος, δηλαδή να χρησιμοποιηθεί η «ειδική συνδεσιμότητα», που είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του δείγματος. Όμως αυτό δεν θα ήταν αντιπροσωπευτικό, καθώς οι ειδικές συνδεσιμότητες δύο γεωμετρικά όμοιων δειγμάτων (δηλαδή δειγμάτων που διαφέρουν μόνο ως προς τον βαθμό μεγέθυνσης) είναι σε αντίστροφη αναλογία μεταξύ τους ως προς τους βαθμούς μεγέθυνσής τους, ενώ οι αριθμοί συντονισμού τους είναι πανομοιότυποι. Ακόμη δύο διαφορετικά δείγματα ενώ μπορεί να έχουν τις ίδιες ειδικές συνδεσιμότητες, ταυτόχρονα μπορεί να χαρακτηρίζονται από αρκετά διαφορετικές τοπολογίες. Με την προϋπόθεση ότι η τοπολογία πόρων διαφορετικών δειγμάτων αντιπροσωπεύεται από τυπικά διαγράμματα διακλάδωσης και κόμβου, η συνδεσιμότητα ανά κόμβο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των τοπολογιών των δειγμάτων.

1.2.1.3 Κατανομή μεγέθους πόρων

Οι πόροι εμφανίζονται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα που είναι χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου. Η κατανομή μεγέθους τους καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του μέσου και καταγράφεται εργαστηριακά με τη χρήση τεχνικών ποροσιμετρίας υδραργύρου (Ritter & Drake, 1945). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εισαγωγή υπό πίεση υδραργύρου σε δείγματα πετρώματος με ταυτόχρονη καταγραφή του όγκου του υδραργύρου που εισχωρεί στο πέτρωμα σε δεδομένη τιμή πίεσης. Με δεδομένη τη μη-διαβρέχουσα φύση του ρευστού στα περισσότερα στερεά, η διεργασία αντιστοιχεί σε αποστράγγιση, όπου ο υδράργυρος καταλαμβάνει αρχικά μεγαλύτερους πόρους σε μικρότερες τριχοειδείς πιέσεις και στη συνέχεια εισέρχεται σε μικρότερους σε μεγαλύτερες τιμές. Σύμφωνα με τους (Ritter & Drake, 1945), η κατανομή μεγέθους πόρων υπολογίζεται εργαστηριακά ως ακολούθως:

$$a(R) = \frac{2P_c}{R} \frac{d(V_v - V_f)}{dP_c} \quad (1.2)$$

όπου R είναι η διάσταση του πόρου, P_c η τριχοειδής πίεση, V_v ο συνολικός όγκος του διάκενου χώρου και V_f ο όγκος του υδραργύρου που εισήλθε στο πέτρωμα.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό, ο συνολικός όγκος διάκενου χώρου είναι:

$$V_v = \int_0^\infty a(R) dR \quad (1.3)$$

και η μέση ακτίνα πόρου είναι:

$$\bar{R} = \frac{\int_0^\infty R a(R) dR}{V_v} \quad (1.4)$$

Επιπλέον, ορίζεται η πυκνότητα πιθανότητας $p(R) = \frac{a(R)}{V_v}$ με την ιδιότητα $\int_0^\infty p(R) dR = 1$.

1.2.2 Μακροσκοπικές ιδιότητες πορώδους δομής

Οι μακροσκοπικές ιδιότητες των πορώδων δομών επηρεάζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τη συνδεσιμότητα των πόρων. Οι ιδιότητες αυτές αντιπροσωπεύουν τη μέση συμπεριφορά ενός δείγματος που περιέχει πολλούς πόρους. Από τις πιο σημαντικές μακροσκοπικές ιδιότητες μιας πορώδους δομής είναι το πορώδες, η διαπερατότητα, η ειδική επιφάνεια, ο συντελεστής αντίστασης σχηματισμού, η ομοιο/ετερο-γένεια και η αν/ισοτροπία. Για να περιγράψουμε τη μακροσκοπική ετερογενή δομή των πόρων ενός πετρώματος, «απεικονίζουμε» το πέτρωμα στην αντιπροσωπευτική κλίμακα μεγέθους (REV) ή (κλίμακα πεδίου) ως ένα συνεχές μέσο. Σε αυτή τη κλίμακα περιλαμβάνεται ένας επαρκής και αντιπροσωπευτικός αριθμός πόρων, ώστε οι ιδιότητες του μέσου να είναι αντιπροσωπευτικές της μικροσκοπικής του ετερογένειας.

1.2.2.1 Πορώδες

Το **πορώδες ϕ** περιγράφει τον όγκο που καταλαμβάνεται από τις ρευστές φάσεις (ή διάκενος χώρος), V_v , ως προς τον συνολικό όγκο ενός χαρακτηριστικού όγκου ελέγχου (ΟΕ) του πετρώματος, V_t , $\phi = \frac{V_v}{V_t}$. Το V_t είναι ανάλογο R^3 , όπου R είναι μια χαρακτηριστική ακτίνα του ΟΕ, που αντιπροσωπεύει την κλίμακα μελέτης. Για να έχουμε μια αντιπροσωπευτική κλίμακα μεγέθους (REV) ή (κλίμακα πεδίου), χρειάζεται η ακτίνα R να παίρνει τιμές μεγαλύτερες από τη χαρακτηριστική κλίμακα μεγέθους R_0 . Εάν επιτευχθεί αυτή η συνθήκη, τότε το πορώδες ϕ , παίρνει μια σταθερή τιμή και λέμε ότι έχουμε μακροσκοπική ομοιογένεια. Το πορώδες είναι δυνατό να λάβει τιμές μεταξύ 0 και 1. Για παράδειγμα, σε ψαμμιτικούς ταμιευτήρες Y/A το πορώδες λαμβάνει τιμές: $0.1 \leq \phi \leq 0.4$ και για ασβεστόλιθους $0.05 \leq \phi \leq 0.15$ (Monicard, 1980). Είναι γνωστό ότι το πορώδες αυξάνεται με το βαθμό ομοιομορφίας (sorting), δηλαδή όταν οι κόκκοι είναι όλοι του ίδιου μεγέθους επιτυγχάνεται το πιο υψηλό πορώδες για δεδομένη γεωμετρία της χαρακτηριστικής δομικής μονάδας που συνθέτει το πορώδες μέσο. Αν σε τέτοιου είδους πληθυσμούς προστεθούν δομικές μονάδες με μεγάλη κατανομή μεγεθών, τότε το πορώδες τείνει να ελαττωθεί.

Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο είδη πορώδους, ανάλογα με τον διάκενο όγκο που λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Υπάρχει το α) **φαινόμενο** (ή **ενεργό**) πορώδες, όπου σχηματίζεται μια συνεχής φάση μέσα στη πορώδη δομή και β) **ολικό** πορώδες, όπου στον υπολογισμό του πορώδους λαμβάνεται υπόψη και οι «τυφλοί» πόροι, που δεν συμμετέχουν στο δίκτυο ροής.

Για τον προσδιορισμό του πορώδους, χρησιμοποιούνται διάφορες πειραματικές μέθοδοι, οι οποίοι αναλύονται διεξοδικά παρακάτω από τους Collins (1961) και Scheidegger (1974), και είναι οι εξής:

a. **Άμεση μέθοδος:** Αρχικά γίνεται μέτρηση του όγκου ενός πορώδους δείγματος και στη συνέχεια το δείγμα αυτό το συμπιέζουμε έτσι ώστε να καταστραφούν όλα τα κενά του και να μετρήσουμε τη διαφορά όγκων. Δυστυχώς, αυτό πραγματοποιείται μόνο εάν το πορώδες δείγμα είναι αρκετά μαλακό και για αυτό δεν έχει εφαρμοστεί αρκετά (Lynovskii και Postnikova 1940).

b. **Οπτικές μέθοδοι:** Το πορώδες ενός δείγματος είναι ίσο με το «τοπικό πορώδες», με την προϋπόθεση ότι η δομή των πόρων είναι τυχαία. Το τοπικό πορώδες προσδιορίζεται σε γυαλισμένες δισδιάστατες τομές του δείγματος. Είναι συχνά απαραίτητος ο εμποτισμός των πόρων με κάποιο υλικό όπως κερί, πλαστικό ή μέταλλο ξύλου, προκειμένου να γίνουν πιο ορατοί οι πόροι και/ή να γίνει διάκριση μεταξύ διασυνδεδεμένων και μη διασυνδεδεμένων πόρων.

c. **Μέθοδος εμποτισμού:** Βασίζεται στην εμβάπτιση του δείγματος σε ένα, κατά προτίμηση, υγρό υπό κενό για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε το διαβρέχον υγρό να απορροφηθεί σε όλο το χώρο των πόρων. Επιπρόσθετα, το δείγμα ζυγίζεται πριν και μετά την απορρόφηση. Αυτά τα δύο βάρη, σε συνδυασμό με την πυκνότητα του ρευστού, επιτρέπουν τον υπολογισμό του όγκου των πόρων. Όταν το δείγμα είναι πλήρως κορεσμένο με το διαβρέχον υγρό, μια μέτρηση αποστράγγισης στο ίδιο υγρό δίνει άμεσα την τιμή του όγκου του δείγματος. Από τον όγκο των πόρων και τον όγκο του δείγματος μπορεί να υπολογιστεί άμεσα το πορώδες. Εάν η απορρόφηση γίνει με επαρκή προσοχή τότε θα αποφέρει τις καλύτερες τιμές του ενεργού πορώδους.

d. **Μέθοδος έγχυσης υδραργύρου:** Βασίζεται στην εμβάπτιση του δείγματος σε υδράργυρο προκειμένου να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος του. Καθώς τα περισσότερα υλικά δεν διαβρέχονται από τον υδράργυρο, το υγρό δεν θα διεισδύσει στους πόρους με αυθόρμητο τρόπο (χωρίς την εφαρμογή ικανής διαφοράς πίεσης). Μετά την εκκένωση του δείγματος, η υδροστατική πίεση του υδραργύρου στον θάλαμο που περιέχει τόσο το δείγμα όσο και τον υδράργυρο αυξάνεται σταδιακά. Ως αποτέλεσμα, ο υδράργυρος εισέρχεται στους πόρους και, με την προϋπόθεση ότι η πίεση είναι αρκετά υψηλή, θα διεισδύσει ακόμη και σε πολύ μικρούς πόρους. Ωστόσο, η διείσδυση δεν είναι ποτέ πλήρης καθώς απαιτείται σημαντική διαφορά πίεσης προκειμένου να καλυφθούν όλες οι άκρες και οι γωνίες των πόρων. Αυτό είναι τεχνικά σύνθετο αλλά και ανεπιθύμητο καθώς οι πολύ υψηλές τιμές πίεσης μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στη δομή των πόρων του δείγματος, αλλοιώνοντας έτσι τη μέτρηση.

e. **Μέθοδος εκτόνωσης αερίου:** Βασίζεται στη μεταβολή του όγκου ενός αερίου καθώς αυτό εκτονώνεται εντός του δείγματος. Το δείγμα περικλείεται σε ένα δοχείο γνωστού όγκου, υπό γνωστή πίεση αερίου, και συνδέεται με ένα δοχείο γνωστού όγκου, που έχει όμως εκκενωθεί. Όταν ανοίξει η βαλβίδα μεταξύ των δύο δοχείων, το αέριο διαστέλλεται στο δοχείο

που εκκενώθηκε και η πίεση του αερίου μειώνεται. Ο ενεργός όγκος πόρων V_p του δείγματος μπορεί να υπολογιστεί με χρήση του νόμου Boyle:

$$V_p = V_B - V_A - V_b \left[\frac{P_2}{P_2 - P_1} \right] V_B \quad (1.5)$$

όπου V_B είναι ο όγκος του δείγματος, V_A είναι ο όγκος του δοχείου που περιέχει το δείγμα, V_b είναι ο όγκος του δοχείου που εκκενώθηκε, P_1 είναι η αρχική πίεση και P_2 είναι η τελική πίεση.

f. **Μέθοδοι πυκνότητας:** προσδιορίζουν το ολικό πορώδες. Επηρεάζονται από τον υπολογισμό της συνολικής πυκνότητας του δείγματος και της πυκνότητας των στερεών στο δείγμα. Η μάζα μιας πορώδους δομής αποτελείται εξ ολοκλήρου από τα στερεά, έχουμε την εξής σχέση:

$$m = \rho_s V_s = \rho_B V_B \quad (1.6)$$

όπου m είναι η μάζα του δείγματος, ρ_s η πυκνότητα των στερεών στο δείγμα, ρ_B η συνολική πυκνότητα του δείγματος, V_B είναι ο όγκος του δείγματος και V_s είναι ο όγκος των στερεών. Τέλος από τον ορισμό του πορώδους, έχουμε ότι:

$$\phi = 1 - \frac{V_s}{V_B} = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_s} \quad (1.7)$$

1.2.2.2 Δαιδαλώδες

Το δαιδαλώδες, τ , ορίζεται ως το κλάσμα με αριθμητή την ελάχιστη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων εντός της πορώδους δομής που καλύπτουν οι ροϊκές γραμμές και παρονομαστή την απόσταση μεταξύ τους. Είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει την πραγματική μέση διαδρομή. Τέλος το δαιδαλώδες είναι ένα μέτρο της ισοτροπίας του πετρώματος, κάτι που θα αναλυθεί εκτενέστερα στην ενότητα (1.2.2.6).

1.2.2.3 Διαπερατότητα

Η **διαπερατότητα** είναι μια ιδιότητα του πορώδους μέσου και χρησιμοποιείται για την περιγραφή της υδραυλικής αγωγιμότητας του πορώδους μέσου κατά τη ροή ενός ρευστού. Σύμφωνα με τον (DULLIEN, 1979), η διαπερατότητα (permeability) είναι η ιδιότητα εκείνη του πετρώματος που επιτρέπει τη διέλευση ενός ή πολλών ρευστών, χωρίς να αλλοιώνεται η εσωτερική του γεωμετρία. Χαρακτηρίζουμε, λοιπόν, ένα πέτρωμα ως διαπερατό, όταν επιτρέπει να ρέει διαμέσου αυτού μια ικανή ποσότητα ρευστού και αδιαπέρατο όταν ο ρυθμός ροής είναι ασήμαντος ακόμη και σε μεγάλες βαθμίδες πίεσης. Η διαπερατότητα είναι συνάρτηση του πορώδους ϕ και του δαιδαλώδους τ . Η διαπερατότητα μετριέται σε μονάδες επιφανείας (m^2) στο SI, αλλά στη μηχανική ταμιευτήρων έχει επικρατήσει η μονάδα Darcy. Ένα πορώδες υλικό με μήκος 1cm, έχει διαπερατότητα ίση με 1 Darcy εάν εφαρμοστεί μια διαφορά πίεσης ίση με 1 atm, που θα αναγκάσει το ρευστό να έχει ρυθμό ροής 1 cm^3/s . Ακόμη το ρευστό έχει ιξώδες 1 cP και ρέει διαμέσου ενός κύβου με πλευρές 1 cm. Οπότε έχουμε,

$$1 \text{ Darcy} = \frac{1 \left(\frac{cm^3}{s} \right) 1 \text{ cP} 1 \text{ cm}}{1 \text{ cm}^2 1 \text{ atm}} \quad (1.8)$$

που ισούται με $0.987 \mu\text{m}^2$.

Σε έναν ταμειυτήρα, η διαπερατότητα k υπολογίζεται με βάση το νόμο του Darcy. Πιο συγκεκριμένα σε μονοδιάστατη, ασυμπίεστη ροή σε ομοιογενές πορώδες μέσο, έχουμε:

$$q = -\frac{k}{\mu} A \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (1.9)$$

όπου q είναι η ογκομετρική παροχή, A είναι το εμβαδόν διατομής του μέσου από το οποίο ρέει το ρευστό, ΔL είναι το μήκος που διανύει το ρευστό μέσα στον ταμειυτήρα, ΔP είναι η πτώση πίεσης μεταξύ δύο σημείων παρατήρησης που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ΔL και μ είναι το ιξώδες του ρευστού.

Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση που αναδεικνύει τη σχέση της ροής διαμέσου ενός πορώδους πετρώματος με τη ροή σε έναν αγωγό κυκλικής διατομής είναι η ομοιότητα που παρουσιάζει με την εξίσωση Poiseuille. Η **εξίσωση Poiseuille** αποτελεί την αναλυτική λύση της μικροσκοπικής (διαφορικής) εξίσωσης διατήρησης της ορμής σε μόνιμες συνθήκες για ένα Νευτώνειο ρευστό σε αγωγούς ακτίνας R :

$$u = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (1.10)$$

Συγκρίνοντας την Εξ. (1.9) με την εξίσωση Darcy, διαπιστώνουμε εύκολα ότι οι δύο εξισώσεις έχουν ακριβώς την ίδια μορφή εάν ορίσουμε τη διαπερατότητα ενός αγωγού κυκλικής διατομής ως $k = \frac{R^2}{8}$.

Εργαστηριακή μέτρηση διαπερατότητας

Σε ισοτροπικά μέσα, δηλαδή σε αυτά που παρουσιάζουν την ίδια τιμή διαπερατότητας προς όλες τις διευθύνσεις, η εργαστηριακή μέτρηση της διαπερατότητας γίνεται συνήθως σε γραμμικά σχήματα, δειγμάτων «πυρήνα». Το πείραμα μπορεί να πραγματοποιηθεί, έτσι ώστε η ροή να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη στην επιφάνεια του δείγματος. Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος οφείλουμε να δίνουμε μεγάλη προσοχή για να αποτραπεί η ροή του υγρού στην επαφή του δείγματος «πυρήνα» με τα πλαίσια που το συγκρατούν στα εξωτερικά του τοιχώματα.

Για τη μέτρηση της διαπερατότητας έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο υγρά όσο και αέρια. Υπάρχει η πιθανότητα τα υγρά σε μεγάλες πιέσεις να αλλάξουν τη δομή των πόρων και επομένως τη διαπερατότητα, λόγω της αναδιάταξης ορισμένων σωματιδίων, της διόγκωσης ορισμένων υλικών (όπως οι άργιλοι) στους πόρους και των χημικών αντιδράσεων.

Η διεξαγωγή του πειράματος και οι μετρήσεις της διαφοράς πίεσης στα άκρα του δοκιμίου μπορούν να γίνουν και με μία μόνο σταθερή ογκομετρική παροχή (ρυθμό ροής). Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της διαπερατότητας με βάση το νόμο του Darcy. Συνήθως υπάρχει σημαντικό πειραματικό σφάλμα σε αυτές τις μετρήσεις και για αυτό το λόγο πραγματοποιούνται μετρήσεις σε διαφορετικές τιμές της ογκομετρικής παροχής. Τέλος σχεδιάζονται διαγράμματα όπου στον ένα άξονα βρίσκονται οι ρυθμοί ροής και στον άλλο οι τιμές της πτώσης πίεσης. Σε αυτά τα διαγράμματα προσαρμόζεται μια ευθεία γραμμή, που ακολουθεί τον νόμο του Darcy, στα σημεία

δεδομένων. Σύμφωνα με το νόμο του Darcy, αυτή η γραμμή πρέπει να περνάει από την αρχή των αξόνων. Εάν τα σημεία των δεδομένων αποκλίνουν από την ευθεία γραμμή, τότε ο νόμος του Darcy δεν ισχύει σε αυτά τα σημεία και πρέπει να εξεταστεί η αιτία.

Σε ένα διαφορετικό πείραμα όπου έχουμε ροή αερίου δια μέσου ενός πορώδους μέσου, λόγω της συμπιεστότητας των αερίων, τόσο η ογκομετρική παροχή όσο και η ταχύτητα ποικίλλουν ανάλογα με την διαφορά πίεσης. Αυτό έχει ορισμένες δυσκολίες, καθώς όπως αναφέραμε ο νόμος του Darcy ισχύει για ασυμπίεστα ρευστά. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση της διαφορικής μορφής του νόμου του Darcy, χρησιμοποιώντας τη συνθήκη που είναι κατάλληλη για τη ροή αερίου. Πιο συγκεκριμένα ότι σε σταθερή θερμοκρασία και σταθερή κατάσταση, το γινόμενο πίεσης-χρόνων-ταχύτητας είναι σταθερό σε όλο το δείγμα. Έτσι, για τα αέρια, ο νόμος του Darcy παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$U_2 = - \frac{k (P_2^2 - P_1^2)}{\mu \cdot 2 P_2 L} = \frac{k P_m \Delta P}{\mu P_2 \Delta L} \quad (1.10)$$

με $U_2 = \frac{Q_2}{A}$ όπου, Q_2 είναι η ογκομετρική παροχή στην έξοδο, A είναι το εμβαδόν διατομής του δείγματος και $P_m = \frac{P_1 + P_2}{2}$ είναι η μέση τιμή της πίεσης. Μέσω των πειραμάτων έχει παρατηρηθεί ότι η υπολογιζόμενη διαπερατότητα μερικές φορές είναι συνάρτηση της πίεσης του αερίου. Αυτή η επίδραση οφείλεται στο λεγόμενο φαινόμενο ολίσθησης, το οποίο λαμβάνεται υπόψη με βάση την εξίσωση Klinkenberg (1941):

$$\frac{U_2 P_2 L \mu}{\Delta P P_m} = k \left[1 + \left(\frac{b}{P_m} \right) \right] \quad (1.11)$$

όπου το b είναι μια σταθερά που επηρεάζεται και από το αέριο και από το πορώδες μέσο.

1.2.2.4 Ειδική Επιφάνεια

Η ειδική επιφάνεια ενός πορώδους υλικού $S_p \left(\frac{1}{m} \right)$, ορίζεται ως το κλάσμα με αριθμητή την διεπιφάνεια μεταξύ των πόρων (ή των ρευστών) με το πέτρωμα S_v και παρονομαστή τον συνολικό όγκο του πετρώματος V_t ή τη μάζα του. Οπότε έχουμε:

$$S_p = \frac{S_v}{V_t} \quad (1.12)$$

Στην πράξη περιγράφει την εσωτερική ελεύθερη επιφάνεια του πετρώματος. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε καταλυτικές αντιδράσεις και είναι ένα μέτρο της προσροφητικής ικανότητας και των διαχωρισμών.

Σύμφωνα με τους Collins (1961) και Scheidegger (1974), για να προσδιοριστεί η ειδική επιφάνεια χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι μέθοδοι. Ορισμένοι από αυτούς είναι οι εξής:

- Προσρόφηση:** Η επιφάνεια συνήθως λαμβάνεται με βάση τη μονάδα μάζας του δείγματος,
- Ποσοτική στερεολογία** («οπτική» μέθοδος): χρησιμοποιούνται φωτομικρογραφίες γυαλισμένων τμημάτων του δείγματος με επαρκή αντίθεση ώστε να υπάρχει διάκριση μεταξύ των πόρων από το στερεό,

- c. **Ροή ρευστού:** Οι μετρήσεις της διαπερατότητας και του πορώδους έχουν συσχέτιση με την ειδική επιφάνεια του πορώδους μέσου.

1.2.2.5 Ομοιογένεια και Ετερογένεια

Ο όρος **ετερογένεια** περιγράφει την ιδιότητα των στερεών να αποτελούνται από δομικές μονάδες με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Στη μικροκλίμακα, η ετερογένεια αφορά στην παρουσία του συμπαγούς στερεού, που εμποδίζει τη ροή, και των πόρων, που αντιθέτως επιτρέπουν τη ροή των φάσεων διαμέσου του πετρώματος. Συνεπώς, σε αυτή την κλίμακα οι δύο διακριτές δομικές μονάδες είναι το στερεό και το διάκενο (πόροι). Στην κλίμακα REV, που το πέτρωμα θεωρείται ως ένα ομοιογενές συνεχές μέσο, η μικροσκοπική ετερογένεια (πόροι και στερεό) αντικαθίσταται από άλλες αντιπροσωπευτικές ιδιότητες, όπως το πορώδες, ϕ , και η διαπερατότητα, k . Η ετερογένεια συνεπώς σε αυτή την κλίμακα ορίζεται με βάση τη χωρική μεταβολή αυτών των ιδιοτήτων μεταξύ των στοιχειωδών δομικών μονάδων REV από τις οποίες θεωρούμε ότι αποτελείται το μέσο. Θεωρούμε δηλαδή ότι το πέτρωμα αποτελείται από REV δομικές μονάδες με διαφορετικές τιμές χαρακτηριστικών μακροσκοπικών ιδιοτήτων. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό, το πέτρωμα στο οποίο το πορώδες και η διαπερατότητα δε μεταβάλλονται χωρικά (μεταξύ των REV) ονομάζεται **ομοιογενές** (homogeneous) στη μακροκλίμακα. Ισχύει δηλ. $\phi(x, y, z) = \phi_0$ και $k(x, y, z) = k_0$. Αντίθετα, όταν το πορώδες ή η διαπερατότητα μεταβάλλονται στο χώρο με συνεχή ή ασυνεχή τρόπο, τότε το πέτρωμα χαρακτηρίζεται **ετερογενές** (heterogeneous) στη μακροκλίμακα. Προφανώς η μακροσκοπική ετερογένεια πηγάζει από τις διαφορετικές μικροσκοπικές ιδιότητες που παρουσιάζονται σε διαφορετικές περιοχές του πετρώματος, όπως για παράδειγμα οι διαφορές στην κατανομή μεγέθους πόρων και λαιμών.

1.2.2.6 Ισοτροπία και Ανισοτροπία

Ο όρος **ανισοτροπία** χαρακτηρίζει κυρίως την ιδιότητα του πετρώματος να άγει τα ρευστά σε διαφορετικό βαθμό σε κάθε διεύθυνση του χώρου. Συνεπώς, η ιδιότητα αυτή συνδέεται άμεσα με τη διαπερατότητά του. Τυπικά, οι κόκκοι ενός ιζηματογενούς πετρώματος έχουν υποστεί συμπίεση σε γεωλογικούς χρόνους λόγω της τάσης υπερκείμενων σχηματισμών με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μία ανισότροπη παραμόρφωση. Σε αυτή την περίπτωση, η μέση τιμή του δαιδαλώδους κατά τη διεύθυνση y είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή κατά τη διεύθυνση x (λόγω της καμπυλότητας των κόκκων) και συνεπώς οι ροϊκές γραμμές έχουν μεγαλύτερο μήκος κατά y (μεταξύ σημείων που ισαπέχουν στους πόρους). Ως αποτέλεσμα, η διαπερατότητα του μέσου κατά y είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή κατά x , δηλ. $k_x > k_y$, και τα ρευστά ρέουν πιο εύκολα στην οριζόντια διεύθυνση (για την ίδια βαθμίδα πίεσης). Με βάση την παραπάνω

ανάλυση, τα πετρώματα που παρουσιάζουν διαφορετική διαπερατότητα μεταξύ τουλάχιστον δύο διευθύνσεων στο χώρο ονομάζονται **ανισότροπα** (anisotropic). Αντίθετα, αυτά που παρουσιάζουν την ίδια τιμή διαπερατότητας προς όλες τις διευθύνσεις ροής ονομάζονται **ισότροπα** (isotropic). Τα ισότροπα πετρώματα μπορούν να είναι είτε ομοιογενή είτε ετερογενή, καθώς η ιδιότητα της ισοτροπίας ορίζεται με βάση μόνο με τη διεύθυνση και όχι τυχόν χωρικές μεταβολές της διαπερατότητας.

2. Συνθήκες ροής

2.1 Γενικευμένη εξίσωση Darcy σε πολυφασική ροή

Είναι εφικτή η επέκταση της εξίσωσης Darcy, με αντικατάσταση όμως της απόλυτης τιμής της διαπερατότητας του πετρώματος, k , από μία «φαινόμενη» τιμή, $k_{a,i}$, η οποία είναι συνάρτηση του κορεσμού του πετρώματος σε κάθε φάση, S_i . Η φαινόμενη τιμή $k_{a,i}$ ισούται με το γινόμενο $k_{r,i} * k$. Όπου $k_{r,i}$ ορίζεται ως **Σχετική Διαπερατότητα** της φάσης i κατά την πολυφασική ροή διαμέσου της πορώδους δομής και είναι ένα αδιάστατο μέγεθος. Η φυσική της ερμηνεία βασίζεται στο χώρο που καταλαμβάνει η φάση i μέσα στο πορώδες του πετρώματος σε σχέση με τις υπόλοιπες φάσεις που συνυπάρχουν μαζί της. Είναι λοιπόν αναμενόμενο να είναι γνησίως αύξουσα συνάρτηση του κορεσμού του πετρώματος στη συγκεκριμένη φάση. Ιδιαίτερη σημασία στην τιμή της σχετικής διαπερατότητας έχει και η χωρική κατανομή μίας δεδομένης τιμής κορεσμού καθώς, εάν η φάση κατανέμεται σε μεγαλύτερους πόρους, συνεισφέρει σε μεγαλύτερο βαθμό στη ροή για την ίδια βαθμίδα πίεσης. Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση η σχετική διαπερατότητα της φάσης είναι μεγαλύτερη. Ορίζετε ως ο λόγος της ογκομετρικής παροχής της φάσης i κατά την πολυφασική (όταν έχει κορεσμό S_i) προς την ογκομετρική παροχή που θα είχε η ίδια φάση στην περίπτωση μονοφασικής ροής (δηλ. εάν καταλάμβανε πλήρως το ίδιο πέτρωμα):

$$k_{r,i} = k_{r,i}(S_i) = \frac{u_i(S_i \leq 1)}{u_i(S_i = 1)} \quad (2.1)$$

Σύμφωνα με την έκφραση της γενικευμένης Darcy Εξ.(1.9), η ροή σε κάθε φάση οφείλεται στην αντίστοιχη διαφορά πίεσης που εφαρμόζεται στη φάση αυτή στα άκρα του διαστήματος ροής. Στην ειδικότερη περίπτωση όπου η μη διαβρέχουσα φάση βρίσκεται σε μικρή τιμή κορεσμού, τότε αυτή είναι ασυνεχής και ρέει με τη μορφή φυσαλίδων (εάν πρόκειται για αέριο) ή σταγονιδίων (εάν πρόκειται για υγρό). Τα σταγονίδια αυτά είναι διασπαρμένα εντός της συνεχούς διαβρέχουσας φάσης και παρατηρείται ότι η διαφορά πίεσης για την ασυνεχή φάση είναι διαφορετική. Η ταχύτητα της ροής της μη διαβρέχουσας φάσης είναι πεπερασμένη (και διαφορετική από μηδέν και προφανώς ανάλογη με την ταχύτητα της ροής της φέρουσας διαβρέχουσας φάσης).

Το συγκεκριμένο παράδειγμα καταδεικνύει ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του πεδίου πίεσης και ροής των δύο φάσεων λόγω των διατμητικών τάσεων και τοπικών πιέσεων που εκδηλώνονται στις μεταξύ τους διεπιφάνειες. Οι δυνάμεις αυτές οδηγούν στη μεταφορά ορμής μεταξύ τους που τελικά επηρεάζει τη φαινόμενη ταχύτητα κάθε φάσης. Για την περιγραφή αυτού του φαινομένου προτάθηκε μία περαιτέρω γενίκευση της εξίσωσης Darcy για διφασική ροή (Bear, 1972; Rose, 1988):

$$\vec{u}_w = -\frac{k_{r,w}k}{\mu_w} \nabla \Phi_w - \frac{k_{r,w-nw}k}{\mu_w} \nabla \Phi_{nw} \quad (2.2)$$

$$\vec{u}_{nw} = -\frac{k_{r,nw-w}k}{\mu_w} \nabla \Phi_w - \frac{k_{r,nw}k}{\mu_{nw}} \nabla \Phi_{nw} \quad (2.3)$$

όπου $\nabla \Phi_i = \nabla P_i - \rho_i \vec{g}$ και Φ_i είναι το δυναμικό ροής κάθε φάσης.

Το παραπάνω πρότυπο περιγράφει τη ροή κάθε φάσης ως συνισταμένη της βαθμίδας πίεσης και στις δύο φάσεις, ορίζοντας δύο νέους όρους σχετικής διαπερατότητας, $k_{r,w-nw}$ και $k_{r,nw-w}$ που περιγράφουν μακροσκοπικά την ανταλλαγή ορμής μεταξύ των δύο φάσεων. Προφανώς το παραπάνω σύστημα μπορεί να επεκταθεί σε περισσότερες από δύο φάσεις.

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σχετική διαπερατότητα

Η σχετική διαπερατότητα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μακροσκοπικές ιδιότητες του πετρώματος που περιγράφουν την πολυφασική μη αναμίξιμη ροή σε αυτό. Σύμφωνα με τον Marle (Marle, 1981), η σχετική διαπερατότητα κάθε φάσης είναι συνάρτηση μίας σειράς παραμέτρων που συνδέονται με τις φυσικοχημικές και ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Για τη διαβρέχουσα και τη μη διαβρέχουσα φάση, ισχύουν τα εξής:

$$k_{r,w} = f\left(\frac{\rho_w}{\rho_{nw}}, \frac{\mu_w}{\mu_{nw}}, \frac{(\rho_w - \rho_{nw})gR^2}{\sigma}, \frac{\mu_w u}{\sigma}, \frac{\rho_w R u}{\mu_w}, \theta, S_w\right) \quad (2.4)$$

$$k_{r,nw} = f\left(\frac{\rho_w}{\rho_{nw}}, \frac{\mu_w}{\mu_{nw}}, \frac{(\rho_w - \rho_{nw})gR^2}{\sigma}, \frac{\mu_{nw} u}{\sigma}, \frac{\rho_{nw} R u}{\mu_{nw}}, \theta, S_{nw}\right) \quad (2.5)$$

Με εξαίρεση τη γωνία διαβροχής θ , όλα τα υπόλοιπα μεγέθη στις παραπάνω σχέσεις είναι αδιάστατα και εκφράζουν τον ανταγωνισμό των δυνάμεων που επηρεάζουν την κίνηση της διεπιφάνειας. Ο λόγος $C_a = \frac{\mu_w u}{\sigma}$ ονομάζεται **τριχοειδής αριθμός** (Capillary number) και εκφράζει τη σχετική δράση των ιξωδών προς τις τριχοειδείς δυνάμεις στην κίνηση της διεπιφάνειας. Ο συγκεκριμένος όρος έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι έχει σημαντική επίδραση στη δυναμική των διεπιφανειών κατά τη διφασική μη μόνιμη ροή. Σε συνδυασμό μάλιστα με τον **λόγο ιξωδών**, $M = \frac{\mu_w}{\mu_{nw}}$ των δύο ρευστών καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη χωρική κατανομή των φάσεων σε διεργασίες μηχανικής εκτόπισης, επηρεάζοντας τελικά τη μετρούμενη σχετική διαπερατότητα σε μόνιμες συνθήκες (Lenormand et al., 1988). Ακόμη η τιμή της σχετικής διαπερατότητας επηρεάζεται από την **αρχική κατανομή των φάσεων** και την «ιστορική» εξέλιξη της διεργασίας

προκειμένου να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη τιμή κορεσμού. Η διεργασία κορεσμού του πετρώματος είναι κατά κανόνα μη αντιστρέψιμη, δημιουργώντας έτσι το φαινόμενο της «υστέρησης» στις καμπύλες σχετικής διαπερατότητας (Chevalier et al., 2015; Dullien, 1992).

2.3 Διεργασίες Εμποτισμού και Αποστράγγισης

Ανάλογα με τον βαθμό διαβροχής του πετρώματος από κάθε φάση, διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες δυναμικής εξέλιξης του πεδίου κορεσμού:

α) Η διεργασία Αποστράγγισης (drainage), όπου ο ταμιευτήρας είναι αρχικά πλήρως κορεσμένος στη διαβρέχουσα φάση και η μη διαβρέχουσα φάση εισέρχεται από ένα φρεάτιο εισπίεσης εκτοπίζοντας την πρώτη προς τα φρεάτια παραγωγής.

β) Η διεργασία Εμποτισμού (imbibition), όπου ο ταμιευτήρας είναι αρχικά πλήρως κορεσμένος και μία πιο διαβρέχουσα φάση εισάγεται σε αυτόν προκειμένου να εκτοπίσει τη μη διαβρέχουσα.

2.4 Δυναμική της διεπιφάνειας και μέτωπο εκτόπισης (κατά την αποστράγγιση)

Κατά τη διεργασία της αποστράγγισης, η μετατόπιση του ρευστού χαρακτηρίζεται από τον τριχοειδή αριθμό C και τον λόγο ιξωδών M . Για ορισμένες τιμές αυτών των αριθμών, είτε οι ιξώδεις είτε οι τριχοειδείς δυνάμεις κυριαρχούν και η μετατόπιση παίρνει μία από τις βασικές μορφές : (α) ιξώδης δακτυλίωση (viscous fingering), (β) τριχοειδής δακτυλίωση (capillary fingering) ή (γ) σταθερή μετατόπιση (stable displacement). Τα πεδία ισχύος των διαφόρων βασικών μηχανισμών μπορούν να απεικονιστούν στο επίπεδο με τους άξονες C και M . Η απεικόνιση αυτή έχει ονομαστεί διάγραμμα φάσης για μη αναμίξιμες μετατοπίσεις, που προτάθηκε από τον Lenormand (1985). Σκοπός είναι η μέτρηση του τελικού κορεσμού κατά τη διάρρηξη, δηλαδή όταν το εγχυόμενο ρευστό φτάσει στην απέναντι πλευρά.

Σταθερή μετατόπιση : Το σύνορο μεταξύ των ρευστών είναι ένα επίπεδο μέτωπο με ορισμένες ανωμαλίες στην κλίμακα λίγων πόρων. Η κύρια δύναμη οφείλεται στο ιξώδες του εγχυόμενου ρευστού. Τα τριχοειδή φαινόμενα και η πτώση πίεσης στο εκτοπιζόμενο ρευστό είναι αμελητέα. Το μέγεθος των συσσωματωμάτων που παγιδεύονται πίσω από το μέτωπο είναι μόνο λίγοι πόροι.

Ιξώδης δακτυλίωση: Αρχικά αναπτύσσονται αρκετά μικρά δάκτυλα στην είσοδο του μικρομοντέλου, και προοδευτικά, μερικά από αυτά αναπτύσσονται ταχύτερα από τα γειτονικά τους εμποδίζοντας την ανάπτυξη των μικρότερων δακτύλων. Η όψη των δακτύλων είναι διαφορετική από την περίπτωση των τριχοειδών, καθώς δεν παρουσιάζουν βρόχους και όλα τα δάκτυλα είναι προσανατολισμένα προς την έξοδο, με αποτέλεσμα να δημιουργείτε ένα χαρακτηριστικό δενδροειδές σχήμα. Η κύρια δύναμη οφείλεται στο ιξώδες του εκτοπιζόμενου

ρευστού. Τα τριχοειδή φαινόμενα και η πτώση πίεσης στο εκτοπιζόμενο ρευστό είναι αμελητέα. Εμφανίζεται σε υψηλό ρυθμό ροής και άρα C , όπου το μοτίβο αλλάζει και γίνεται λεπτότερο (άρα με μικρότερο κορεσμό).

Τριχοειδής δακτυλίωση : Σε χαμηλό τριχοειδή αριθμό C , οι ιξώδεις δυνάμεις είναι αμελητέες και στα δύο ρευστά και η κύρια δύναμη οφείλεται στην τριχοειδικότητα. Τα δάκτυλα απλώνονται επίσης σε όλο το δίκτυο, αλλά το μοτίβο είναι διαφορετικό από την προηγούμενη περίπτωση και ο τελικός κορεσμός είναι μεγαλύτερος. Τα δάκτυλα αναπτύσσονται προς όλες τις κατευθύνσεις, ακόμη και προς τα πίσω (προς την είσοδο). Σχηματίζουν βρόχους οι οποίοι παγιδεύουν το εκτοπιζόμενο ρευστό και το μέγεθος των παγιδευμένων συσσωματωμάτων κυμαίνεται από το μέγεθος των πόρων έως το δίκτυο πόρων.

2.5 Επιδράσεις της ιστορίας στα υπολείμματα μη διαβρεχόμενου ρευστού

(Εμποτισμός) και η εξέλιξη του κορεσμού με την ταχύτητα ροής και το ιστορικό

Κατά τη διάρκεια μη αναμίξιμης διφασικής ροής, είναι δυνατές διάφορες διαμορφώσεις για τις κατανομές φάσεων των ρευστών που διαβρέχονται (w) και των ρευστών που δεν διαβρέχονται (nw), ανάλογα με το ιστορικό ροής, τους κορεσμούς φάσεων και τον τριχοειδή αριθμό. Αυτό που επηρεάζει την ροή είναι η χωρική συνδεσιμότητα κάθε φάσης, η οποία μπορεί να καλύπτει ή να μην καλύπτει το πορώδες μέσο και ιδιαίτερα η ύπαρξη αποσυνδεδεμένων σταγονιδίων υγρού nw (γάγγλια). Η ανάκτηση αυτών των υπολειμμάτων, τα οποία μπορεί να αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό κλάσμα όγκου της συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας του εδαφικού σχηματισμού, είναι ένα δύσκολο έργο. Πράγματι, η κινητοποίηση των παγιδευμένων σταγόνων μπορεί να απαιτεί σημαντική πτώση πίεσης και κατανάλωση ενέργειας.

Η μελέτη των επιδράσεων του ιστορικού ροής, πραγματοποιείται με τη διεξαγωγή ενός πειράματος σε ένα μεγάλο εύρος τιμών Ca και μεγεθών σταγόνων. Συγκεκριμένα η αύξηση της ροής του ρευστού w οδηγεί σε μείωση του κορεσμού nw . Αυτό συμβαίνει γιατί οι ιξώδεις δυνάμεις γίνονται προοδευτικά πιο σημαντικές στις διεπιφάνειες των σταγόνων και έχει ως επακόλουθο την κινητοποίηση αρκετών σταγόνων nw . Σε πολύ χαμηλό Ca , το πεδίο πίεσης που δημιουργείται από τη ροή δεν είναι σε θέση να μετακινήσει καμία κηλίδα nw , ο κορεσμός nw παραμένει σταθερός. Αυτό προϋποθέτει ότι η αρχική φάση διαβροχής είναι διηθητική, όπου η ροή επιτρέπεται χωρίς να μετακινείται η άλλη φάση. Σε χαμηλούς αριθμούς Ca , η πορεία κορεσμού εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες. Όμως σε μεγάλους τριχοειδείς αριθμούς $Ca \geq 10^{-5}$, ο κορεσμός δεν εξαρτάται πλέον από την αρχική διαμόρφωση και το ιστορικό της ροής.

2.6 Καθεστώτα Ροής

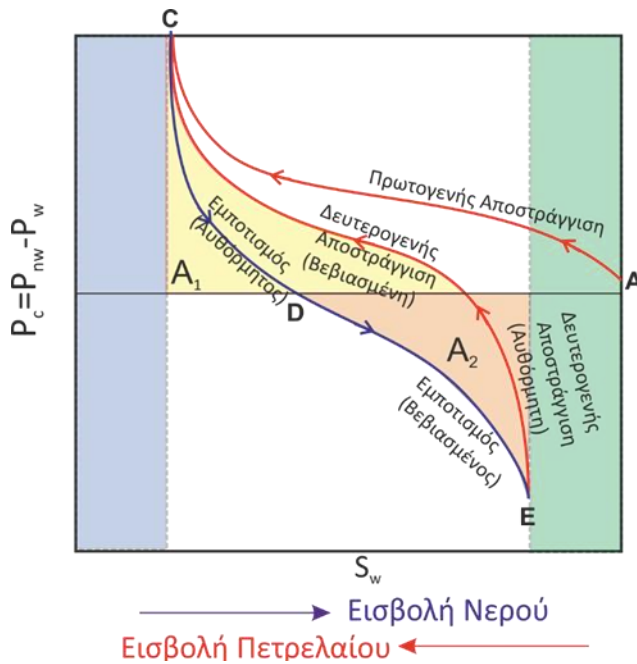
Η παρουσία ακίνητων σταγόνων της φάσης nw έχει επίσης βαθιά επίδραση στην "αποτελεσματική" διαπερατότητα του μέσου, όπως τη βιώνει η ρέουσα φάση w. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το ζήτημα, μετράμε την πτώση πίεσης (B) κατά μήκος του μέσου σε σχέση με την επιβαλλόμενη ροή της φάσης w, δημιουργώντας ένα διάγραμμα B – Ca. Πιο συγκεκριμένα τα καθεστώτα ροής είναι: (i) Σε χαμηλές τιμές Ca, όπου η πτώση πίεσης είναι γραμμική με την παροχή. (ii) Σε ενδιάμεσες τιμές Ca, η κλίση είναι σημαντικά μικρότερη. (iii) Για μεγαλύτερες τιμές Ca, η κλίση αυξάνεται και πάλι.

- i) Σε χαμηλό τριχοειδή αριθμό Ca, ο κορεσμός της ακίνητης nw-φάσης παραμένει σταθερός. Το καθεστώς αυτό είναι "αντιστρεπτό" σε σχέση με την αύξηση ή τη μείωση του ρυθμού ροής.
- ii) Σε ενδιάμεσο ρυθμό ροής, καθώς ο τριχοειδής αριθμός αυξάνεται, μέρος της φάσης nw κινητοποιείται και παρασύρεται από τη ρέουσα φάση w, οδηγώντας σε συνεχή μείωση του υπολειπόμενου κορεσμού nw. Επομένως, η αύξηση της πτώσης πίεσης προκύπτει από δύο ανταγωνιστικές επιδράσεις. Από τη μία πλευρά, η απώλεια πίεσης αυξάνεται με την ταχύτητα ροής, αλλά από την άλλη πλευρά η αύξηση του αριθμού των διαδρομών ροής (κανάλια ροής) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της υδραυλικής αντίστασης. Αυτή η διαδικασία αποκορεσμού έχει ως επακόλουθο την μη αναστρέψιμη αύξηση της διαπερατότητας.
- iii) Σε υψηλό Ca παρατηρούμε ότι ο υπολειπόμενος κορεσμός και η διαπερατότητα παραμένουν σταθερά. Σε αυτό το καθεστώς ροής εμφανίζονται αδρανειακές δυνάμεις, καθώς ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται ως εξής: $Re \sim 5$.

Συνοπτικά να επισημανθεί ότι ο κορεσμός nw εξαρτάται αναγκαστικά από το ιστορικό της ροής και πιο συγκεκριμένα από τον υψηλότερο τριχοειδή αριθμό που επιτεύχθηκε στο παρελθόν, σημειώνεται ως Ca_M . Σε χαμηλό Ca_M , ο τελικός κορεσμός εξαρτάται σημαντικά από την αρχική διαμόρφωση. Ωστόσο, για μεγάλο Ca_M , ο κορεσμός είναι ανεξάρτητος από το ιστορικό της ροής.

2.7 Καμπύλη τριχοειδούς πίεσης

Η καμπύλη αντιπροσωπεύει τη διαφορά πίεσης που απαιτείται να εφαρμοστεί σε μόνιμες συνθήκες μεταξύ των φάσεων, προκειμένου να επιτευχθεί ολόκληρο το πιθανό εύρος κορεσμού του πετρώματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες για ένα υδατοδιαβρεκτό πέτρωμα συναρτήσει του κορεσμού σε νερό, όπου ισχύει η σχέση: $P_{nw} - P_w = P_c(S_w)$.



Εικόνα 2: Χαρακτηριστικές καμπύλες διαγράμματος τριχοειδούς πίεσης σε διεργασίες μηχανικής εκτόπισης σε πορώδες υδατοδιαβρεκτό πέτρωμα.

Διακρίνουμε μία σειρά από καμπύλες που αντιστοιχούν σε διαφορετικές διεργασίες αποστράγγισης και εμποτισμού ανάλογα με την αρχική τιμή κορεσμού κατά την έναρξη κάθε διεργασίας.

Οι χαρακτηριστικότερες καμπύλες είναι οι ακόλουθες:

α) **Πρωτογενής Αποστράγγιση** (Primary Drainage) (**A-C**). Αντιστοιχεί στη διεργασία αποστράγγισης ενός πλήρως κορεσμένου σε νερό υδατοδιαβρεκτού δείγματος που προκύπτει με την αύξηση της πίεσης στη δεξαμενή πετρελαίου. Αρχικά καταλαμβάνονται οι μεγαλύτεροι πόροι που αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές P_c και προσδευτικά όλο και μικρότεροι πόροι σε μεγαλύτερες τιμές P_c . Η καμπύλη καταλήγει ασυμπτωτικά στην τιμή υπολειμματικού κορεσμού σε νερό S_{wr} όπου η περαιτέρω αύξηση της πίεσης δεν επιφέρει καμία μεταβολή στον κορεσμό. Σε αυτό το σημείο, το πετρέλαιο σχηματίζει μία συνεχή φάση που καταλαμβάνει κυρίως το κέντρο των πόρων, ενώ το νερό βρίσκεται απομονωμένο ως ασυνεχής φάση σε μικρότερους πόρους.

β) **Αυθόρμητος Εμποτισμός** (Spontaneous Imbibition) (**C-D**). Αντιστοιχεί στη διεργασία εμποτισμού του πετρώματος ξεκινώντας από τον υπολειμματικό κορεσμό σε νερό που προκύπτει με τη σταδιακή μείωση της πίεσης στη δεξαμενή πετρελαίου. Το νερό επανεισέρχεται πρώτα στους μικρούς πόρους και στη συνέχεια στους μεγαλύτερους, αυξάνοντας έτσι τον κορεσμό S_w . Το νερό εισέρχεται κυρίως με τη μορφή υμενίων (φιλμς) που καλύπτουν το τοίχωμα και διογκώνονται εκτοπίζοντας το πετρέλαιο από το κέντρο των πόρων.

γ) **Βεβιασμένος Εμποτισμός** (Forced Imbibition) (**D-E**). Αντιστοιχεί στον συνεχιζόμενο εμποτισμό του πετρώματος σε νερό, αφού οι πιέσεις στις δύο δεξαμενές γίνουν ίσες, δηλ. $P_c=0$.

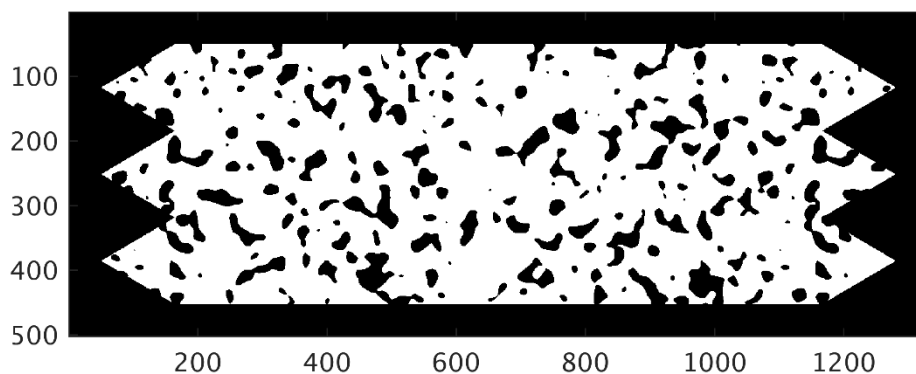
Το πετρέλαιο από αυτό το σημείο υπάρχει κυρίως ως ασυνεχής φάση με τη μορφή γαγγλίων και η απομάκρυνσή του επιτυγχάνεται μόνο με αύξηση της πίεσης στη δεξαμενή νερού προκειμένου να αναπτυχθεί ροή νερού που απομακρύνει τα γάγγλια μέχρι τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε πετρέλαιο, S_{or} . Περαιτέρω αύξηση της πίεσης πέρα από εκείνο το σημείο δεν επιφέρει καμία μεταβολή στον κορεσμό, καθώς τα μικρότερα γάγγλια πετρελαίου έχουν ακινητοποιηθεί σε περιοχές μικρής ροής.

δ) Δευτερογενής Αποστράγγιση (Secondary Drainage) (E-C). Αντιστοιχεί σε έναν νέο κύκλο αποστράγγισης ξεκινώντας όμως αυτή τη φορά από τον υπολειμματικό κορεσμό του πετρελαίου στο δείγμα με τη βαθμιαία μείωση της πίεσης στη δεξαμενή νερού (ή ισοδύναμα με αύξηση αυτής στη δεξαμενή πετρελαίου). Η αύξηση της τριχοειδούς πίεσης οδηγεί και πάλι στην ίδια τιμή υπολειμματικού κορεσμού σε νερό με την πρωτογενή αποστράγγιση, παρά το γεγονός ότι η διεργασία ακολουθεί διαφορετική διαδρομή.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΔΟΜΗΣ

3.1 Ψηφιακός σχεδιασμός πορώδους δομής

Το πορώδες μέσο αποτελείται από στερεές (αδιαπέραστες) και κενές (διαπερατές) θέσεις, όπου η χωρική κατανομή των στερεών θέσεων επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο στοχαστικής ανακατασκευής. Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα MATLAB και τον έτοιμο κώδικα (`surf2stl.m` - παράρτημα) ο οποίος ήταν γραμμένος από τον συγγραφέα Bill McDonald, δημιουργήσαμε ένα αρχείο `stl`. Το αρχείο αυτό δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα επιφάνειας. Η γεωμετρία της επιφάνειας ορίζεται από τρία ορίσματα μήτρας X, Y και Z . Τα X, Y και Z πρέπει να είναι δισδιάστατοι πίνακες με το ίδιο μέγεθος. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας πάλι την MATLAB και τον επίσης έτοιμο κώδικα (`gen_log_gaussian_pattern_stl_190622.m` - παράρτημα), προσαρμόσαμε μόνο τα X και Y ώστε να λάβουν αυθαίρετες τιμές. Οι τιμές των πινάκων-διανυσμάτων είναι σε mm, οπότε η ανάλυση είναι σε mm. Στη MATLAB μπορούμε να ρυθμίσουμε ορισμένες παραμέτρους όπως είναι το πορώδες. Ο 2^{ος} κώδικας ακολουθούσε το πρότυπο της λογαριθμικής γκαουσιανής κατανομής για την προσαρμογή των X και Y . Εκτελώντας αυτόν τον κώδικα εξήγαμε δύο αρχεία. Το ένα είναι σε μορφή `tif`, δηλαδή εικόνα υψηλής ποιότητας και το άλλο σε μορφή `stl`, δηλαδή γενικά ένα αρχείο CAD που χρησιμοποιείται ως πρότυπο μορφής σχεδιασμού στερεολιθογραφίας. Από την εικόνα 3 (αρχείο `tif`) εμείς θα χαράξουμε μόνο την περιοχή της εικόνας που είναι λευκή, δηλαδή τον διάκενο χώρο.



Εικόνα 3: Αρχείο `tif`

3.2 Επεξεργασία αρχείου `stl` και μετατροπή σε κώδικα G/M μηχανής

Η κατεργασία του κελιού έγινε με χρήση κύκλων κατεργασίας και λογισμικού CAD/CAM. Το λογισμικό αυτό ήταν το InventorCAM της Autodesk, με το οποίο επεξεργαζόμαστε και μετατρέπουμε το αρχείο μορφής `stl` σε κώδικα G/M μηχανής. Η ανάγκη για γρήγορους ρυθμούς παραγωγής και διευκόλυνση της επαναληψιμότητας, οδήγησε στην ομαδοποίηση των

λειτουργιών και στην εξέλιξη του G-code με αποτέλεσμα τη δημιουργία των Κύκλων Κατεργασίας (Canned Cycles) στον CNC προγραμματισμό. Κύκλος Κατεργασίας είναι μια εφαρμόσιμη τεχνολογία υπορουτίνας με την οποία λειτουργεί συγκεκριμένη μηχανική διαδικασία με καθορισμένη εφαρμογή όπως φραιζάρισμα εσοχής, διάτρηση. Οι κύκλοι κατεργασίας πραγματοποιούν την κατεργασία ως μεμονωμένη εργασία η οποία παραμετροποιείται μέσω ορισμάτων που δέχονται ως είσοδο. Οι παράμετροι των κύκλων κατεργασίας καθορίζουν πληθώρα χαρακτηριστικών της κατεργασίας τα οποία ποικίλουν ανάλογα με το είδος της και καθορίζονται από τον προγραμματιστή. Οι κύκλοι κατεργασίας λειτουργούν ως μια προγραμματιστική μέθοδος η οποία αποδίδει επαναληψιμότητα στην κατεργασία χρησιμοποιώντας G/M κώδικα.

3.3 Χάραξη πορώδους δομής

Η κοπή του plexiglass για τη δημιουργία του μικρομοντέλου, γίνεται σε φρέζα CNC και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε στην DMU 50 eco (DMGECOLINE) της εταιρείας Siemens, η οποία καθοδηγείται με ψηφιακή καθοδήγηση Siemens 810D και η οποία βρίσκεται στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης (m3) της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για τη λειτουργία της φρέζας χρειάζεται να περαστούν οι συντεταγμένες τις οποίες θα πάει να κόψει η φρέζα, αλλά και παράμετροι για την επεξεργασία κοπής, όπως είναι οι στροφές του κοπτικού (rpm), η φορά περιστροφής του (δεξιόστροφη) και η πρόωση (mm/min). Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατεργασία του Plexiglas είναι:



Εικόνα 4: Ηλεκτρονικό παχύμετρο



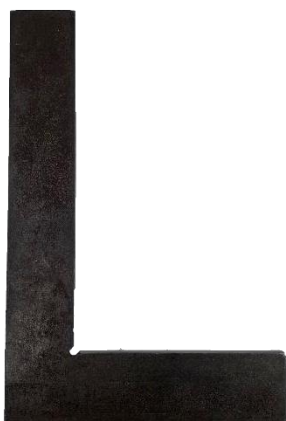
Εικόνα 5: Λίμα



Εικόνα 6: Κονδύλι



Εικόνα 7: Μέτσολα



Εικόνα 8: Χάρακας ορθής γωνίας (για γώνιασμα)

Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις διάφορες κατεργασίες, είναι:



Εικόνα 9: Μετρητικό ρολόι



Εικόνα 10: Τρυπάνι



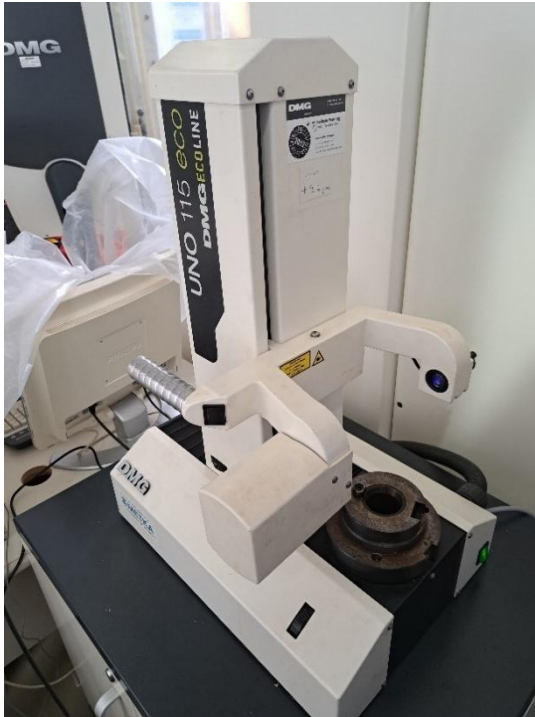
Εικόνα 11: φρέζα CNC



Εικόνα 12: χώρος εργαλείων φρέζας CNC



Εικόνα 13: Διεπαφή χρήστη με CNC



Εικόνα 14: Μετρητικό UNO 115 eco
DMGECOLINE

Το μετρητικό UNO 115 eco DMGECOLINE χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαμέτρου των κοπτικών εργαλείων. Μόλις μετρηθεί το κάθε εργαλείο, ο χρήστης σημειώνει τη μέτρηση σε ένα χαρτί και στη συνέχεια εισάγει τις μετρήσεις του στη μηχανή. Η αρχική διαμόρφωση του τεμαχίου γίνεται με το φραιζάρισμα, το οποίο λειαίνει τις επιφάνειές του. Κατά την κοπή ρίχνουμε ψυκτικό υγρό, για να μην σπάσει το κοπτικό. Ο χειριστής πρέπει εκ των προτέρων να γωνιάσει το τεμάχιο, ώστε να βγει ίσιο.

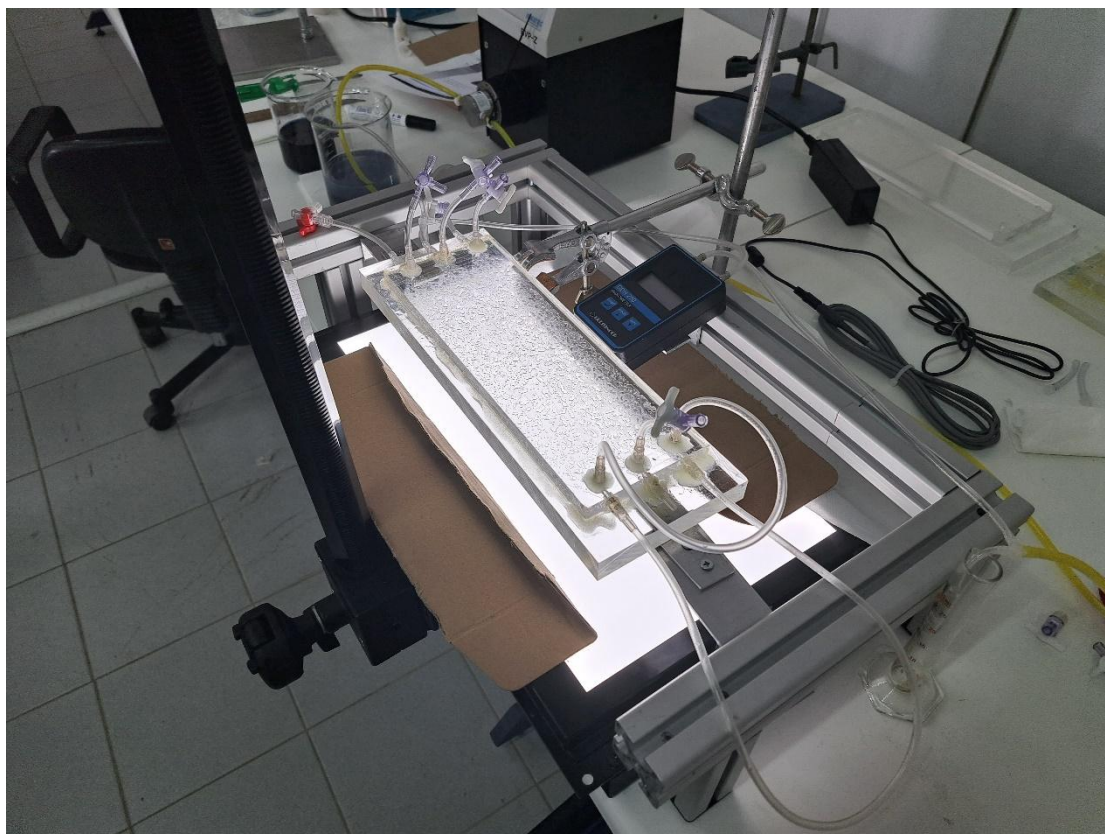
Αφού κοπεί το Plexiglas, κολλάμε πάνω του μια επιφάνεια του ίδιου υλικού με εποξική κόλλα.



Εικόνα 15: Εποξική κόλλα

4. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει χαρακτηρισμός του χαραγμένου σε φρέζα PMMA (plexiglass), ως προς τη διαπερατότητα κατά Darcy. Για αρχή θα γίνει παρουσίαση των βασικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται η πειραματική διάταξη. Στη συνέχεια θα αναλυθεί η διαδικασία του πειράματος που σκοπό έχει τον υπολογισμό της διαπερατότητας του μικρομοντέλου μέσω συγκεκριμένων μετρήσεων. Και τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού.

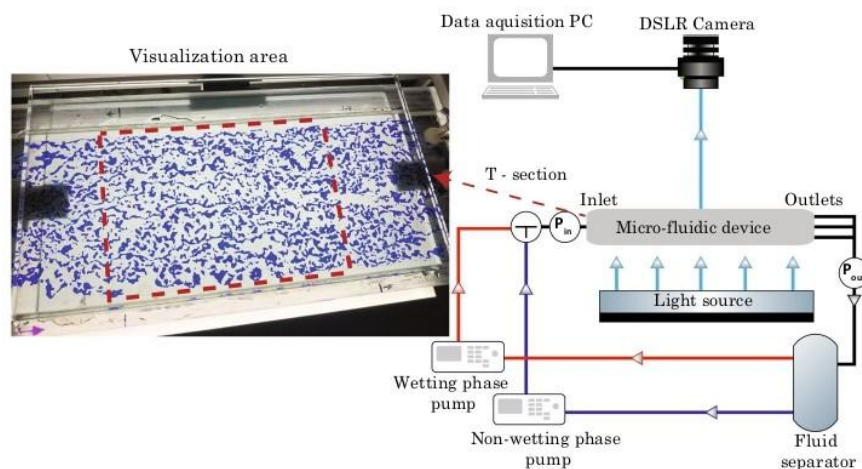


Εικόνα 16: Πειραματική διάταξη

4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης υπολογισμού διαπερατότητας

Για τον χαρακτηρισμό του δοκιμίου χρησιμοποιείται μια διάταξη που παρουσιάζεται στη Εικόνα 2 και αποτελείται από μία αντλία, ένα διαφορικό μανόμετρο, τα σωληνάκια ροής του ρευστού, τις συνδέσεις T ή αλλιώς τα λεγόμενα T-junction και το δοκίμιο - πορώδες μέσο. Η αντλία «Ismatec BVP-Z Gear Pump» που λειτουργεί με γρανάζια γραφίτη, χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ροής του ρευστού. Με την κεφαλή GA-X21.CFS.B μπορεί να δώσει παροχή από 0.1 έως 99.9 ml/min (ή αλλιώς 0.01 έως 999 rpm στα γρανάζια) και μέγιστη διαφορική πίεση 1.4bar. Ακόμη έχουμε το διαφορικό μανόμετρο GDH 200 Manometer της Greisinger, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πτώσης πίεσης σε μονάδες mbar, mmHg, PSI και Pa, ανάλογα

με την ογκομετρική παροχή που δίνεται από την αντλία. Εμείς το ρυθμίζουμε σε Pa. Έχει εύρος λειτουργίας 0 με 1999 Pa με ανάλυση 1 Pa. Η ακρίβειά του είναι: $\pm 1\%$ FS υστέρηση και γραμμικότητα και επιπλέον $\pm 2\%$ FS εξάρτηση από τη θερμοκρασία 0° έως 50 °C. Τα T-junction είναι οι συνδέσεις που χρησιμοποιούνται για να ενώσουν τα σωληνάκια ροής του ρευστού με το μανόμετρο. Μέσω αυτής της διάταξης γίνεται ο χαρακτηρισμός του δοκιμίου, ως προς τη διαπερατότητά του.



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης

4.2 Βαθμονόμηση αντλίας

Αρχικά ξεκινάμε με τη βαθμονόμηση της αντλίας προκειμένου να διαπιστώσουμε ότι δεν υπάρχουν αποκλίσεις της πραγματικής ογκομετρικής παροχής από την επιβαλλόμενη-θεωρητική τιμή στην αντλία. Συγκεκριμένα ρυθμίζουμε την αντλία στα 500rpm ή 50 ml/min, η οποία είναι συνδεδεμένη με ένα σωληνάκι, το οποίο καταλήγει σε μία ογκομετρική φιάλη των 100 ml. Ο απαιτούμενος θεωρητικός χρόνος είναι 2 min. Πραγματοποιώντας το πείραμα διαπιστώνουμε ότι η ογκομετρική φιάλη πληρώνεται σε 2 min. Οπότε η αντλία είναι σωστά βαθμονομημένη.

4.3 Υπολογισμός διαπερατότητας κελιού

Το **1ο πείραμα** γίνεται για τον υπολογισμό της διαπερατότητας του κελιού. Συγκεκριμένα μέσω αρκετών μετρήσεων και την εφαρμογή της εξίσωσης Darcy καταφέρνουμε να υπολογίσουμε την διαπερατότητα της πορώδους δομής (plexiglass). Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος μετράμε τη πτώση της πίεσης ΔP (Pa) του ρευστού, για μια συγκεκριμένη τιμή ογκομετρικής παροχής q . Το μανόμετρο το συνδέουμε σε απόσταση 4.8 cm από την είσοδο και 5.2 cm από την έξοδο του κελιού. Ακόμη τοποθετούμε το μανόμετρο σε τέτοια θέση, ώστε να

αποφύγουμε την υψομετρική διαφορά με το κελί, προκειμένου να μην έχουμε υπερπίεση ή υποπίεση λόγω υδροστατικής πίεσης. Για τον ίδιο λόγο, τα σωληνάκια στην είσοδο και στην έξοδο του κελιού (cell) είναι τοποθετημένα από τα πλάγια και όχι από πάνω. Ένα ακόμη βήμα είναι να ελέγξουμε με ένα αλφάδι το κελί (plexiglass), για το εάν είναι σε απόλυτη ευθεία, προκειμένου να μην έχουμε υδροστατική πίεση λόγω υψομετρικής διαφοράς. Τα σωληνάκια στην έξοδο βρίσκονται στον αέρα και όχι βυθισμένα μέσα στο ρευστό του ογκομετρικού κυλίνδρου, προκειμένου να μην αυξάνουν την πτώση πίεσης και επηρεάζουν τις μετρήσεις. Διατηρούμε τη συγκεκριμένη διάταξη σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, προκειμένου να μπορούμε να κάνουμε συγκρίσεις. Τέλος αυξάνουμε την ογκομετρική παροχή από 0 έως 54 ml/min, με βήμα 2 ml/min και καταγράφουμε την μετρούμενη πτώση πίεσης, ως διαφορά πίεσης, με το μανόμετρο (σε μονάδες μέτρησης Pa) σε κάθε βήμα. Για μείωση των πειραματικών σφαλμάτων επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από 54 έως 0 ml/min, με βήμα 2 ml/min. Το ρευστό το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε είναι το επτάνιο C₇ με πυκνότητα $\rho = 684 \text{ kg/m}^3$ και ιξώδες $\mu_{C7} = 0.386 \text{ cP}$. Οι διαστάσεις του κελιού είναι: βάθος τομής $d_{\text{cell}} = 400 \text{ }\mu\text{m}$, μήκος $L_{\text{cell}} = 32 \text{ cm}$ και πλάτος $w = 10 \text{ cm}$, οπότε το εμβαδόν διατομής του είναι $A_{\text{cell}} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$. Η εσωτερική διάμετρος από το σωληνάκι είναι $D_{\text{tube}} = (1/8)'' = 0.3175 \text{ cm}$ ή $R_{\text{tube}} = 0.0015875 \text{ m}$ και το εμβαδόν διατομής του είναι $A_{\text{tube}} = \pi \cdot R^2 = 7.917 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

Οπότε από την διεξαγωγή του πειράματος, έχουμε τις εξής μετρήσεις:

rpm	q (m3/sec)	ΔP_{tot} (Pa)	rpm	q (m3/sec)	ΔP_{tot} (Pa)
0	$0,00 \cdot 10^0$	0	530	$8,83 \cdot 10^{-7}$	1946
10	$1,67 \cdot 10^{-8}$	17	520	$8,67 \cdot 10^{-7}$	1881
20	$3,33 \cdot 10^{-8}$	33	500	$8,33 \cdot 10^{-7}$	1775
40	$6,67 \cdot 10^{-8}$	66	480	$8,00 \cdot 10^{-7}$	1673
60	$1,00 \cdot 10^{-7}$	102	460	$7,67 \cdot 10^{-7}$	1573
80	$1,33 \cdot 10^{-7}$	143	440	$7,33 \cdot 10^{-7}$	1470
100	$1,67 \cdot 10^{-7}$	190	420	$7,00 \cdot 10^{-7}$	1357
120	$2,00 \cdot 10^{-7}$	242	400	$6,67 \cdot 10^{-7}$	1259
140	$2,33 \cdot 10^{-7}$	289	380	$6,33 \cdot 10^{-7}$	1172
160	$2,67 \cdot 10^{-7}$	341	360	$6,00 \cdot 10^{-7}$	1089
180	$3,00 \cdot 10^{-7}$	398	340	$5,67 \cdot 10^{-7}$	1002
200	$3,33 \cdot 10^{-7}$	460	320	$5,33 \cdot 10^{-7}$	912
220	$3,67 \cdot 10^{-7}$	531	300	$5,00 \cdot 10^{-7}$	820
240	$4,00 \cdot 10^{-7}$	600	280	$4,67 \cdot 10^{-7}$	746
260	$4,33 \cdot 10^{-7}$	669	260	$4,33 \cdot 10^{-7}$	675
280	$4,67 \cdot 10^{-7}$	741	240	$4,00 \cdot 10^{-7}$	607
300	$5,00 \cdot 10^{-7}$	814	220	$3,67 \cdot 10^{-7}$	537
320	$5,33 \cdot 10^{-7}$	898	200	$3,33 \cdot 10^{-7}$	468
340	$5,67 \cdot 10^{-7}$	990	180	$3,00 \cdot 10^{-7}$	402
360	$6,00 \cdot 10^{-7}$	1074	160	$2,67 \cdot 10^{-7}$	347
380	$6,33 \cdot 10^{-7}$	1160	140	$2,33 \cdot 10^{-7}$	296
400	$6,67 \cdot 10^{-7}$	1249	120	$2,00 \cdot 10^{-7}$	248
420	$7,00 \cdot 10^{-7}$	1352	100	$1,67 \cdot 10^{-7}$	198

440	$7,33 \cdot 10^{-7}$	1460	80	$1,33 \cdot 10^{-7}$	150
460	$7,67 \cdot 10^{-7}$	1574	60	$1,00 \cdot 10^{-7}$	110
480	$8,00 \cdot 10^{-7}$	1672	40	$6,67 \cdot 10^{-8}$	74
500	$8,33 \cdot 10^{-7}$	1773	20	$3,33 \cdot 10^{-8}$	43
520	$8,67 \cdot 10^{-7}$	1882	10	$1,67 \cdot 10^{-8}$	26
530	$8,83 \cdot 10^{-7}$	1945	0	$0,00 \cdot 10^0$	13
540	$9,00 \cdot 10^{-7}$	1999			

Πίνακας 1: Πειραματικές Μετρήσεις

Προτού υπολογίσουμε την διαπερατότητα του κελιού, χρειάζεται να υπολογίσουμε ποια είναι η επίδραση στη συνολική πτώση πίεσης από το σωληνάκι $\Delta P_{\text{tube Poiseuille}}$ και στην συνέχεια να την αφαιρέσουμε από την συνολική πτώση πίεσης ΔP_{tot} . Από την επεξεργασία των συγκεκριμένων μετρήσεων, θα υπολογίσουμε για το ρευστό μέσα στο σωληνάκι: u_{tube} , Re_{tube} , $\Delta P_{\text{tube Poiseuille}}$ και για το κελί: ΔP_{cell} , u_{cell} , Re_{cell} , $\Delta P_{\text{cell}}/\Delta L_{\text{cell}}$. Να σημειωθεί ότι υπολογίζουμε τον αριθμό Reynolds προκειμένου να εξακριβώσουμε αν η ροή είναι στρωτή ή όχι, καθώς η στρωτή ροή αποτελεί προϋπόθεση για να κάνουμε χρήση του νόμου Poiseuille. Πιο αναλυτικά:

$$u_{\text{tube}} = \frac{q \left(\frac{m^3}{sec} \right)}{A_{\text{tube}}} = \frac{1.67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{m^3}{sec} \right)}{7.9173 \cdot 10^{-6} m^2} = 2.11 \cdot 10^{-3} \frac{m}{sec}. \text{ Ο αριθμός Reynolds στο σωληνάκι είναι}$$

$$Re_{\text{tube}} = \frac{\rho \cdot u_{\text{tube}} \cdot D_{\text{tube}}}{\mu_{C7}} = \frac{684 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot 2.11 \cdot 10^{-3} \left(\frac{m}{sec} \right) \cdot 2 \cdot 0.0015875 m}{0.386 \cdot 10^{-3} Pa \cdot sec} = 11.8 \text{ (αδιάστατο μέγεθος) και}$$

αφού ισχύει η προϋπόθεση για το $Re_{\text{tube}} < 2100$, συμπεραίνουμε ότι έχουμε στρωτή ροή και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση Poiseuille για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στο σωληνάκι $\Delta P_{\text{tube Poiseuille}}$. Η εξίσωση Poiseuille είναι $q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \Rightarrow \Delta P = \frac{8\mu \cdot q \cdot (L_1 + L_2)}{\pi R^4} \Rightarrow$

$$\Delta P_{\text{tube Poiseuille}} = \frac{8 \cdot 0.386 \cdot 10^{-3} (Pa \cdot sec) \cdot 1.67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{m^3}{sec} \right) \cdot (4.8 + 5.2) \cdot 10^{-2} m}{\pi \cdot 0.0015875^4 m^4} = 0.26 Pa. \text{ Τώρα θα}$$

υπολογίσουμε την πτώση πίεσης στο κελί ως εξής: $\Delta P_{\text{cell}} = \Delta P_{\text{tot}} - \Delta P_{\text{tube Poiseuille}} \Rightarrow \Delta P_{\text{cell}} = 17 Pa$

$$- 0.26 Pa \Rightarrow \Delta P_{\text{cell}} = 16.74 Pa. \text{ Η ταχύτητα του ρευστού } C_7 \text{ μέσα στο κελί είναι: } u_{\text{cell}} = \frac{q \left(\frac{m^3}{sec} \right)}{A_{\text{cell}} (m^2)} =$$

$$\frac{1.67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{m^3}{sec} \right)}{4 \cdot 10^{-5} m^2} = 4.17 \cdot 10^{-4} \frac{m}{sec}. \text{ Ο αριθμός Reynolds στο κελί είναι: } Re_{\text{cell}} = \frac{\rho \cdot u_{\text{cell}} \cdot d_{\text{cell}}}{\mu_{C7}} =$$

$$\frac{684 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot 4.17 \cdot 10^{-4} \left(\frac{m}{sec} \right) \cdot 400 \cdot 10^{-6} m}{0.386 \cdot 10^{-3} (Pa \cdot sec)} = 0.3 \text{ (αδιάστατο μέγεθος). Οπότε και μέσα στο κελί έχουμε}$$

στρωτή ροή, αφού $Re_{\text{cell}} < 2100$. Τέλος, υπολογίζουμε την βαθμίδα πίεσης $\Delta P_{\text{cell}}/\Delta L_{\text{cell}} = \frac{\Delta P_{\text{cell}}}{\Delta L_{\text{cell}}}$

$$= \frac{16.74 Pa}{32 \cdot 10^{-2} m} = 52.32 \left(\frac{Pa}{m} \right). \text{ Αυτή τη διαδικασία την εφαρμόζουμε για όλες τις μετρήσεις μας και}$$

καταλήγουμε στα εξής αποτελέσματα:

u _{tube} (m/s)	Re _{tube} (αδιάστατο)	ΔP _{tub} Poiseuille (Pa)	u _{tube} (m/s)	Re _{tube} (αδιάστατο)	ΔP _{tub} Poiseuille (Pa)
0,00*10 ⁰	0,0	0,00	1,12*10 ⁻¹	627,7	13,67
2,11*10 ⁻³	11,8	0,26	1,09*10 ⁻¹	615,9	13,41
4,21*10 ⁻³	23,7	0,52	1,05*10 ⁻¹	592,2	12,90
8,42*10 ⁻³	47,4	1,03	1,01*10 ⁻¹	568,5	12,38
1,26*10 ⁻²	71,1	1,55	9,68*10 ⁻²	544,8	11,87
1,68*10 ⁻²	94,7	2,06	9,26*10 ⁻²	521,1	11,35
2,11*10 ⁻²	118,4	2,58	8,84*10 ⁻²	497,4	10,83
2,53*10 ⁻²	142,1	3,10	8,42*10 ⁻²	473,7	10,32
2,95*10 ⁻²	165,8	3,61	8,00*10 ⁻²	450,1	9,80
3,37*10 ⁻²	189,5	4,13	7,58*10 ⁻²	426,4	9,29
3,79*10 ⁻²	213,2	4,64	7,16*10 ⁻²	402,7	8,77
4,21*10 ⁻²	236,9	5,16	6,74*10 ⁻²	379,0	8,25
4,63*10 ⁻²	260,6	5,67	6,32*10 ⁻²	355,3	7,74
5,05*10 ⁻²	284,2	6,19	5,89*10 ⁻²	331,6	7,22
5,47*10 ⁻²	307,9	6,71	5,47*10 ⁻²	307,9	6,71
5,89*10 ⁻²	331,6	7,22	5,05*10 ⁻²	284,2	6,19
6,32*10 ⁻²	355,3	7,74	4,63*10 ⁻²	260,6	5,67
6,74*10 ⁻²	379,0	8,25	4,21*10 ⁻²	236,9	5,16
7,16*10 ⁻²	402,7	8,77	3,79*10 ⁻²	213,2	4,64
7,58*10 ⁻²	426,4	9,29	3,37*10 ⁻²	189,5	4,13
8,00*10 ⁻²	450,1	9,80	2,95*10 ⁻²	165,8	3,61
8,42*10 ⁻²	473,7	10,32	2,53*10 ⁻²	142,1	3,10
8,84*10 ⁻²	497,4	10,83	2,11*10 ⁻²	118,4	2,58
9,26*10 ⁻²	521,1	11,35	1,68*10 ⁻²	94,7	2,06
9,68*10 ⁻²	544,8	11,87	1,26*10 ⁻²	71,1	1,55
1,01*10 ⁻¹	568,5	12,38	8,42*10 ⁻³	47,4	1,03
1,05*10 ⁻¹	592,2	12,90	4,21*10 ⁻³	23,7	0,52
1,09*10 ⁻¹	615,9	13,41	2,11*10 ⁻³	11,8	0,26
1,12*10 ⁻¹	627,7	13,67	0,00*10 ⁰	0,0	0,00
1,14*10 ⁻¹	639,6	13,93			

Πίνακας 2: Επεξεργασία Μετρήσεων tube

ΔP _{cell} (Pa)	u _{cell} (m/sec)	Re _{cell} (αδιάστατο)	ΔP _{cell} (Pa)	u _{cell} (m/sec)	Re _{cell} (αδιάστατο)
0,00	0,00*10 ⁰	0,00	1932,33	2,21*10 ⁻²	15,65
16,74	4,17*10 ⁻⁴	0,30	1867,59	2,17*10 ⁻²	15,36
32,48	8,33*10 ⁻⁴	0,59	1762,10	2,08*10 ⁻²	14,77
64,97	1,67*10 ⁻³	1,18	1660,62	2,00*10 ⁻²	14,18
100,45	2,50*10 ⁻³	1,77	1561,13	1,92*10 ⁻²	13,59
140,94	3,33*10 ⁻³	2,36	1458,65	1,83*10 ⁻²	12,99
187,42	4,17*10 ⁻³	2,95	1346,17	1,75*10 ⁻²	12,40
238,90	5,00*10 ⁻³	3,54	1248,68	1,67*10 ⁻²	11,81
285,39	5,83*10 ⁻³	4,13	1162,20	1,58*10 ⁻²	11,22
336,87	6,67*10 ⁻³	4,73	1079,71	1,50*10 ⁻²	10,63

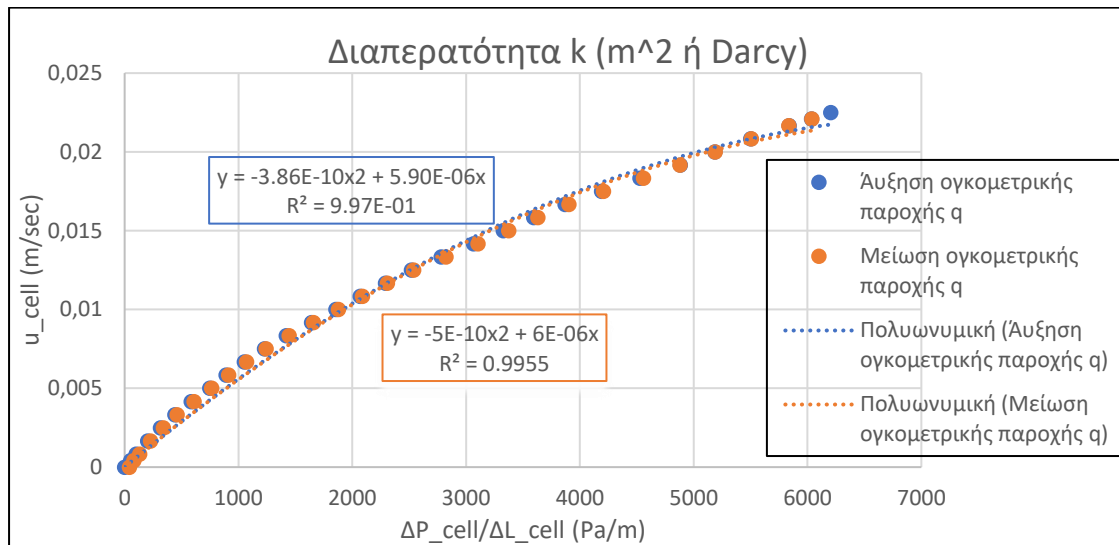
393,36	$7,50 \cdot 10^{-3}$	5,32	993,23	$1,42 \cdot 10^{-2}$	10,04
454,84	$8,33 \cdot 10^{-3}$	5,91	903,75	$1,33 \cdot 10^{-2}$	9,45
525,33	$9,17 \cdot 10^{-3}$	6,50	812,26	$1,25 \cdot 10^{-2}$	8,86
593,81	$1,00 \cdot 10^{-2}$	7,09	738,78	$1,17 \cdot 10^{-2}$	8,27
662,29	$1,08 \cdot 10^{-2}$	7,68	668,29	$1,08 \cdot 10^{-2}$	7,68
733,78	$1,17 \cdot 10^{-2}$	8,27	600,81	$1,00 \cdot 10^{-2}$	7,09
806,26	$1,25 \cdot 10^{-2}$	8,86	531,33	$9,17 \cdot 10^{-3}$	6,50
889,75	$1,33 \cdot 10^{-2}$	9,45	462,84	$8,33 \cdot 10^{-3}$	5,91
981,23	$1,42 \cdot 10^{-2}$	10,04	397,36	$7,50 \cdot 10^{-3}$	5,32
1064,71	$1,50 \cdot 10^{-2}$	10,63	342,87	$6,67 \cdot 10^{-3}$	4,73
1150,20	$1,58 \cdot 10^{-2}$	11,22	292,39	$5,83 \cdot 10^{-3}$	4,13
1238,68	$1,67 \cdot 10^{-2}$	11,81	244,90	$5,00 \cdot 10^{-3}$	3,54
1341,17	$1,75 \cdot 10^{-2}$	12,40	195,42	$4,17 \cdot 10^{-3}$	2,95
1448,65	$1,83 \cdot 10^{-2}$	12,99	147,94	$3,33 \cdot 10^{-3}$	2,36
1562,13	$1,92 \cdot 10^{-2}$	13,59	108,45	$2,50 \cdot 10^{-3}$	1,77
1659,62	$2,00 \cdot 10^{-2}$	14,18	72,97	$1,67 \cdot 10^{-3}$	1,18
1760,10	$2,08 \cdot 10^{-2}$	14,77	42,48	$8,33 \cdot 10^{-4}$	0,59
1868,59	$2,17 \cdot 10^{-2}$	15,36	25,74	$4,17 \cdot 10^{-4}$	0,30
1931,33	$2,21 \cdot 10^{-2}$	15,65	13,00	$0,00 \cdot 10^0$	0,00
1985,07	$2,25 \cdot 10^{-2}$	15,95			

Πίνακας 3: Επεξεργασία Μετρήσεων cell

$u_{cell}(\frac{m}{sec})$	$\frac{\Delta P_{cell}}{\Delta L_{cell}} (\frac{Pa}{m})$	$u_{cell}(\frac{m}{sec})$	$\frac{\Delta P_{cell}}{\Delta L_{cell}} (\frac{Pa}{m})$	$u_{cell}(\frac{m}{sec})$	$\frac{\Delta P_{cell}}{\Delta L_{cell}} (\frac{Pa}{m})$	$u_{cell}(\frac{m}{sec})$	$\frac{\Delta P_{cell}}{\Delta L_{cell}} (\frac{Pa}{m})$
$0,00 \cdot 10^0$	0,00	$1,17 \cdot 10^{-2}$	2293,06	$2,21 \cdot 10^{-2}$	6038,53	$1,00 \cdot 10^{-2}$	1877,53
$4,17 \cdot 10^{-4}$	52,32	$1,25 \cdot 10^{-2}$	2519,57	$2,17 \cdot 10^{-2}$	5836,21	$9,17 \cdot 10^{-3}$	1660,39
$8,33 \cdot 10^{-4}$	101,51	$1,33 \cdot 10^{-2}$	2780,46	$2,08 \cdot 10^{-2}$	5506,57	$8,33 \cdot 10^{-3}$	1446,38
$1,67 \cdot 10^{-3}$	203,03	$1,42 \cdot 10^{-2}$	3066,34	$2,00 \cdot 10^{-2}$	5189,43	$7,50 \cdot 10^{-3}$	1241,74
$2,50 \cdot 10^{-3}$	313,91	$1,50 \cdot 10^{-2}$	3327,23	$1,92 \cdot 10^{-2}$	4878,55	$6,67 \cdot 10^{-3}$	1071,48
$3,33 \cdot 10^{-3}$	440,43	$1,58 \cdot 10^{-2}$	3594,37	$1,83 \cdot 10^{-2}$	4558,28	$5,83 \cdot 10^{-3}$	913,72
$4,17 \cdot 10^{-3}$	585,69	$1,67 \cdot 10^{-2}$	3870,88	$1,75 \cdot 10^{-2}$	4206,77	$5,00 \cdot 10^{-3}$	765,33
$5,00 \cdot 10^{-3}$	746,58	$1,75 \cdot 10^{-2}$	4191,15	$1,67 \cdot 10^{-2}$	3902,13	$4,17 \cdot 10^{-3}$	610,69
$5,83 \cdot 10^{-3}$	891,84	$1,83 \cdot 10^{-2}$	4527,03	$1,58 \cdot 10^{-2}$	3631,87	$3,33 \cdot 10^{-3}$	462,30
$6,67 \cdot 10^{-3}$	1052,73	$1,92 \cdot 10^{-2}$	4881,67	$1,50 \cdot 10^{-2}$	3374,11	$2,50 \cdot 10^{-3}$	338,91
$7,50 \cdot 10^{-3}$	1229,24	$2,00 \cdot 10^{-2}$	5186,31	$1,42 \cdot 10^{-2}$	3103,84	$1,67 \cdot 10^{-3}$	228,03
$8,33 \cdot 10^{-3}$	1421,38	$2,08 \cdot 10^{-2}$	5500,32	$1,33 \cdot 10^{-2}$	2824,21	$8,33 \cdot 10^{-4}$	132,76
$9,17 \cdot 10^{-3}$	1641,64	$2,17 \cdot 10^{-2}$	5839,33	$1,25 \cdot 10^{-2}$	2538,32	$4,17 \cdot 10^{-4}$	80,44
$1,00 \cdot 10^{-2}$	1855,65	$2,21 \cdot 10^{-2}$	6035,40	$1,17 \cdot 10^{-2}$	2308,68	$0,00 \cdot 10^0$	40,63
$1,08 \cdot 10^{-2}$	2069,67	$2,25 \cdot 10^{-2}$	6203,35	$1,08 \cdot 10^{-2}$	2088,42	$2,21 \cdot 10^{-2}$	6038,53

Πίνακας 4: Επεξεργασία Μετρήσεων cell

Ο υπολογισμός της διαπερατότητας της πορώδους δομής-κελίου, γίνεται μέσω του νόμου του Darcy (1.9). Συγκεκριμένα έχουμε: $q = -\frac{k}{\mu} A \frac{\Delta P}{\Delta L} \Rightarrow u \cdot A = -\frac{k}{\mu} A \frac{\Delta P}{\Delta L} \Rightarrow u = -\frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta L}$. Με βάση τον πίνακα 4, φτιάχνουμε το εξής διάγραμμα:



Διάγραμμα 1: Διαπερατότητα πορώδους δομής

Με βάση την θέση των σημείων πάνω στο διάγραμμα $u_{cell} - \frac{\Delta P_{cell}}{\Delta L_{cell}}$, έχουμε δύο πολυωνυμικές εξισώσεις, οι οποίες είναι: 1) $y = -3.86 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 + 5.90 \cdot 10^{-6} \cdot x$ και 2) $y = -5 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot x$. Από την κλίση της πολυωνυμικής υπολογίζουμε τον λόγο $\frac{k}{\mu}$. Συγκεκριμένα έχουμε $\frac{k_1}{\mu_{C7}} = 5.9 \cdot 10^{-6} \Rightarrow k_1 = 5.9 \cdot 10^{-6} \frac{\frac{m}{Pa \cdot sec}}{\frac{m}{Pa}} \cdot 0.386 \cdot 10^{-3} Pa \cdot sec \Rightarrow k_1 = 2.2774 \cdot 10^{-9} m^2$. Αντίστοιχα $k_2 = 2.316 \cdot 10^{-9} m^2$. Οπότε ο μέσος όρος είναι: $k = \frac{k_1 + k_2}{2} \Rightarrow k = 2.2967 \cdot 10^{-9} m^2$ ή Darcy. Η θεωρητική τιμή της διαπερατότητας k , αντιστοιχεί στην αναλυτική λύση ανάμεσα σε δύο πλάκες απείρου μήκους και χωρίς εμπόδια: $k = \frac{b^2}{12} \Rightarrow k = \frac{(400 \cdot 10^{-6})^2 m^2}{12} \Rightarrow k = 1.33 \cdot 10^{-8} m^2$ ή Darcy και το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο από την πειραματική τιμή. Συγκρίνοντας αυτές τις δύο τιμές, έχουμε τον λόγο της πειραματικής προς τη θεωρητική τιμή: $\frac{2.2967 \cdot 10^{-9} m^2}{1.33 \cdot 10^{-8} m^2} = 1.72 \cdot 10^{-1}$.

Τέλος, χρειάζεται να αναφερθεί ότι πριν τη λήψη των μετρήσεων από το μανόμετρο, θέταμε την αντλία στο max, προκειμένου να απομακρυνθούν όσο το δυνατόν περισσότερες φυσαλίδες γίνεται, καθώς προσθέτουν τριχοειδείς δυνάμεις. Οι μετρήσεις στο μανόμετρο γίνονται όταν δεν βγαίνουν περιοδικά φυσαλίδες από τις βάνες. Πριν την έναρξη του πειράματος αφήνονταν για 5min στα 40 ml/min.

4.4 Θεωρητικός χρόνος πλήρωσης πορώδους κελιού

Υπολογίζουμε τον θεωρητικό χρόνο πλήρωσης του πορώδους κελιού, προκειμένου να αδιαστατικοποιήσουμε τον χρόνο για μελλοντικούς υπολογισμούς. Έχει νόημα η αδιαστατικοποίηση του χρόνου από τη στιγμή που θα μπει η 1η σταγόνα μέχρι το σημείο όπου κάνει break through, καθώς πριν και μετά από αυτά τα σημεία, ο κορεσμός S και η διαπερατότητα k_r σταθεροποιούνται. Πρακτικά τα διαγράμματα σκιαγραφούνται μέχρι το break through. Μας ενδιαφέρουν αυτοί οι χρόνοι, γιατί σε αυτούς τους χρόνους έχουμε μεταβολή k_r και S . Το τι συμβαίνει έξω από το cell δεν μας αφορά.

Οι θεωρητικοί χρόνοι πλήρωσης του κελιού έχουν μεγάλη διαφορά με τους πειραματικούς. Πιο συγκεκριμένα ο θεωρητικός χρόνος για τα 40 rpm, είναι:

$$q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta V_f}{q} = \frac{\Phi L_x L_y L_z}{q} = \frac{0,85 * (32 * 10^{-2} \text{ m}) * (10 * 10^{-2} \text{ m}) * (400 \mu\text{m})}{4 * (10^{-6} / 60) \text{ m}^3 / \text{sec}} = 163,2 \text{ sec.}$$

Θεωρητικός χρόνος πλήρωσης του πορώδους κελιού:		
30rpm	Δt (sec) =	217,6
40rpm	Δt (sec) =	163,2
45rpm	Δt (sec) =	145,06
60rpm	Δt (sec) =	108,8
80rpm	Δt (sec) =	81,6
90rpm	Δt (sec) =	72,53
180rpm	Δt (sec) =	36,3

Πίνακας 5: Θεωρητικές τιμές για κορεσμό 100%

4.5 Σχετική διαπερατότητα κατά τον Εμποτισμό

Το **2ο πείραμα** πραγματοποιείται για τον καθορισμό της σχετικής διαπερατότητας στη διαδικασία του εμποτισμού. Το πείραμα εμποτισμού διεξάγεται με το κελί να είναι στην αρχή άδειο και εμείς να εισάγουμε έπειτα επτάνιο C_7 με ρυθμό 18 ml/min. Συγκεκριμένα καταγράφουμε το μέτωπο εκτόπισης, άρα και τη μεταβολή της πίεσης συναρτήσει του χρόνου. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στη δειγματοληψία των μετρήσεων $\Delta P(t)$, καταγράφουμε σε video τις τιμές από το μανόμετρο. Όταν σταθεροποιηθεί η $\Delta P(t)$ στο μανόμετρο, τότε ο κορεσμός στο κελί έχει φτάσει στη μέγιστη τιμή ($S_{C7} \neq 1$). Προκειμένου να σχεδιάσουμε τη καμπύλη σχετικής διαπερατότητας θέλουμε δύο μεγέθη. Πρώτον τη σχετική διαπερατότητα k_r και δεύτερον τον αδιάστατο χρόνο Λt που ουσιαστικά είναι η κανονικοποίηση του χρόνου. Ο αδιάστατος χρόνος αντιπροσωπεύει τον κορεσμό S . Για το k_r ισχύει το εξής: $k_r = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$, όπου $\Delta P_{cell}(S=1)$ είναι η τιμή της πτώσης πίεσης του ρευστού σε πλήρη κορεσμό για μια συγκεκριμένη ογκομετρική παροχή. Για τον αδιάστατο χρόνο Λt ισχύει η εξίσωση $\Lambda t = \frac{t(\text{Saturation})}{t(S=1)} = \frac{t(S)}{t(S=1)}$, όπου $t(S=1)$ είναι

ο θεωρητικός χρόνος πλήρωσης του κελιού. Το πείραμα με ογκομετρική παροχή $q=18 \text{ ml/min}$ το επαναλαμβάνουμε τέσσερις φορές, προκειμένου να περιορίσουμε τα πειραματικά σφάλματα. Παράδειγμα: για $t=5 \text{ sec}$, το μανόμετρο δείχνει $\Delta P_{\text{tot}}=139 \text{ Pa}$. Εμάς μας ενδιαφέρει το $\Delta P_{\text{cell}}(t)$, το οποίο υπολογίζεται αφαιρώντας από την συνολική ΔP_{tot} , την πτώση πίεσης μόνο στο σωληνάκι εισαγωγής $\Delta P_{\text{tub Poiseuille}}$.

$$\Delta P_{\text{tub Poiseuille}} = \frac{8\mu * q * L_1}{\pi * R^4} \Rightarrow$$

$$\Delta P_{\text{tub Poiseuille}} = \frac{8 * 0.386 * 10^{-3} (\text{Pa} * \text{sec}) * 3 * 10^{-7} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{sec}}\right) * 4,8 * 10^{-2} \text{ m}}{\pi * 0.0015875^4 \text{ m}^4} = 2,22861 \Rightarrow \Delta P_{\text{tub Poiseuille}} = 2,23 \text{ Pa}$$

Οπότε έχουμε $\Delta P_{\text{cell}} = \Delta P_{\text{tot}} - \Delta P_{\text{tub Poiseuille}} \Rightarrow \Delta P_{\text{cell}} = (139 - 2,23) \text{ Pa} = 136,77 \text{ Pa}$ και $\Delta P_{\text{cell}}(S=1) = 395,77 \text{ Pa}$. Για την σχετική διαπερατότητα ισχύει το εξής: $k_r = \frac{136,77 \text{ Pa}}{395,77 \text{ Pa}} = 0,346$ (αδιάστατο). Για τον αδιάστατο χρόνο ($\wedge t$), που τον χρησιμοποιούμε για τον κορεσμό (S), πρώτα θα αφαιρέσουμε 3 sec και μετά θα διαιρέσουμε με το $t(S=1)$. Ο λόγος που αφαιρούμε 3 sec είναι γιατί τόσοι είναι ο χρόνος στο σωληνάκι της εισόδου και με αυτό τον τρόπο μετατοπίζουμε την καμπύλη $k_r - S$ (ή $\wedge t$) προς τα αριστερά (αρχή των αξόνων). Οπότε έχουμε $\wedge t = \frac{5-3 \text{ sec}}{36,3 \text{ sec}} = 0,055$ (αδιάστατο). Στον παρονομαστή έχουμε το $t(S=1)=36,3 \text{ sec}$, που αντιστοιχεί στον θεωρητικό χρόνο πλήρωσης ολόκληρου του κελιού για ογκομετρική παροχή 180 rpm. Την ίδια διαδικασία την επαναλαμβάνουμε μέχρι το break through ($t=27 \text{ sec}$). Οι χρόνοι εισαγωγής της 1ης σταγόνας επτανίου και break through στο κελί, επισημαίνονται με πράσινο και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα.

t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\wedge t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{\text{cell}}(t)}{\Delta P_{\text{cell}}(S=1)}$	t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\wedge t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{\text{cell}}(t)}{\Delta P_{\text{cell}}(S=1)}$
0	0	-	0,000	22	211,77	0,523	0,535
1	23,77	-	0,060	23	213,77	0,551	0,540
2	46,77	-	0,118	24	215,77	0,579	0,545
2,5	68,77	-	0,174	25	217,77	0,606	0,550
3	92,77	0,000	0,234	26	232,77	0,634	0,588
3,5	117,77	0,014	0,298	27	234,77	0,661	0,593
4	134,77	0,028	0,341	28	262,77	0,689	0,664
5	136,77	0,055	0,346	28,5	296,77	0,702	0,750
6	138,77	0,083	0,351	29	330,77	-	-
7	139,77	0,110	0,353	30	365,77	-	-
8	142,77	0,138	0,361	31	367,77	-	-
9	145,77	0,165	0,368	32	351,77	-	-
10	161,77	0,193	0,409	33	348,77	-	-
11	162,77	0,220	0,411	34	345,77	-	-
12	163,77	0,248	0,414	35	345,77	-	-
13	166,77	0,275	0,421	36	344,77	-	-
14	185,77	0,303	0,469	37	377,77	-	-
15	185,77	0,331	0,469	38	394,77	-	-
16	187,77	0,358	0,474	39	395,77	-	-
17	188,77	0,386	0,477	40	394,77	-	-
18	190,77	0,413	0,482	41	392,77	-	-

19	191,77	0,441	0,485	42	391,77	-	-
20	194,77	0,468	0,492	43	389,77	-	-
21	210,77	0,496	0,533	44	388,77	-	-

Πίνακας 6: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (1^ο πείραμα)

t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda_t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$	t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda_t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$
0	0	-	0,000	28,5	243,77	0,702	0,616
1	0	-	0,000	29	291,77	0,716	0,737
2	20,77	-	0,052	29,5	340,77	-	-
3	48,77	0,000	0,123	30	357,77	-	-
3,5	68,77	0,014	0,174	31	336,77	-	-
4	84,77	0,028	0,214	32	319,77	-	-
5	86,77	0,055	0,219	33	317,77	-	-
6	83,77	0,083	0,212	34	316,77	-	-
7	82,77	0,110	0,209	35	316,77	-	-
8	83,77	0,138	0,212	36	334,77	-	-
9	85,77	0,165	0,217	37	352,77	-	-
10	87,77	0,193	0,222	38	354,77	-	-
11	88,77	0,220	0,224	39	331,77	-	-
12	90,77	0,248	0,229	40	329,77	-	-
13	108,77	0,275	0,275	41	329,77	-	-
14	110,77	0,303	0,280	42	328,77	-	-
15	111,77	0,331	0,282	43	328,77	-	-
16	113,77	0,358	0,287	44	326,77	-	-
17	115,77	0,386	0,293	45	324,77	-	-
18	117,77	0,413	0,298	46	322,77	-	-
19	120,77	0,441	0,305	47	320,77	-	-
20	136,77	0,468	0,346	48	319,77	-	-
21	137,77	0,496	0,348	49	319,77	-	-
22	140,77	0,523	0,356	50	321,77	-	-
23	142,77	0,551	0,361	51	320,77	-	-
24	144,77	0,579	0,366	52	319,77	-	-
25	146,77	0,606	0,371	53	318,77	-	-
26	148,77	0,634	0,376	54	318,77	-	-
27	165,77	0,661	0,419	55	318,77	-	-
28	198,77	0,689	0,502				

Πίνακας 7: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (2^ο πείραμα)

t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda_t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$	t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda_t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$
0	0	-	0,000	22	174,77	0,523	0,442
1	17,77	-	0,045	23	190,77	0,551	0,482
2	37,77	-	0,095	24	192,77	0,579	0,487
3	70,77	0,000	0,179	25	194,77	0,606	0,492
3,5	90,77	0,014	0,229	26	196,77	0,634	0,497

4	112,77	0,028	0,285	27	205,77	0,661	0,520
5	114,77	0,055	0,290	27,5	212,77	0,675	0,538
6	116,77	0,083	0,295	28	214,77	0,689	0,543
6,5	131,77	0,096	0,333	28,5	234,77	0,702	0,593
7	132,77	0,110	0,335	29	266,77	-	-
8	133,77	0,138	0,338	29,5	306,77	-	-
9	134,77	0,165	0,341	30	345,77	-	-
10	136,77	0,193	0,346	30,5	367,77	-	-
11	138,77	0,220	0,351	31	367,77	-	-
12	140,77	0,248	0,356	32	344,77	-	-
13	142,77	0,275	0,361	33	321,77	-	-
14	158,77	0,303	0,401	34	319,77	-	-
15	160,77	0,331	0,406	35	317,77	-	-
16	162,77	0,358	0,411	36	319,77	-	-
17	164,77	0,386	0,416	37	335,77	-	-
18	166,77	0,413	0,421	38	360,77	-	-
19	168,77	0,441	0,426	39	362,77	-	-
20	171,77	0,468	0,434	40	347,77	-	-
21	172,77	0,496	0,437	41	326,77	-	-

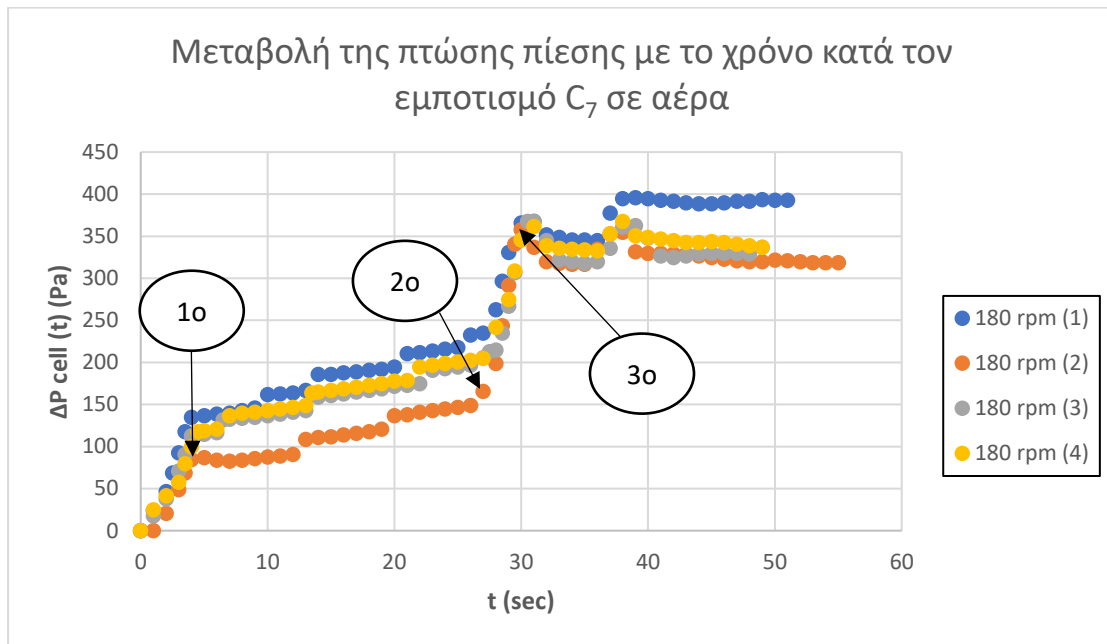
Πίνακας 8: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (3^ο πείραμα)

t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$	t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$
0	0	-	0,000	23	196,77	0,551	0,494
1	24,77	-	0,057	24	198,77	0,579	0,499
2	41,77	-	0,100	25	200,77	0,606	0,504
3	57,77	0,000	0,141	26	202,77	0,634	0,509
3,5	79,77	0,014	0,197	27	204,77	0,661	0,514
4	99,77	0,028	0,248	28	241,77	0,689	0,609
4,5	117,77	0,041	0,293	29	274,77	0,716	0,692
5	118,77	0,055	0,296	29,5	308,77	0,730	0,779
6	120,77	0,083	0,301	30	345,77	0,744	0,873
7	136,77	0,110	0,342	31	361,77	0,771	0,914
8	139,77	0,138	0,349	32	338,77	-	-
9	140,77	0,165	0,352	33	335,77	-	-
10	142,77	0,193	0,357	34	334,77	-	-
11	144,77	0,220	0,362	35	333,77	-	-
12	146,77	0,248	0,367	36	332,77	-	-
13	148,77	0,275	0,372	37	352,77	-	-
13,5	163,77	0,289	0,410	38	367,77	-	-
14	164,77	0,303	0,413	39	350,77	-	-
15	166,77	0,331	0,418	40	348,77	-	-
16	168,77	0,358	0,423	41	346,77	-	-
17	170,77	0,386	0,428	42	344,77	-	-
18	172,77	0,413	0,433	43	342,77	-	-
19	174,77	0,441	0,438	44	342,77	-	-
20	177,77	0,468	0,446	45	343,77	-	-

21	178,77	0,496	0,448	46	342,77	-	-
22	194,77	0,523	0,489	47	340,77	-	-

Πίνακας 9: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (4^ο πείραμα)

Με βάση τους πίνακες 6, 7, 8 και 9 κατασκευάζουμε τα Διαγράμματα 2 και 3.



Οι παρακάτω εικόνες αναφέρονται στο πείραμα: 180 rpm (2). Για τις εικόνες αυτές, έχουμε το ΔP_{tot} και όχι το ΔP_{cell} , όπως είναι στο Διάγραμμα 2. Η αντιστοίχιση όμως ως προς τους χρόνους ισχύει.



Εικόνα 18: 1^ο σημείο pick (4 sec, 87 Pa)



Εικόνα 19: 2^ο σημείο (27 sec, 168 Pa)

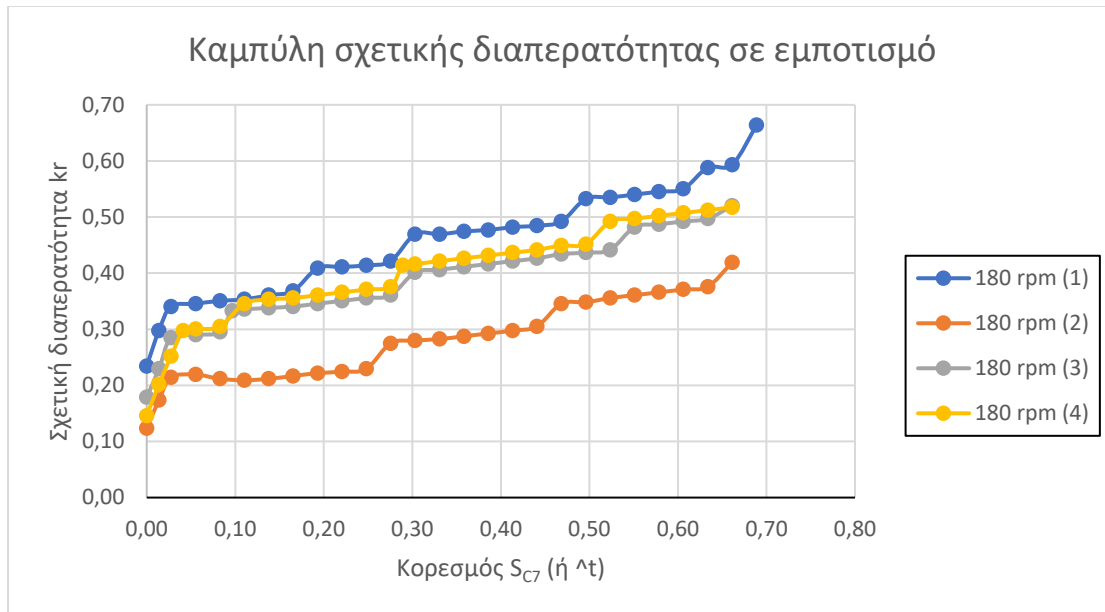
Με το που κάνει break through. Δεν έχει προλάβει να φτάσει το ρευστό στο σωληνάκι του μανομέτρου στην έξοδο.



Εικόνα 20: 3^ο σημείο (30 sec , 360 Pa)

Φτάνει το ρευστό στο σωληνάκι του μανομέτρου στην έξοδο. Από το 2^ο στο 3^ο σημείο η πτώση πίεσης αυξάνεται απότομα λόγω της μειωμένης ικανότητας εξόδου του ρευστού από το κελί. Η πτώση πίεσης είναι η εσωτερική ενέργεια ενός ρευστού. Μετά από το 3^ο σημείο η πτώση πίεσης πέφτει πολύ λίγο και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Αυτή η μεγάλη αύξηση γίνεται λόγω της επίδρασης των ιξωδών δυνάμεων. Ακόμη υπάρχει και μια μικρή επίδραση στη πτώση πίεσης από τα λαστιχάκια, τα οποία διογκώθηκαν και συρρικνώθηκαν ξανά.

Το διάγραμμα της καμπύλης σχετικής διαπερατότητας – κορεσμού: $k_r - S(^{\wedge}t)$:



Διάγραμμα 3: Καμπύλη σχετικής διαπερατότητας - κορεσμού ($k_r - S$ ή $^{\wedge}t$) σε εμποτισμό

Από το διάγραμμα $k_r - S$ δεν μπορούμε να εξάγουμε κάποιο συμπέρασμα, ούτε να κάνουμε κάποια σύγκριση, γιατί έχουμε μόνο μία ογκομετρική παροχή και μόνο για εμποτισμό.

Από το video παρατηρούμαι ότι το μέτωπο εκτόπισης χρειάζεται να είναι όσο το δυνατόν 'πιο επίπεδο', προκειμένου να απομακρύνει όσο το δυνατόν περισσότερο τη μη διαβρέχουσα φάση (αέρα), καθώς οι φυσαλίδες αέρα που παγιδεύονται προσθέτουν τριχοειδή πίεση.

Θα υπολογίσουμε τη σχετική διαπερατότητα $k_{r,C7}$ για διάφορες ογκομετρικές παροχές και συγκεκριμένα για 4 ml/min, 6 ml/min και 8 ml/min, προκειμένου να συγκρίνουμε αν και πως μεταβάλλεται η $k_{r,C7}$ με βάση αυτό το κριτήριο. Η δειγματοληψία των μετρήσεων γίνεται ανά 5 sec. Θα πραγματοποιήσουμε τέσσερα πειράματα στα 4 ml/min, δύο πειράματα στα 6 ml/min και ένα πείραμα στα 8 ml/min. Για αυτά τα πειράματα η διάταξη του κελιού ήταν λίγο διαφορετική σε σχέση με τα 18 ml/min και πιο συγκεκριμένα η έξοδος ήταν ελαφρώς υπερυψωμένη, προσθέτοντας εσφαλμένα υδροστατική πίεση.

Για τις ανάγκες συγγραφής της εργασίας θα θεωρήσουμε λανθασμένα ότι όσον αφορά τα 4 ml/min, το $\Delta P_{tot}(S=1) = 80$ Pa. Το ΔP_{tub} Poiseuille μόνο για την είσοδο είναι

$$\Delta P_{tub_Poiseuille} = \frac{8\mu * q * L_1}{\pi * R^4} \Rightarrow \Delta P_{tub_Poiseuille} = \frac{8 * 0.386 * 10^{-3} (Pa * sec) * 6,67 * 10^{-8} \left(\frac{m^3}{sec}\right) * 4,8 * 10^{-2} m}{\pi * 0.0015875^4 m^4} =$$

$$0,495495 \Rightarrow \Delta P_{tub_Poiseuille} = 0,5 \text{ Pa. Οπότε το } \Delta P_{cell}(S=1) = (80 - 0,5) = 79,50 \text{ Pa. Ο}$$

αδιάστατος χρόνος στο $t = 15 \text{ sec}$ είναι: $^{\wedge}t = \frac{15 \text{ sec}}{163,2 \text{ sec}} = 0,031$.

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$^{\wedge}t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$	ΔP_{cell} (Pa)	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$
0	0	0,000	0,000	0	0,000
5	26,50	0,031	0,333	26,50	0,333
10	8,50	0,061	0,107	34,50	0,434
15	29,50	0,092	0,371	44,50	0,560

20	34,50	0,123	0,434	53,50	0,673
25	37,50	0,153	0,472	56,50	0,711
30	45,50	0,184	0,572	59,50	0,748
35	53,50	0,214	0,673	54,50	0,686
40	63,50	0,245	0,799	59,50	0,748
45	60,50	0,276	0,761	59,50	0,748
50	56,50	0,306	0,711	54,50	0,686
55	54,50	0,337	0,686	60,50	0,761
60	60,50	0,368	0,761	66,50	0,837
65	64,50	0,398	0,811	69,50	0,874
70	63,50	0,429	0,799	71,50	0,899
75	64,50	0,460	0,811	72,50	0,912
80	72,50	0,490	0,912	75,50	0,950
85	70,50	0,521	0,887	76,50	0,962
90	74,50	0,551	0,937	75,50	0,950
95	75,50	0,582	0,950	84,50	1,063
100	80,50	0,613	1,013	85,50	1,076
105	84,50	0,643	1,063	89,50	1,126
110	84,50	0,674	1,063	89,50	1,126
115	91,50	0,705	1,151	93,50	1,176
120	90,50	0,735		96,50	1,214
125	125,50	0,766		89,50	

Πίνακας 10: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (1° και 2° πείραμα 4 ml/min)

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda_t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$	ΔP_{cell} (Pa)	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$
0	0	0,000	0,000	0	0,000
5	26,50	0,031	0,333	5,50	0,069
10	32,50	0,061	0,409	20,50	0,258
15	37,50	0,092	0,472	25,50	0,321
20	37,50	0,123	0,472	30,50	0,384
25	39,50	0,153	0,497	27,50	0,346
30	36,50	0,184	0,459	34,50	0,434
35	32,50	0,214	0,409	31,50	0,396
40	33,50	0,245	0,421	29,50	0,371
45	33,50	0,276	0,421	29,50	0,371
50	33,50	0,306	0,421	33,50	0,421
55	36,50	0,337	0,459	34,50	0,434
60	43,50	0,368	0,547	42,50	0,535
65	47,50	0,398	0,598	42,50	0,535
70	48,50	0,429	0,610	43,50	0,547
75	47,50	0,460	0,598	46,50	0,585
80	49,50	0,490	0,623	47,50	0,598
85	47,50	0,521	0,598	45,50	0,572
90	50,50	0,551	0,635	49,50	0,623
95	49,50	0,582	0,623	50,50	0,635
100	51,50	0,613	0,648	41,50	0,522
105	53,50	0,643	0,673	40,50	0,509

110	54,50	0,674	0,686	42,50	0,535
115	55,50	0,705	0,698	42,50	0,535
120	59,50	0,735	0,748	46,50	0,585
125	57,50	0,766	0,723	49,50	0,623
130	57,50	0,797	0,723	45,50	0,572
135	144,50	0,827		42,50	0,535
140		0,858		105,50	
145		0,888		127,50	

Πίνακας 11: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (3^ο και 4^ο πείραμα 4 ml/min)

Τώρα θα πραγματοποιήσουμε δύο πειράματα στα 6 ml/min. Για τις ανάγκες συγγραφής της εργασίας θα θεωρήσουμε λανθασμένα ότι όσον αφορά τα 6 ml/min, το $\Delta P_{tot}(S=1) = 130$ Pa. Το $\Delta P_{tub\ Poiseuille} = 0,742872$ Pa ή αλλιώς $\Delta P_{cell}(S=1) = (130 - 0,742872) = 129,2571$ Pa. Ο αδιάστατος χρόνος στο $t = 15$ sec είναι: $\Lambda_t = \frac{15\ sec}{108,8\ sec} = 0,138$.

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda_t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$	ΔP_{cell} (Pa)	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$
0	0	0,000	0,000	0	0,000
5	11,26	0,046	0,087	15,26	0,118
10	36,26	0,092	0,281	29,26	0,226
15	32,26	0,138	0,250	35,26	0,273
20	33,26	0,184	0,257	41,26	0,319
25	37,26	0,230	0,288	34,26	0,265
30	38,26	0,276	0,296	40,26	0,311
35	46,26	0,322	0,358	49,26	0,381
40	52,26	0,368	0,404	56,26	0,435
45	61,26	0,414	0,474	57,26	0,443
50	61,26	0,460	0,474	61,26	0,474
55	66,26	0,506	0,513	65,26	0,505
60	72,26	0,551	0,559	70,26	0,544
65	77,26	0,597	0,598	74,26	0,574
70	77,26	0,643	0,598	80,26	0,621
75	81,26	0,689	0,629	86,26	0,667
80	89,26	0,735	0,691	91,26	0,706
85	89,26	0,781	0,691	96,26	0,745
90	127,26	0,827	0,985	224,26	1,735

Πίνακας 12: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας (δύο πειράματα των 6 ml/min)

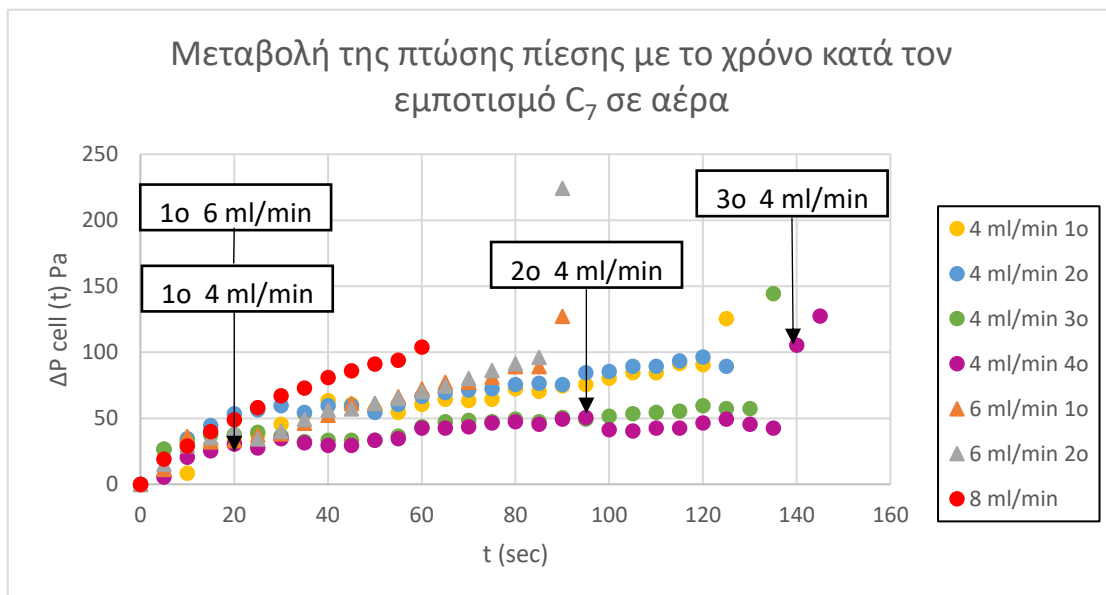
Τώρα θα πραγματοποιήσουμε ένα πειράματα στα 8 ml/min. Για τις ανάγκες συγγραφής της εργασίας θα θεωρήσουμε λανθασμένα ότι όσον αφορά τα 8 ml/min, το $\Delta P_{tot}(S=1) = 200$ Pa. Το $\Delta P_{tub\ Poiseuille} = 0,988019$ Pa ή αλλιώς $\Delta P_{cell}(S=1) = (200 - 0,988019) = 199,012$ Pa. Ο αδιάστατος χρόνος στο $t = 15$ sec είναι: $\Lambda_t = \frac{15\ sec}{108,8\ sec} = 0,138$.

t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda_t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$	t(sec)	ΔP_{cell} (Pa)	$\Lambda_t = \frac{t(S)}{t(S=1)}$	$k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S=1)}$
0	0	0,000	0,000	35	73,01	0,429	0,367
5	19,01	0,061	0,096	40	81,01	0,490	0,407

10	29,01	0,123	0,146	45	86,01	0,551	0,432
15	40,01	0,184	0,201	50	91,01	0,613	0,457
20	49,01	0,245	0,246	55	94,01	0,674	0,472
25	58,01	0,306	0,291	60	104,01	0,735	0,523
30	67,01	0,368	0,337				

Πίνακας 13: Δεδομένα καμπύλης σχετικής διαπερατότητας για τα 8 ml/min

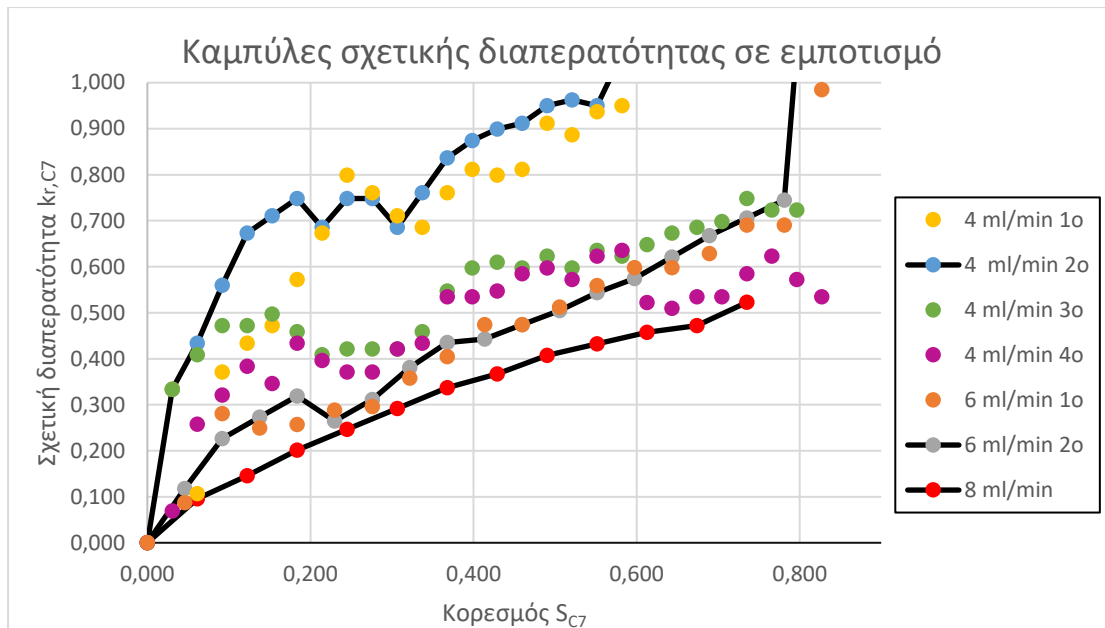
Από τους πίνακες 10,11,12 και 13 έχουμε το εξής διάγραμμα:



Διάγραμμα 4: Μεταβολή της πτώσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου κατά τον εμποτισμό C₇

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι για ογκομετρική παροχή 4 ml/min, το κελί γεμίζει περίπου στα 140 sec (4^ο πείραμα). Για 6 ml/min στα 90 sec και για 8 ml/min στα 60 sec.

Πιο συγκεκριμένα: για τα 60rpm, ο πειραματικός χρόνος από το video της Nikon είναι 90 sec, ενώ η θεωρητική τιμή με βάση τις διαστάσεις του κελιού είναι 108,8 sec. Στο break through φτάνει σε κορεσμό $S_{max} = \frac{90 \text{ sec}}{108,8 \text{ sec}} = 0,827$ ή 82,7%, οπότε δεν λαμβάνω χρόνους πάνω από 90 sec και σίγουρα δεν θα έχουμε ποτέ $S_{C7} = 100\%$. Για τα 80 rpm, έχουμε: 60 sec ο πειραματικός χρόνος και 81,6 sec ο θεωρητικός χρόνος. Οπότε $S_{max} = \frac{60 \text{ sec}}{81,6 \text{ sec}} = 0,735$ ή 73,5%. Για τα 40 rpm, έχουμε: 134 sec ο πειραματικός χρόνος και 163,2 sec ο θεωρητικός χρόνος. Οπότε $S_{max} = \frac{134 \text{ sec}}{163,2 \text{ sec}} = 0,821$ ή 82,1%. Γενικά ως συμπέρασμα έχουμε ότι οι πειραματικές και οι θεωρητικές τιμές πλήρωσης του κελιού δεν μπορούν να συμπίπτουν, γιατί το κελί δεν γεμίζει ποτέ πλήρως.



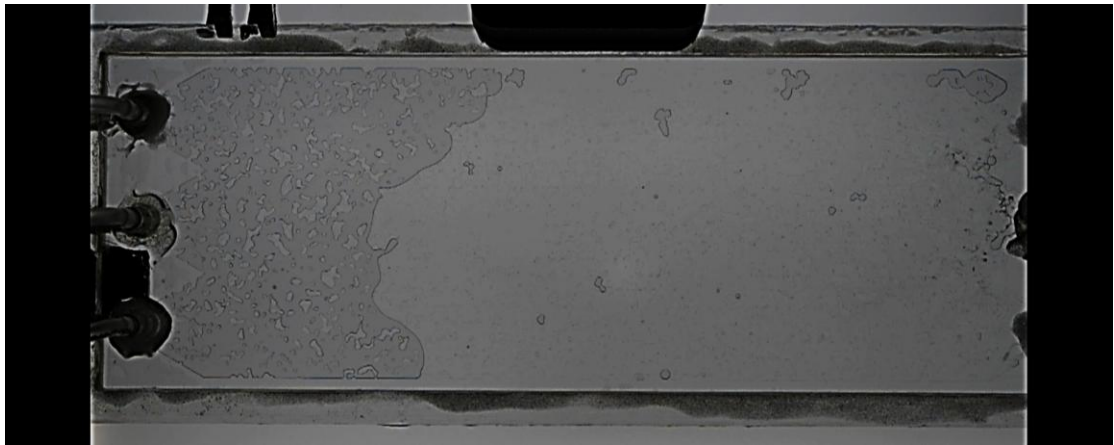
Διάγραμμα 5: Επιρροή ογκομετρικής παροχής στην σχετική διαπερατότητα

Παρατηρούμε ότι όταν αυξάνουμε την ογκομετρική παροχή q , η σχετική διαπερατότητα $k_{r,C7}$ μειώνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή τα κανάλια ροής σε μεγαλύτερες ταχύτητες είναι λιγότερα και άρα δεν είναι τόσο διαπερατό το μικρομοντέλο μας. Όσο αυξάνουμε την ταχύτητα, οι τριχοειδείς δυνάμεις μειώνονται, ενώ οι ιξώδεις δυνάμεις αυξάνονται. Οι ιξώδεις είναι πολύ πιο ισχυρές από τις τριχοειδείς και για αυτό επηρεάζεται τόσο η σχετική διαπερατότητα, αλλά και ο κορεσμός της φάσης.

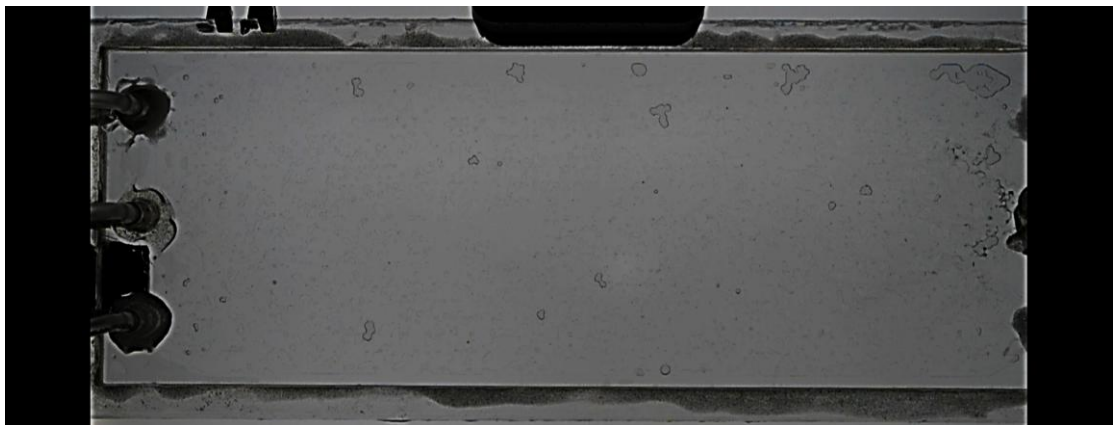
Για να οπτικοποιήσουμε το διάγραμμα 5, θα παραθέσουμε ορισμένες φωτογραφίες από τη θέση του ρευστού μέσα στο κελί, συναρτήσει του χρόνου. Συγκεκριμένα για 4 ml/min, έχουμε:



Εικόνα 21: 1^ο σημείο (20 sec , 30,50 Pa)



Εικόνα 22: 2^ο σημείο (95 sec , 50,50 Pa)



Εικόνα 23: 3^ο σημείο (140 sec , 105,50 Pa)

Για 6 ml/min, έχουμε:



Εικόνα 24: 1^ο σημείο (20 sec , 41,26 Pa)

Για 8 ml/min, έχουμε:



Εικόνα 25: 1^ο σημείο (10 sec , 29,01 Pa)

Συγκρίνοντας τις εικόνες 20,23,24 βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται η ογκομετρική παροχή, τόσο 'χαλαί' το μέτωπο εκτόπισης.

4.6 Σχετική διαπερατότητα κατά την Αποστράγγιση

Η 3^η σειρά πειραμάτων (Το 3^ο πείραμα) πραγματοποιείται για τον καθορισμό της σχετικής διαπερατότητας κατά την διαδικασία της αποστράγγισης της διαβρέχουσας φάσης C₇. Στην αρχή το κελί είναι πλήρως κορεσμένο σε επτάνιο C₇ και στην συνέχεια πραγματοποιούμε αποστράγγιση με αέρα στα 18 ml/min. Το σημείο κατά το οποίο ο αέρας φτάνει στην έξοδο του κελιού, λέγεται Break through. Μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε τον υπολειμματικό κορεσμό σε C₇, δηλαδή το S_{C7}, που το περιγράφουμε παρακάτω. Μετράμε ΔP_{tot} , αλλά μας ενδιαφέρει το ΔP_{cell} . Εδώ το ΔP_{tub} Poiseuille θα πρέπει να το ξαναυπολογίσουμε, καθώς έχουμε αέρα στην είσοδο και C₇ στην έξοδο. Για την είσοδο θεωρούμε τον αέρα που εισέρχεται ασυμπίεστο. Το ΔP_{tub} Poiseuille outlet υπολογίζεται σε αυτή την περίπτωση μόνο για την έξοδο. Οπότε θα έχουμε $\Delta P_{tub} \text{ Poiseuille} = \frac{8\mu * q * L_2}{\pi * R^4} = \frac{8 * 0,386 * 10^{-3} (Pa * sec) * 3 * 10^{-7} \left(\frac{m^3}{sec}\right) * 5,2 * 10^{-2} m}{\pi * 0,0015875^4 m^4} = 2,414332505 \Rightarrow \Delta P_{tub} \text{ Poiseuille outlet} = 2,41 \text{ Pa}$. Οπότε το $\Delta P_{cell} = \Delta P_{tot} - \Delta P_{tub} \text{ Poiseuille outlet} \Rightarrow \Delta P_{cell} = 389 - 2,41 = 386,59 \text{ Pa}$. Ο υπολογισμός του κορεσμού παρουσιάζεται παρακάτω.

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)			
0	386,59			
5	386,59			
10	386,59			
15	386,59			
20	386,59			
25	386,59			
30	386,59			

32	407,59			
33	409,59			
34	410,59			
35	412,59			
36	413,59			
37	410,59			
38	409,59			
39	407,59	S_{air}	S_{C7} (Υπολειμματικός κορεσμός σε C_7)	$k_{r,C7}$
40	407,59	0,000	1,000	1,000
41	384,59	0,028	0,972	0,944
42	367,59	0,055	0,945	0,902
43	365,59	0,083	0,917	0,897
44	350,59	0,110	0,890	0,860
46	330,59	0,165	0,835	0,811
49	310,59	0,248	0,752	0,762
51	291,59	0,303	0,697	0,715
53	254,59	0,358	0,642	0,625
54	208,59	0,386	0,614	0,512
55	187,59	0,413	0,587	0,460
60	193,59			
61	197,59			
64	201,59			
66	219,59			
68	204,59			
73	189,59			
77	210,59			
88	207,59			

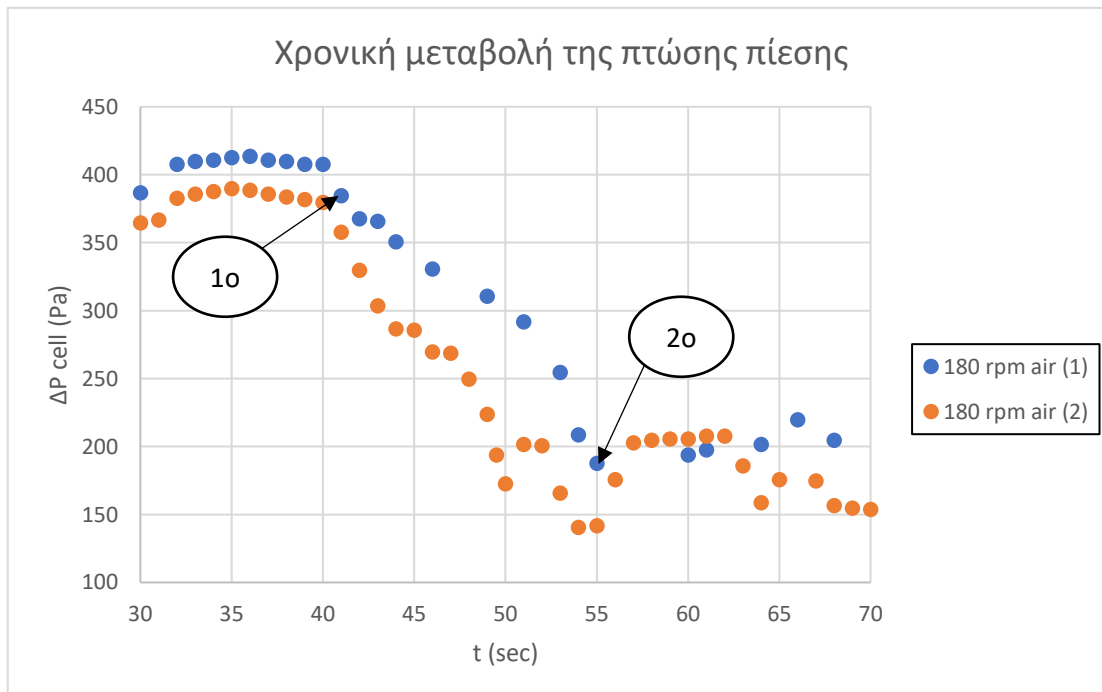
Πίνακας 14: Αποτελέσματα αποστράγγισης C_7 με αέρα και επεξεργασία τους (1^ο πείραμα)

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)			t (sec)	ΔP (Pa)
0	368,59			58	204,59
5	371,59			59	205,59
10	370,59			60	205,59
12	367,59			61	207,59
15	363,59			62	207,59
20	359,59			63	185,59
25	363,59			64	158,59
30	364,59			65	175,59
31	366,59			67	174,59
32	382,59			68	156,59
33	385,59			69	154,59
34	387,59			70	153,59
35	389,59				
36	388,59				
37	385,59				
38	383,59				

		S_{C7} (Υπολειμματικός κορεσμός σε C_7)	kr_{C7}
39	381,59		
40	379,59	1,000	1,000
41	357,59	0,972	0,942
42	329,59	0,945	0,868
43	303,59	0,917	0,800
44	286,59	0,890	0,755
45	285,59	0,862	0,752
46	269,59	0,835	0,710
47	268,59	0,807	0,708
48	249,59	0,780	0,658
49	223,59	0,752	0,589
49,5	193,59	0,738	0,510
50	172,59	0,725	0,455
51	201,59	0,697	0,531
52	200,59	0,669	0,528
53	165,59	0,642	0,436
54	140,59	0,614	0,370
55	141,59	0,587	0,373
56	175,59		
57	202,59		

Πίνακας 15: Αποτελέσματα αποστράγγισης C_7 με αέρα και επεξεργασία τους (2^ο πείραμα)

Με βάση τους πίνακες 14 και 15, έχουμε το διάγραμμα 6:



Διάγραμμα 6: Μεταβολή της πτώσης πίεσης συναρτήσει του χρόνου κατά την αποστράγγιση C_7

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι ο αέρας εισέρχεται στο κελί τη χρονική στιγμή $t = 40$ seconds και εξέρχεται από αυτό τη χρονική στιγμή $t = 55$ seconds. Μετά τα 55 sec η πτώση πίεσης σταθεροποιείται. Ο κορεσμός σε αέρα υπολογίζεται ως εξής: $S_{air} = \frac{t_{steady} - t_0}{t_{C7}} = \frac{(t_{steady} - 40) \text{ sec}}{36,3 \text{ sec}}$, με τιμές t_{steady} : 40 έως 55 sec και t_{C7} ο χρόνος που χρειάζεται το κελί με αέρα για να εμποτιστεί πλήρως με C_7 , δηλαδή από $S_{C7} = 0$ έως 100 %. Ο υπολειμματικός κορεσμός σε C_7 , δηλαδή S_{C7r} , υπολογίζεται ως εξής: $S_{C7r} = 1 - S_{air}$. Εμείς υπολογίζουμε κορεσμό σε αέρα, θέλουμε όμως να τα μετατρέψουμε όλα σε κορεσμό σε C_7 , για να μπορούμε να τα συγκρίνουμε με τα επόμενα πειράματα. Για παράδειγμα στον Πίνακα 13, ο κορεσμός σε αέρα τη χρονική στιγμή $t = 46$ sec ήταν $S_{air} = \frac{(46 - 40) \text{ sec}}{36,3 \text{ sec}} = 0,165$ ή 16,5 % και σε επτάνιο ήταν $S_{C7r} = 1 - 0,165 = 0,835$ ή 83,5 %. Η σχετική διαπερατότητα είναι: $k_{r,C7} = \frac{\Delta P_{cell}(t)}{\Delta P_{cell}(S_{C7}=1)} = \frac{330,59 \text{ Pa}}{407,59 \text{ Pa}} = 0,811$ (αδιάστατο). Την ίδια διαδικασία εφαρμόζουμε για όλες τις μετρήσεις.

Προκειμένου να γίνει αντιληπτό που αντιστοιχούν τα peak των πτώσεων πίεσης από τα διαγράμματα, θα τα αναδείξουμε μέσω κάποιων φωτογραφιών κατά τη διαδικασία του πειράματος. Συγκεκριμένα έχουμε, για το 1^ο πείραμα:

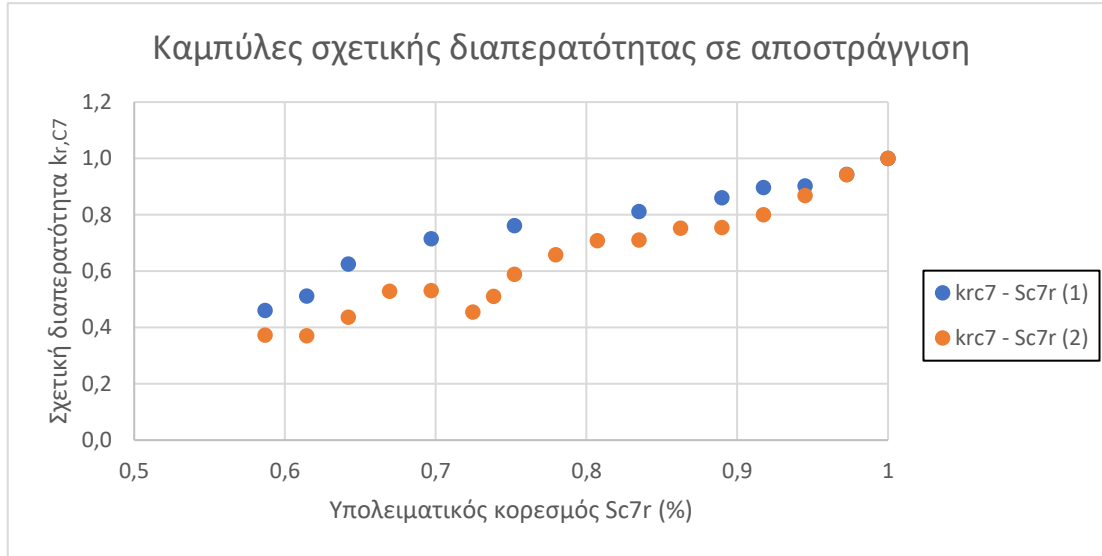


Εικόνα 26: (41 sec , 387 Pa) ή (41 sec , 384,59 Pa) Το σημείο όπου εισέρχεται ο αέρας



Εικόνα 27: (55 sec , 189 Pa) (55sec , 187,59 Pa) Το σημείο όπου γίνεται το break through

Τέλος έχουμε το διάγραμμα σχετικής διαπερατότητας – υπολειμματικού κορεσμού:

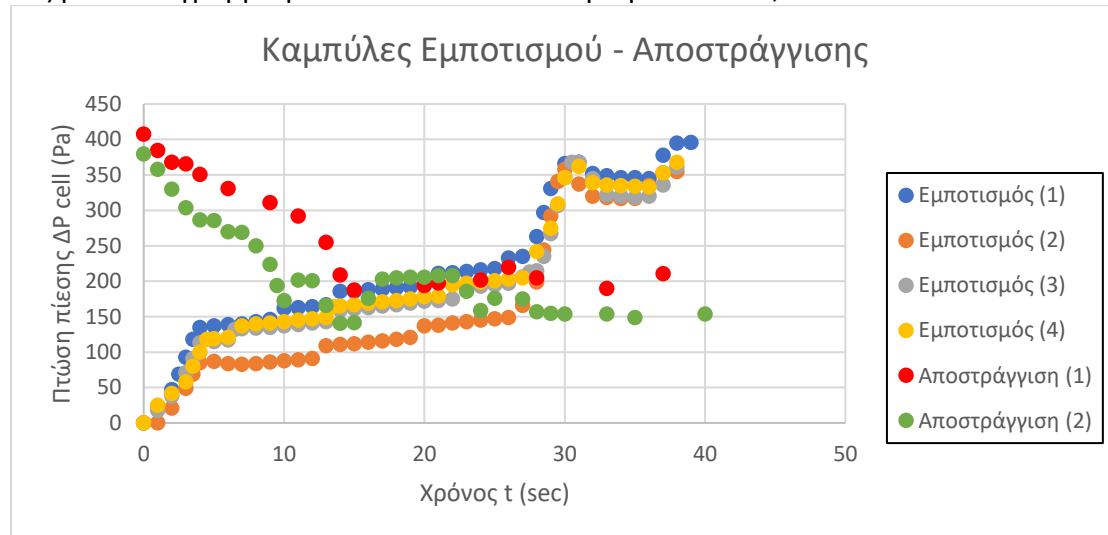


Διάγραμμα 7: Καμπύλες αποστράγγισης

Από το διάγραμμα εξάγουμε το συμπέρασμα ότι σε διφασική ροή, όσο μειώνεται ο κορεσμός της φάσης C_7 , τόσο μειώνεται και η σχετική διαπερατότητα k_{rc7} .

4.7 Συνδυασμός Εμποτισμού και Αποστράγγισης

Ταιριάζοντας τα διαγράμματα 2 και 6 των πειραμάτων για 18 ml/min, δημιουργείται το διάγραμμα 8. Ο υπολειμματικός κορεσμός σε C_7 έχει την ίδια φυσική ερμηνεία με τον αδιάστατο χρόνο και μετά από τροποποίηση στον χρόνο για την αποστράγγιση, έχουμε τα αποτελέσματα του διαγράμματος 8. Η τροποποίηση στον χρόνο έχει ως εξής: τη χρονική στιγμή $t=44$ sec, ο χρόνος για το διάγραμμα γίνεται $t'=44-40=4$ sec. Άρα για $t=40$ sec, $t'=0$ sec.



Διάγραμμα 8: Εμποτισμός και αποστράγγιση πετρελαιοδιαβρεκτού κελιού

Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα, οι καμπύλες εμποτισμού και αποστράγγισης δεν συμπίπτουν. Αυτό ερμηνεύεται από το παράρτημα 2.6 ως εξής: Στον εμποτισμό η διεπιφάνεια C_7 -air καταλαμβάνει αρχικά τους μικρότερους πόρους (οι οποίοι έχουν μεγάλη τριχοειδή πίεση)

και στη συνέχεια τους μεγαλύτερους, αντίθετα με ότι συμβαίνει στη διεργασία αποστράγγισης. Η διαφορά μεταξύ των καμπυλών (βρόχος τριχοειδούς υστέρησης) οφείλεται σε φαινόμενα διαβροχής και διεπιφανειακής τάσης.

4.8 Αποστράγγιση επτανίου με χρήση νερού

Σε αυτά τα πειράματα θα ακολουθήσουμε τα εξής βήματα. Στην αρχή το κελί είναι πλήρως κορεσμένο με επτάνιο C_7 και στη συνέχεια το εκτοπίζουμε με μια λιγότερο διαβρέχουσα φάση, δηλαδή με νερό. Ταυτόχρονα καταγράφουμε τις πτώσεις πίεσης. Η εισαγωγή του νερού έγινε με ογκομετρική παροχή στα 9 ml/min. Προκειμένου να μπορούμε να διαχωρίσουμε τις φάσεις μεταξύ τους, χρησιμοποιούμε ένα υδατοδιαλυτό διαλύτη. Συγκεκριμένα το Methyl Blue, το οποίο διαλύεται στο νερό κάνοντάς το μπλε. Όμως δεν διαλύεται στα οργανικά όπως το C_7 . Το πείραμα αυτό επαναλήφθηκε τρεις φορές. Κατά τη διεξαγωγή του δεύτερου και τρίτου πειράματος η διαπερατότητα του κελιού έχει ήδη αλλάξει, καθώς μετά το πρώτο πείραμα έχουμε τον σχηματισμό φιλμ στα τοιχώματα του κελιού ή αλλιώς υπολειμματικού κορεσμού.



Εικόνα 28: Methyl Blue για χρωματισμό νερού

Στο 1^ο πείραμα το νερό περνάει το μανόμετρο της εισόδου στο $t_1 = 6$ sec και φτάνει στην είσοδο του κελιού στο $t_2 = 10$ sec. Το νερό φτάνει στην έξοδο του κελιού (break through) τη στιγμή $t_3 = 53$ sec και στο μανόμετρο της εξόδου στο $t_4 = 57$ sec. Για το 2^ο πείραμα, έχουμε αντίστοιχα: $t_1 = 9$ sec, $t_2 = 13$ sec, $t_3 = 52$ sec και $t_4 = 56$ sec. Για το 3^ο πείραμα, $t_1 = 8$ sec, $t_2 = 12$ sec. Τη χρονική στιγμή $t_3 = 51$ sec έχουμε το break through της φάσης του νερού. Μετά το $t_3 = 51$ sec και μέχρι το $t_4 = 55$ sec έχουμε πέρασμα του νερού από το μανόμετρο της εξόδου. Μας ενδιαφέρει αποκλειστικά και μόνο το τι συμβαίνει μέσα στο κελί. Από τη στιγμή που θα μπει η 1^η σταγόνα μέχρι το break through.

Για την είσοδο του H_2O , έχουμε:

$$\Delta P_{\text{tube_Poiseuille_input_water}} = \frac{8\mu * q * L_1}{\pi * R^4} = \frac{8 * 1,0 * 10^{-3} (Pa * sec) * 1,5 * 10^{-7} \left(\frac{m^3}{sec}\right) * 4,8 * 10^{-2} m}{\pi * 0,0015875^4 m^4} \Rightarrow$$

$\Delta P_{\text{tube_Poiseuille_input_water}} = 2,89 \text{ Pa}$.

Για την έξοδο του H_2O , έχουμε: $\Delta P_{\text{tube_Poiseuille_out_water}} = 3,13 \text{ Pa}$.

Για την είσοδο του C_7 έχουμε: $\Delta P_{\text{tube_Poiseuille_input_C7}} = \frac{8 \cdot 0,386 \cdot 10^{-3} (\text{Pa} \cdot \text{sec}) \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} \left(\frac{m^3}{\text{sec}}\right) \cdot 4,8 \cdot 10^{-2} m}{\pi \cdot 0,0015875^4 m^4}$

$\Rightarrow \Delta P_{\text{tube_Poiseuille_input_C7}} = 1,11 \text{ Pa}$. Για την έξοδο, $\Delta P_{\text{tube_Poiseuille_out_C7}} = 1,21 \text{ Pa}$.

Για παράδειγμα στο 1^ο πείραμα, για $t = 10 \text{ second}$, έχουμε $\Delta P_{\text{cell}} = \Delta P_{\text{tot}} - \Delta P_{\text{tube_Poiseuille_input_water}} - \Delta P_{\text{tube_Poiseuille_out_C7}} \Rightarrow \Delta P_{\text{cell}} = 170 \text{ Pa} - 2,89 \text{ Pa} - 1,21 \text{ Pa} \Rightarrow \Delta P_{\text{cell}} = 165,9 \text{ Pa}$.

Τα δεδομένα των πειραμάτων παρουσιάζονται στους πίνακες 15, 16 και 17. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων, μας ενδιαφέρει πότε μπαίνει η 1^η σταγόνα στο κελί και πότε κάνει το break through, δηλαδή φτάνει στην έξοδο του κελιού. Οπότε έχουμε:

Για το 1^ο πείραμα: 1^η σταγόνα το $t = 10 \text{ sec}$ και break through το $t = 53 \text{ sec}$.

Για το 2^ο πείραμα: 1^η σταγόνα το $t = 13 \text{ sec}$ και break through το $t = 52 \text{ sec}$.

Για το 3^ο πείραμα: 1^η σταγόνα το $t = 12 \text{ sec}$ και break through το $t = 51 \text{ sec}$.

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)
0	144,68	21	295,91	49	377,91	87	393,99
1	149,68	22	297,91	51	380,91	90	393,99
2	150,68	23	313,91	52	382,91	95	395,99
3	152,68	25	315,91	53	399,99	100	396,99
4	152,68	26	318,91	55	403,99	102	400,99
5	153,68	27	320,91	56	387,99	103	401,99
5,5	155,68	29	324,91	58	388,99	105	403,99
6	154,91	30	326,91	60	387,99	108	405,99
7	150,91	31	328,91	61	369,99	110	404,99
8	150,91	32	345,91	63	368,99	115	406,99
10	165,91	35	348,91	65	365,99	118	408,99
12	195,91	36	350,91	68	363,99	119	410,99
13	222,91	38	355,91	70	368,99	120	413,99
14	249,91	39	357,91	72	384,99	121	416,99
15	266,91	40	359,91	73	381,99	123	418,99
16	267,91	42	362,91	75	378,99	124	421,99
17	270,91	43	365,91	76	375,99	125	423,99
18	272,91	45	369,91	77	374,99	127	426,99
19	275,91	47	372,91	85	374,99	128	429,99
20	291,91	48	375,91	86	392,99	130	433,99

Πίνακας 16: Πειραματικά δεδομένα εκτοπισμού C_7 από H_2O (1^ο πείραμα)

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)
0	164,68	28	334,91	51	427,91	75	461,99
5	167,68	30	337,91	52	446,99	80	461,99
9	169,91	32	343,91	53	452,99	85	464,99
12	172,91	33	358,91	55	452,99	90	464,99

13	208,91	35	362,91	56	470,99	95	464,99
14	239,91	37	366,91	57	473,99	100	465,99
15	271,91	40	372,91	60	467,99	105	464,99
16	297,91	41	375,91	62	443,99	110	470,99
18	300,91	44	381,91	65	441,99	115	472,99
20	305,91	46	384,91	67	446,99	116	473,99
22	309,91	48	387,91	68	462,99	120	476,99
24	312,91	49	403,91	70	465,99	122	493,99
26	315,91	50	407,91	72	465,99	125	499,99
						130	499,99

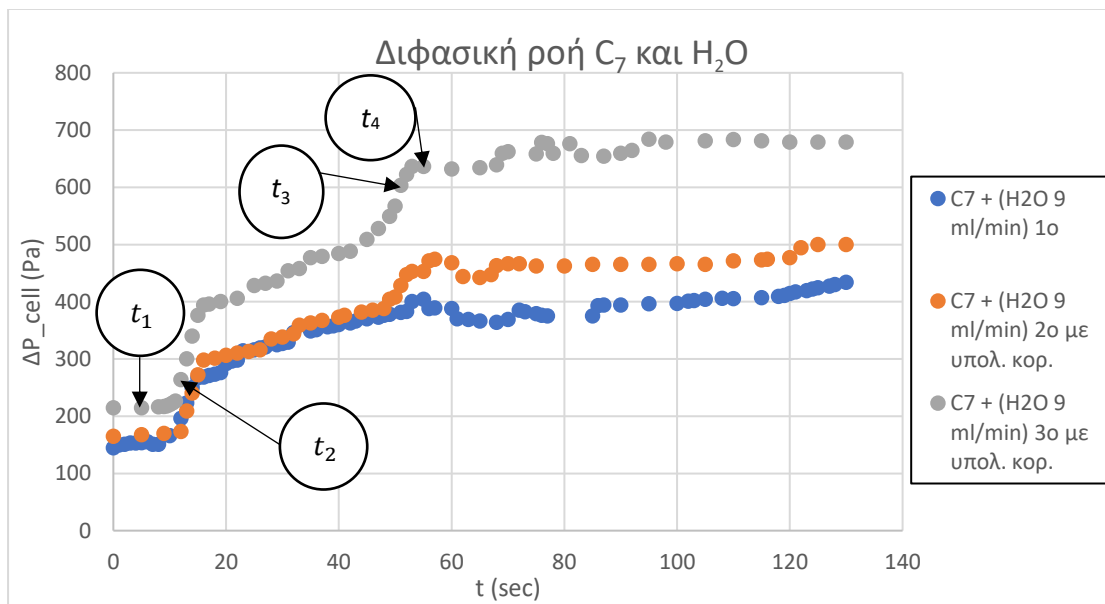
Πίνακας 17: Πειραματικά δεδομένα εκτοπισμού C₇ από H₂O (2^ο πείραμα)

Ακόμη στο 3^ο πείραμα θα υπολογίσουμε τον υπολειμματικό κορεσμό σε νερό. Ο κορεσμός του νερού τη χρονική στιγμή $t = 25 \text{ sec}$, είναι: $S_{\text{water}} = \frac{(25-12)\text{sec}}{72,5 \text{ sec}} = 0,179$ ή 17,9%. Και $S_{C7r} = 1 - S_{\text{water}}$.

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)			t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	S_{water}	S_{C7r}
0	214,68			50	566,91	0,524	0,476
5	214,68			51	602,99	0,538	0,462
8	215,91			52	621,99		
9	216,91			53	635,99		
9,5	217,91			55	635,99		
10	219,91			60	631,99		
10,5	222,91			65	633,99		
11	225,91	S_{water}	S_{C7r}	68	638,99		
12	263,91	0,000	1,000	69	658,99		
13	299,91	0,014	0,986	70	661,99		
14	339,91	0,028	0,972	75	657,99		
15	375,91	0,041	0,959	76	677,99		
16	393,91	0,055	0,945	77	675,99		
17	395,91	0,069	0,931	78	658,99		
19	399,91	0,097	0,903	81	675,99		
22	405,91	0,138	0,862	83	654,99		
25	427,91	0,179	0,821	87	653,99		
27	431,91	0,207	0,793	90	658,99		
29	435,91	0,234	0,766	92	663,99		
31	453,91	0,262	0,738	95	683,99		
33	457,91	0,290	0,710	98	678,99		
35	476,91	0,317	0,683	105	680,99		
37	478,91	0,345	0,655	110	682,99		
40	483,91	0,386	0,614	115	680,99		
42	487,91	0,414	0,586	120	678,99		
45	508,91	0,455	0,545	125	678,99		
47	527,91	0,483	0,517	130	678,99		
49	548,91	0,510	0,490				

Πίνακας 18: Πειραματικά δεδομένα εκτοπισμού C₇ από H₂O (3^ο πείραμα) και υπολογισμοί

Από τα ανωτέρω πειραματικά δεδομένα, σχεδιάζουμε το εξής διάγραμμα:



Διάγραμμα 9: Διφασική ροή επτανίου και νερού με ογκομετρική παροχή 9 ml/min

Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι κατά το δεύτερο και τρίτο πείραμα, η πτώση πίεσης αυξάνεται σε σχέση με τη πρώτη φορά. Αυτό συμβαίνει επειδή αλλάζει η διαπερατότητα του μέσου, καθώς η μη διαβρέχουσα φάση του νερού επικάθεται στο plexiglass και παγιδεύεται σε κάποιους πόρους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο αριθμός των καναλιών ροής και άρα και η διαπερατότητα του μέσου, την οποία θα την υπολογίσω στη συνέχεια.

4.9 Διαπερατότητα με υπολειμματικό κορεσμό

Εξαιτίας της ροής επτανίου και νερού στο κελί, η διαπερατότητά του αλλάζει. Υπάρχουν υπολείμματα και από τις δύο φάσεις που επηρεάζουν τη ροή, καθώς δημιουργούν ένα φιλμ στα τοιχώματα. Οπότε θα επαναλάβουμε τον υπολογισμό της διαπερατότητας με υπολειμματικό κορεσμό, όπως πριν στο 4.3.

Τα πειραματικά δεδομένα είναι τα εξής:

rpm	q (m ³ /sec)	ΔP tot (Pa)	rpm	q (m ³ /sec)	ΔP tot (Pa)
0	0,00*10 ⁰	0	380	6,33*10 ⁻⁷	1511
10	1,67*10 ⁻⁸	30	400	6,67*10 ⁻⁷	1630
20	3,33*10 ⁻⁸	48	420	7,00*10 ⁻⁷	1765
30	5,00*10 ⁻⁸	67	440	7,33*10 ⁻⁷	1920
40	6,67*10 ⁻⁸	116	450	7,50*10 ⁻⁷	1995
50	8,33*10 ⁻⁸	136	440	7,33*10 ⁻⁷	1920
60	1,00*10 ⁻⁷	158	420	7,00*10 ⁻⁷	1773
70	1,17*10 ⁻⁷	183	400	6,67*10 ⁻⁷	1645
80	1,33*10 ⁻⁷	210	380	6,33*10 ⁻⁷	1536
90	1,50*10 ⁻⁷	239	360	6,00*10 ⁻⁷	1423
100	1,67*10 ⁻⁷	267	340	5,67*10 ⁻⁷	1303
110	1,83*10 ⁻⁷	300	320	5,33*10 ⁻⁷	1187

120	$2,00 \cdot 10^{-7}$	331	300	$5,00 \cdot 10^{-7}$	1070
130	$2,17 \cdot 10^{-7}$	360	280	$4,67 \cdot 10^{-7}$	973
140	$2,33 \cdot 10^{-7}$	393	260	$4,33 \cdot 10^{-7}$	887
150	$2,50 \cdot 10^{-7}$	425	240	$4,00 \cdot 10^{-7}$	800
160	$2,67 \cdot 10^{-7}$	460	220	$3,67 \cdot 10^{-7}$	715
170	$2,83 \cdot 10^{-7}$	495	200	$3,33 \cdot 10^{-7}$	620
180	$3,00 \cdot 10^{-7}$	530	180	$3,00 \cdot 10^{-7}$	536
190	$3,17 \cdot 10^{-7}$	573	160	$2,67 \cdot 10^{-7}$	465
200	$3,33 \cdot 10^{-7}$	613	140	$2,33 \cdot 10^{-7}$	398
220	$3,67 \cdot 10^{-7}$	703	120	$2,00 \cdot 10^{-7}$	335
240	$4,00 \cdot 10^{-7}$	792	100	$1,67 \cdot 10^{-7}$	273
260	$4,33 \cdot 10^{-7}$	881	80	$1,33 \cdot 10^{-7}$	220
280	$4,67 \cdot 10^{-7}$	971	60	$1,00 \cdot 10^{-7}$	168
300	$5,00 \cdot 10^{-7}$	1067	40	$6,67 \cdot 10^{-8}$	127
320	$5,33 \cdot 10^{-7}$	1177	20	$3,33 \cdot 10^{-8}$	86
340	$5,67 \cdot 10^{-7}$	1304	10	$1,67 \cdot 10^{-8}$	66
360	$6,00 \cdot 10^{-7}$	1410	0	$0,00 \cdot 10^0$	0

Πίνακας 19: Πειραματικές Μετρήσεις

u_tube (m/s)	Re_tube (αδιάστατο)	ΔP_{tub} Poiseuille (Pa)	u_tube (m/s)	Re_tube (αδιάστατο)	ΔP_{tub} Poiseuille (Pa)
$0,00 \cdot 10^0$	0,0	0,00	$8,00 \cdot 10^{-2}$	450,1	9,80
$2,11 \cdot 10^{-3}$	11,8	0,26	$8,42 \cdot 10^{-2}$	473,7	10,32
$4,21 \cdot 10^{-3}$	23,7	0,52	$8,84 \cdot 10^{-2}$	497,4	10,83
$6,32 \cdot 10^{-3}$	35,5	0,77	$9,26 \cdot 10^{-2}$	521,1	11,35
$8,42 \cdot 10^{-3}$	47,4	1,03	$9,47 \cdot 10^{-2}$	533,0	11,61
$1,05 \cdot 10^{-2}$	59,2	1,29	$9,26 \cdot 10^{-2}$	521,1	11,35
$1,26 \cdot 10^{-2}$	71,1	1,55	$8,84 \cdot 10^{-2}$	497,4	10,83
$1,47 \cdot 10^{-2}$	82,9	1,81	$8,42 \cdot 10^{-2}$	473,7	10,32
$1,68 \cdot 10^{-2}$	94,7	2,06	$8,00 \cdot 10^{-2}$	450,1	9,80
$1,89 \cdot 10^{-2}$	106,6	2,32	$7,58 \cdot 10^{-2}$	426,4	9,29
$2,11 \cdot 10^{-2}$	118,4	2,58	$7,16 \cdot 10^{-2}$	402,7	8,77
$2,32 \cdot 10^{-2}$	130,3	2,84	$6,74 \cdot 10^{-2}$	379,0	8,25
$2,53 \cdot 10^{-2}$	142,1	3,10	$6,32 \cdot 10^{-2}$	355,3	7,74
$2,74 \cdot 10^{-2}$	154,0	3,35	$5,89 \cdot 10^{-2}$	331,6	7,22
$2,95 \cdot 10^{-2}$	165,8	3,61	$5,47 \cdot 10^{-2}$	307,9	6,71
$3,16 \cdot 10^{-2}$	177,7	3,87	$5,05 \cdot 10^{-2}$	284,2	6,19
$3,37 \cdot 10^{-2}$	189,5	4,13	$4,63 \cdot 10^{-2}$	260,6	5,67
$3,58 \cdot 10^{-2}$	201,3	4,39	$4,21 \cdot 10^{-2}$	236,9	5,16
$3,79 \cdot 10^{-2}$	213,2	4,64	$3,79 \cdot 10^{-2}$	213,2	4,64
$4,00 \cdot 10^{-2}$	225,0	4,90	$3,37 \cdot 10^{-2}$	189,5	4,13
$4,21 \cdot 10^{-2}$	236,9	5,16	$2,95 \cdot 10^{-2}$	165,8	3,61
$4,63 \cdot 10^{-2}$	260,6	5,67	$2,53 \cdot 10^{-2}$	142,1	3,10
$5,05 \cdot 10^{-2}$	284,2	6,19	$2,11 \cdot 10^{-2}$	118,4	2,58
$5,47 \cdot 10^{-2}$	307,9	6,71	$1,68 \cdot 10^{-2}$	94,7	2,06
$5,89 \cdot 10^{-2}$	331,6	7,22	$1,26 \cdot 10^{-2}$	71,1	1,55
$6,32 \cdot 10^{-2}$	355,3	7,74	$8,42 \cdot 10^{-3}$	47,4	1,03

$6,74 \cdot 10^{-2}$	379,0	8,25	$4,21 \cdot 10^{-3}$	23,7	0,52
$7,16 \cdot 10^{-2}$	402,7	8,77	$2,11 \cdot 10^{-3}$	11,8	0,26
$7,58 \cdot 10^{-2}$	426,4	9,29	$0,00 \cdot 10^0$	0,0	0,00

Πίνακας 20: Επεξεργασία Μετρήσεων tube

ΔP_{cell} (Pa)	u_{cell} (m/sec)	Re_{cell} (αδιάστατο)	ΔP_{cell} (Pa)	u_{cell} (m/sec)	Re_{cell} (αδιάστατο)
0,00	0,0000	0,00	1501,20	0,0158	11,22
29,74	0,0004	0,30	1619,68	0,0167	11,81
47,48	0,0008	0,59	1754,17	0,0175	12,40
66,23	0,0013	0,89	1908,65	0,0183	12,99
114,97	0,0017	1,18	1983,39	0,0188	13,29
134,71	0,0021	1,48	1908,65	0,0183	12,99
156,45	0,0025	1,77	1762,17	0,0175	12,40
181,19	0,0029	2,07	1634,68	0,0167	11,81
207,94	0,0033	2,36	1526,20	0,0158	11,22
236,68	0,0038	2,66	1413,71	0,0150	10,63
264,42	0,0042	2,95	1294,23	0,0142	10,04
297,16	0,0046	3,25	1178,75	0,0133	9,45
327,90	0,0050	3,54	1062,26	0,0125	8,86
356,65	0,0054	3,84	965,78	0,0117	8,27
389,39	0,0058	4,13	880,29	0,0108	7,68
421,13	0,0063	4,43	793,81	0,0100	7,09
455,87	0,0067	4,73	709,33	0,0092	6,50
490,61	0,0071	5,02	614,84	0,0083	5,91
525,36	0,0075	5,32	531,36	0,0075	5,32
568,10	0,0079	5,61	460,87	0,0067	4,73
607,84	0,0083	5,91	394,39	0,0058	4,13
697,33	0,0092	6,50	331,90	0,0050	3,54
785,81	0,0100	7,09	270,42	0,0042	2,95
874,29	0,0108	7,68	217,94	0,0033	2,36
963,78	0,0117	8,27	166,45	0,0025	1,77
1059,26	0,0125	8,86	125,97	0,0017	1,18
1168,75	0,0133	9,45	85,48	0,0008	0,59
1295,23	0,0142	10,04	65,74	0,0004	0,30
1400,71	0,0150	10,63	0,00	0,0000	0,00

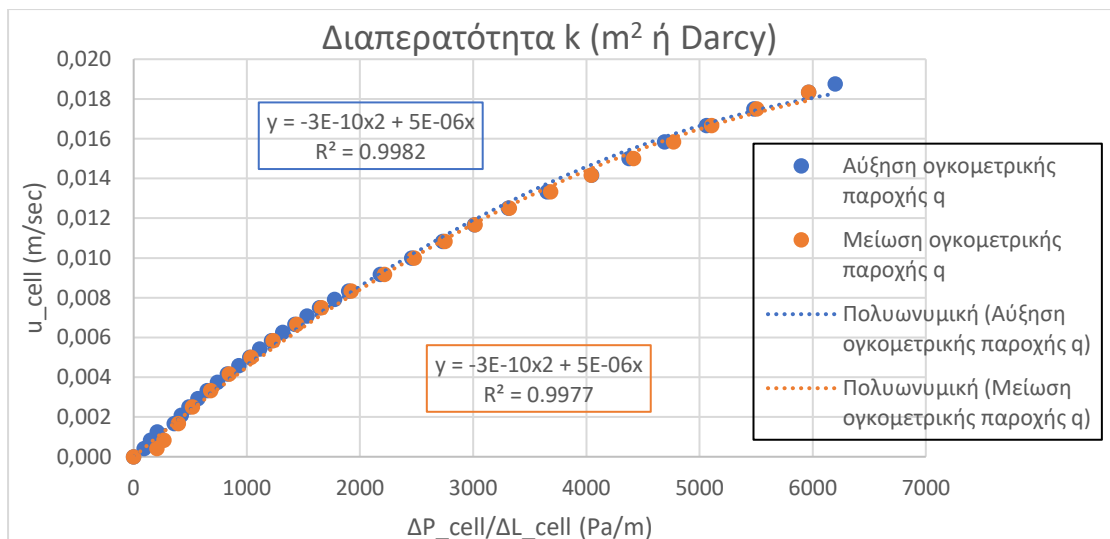
Πίνακας 21: Επεξεργασία Μετρήσεων cell

u_{cell} (m/sec)	$\Delta P_{\text{cell}}/\Delta L_{\text{cell}}$ (Pa/m)	u_{cell} (m/sec)	$\Delta P_{\text{cell}}/\Delta L_{\text{cell}}$ (Pa/m)
0,0000	0,00	0,0158	4691,24
0,0004	92,94	0,0167	5061,51
0,0008	148,39	0,0175	5481,77
0,0013	206,96	0,0183	5964,53
0,0017	359,28	0,0188	6198,10
0,0021	420,97	0,0183	5964,53
0,0025	488,91	0,0175	5506,77

0,0029	566,23	0,0167	5108,38
0,0033	649,80	0,0158	4769,37
0,0038	739,62	0,0150	4417,86
0,0042	826,31	0,0142	4044,47
0,0046	928,63	0,0133	3683,58
0,0050	1024,70	0,0125	3319,57
0,0054	1114,52	0,0117	3018,06
0,0058	1216,84	0,0108	2750,92
0,0063	1316,03	0,0100	2480,65
0,0067	1424,60	0,0092	2216,64
0,0071	1533,17	0,0083	1921,38
0,0075	1641,74	0,0075	1660,49
0,0079	1775,31	0,0067	1440,23
0,0083	1899,50	0,0058	1232,47
0,0092	2179,14	0,0050	1037,20
0,0100	2455,65	0,0042	845,06
0,0108	2732,17	0,0033	681,05
0,0117	3011,81	0,0025	520,16
0,0125	3310,19	0,0017	393,65
0,0133	3652,33	0,0008	267,14
0,0142	4047,59	0,0004	205,44
0,0150	4377,23	0,0000	0,00

Πίνακας 22: Επεξεργασία Μετρήσεων cell

Ο υπολογισμός της διαπερατότητας της πορώδους δομής-κελιού, γίνεται μέσω του νόμου του Darcy (1.9). Συγκεκριμένα έχουμε: $q = -\frac{k}{\mu} A \frac{\Delta P}{\Delta L} \Rightarrow u \cdot A = -\frac{k}{\mu} A \frac{\Delta P}{\Delta L} \Rightarrow u = -\frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta L}$. Με βάση τον πίνακα 21, φτιάχνουμε το εξής διάγραμμα:



Διάγραμμα 10: Διαπερατότητα με υπολειμματικό κορεσμό πορώδους δομής

Από την κλίση της πολυωνυμικής υπολογίζουμε τον λόγο $\frac{k}{\mu}$. Συγκεκριμένα έχουμε $k_1=k_2=k$,
 οπότε $\frac{k}{\mu_{C7}} = 5 \cdot 10^{-6} \Rightarrow k = 5 \cdot 10^{-6} \frac{\frac{m}{Pa \cdot sec}}{\frac{m}{Pa}} \cdot 0.386 \cdot 10^{-3} Pa \cdot sec \Rightarrow k = 1.93 \cdot 10^{-9} m^2$ ή Darcy. Η αρχική
 διαπερατότητα είναι $k = 2.2967 \cdot 10^{-9} m^2$ ή Darcy. Και οι δύο τιμές διαπερατότητας έχουν την ίδια
 τάξη μεγέθους, οπότε η μεταβολή είναι αμελητέα.

4.10 Αποστράγγιση επτανίου με χρήση νερού και επανεμποτισμός επτανίου

Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων, στην αρχή το κελί θα είναι πλήρως κορεσμένο σε επτάνιο C_7 και στην συνέχεια θα εισάγουμε νερό H_2O το οποίο είναι μη διαβρέχουσα φάση για το plexiglass, προκαλώντας εκτοπισμό του επτανίου. Μετά από αρκετό χρονικό διάστημα και αφού έχει σταθεροποιηθεί η πτώση πίεσης, επανεισάγουμε επτάνιο που είναι η διαβρέχουσα φάση. Το πείραμα αυτό πραγματοποιείται προκειμένου να δούμε την ροή των ρευστών κατά τη διαφασική ροή και για να μετρήσουμε τον υπολειμματικό κορεσμό σε επτάνιο, μέσω των video και της επεξεργασίας τους στο πρόγραμμα MATLAB, για διάφορες ογκομετρικές παροχές και πιο συγκεκριμένα για 3 ml/min, 4,5 ml/min, 9 ml/min και 18 ml/min. Οι καταγραφές των συνολικών πτώσεων πίεσης παρουσιάζονται στον πίνακα 23 και αυτών στα σωληνάκια στον πίνακα 22.

$\Delta P_{\text{tube Poiseuille}}$ (Pa)				
	30 rpm	45 rpm	90 rpm	180 rpm
Είσοδος H_2O	0,96	1,44	2,89	5,77
Έξοδος H_2O	1,04	1,56	3,13	6,25
Είσοδος C_7	0,37	0,56	1,11	2,23
Έξοδος C_7	0,40	0,60	1,21	2,41

Πίνακας 23: Δεδομένα για τις πτώσεις πίεσης στα λαστιχάκια σε Pa

Τα δεδομένα των πειραμάτων παρουσιάζονται στους πίνακες 24, 25, 26 και 27. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων, μας ενδιαφέρει πότε μπαίνει η 1^η σταγόνα νερού στο κελί, πότε κάνει το break through το νερό, πότε επανεισάγεται η 1^η σταγόνα επτανίου στο κελί και πότε κάνει το break through. Οπότε έχουμε:

Για 30 rpm έχουμε: 1^η σταγόνα H_2O στο cell το $t = 38$ sec και break through το $t = 125$ sec.

1^η σταγόνα C_7 στο cell το $t = 593$ sec και break through το $t = 683$ sec.

Για 45 rpm έχουμε: 1^η σταγόνα H_2O στο cell το $t = 22$ sec και break through το $t = 94$ sec.

1^η σταγόνα C_7 στο cell το $t = 529$ sec και break through το $t = 575$ sec.

Για 90 rpm έχουμε: 1^η σταγόνα H_2O στο cell το $t = 35$ sec και break through το $t = 61$ sec.

1^η σταγόνα C_7 στο cell το $t = 257$ sec και break through το $t = 285$ sec.

Για 180 rpm έχουμε: 1^η σταγόνα H_2O στο cell το $t_1 = 25$ sec και break through το $t_2 = 45$ sec.

1^η σταγόνα C_7 στο cell το $t_3 = 289$ sec και break through το $t_4 = 305$ sec.

Για το πείραμα στα 180 rpm σημειώσαμε πάνω στο διάγραμμα 12 που αντιστοιχούν οι χρόνοι.

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)
0	86,23	122	183,64	350	242,00	640	293,59
5	86,23	125	188,64	380	261,00	645	288,59
10	83,23	127	193,00	410	253,00	650	290,59
15	86,23	128	209,00	440	250,00	655	285,59
20	84,23	130	209,00	470	252,00	660	286,59
25	86,23	135	211,00	500	248,00	665	286,59
38	80,64	140	211,00	530	247,00	670	285,59
40	108,64	142	190,00	560	254,00	675	278,59
41	132,64	145	187,00	582	257,00	680	277,59
50	138,64	148	179,00	583	273,00	683	278,59
57	140,64	150	180,00	589	253,00	685	259,23
60	144,64	160	185,00	593	261,59	685,5	230,23
65	148,64	162	189,00	594	279,59	686	214,23
68	153,64	165	196,00	594,5	295,59	688	196,23
70	153,64	170	199,00	595	310,59	690	192,23
75	156,64	180	198,00	596	327,59	691	188,23
80	158,64	181	194,00	600	320,59	695	192,23
85	160,64	185	202,00	603	313,59	700	190,23
90	159,64	190	228,00	604	298,59	705	181,23
95	162,64	195	232,00	608	303,59	710	177,23
100	162,64	196	215,00	610	303,59	715	186,23
105	164,64	200	207,00	615	301,59	720	194,23
108	168,64	205	238,00	620	294,59	725	197,23
110	173,64	260	238,00	625	293,59	730	197,23
115	173,64	290	248,00	630	289,59	735	192,23
120	179,64	320	242,00	635	295,59	740	193,23

Πίνακας 24: Πειραματικά δεδομένα αποστράγγισης και εμποτισμού στα 30 rpm – 1°

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)
0	228,84	195	438,99	430	440,99	582	484,84
5	228,84	200	438,99	435	441,99	583	487,84
10	228,84	205	438,99	440	441,99	585	491,84
15	233,84	210	438,99	445	441,99	587	508,84
22	225,95	215	438,99	450	441,99	590	511,84
24	267,95	220	438,99	455	444,99	592	510,84
25	336,95	225	438,99	457	460,99	593	490,84
26	381,95	230	438,99	458	476,99	596	464,84
26	415,95	235	441,99	460	481,99	596,5	439,84
27,5	398,95	240	441,99	463	479,99	597	419,84
33	382,95	245	442,99	466	482,99	600	413,84
35	377,95	250	443,99	470	483,99	602	415,84
37	373,95	255	444,99	475	482,99	603	418,84
40	373,95	260	444,99	480	482,99	605	403,84
43	378,95	265	450,99	485	482,99	607	401,84
50	382,95	270	455,99	490	484,99	609	423,84
54	387,95	275	458,99	495	483,99	610	438,84

59	393,95	280	456,99	500	484,99	612	434,84
61	398,95	285	456,99	505	483,99	615	427,84
66	404,95	290	456,99	510	483,99	618	443,84
70	409,95	295	456,99	515	483,99	620	444,84
75	414,95	300	456,99	520	483,99	621	428,84
80	417,95	305	456,99	522	502,99	623	408,84
85	425,95	310	464,99	524	521,99	625	402,84
90	432,95	315	464,99	525	523,99	630	401,84
94	439,95	320	465,99	527	508,99	633	406,84
96	458,99	325	465,99	528	504,99	640	402,84
100	456,99	330	465,99	529	507,88	645	406,84
105	460,99	335	465,99	531	533,88	647	410,84
108	439,99	340	465,99	531,5	548,88	650	409,84
110	435,99	345	466,99	532	549,88	656	410,84
114	431,99	350	460,99	533	550,88	658	412,84
120	430,99	355	458,99	534	527,88	661	417,84
126	426,99	360	457,99	535	506,88	665	396,84
130	422,99	365	457,99	536	503,88	670	396,84
135	431,99	370	457,99	538	501,88	675	398,84
140	429,99	375	459,99	539	503,88	680	398,84
145	429,99	380	460,99	540	504,88	682	400,84
150	430,99	385	460,99	545	504,88	685	401,84
155	434,99	390	460,99	550	505,88	691	404,84
160	435,99	395	460,99	555	506,88	696	405,84
165	436,99	400	460,99	560	506,88	701	406,84
170	438,99	405	461,99	565	502,88	703	402,84
175	445,99	410	461,99	570	502,88	706	403,84
180	441,99	415	461,99	575	479,88	710	406,84
185	441,99	420	453,99	577	478,84	713	403,84
190	438,99	425	444,99	580	482,84		

Πίνακας 25: Πειραματικά δεδομένα αποστράγγισης και εμποτισμού στα 45 rpm – 2°

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)
0	252,68	62	547,99	125	643,99	276	623,76
5	252,68	62,5	564,99	130	643,99	277	619,76
10	251,68	63	583,99	135	633,99	278	618,76
15	251,68	64	601,99	140	633,99	280	614,76
20	252,68	65	603,99	145	628,99	283	608,76
30	252,68	66	623,99	155	633,99	285	604,76
35	255,91	68	607,99	175	633,99	286	589,68
37	284,91	70	611,99	195	633,99	286,5	566,68
37,5	322,91	75	618,99	205	643,99	287	540,68
38	359,91	78	633,99	215	643,99	288	511,68
38,5	399,91	80	638,99	230	643,99	289	492,68
39	417,91	82	659,99	240	643,99	290	490,68
40	419,91	83	675,99	250	643,99	291	471,68
42	424,91	86	662,99	255	653,99	296	466,68
43	440,91	90	663,99	257	679,76	300	442,68

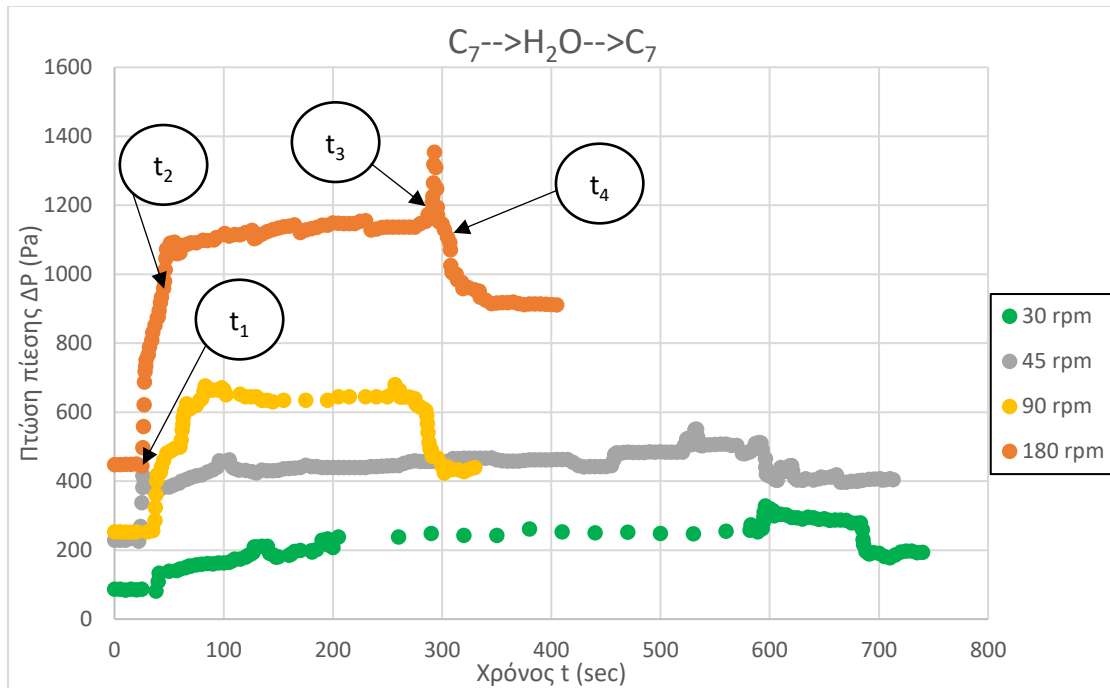
45	459,91	95	663,99	259	659,76	302	423,68
48	480,91	98	669,99	261	662,76	305	440,68
51	486,91	100	664,99	262	643,76	309	433,68
55	493,91	102	649,99	265	643,76	315	432,68
60	498,91	115	651,99	270	643,76	320	426,68
61	518,91	120	643,99	275	638,76	325	434,68
						330	438,68

Πίνακας 26: Πειραματικά δεδομένα αποστράγγισης και εμποτισμού στα 90 rpm – 3°

t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)	t (sec)	ΔP_{cell} (Pa)
0	447,59	55	1092,97	185	1134,97	296	1170,52
5	447,59	56	1076,97	190	1141,97	297	1151,52
10	448,59	57	1058,97	195	1141,97	300	1145,52
15	448,59	60	1061,97	200	1147,97	302	1128,52
20	449,59	62	1081,97	205	1146,97	305	1106,52
25	443,81	66	1085,97	210	1145,97	307	1091,36
26	496,81	70	1090,97	215	1145,97	307,5	1070,36
26,5	557,81	75	1090,97	220	1145,97	308	1024,36
27	620,81	81	1097,97	225	1152,97	309	1005,36
27,5	686,81	85	1096,97	230	1154,97	310	1002,36
28	717,81	91	1098,97	235	1127,97	313	999,36
28,5	733,81	93	1105,97	240	1130,97	314	983,36
29	750,81	100	1114,97	245	1134,97	318	976,36
31	766,81	101	1117,97	250	1135,97	319	958,36
32	788,81	105	1109,97	255	1135,97	324	960,36
34	808,81	110	1114,97	260	1135,97	330	954,36
35	830,81	115	1113,97	265	1135,97	334	950,36
37	850,81	120	1119,97	270	1135,97	335	933,36
39	872,81	126	1126,97	275	1135,97	340	924,36
40	875,81	128	1102,97	280	1145,97	345	914,36
41	893,81	130	1105,97	285	1152,97	350	916,36
42	916,81	135	1115,97	287	1171,97	355	917,36
43	932,81	140	1122,97	289	1176,52	360	917,36
45	958,81	145	1128,97	291	1207,52	365	919,36
46	978,97	150	1132,97	291,5	1225,52	370	914,36
46,5	1012,97	155	1136,97	292	1264,52	375	911,36
47	1044,97	160	1138,97	292,5	1318,52	380	913,36
47,5	1071,97	165	1142,97	293	1353,52	385	913,36
49	1072,97	170	1119,97	294	1308,52	390	913,36
50	1077,97	175	1127,97	295	1247,52	395	912,36
51	1089,97	180	1131,97	295,5	1193,52	400	911,36

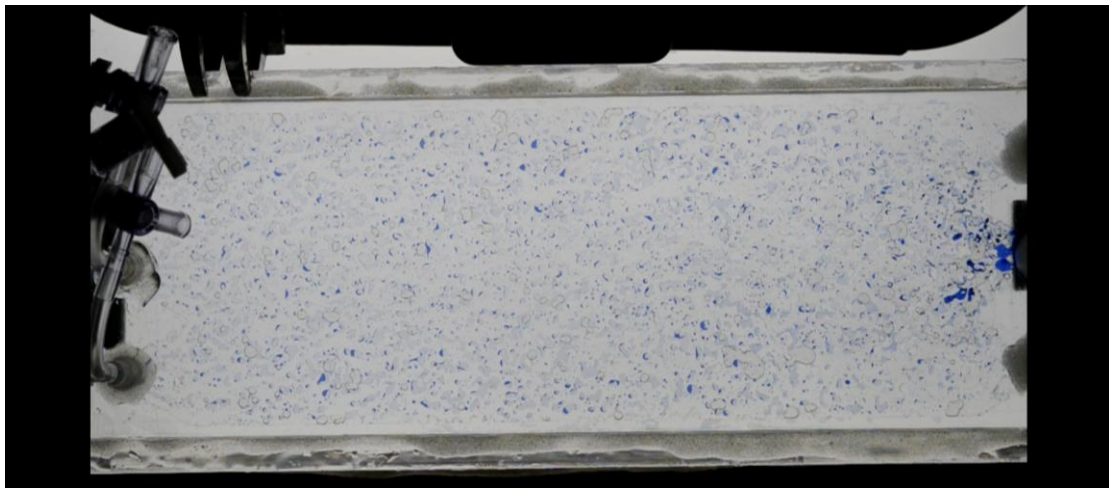
Πίνακας 27: Πειραματικά δεδομένα αποστράγγισης και εμποτισμού στα 180 rpm – 4°

Σύμφωνα με τους πίνακες 24,25,26 και 27, έχουμε το εξής διάγραμμα:

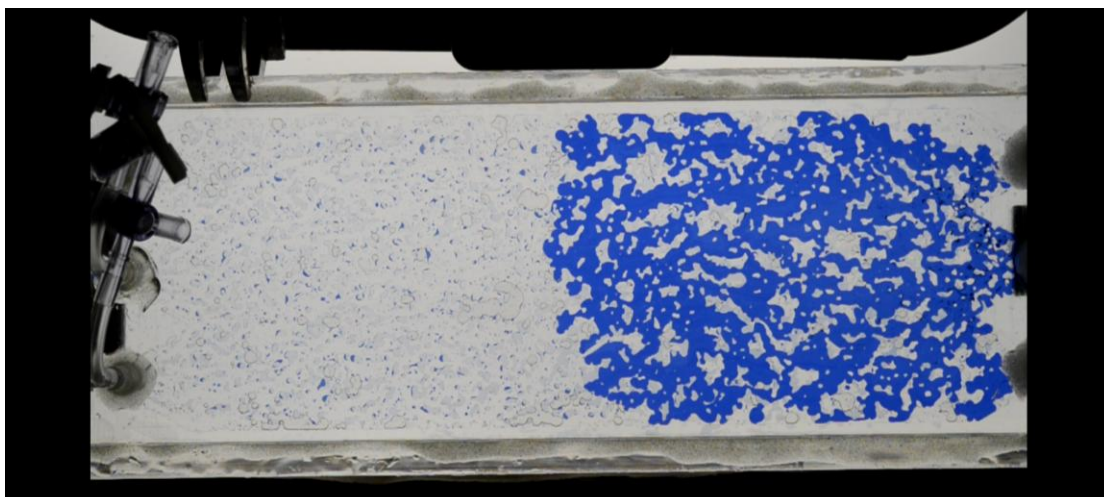


Διάγραμμα 11: Αποστράγγιση και εμποτισμός πορώδους δομής

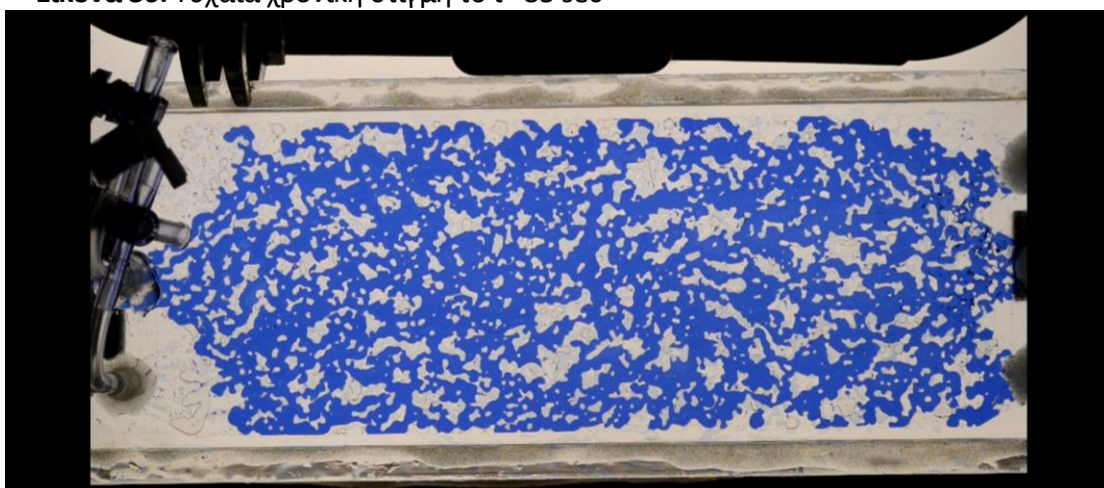
Η οπτικοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, των πτώσεων πίεσης, αποτυπώνεται στις εικόνες 15 έως 20. Συγκεκριμένα για ογκομετρική παροχή 18 ml/min ή 180 rpm, έχουμε:



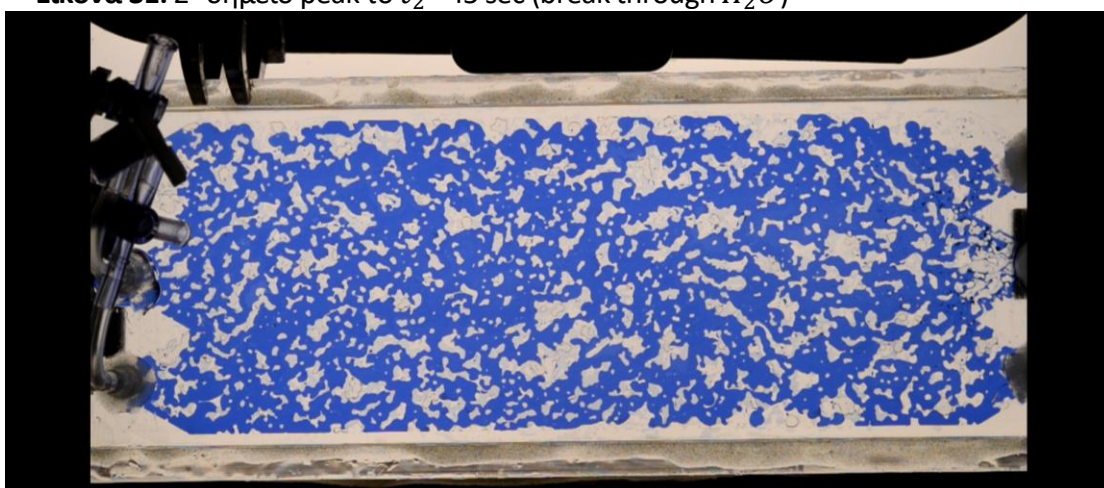
Εικόνα 29: 1^ο σημείο peak το $t_1 = 25$ sec (1^η σταγόνα H_2O στο cell)



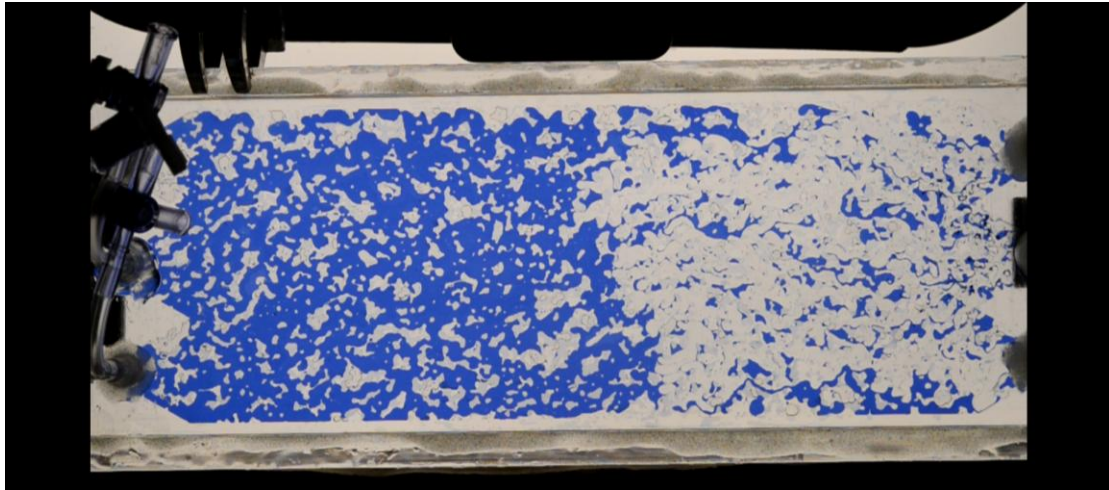
Εικόνα 30: Τυχαία χρονική στιγμή το $t = 35$ sec



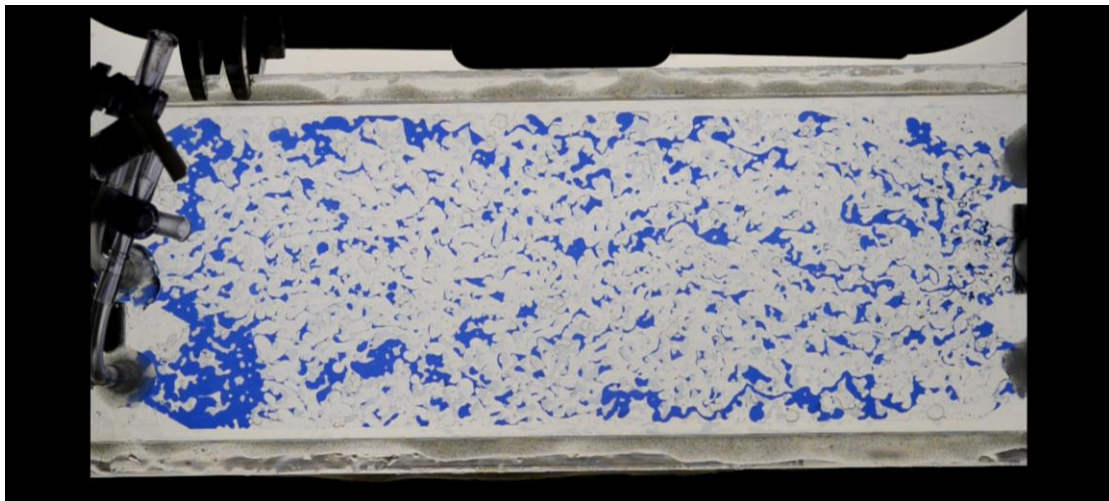
Εικόνα 31: 2^ο σημείο peak το $t_2 = 45$ sec (break through H_2O)



Εικόνα 32: 3^ο σημείο peak το $t_3 = 289$ sec (1^η σταγόνα C_7 στο cell)



Εικόνα 33: Τυχαία χρονική στιγμή το $t = 297 \text{ sec}$



Εικόνα 34: 4^ο σημείο peak το $t_4 = 305 \text{ sec}$ (break through C_7)

4.11 Υπολογισμός κορεσμού

Ο υπολογισμός του κορεσμού θα γίνει με δύο προσεγγίσεις. Α) Με βάση την ογκομετρική παροχή και τη συνολική χωρητικότητα του κελιού. Με αυτό το τρόπο σε κάθε χρονική στιγμή γνωρίζαμε το κλάσμα όγκου που είχε καλυφθεί. Β) Με οπτική καταγραφή και επεξεργασία της εικόνας, ώστε να υπολογίσουμε το κλάσμα όγκου της εισερχόμενης φάσης στο συνολικό διάκενο χώρο.

4.11.1 Κορεσμός S_{H_2O} με βάση τις διαστάσεις του κελιού και την ογκομετρική παροχή του ρευστού

Για 30 rpm ο κορεσμός του νερού όταν κάνει break through τη χρονική στιγμή $t = 125 \text{ sec}$, είναι: $S_{\text{water}} = \frac{(125-38)\text{sec}}{217,6 \text{ sec}} = 0,399$ ή 39,9%. Ο υπολειμματικός κορεσμός του S_{H_2O} κατά τον

εμποτισμό C_7 και πιο συγκεκριμένα τη στιγμή που κάνει break through το C_7 ($t=683$ sec), είναι $S_{water} = \frac{(683-593) \text{ sec}}{217,6 \text{ sec}} = 0,413$ ή 41,3%.

Για 45 rpm ο κορεσμός του νερού όταν κάνει break through τη χρονική στιγμή $t=94$ sec, είναι: $S_{water} = \frac{(94-22) \text{ sec}}{145,06 \text{ sec}} = 0,496$ ή 49,6%. Ο υπολειμματικός κορεσμός του S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 και πιο συγκεκριμένα τη στιγμή που κάνει break through το C_7 ($t=575$ sec), είναι $S_{water} = \frac{(575-529) \text{ sec}}{145,06 \text{ sec}} = 0,317$ ή 31,7%.

Για 90 rpm ο κορεσμός του νερού όταν κάνει break through τη χρονική στιγμή $t=61$ sec, είναι: $S_{water} = \frac{(61-35) \text{ sec}}{72,53 \text{ sec}} = 0,358$ ή 35,8%. Ο υπολειμματικός κορεσμός του S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 και πιο συγκεκριμένα τη στιγμή που κάνει break through το C_7 ($t=285$ sec), είναι $S_{water} = \frac{(285-257) \text{ sec}}{72,53 \text{ sec}} = 0,386$ ή 38,6%.

Για 180 rpm ο κορεσμός του νερού όταν κάνει break through τη χρονική στιγμή $t=45$ sec, είναι: $S_{water} = \frac{(45-25) \text{ sec}}{36,3 \text{ sec}} = 0,551$ ή 55%. Ο υπολειμματικός κορεσμός του S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 και πιο συγκεκριμένα τη στιγμή που κάνει break through το C_7 ($t=305$ sec), είναι $S_{water} = \frac{(305-289) \text{ sec}}{36,3 \text{ sec}} = 0,441$ ή 44,1%.

4.11.2 Κορεσμός S_{H_2O} με οπτική μέθοδο

Ταυτόχρονα με την καταγραφή των πτώσεων πίεσης από το μανόμετρο, καταγράψαμε με την camera Nikon πως μεταβάλλεται οπτικά ο κορεσμός της φάσης του H_2O .

Για αρχή θα συμπίεσουμε το αρχείο video χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ffmpeg μέσω της γραμμής εντολών Windows PowerShell. **1)**Συγκεκριμένα ο τρόπος συμπίεσης του αρχείου θα είναι με το libx264, εκτελώντας την εντολή: (PS C:\Users\iUser\Desktop\ffmpeg\ffmpeg-2023-05-15-git-2953ebe7b6-full_build\bin> .\ffmpeg.exe -i '.\180 rpm C7, C7+H2O, H2O+C7.MOV' -c:v libx264 -preset ultrafast out.mp4). Αυτή δημιουργεί ένα νέο αρχείο (out.mp4), δηλαδή το συμπιεσμένο μέσα στο φάκελο bin. **2)**Μετά τρέχουμε το νέο video με την εντολή (\ffplay.exe .\out.mp4), για να δούμε ότι όλα ολοκληρώθηκαν σωστά. Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε την εντολή **3)**dir, καθώς αυτή επιστρέφει μια συμβολοσειρά που αντιπροσωπεύει το όνομα ενός αρχείου ή φακέλου που ταιριάζει με ένα συγκεκριμένο μοτίβο ή χαρακτηριστικό αρχείου. Έπειτα θέλουμε να δημιουργήσουμε εικόνες μέσα στο φάκελο bin, από το video. **4)** Με την εντολή (PS C:\Users\iUser\Desktop\ffmpeg\ffmpeg-2023-05-15-git-2953ebe7b6-full_build\bin> .\ffmpeg.exe -i .\out.mp4 -r 1 \$filename%03d.png) δημιουργούνται 406 εικόνες (.png) από τον εμποτισμό και την αποστράγγιση. Οι εικόνες δημιουργούνται κάθε 1 second, με βάση την εντολή που δώσαμε.

Αυτές τις εικόνες που δημιουργήσαμε, θέλουμε να τις επεξεργαστούμε για να υπολογίσουμε τον κορεσμό της φάσης του νερού. Η επεξεργασία τους γίνεται στη MATLAB και το αρχείο που προκύπτει είναι της μορφής (q180.avi). Μετά συνεχίζω στο Windows PowerShell.

5) Συγκεκριμένα στη MATLAB δημιουργούμε το αρχείο (q180.avi), γράφοντας τον κώδικα (q180_2.m):

```
Nimages=406
Sat=[];
close all

v = VideoWriter('q180.avi');
% v.FrameRate = 20;
open(v);

Nimages=[(1:1:60) (260:1:325)];

% Διάβασε τις εικόνες διαδοχικά
for i=Nimages
% Όνομα επόμενης εικόνας
    filename=[num2str(i,'%03d') '.png']
%Φόρτωσε εικόνα στη μεταβλητή a (πίνακας με φωτογραφίες)
    a=imread(filename);
% Κόψε περιθώρια εικόνας
    a=(a(148:660,100:1200,:));
% Περιστροφή εικόνας
    a=(imrotate(a,-0.7,'bilinear','crop'));
% Ξανακόψε περιθώρια
    a=(a(10:441,58:1097,:));
% Εντόπισε θέσεις μπλε pixel>150/255 και κόκκινο<100/255
    conditions=(a(:,:,3)>150&a(:,:,1)<100);
% Μέτρησε συνολικό αριθμό μπλε pixel στην τρέχουσα εικόνα
% και πρόσθεσε τον αριθμό στο διάνυσμα Sat
% Διείλεσε με πλήθος x-y pixel(RGB-3 διαστάσεις),ενώ εσύ θες μόνο 1
διάσταση και πορώδες

    curvalue=(nnz(conditions)/(numel(a)/3)/0.85);
    subplot(3,1,1)

    imshow(a)
    title(filename)

    subplot(3,1,2)
    imshow(conditions)

    subplot(3,1,3)
    plot(Sat)
    drawnow

    frame = getframe(gcf);
    writeVideo(v,frame);

    Sat=[Sat curvalue]
end

close(v)
```

```

plot(Sat)
xlabel('time (sec)')
ylabel('saturation of water ')
shg

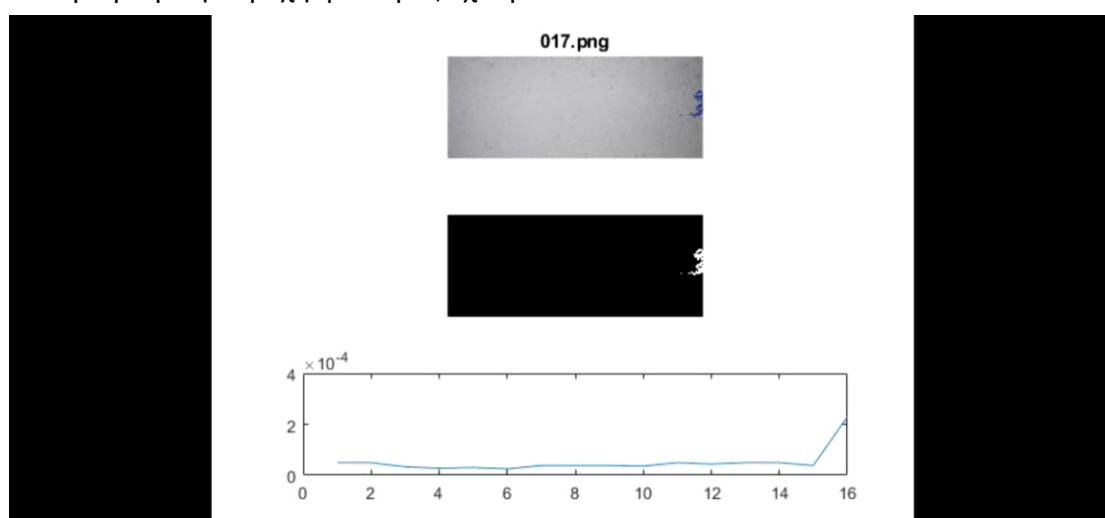
```

Ερμηνεία κώδικα: Το $Sat=[]$; είναι το διάνυσμα του κορεσμού. Από τις 406 εικόνες, θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τις εικόνες από 1 έως 60 και από 260 έως 325. Αφού φορτώσουμε τις εικόνες στη MATLAB, θα κόψουμε τα περιθώριά τους και θα τις περιστρέψουμε κατάλληλα, καθώς η περιοχή έξω από το κελί μας επηρεάζει το RGB (Red, Green και Blue). Αυτό έχει ως συνέπεια να εμφανίζεται λάθος τον αριθμό των μπλε pixel, που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του κορεσμού. Στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη και το πορώδες ως $\phi=0,85$. Στο αρχείο που δημιουργείται (q180.avi), έχουμε στον άξονα x, τον χρόνο (t) και στον άξονα y, τον κορεσμό του νερού κατά την αποστράγγιση, αλλά και τον υπολειμματικό κορεσμό του νερού κατά το στάδιο του εμποτισμού με C_7 . Για τη δημιουργία των τριών απεικονίσεων, χρησιμοποιώ την εντολή “subplot”.

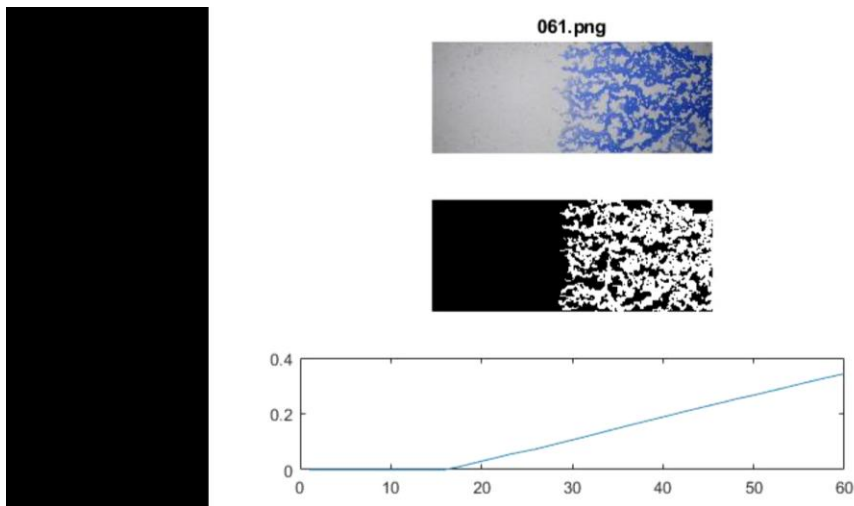
Στο επόμενο βήμα τρέχω το αρχείο (q180.avi) στο Windows PowerShell, μέσω της εντολής: (PSC:\Users\iUser\Desktop\ffmpeg\ffmpeg-2023-05-15-git-2953ebe7b6-full_build\bin> \ffplay.exe .\q180.avi) και παρατηρώ ότι τρέχει κανονικά. **6)** Αν θέλω να αυξήσω την ταχύτητα εκτέλεσης του αρχείου, γράφω τον εξής κώδικα: (PS C:\Users\iUser\Desktop\ffmpeg\ffmpeg-2023-05-15-git-2953ebe7b6-full_build\bin> .\ffmpeg.exe -i .\q180.avi -c:v libx264 -preset ultrafast -filter:v "setpts=0.25*PTS" out.mp4), με το PTS να είναι για τη ταχύτητα που τρέχει το video. Την ίδια διαδικασία εφαρμόζουμε για όλες τις ογκομετρικές παροχές.

Τα αποτελέσματα καταγράφονται κάτω από τις εικόνες. Στον άξονα y, έχουμε τον κορεσμό του νερού S_{H_2O} (0-1) και στον άξονα x, τον χρόνο σε sec.

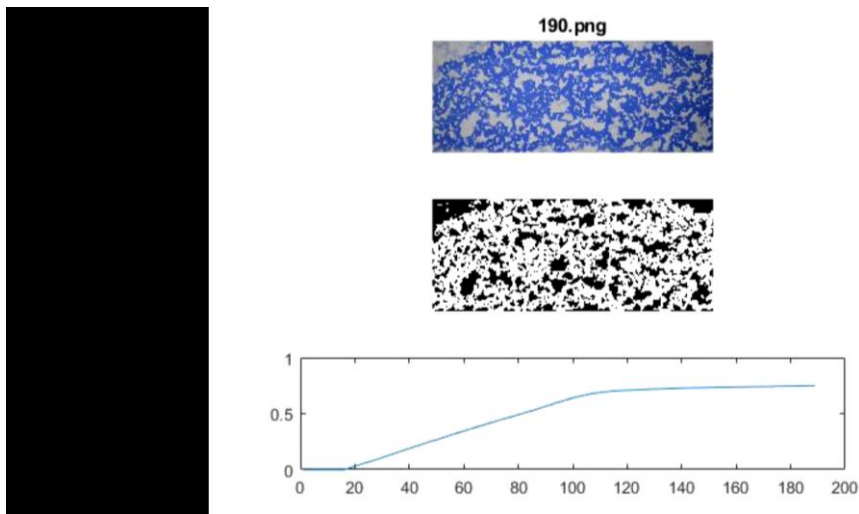
Για ογκομετρική παροχή $q=30$ grpm, έχουμε:



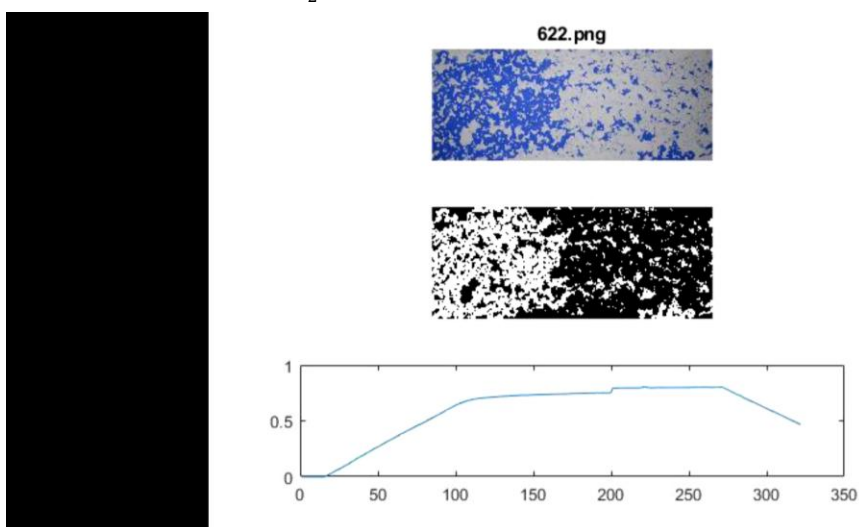
Εικόνα 35: Όταν μπαίνει η 1^η σταγόνα νερού στο cell



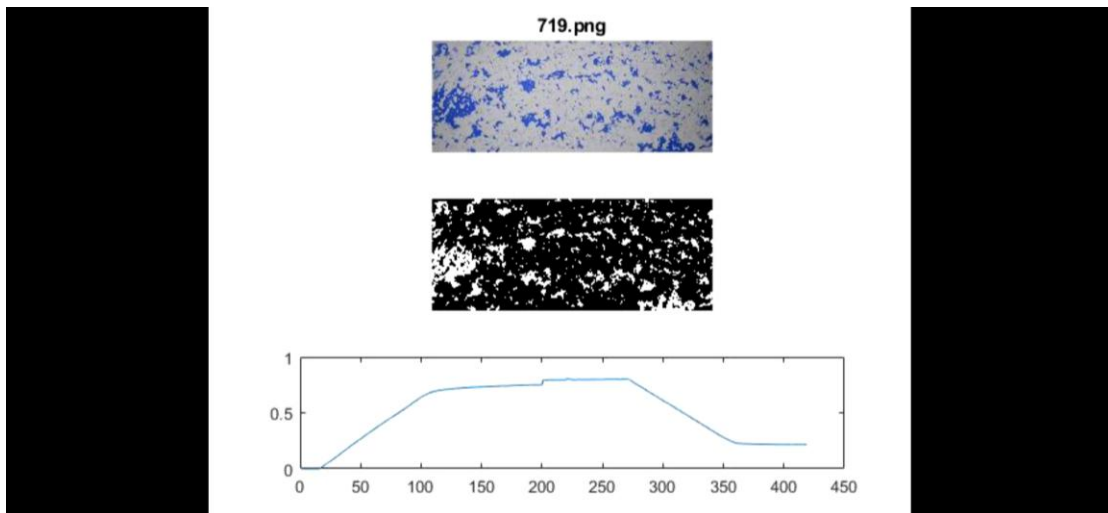
Εικόνα 36: Κατά το στάδιο της αποστράγγισης του C_7



Εικόνα 37: Κορεσμός S_{H_2O} μετά το break through του νερού = 0,7467 ή 74,67%.

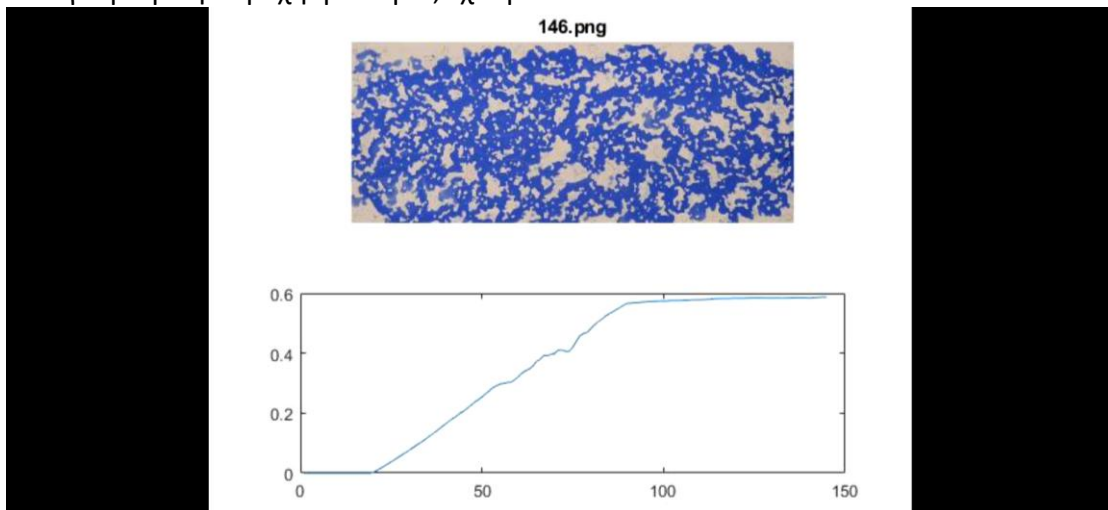


Εικόνα 38: Κατά το στάδιο εμποτισμού του C_7 , τυχαίο σημείο

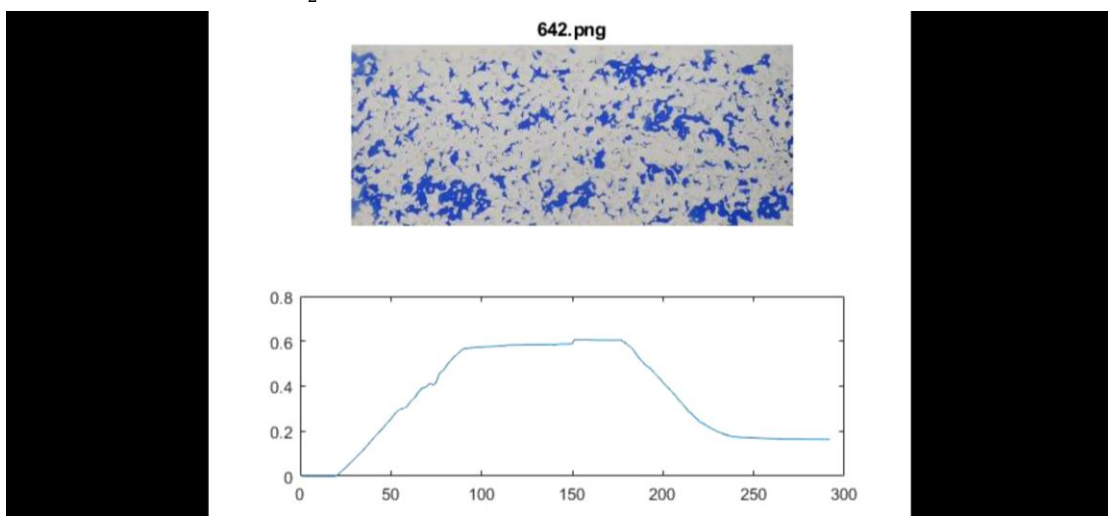


Εικόνα 39: Υπολειμματικός κορεσμός S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 , $S_{H_2O} = 0,2154$ ή 21,54%.

Για ογκομετρική παροχή $q=45$ rpm, έχουμε:

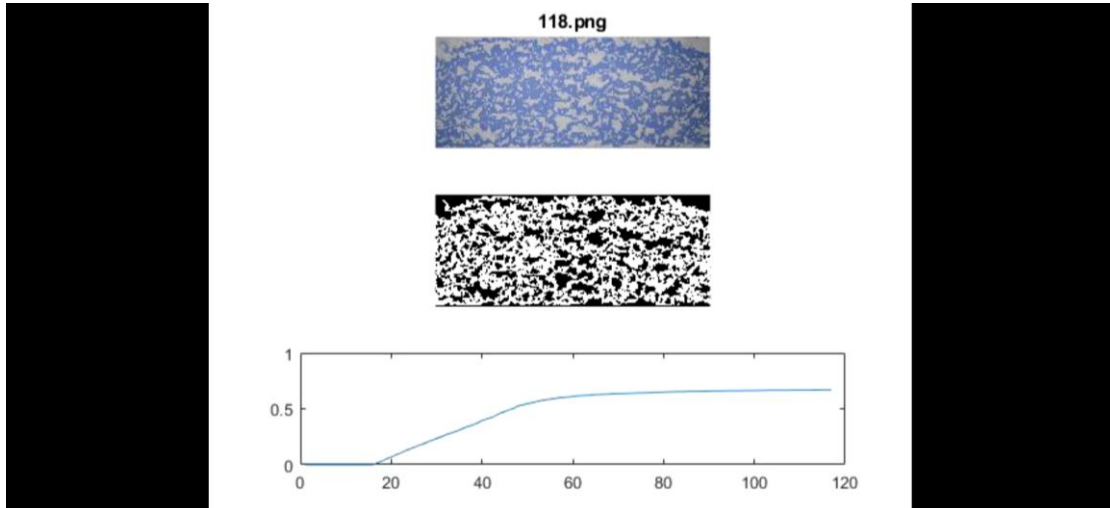


Εικόνα 40: Κορεσμός S_{H_2O} μετά το break through του νερού = 0,5847 ή 58,47%.

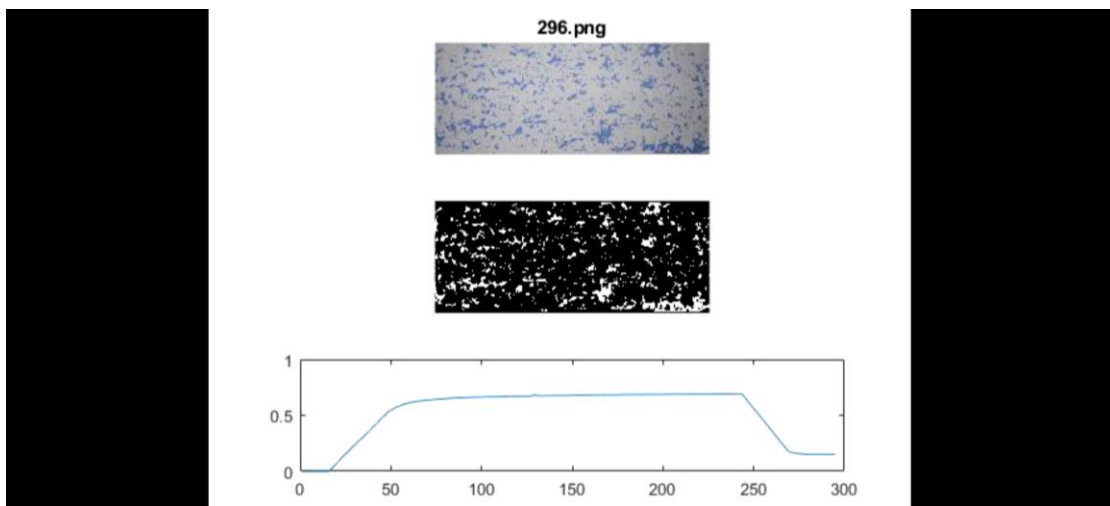


Εικόνα 41: Υπολειμματικός κορεσμός S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 , $S_{H_2O} = 0,1625$ ή 16,25%.

Για ογκομετρική παροχή $q=90$ rpm, έχουμε:

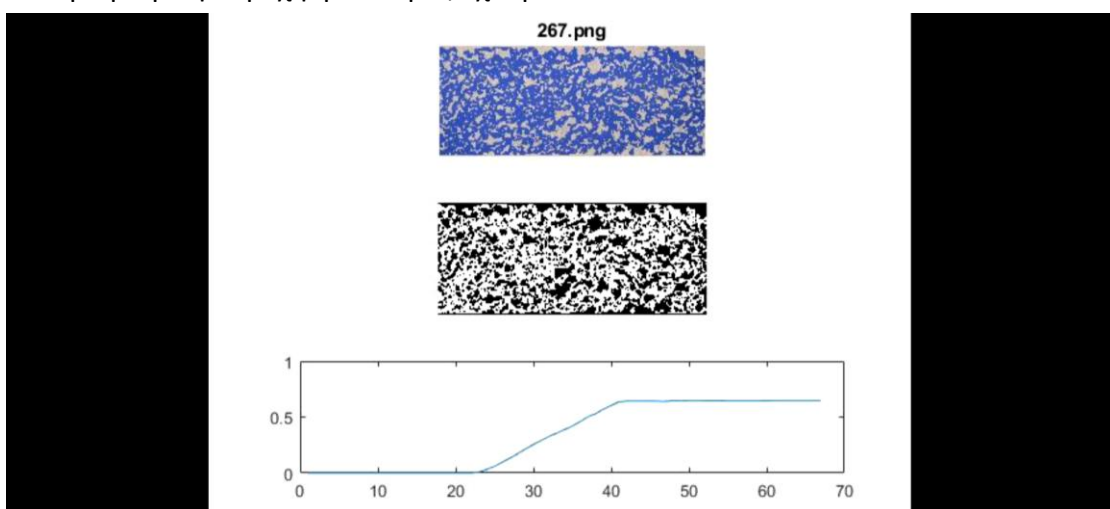


Εικόνα 42: Κορεσμός S_{H_2O} μετά το break through του νερού = 0,6676 ή 66,76%.

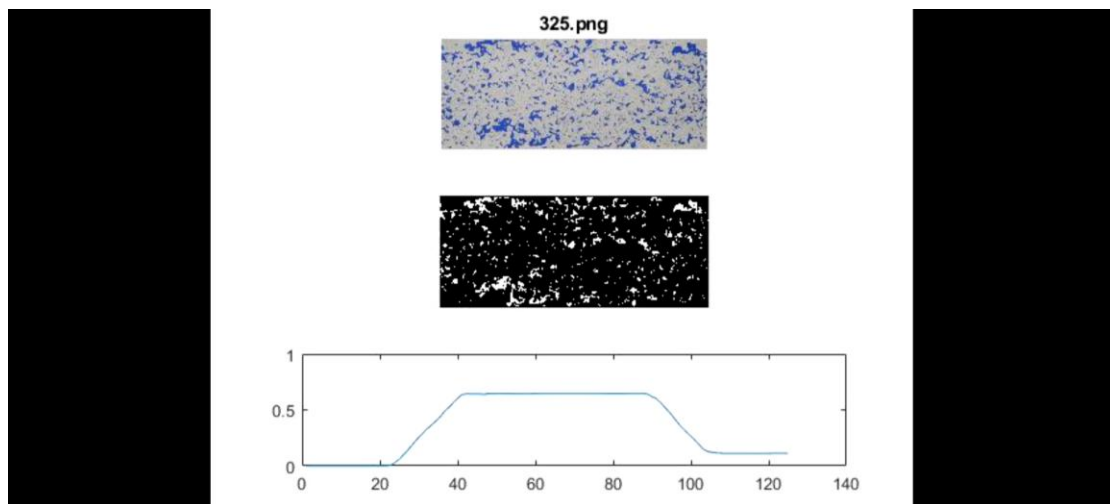


Εικόνα 43: Υπολειμματικός κορεσμός S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 $S_{H_2O}=14,95$ ή 14,95%.

Για ογκομετρική παροχή $q=180$ rpm, έχουμε:



Εικόνα 44: Κορεσμός S_{H_2O} μετά το break through του νερού = 0,6450 ή 64,50%.



Εικόνα 45: Υπολειμματικός κορεσμός S_{H_2O} κατά τον εμποτισμό C_7 $S_{H_2O} = 0,1120$ ή $11,20$

4.11.3 Σύγκριση των δύο προσεγγίσεων υπολογισμού του κορεσμού

Ογκομετρική παροχή q (ml/min)	Κορεσμός S με βάση το χρόνο		Κορεσμός S_{water} με οπτική μέθοδο	
	Κορεσμός S_{water} κατά την από-στράγγιση με H_2O	Υπολειμματικός S_{water} κατά τον εμποτισμό με C_7	Κορεσμός S_{water} κατά την από-στράγγιση με H_2O	Υπολειμματικός S_{water} κατά τον εμποτισμό με C_7
3 ml/min	39,9 %	41,3 %	74,67 %	21,54 %
4,5 ml/min	49,6 %	31,7 %	58,47 %	16,25 %
9 ml/min	35,8 %	38,6 %	66,76 %	14,95 %
18 ml/min	55 %	44,1 %	64,50 %	11,20 %

Πίνακας 28: Σύγκριση μεθοδολογιών για κορεσμό

Συγκρίνοντας τους δύο τρόπους υπολογισμού του κορεσμού, συμπεραίνουμε ότι αυτοί δεν συμπίπτουν μεταξύ τους. Κάτι που θα έπρεπε να γίνεται, για να θεωρηθούν σωστοί και αξιόπιστοι οι δύο αυτοί τρόποι.

5. Παράρτημα

1^{ος} κώδικας: surf2stl.m

```
function surf2stl(filename,x,y,z,mode)
% 15-2-13 All units in mm only positive values.
%
%SURF2STL Write STL file from surface data.
% SURF2STL('filename',X,Y,Z) writes a stereolithography (STL) file
```

```

% for a surface with geometry defined by three matrix arguments, X, Y
% and Z. X, Y and Z must be two-dimensional arrays with the same size.
%
% SURF2STL('filename',x,y,Z), uses two vector arguments replacing
% the first two matrix arguments, which must have length(x) = n and
% length(y) = m where [m,n] = size(Z). Note that x corresponds to
% the columns of Z and y corresponds to the rows.
%
% SURF2STL('filename',dx,dy,Z) uses scalar values of dx and dy to
% specify the x and y spacing between grid points.
%
% SURF2STL(...,'mode') may be used to specify the output format.
%
% 'binary' - writes in STL binary format (default)
% 'ascii' - writes in STL ASCII format
%
% Example:
%
% surf2stl('test.stl',1,1,peaks);
%
% See also SURF.
%
% Author: Bill McDonald, 02-20-04
error(nargchk(4,5,nargin));

if (ischar(filename)==0)
    error('Invalid filename');
end
if (nargin < 5)
    mode = 'binary';
elseif (strcmp(mode,'ascii')==0)
    mode = 'binary';
end
if (ndims(z) ~= 2)
    error('Variable z must be a 2-dimensional array');
end
if any( (size(x)~=size(z)) | (size(y)~=size(z)) )

```

```

% size of x or y does not match size of z
if ( (length(x)==1) & (length(y)==1) )
    % Must be specifying dx and dy, so make vectors
    dx = x;
    dy = y;
    x = ((1:size(z,2))-1)*dx;
    y = ((1:size(z,1))-1)*dy;
end
if ( (length(x)==size(z,2)) & (length(y)==size(z,1)) )
    % Must be specifying vectors
    xvec=x;
    yvec=y;
    [x,y]=meshgrid(xvec,yvec);
else
    error('Unable to resolve x and y variables');
end
end

if strcmp(mode,'ascii')
    % Open for writing in ascii mode
    fid = fopen(filename,'w');
else
    % Open for writing in binary mode
    fid = fopen(filename,'wb+');
end
if (fid == -1)
    error( sprintf('Unable to write to %s',filename) );
end
title_str = sprintf('Created by surf2stl.m %s',datestr(now));
if strcmp(mode,'ascii')
    fprintf(fid,'solid %s\r\n',title_str);
else
    str = sprintf('%-80s',title_str);
    fwrite(fid,str,'uchar');    % Title
    fwrite(fid,0,'int32');      % Number of facets, zero for now
end
nfacets = 0;

```

```

for i=1:(size(z,1)-1)
    for j=1:(size(z,2)-1)
        p1 = [x(i,j)  y(i,j)  z(i,j)];
        p2 = [x(i,j+1)  y(i,j+1)  z(i,j+1)];
        p3 = [x(i+1,j+1)  y(i+1,j+1)  z(i+1,j+1)];
        val = local_write_facet(fid,p1,p2,p3,mode);
        nfacets = nfacets + val;
        p1 = [x(i+1,j+1)  y(i+1,j+1)  z(i+1,j+1)];
        p2 = [x(i+1,j)  y(i+1,j)  z(i+1,j)];
        p3 = [x(i,j)  y(i,j)  z(i,j)];
        val = local_write_facet(fid,p1,p2,p3,mode);
        nfacets = nfacets + val;
    end
end
if strcmp(mode,'ascii')
    fprintf(fid,'endsolid %s\r\n',title_str);
else
    fseek(fid,0,'bof');
    fseek(fid,80,'bof');
    fwrite(fid,nfacets,'int32');
end
fclose(fid);
disp( sprintf('Wrote %d facets',nfacets) );
% Local subfunctions
function num = local_write_facet(fid,p1,p2,p3,mode)
if any( isnan(p1) | isnan(p2) | isnan(p3) )
    num = 0;
    return;
else
    num = 1;
    n = local_find_normal(p1,p2,p3);
    if strcmp(mode,'ascii')
        fprintf(fid,'facet normal %.7E %.7E %.7E\r\n', n(1),n(2),n(3) );
        fprintf(fid,'outer loop\r\n');
        fprintf(fid,'vertex %.7E %.7E %.7E\r\n', p1);
        fprintf(fid,'vertex %.7E %.7E %.7E\r\n', p2);
        fprintf(fid,'vertex %.7E %.7E %.7E\r\n', p3);
    end
end

```

```

        fprintf(fid,'endloop\r\n');
        fprintf(fid,'endfacet\r\n');
    else
        fwrite(fid,n,'float32');
        fwrite(fid,p1,'float32');
        fwrite(fid,p2,'float32');
        fwrite(fid,p3,'float32');
        fwrite(fid,0,'int16'); % unused
    end
end
function n = local_find_normal(p1,p2,p3)
v1 = p2-p1;
v2 = p3-p1;
v3 = cross(v1,v2);
n = v3 ./ sqrt(sum(v3.*v3));

```

2^{ος} κώδικας: gen_log_gaussian_pattern_stl_190622.m

```

%In this version the resolution of the domain can be adapted, i.e. nx,ny
%take arbitrary values
clear all
close all
nx=1000;
ny=1000 ;
N=nx*ny;
sigma = 0.5 ;
lambda_s =15;
lambda_g = 300;

% seed_s = 16; seed = 21; Values for PRE blob paper
seed_s=16;
seed=21;
Sg = 0.00001;
phi = 0.82;
phi_g=Sg*phi;
filename=['pattern_' num2str(phi) '_' num2str(lambda_s) '_' num2str(seed_s)]
RandStream.setGlobalStream(RandStream('mt19937ar','seed',seed_s))

```

```

fmoy= 0;
    m=rand(ny,nx);
F=fft2(m);
P=F.*conj(F);
x_values = 0:.01:8;
kx=1:nx;
ky=1:ny;
dkx = (2*pi)/nx;
dky = (2*pi)/ny;
    kx=dkx*(mod(kx + nx/2+nx,nx)-nx/2-1);
    ky=dky*(mod(ky + ny/2+ny,ny)-ny/2-1);
    KX = repmat(kx',1,nx);
    KY = repmat(ky,ny,1);
%
    normK=sqrt( (KX.^2 + KY.^2) );
    k0 = pi / lambda_s;
    H = exp( - normK.^2 / k0^2 );
    W = H.*conj(F);
w=real(ifft2(W));
sigw=std(w(:));
w=sigma*w/sigw;
mw=mean(w(:));
w=w -mw + fmoy;
W=w;
    Wn=sort((W(:))) ;
    th=Wn(int32(phi*nx^2));

figure(1) %Reconstructed
    w=1-w;
    imagesc(w)
    axis([0 nx 0 ny])
axis square
xlabel('(a)','fontsize',24)
set(gca,'DataAspectRatio',[1 1 1],...
    'PlotBoxAspectRatio',[1 1 1],'FontSize',16)
c=colormap('gray')
brighten(0.1);

```

```

w=1-w;
saveas(gcf,'renstruced.eps', 'psc2')

figure(2) %Only solid
w(w<th)=0;
w(w~=0)=1;
w=1-w;
imagesc(w)
axis([0 nx 0 ny])
axis square
xlabel('          (b)', 'fontSize', 24, 'HorizontalAlignment', 'left')
set(gca, 'DataAspectRatio', [1 1 1], ...
    'PlotBoxAspectRatio', [1 1 1], 'FontSize', 16)
c=colormap('gray')
brighten(0.1);
saveas(gcf, 'solid.eps', 'psc2')
mean(w(:));
S=w;
[L num]=bwlabel(w==0);
imagezoom=w(1:500,1:500);
extendX=round((346/3000)*nx); %length of flow distribution regions in pixels
centralY=round((1200/3000)*ny); %width of flow region in pixels
% image1=[w(1201:2400,end-(extendX-1):end) w(1201:2400,:) w(1201:2400,1:extendX)];
image1=[w(1:centralY,end-(extendX-1):end) w(1:centralY,:) w(1:centralY,1:extendX)];
x=1:extendX;
inletRegionWidth=round(centralY/6); % The width (1/6) of the flow ditribution region
centralY=6*inletRegionWidth;
diag1=round((inletRegionWidth/(extendX-1))*x);
image1=[w(1:centralY,end-(extendX-1):end) w(1:centralY,:) w(1:centralY,1:extendX)];
for i=1:extendX
    for j=1:inletRegionWidth
        if(j>=diag1(i))
            r(j,i)=0;
        else
            r(j,i)=1;
        end
    end
end
end

```

```

end
sideR=[r;flipud(r);r;flipud(r);r;flipud(r)];
sideL=fliplr(sideR);
imageLside(1:centralY,1:extendX)=image1(1:centralY,1:extendX);
imageLside(sideL==1)=0;
imageRside(1:centralY,1:extendX)=image1(1:centralY,end-(extendX-1):end);
imageRside(sideR==1)=0;
%M=ones(1200,3692);
%M(:,1:346)=(1-sideL);
%M(:,end-345:end)=(1-sideR);
%imagesc(image1.*M)
image1(1:centralY,1:extendX)=imageLside;
image1(1:centralY,end-(extendX-1):end)=imageRside;
image2(size(image1,1)+100,size(image1,2)+100)=0;
image2(51:size(image1,1)+50,51:size(image1,2)+50)=image1(1:end,1:end);

figure(3)
imagesc(image2)
axis image
colormap('gray')
fig=gcf;
%saveas(fig,[filename '.tif'],'tiff')
print(fig,[filename '.tif'],'-dtiff','-r600')
stats = regionprops(image2==0,'Centroid','Area');
figure
% hist(log(sort([stats(2:end).Area])),30);
[counts,centers] = hist(log(sort([stats(2:end).Area])),20);
bar(centers,count./(length([stats(2:end).Area]).*gradient(centers)))
length([stats.Area])
shg
x=log(sort([stats(2:end).Area]));
% pd = fitdist(x,'Normal')
% sqrt(exp(pd.mu))
% x=(sort([stats(2:end).Area]));
pd = fitdist(x,'Normal')
%Mean size of log normal distribution
meandist=exp(pd.mu+pd.sigma^2/2);

```

```

% sqrt(exp(pd.mu))
hold all
x_values = 0:.01:8;
y = pdf(pd,x_values);
plot(x_values,y)
hold off
CC = bwconncomp(image2==0);
L=labelmatrix (CC);
figure
imshow(label2rgb(L))
figure
widthrl=120; % mm
widthpx=centralY; %1200
hist(sqrt(sort([stats(2:end).Area]))'*widthrl/widthpx,20)
xlabel('Size [mm]')
ylabel('Obstacle count')
%% stl of initial domain - practically zoom at the upper left corner
% 1-500 of full size
depth=-0.4; %mm
Ysize=50; %mm
Xsize=size(imagezoom,2)/size(imagezoom,1)*Ysize; %mm
dY=Ysize/size(imagezoom,1); %Resolution in mm
[xx,yy]=meshgrid(dY:dY:Xsize,dY:dY:Ysize);
surf(xx,yy,imagezoom*depth,'EdgeColor','none')
axis equal
surf2stl([filename '_window.stl'],xx,yy,depth*imagezoom)
%% stl of final domain
% Create stl file by assing a size of dY to pixels
% and setting drilling depth
depth=-0.45; %mm
Ysize=80; %mm
Xsize=size(image2,2)/size(image2,1)*Ysize; %mm
dY=Ysize/size(image2,1); %Resolution in mm
[xx,yy]=meshgrid(dY:dY:Xsize,dY:dY:Ysize);
surf(xx,yy,image2*depth,'EdgeColor','none')
axis equal
surf2stl([filename '_full.stl'],xx,yy,depth*image2)

```

6. Σχόλια

Από το διάγραμμα 7, εξάγουμε το εξής συμπέρασμα: Δυστυχώς δεν πραγματοποιήσαμε πειράματα αποστράγγισης και σε άλλες ογκομετρικές παροχές για να διαπιστώσουμε πως διαμορφώνονται τα κανάλια ροής και συν επαγωγικά πως μεταβάλλεται η σχετική διαπερατότητα.

7. Βιβλιογραφία – Πηγές

- 1)A lattice Boltzmann study of viscous coupling effects in immiscible two-phase flow in porous media- Andreas G. Yiotis a, John Psihogios a,b, Michael E. Kainourgiakis a, Aggelos Papaioannou b, Athanassios K. Stubos a
- 2)Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media By ROLAND LENORMAND, ERIC TOUBOUL and CESAR ZARCONI
- 3) History effects on nonwetting fluid residuals during desaturation flow through disordered porous media Thibaud Chevalier,* Dominique Salin, and Laurent Talon and Andreas G. Yiotis
- 4)Pore-scale effects during the transition from capillary- to viscosity-dominated flow dynamics within microfluidic porous-like domains A.Yiotis , N. K. Karadimitriou , I. Zarikos & H. Steeb
- 5) Μηχανική Κοιτασμάτων Υδρογονανθράκων Ανδρέας Γιώτης - Δημήτρης Μαρινάκης (Κάλλυπος)
- 6)<https://www.reviversoft.com/el/file-extensions/stl>
- 7)Διπλωματική Χατζιδάκη Ειρήνη - [Chatzidaki Eirini Dip 2019.pdf - Institutional Repository](#)
- 8)Διπλωματική εργασία των Μαραζιώτη – Μπαχταλία - [Marazioti-Bachtalia Dip 2021.pdf - Ιδρυματικό Αποθετήριο](#)