



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ ΣΕ  
ΠΟΡΩΔΗ ΜΕΣΑ**

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**ΠΑΛΕΓΑ Χ. ΧΡΙΣΤΙΝΑ**  
ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
**ΧΡΥΣΙΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009  
ΠΑΤΡΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πατρών “Υδάτινοι Πόροι και Περιβάλλον”. Η παρούσα διατριβή διήρκησε περίπου δυο χρόνια, από τον Νοέμβρη του 2007 έως τον Σεπτέμβρη του 2009.

Επιβλέπων διετέλεσε ο κος Κωνσταντίνος Χρυσικόπουλος, Καθηγητής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και με καθοδήγησε με το σωστότερο τρόπο προκειμένου να φέρω εις πέρας την παρούσα μελέτη.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής και συγκεκριμένα τον κο Αλέξανδρο Δημητρακόπουλο, Καθηγητή και τον κο Παναγιώτη Γιαννόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην επιτροπή.

Πολύ σημαντική και αποτελεσματική ήταν η συνεργασία μου με τον κο Ιωάννη Μαναριώτη, Λέκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, τον οποίο και ευχαριστώ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Χ. Τσακίρογλου, Ερευνητή του ΙΤΕ – Ε.Ι.ΧΗ.Μ.Υ.Θ. για τις πολύτιμες συμβουλές του, την παροχή επιστημονικού υλικού και την εργαστηριακή υποστήριξη.

Ευχαριστώ επίσης τον κο Χ. Παρασκευά, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, που ήταν πρόθυμος να βοηθήσει σε ότι χρειάστηκα.

Την Δρ. Βαρβάρα Συγγούνη, Ερευνήτρια του ΙΤΕ – Ε.Ι.ΧΗ.Μ.Υ.Θ., ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθειά της, καθώς και για το χρόνο που μου διέθεσε.

Τον Dr. Matthew Thomas για την βοήθεια που μου προσέφερε.

Τους φοιτητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, Μαριάνθη Ποδηματά, Φωτεινή Παπανούση και Δημήτρη Μαρούπα για την άψογη συνεργασία και το άριστο κλίμα σε διαπροσωπικό επίπεδο καθ’ όλη τη διάρκεια των μαθημάτων.

Οφείλω ακόμη να ευχαριστήσω τα άτομα του εργαστηρίου Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος για την συνεργασία και για την αμέριστη συμπαράσταση καθ’ όλη τη διάρκεια της εκτέλεσης των πειραμάτων.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Κ. Κοράκη, Α. Σκέντο, Μ. και Κ. Παπανικολάου, για την προσωπική συμβολή τους στην παρούσα διατριβή.

Φυσικά, ένα πολύ μεγάλο μέρος της «ευθύνης» για όλους τους στόχους που διεκπεραιώνω στη ζωή μου, το φέρουν οι φίλοι μου και κυρίως η οικογένειά μου, τους οποίους και θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος για την αμέριστη συμπαράστασή τους σε ό,τι κάνω.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 2.1:</b>	Η εξελικτική πορεία της υδροδυναμικής διασποράς.....	11
<b>Σχήμα 2.2:</b>	Στοιχειώδης όγκος ελέγχου.....	13
<b>Σχήμα 5.1:</b>	Διάταξη για τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής σε γυάλινα δοκίμια και σε συνθήκες ορατού φωτός.....	84
<b>Σχήμα 6.1:</b>	Καμπύλη βαθμονόμησης πειραμάτων ορατού φωτός.....	93
<b>Σχήμα 6.2:</b>	Καμπύλη βαθμονόμησης πειραμάτων υπεριώδους φωτός.....	94
<b>Σχήμα Π.Α.1:</b>	Τετραγωνικά κελιά του δικτύου πόρων.....	122
<b>Σχήμα Π.Α.2:</b>	Διάγραμμα μήκους με συγκέντρωση πυριτίου.....	128
<b>Σχήμα Π.Β.1:</b>	Διαγράμματα μεταβολής της πίεσης με το χρόνο σε διαφορετικές παροχές.....	132
<b>Σχήμα Π.Β.2:</b>	Διαγράμματα μεταβολής της πίεσης με το χρόνο σε διαφορετικές παροχές.....	133
<b>Σχήμα Π.Β.3:</b>	Διάγραμμα συσχέτισης της πίεσης σε συνάρτηση με τη παροχή σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης.....	133



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 3.1:</b>	α) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1mm, β) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1,5mm.....	28
<b>Εικόνα 3.2:</b>	α) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1mm, β) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1,5mm.....	29
<b>Εικόνα 3.3:</b>	Μοντέλο ανομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1mm και 1,5mm.....	29
<b>Εικόνα 3.4:</b>	Μοντέλο θαλάμων - λαιμών με σφαιρικούς πόρους διαμέτρου 1mm και κυλινδρικούς σωληνίσκους πάχους 0,5mm.....	30
<b>Εικόνα 3.5:</b>	Απεικόνιση πορώδους του μοντέλου θαλάμων λαιμών.....	30
<b>Εικόνα 3.6:</b>	Έκθεση σε υπεριώδες φως.....	32
<b>Εικόνα 3.7:</b>	Φωτογραφία του δοκιμίου που προκύπτει μετά από τη διαδικασία που περιγράφηκε.....	33
<b>Εικόνα 3.8:</b>	Οθόνη ελέγχου του Nabertherm.....	35
<b>Εικόνα 3.9:</b>	Φωτογραφία του φούρνου Nabertherm που χρησιμοποιήθηκε για την πυροσυσσωμάτωση των γυάλινων δοκιμίων.....	37
<b>Εικόνα 3.10:</b>	Φωτογραφία του τελικού δοκιμίου.....	37
<b>Εικόνα 5.1:</b>	Φωτογραφίες μετά την εισαγωγή του ιχνηθέτη σε χρονικές στιγμές (α) 1 min, (β) 13 min, (γ) 25 min, (δ) 37 min, (ε) 49 min και (στ) 61 min.....	86
<b>Εικόνα 5.2:</b>	Φωτογραφίες μετά την εισαγωγή του ιχνηθέτη σε χρονικές στιγμές (α) 1 min, (β) 4 min, (γ) 7 min, (δ) 10 min, (ε) 13 min και (στ) 16 min.....	86
<b>Εικόνα 5.3:</b>	Διάταξη για τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής σε γυάλινα δοκίμια και σε συνθήκες υπεριώδους φωτός.....	88

<b>Εικόνα 5.4:</b>	Φωτογραφίες μετά την εισαγωγή του ιχνηθέτη σε χρονικές στιγμές (α) 1 min, (β) 5 min, (γ) 9 min, (δ) 13 min, (ε) 17 min και (στ) 21 min.....	89
<b>Εικόνα 5.5:</b>	Φωτογραφίες μετά την εισαγωγή του ιχνηθέτη σε χρονικές στιγμές (α) 1 min, (β) 3 min, (γ) 5 min, (δ) 7 min, (ε) 9 min και (στ) 11 min.....	90
<b>Εικόνα Π.Α.1:</b>	Τοπογραφική αποτύπωση του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 33x.....	124
<b>Εικόνα Π.Α.2:</b>	Secondary electron image (SEI) του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 33x.....	124
<b>Εικόνα Π.Α.3:</b>	Τοπογραφική αποτύπωση και SEI του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 33x.....	125
<b>Εικόνα Π.Α.4:</b>	SEI του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 15x.....	125
<b>Εικόνα Π.Α.5:</b>	SEI του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 65x.....	126
<b>Εικόνα Π.Α.6:</b>	Τοπογραφική αποτύπωση και SEI από την αριστερή πλευρά ενός τετραγωνικού κελιού του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 200x και με χρήση της μεθόδου Line Scan.....	126
<b>Εικόνα Π.Α.7:</b>	Τοπογραφική αποτύπωση και SEI από την αριστερή πλευρά ενός τετραγωνικού κελιού του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 200x και με χρήση της μεθόδου Line Scan σε μεγαλύτερη επιφάνεια.....	127
<b>Εικόνα Π.Α.8:</b>	Τοπογραφική αποτύπωση και SEI από τη δεξιά πλευρά ενός τετραγωνικού κελιού του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 200x και με χρήση της μεθόδου Line Scan.....	127
<b>Εικόνα Π.Α.9:</b>	Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του SEM.....	128
<b>Εικόνα Π.Β.1:</b>	Πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής σε γυάλινα δοκίμια.....	131

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 6.1:</b>	Αποτελέσματα πρότυπων διαλυμάτων του κόκκινου δείκτη.....	92
<b>Πίνακας 6.2:</b>	Αποτελέσματα πρότυπων διαλυμάτων της ουρανίνης.....	93
<b>Πίνακας 6.3:</b>	Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,2.7612).....	104
<b>Πίνακας 6.4:</b>	Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,1.0452).....	105
<b>Πίνακας 6.5:</b>	Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(9.0012,2.7612).....	106
<b>Πίνακας 6.6:</b>	Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,2.7612).....	107
<b>Πίνακας 6.7:</b>	Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,1.0452).....	108
<b>Πίνακας 6.8:</b>	Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(9.0012,2.7612).....	109
<b>Πίνακας 6.9:</b>	Αποτελέσματα υπολογισμού της διασποράς των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,2.7612).....	111
<b>Πίνακας 6.10:</b>	Αποτελέσματα υπολογισμού των συντελεστών τάσεων διασποράς των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,1.0452).....	111

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα πορώδη υλικά είναι αρκετά διαδεδομένα στην καθημερινή ζωή, στις τεχνολογικές εφαρμογές και στο φυσικό κόσμο. Με την εξαίρεση των μετάλλων, ορισμένων πετρωμάτων μεγάλης πυκνότητας και ορισμένων πλαστικών, όλα τα στερεά υλικά είναι πορώδη σε κάποιο βαθμό. Η πορώδης δομή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα φαινόμενα μεταφοράς, διάχυσης και διφασικής ροής που λαμβάνουν χώρα στους πόρους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η μελέτη της μεταφοράς ρύπων (κόκκινου δείκτη και ουρανίνης) σε πορώδες μέσο, σε συνθήκες ορατού και υπεριώδους φωτός αντίστοιχα. Αρχικά, κατασκευάστηκε δισδιάστατο μοντέλο δικτύων πόρων σε γυάλινα δοκίμια σύμφωνα με τη φωτολιθογραφική μέθοδο (M. Mc Kellar and N.C Wardlaw, 1982). Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για κάθε έναν ιχνηθέτη διαφορετικής συγκέντρωσης υπό διαφορετική παροχή νερού, έτσι ώστε να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς τους. Κατά τη διάρκεια του πειράματος πάρθηκαν φωτογραφίες ανά τακτά χρονικά διαστήματα υπολογίζοντας την ένταση του χρώματος ή του φθορισμού του ιχνηθέτη, οι οποίες και επεξεργάστηκαν. Τέλος, επιλύθηκε η εξίσωση Navier-Stokes σε δύο διαστάσεις.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα πορώδη υλικά και στις χρήσεις τους. Επιπλέον, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος της μεταφοράς μάζας σε πορώδη μέσα.

Συνεχίζοντας, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή των μηχανισμών μεταφοράς μάζας, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα φαινόμενα της διάχυσης, συμμεταφοράς και διασποράς αυτής μέσα σε πορώδη υλικά. Επιπλέον, περιγράφονται οι εξισώσεις και οι λύσεις που διέπουν τα παραπάνω φαινόμενα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται η τεχνική κατασκευής του δοκιμίου και τα στάδια που ακολουθήθηκαν. Τα δοκίμια αυτά καθιστούν εφικτή, σε πρώτη φάση, την οπτική παρατήρηση, η οποία και διευκολύνει την κατανόηση των φαινομένων που επικρατούν στους πόρους και συμβάλλει στην εξαγωγή ουσιαστών συμπερασμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Comsol Multiphysics version 3.4 για την επίλυση της εξίσωσης Navier-Stokes σε δύο διαστάσεις, ώστε να υπολογιστεί η κατανομή των ροών των ταχυτήτων μέσα σε ένα ακόρεστο μοντέλο, αξιοποιώντας την αξονική συμμετρία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφεται η προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας και αναφέρεται ο τεχνικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της. Περιγράφονται όλα τα στάδια του πειράματος με λεπτομέρειες στις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Κατά τη διάρκεια αυτού, πάρθηκαν φωτογραφίες ανά τακτά χρονικά διαστήματα και υπολογίστηκε μέσω της έντασης του χρώματος ή του φθορισμού του ιχνηθέτη η συγκέντρωσή του σε κάθε χρονική στιγμή και θέση.

Στο έκτο κεφάλαιο επεξεργάστηκαν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας με τη βοήθεια των προγραμμάτων Matlab 7.1 και Igor Pro. Τα αποτελέσματα αυτά αναλύθηκαν και εξήχθησαν συμπεράσματα και υποδείξεις για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου.

Τέλος, ακολουθούν τα παραρτήματα Α, Β και Γ στα οποία περιέχονται ο προσδιορισμός πορώδους του δοκιμίου, τα πειράματα μονοφασικής ροής του νερού για τον υπολογισμό της διαπερατότητας του πορώδους δοκιμίου, καθώς και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των φωτογραφιών (σε συνθήκες ορατού και υπεριώδους φωτός), αντίστοιχα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΠΡΟΛΟΓΟΣ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

##### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	2
2.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	3

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

##### ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ

2.1 ΔΙΑΧΥΣΗ.....	7
------------------	---

2.2 ΣΥΜΜΕΤΑΦΟΡΑ.....	9
----------------------	---

2.3 ΔΙΑΣΠΟΡΑ.....	10
-------------------	----

2.3.1 Μηχανική διασπορά.....	10
------------------------------	----

2.3.2 Υδροδυναμική διασπορά.....	11
----------------------------------	----

2.4 ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΟΓΚΟ ΕΛΕΓΧΟΥ-ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΜΜΕΤΑΦΟΡΑΣ- ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ.....	13
--	----

2.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΛΟΓΩ	16
--	----

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΣΕ ΕΔΑΦΙΚΟΥΣ ΚΟΚΚΟΥΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ..	
--	--

2.6 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΣΥΜΜΕΤΑΦΟΡΑΣ –	18
---	----

ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ.....	
----------------	--

2.6.1 Συνοριακές συνθήκες τύπου I.....	18
--	----

2.6.2 Συνοριακές συνθήκες τύπου II.....	19
---	----

2.6.3 Συνοριακές συνθήκες τύπου III.....	20
--	----

2.7 ΛΥΣΕΙΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ	21
--	----

ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΣΥΧΝΑ ΕΜΦΑΝΙΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	
--	--

2.7.1 Στιγμαία εισαγωγή μικρής ποσότητας σε μονοδιάστατο πεδίο ροής.....	21
--	----

2.7.2 Συνεχής εισαγωγή ουσίας σε δισδιάστατο πεδίο ροής.....	21
--	----

2.7.3 Στιγμαία εισαγωγή μικρής ποσότητας σε δισδιάστατο πεδίο ροής	22
--	----

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

##### ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
-------------------	----

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	26
--------------------------------	----

3.2.1 Επιλογή και σχεδιασμός μοντέλων δικτύων πόρων.....	28
--	----

3.2.2 Φωτολιθογραφική μέθοδος κατασκευής γυάλινων δοκιμίων.....	31
3.2.3 Κατασκευή εισόδων- εξόδων στο γυαλί.....	34
3.2.4 Πυροσυσσωμάτωση και τελειοποίηση γυάλινων δοκιμίων.....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	
<b>ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΡΟΗΣ NAVIER-STOKES</b>	38
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	39
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΜΕΝΟΥ.....	40
4.2.1 Ο οδηγός πλοήγησης.....	40
4.2.2 Η επιφάνεια εργασίας.....	41
4.3 ΠΟΡΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	44
4.3.1 Διατύπωση του προβλήματος.....	44
4.3.2 Στάδια επίλυσης.....	45
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	77
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>	
<b>ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ</b>	78
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	79
5.2 ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	80
5.3 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	82
5.3.1 Πειράματα σε ορατό φως.....	82
5.3.1.1 Προετοιμασία πρότυπων διαλυμάτων.....	82
5.3.1.2 Προετοιμασία πειραμάτων.....	82
5.3.1.3 Λήψη φωτογραφιών.....	85
5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΥΠΕΡΙΩΔΕΣ ΦΩΣ.....	87
5.4.1 Προετοιμασία πρότυπων διαλυμάτων.....	87
5.4.2 Προετοιμασία πειραμάτων.....	87
5.4.3 Λήψη φωτογραφιών.....	88
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>	
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	91
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	92
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ.....	92
6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	95
6.3.1 Αποτελέσματα πειραμάτων σε ορατό φως.....	95

6.3.2 Αποτελέσματα πειραμάτων σε υπεριώδες φως.....	99
6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	103
6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	114
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	117
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	121
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β</b>	130
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ</b>	135



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Τα πορώδη υλικά είναι παρόντα σε πολλές διεργασίες και παρουσιάζουν ενδιαφέρον τόσο από πρακτική όσο και από θεωρητική πλευρά. Σχετίζονται με διεργασίες που αφορούν τη γεωργία, την επιστήμη των τροφίμων, τη βιοιατρική, την οικοδομική για τη σύνθεση νέων κεραμικών υλικών και χημικών ειδών, την αποκατάσταση των εδαφών, στην κονιομεταλλουργία και τη βιομηχανία πετρελαίου.

Τα πορώδη υλικά συναντώνται σε πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία πετρελαίου όπως για παράδειγμα κατά την ανάκτηση του εναπομείναντος πετρελαίου μετά το πέρας διεργασιών πρωτογενούς και δευτερογενούς ανάκτησης πετρελαίου. Επιπροσθέτως χρησιμοποιούνται σε μελέτες που αφορούν την αποθεραπεία του μολυσμένου υδροφόρου ορίζοντα από ρύπους.

Για τη μελέτη των υπογείων υδάτων και την αποκατάσταση του μολυσμένου υδροφόρου ορίζοντα από υγρά απόβλητα, διεξάγονται πειράματα ταυτόχρονης ροής δυο μη αναμειξιμων ρευστών μέσω πορωδών μέσων σε μεταβατική κατάσταση, ως εκτόπιση του ενός ρευστού από το άλλο.

Ως **διαπερατά πορώδη** χαρακτηρίζονται τα υλικά που έχουν την ικανότητα αγωγής ρευστών φάσεων μέσα από τη μάζα τους με ιξώδη ροή, διαμέσου ενός δικτύου πόρων που συνδέονται μεταξύ τους και με τα σύνορα του μέσου. **Κλειστός πορώδης όγκος** καλείται ένα πορώδες μέσο το οποίο διαθέτει δίκτυο πόρων χωρίς να συνδέεται με το περιβάλλον. Ένας κλειστός πορώδης όγκος ή ένα μέσο χωρίς πόρους καλείται **αδιαπέρατο** υλικό. Στην περίπτωση της εκτόπισης, το εκτοπίζον ρευστό καλείται **εισβολέας** ενώ το εκτοπιζόμενο **υπερασπιστής**.

## 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα μικρομοντέλα είναι διαπερατά δίκτυα πόρων και σημείων συγκέντρωσης που προσομοιάζουν κάποιες από τις πολυπλοκότητες των φυσικών πορώδων μέσων. Η παρατήρησή τους μπορεί να βελτιώσει την κατανόηση της ροής και της διαδικασίας μεταφοράς σε μικρής κλίμακας πορώδη μέσα, αναγνωρίζοντας και περιγράφοντας μηχανισμούς σε επίπεδο πόρων. Από την εισαγωγή τους στην έρευνα, τα μικρομοντέλα χρησιμοποιήθηκαν εντατικά για να εξετάσουμε και να επεξηγήσουμε μεθόδους αποκατάστασης υπολειμματικών υπό-επιφανειακών καταλοίπων, σε πετρελαϊκά μηχανικά πεδία. Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας των Corapcioglu and Fedirchuk (1999) ήταν καθαρά παρατηρητικό, περιγράφοντας τη ροή του ρευστού σε πορώδες μέσο σε μικρο-κλίμακα, παρά ποσοτικής ανάλυσης.

Το αντικείμενο της μελέτης των Corapcioglu and Fedirchuk (1999) ήταν να δημιουργηθεί ένα μικρομοντέλο με γυάλινα σφαιρίδια σε πρωτότυπη σχεδίαση, να παρατηρηθεί δισδιάστατη μεταφορά διαλύματος και να ποσοτικοποιηθούν τα πειραματικά αποτελέσματα. Η μελέτη του μικρομοντέλου με γυάλινα σφαιρίδια κρίθηκε πρακτικά εφαρμόσιμη πειραματική μέθοδος, για την ποσοτικοποίηση μεταφοράς ρευστού, συγκρινόμενη με παραδοσιακά, γυάλινης κατασκευής, μικρομοντέλα.

Η διασπορά των κολλοειδών σε πορώδες μέσο είναι αποτέλεσμα διαφορετικών διαδρομών και ταχυτήτων, αναπτυγμένα από τα ίδια τα κολλοειδή. Εξετάστηκε σε κλίμακα πόρων από τους Auset and Keller (2004) η επίδραση του σωματιδίου και το μέγεθος των πόρων στη διασπορά κολλοειδών, χρησιμοποιώντας κορεσμένα με νερό μικρομοντέλα. Τα μικρομοντέλα αυτά παρήχθησαν με τη χρήση polydimethylsiloxane (PDMS), χρησιμοποιώντας μια φωτολιθογραφική τεχνική που επιτρέπει τη δημιουργία διαπερατών μορφών που έχουν διαστάσεις όμοιες με αυτές της κλίμακας των πόρων. Τέσσερα είδη κολλοειδών μεταφέρθηκαν σε διαφορετικές ολικές πιέσεις και η ανάλυση φωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της τροχιάς του σωματιδίου, του χρόνου παραμονής και του συντελεστή διασποράς μέσω των μικρομοντέλων. Το μέγεθος της διασποράς σε κάθε δοθείσα ροή υγρού, βρέθηκε ότι ελέγχεται από τη γεωμετρία των πόρων και το σχετικό μέγεθος των κολλοειδών, σε συσχέτιση και με τους λαιμούς των πόρων. Ο συντελεστής διασποράς και διάχυσης μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος των κολλοειδών. Ο συντελεστής τάσης

διασποράς (dispersivity) είναι όχι απλά μια λειτουργία της γεωμετρίας των πόρων, αλλά εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά των κολλοειδών. Εξαιτίας του μεγέθους τους, τα μεγαλύτερα κολλοειδή κινούνται στους κεντρικούς λαιμούς, οδηγώντας σε μεγαλύτερες ταχύτητες, λιγότερες παρακάμψεις και έτσι μειώνεται η έκταση των χρόνων μεταφοράς. Αυτά τα αποτελέσματα δίνουν έμφαση στο ρόλο του σωματιδίου και του μεγέθους των πόρων στην κολλοειδή διασπορά και έχουν αξιοσημείωτα συμπεράσματα για την πρόβλεψη της κίνησης κολλοειδών σε κορεσμένα πορώδη μέσα.

Σημαντικοί πρόοδοι έχουν γίνει όσον αφορά στην πρόβλεψη της μεταφοράς κολλοειδών, με τη χρήση εργαστηριακών πειραμάτων και μελέτες πεδίων, καθώς και αριθμητικά μοντέλα (McDowell-Boyer et al., 1986, Hornberger et al., 1992, Johnson et al., 1996, McGechan et al., 2002). Ωστόσο, οι ακριβείς μηχανισμοί παραμένουν απροσδιόριστοι. Η πρώιμη ανακάλυψη της συγγένειας των κολλοειδών με τους συντηρητικούς ιχνηθέτες έχει παρατηρηθεί αρκετά, αλλά οι διαδικασίες που την ελέγχουν, δεν είναι καλώς προσδιορισμένες. Η διασπορά κολλοειδών μπορεί εν μέρει να εξηγηθεί με αποκλεισμό του μεγέθους των πόρων (Sirivithayapakorn and Keller, 2003, Bales et al., 1989, Dong et al., 2002, Harter et al., 2000). Ο αποκλεισμός αναφέρεται στο γεγονός ότι παρόλο που οι διαλυτοί ιχνηθέτες είναι επαρκώς μικροί (σε μέγεθος νανομέτρων ή μικρότεροι) για να κινηθούν σε μερικούς ή όλους τους πόρους του πορώδους μέσου, τα κολλοειδή, χάρις του φυσικού μεγέθους τους (μεγέθους εκατοντάδων ή χιλιάδων νανομέτρων), μπορεί να μην εισέλθουν στους πόρους.

Οι Theodoropoulou et al. (2003) ανέπτυξαν μια τεχνική υψηλής ανάλυσης για να ερμηνεύσουν τα πειράματα υδροδυναμικής διασποράς ρυπαντών σε διαπερατά γυάλινα πορώδη δοκίμια, που θεωρούνται ως αντιπροσωπευτικά μοντέλα των φυσικών πορωδών μέσων και ατομικών διαρρήξεων. Η τεχνική βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των αλλαγών του έντονου χρώματος που προκαλείται σε υδάτινο διάλυμα, εξαιτίας της έντονης ευαισθησίας ενός συστήματος που υποδεικνύεται από το pH. Εκτίμησαν τον διαμήκη και εγκάρσιο συντελεστή διασποράς σε σχέση με τον αριθμό Peclet. Οι συντελεστές διασποράς εκτιμήθηκαν ταιριάζοντας τη χωρική διασπορά της συγκέντρωσης διαλύματος από διαφορετικά τμήματα του δικτύου με τις αναλυτικές μεθόδους της εξίσωσης μεταφοράς μεταγωγής-διασποράς.

Υγρά μη υδατικής φάσης (NAPLs) μπορούν να μολύνουν υπόγειους υδροφόρους μέσω μηχανισμών μεταφοράς μεταξύ των οποίων η διάλυση των NAPL

(διάλυμα) στη ρευστή υγρή φάση (διαλύτης) και η απορρέουσα διασπορά των αδιάλυτων NAPL σε μεγάλες αποστάσεις στο εσωτερικό του δοχείου έτυχαν μεγάλης προσοχής (Bear et al.,1993).

Μια νέα μέθοδος αναπτύχθηκε από τους Thomas and Chrysikopoulos (2009) για την ακριβή μέτρηση *in situ* ιχνηθετών και συγκεντρώσεων κολλοειδών σε συμπαγείς στήλες. Η μέθοδος αποτελείται από στήλες με γυάλινα σφαιρίδια που έχουν περασθεί από υψηλές θερμοκρασίες (όχι λιωμένα). Ανά χρονικά διαστήματα πάρθηκαν ψηφιακές φωτογραφίες της στήλης κάτω από υπεριώδη πηγή φωτός, μετατρέποντας τις εντάσεις του φθορισμού του ιχνηθέτη ή των κολλοειδών σε συγκεντρώσεις. Η θερμαινόμενη διαδικασία εμπόδισε τις αλλαγές στη γεωμετρία του πορώδους μέσου κάνοντάς το ιδιαίτερα χρήσιμο για πειράματα μεταφοράς ρυπαντών σε συμπαγείς στήλες με την παρουσία σεισμικών δονήσεων ή ακουστικών κυμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:  
**ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**  
**ΜΑΖΑΣ**

## 2.1 ΔΙΑΧΥΣΗ (Diffusion)

Στο συγκεκριμένο μηχανισμό μεταφοράς, μια ουσία κινείται στον αέρα ή στο νερό από μία τοποθεσία με σχετικά μεγάλη συγκέντρωση σε μία άλλη με μικρότερη συγκέντρωση λόγω τυχαίων κινήσεων των χημικών μορίων (μοριακή διάχυση – *molecular diffusion*), του μέσου που μεταφέρει την ουσία (τυρβώδης διάχυση – *turbulent diffusion*) ή λόγω συνδυασμού των δύο (Hemond & Fechner, 1994). Κατά συνέπεια, εξαρτάται από το μοριακό βάρος και τη δομή των μορίων και όχι από την κατεύθυνση (Χρυσικόπουλος, 2007). Η τυρβώδης διάχυση αποτελεί μια σημαντική μορφή μεταφοράς στα επιφανειακά νερά και στον αέρα. Εν τούτοις, στο υπεδάφιο περιβάλλον, οι τυπικές ταχύτητες υπόγειου νερού είναι τόσο χαμηλές ώστε η υπόγεια ροή συνήθως δεν υφίσταται τις τυρβώδεις επιδράσεις, που χαρακτηρίζουν τις κινήσεις των επιφανειακών υδάτων και του αέρα.

Η διάχυση είναι μια διαδικασία που οφείλεται αποκλειστικά στην ουσία, άρα για να συμβεί δε χρειάζεται ταχύτητα ροής. Με άλλα λόγια, ακόμα και στην περίπτωση που ένα υγρό είναι εντελώς ήρεμο και ανεμπόδιστο, το φαινόμενο της διάχυσης θα συμβαίνει εξαιτίας της ασταμάτητης, τυχαίας κίνησης των μορίων (θερμική κίνηση) (Hemond & Fechner, 1994, Miller & Hogan, 1997). Όσο πιο μεγάλη είναι η ποσότητα της ουσίας, τόσο πιο έντονες είναι οι επιδράσεις της διάχυσης. Ωστόσο, δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα σε συστήματα με μεγάλες ταχύτητες. Ιδιαίτερα, η μοριακή διάχυση έχει επίδραση σε χαμηλές ταχύτητες ή σε μεγάλες χρονικές περιόδους διαδρομής (Miller & Hogan, 1997).

Τόσο η μοριακή όσο και η τυρβώδης διάχυση περιγράφονται από τον πρώτο νόμο του Fick, ο οποίος δηλώνει ότι η μάζα του υγρού που διαχέεται είναι ανάλογη της διαφοράς (κλίσης) των συγκεντρώσεων και περιγράφεται μαθηματικά ως εξής :

$$J = - D \frac{\partial c}{\partial x}$$

όπου  $J$  : η ροή μάζας ανά μονάδα επιφάνειας ( $M/t L^2$ ),

$D$  : ο συντελεστής μοριακής διαχύσεως ( $L^2/t$ ) και

$\partial c/\partial x$  : η κλίση της συγκέντρωσης ( $M/L^3/L$ ).

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει κίνηση από περιοχές μεγάλης συγκέντρωσης προς περιοχές μικρότερης συγκέντρωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρώτος νόμος του Fick αδυνατεί να συμπεριλάβει τη μεταφορά διαλυμένης στο νερό ουσίας που οφείλεται σε διαφορές θερμοκρασίας ή πίεσης, οι οποίες συνεισφέρουν στη μεταφορά μάζας. Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται ο δεύτερος νόμος του Fick, ο οποίος εκφράζει τη μεταβολή της συγκέντρωσης χρονικά και δίδεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

όπου  $\frac{\partial c}{\partial t}$  : η αλλαγή της συγκέντρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο ( $M/L^3/T$ ) (Χρυσικόπουλος 2007, Καρατζάς).

Όσον αφορά τα πορώδη υλικά, η διάχυση προχωράει με πιο αργούς ρυθμούς σε σύγκριση με το νερό, λόγω του ότι τα ιόντα ταξιδεύοντας γύρω από τους πόρους ακολουθούν μακρύτερες διαδρομές. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιείται η πραγματική σταθερά διάχυσης  $D^* = \omega D_d$ , όπου  $\omega$  είναι μια σταθερά που σχετίζεται με το δαιδάλωδες των πόρων (tortuosity,  $T$ ), το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από το σχήμα της γραμμής ροής που ακολουθούν τα μόρια του νερού σε πορώδη μέσα. Το δαιδάλωδες των πόρων σε πορώδη υλικά είναι πάντα μεγαλύτερο της μονάδας, διότι η γραμμή ροής που ακολουθούν τα μόρια του νερού παρεκκλίνει γύρω από τα στερεά μόρια. (Καρατζάς).

Το φαινόμενο της διάχυσης έχει ως αποτέλεσμα μια διαλυμένη ουσία να εξαπλώνεται από το μέρος που εμφανίζεται προς το πορώδες ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχει ροή, όπως προαναφέρθηκε. Στην περίπτωση αυτή, η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας ακολουθεί κανονική ή Gaussian κατανομή, η οποία περιγράφεται από τη μέση τιμή της συγκέντρωσης  $C$  και το τετράγωνο της διακύμανσης  $\sigma_c^2$ . Επομένως, ο πραγματικός συντελεστής διάχυσης εκφράζεται εναλλακτικά ως εξής :  $D^* = \frac{\sigma_c^2}{2t}$  (Καρατζάς).



## 2.2 ΣΥΜΜΕΤΑΦΟΡΑ (Advection)

Εάν μια ουσία εισάγεται σε κινούμενο αέρα ή νερό, μεταφέρεται με ταχύτητα ίση με αυτή του κινούμενου μέσου. Ενώ μπορεί να συμβεί συγχρόνως διάχυση, το κέντρο μάζας της ουσίας κινείται με συμμεταφορά στη μέση ταχύτητα του μέσου (Hemond & Fechner, 1994). Στη περίπτωση που έχουμε υγρό μέσο η ποσότητα της μεταφερόμενης ουσίας εξαρτάται από την συγκέντρωσή της σε αυτό και την ποσότητα του υγρού που ρέει. Για μονοδιάστατη ροή σε μια κατά πλάτος τομή του πορώδους υλικού, η ποσότητα της ουσίας που μεταφέρεται ισούται με το γινόμενο της μέσης γραμμικής ταχύτητας (*average linear velocity*) με το ενεργό πορώδες (*effective porosity*). Ο πρώτος παράγοντας ( $v_x$ ) δεν είναι η μέση τιμή της ταχύτητας με την οποία κινούνται τα μόρια του υγρού κατά μήκος των γραμμών ροής, αλλά η τιμή της ροής του υγρού σε κατά πλάτος τομή ενός πορώδους υλικού. Ο δεύτερος όρος αποτελεί το πορώδες μέσω του οποίου υφίσταται η ροή χωρίς να περιλαμβάνει τους νεκρούς πόρους (Καρατζάς). Η μέση γραμμική ταχύτητα ( $v_x$ ) περιγράφεται από τον ακόλουθο τύπο σύμφωνα με τον Fetter, 1999 :

$$V_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl}$$

όπου  $K$  : η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T),

$n_e$  : το ενεργό πορώδες και

$dh/dl$  : η υδραυλική κλίση (L/L).

Ο ρυθμός με τον οποίο μια ουσία μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας συχνά εκφράζεται σε όρους **ροής μάζας** (flux density), η οποία ορίζεται ως η μάζα της ουσίας που μεταφέρεται κατά πλάτος μιας φανταστικής επιφάνειας μοναδιαίου εμβαδού ανά μονάδα χρόνου. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να συμπίπτει με ένα από τα όρια του όγκου ελέγχου (Hemond & Fechner, 1994). Η μονοδιάστατη ροή μάζας  $F_x$  λόγω οριζόντιας μεταφοράς είναι ίση με την ποσότητα του υγρού που ρέει επί τη συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών ( $F_x = v_x n_e C$ ) (Καρατζάς).

Η τελική μορφή της εξίσωσης για μονοδιάστατη οριζόντια μεταφορά είναι η ακόλουθη :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v_x \frac{\partial c}{\partial x}$$

## 2.3 ΔΙΑΣΠΟΡΑ (*Dispersion*)

### 2.3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ (*Mechanical Dispersion*)

Παρά το γεγονός ότι η τυρβώδης διάχυση αποτελεί μια σημαντική μορφή μεταφοράς στα επιφανειακά νερά και στον αέρα, στο υπεδάφιο περιβάλλον, οι τυπικές ταχύτητες υπόγειου νερού είναι τόσο χαμηλές ώστε η υπόγεια ροή συνήθως δεν υφίσταται τις τυρβώδεις επιδράσεις που χαρακτηρίζουν τις κινήσεις των επιφανειακών υδάτων και του αέρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ανάμιξη οφείλεται κυρίως στην κίνηση του νερού μέσω πολύπλοκων δομών που διέπουν τους πόρους (Hemond & Fechner, 1994). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **μηχανική διασπορά** (*mechanical dispersion*) και είναι δυνατό η ανάμιξη να συμβαίνει είτε κατά μήκος των διαδρομών της ροής (**διαμήκης διασπορά** – *longitudinal dispersion*), είτε κάθετα με την κατεύθυνση ροής, λόγω απόκλισης των μονοπατιών των πόρων (**εγκάρσια διασπορά** – *transverse dispersion*) (Καρατζάς).

Οι διαφορετικές ιδιότητες των πόρων επηρεάζουν άμεσα τη μεταφορά των ουσιών. Μια από αυτές είναι το *μέγεθος των πόρων*, το οποίο δύναται να ποικίλει αρκετά ώστε να εμποδίζει την ταχύτητα ενός μορίου σε σχέση με ένα άλλο στο ίδιο μέσο. Έτσι, όσο πιο μεγάλα είναι τα κενά ανάμεσα στους πόρους, τόσο πιο γρήγορα θα ρέει το νερό δια μέσου τους με αποτέλεσμα η διασπορά να είναι μεγαλύτερη (Καρατζάς). Το μήκος μιας διαδρομής επηρεάζει επίσης τη μεταφορά, αφού μεγαλύτερες διαδρομές καθυστερούν τη διέλευση του νερού καθώς και η τριβή ανάμεσα στους πόρους. Μια ουσία που κινείται κοντά στις πλευρές ενός πόρου μπορεί να επιβραδυνθεί λόγω τριβής σε σχέση με ένα άλλο που διασχίζει το κέντρο ενός πορώδους καναλιού (Miller & Hogan, 1997).

Η μηχανική διασπορά συνήθως χρησιμοποιείται μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο όπως η τυρβώδης διάχυση και η διασπορά σε επιφανειακά ύδατα. Αν υποθεθεί ότι η μηχανική διασπορά μπορεί να περιγραφεί από το νόμο της διάχυσης του Fick και ότι η ποσότητα της μηχανικής διασποράς είναι συνάρτηση της μέσης γραμμικής ταχύτητας, τότε μπορεί να εισαχθεί μια σταθερά. Συγκεκριμένα, εισάγεται ένας **συντελεστής δυναμικής διασποράς**,  $\alpha$ , (*dynamic dispersivity*), το γινόμενο του

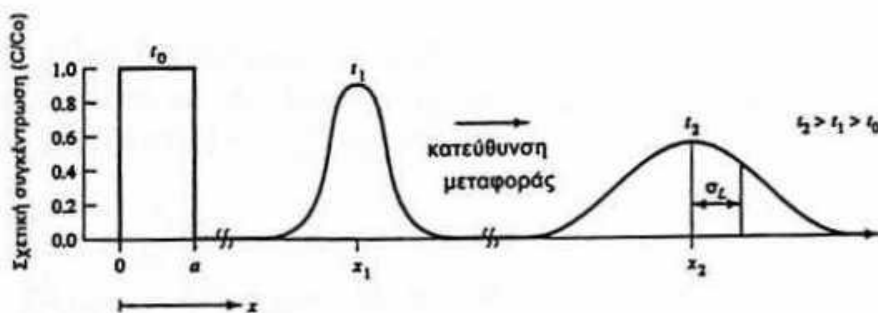
οποίου με τη γραμμική ταχύτητα,  $v$ , ορίζει τον συντελεστή μηχανικής διασποράς (Καρατζάς).

### 2.3.2 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ (Hydrodynamic Dispersion)

Όταν δύο υγρά που αναμιγνύονται εκτοπίζουν το ένα το άλλο σε ένα πορώδες μέσο, παρατηρείται μικροσκοπική ανάμιξη στη διεπιφάνεια των δύο υγρών και το μήκος της μεταβατικής ζώνης αυξάνει με την πάροδο του χρόνου (Χρυσικόπουλος, 2007). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υδροδυναμική διασπορά, το οποίο στην ουσία προσθέτει τον παράγοντα της μοριακής διαχύσεως στις επιδράσεις της μηχανικής διασποράς (Miller & Hogan, 1997). Ο συνδυασμός τους καθορίζει μια παράμετρο που ονομάζεται *συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς* (hydrodynamic dispersion coefficient) και εκφράζεται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$D_L = \alpha_L v_i + D^* \quad \text{και} \quad D_T = \alpha_T v_i + D^*$$

όπου  $D_L$  και  $D_T$ : οι σταθερές υδροδυναμικής διασποράς παράλληλη και κάθετη στην κύρια κατεύθυνση ροής και  
 $\alpha_L$  και  $\alpha_T$ : οι συντελεστές διαμήκους και εγκάρσιας δυναμικής διασποράς (Καρατζάς).



Σχήμα 2.1: Η εξελικτική πορεία της υδροδυναμικής διασποράς.

Στο παρακάτω σχήμα η μάζα διαλυμένης ουσίας με αρχική συγκέντρωση  $C_0$  εμφανίζεται στιγμιαία στον υδροφορέα τη χρονική στιγμή  $t_0$  και για διάστημα  $x=0+a$ . Αρχικά, το κινούμενο νερό παρασύρει τη μάζα της διαλυμένης ουσίας μαζί του, ενώ στην πορεία η τελευταία απλώνεται με αποτέλεσμα η μέγιστη συγκέντρωσή της να μειώνεται με το χρόνο, όπως δηλώνει το χρονικό διάστημα  $t_1-t_2$  του σχήματος. Από το μοντέλο της διάχυσης για υδροδυναμική διασπορά προκύπτει ότι η καμπύλη συγκέντρωσης θα έχει κανονική κατανομή που περιγράφεται από τον μέσο όρο και τη διακύμανση. Συνεπώς, οι σταθερές της διαμήκους και της εγκάρσιας υδροδυναμικής διασποράς περιγράφονται ως εξής :

$$D_L = \sigma_L^2 / 2t$$

και

$$D_T = \sigma_T^2 / 2t$$

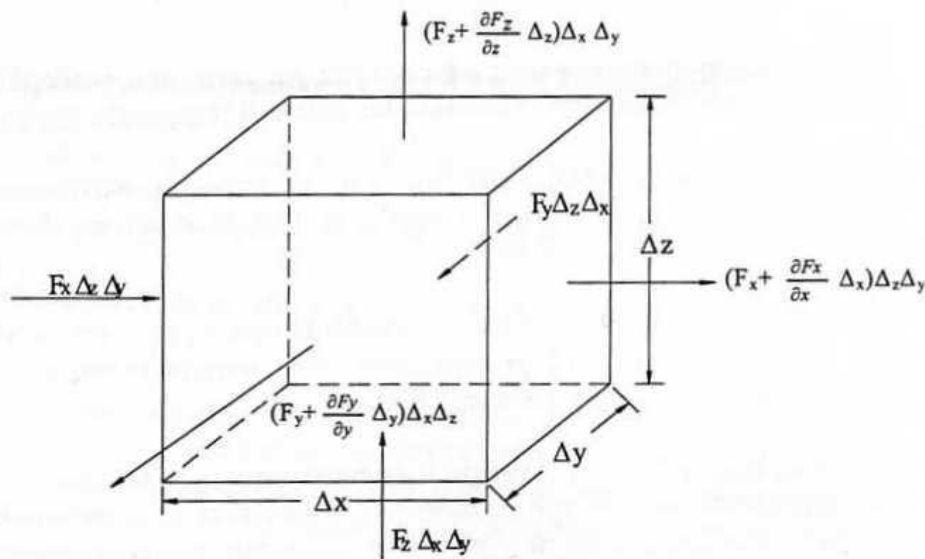
όπου  $t$ : ο χρόνος και

$\sigma_L^2$  και  $\sigma_T^2$ : οι διακύμανσεις της διαμήκους και εγκάρσιας διασποράς(Καρατζάς).

## 2.4 ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΟΓΚΟ ΕΛΕΓΧΟΥ – Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΜΜΕΤΑΦΟΡΑΣ – ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ (Advection-Dispersion Equation)

Η διατήρηση μάζας μπορεί να εκφραστεί και σε στοιχειώδη όγκο ελέγχου, που μαθηματικά θεωρείται σημειακός με τη βοήθεια της εξίσωσης συµμεταφοράς – διασποράς (advection – dispersion reaction) (Hemond & Fechner, 1994).

Βασική προϋπόθεση για τη διατύπωση της εξίσωσης είναι ότι το πορώδες υλικό είναι ομοιογενές, ισότροπο, κορεσμένο και οι συνθήκες ροής είναι τέτοιες ώστε να βρίσκει εφαρμογή ο νόμος του Darcy. Εν συνεχεία, θεωρείται ένας στοιχειώδης όγκος ελέγχου (representative elementary volume, REV), πάνω στον οποίο εξετάζονται οι ροές που εισέρχονται και εξέρχονται ανά μονάδα επιφάνειας (σχήμα ).



Σχήμα 2.2: Στοιχειώδης όγκος ελέγχου.

Η ουσία θα μεταφερθεί λόγω συµμεταφοράς και διασποράς προς την κατεύθυνση ροής ( $i$  κατεύθυνση). Ο όρος της συµμεταφοράς είναι  $v_i n_e C_d A$ , ενώ της διασποράς είναι  $n_e D_i \frac{\partial C}{\partial i} dA$ , όπου  $dA$  είναι το εμβαδό της καθέτου προς τη ροή διατομής. Η ολική μάζα διαλυμένης ουσίας ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω όρων.

Δηλαδή,

$$F_i = v_i n_e C - n_e D_i \frac{\partial C}{\partial i}$$

όπου το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η διασπορά λαμβάνει χώρα από περιοχές με μεγαλύτερη συγκέντρωση σε άλλες με μικρότερη.

Αν η παραπάνω εξίσωση γραφτεί για τον αντιπροσωπευτικό όγκο του σχήματος και για όλες τις κατευθύνσεις, προκύπτει ότι η συνολική μάζα που εισέρχεται είναι :

$$F_x dz dy + F_y dx dz + F_z dx dy$$

Η συνολική ποσότητα της ουσίας που εξέρχεται είναι:

$$\left( F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \right) dy dz + \left( F_y + \frac{\partial F_y}{\partial y} dy \right) dx dz + \left( F_z + \frac{\partial F_z}{\partial z} dz \right) dx dy$$

Η διαφορά ανάμεσα στην εισερχόμενη και εξερχόμενη μάζα στο στοιχειώδη όγκο ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την αλλαγή στην ποσότητα μάζας μέσα στον όγκο ελέγχου και είναι:

$$-\left( \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right) dx dy dz$$

Ο ρυθμός αλλαγής μάζας μέσα στον REV είναι  $n_e \frac{\partial C}{\partial t} dx dy dz$ . Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, ο ρυθμός αλλαγής της μάζας μέσα στον REV ισούται με τη διαφορά της εισερχόμενης και εξερχόμενης μάζας. Με άλλα λόγια, ισχύει :

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = n_e \frac{\partial C}{\partial t}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των  $F_x$ ,  $F_y$  και  $F_z$  στην παραπάνω εξίσωση και αφού το  $n_e$  έχει απαλειφθεί από τις δύο πλευρές, η εξίσωση παίρνει την τελική της μορφή :

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (v_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z C) \right] = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την τρισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας για ουσία που δεν αντιδρά με το πορώδες υλικό και δεν αποσυντίθεται βιολογικά ή ραδιενεργά (συντηρητική ουσία). Σε ένα ομοιογενές υλικό, οι συντελεστές  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  θα πρέπει να μένουν αμετάβλητοι με το χώρο. Εν τούτοις, λόγω του ότι η υδροδυναμική διασπορά είναι ένα φαινόμενο που εξαρτάται από την κατεύθυνση ροής, οι συντελεστές διαφέρουν.

Σε περιπτώσεις που η μέση γραμμική ταχύτητα  $v_x$  είναι ομοιόμορφη στο χώρο, η εξίσωση μεταφοράς μάζας για μονοδιάστατη ροή σε ομογενές και ισότροπο μέσο παίρνει τη μορφή :

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Για την ίδια περίπτωση, η εξίσωση μεταφοράς μάζας για δισδιάστατη ροή με κύρια κατεύθυνση ροής τη  $x$  δίνεται από τη σχέση :

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

## 2.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΣΕ ΕΔΑΦΙΚΟΥΣ ΚΟΚΚΟΥΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ

Μέχρι τώρα, οι εξισώσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί περιγράφουν τη μεταφορά ουσιών που ούτε φθείρονται με το χρόνο ούτε προσκολλώνται σε σωματίδια. Εν τούτοις, πολλές ουσίες προσκολλώνται σε κόκκους ή σε οξυδροξείδια του σιδήρου ή σε οργανικές επιστρώσεις των κόκκων. Εκτός από την προσκόλληση – προσρόφηση (adsorption), μια ουσία είναι δυνατόν να διαχυθεί μέσα σε ένα σωματίδιο (απορρόφηση – absorption). Κατά συνέπεια, η μεταφορά τέτοιων ουσιών επιβραδύνεται. Αυτή η συμπεριφορά περιγράφεται με τη χρήση ενός συντελεστή κατανομής  $K_d$  (distribution coefficient), ο οποίος σχετίζει την ποσότητα της ουσίας που προσροφάται με αυτή που διαλύεται στο νερό (Hemond & Fechner, 1994). Το φαινόμενο της προσρόφησης συχνά περιγράφεται μαθηματικά με τον τύπο Freundlich (ισόθερμη προσρόφηση). Δηλαδή :

$$S = K_d C^b$$

όπου  $S$  : η μάζα που προσροφάται ανά μονάδα στερεού όγκου του πορώδους μέσου και

$b$  : συντελεστής που προσδιορίζεται πειραματικά.

Αν υποθεθεί ότι υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στα  $S$  και  $C$  (δηλαδή για  $b=1$ ), τότε ισχύει  $S = K_d C$ . Επομένως, με μερική παραγωγή και επίλυση ως προς

$$K_d, \text{ ισχύει } K_d = \frac{\partial S}{\partial C}.$$

Αν  $\rho_b$  είναι η πυκνότητα των στερεών ανά μονάδα όγκου και  $n$  το πορώδες του μέσου ισχύει:

$$- \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t}$$



Σύμφωνα με το συνδυασμό των δύο παραπάνω εξισώσεων, προκύπτει η ακόλουθη μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας :

$$D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \left( 1 + \frac{\rho_b}{n} K_d \right)$$

Τέλος, αν οριστεί ο συντελεστής επιβράδυνσης  $R$  (retardation factor) ως  $R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{n}$ , η εξίσωση μεταφοράς μάζας παίρνει την ακόλουθη τελική μορφή :

$$D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial c}{\partial x} = R \frac{\partial c}{\partial t}$$

Πέραν της διαδικασίας της προσρόφησης, υπάρχει και άλλο ένα φαινόμενο που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαλυμένης ουσίας με την πάροδο του χρόνου. Αυτό είναι η βιοαποδόμηση (biodegradation) και αναφέρεται στη μετατροπή μιας οργανικής ένωσης σε μια άλλη μέσω μικροβιακής δράσης. Στην περίπτωση που η βιοαποδόμηση οδηγεί στη δημιουργία ανόργανων ενώσεων (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα, νερό, μεταλλικά άλατα), ονομάζεται μεταλλοποίηση (mineralization). Η τέλεια μεταλλοποίηση αφορά οξείδωση με τη χρήση οξυγόνου, αλλά μπορεί εξίσου να συμβεί και κάτω από ανοξικές συνθήκες (Hemond & Fechner, 1994).

Όσον αφορά τη μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας, λαμβάνοντας υπόψη τον όρο της αποσύνθεσης  $-\lambda C$  ( $\lambda$  = ρυθμός αποσύνθεσης,  $t^{-1}$ ), παίρνει την παρακάτω μορφή :

$$D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial c}{\partial x} - \lambda c = \frac{\partial c}{\partial t}$$

## 2.6 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΣΥΜΜΕΤΑΦΟΡΑΣ – ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

Η εξίσωση μεταφοράς μάζας είναι μια διαφορική εξίσωση, οπότε για να υπάρχει μοναδική λύση πρέπει να οριστούν κάποιες αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Υπάρχουν τριών τύπων συνοριακές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας. Η συνθήκη πρώτου τύπου αφορά σταθερή συγκέντρωση, η συνθήκη δεύτερου τύπου αναφέρεται σε σταθερή κλίση, ενώ η συνθήκη τρίτου τύπου σε σταθερή ροή μάζας.

### 2.6.1 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΥΠΟΥ I

Στην περίπτωση αυτή, η αρχική συγκέντρωση της ουσίας στο εξεταζόμενο τμήμα είναι μηδέν και σε κάποια χρονική στιγμή  $t$  εισέρχεται στο υπό εξέταση στοιχείο ουσία συγκέντρωσης  $C_0$ . Συνεπώς, οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες είναι οι εξής :

$$\begin{array}{ll} C(x,0) = 0, \text{ για } x \geq 0 & \text{αρχική συνθήκη} \\ C(0,t) = 0, \text{ για } t \geq 0 & \text{συνοριακή συνθήκη} \\ C(\infty,t) = 0, \text{ για } t \geq 0 & \text{συνοριακή συνθήκη} \end{array}$$

Σύμφωνα με τις συνθήκες αυτές και θεωρώντας ότι το υπό εξέταση στοιχείο είναι μια πειραματική στήλη με ομοιόμορφη άμμο, η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας έχει την ακόλουθη λύση :

$$C = C_0/2 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L-v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left( \frac{v_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L+v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right]$$

Η αδιάστατη μορφή της παραπάνω εξίσωσης είναι :

$$C_R(t_R, Pe) = 0,5 \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{Pe}{4t_R} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - t_R) \right] + \exp(Pe) \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{Pe}{4t_R} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + t_R) \right] \right\}$$

όπου  $t_R = v_x t/L$ ,  $C_R = C/C_0$ ,  $Pe = \text{αριθμός Peclet}$  και  $\operatorname{erfc} = \text{συνάρτηση σφάλματος}$ .

## 2.6.2 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΥΠΟΥ II

Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάγεται μια διαρροή από κανάλι, στο οποίο ρέει μολυσμένο νερό και καταλήγει σε έναν υπόγειο υδροφορέα. Ο ρυθμός διοχέτευσης του μολυσμένου νερού θεωρείται σταθερός και η μάζα της ουσίας που εισάγεται στον υδροφορέα ανάλογη της διάρκειας της διαρροής. Η αρχική συγκέντρωση της ουσίας που εισέρχεται είναι  $C_0$  και οι συνθήκες που επικρατούν είναι :

$$\begin{array}{ll}
 C(x,0) = 0, \text{ για } -\infty < x < \infty & \text{αρχική συνθήκη} \\
 \int_{-\infty}^{+\infty} n_s C(x,t) dx = C_0 n_s t, \text{ για } t > 0 & \text{συνοριακή συνθήκη} \\
 C(\infty,t) = 0, \text{ για } t \geq 0 & \text{συνοριακή συνθήκη}
 \end{array}$$

Η λύση της μονοδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας και η αδιάστατη μορφή της είναι ακριβώς ίδιες με αυτήν που ισχύει στις συνθήκες τύπου I με μόνη διαφορά το πρόσημο στο δεύτερο όρο της αγκύλης. Δηλαδή,

$$C = C_0/2 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2 \sqrt{D_L t}} \right) - \exp \left( \frac{v_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L + v_x t}{2 \sqrt{D_L t}} \right) \right]$$

και

$$C_R(t_R, Pe) = 0,5 \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{Pe}{4t_R} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - t_R) \right] - \exp(Pe) \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{Pe}{4t_R} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + t_R) \right] \right\}$$

Έχει προταθεί να παραλείπεται ο δεύτερος όρος της αγκύλης για μεγάλους αριθμούς Peclet, λόγω του ότι θεωρείται πολύ μικρός σε σχέση με τον πρώτο, έτσι ώστε η παράλειψη του να μην αλλάζει ουσιαστικά το αποτέλεσμα.

### 2.6.3 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΥΠΟΥ ΙΙΙ

Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει συνεχής τροφοδότηση με ουσία του εξεταζόμενου στοιχείου. Οι συνθήκες που εφαρμόζονται είναι :

$$\begin{array}{ll}
 C(x,0) = 0 & \text{αρχική συνθήκη} \\
 \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} + v_x C\right) \Big|_{x=0} = v_x C_0 & \text{συνοριακή συνθήκη} \\
 \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} \text{ (finite)} & \text{συνοριακή συνθήκη}
 \end{array}$$

Η λύση της μονοδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας δίνεται από τη σχέση :

$$\begin{aligned}
 C = C_0/2 & \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2 \sqrt{D_L t}} \right) + \left( \frac{v_x^2 t}{\pi D_L} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{(L - v_x t)^2}{4 D_L t} \right] \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{v_x L}{D_L} + \frac{v_x^2 t}{D_L} \right] \exp \left( \frac{v_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2 \sqrt{D_L t}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

## 2.7 ΛΥΣΕΙΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΚΑΙ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΣΥΧΝΑ ΕΜΦΑΝΙΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

### **2.7.1 ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ**

Στην περίπτωση αυτή μικρή ποσότητα ουσίας εισάγεται στιγμιαία σε ομοιόμορφο, μονοδιάστατο πεδίο ροής. Η μέγιστη συγκέντρωση  $C_{\max}$  θα εντοπιστεί μετά από  $t_{\max}$  μετά την εισαγωγή της ουσίας στο πεδίο ροής. Η αδιάστατη λύση της μονοδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας για την περίπτωση αυτή είναι :

$$C_R(t_R, Pe) = \frac{E}{(t_R)^{1/2}} \exp\left(-\frac{Pe}{4t_R}(t - t_R)^2\right)$$

όπου  $E = (t_{Rmax})^{1/2} \exp\left(-\frac{Pe}{4t_{Rmax}}(t - t_{Rmax})^2\right)$ ,

$t_{Rmax} = (1 + Pe^{-2})^{1/2} - Pe^{-1}$  (αδιάστατος χρόνος στον οποίο συμβαίνει η μέγιστη συγκέντρωση) και

$$C_R = C/C_{\max}$$

### **2.7.2 ΣΥΝΕΧΗΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΟΥΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ**

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι υπάρχει σημειακή πηγή, η οποία τροφοδοτεί συνεχώς τον υδροφορέα με ουσία συγκέντρωσης  $C_0$  με ρυθμό  $Q$  και ο υδροφορέας έχει πλάτος  $b$ . Για τον υδροφορέα ισχύει η δισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς μάζας, η ταχύτητα είναι ομοιόμορφη και σταθερή ( $v_x$ ) και παράλληλη στον άξονα  $x$ . Η αδιάστατη λύση της δισδιάστατης εξίσωσης μεταφοράς μάζας γίνεται τότε :

$$C(x,y,t) = \frac{1}{4\pi t(D_L D_T)^{0,5}} \exp \left[ -\frac{(x-v_x t)^2}{4D_L t} - \frac{y^2}{4D_T t} \right]$$

Εάν ο ρυθμός εισαγωγής της ουσίας ορίζεται ως  $C_0(Q/b)$ , τότε ισχύει :

$$C(x,y,t) = \frac{C_0 \left(\frac{Q}{b}\right) dt}{4\pi t(D_L D_T)^{0,5}} \exp \left[ -\frac{(x-v_x t)^2}{4D_L t} - \frac{y^2}{4D_T t} \right]$$

Εάν ο ρυθμός εισαγωγής της ουσίας είναι  $Q/b$  και συνεχής, τότε η λύση σε χρόνο  $t$  παίρνει την ακόλουθη μορφή :

$$C(x,y,t) = \frac{C_0 \left(\frac{Q}{b}\right)}{4\pi(D_L D_T)^{0,5}} \int_{\theta=0}^{\theta=t} \exp \left[ -\frac{(x-v_x \theta)^2}{4D_L \theta} - \frac{y^2}{4D_T \theta} \right] d\theta / \theta$$

Συνθήκες σταθερής ροής παρατηρούνται μετά από χρόνο  $t = \infty$ , οπότε η λύση της παραπάνω εξίσωσης από  $t = 0 \rightarrow \infty$ , είναι :

$$C(x,y) = \frac{C_0 \left(\frac{Q}{b}\right)}{2\pi(D_L D_T)^{0,5}} \exp \left( \frac{v_x x}{2D_L} \right) K_0 \left[ \left( \frac{v_x^2}{4D_L} \left( \frac{x^2}{D_L} + \frac{y^2}{D_T} \right) \right)^{1/2} \right]$$

όπου  $K_0$  είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel (δευτέρου είδους και μηδενικής κλάσης).

### 2.7.3 ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ

Εάν μια μικρή ποσότητα ουσίας εισαχθεί σε όλο το πλάτος ενός υδροφορέα σε συνθήκες ομοιόμορφης και σταθερής ροής, τότε η ουσία θα εξαπλωθεί στη διεύθυνση της ροής συναρτήσει του χρόνου. Έστω λοιπόν ότι εισάγεται ουσία συγκέντρωσης  $C_0$  στο σημείο  $(x_0, y_0)$  ενός υδροφορέα με επιφάνεια  $A$  και σταθερό δισδιάστατο πεδίο ροής. Η συγκέντρωση  $C$  στο σημείο  $(x,y)$  μετά από χρόνο  $t$  μετά την εισαγωγή θα είναι :

$$C(x,y,t) = \frac{C_0 A}{4\pi t(D_L D_T)^{0.5}} \exp \left[ -\frac{((x-x_0)-v_x t)^2}{4D_L t} - \frac{(y-y_0)^2}{4D_T t} \right]$$

Η μέγιστη συγκέντρωση μιας μικρής ποσότητας ουσίας που έχει εισαχθεί σε έναν υδροφορέα βρίσκεται πάντα στο κέντρο της μάζας της διαλυόμενης – μεταφερόμενης ουσίας. Συνεπώς, εάν η ροή γίνεται προς την κατεύθυνση του άξονα  $x$  και η εισαγωγή της ουσίας έγινε στο σημείο  $x_0 = 0$  και  $y_0 = 0$ , το κέντρο μάζας βρίσκεται σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  στο σημείο  $x = v_x t$  και  $y = 0$ , η παραπάνω εξίσωση για τη μέγιστη  $C_{\max}$  δίνει :

$$C_{\max} = \frac{C_0 A}{4t\pi\sqrt{D_T D_L}}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:  
**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ**



### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πορώδη υλικά είναι αρκετά διαδεδομένα στην καθημερινή ζωή, στις τεχνολογικές εφαρμογές και στο φυσικό κόσμο. Ένα πορώδες διαπερατό μέσο περιέχει κενούς χώρους (πόροι) και είναι διαπερατό σε μια ποικιλία ρευστών.

Ως *πορώδες* (porosity) ορίζεται ο λόγος του όγκου των κενών προς το συνολικό όγκο του δείγματος και δίνεται από τη σχέση:

$$n = \text{συνολικός όγκος διακένων} / \text{συνολικός όγκος εδάφους}$$

Ο υπολογισμός πορώδους του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

Ανάλογα με τον τύπο του πορώδους μέσου οι τιμές του πορώδους κυμαίνονται μεταξύ του μηδενός και της μονάδας. Σε πολλά όμως πετρώματα ορισμένοι πόροι δεν επικοινωνούν, άρα δεν είναι διαθέσιμοι για τη ροή του νερού. Σε αυτές τις περιπτώσεις ορίζουμε το ενεργό πορώδες το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$n_e = \text{όγκος συκοινωνούντων διακένων} / \text{συνολικός όγκος εδάφους}$$

Η *ειδική διαπερατότητα* ( permeability) είναι η ικανότητα του πορώδους μέσου να επιτρέπει την είσδυση ενός Νευτώνιου ρευστού. Από το νόμο του Darcy μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική διαπερατότητα ενός ρευστού μέσα από ένα πορώδες μέσο ως εξής:

$$q = - \frac{k \cdot A}{\mu_w} \frac{dp}{L}$$

όπου  $q$  : η ογκομετρική παροχή

$k$  : η ειδική διαπερατότητα

$A$  : η κάθετη διατομή του δοκιμίου

$\mu_w$  : το δυναμικό ιξώδες του νερού

$dp$  : η μεταβολή της υδροστατικής πίεσης

$L$  : το μήκος του δοκιμίου

Ο υπολογισμός της διαπερατότητας του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

### 3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στο πορώδες μέσο που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μεταφοράς, διάχυσης και διασπαστικής ροής. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα βήματα που απαιτούνται για την κατασκευή δισδιάστατων δικτύων πόρων. Πριν αναλυθεί η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων κρίθηκε σκόπιμο να παρατεθούν κάποια σημαντικά στοιχεία σχετικά με τα μοντέλα δικτύων πόρων.

Τα πραγματικά πορώδη έχουν ακανόνιστη γεωμετρία, με πόρους διαφόρων σχημάτων και μεγεθών οι οποίοι κατανέμονται μέσα στο δίκτυο με τυχαίο ή μη τυχαίο τρόπο σύνδεσης μεταξύ τους. Συνήθως, αναπαρίστανται με απλοποιημένη γεωμετρία δικτύων πόρων, ώστε να είναι δυνατή η μαθηματική περιγραφή των διαδικασιών που συμβαίνουν στα πορώδη μέσα. Τρία είναι τα πιο συνηθισμένα δοκίμια που χρησιμοποιούνται:

#### *A) Μοντέλο παράλληλης δέσμης κυλινδρικών σωλήνων*

Το δίκτυο αποτελείται από τριχοειδείς κυλινδρικούς σωληνίσκους που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη διάμετρο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του μοντέλου αποτελεί η πορώδης δομή του ξύλου.

#### *B) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών*

Το δίκτυο δημιουργείται από τον κενό χώρο που αφήνουν οι σφαίρες οι οποίες μπορεί να έχουν ίδια ή διαφορετική διάμετρο. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση της άμμου ή για άλλα κοκκώδη υλικά.

#### *Γ) Μοντέλο θαλάμων – λαιμών*

Το δίκτυο δημιουργείται από σφαιρικούς πόρους (θαλάμους) που συνδέονται μεταξύ τους με κυλινδρικούς σωληνίσκους (λαιμούς) (Γ.Καπέλλος, Γ.Σγούντζος).

Οι παράμετροι που χρειάζονται για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό ενός δισδιάστατου δικτύου λαιμών – θαλάμων είναι:

I) η διάταξη του πλέγματος (τριγωνικό, τετραγωνικό, εξαγωνικό, κυβικό, ρομβοεδρικό κ.λπ.),

II) ο αριθμός συνδιάταξης που εκφράζει τον αριθμό των λαιμών που συνδέονται με κάθε θάλαμο,

III) η κατανομή μεγεθών των θαλάμων,

- IV) η κατανομή μεγεθών των λαιμών,
- V) τα χαρακτηριστικά σχήματα λαιμών και θαλάμων,
- VI) το πορώδες του δικτύου.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα δοκίμια χρησιμοποιούνται γιατί δίνουν τη δυνατότητα οπτικής παρατήρησης των φαινομένων που επικρατούν στους πόρους.

Συγκεκριμένα, η τεχνική η οποία ακολουθήθηκε για τη κατασκευή των απαραίτητων δοκιμίων αποτελείται από τα εξής στάδια:

1. Αρχικά επιλέχθηκαν και στη συνέχεια σχεδιάστηκαν τα μοντέλα με χρήση του προγράμματος AutoCAD 2009 σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.
2. Κατασκευάστηκε σε γυάλινο δοκίμιο το μοντέλο δικτύων πόρων σύμφωνα με τη φωτολιθογραφική μέθοδο των M. McKellar and N.C. Wardlaw (1982).
3. Στη συνέχεια, στο ένα από τα δύο δοκίμια κατασκευάστηκε η είσοδος και η έξοδος.

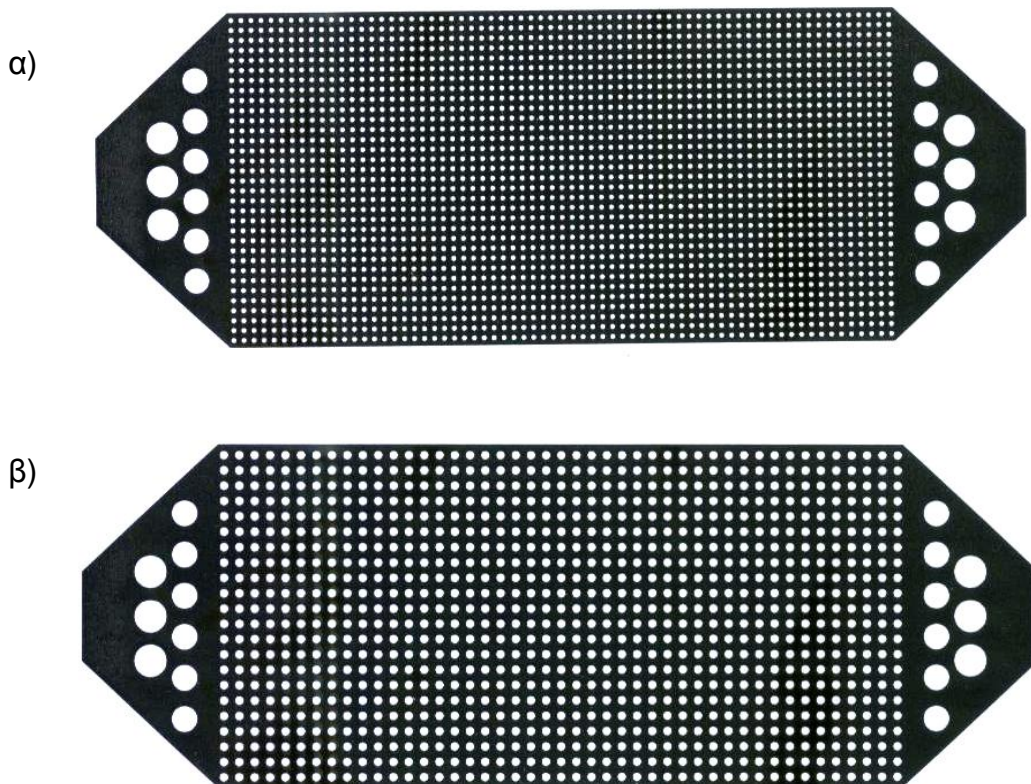
Τα δυο γυάλινα δοκίμια πυροσυσσωματώθηκαν σε προγραμματισμένο φούρνο, ώστε να σχηματιστεί το τελικό δισδιάστατο δοκίμιο στο οποίο προσαρμόστηκε η είσοδος και η έξοδος.

### 3.2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΟΡΩΝ

Κάθε μοντέλο αποτελείται από το δίκτυο πόρων (ορθογώνιο με μήκος 100mm και πλάτος 50mm) και δύο τραπέζια (διαστάσεις: μεγάλη βάση 50mm, μικρή βάση 13mm και ύψος 19mm) δεξιά και αριστερά αυτού, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για είσοδο και έξοδο. Τα τραπέζια αυτά περιέχουν 3 πόρους διαμέτρου 5mm και 6 πόρους διαμέτρου 4mm κατανομημένους έτσι ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν καλύτερη είσοδος και έξοδος του υδατικού διαλύματος στο πορώδες μέσο.

Η κατασκευή των μοντέλων έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος AutoCAD 2009. Σχεδιάστηκαν δίκτυα πόρων διαφόρων μοντέλων, τα οποία είχαν διαφορετικές διατάξεις πλέγματος και μεγέθη πόρων. Παρακάτω ακολουθούν τα σχέδια των μοντέλων:

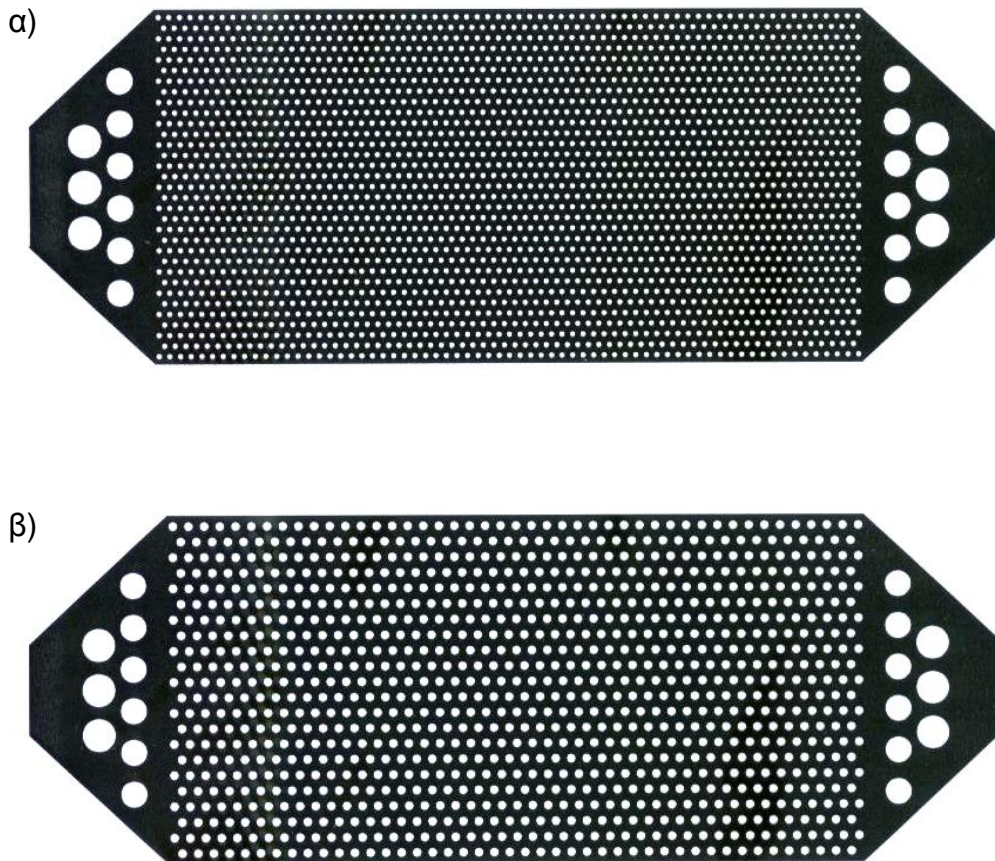
- ❖ Στη Εικόνα 3.1 παρατίθενται δύο μοντέλα ομοιόμορφων σφαιρών με τετραγωνικό πλέγμα. Τα δίκτυα δημιουργήθηκαν από τον κενό χώρο (0,5mm, 0.74mm) που άφησαν οι σφαίρες οι οποίες είχαν στη μεν 1.α) 1mm διάμετρο, στη δε 1.β) 1,5mm.



**Εικόνα 3.1:** α) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1mm, β) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1,5mm.

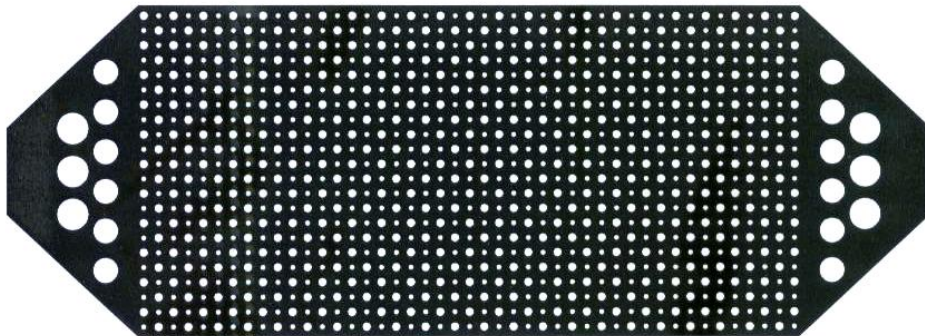


- ❖ Στη Εικόνα 3.2 παρατίθενται άλλα δύο μοντέλα ομοιόμορφων σφαιρών με εξαγωνικό όμως πλέγμα. Τα δίκτυα δημιουργήθηκαν από τον κενό χώρο (0,5mm, 0.74mm) που άφησαν οι σφαίρες οι οποίες είχαν στη μεν 2.α) 1mm διάμετρο, στη δε 2.β) 1,5mm.



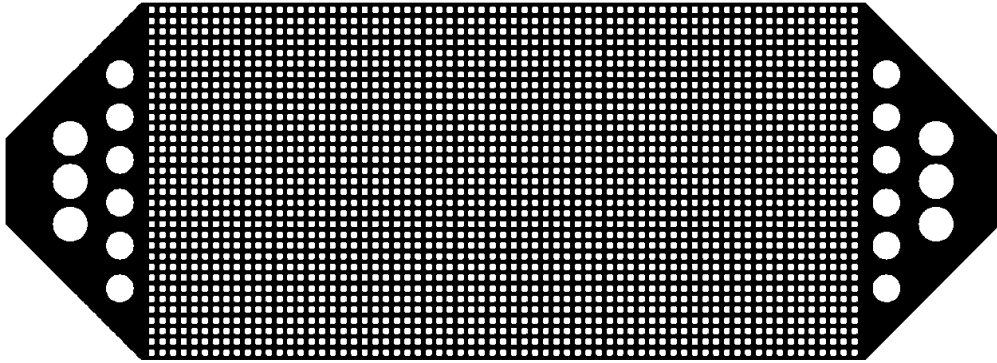
**Εικόνα 3.2:** α) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1mm, β) Μοντέλο ομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1,5mm.

- ❖ Στη Εικόνα 3.3 παρατίθεται ένα μοντέλο ανομοιόμορφων σφαιρών με τετραγωνικό πλέγμα. Το δίκτυο δημιουργήθηκε από τον κενό χώρο (0.99mm) που άφησαν οι σφαίρες οι οποίες είχαν εναλλάξ διάμετρο 1mm και 1,5mm.



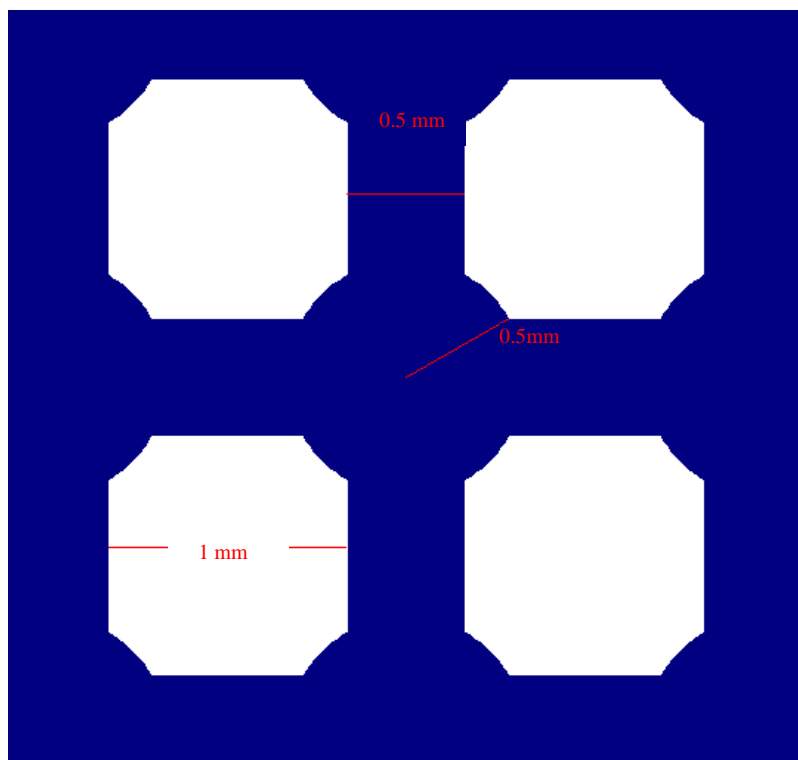
**Εικόνα 3.3:** Μοντέλο ανομοιόμορφων σφαιρών με σφαίρες διαμέτρου 1mm και 1,5mm.

- ❖ Στη Εικόνα 3.4 παρατίθεται το μοντέλο θαλάμων - λαιμών με τετραγωνικό πλέγμα το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Το δίκτυο δημιουργήθηκε από σφαιρικούς πόρους (θαλάμους) διαμέτρου 1mm που συνδέονται μεταξύ τους με κυλινδρικούς σωληνίσκους (λαιμούς) πάχους 0,5mm (Εικόνα 5).



**Εικόνα 3.4:** Μοντέλο θαλάμων - λαιμών με σφαιρικούς πόρους διαμέτρου 1mm και κυλινδρικούς σωληνίσκους πάχους 0,5mm.

Το αρνητικό των παραπάνω εικόνων εκτυπώθηκε σε διαφάνεια και στη συνέχεια αυτή χρησιμοποιήθηκε ως «μάσκα» για την αποτύπωση του μοντέλου στο γυάλινο δοκίμιο.



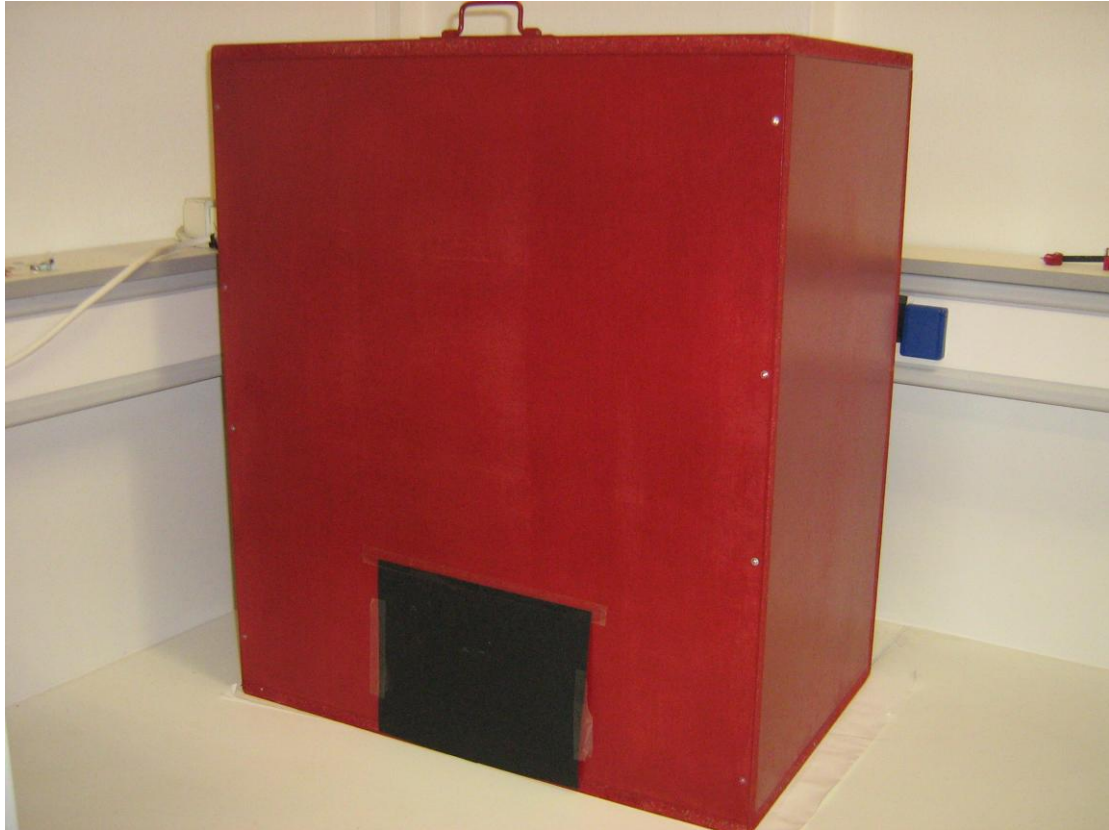
**Εικόνα 3.5:** Απεικόνιση πορώδους του μοντέλου θαλάμων-λαιμών.

### 3.2.2 ΦΩΤΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΓΥΑΛΙΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το στάδιο το οποίο ακολούθησε μετά το σχεδιασμό των μοντέλων ήταν η φωτολιθογραφική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους McKellar and Wardlaw (1982) με μερικές τροποποιήσεις. Η διαδικασία κατασκευής γυάλινων δοκιμίων ήταν η εξής:

- 1) Το υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη ήταν κομμάτια **καθρέπτη** (δηλαδή γυαλί με επίστρωση χαλκού) μήκους 20,9cm και πλάτους 12cm.
- 2) Διαλύθηκαν **200gr** υδροξειδίου του νατρίου, **NaOH**, σε **600cm<sup>3</sup> απεσταγμένου νερού** και μετά την **ανάδευση με ράβδο** μετρήθηκε η θερμοκρασία του διαλύματος που βρέθηκε ίση με 75 °C. Όσες φορές δεν χρησιμοποιήθηκε αμέσως το διάλυμα, ήταν απαραίτητη η θέρμανσή του με **θερμαντική εστία**, ώστε να επιτευχθεί η παραπάνω τιμή της θερμοκρασίας. Σε **γυάλινο δοχείο** (Pyrex ταψί 234, με διαστάσεις 44,5x27x5cm) τοποθετήθηκαν τα κομμάτια του καθρέπτη και προστέθηκε το παραπάνω διάλυμα αμέσως μετά την ανάδευσή του. Σε περίπου 24h αφαιρέθηκαν τα στρώματα πλαστικής κόλλας (πράσινο) που κάλυπταν τις επιφάνειες του χαλκού, πλένοντας τα κομμάτια με άφθονο νερό βρύσης.
- 3) Εφόσον είχαν πλυθεί καλά τα δοκίμια με νερό βρύσης και έπειτα με απεσταγμένο νερό και αφού στέγνωσε η επιφάνεια του χαλκού τοποθετήθηκαν τα κομμάτια σε **καθαρό κλειστό κουτί**, ώστε να μην οξειδωθεί περισσότερο ο χαλκός.
- 4) Στη συνέχεια, ρυθμίστηκε ο **φούρνος** στους 70 °C.
- 5) Οι ακόλουθες διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν σε **σκοτεινό θάλαμο** με **κόκκινο φωτισμό**. Απλώθηκε στον απαγωγό καθαρό χαρτί και τοποθετήθηκαν τα κομμάτια. Έπειτα, ψεκάστηκε η επιφάνεια του χαλκού με σπρέι **Positive Resist** σε συνεχή ροή κλίσεως 30-45°, αρχικά κατά μήκος και έπειτα κατά πλάτος (για να καλυφθούν τυχόν ατέλειες).
- 6) Προσέχοντας τα κομμάτια να παραμένουν οριζόντια, μεταφέρθηκαν στο φούρνο πιάνοντάς τα από τις άκρες, με προσοχή ώστε να παραμείνει ανέπαφη η καλυμμένη με Positive Resist επιφάνεια. Τα κομμάτια θερμάνθηκαν για 30min σε θερμοκρασία 70 °C, ώστε να σταθεροποιηθεί η επίστρωση.
- 7) Ψύχθηκαν και φυλάχθηκαν τα κομμάτια σε **καθαρό κουτί**, προστατευμένα από σκόνες και φως.

8) Προσαρμόστηκε η «**μάσκα**» με το δίκτυο (από τη γυαλιστερή μεριά) πάνω στην καλυμμένη από το Positive Resist επιφάνεια του κομματιού. Έπειτα, τοποθετήθηκε σε **κλειστό κουτί με υπεριώδες φως** και εκτέθηκε για 45min.



**Εικόνα 3.6** : Έκθεση σε υπεριώδες φως.

9) Πριν ολοκληρωθεί το προηγούμενο βήμα διαλύθηκαν **7gr** υδροξειδίου του νατρίου, **NaOH**, σε **1L απεσταγμένου νερού** και το διάλυμα αποθηκεύτηκε μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος.

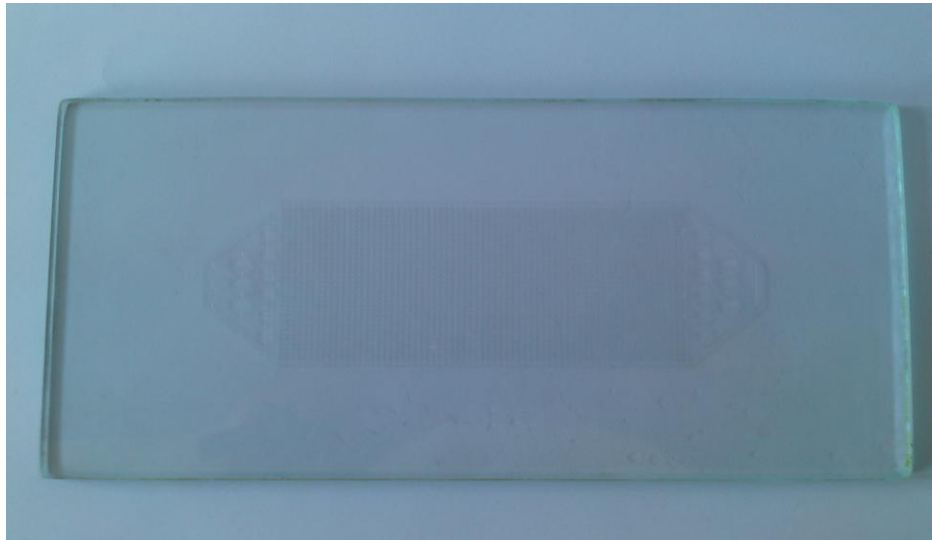
10) Το διάλυμα του βήματος 9 τοποθετήθηκε σε **pyrex** και προστέθηκε ένα δοκίμιο κάθε φορά το οποίο και παρέμεινε εωσότου να διαλυθεί το μη πολυμερισμένο Positive Resist και να εμφανιστεί το δίκτυο. Ο χρόνος παραμονής του δοκιμίου κυμάνθηκε από 1-10min περίπου. Η οπτική παρακολούθηση με κόκκινο φως (Philips darkroom lamp 230V) σε αυτό το βήμα του δικτύου κρίνεται απαραίτητη.

11) Ξεπλύθηκαν τα δοκίμια με άφθονο νερό βρύσης (όχι πάνω στο αποτύπωμα).

12) Έπειτα η διαδικασία συνεχίστηκε σε κανονικό φως, όπου και ξεπλύθηκαν με απεσταγμένο νερό τα δοκίμια και τοποθετήθηκαν όρθια μέχρι να στεγνώσουν.



- 13) Διαλύθηκαν  $200\text{cm}^3$  διαλύματος νιτρικού οξέος,  $\text{HNO}_3$ , 65% σε  $230\text{cm}^3$  νερού σε **pyrex** και βυθίστηκαν ένα ένα τα δοκίμια στο διάλυμα αυστηρά για 10-15sec, ώστε να διαλυθεί το τμήμα του χαλκού που δεν προστατεύεται από το Positive Resist. Τα δοκίμια στη συνέχεια ξεπλύθηκαν με άφθονο νερό.
- 14) Με τη βοήθεια **θερμαντικής εστίας** θερμάνθηκε **κερί** μέχρι να λιώσει και με το **πινέλο** απλώθηκε προσεκτικά στο δοκίμιο, ώστε να καλυφθεί η τριγύρω επιφάνεια του δοκιμίου που δεν θα χαρασσόταν. Απλώθηκε περισσότερο κερί στα άκρα του δοκιμίου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα είδος τοιχώματος που θα συγκρατήσει το διάλυμα.
- 15) Αυτό το βήμα πραγματοποιήθηκε φορώντας **προστατευτικά γυαλιά**. Διαλύθηκαν  $75\text{cm}^3$  διαλύματος υδροφθορίου,  $\text{HF}$ , 90% σε  $25\text{cm}^3$  νερού μέσα σε **πλαστικό ογκομετρικό σωλήνα των 100mL**. Τοποθετήθηκαν τα δοκίμια σε **πλαστικό δίσκο** και καλύφθηκε η επιφάνεια των δικτύων με διάλυμα  $20\text{cm}^3$  που παρασκευάστηκε σε αυτό το βήμα (το διάλυμα παραμένει εντός του τοιχώματος). Το διάλυμα παρέμεινε για 5min. Μετά από πλήρωση του πλαστικού δίσκου με νερό αφαιρέθηκαν και ξεπλύθηκαν τα δοκίμια με άφθονο νερό.
- 16) Απομακρύνθηκε το κερί από την επιφάνεια των δοκιμίων με μηχανικό τρόπο.
- 17) Τέλος, στο διάλυμα του βήματος 13 βυθίστηκαν τα δοκίμια μέχρι να απομακρυνθεί ο χαλκός από αυτά και να γίνουν διάφανα.



Εικόνα 3.7: Φωτογραφία του δοκιμίου που προκύπτει μετά από τη διαδικασία που περιγράφηκε.

### 3.2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΙΣΟΔΩΝ – ΕΞΟΔΩΝ ΣΤΟ ΓΥΑΛΙ

Για την κατασκευή του πορώδους μέσου απαιτήθηκαν δύο όμοια δοκίμια. Στο ένα από τα δύο δημιουργήθηκε μια είσοδος και μια έξοδος (εγκάρσιες τομές) μετά από χρήση τρυπανιού. Τα εργαλεία τα οποία απαιτήθηκαν για τη δημιουργία των τομών περιγράφονται αναλυτικά ακολούθως.

1. Τρυπάνι για γυαλί (Verre) διαμέτρου 4mm, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος σπασίματος της τριγύρω περιοχής από τη τομή.
2. Ένα κομμάτι ξύλο πάνω στο οποίο τοποθετήθηκε το γυαλί για να απορροφάται όσο γίνεται μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων που ασκούνται στο γυαλί από το τρυπάνι.
3. Επιτραπέζιο τρυπάνι στη βάση του οποίου τοποθετήθηκε το ξύλο και από πάνω το δοκίμιο.
4. Ένας υδροβολέας με απεσταγμένο νερό χρησιμοποιήθηκε σε όλη τη διάρκεια της κατασκευής των οπών, προκειμένου να αποφευχθεί αύξηση της θερμοκρασίας η οποία μπορεί να οδηγήσει σε θραύση του γυαλιού.

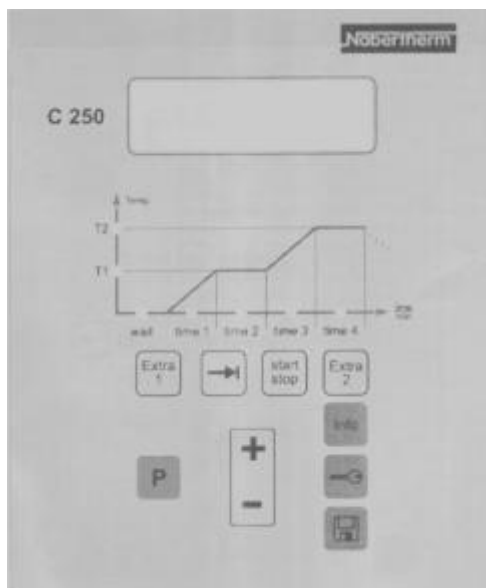
### 3.2.4 ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΤΕΛΕΙΟΠΟΙΗΣΗ ΓΥΑΛΙΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σε προγραμματισμένο φούρνο τοποθετήθηκαν τα δύο δοκίμια αφού πρώτα προσαρμόστηκαν το ένα πάνω στο άλλο με τη βοήθεια νερού για να κολλήσουν και μικροσκοπίου για τον έλεγχο της ακριβούς ταύτισής τους. Αλείφθηκε η πυρίμαχη πλάκα του φούρνου με κιμωλία για να μην κολλήσουν πάνω σε αυτή τα δοκίμια. Έπειτα με πολλή προσοχή, ώστε να μη μετακινηθούν και κολλήσουν στραβά, τοποθετήθηκαν τα δοκίμια στο φούρνο. Η διάρκεια του προγράμματος της πυροσυσσωμάτωσης ήταν 11h και 12min. Όμως, ο φούρνος δεν ανοίχτηκε αμέσως μετά το τέλος λειτουργίας του, διότι η θερμοκρασία ήταν πολύ υψηλή και απαγορεύεται. Όταν η θερμοκρασία έπεσε στους 100 °C τότε ανοίχτηκε η πόρτα του φούρνου. Τα γυάλινα δοκίμια αφαιρέθηκαν από το φούρνο μετά από μια ημέρα, ώστε να αποφευχθεί το ράγισμα του δοκιμίου λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που είχε με το πάγκο που τοποθετήθηκε.


Στη συνέχεια θα περιγραφούν τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν για τον προγραμματισμό του φούρνου, αφού πρώτα αναφερθεί πως το μοντέλο του φούρνου που χρησιμοποιήθηκε είναι Nabertherm, model LH 60/12.

Βήματα για προγραμματισμό του φούρνου:

- 1) Πατώντας το κουμπί 'ON' ανοίχτηκε ο φούρνος και εμφανίστηκε η ένδειξη C 250 στην οθόνη ελέγχου.



Εικόνα 3.8: Οθόνη ελέγχου του Nabertherm.

- 2) Επιλέχθηκε η περιοχή αποθήκευσης του προγράμματος πατώντας αρχικά ‘program selection, P’ , έπειτα με τα βελάκια το νούμερο του προγράμματος (P = 1) και τέλος το κουμπί ‘Scroll, .
- 3) Μετά το Scroll άναψε το φωτάκι της ένδειξης ‘time 1’, όπου και συμπληρώθηκε με 0:02 σε h:min. Αυτό στην ουσία αποτελούσε το βήμα του χρόνου ώστε ο φούρνος να αποκτήσει την θερμοκρασία που θα του δώσουμε.
- 4) Πατώντας το Scroll άναψε το φωτάκι της ένδειξης ‘temperature, T1’ όπου και συμπληρώθηκε με τη τιμή 40 °C.
- 5) Έπειτα, πατώντας και πάλι το Scroll πληκτρολογήθηκε το επόμενο βήμα του χρόνου, ‘time 2’, με 0:02 σε h:min.
- 6) Για να μην γίνεται συνεχής αναφορά στην επιλογή Scroll, μετά από κάθε αλλαγή πατήθηκε αυτό το κουμπί. Οπότε, σε αυτό το σημείο άναψε το φωτάκι της ένδειξης ‘time 3’ και συμπληρώθηκε με 6:00 στις ίδιες μονάδες πάντα. Αυτό σήμαινε πως σε 6h θα έφτανε την θερμοκρασία που δίνεται στο επόμενο βήμα.
- 7) Σε αυτό το βήμα άναψε το φωτάκι της ένδειξης ‘T2’ και πληκτρολογήθηκε 400 °C. Οπότε μέχρι και εδώ προγραμματίστηκε ο φούρνος σε 2 min να αποκτήσει θερμοκρασία 40 °C και στις επόμενες 6h να έχει φτάσει σε θερμοκρασία 400 °C και να παραμείνει για 2 min.
- 8) Επαναλήφθηκε η διαδικασία που προηγείται μέχρι τον χρόνο ‘time 3’ = 0:30 και την θερμοκρασία ‘T2’= 600 °C. Οι τιμές των παραμέτρων που ρυθμίστηκαν στο πρόγραμμα για την πυροσυσσώματωση περιγράφονται στο πίνακα που ακολουθεί:

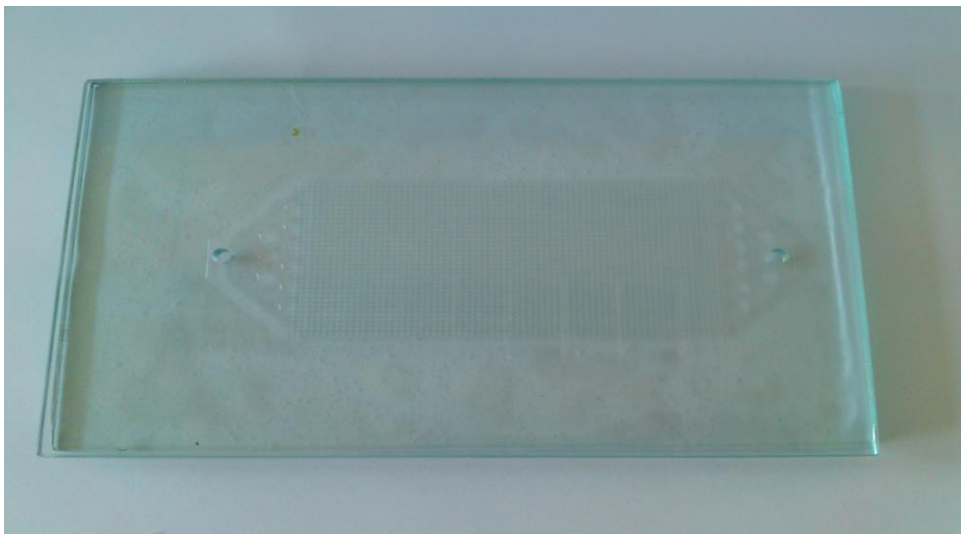
Χρόνος Παραμονής (h:min)	Χρονικό Βήμα (h:min)	Θερμοκρασία (°C)
	time 1 = 0:02	T1 = 40
time 2 = 0:02	time 3 = 6:00	T2= 400
time 4 = 0:02	time 1 = 2:00	T1 = 500
time 2 = 0:02	time 3 = 2:00	T2= 600
time 4 = 0:02	time 1 = 0:30	T1 = 690
time 2 = 0:02	time 3 = 0:30	T2= 600

- 9) Έπειτα πατήθηκε το κουμπί που δείχνει μια δισκέτα, 'save', ώστε να αποθηκευτεί το πρόγραμμα που ρυθμίστηκε.
- 10) Τέλος, πιάστηκε το κουμπί 'start', για να ξεκινήσει το πρόγραμμα.

Έπειτα, κατασκευάστηκαν από plexiglas είσοδος και έξοδος οι οποίες με εποξική κόλλα προσαρμόστηκαν πάνω στις οπές του δοκιμίου προκειμένου να είναι δυνατή η σύνδεση του δοκιμίου με την πειραματική διάταξη.



**Εικόνα 3.9:** Φωτογραφία του φούρνου Nabertherm που χρησιμοποιήθηκε για την πυροσυσσώματωση των γυάλινων δοκιμίων.



**Εικόνα 3.10:** Φωτογραφία του τελικού δοκιμίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

**ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ  
ΡΟΗΣ NAVIER-STOKES**

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υπολογιστικό πακέτο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση της εξίσωσης Navier-Stokes σε δύο διαστάσεις, ώστε να υπολογιστεί η κατανομή των ροών των ταχυτήτων μέσα σε ένα ακόρεστο μοντέλο, αξιοποιώντας την αξονική συμμετρία, είναι το Comsol Multiphysics version 3.4.

Το COMSOL είναι ένα υπολογιστικό πακέτο το οποίο, βασισμένο στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (**F**inite **E**lement **M**ethod), επιλύει προβλήματα που περιγράφονται μαθηματικά από διαφορετικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους (PDEs).

Έχοντας ορίσει το πρόβλημα, τα στάδια που ακολουθούνται για τον υπολογισμό της λύσης είναι:

1. Σχεδιασμός του χωρίου επίλυσης (*Draw mode*)
2. Προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών και των παραμέτρων του προβλήματος (*Physics mode*)
3. Κατασκευή του πλέγματος διακριτοποίησης (*Mesh mode*)
4. Υπολογισμός της λύσης (*Solve*)
5. Γραφική επεξεργασία των αποτελεσμάτων (*Post-processing mode*)

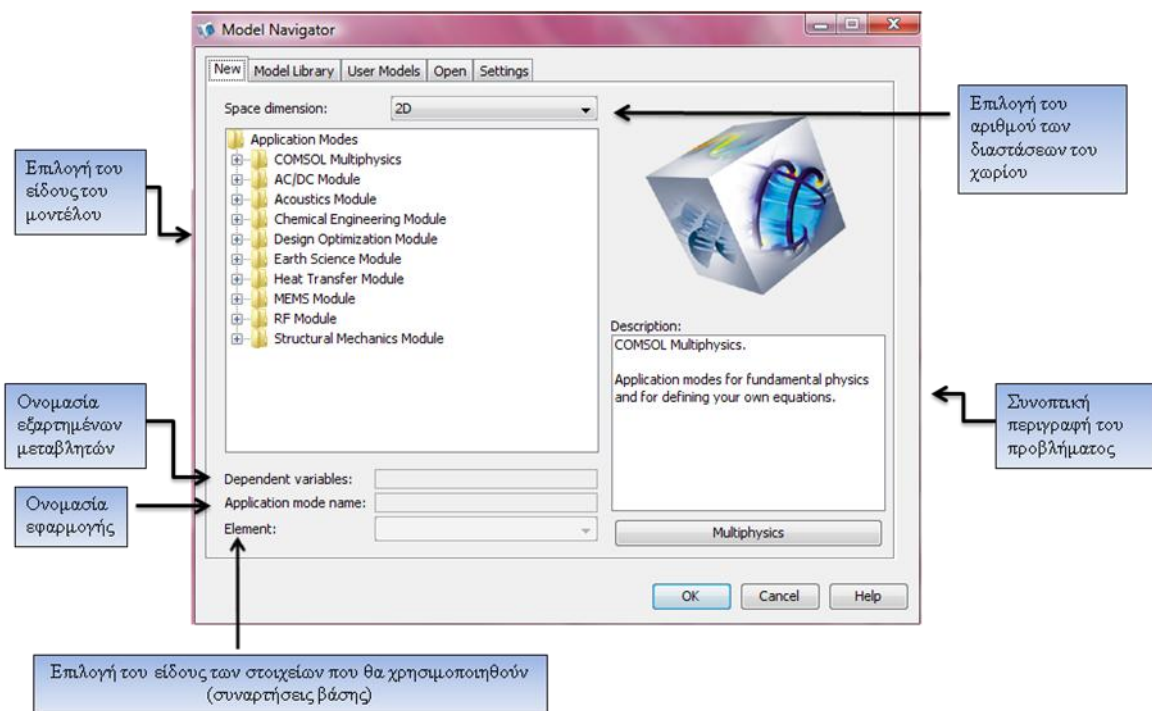
Ορισμένα από τα πεδία στα οποία έχει εφαρμογή το συγκεκριμένο υπολογιστικό πακέτο είναι:

- I. Φαινόμενα μεταφοράς μάζας, ενέργειας και ορμής
- II. Ηλεκτρομαγνητισμός
- III. Οπτική
- IV. Ακουστική
- V. Βιοτεχνολογία-Βιοϊατρική
- VI. Μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMs)
- VII. Ηλεκτρολυτικά κελιά, μπαταρίες, κυψελίδες καυσίμου (Full cells)

## 4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΜΕΝΟΥ

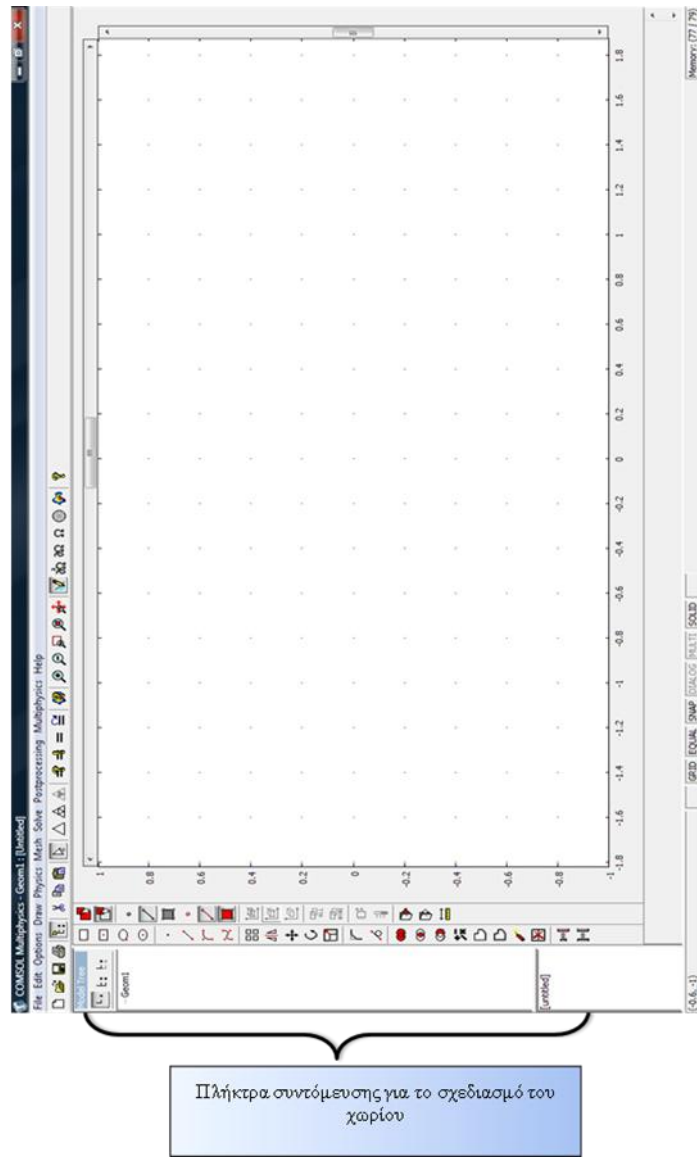
### 4.2.1. Ο ΟΔΗΓΟΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

Ενεργοποιώντας το υπολογιστικό πακέτο, εμφανίζεται ο οδηγός πλοήγησης (**Model Navigator**), από τον οποίο επιλέγουμε την πορεία μοντελοποίησης του προβλήματος.

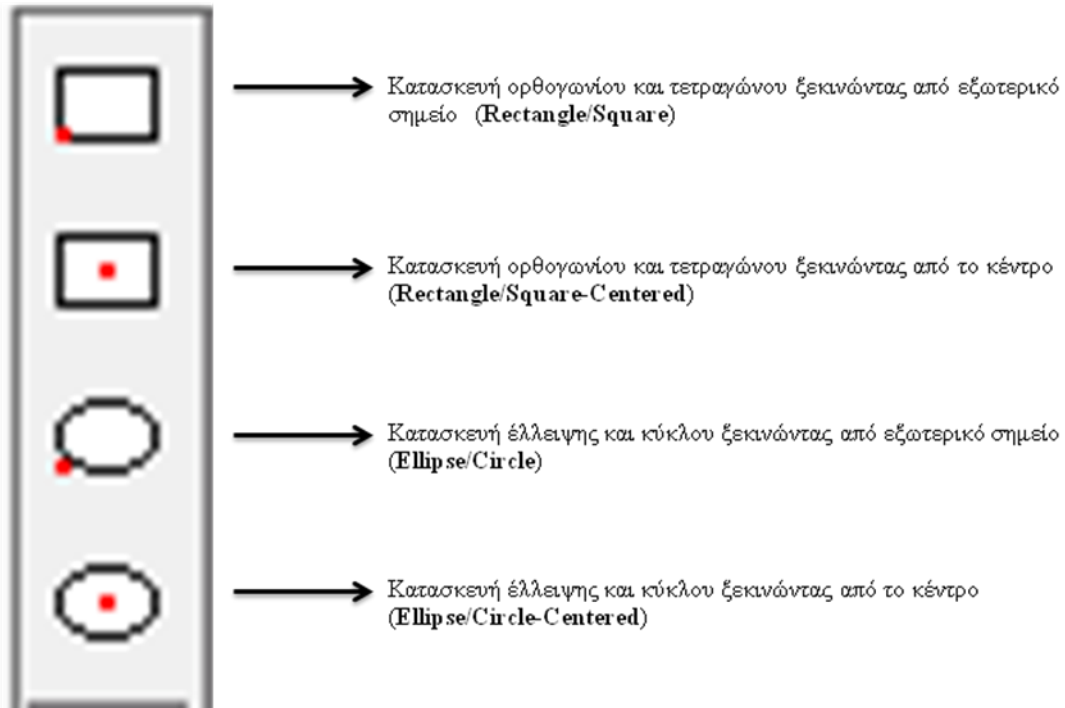




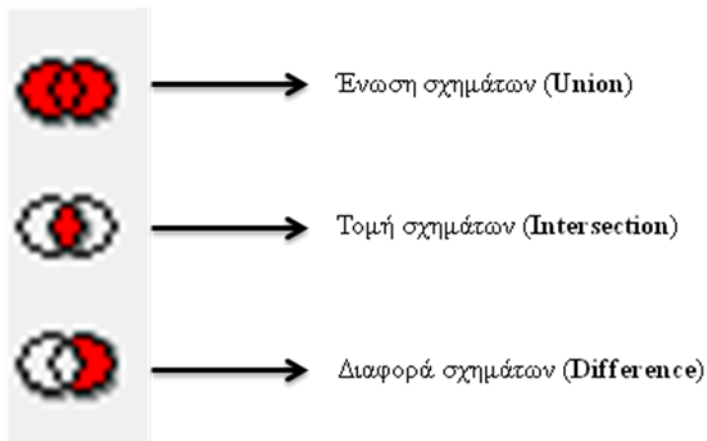
### 4.2.2 Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΓΙΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ)



Για το σχεδιασμό απλών δισδιάστατων χωρίων, τα πλήκτρα συντόμευσης που χρησιμοποιούνται είναι:



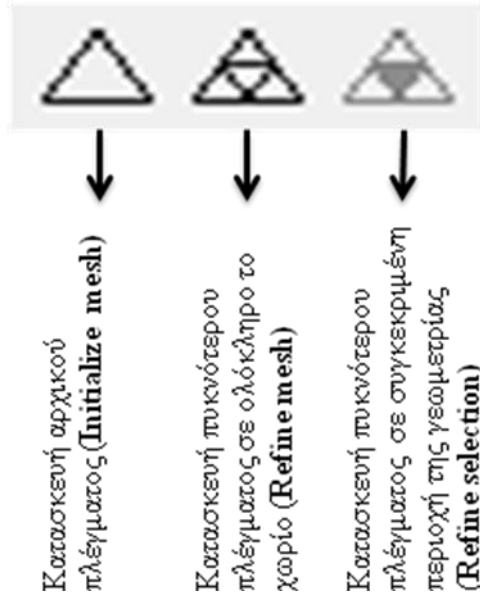
Για περισσότερο σύνθετες γεωμετρίες:



Οι αντίστοιχες, καθώς και πρόσθετες, ρυθμίσεις για το σχεδιασμό της γεωμετρίας μπορούν να καθοριστούν από το μενού **Draw** στην επιφάνεια εργασίας.

Χρησιμοποιώντας το μενού **Physics** ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και οι παράμετροι του προβλήματος, επιλέγοντας **Boundary Settings** και **Subdomain Settings** αντίστοιχα.

Οι ρυθμίσεις για το πλέγμα διακριτοποίησης γίνονται επιλέγοντας **Mesh**. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα εικονίδια:



Η επιλογή του επιλύτη και ο προσδιορισμός της αρχικής εκτίμησης της λύσης γίνεται από το μενού **Solve**. Το COMSOL παρέχει έξι διαφορετικούς επιλύτες, ανάλογα με το φυσικό πρόβλημα. Μπορούν να αντιμετωπιστούν προβλήματα γραμμικά και μη, σε μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση, καθώς επίσης και προβλήματα ιδιοτιμών.

Η γραφική επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται από το μενού **Postprocessing**.

## **4.3 ΠΟΡΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**

### **4.3.1. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

Ρευστό κινείται στο δισδιάστατο μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει (Εικόνα 4), το οποίο δημιουργήθηκε από σφαιρικούς πόρους (θαλάμους) διαμέτρου 1mm που συνδέονται μεταξύ τους με κυλινδρικούς σωληνίσκους (λαιμούς) πάχους 0,5mm.

Χρησιμοποιώντας το COMSOL, θα προσομοιωθεί το φαινόμενο σε μη μόνιμη κατάσταση, όταν το ρευστό (νερό) έχει πυκνότητα  $1000 \text{ kg/m}^3$ , δυναμικό ιξώδες  $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  και ταχύτητα  $0,0000204 \text{ m/s}$ . Η επίδραση της βαρύτητας θεωρείται αμελητέα.

4.3.2. ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

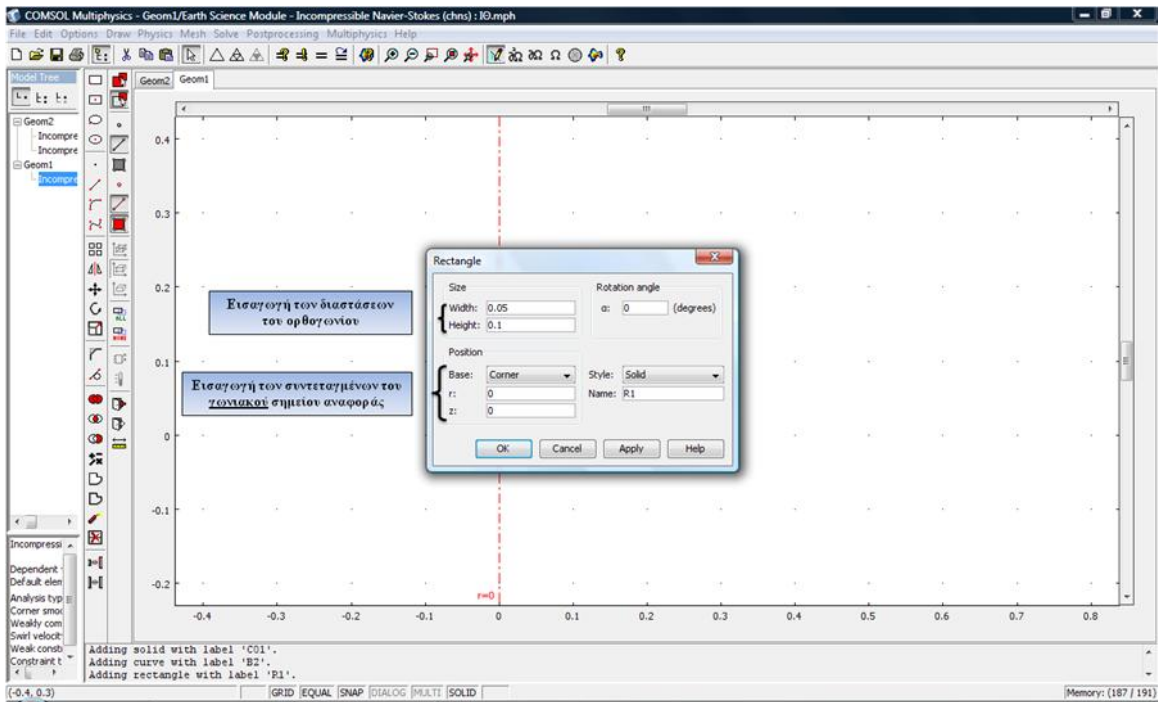
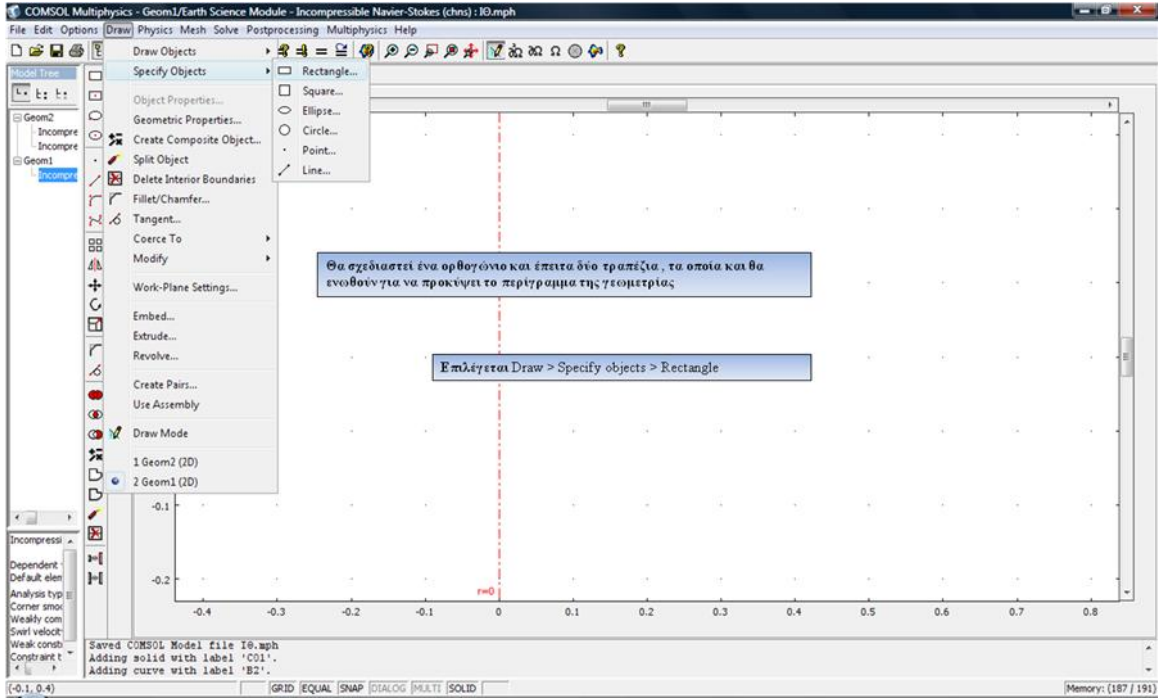
Βήμα 1: Ρυθμίσεις στον οδηγό πλοήγησης

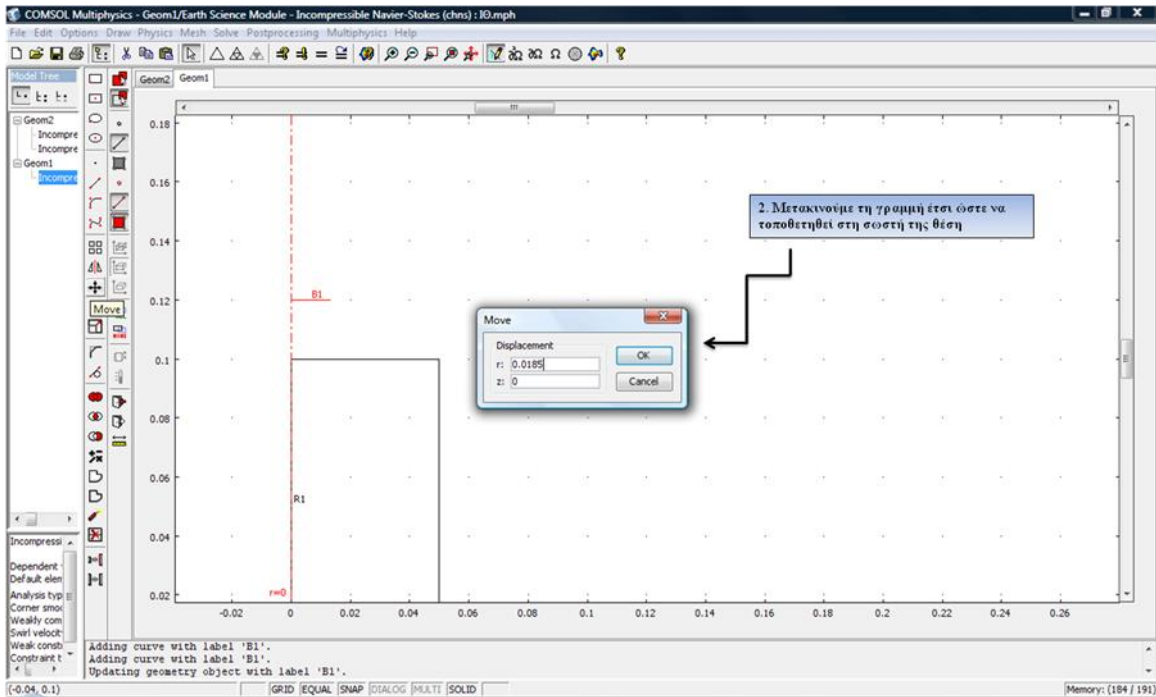
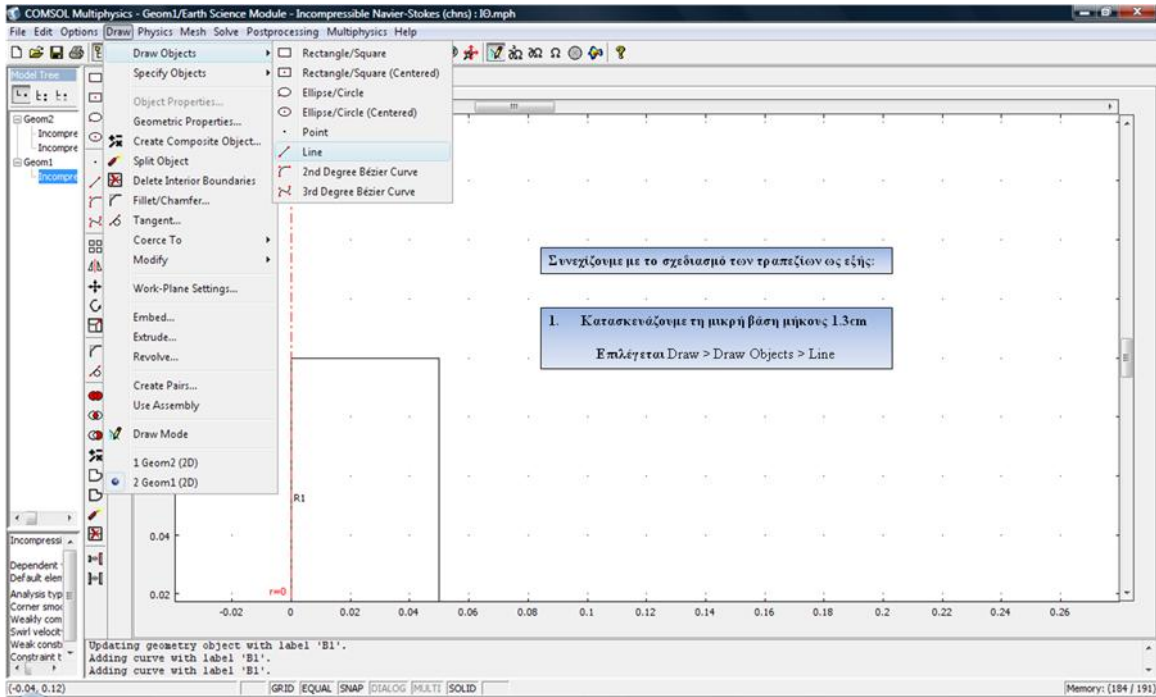
Επιλογή επίλυσης του προβλήματος σε δύο διαστάσεις, αξιοποιώντας την αξονική συμμετρία.

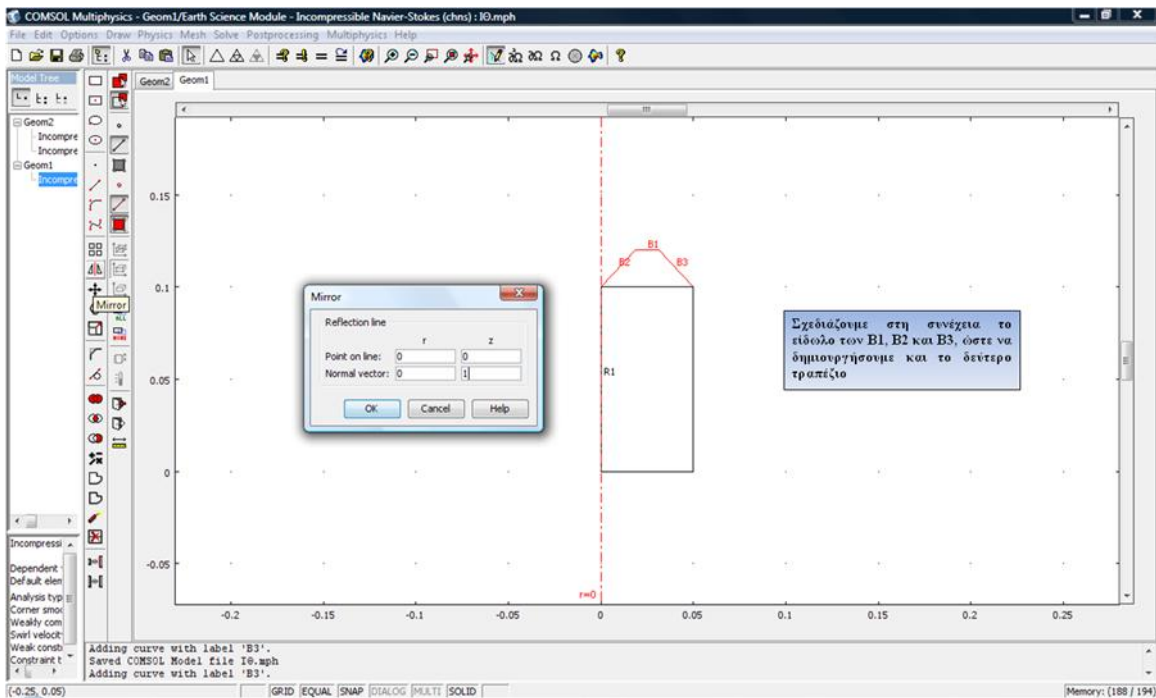
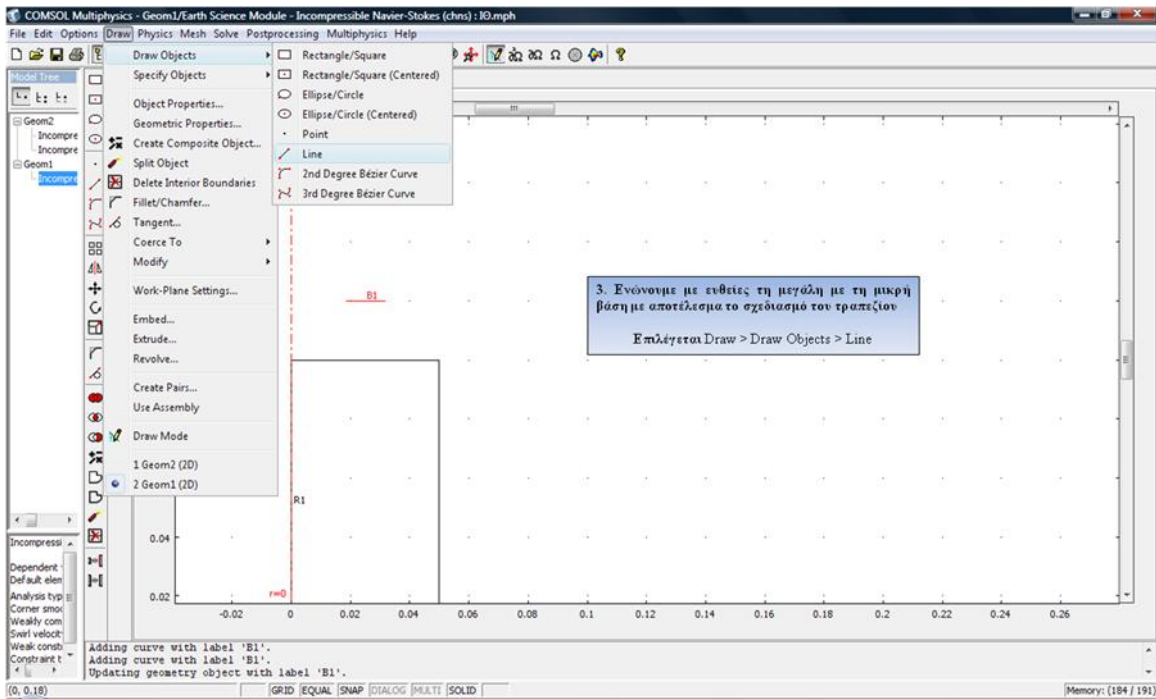
Θα γρηγορηθεί το μοντέλο ασυμπίεστης ροής Navier-Stokes. Επλέγονται διαδοχικά: Fluid Flow > Incompressible Navier-Stokes > Transient analysis, ώστε να μελετηθεί το φαινόμενο σε μη μόνιμη κατάσταση

Εξαρτημένες μεταβλητές είναι το πεδίο ταχύτητας (u, v) και η πίεση p

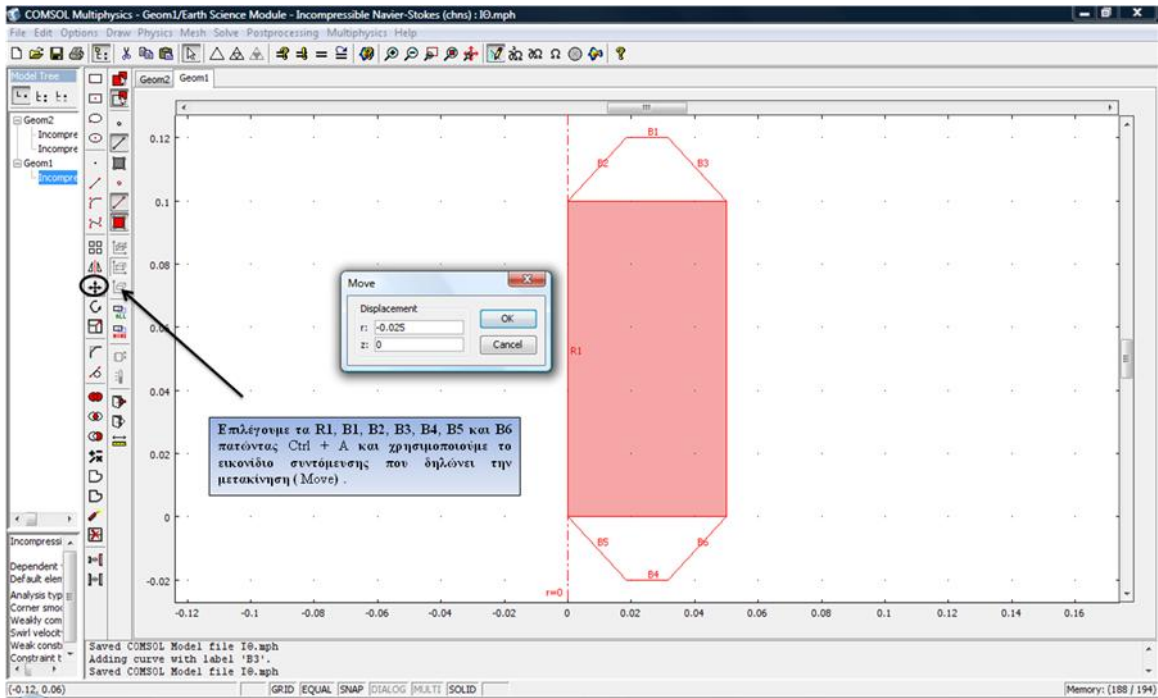
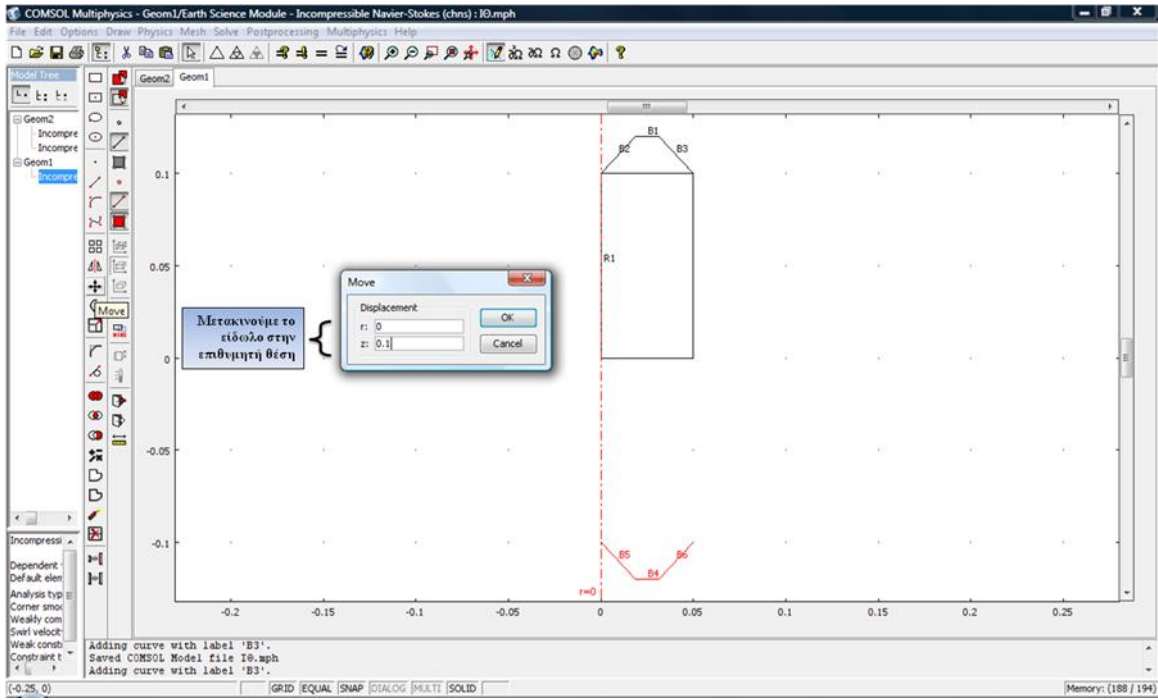
**Βήμα 2: Σχεδιασμός γεωμετρίας**

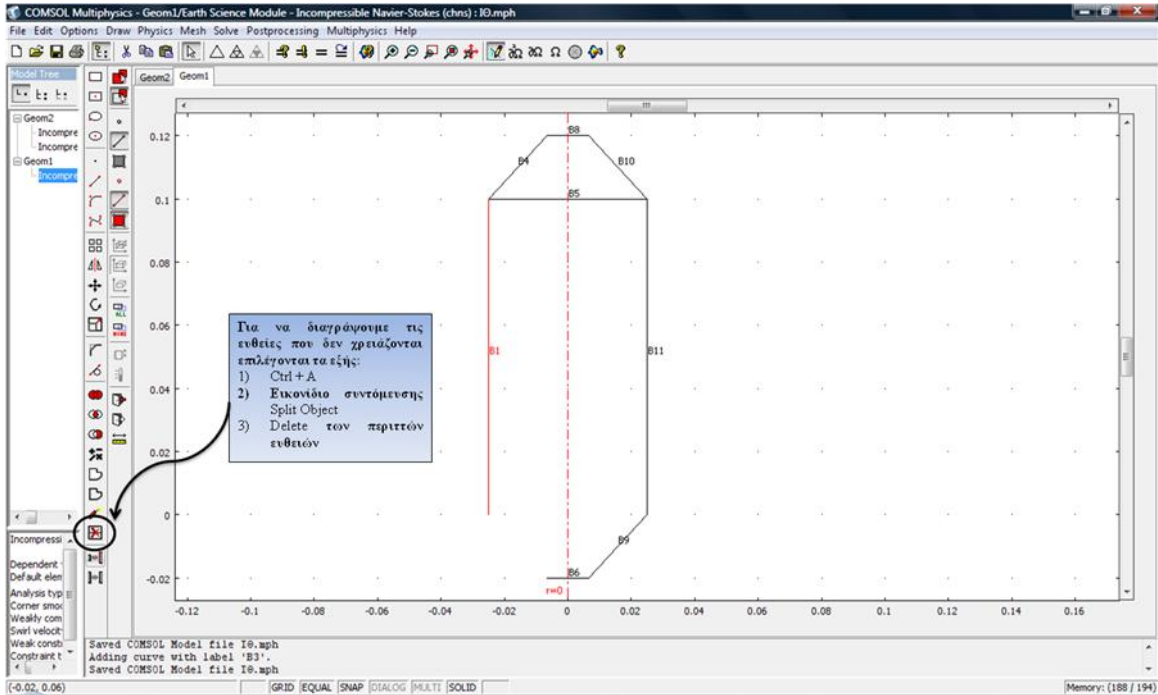
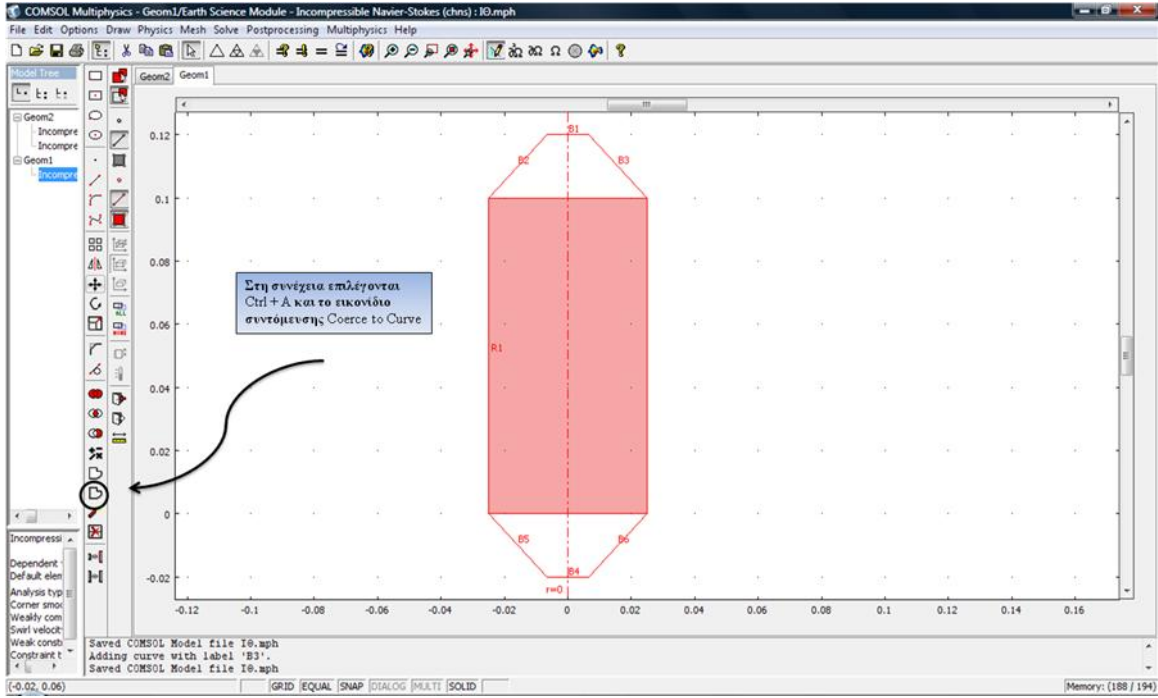


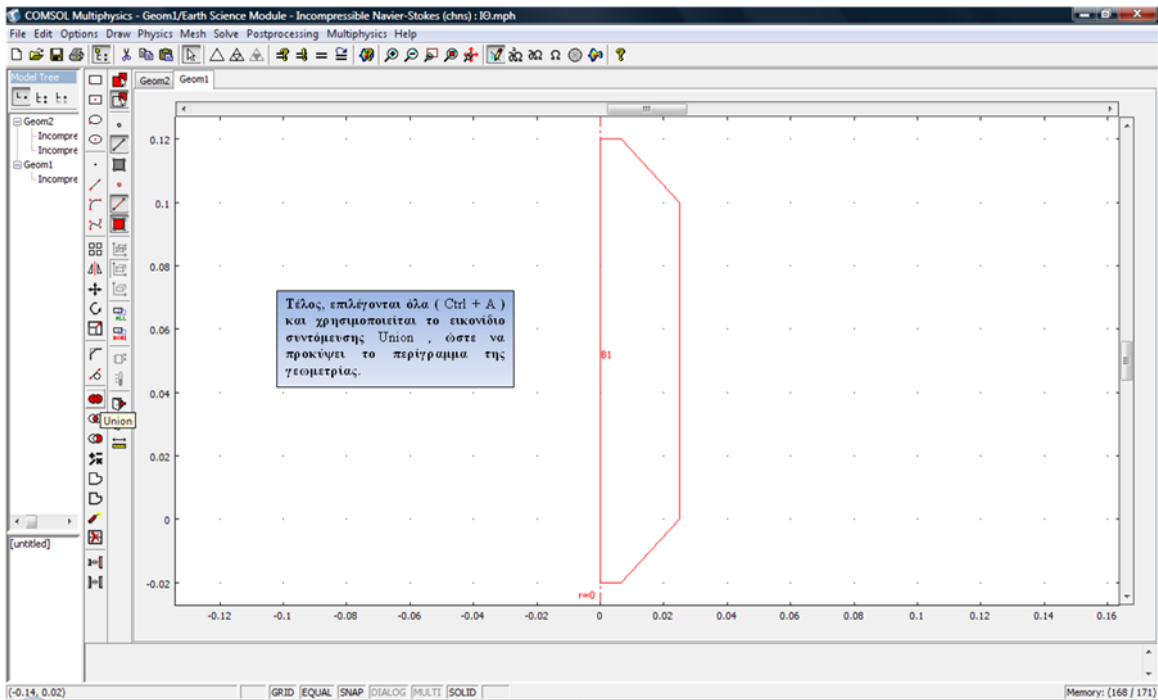
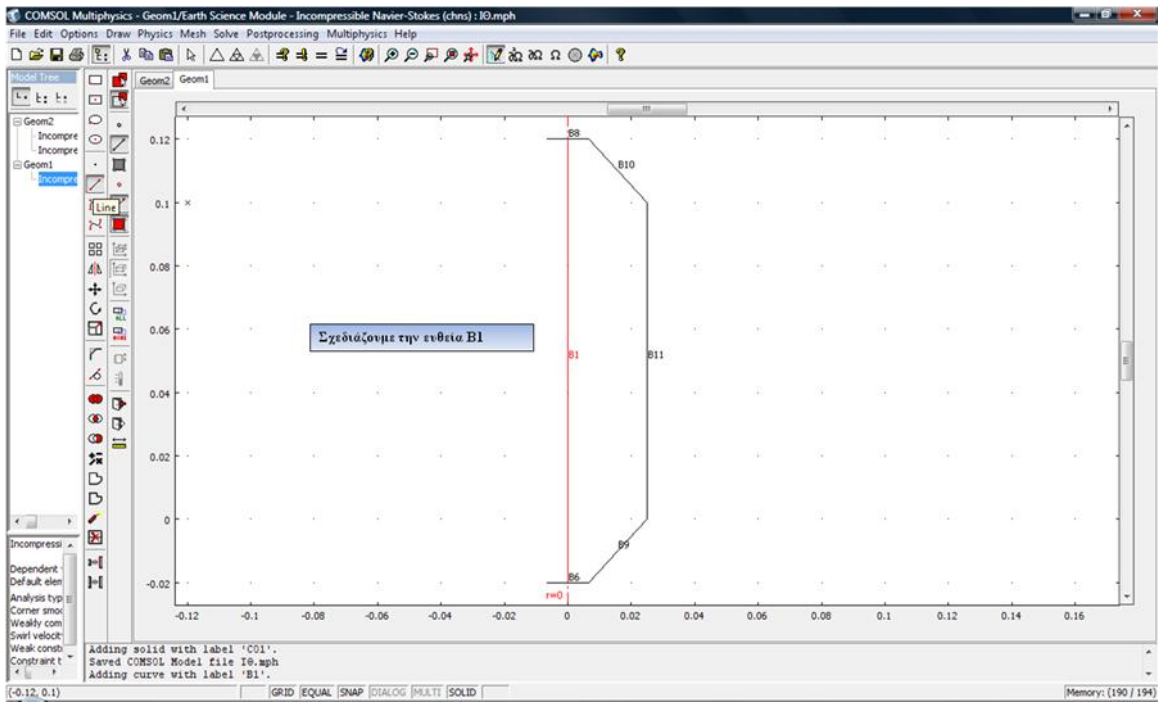


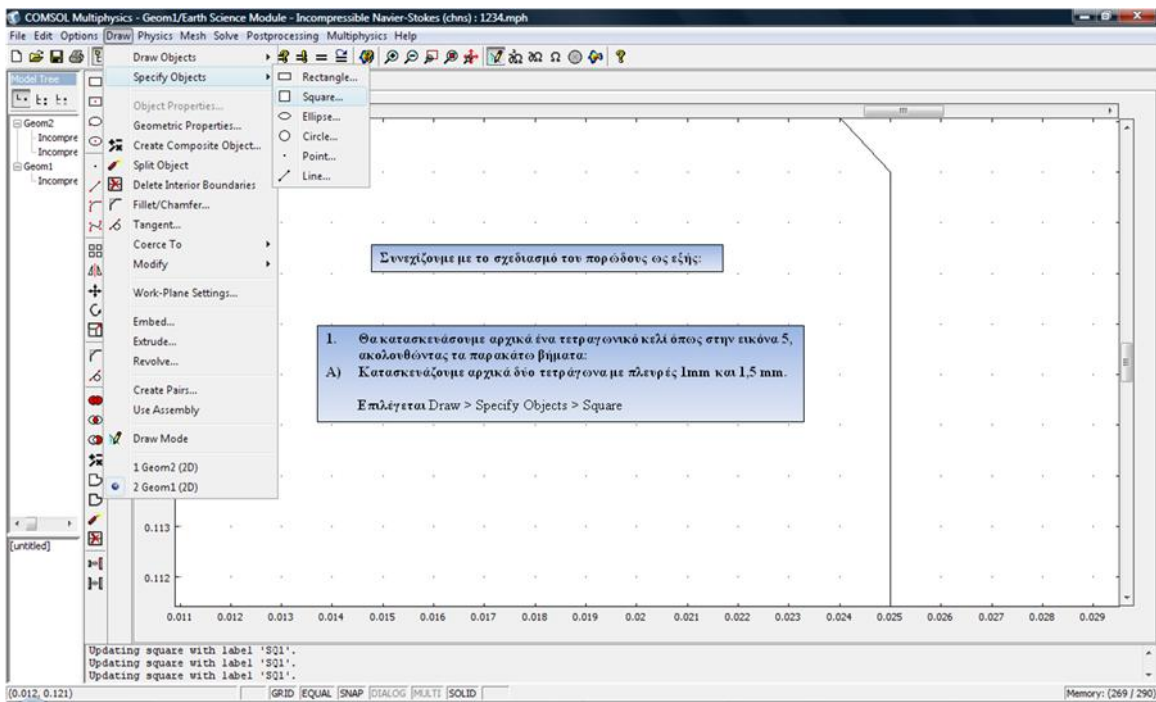
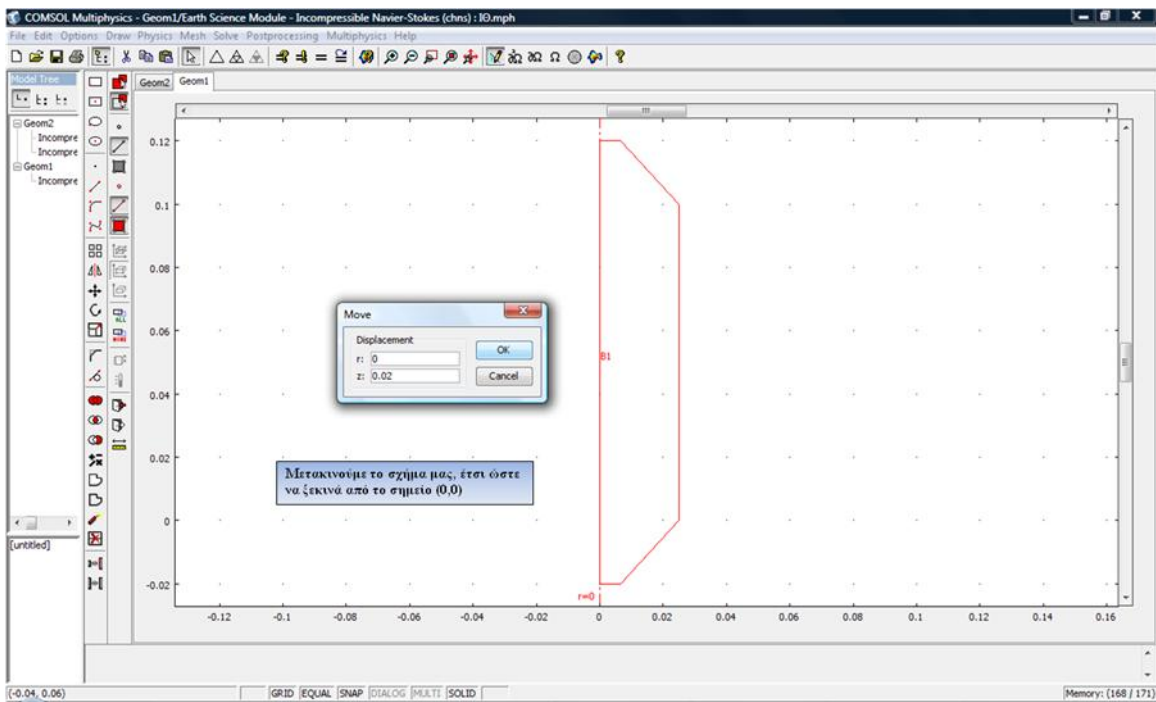


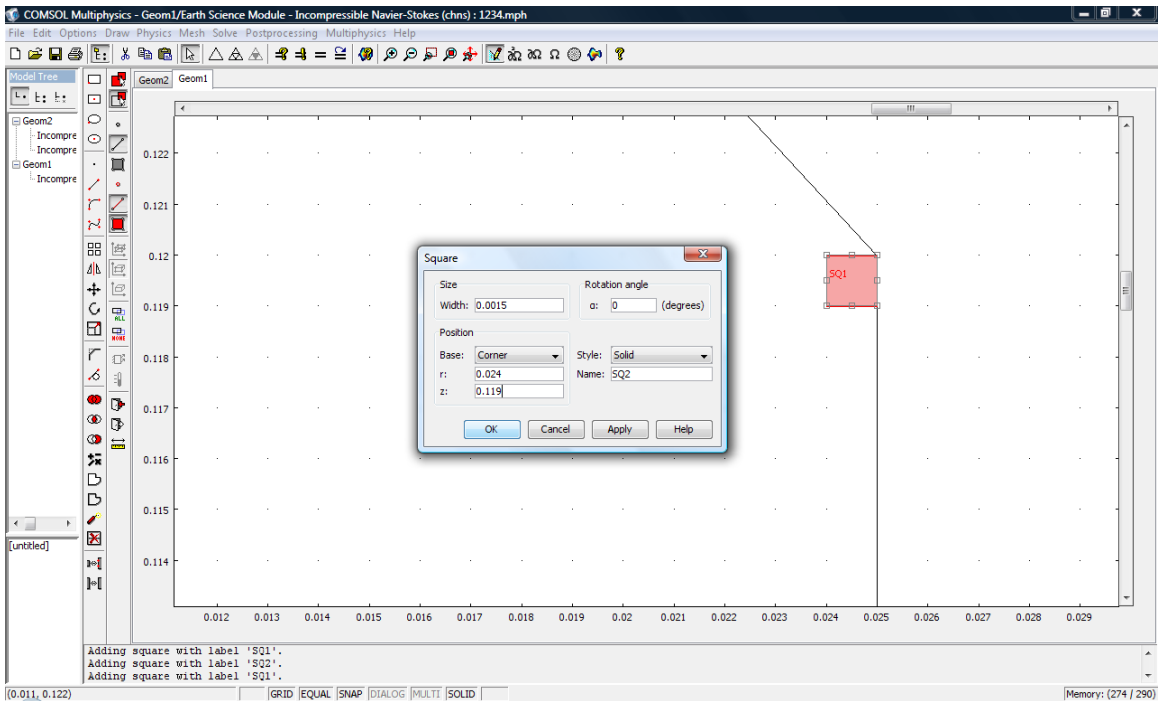
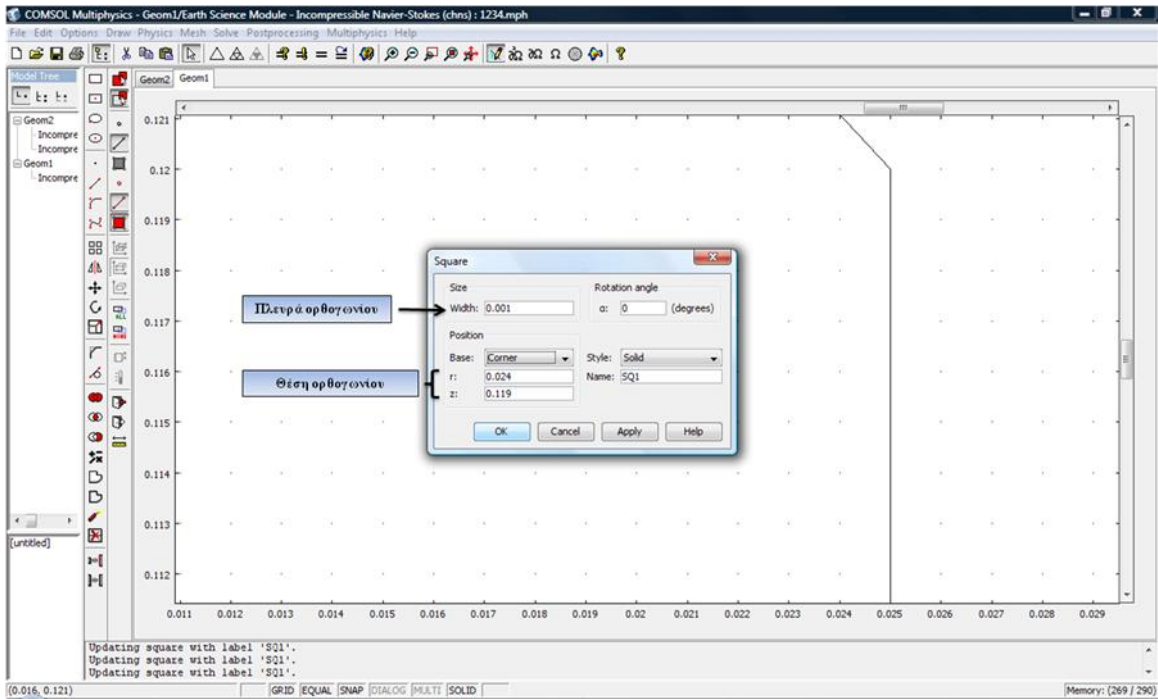


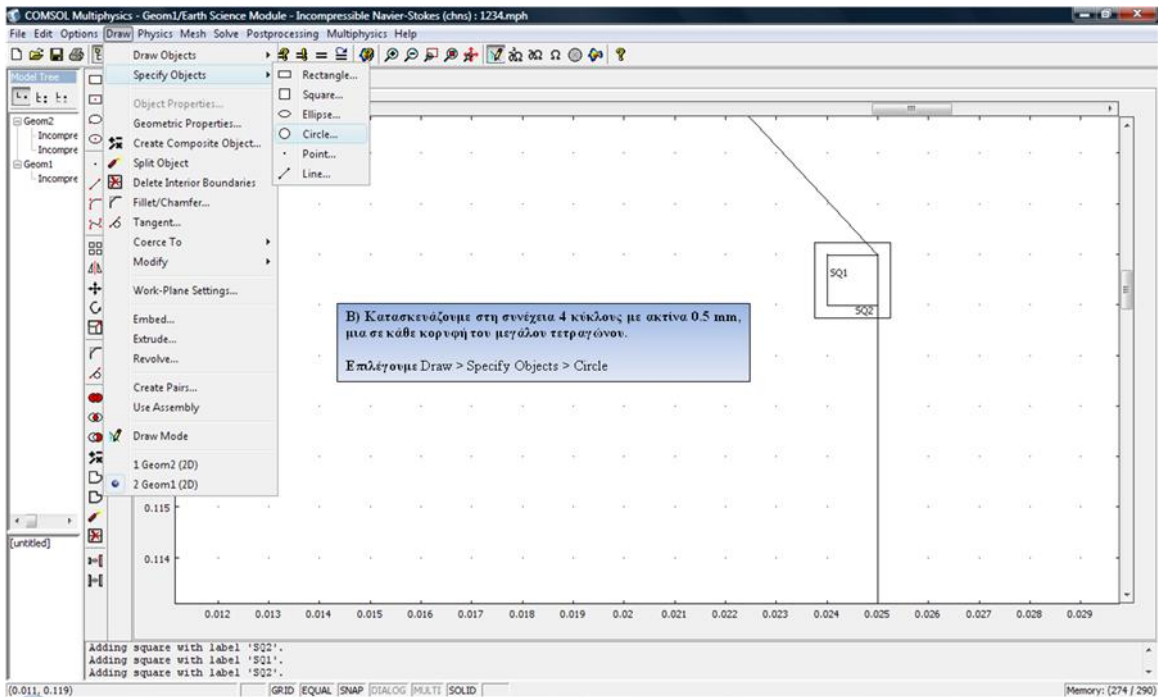
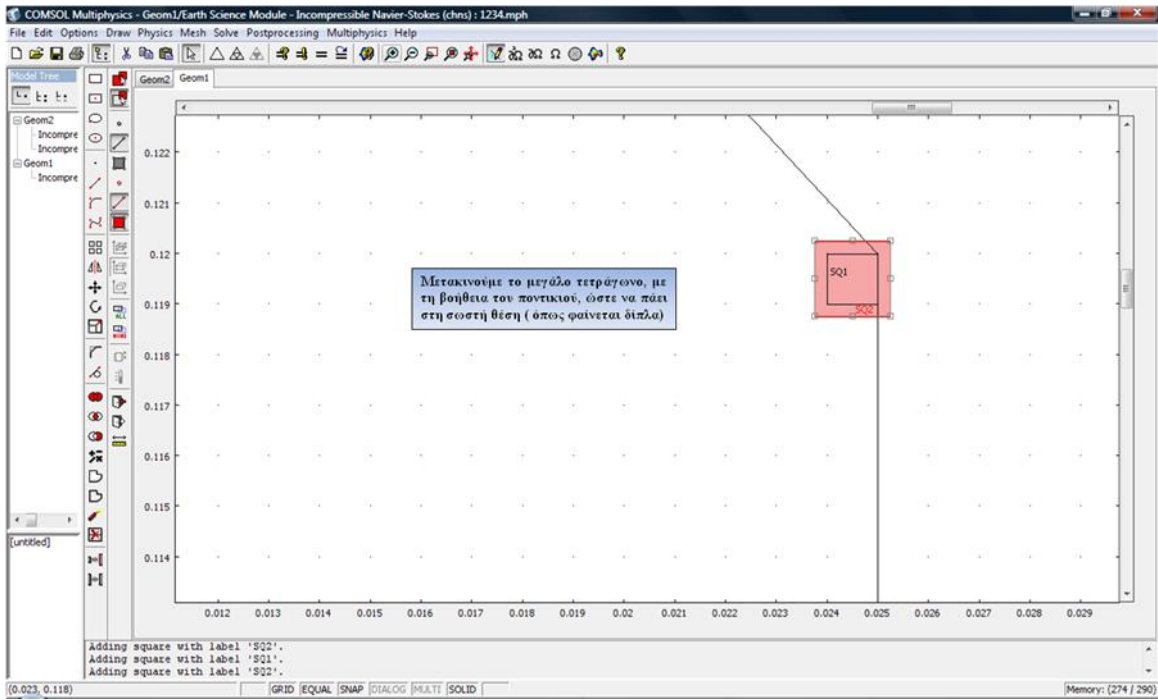




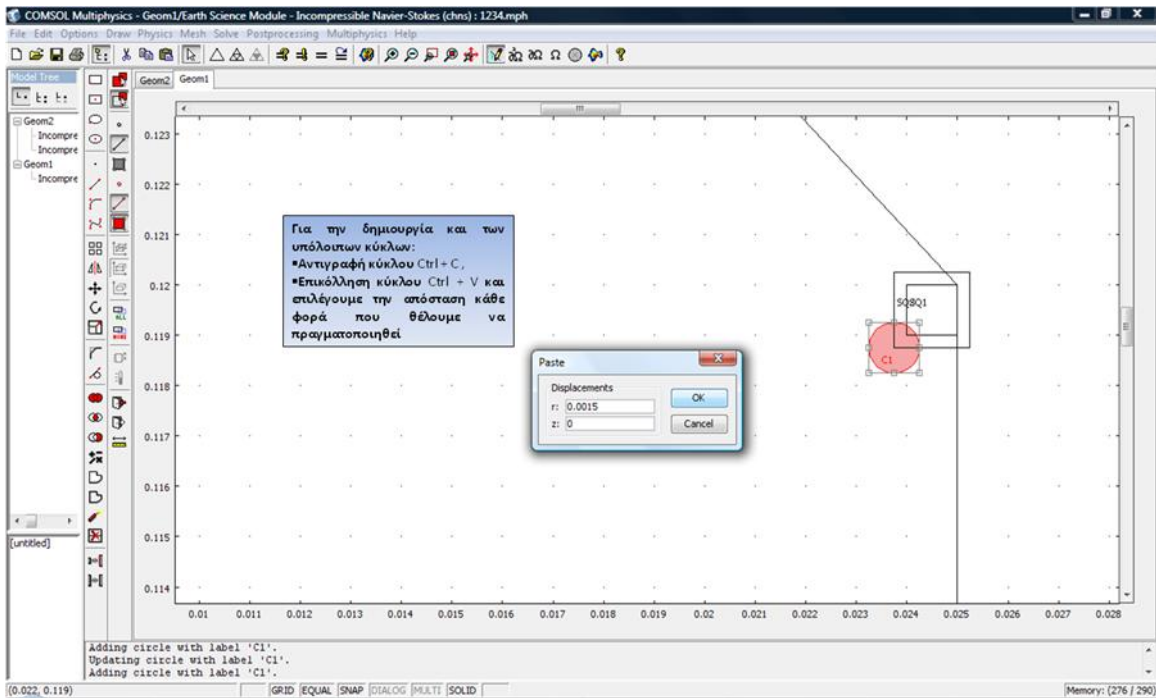
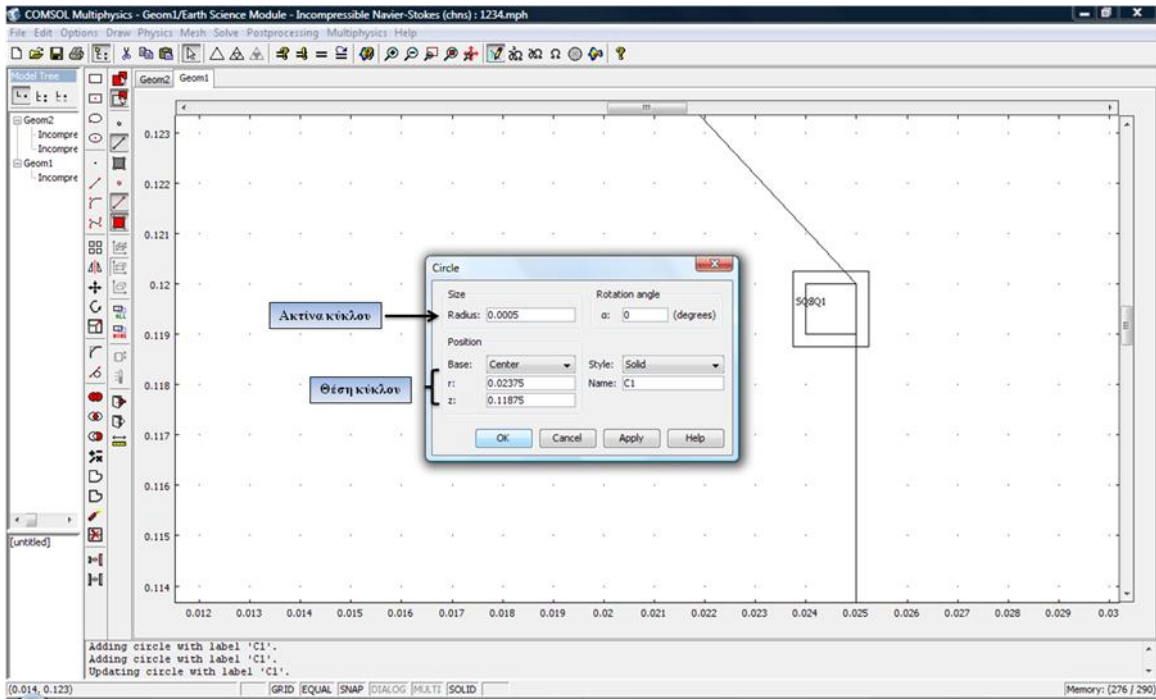


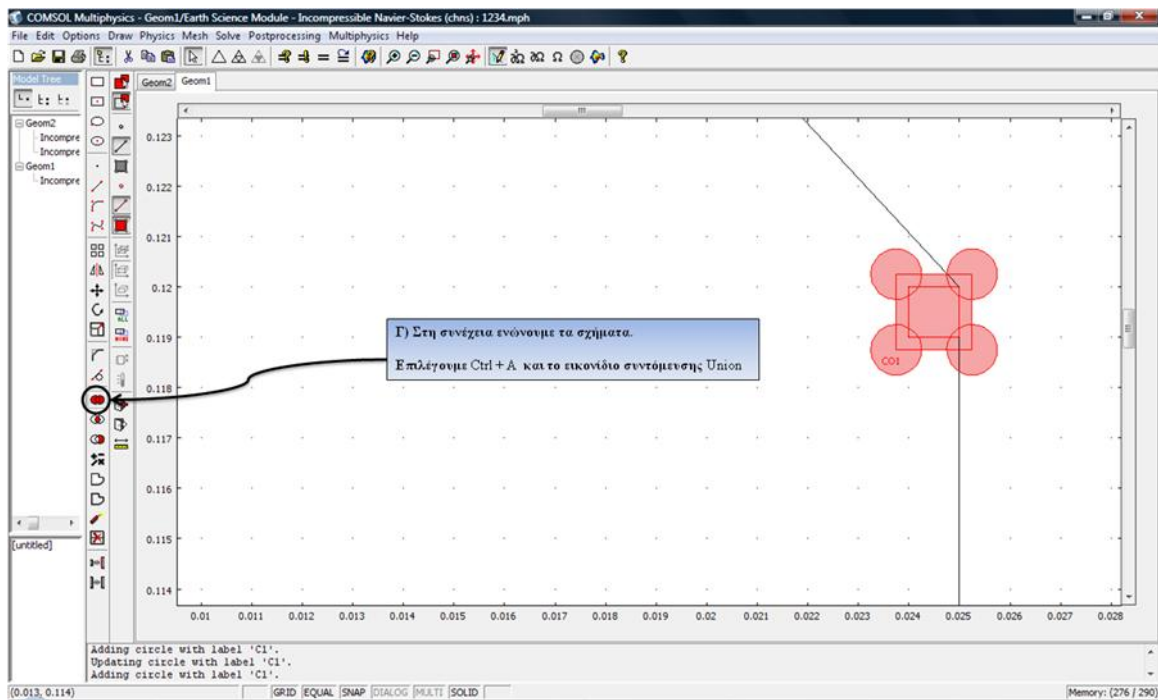
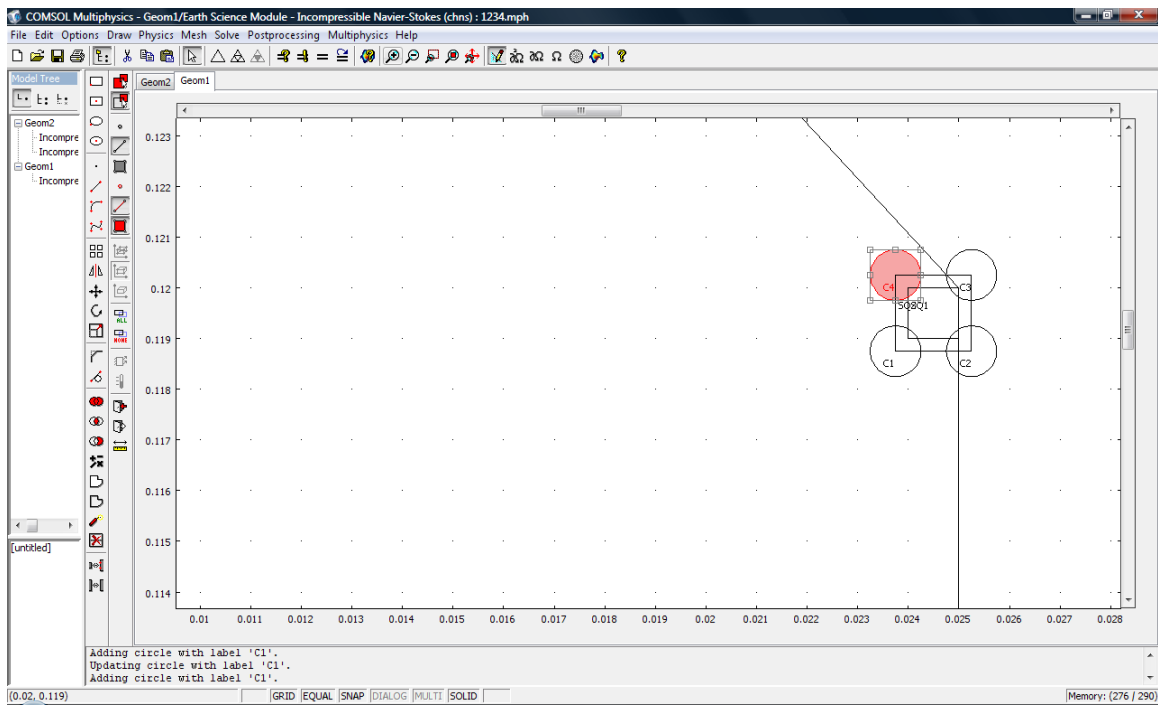




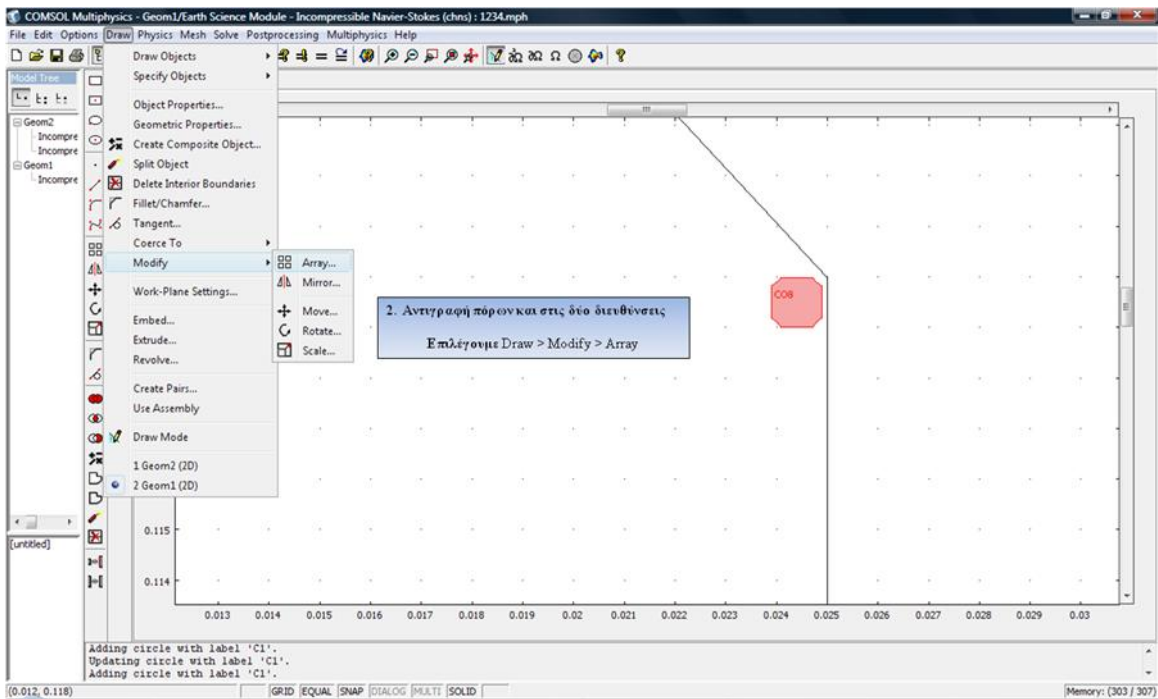
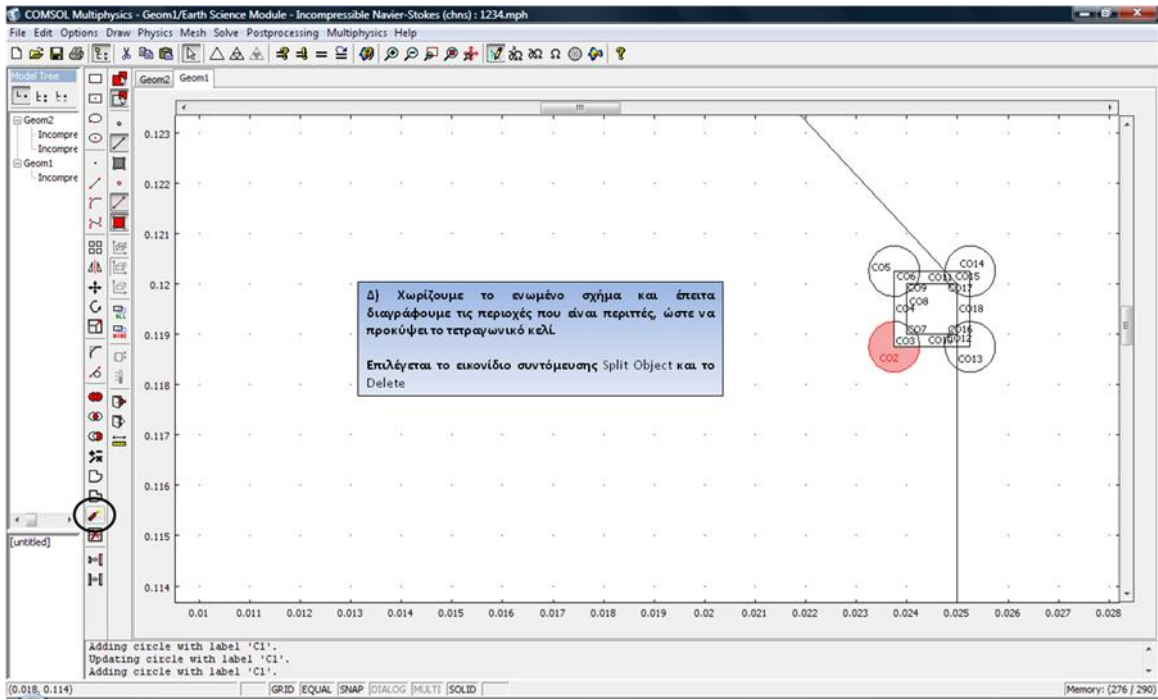


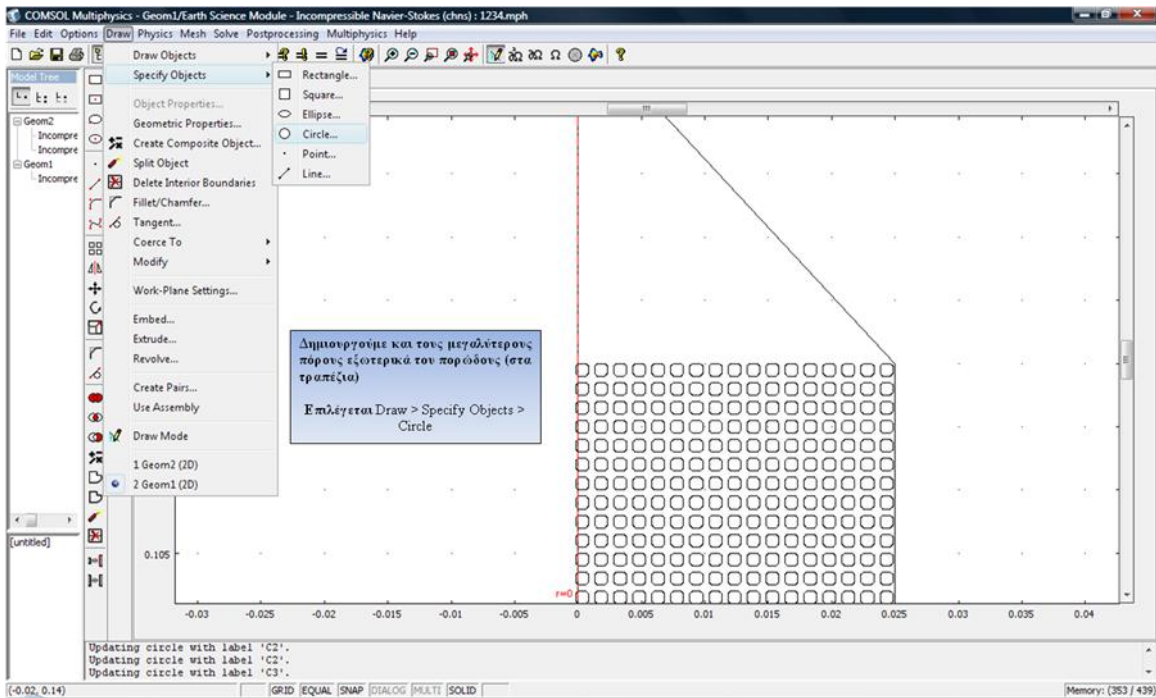
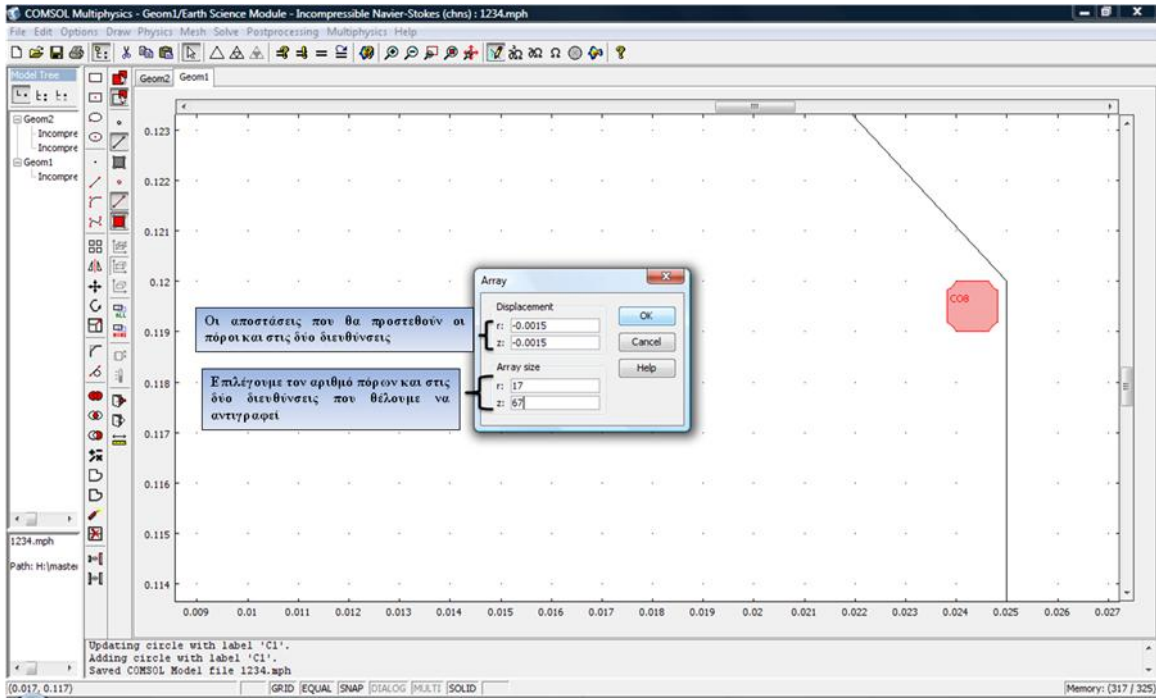


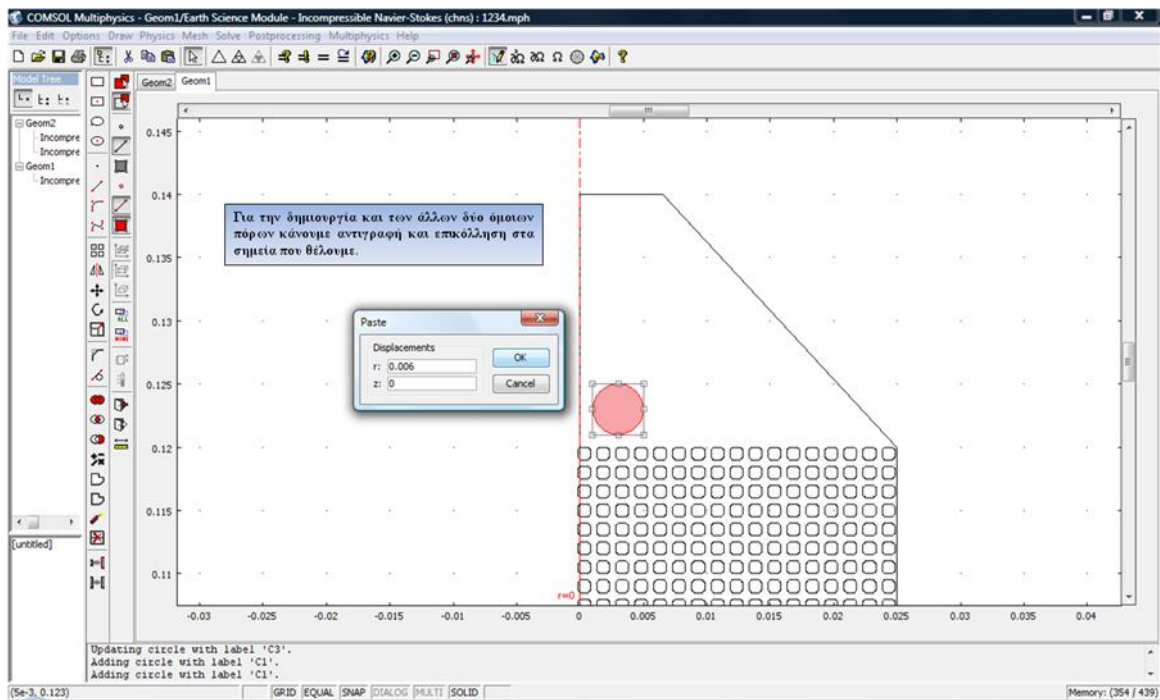
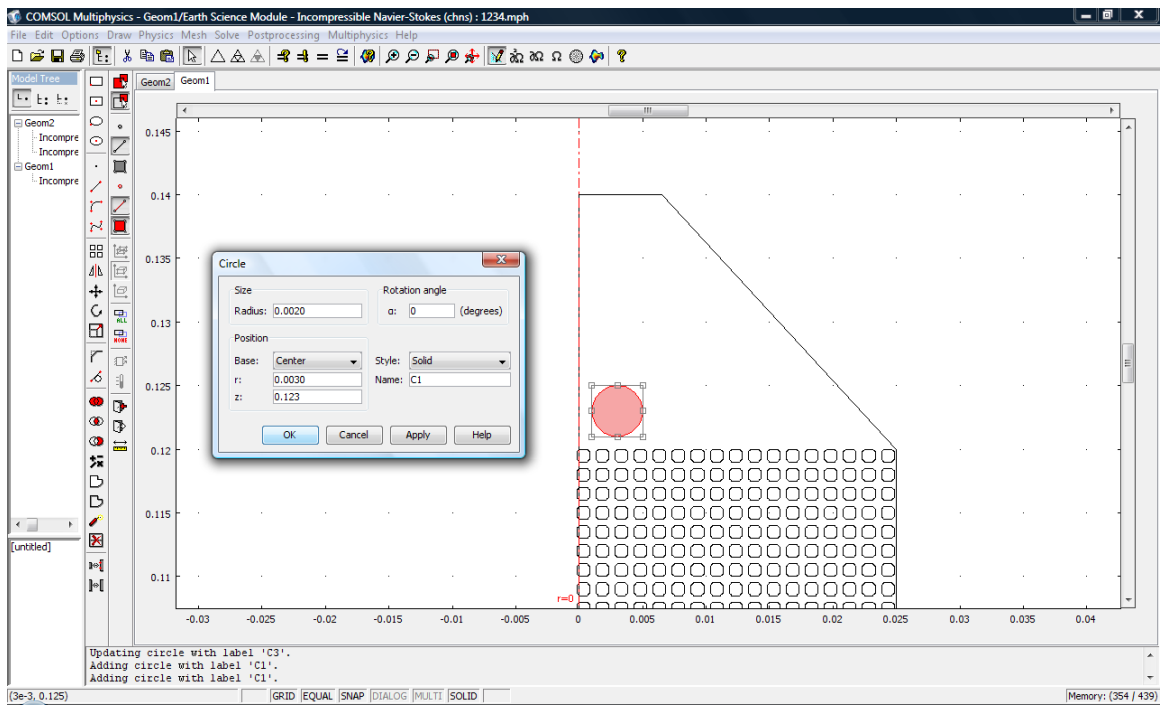


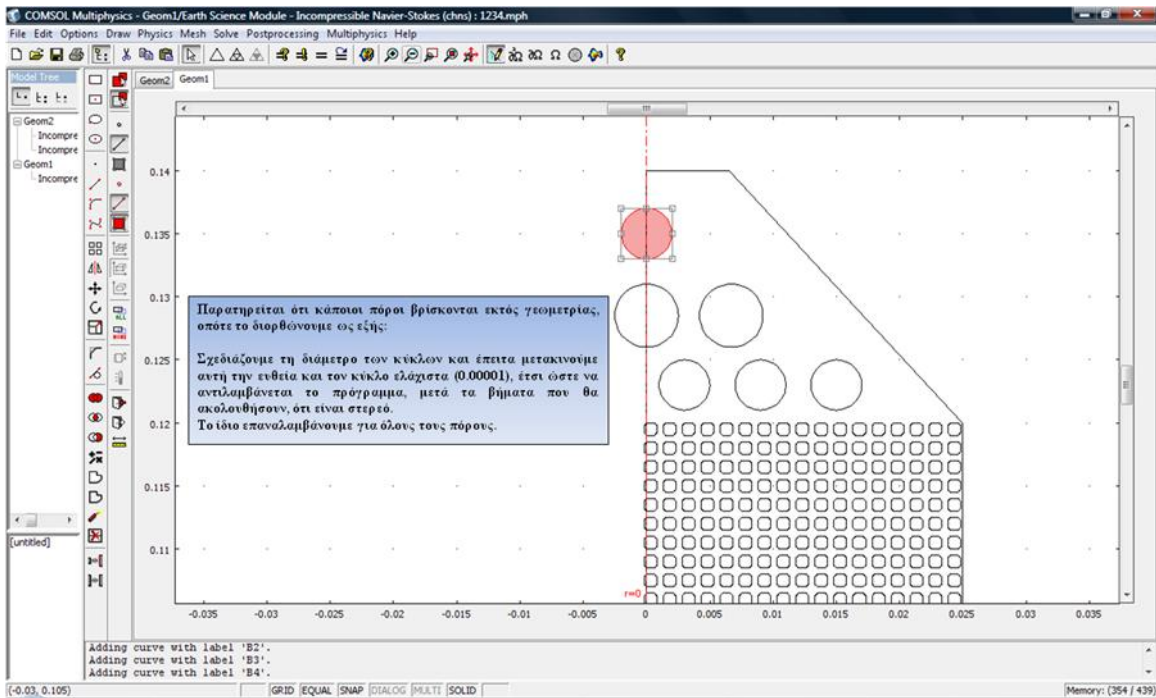
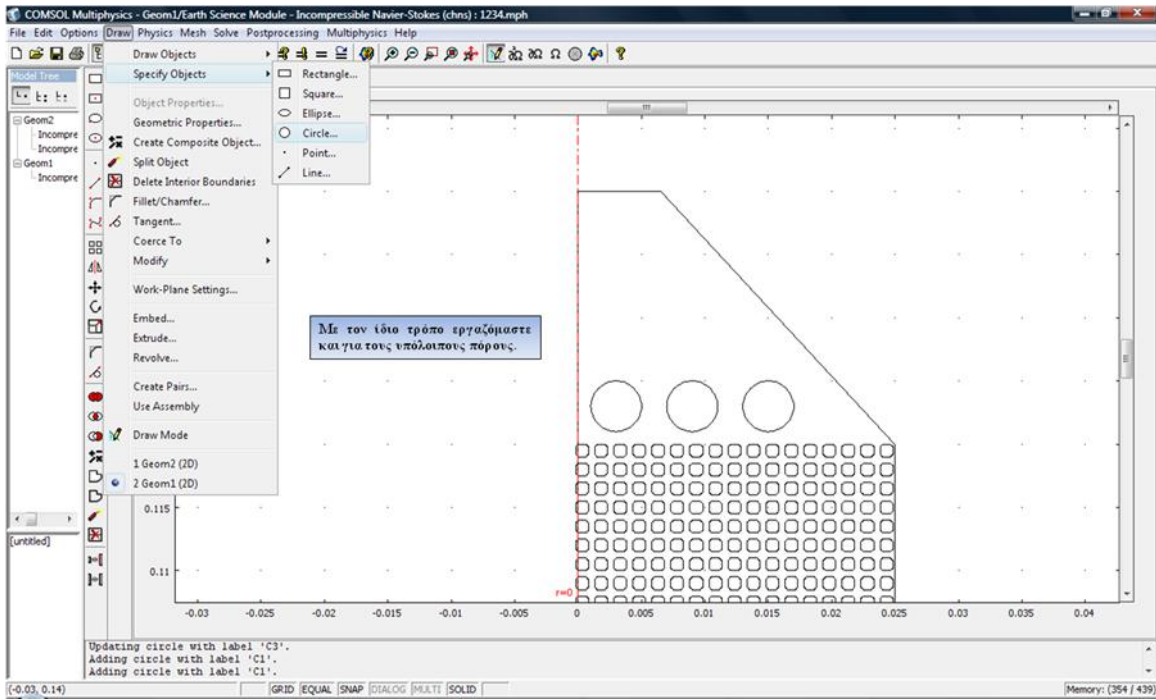


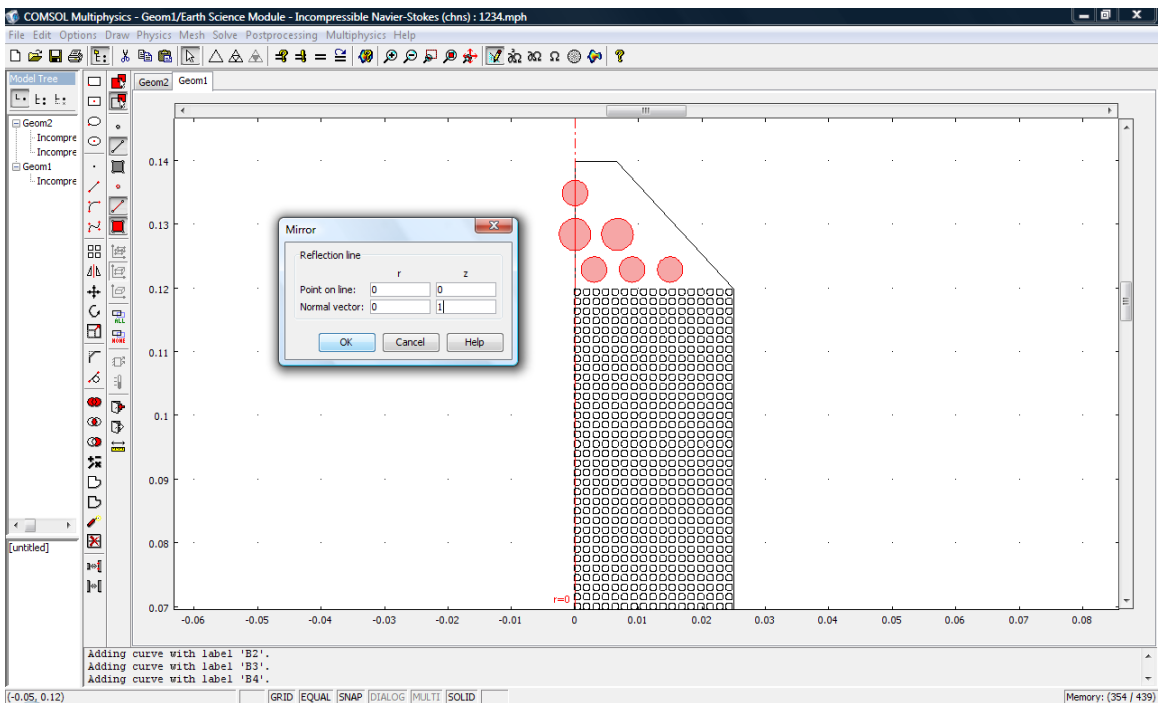
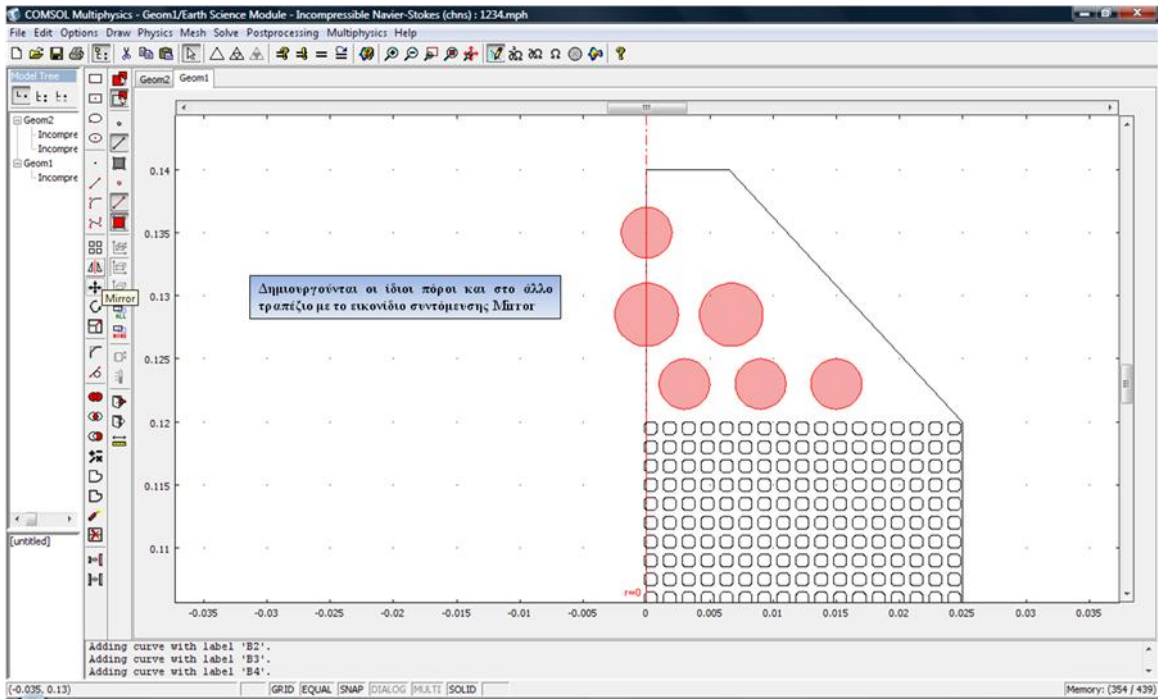




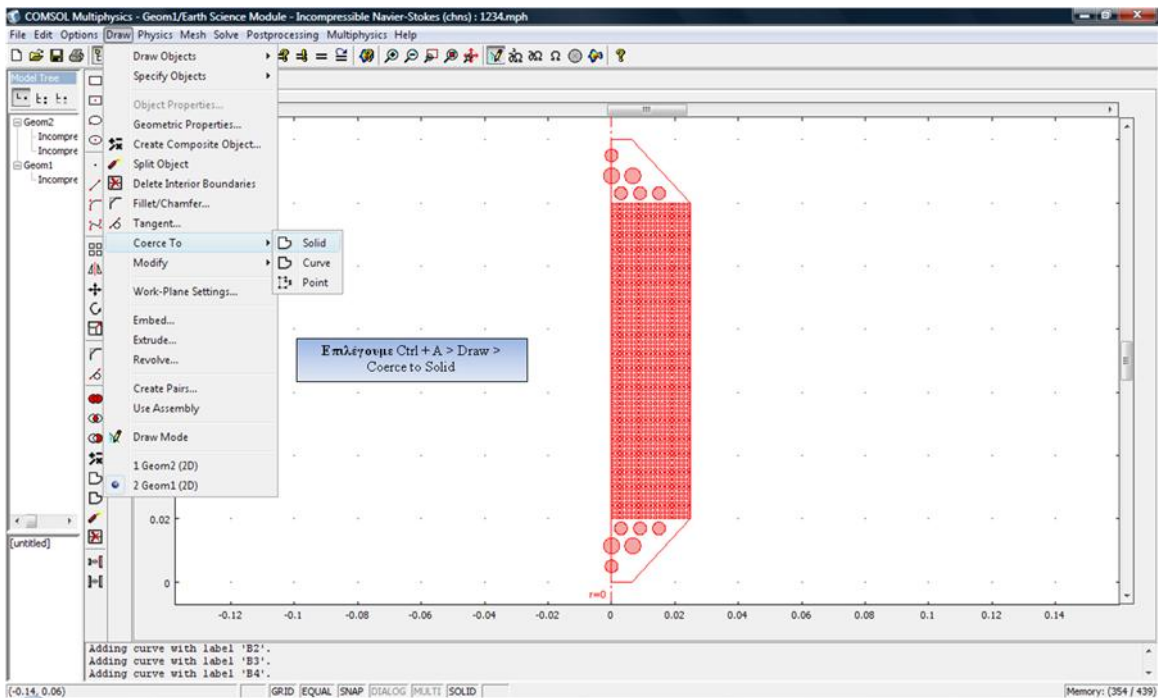
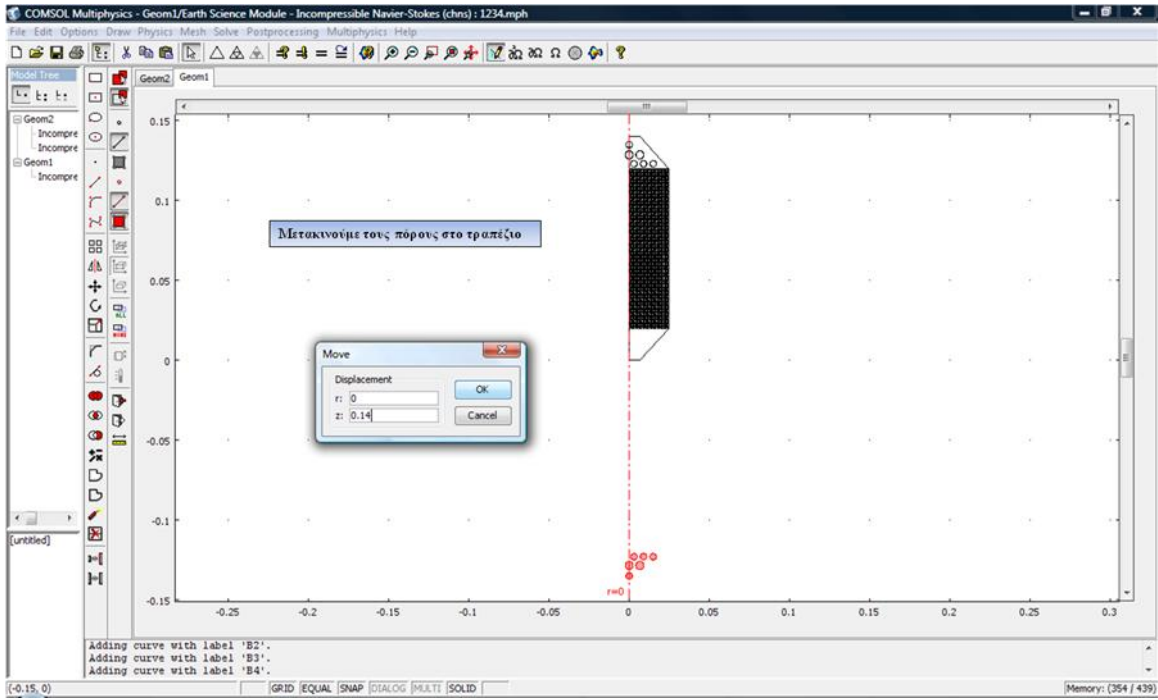


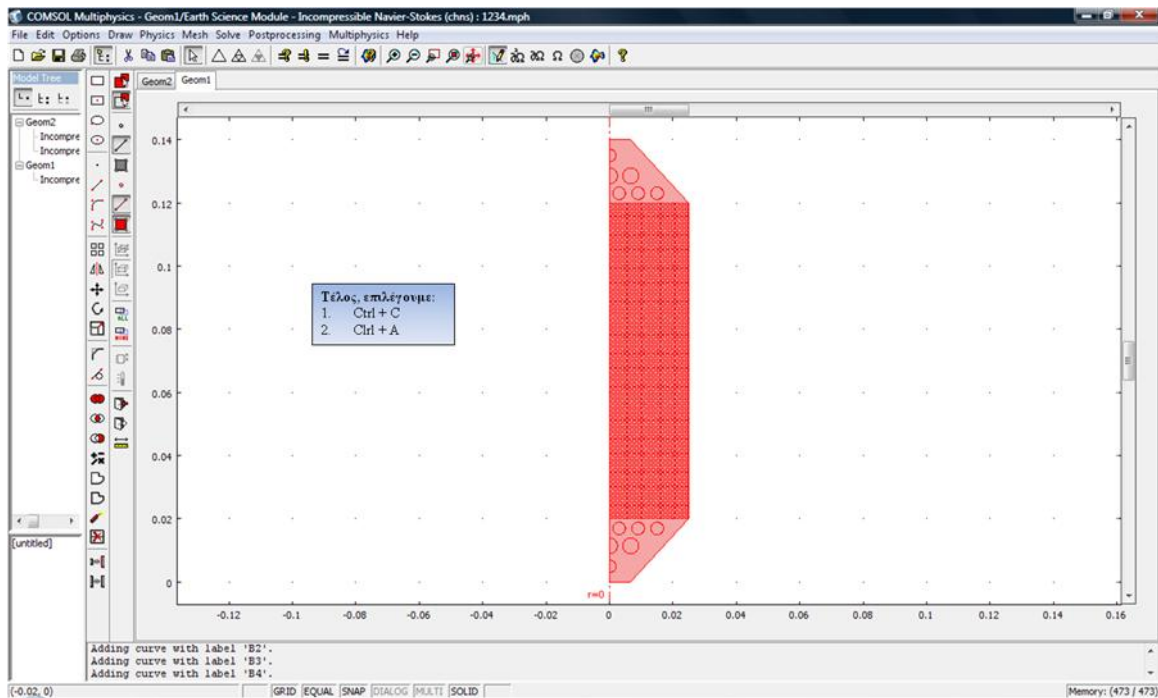
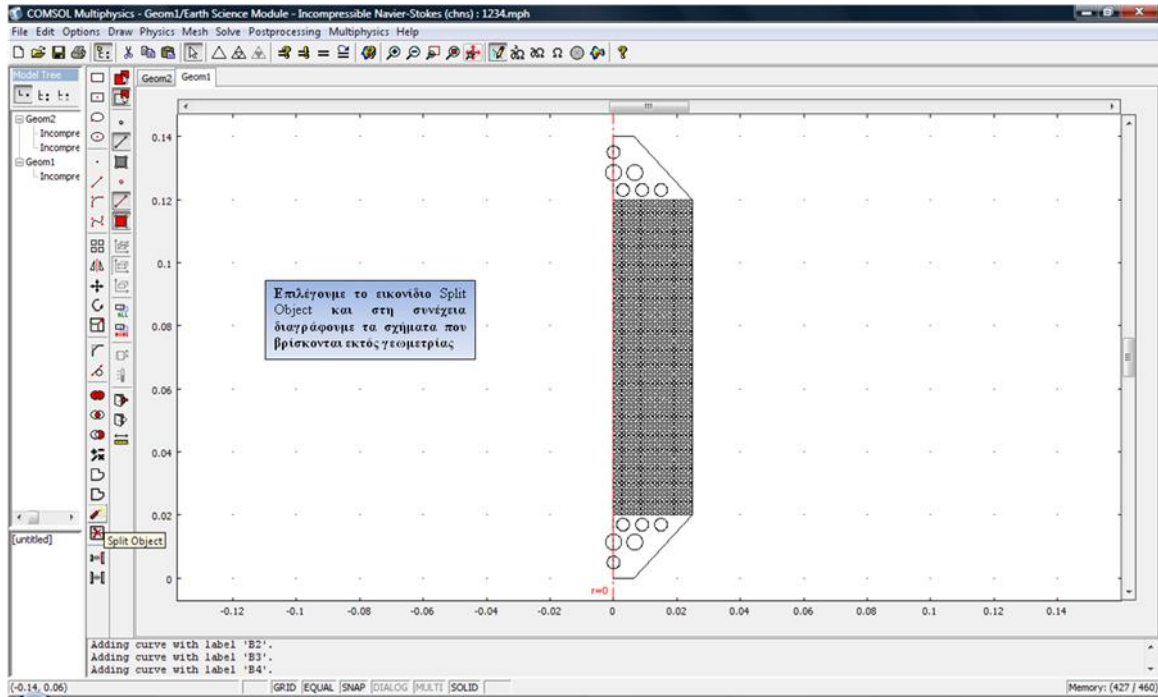


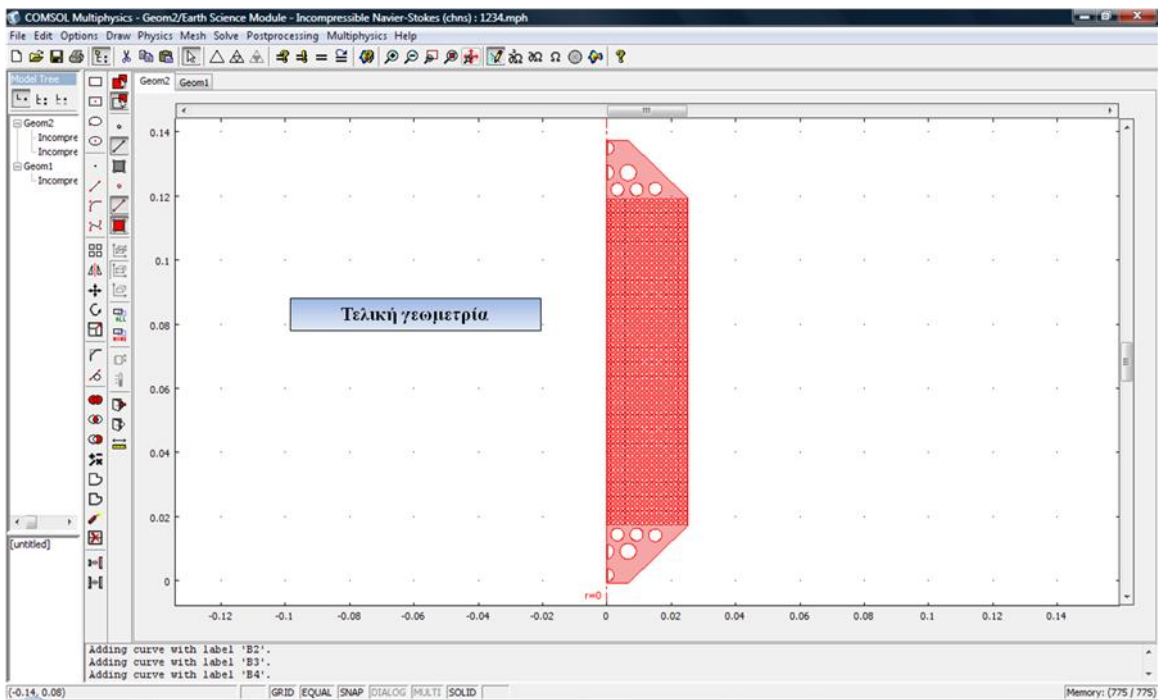
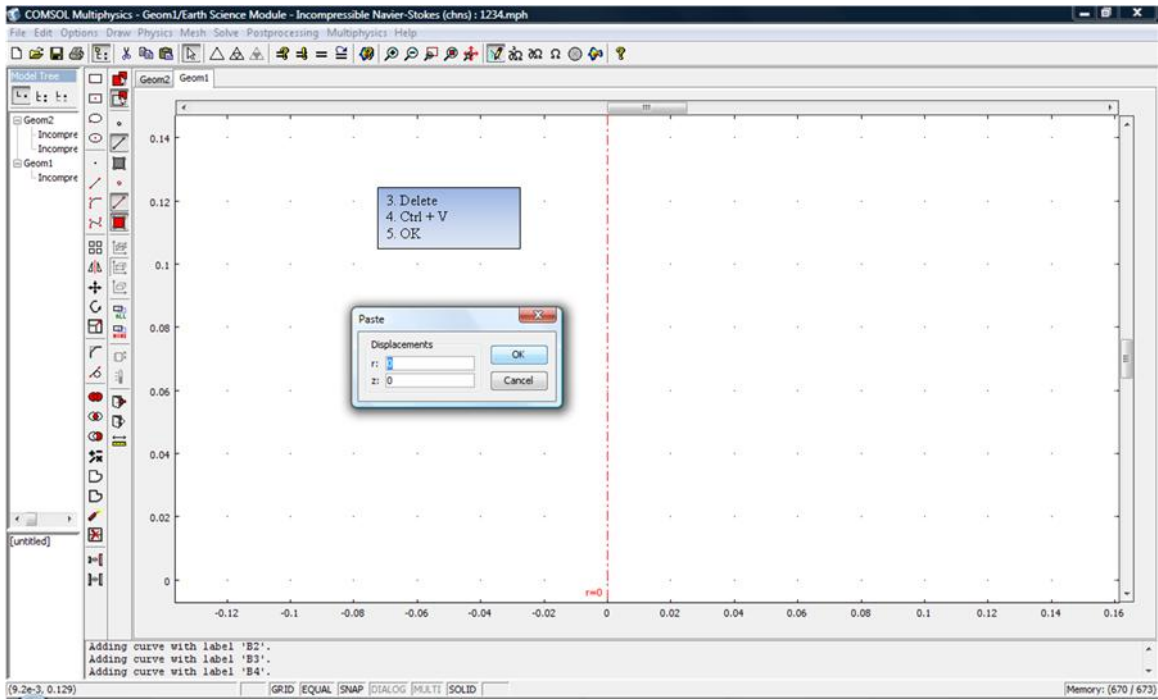






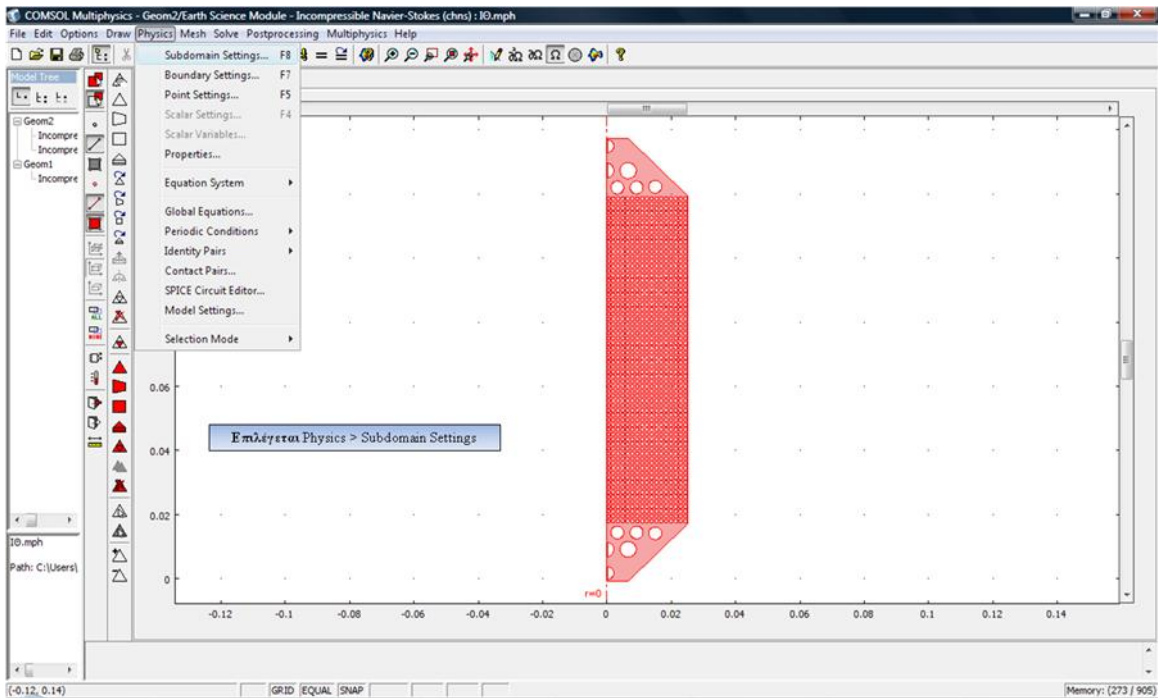
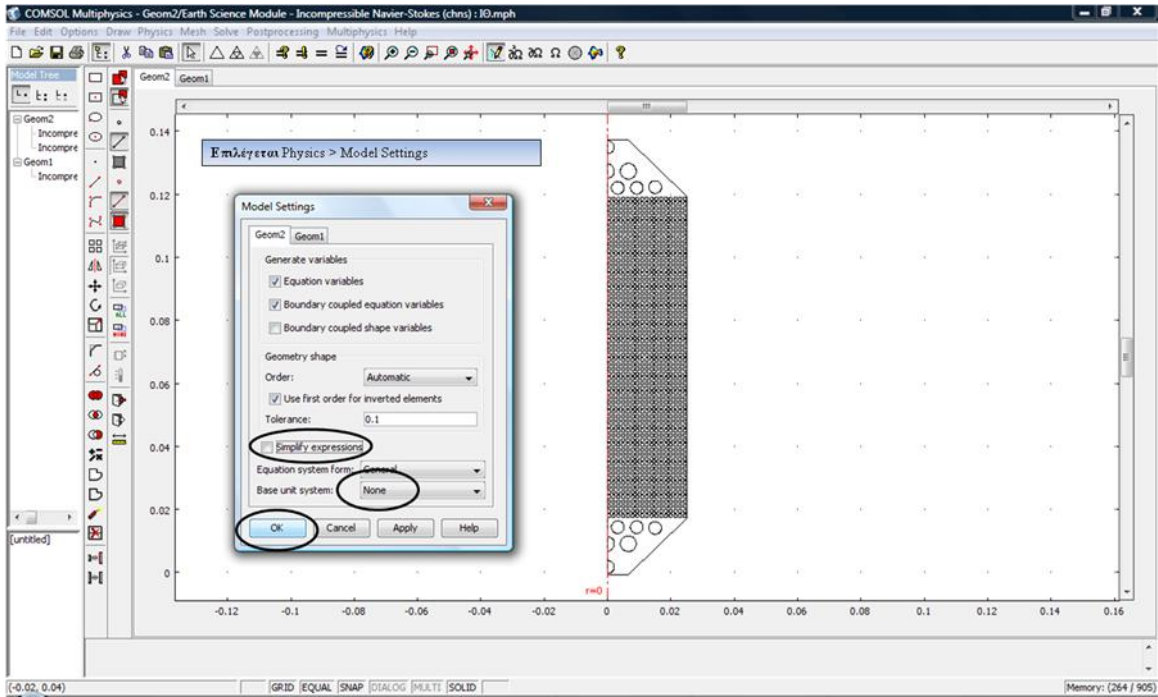


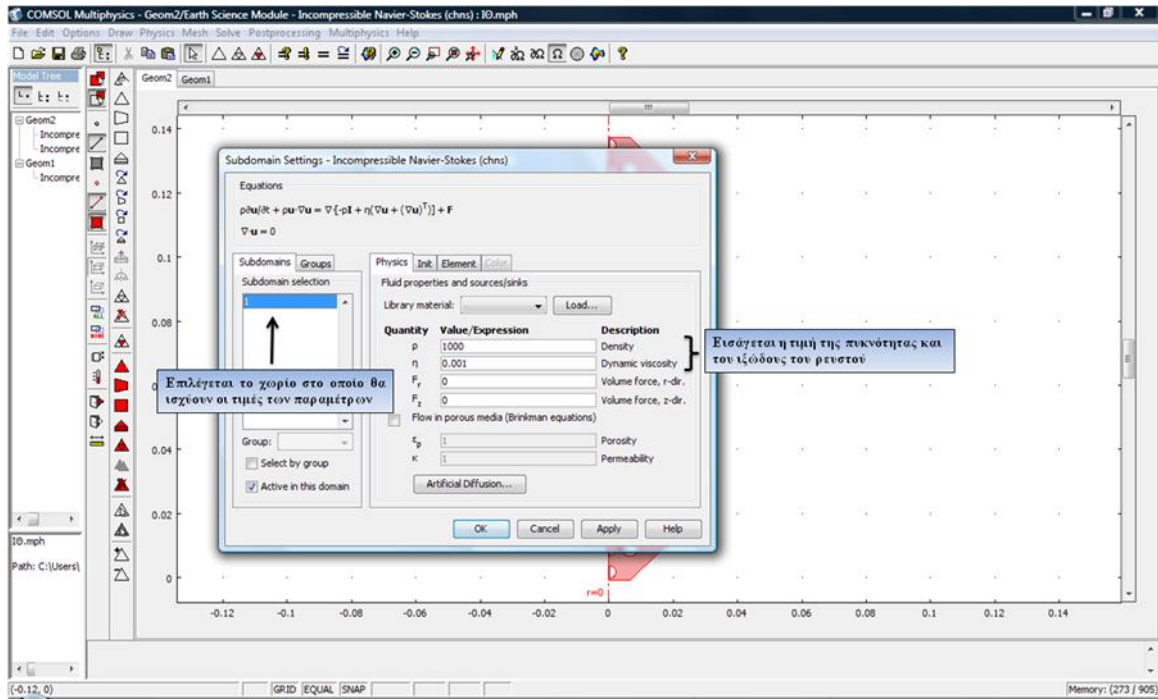




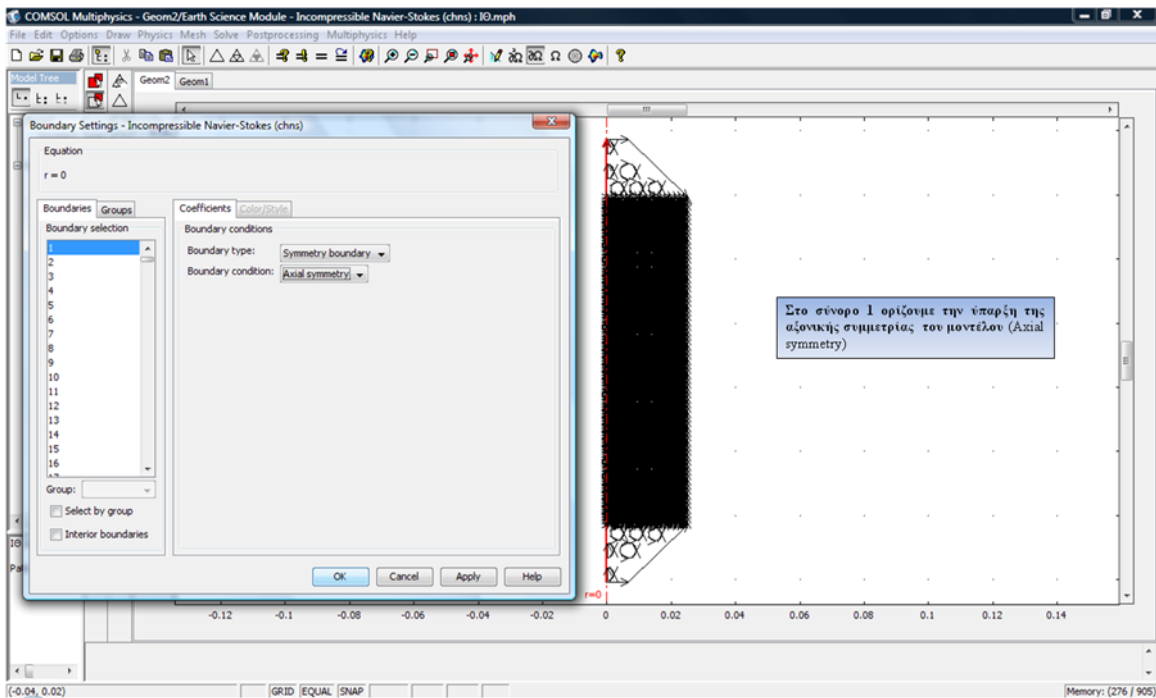
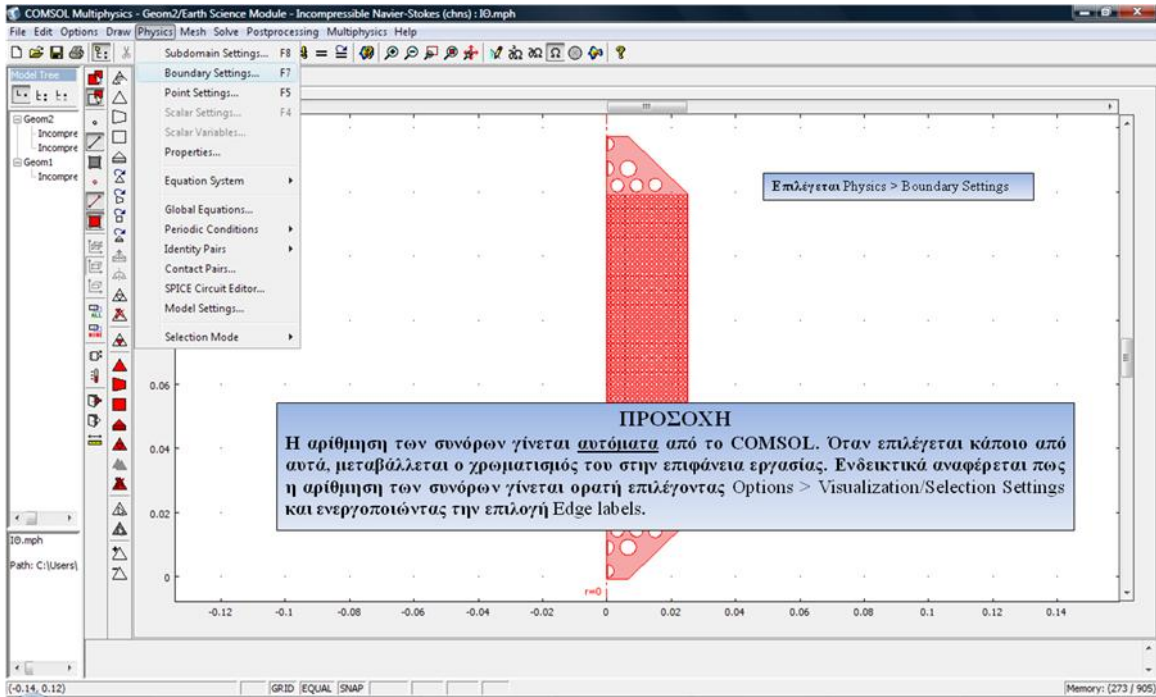


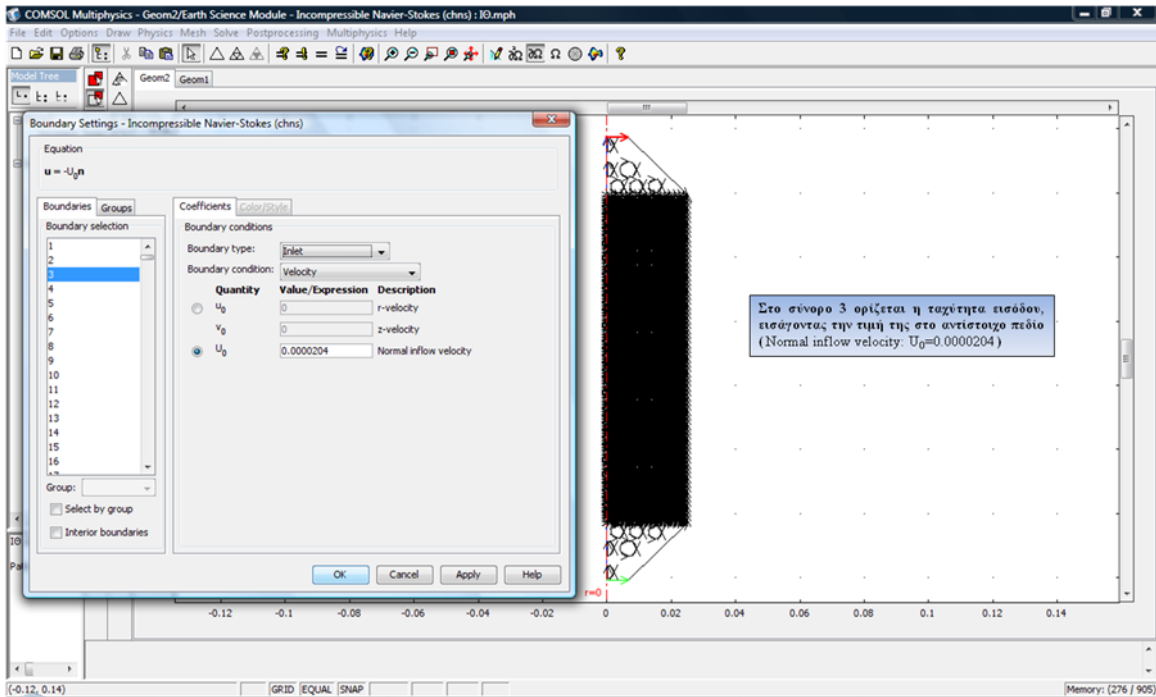
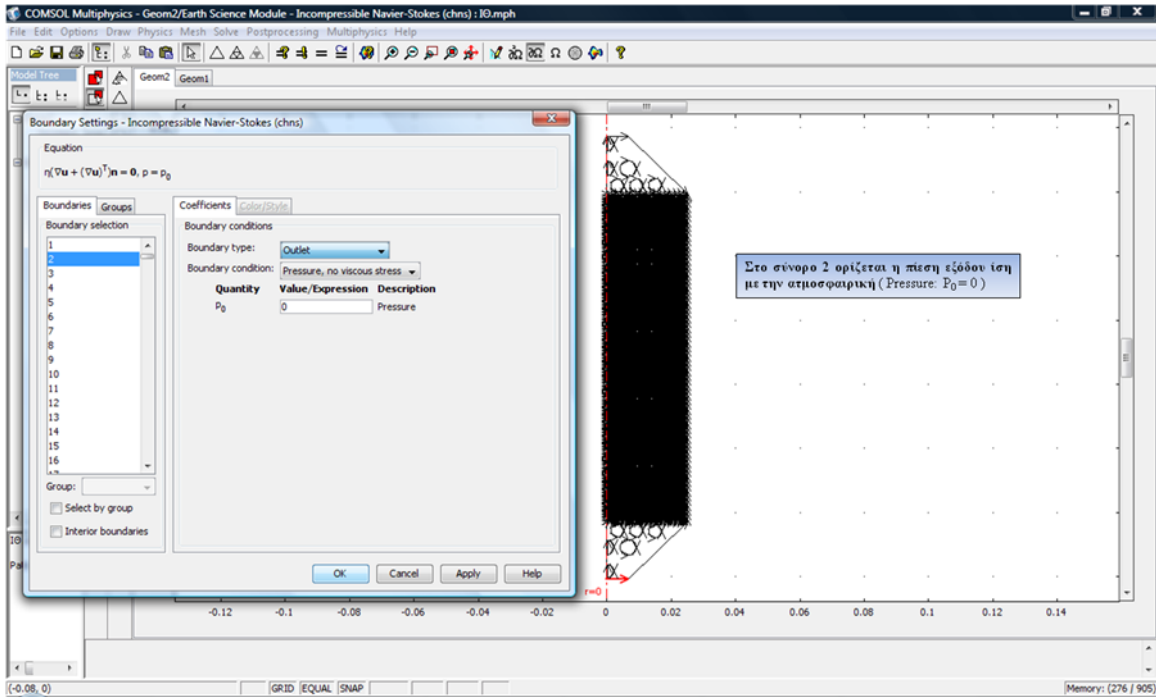
Βήμα 3: Ορισμός των παραμέτρων



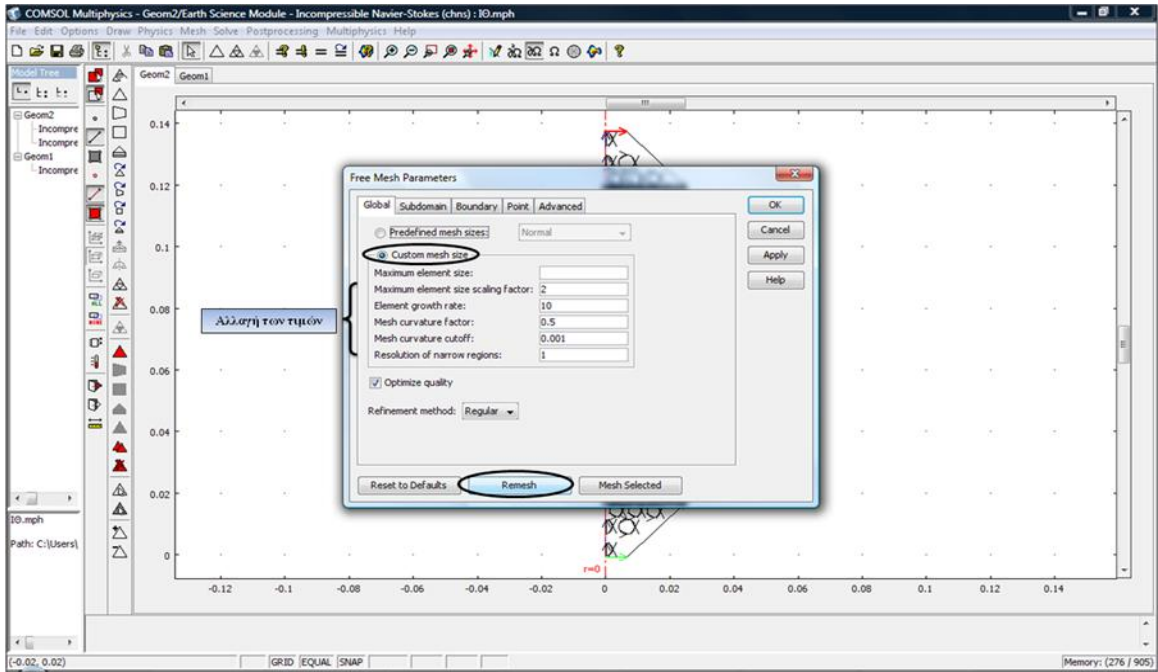
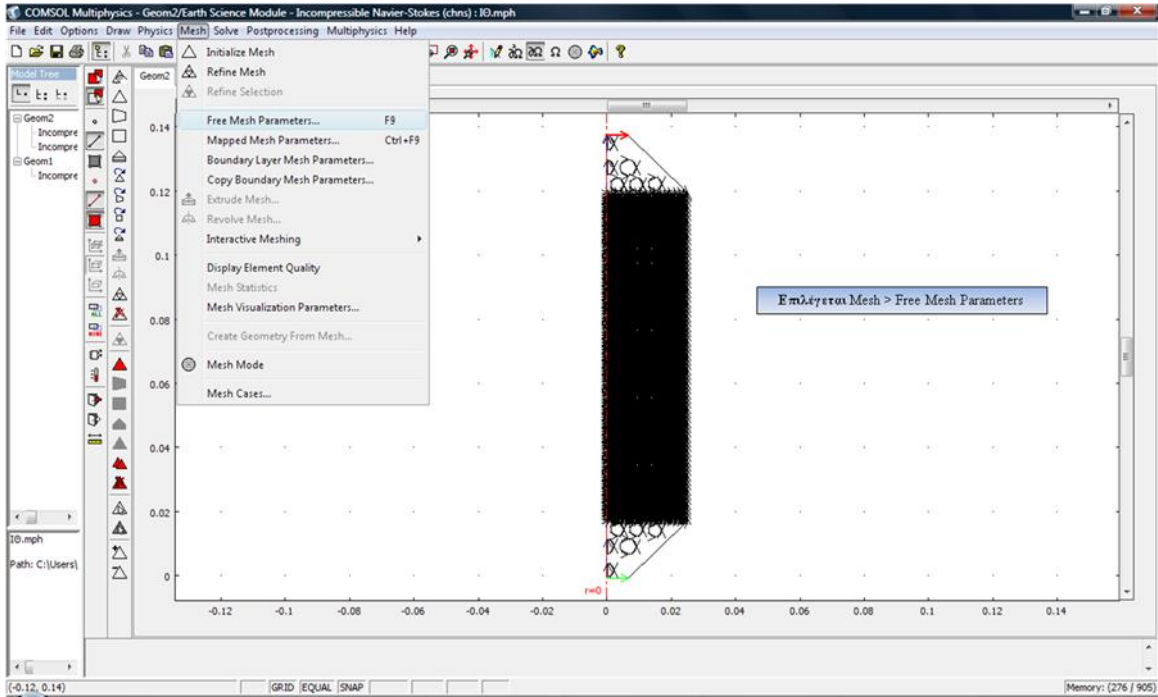


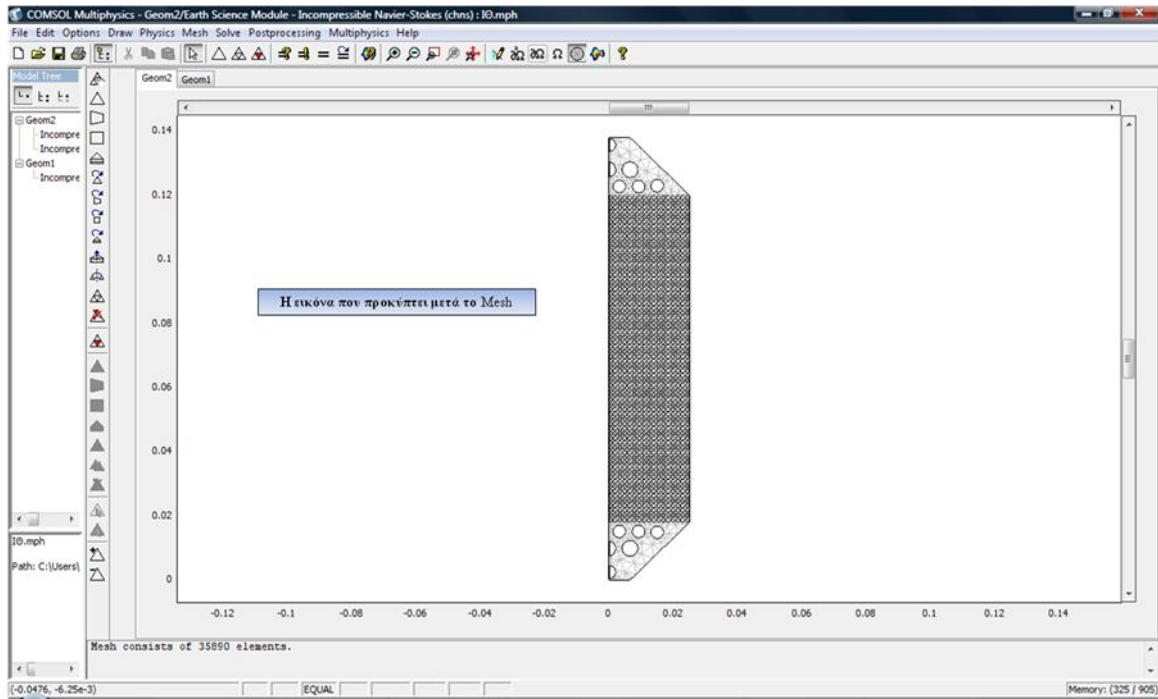
Βήμα 4: Επιβολή συνοριακών συνθηκών





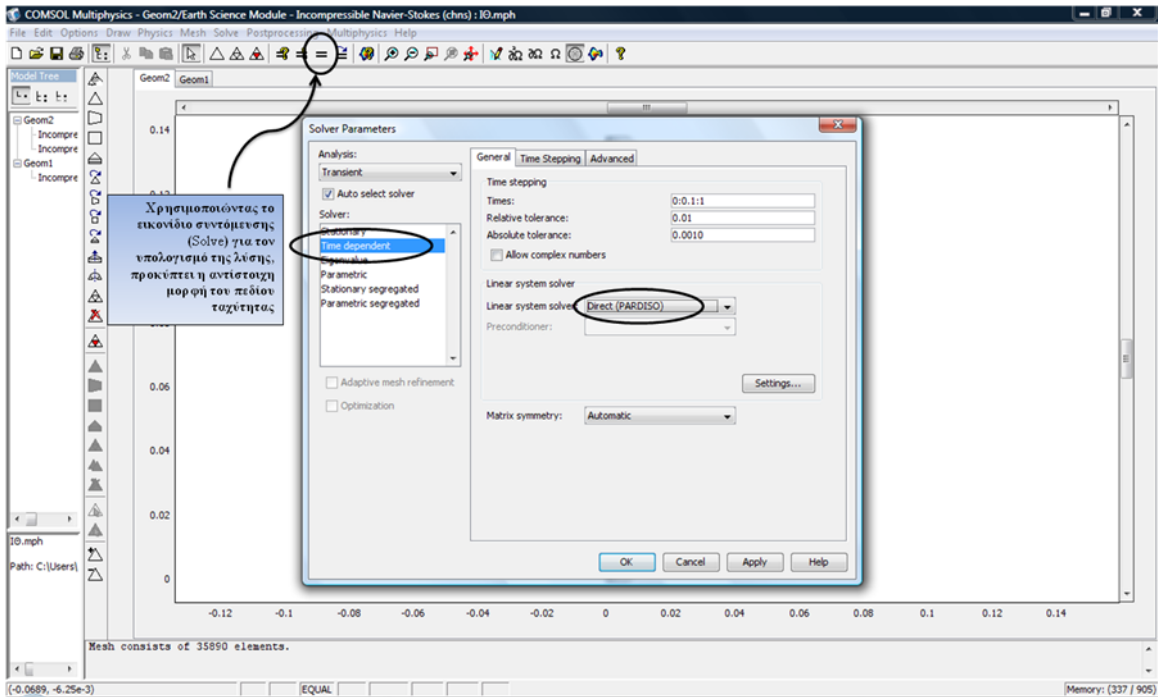
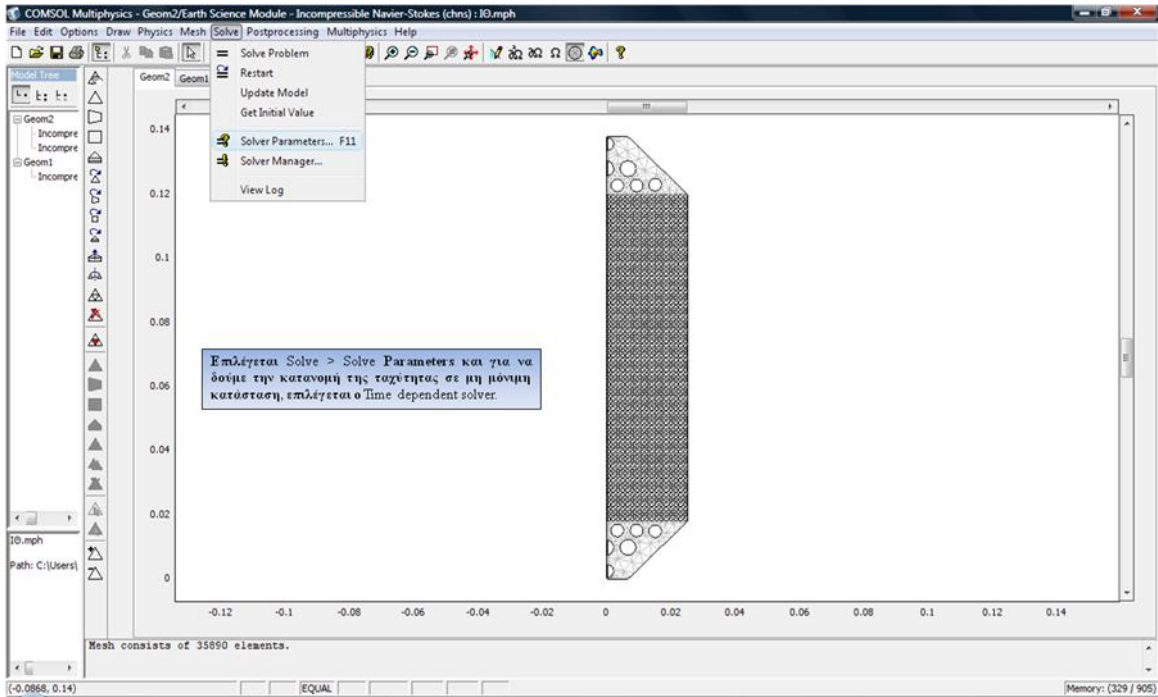
Βήμα 5: Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης



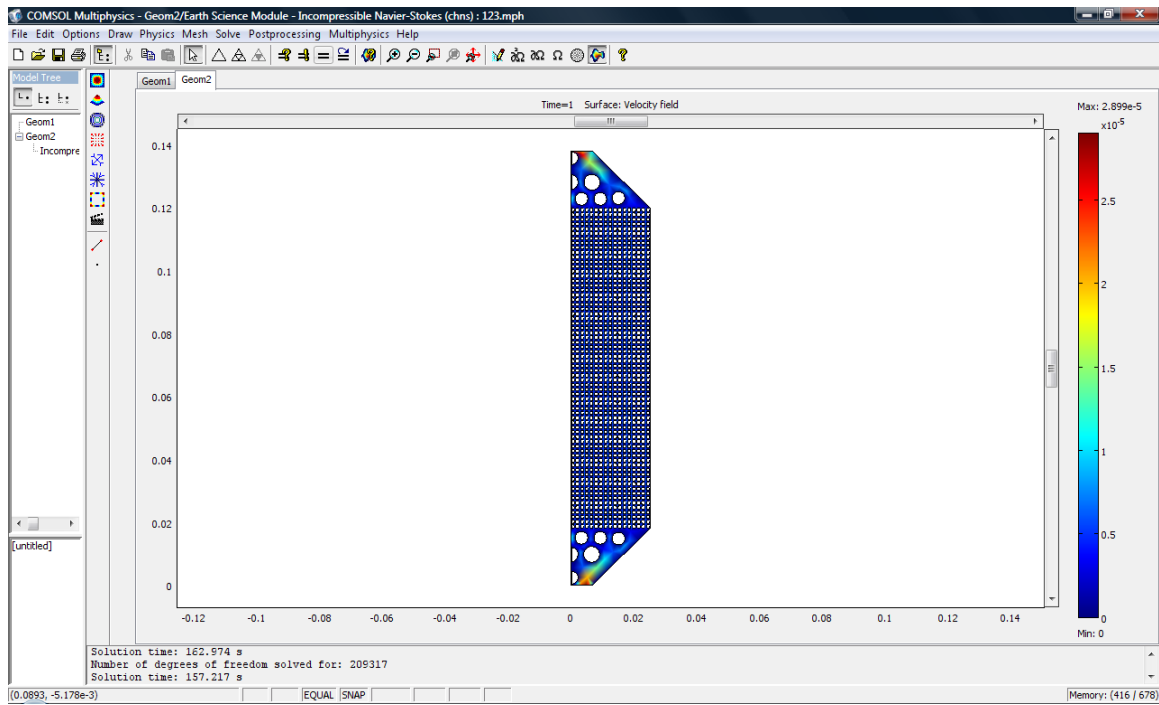




**Βήμα 6: Επιλογή επιλύτη**

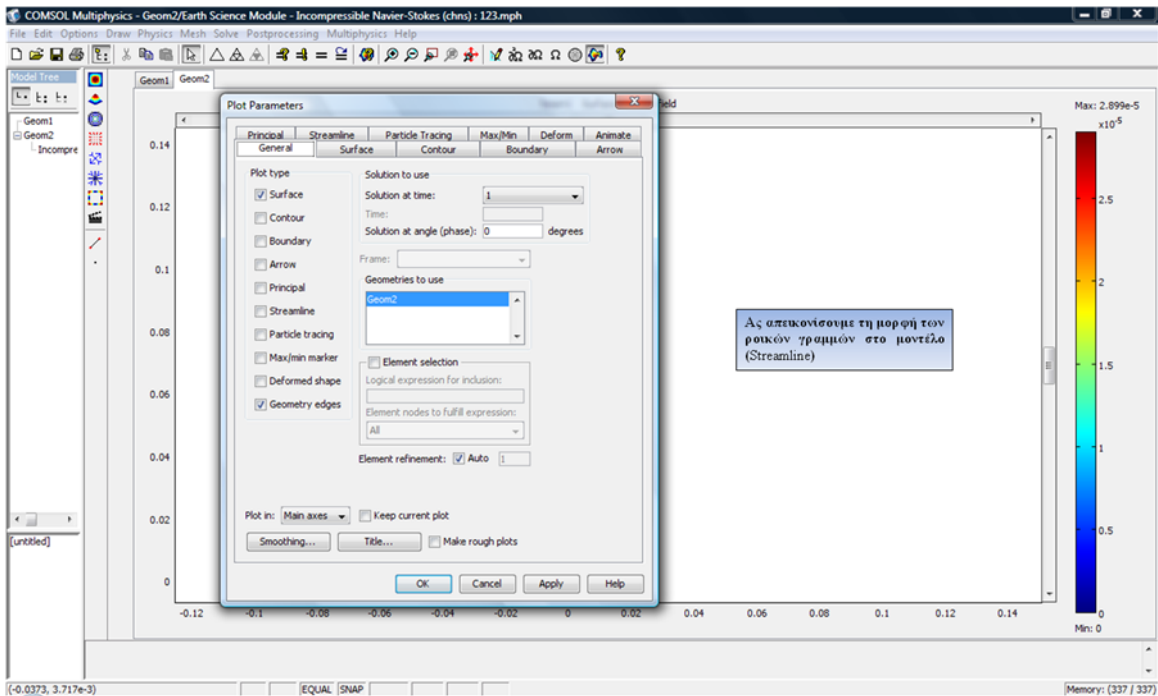
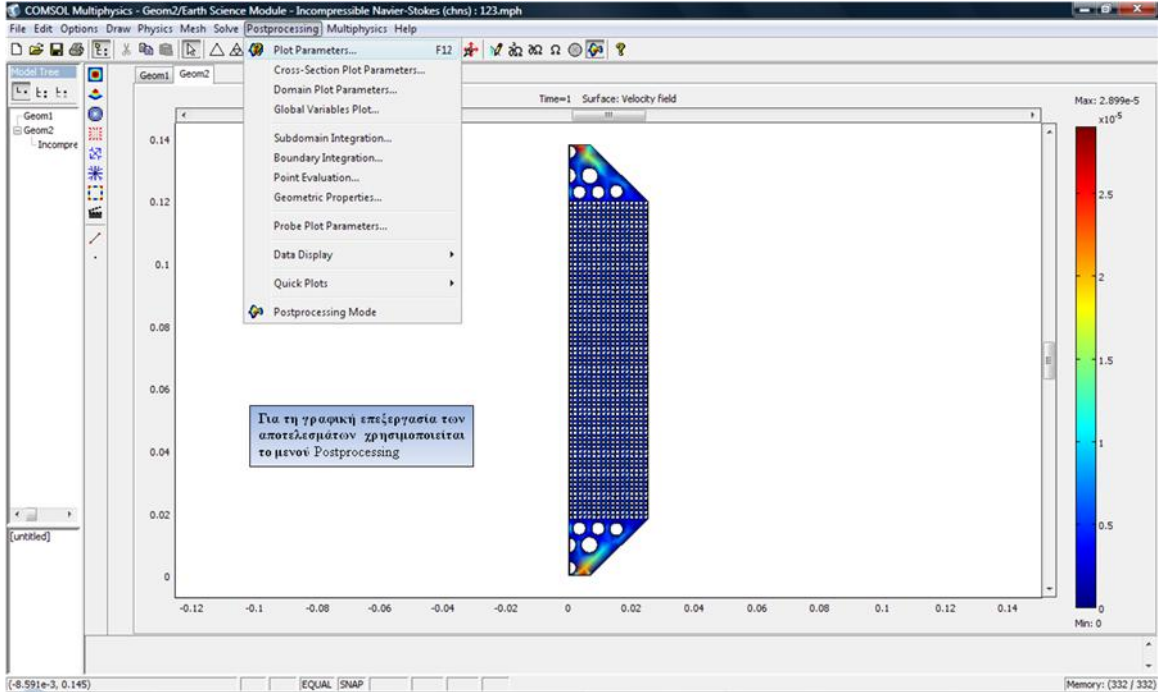


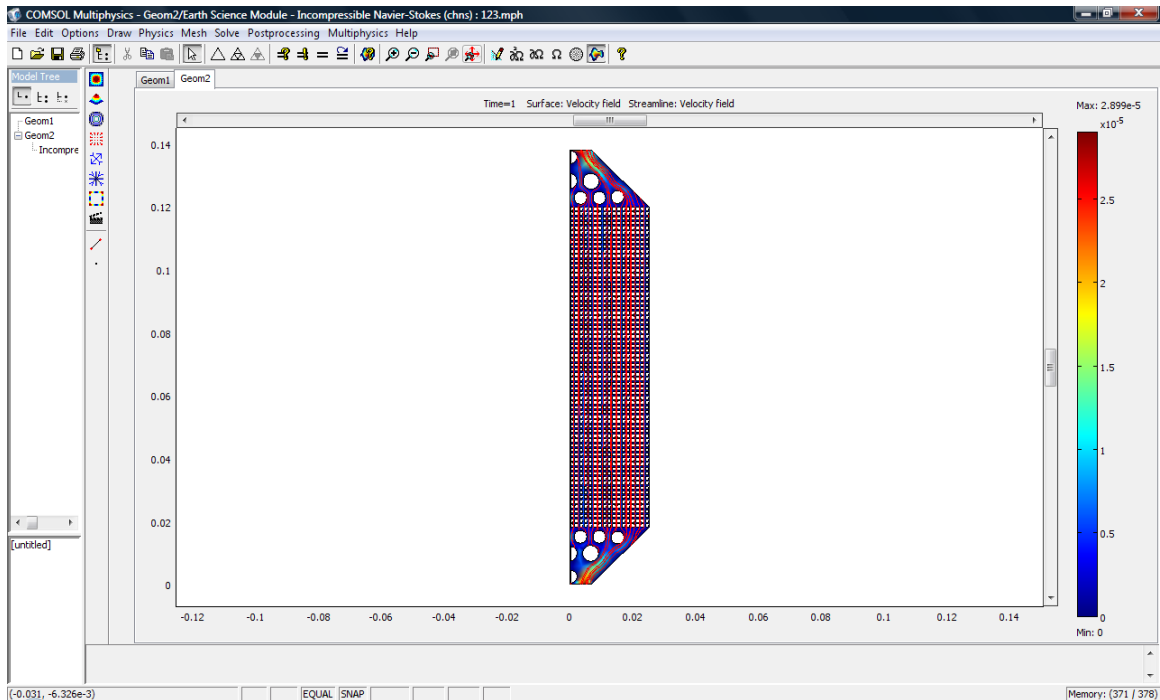
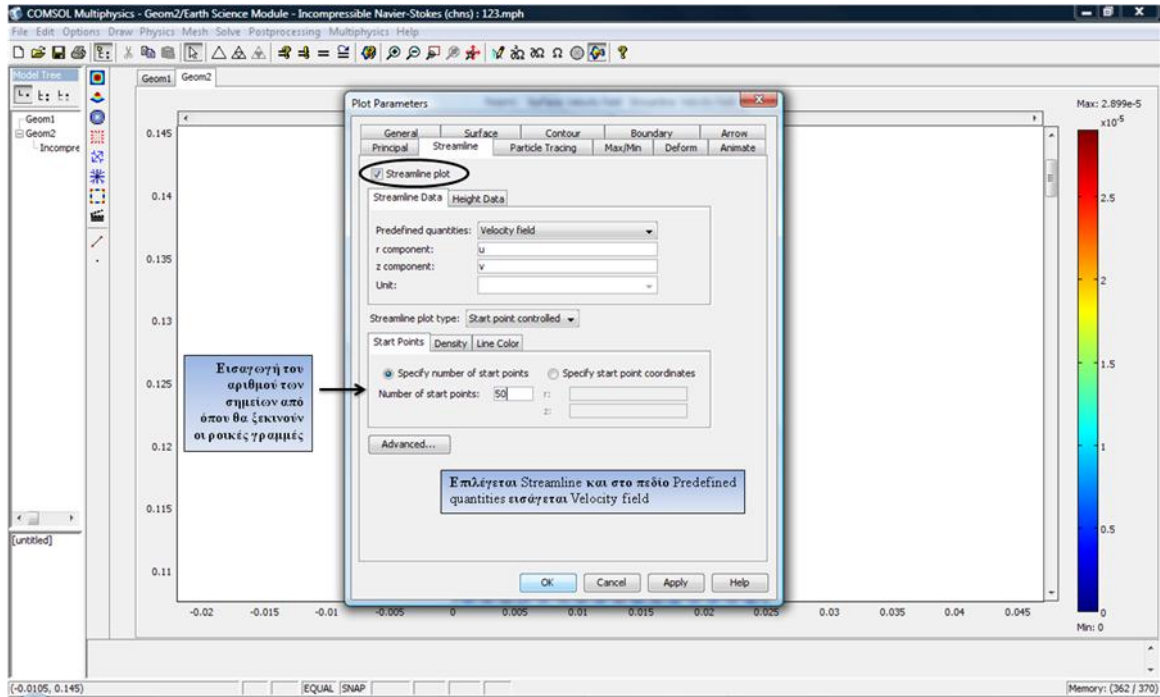
Βήμα 7: Επίλυση προβλήματος

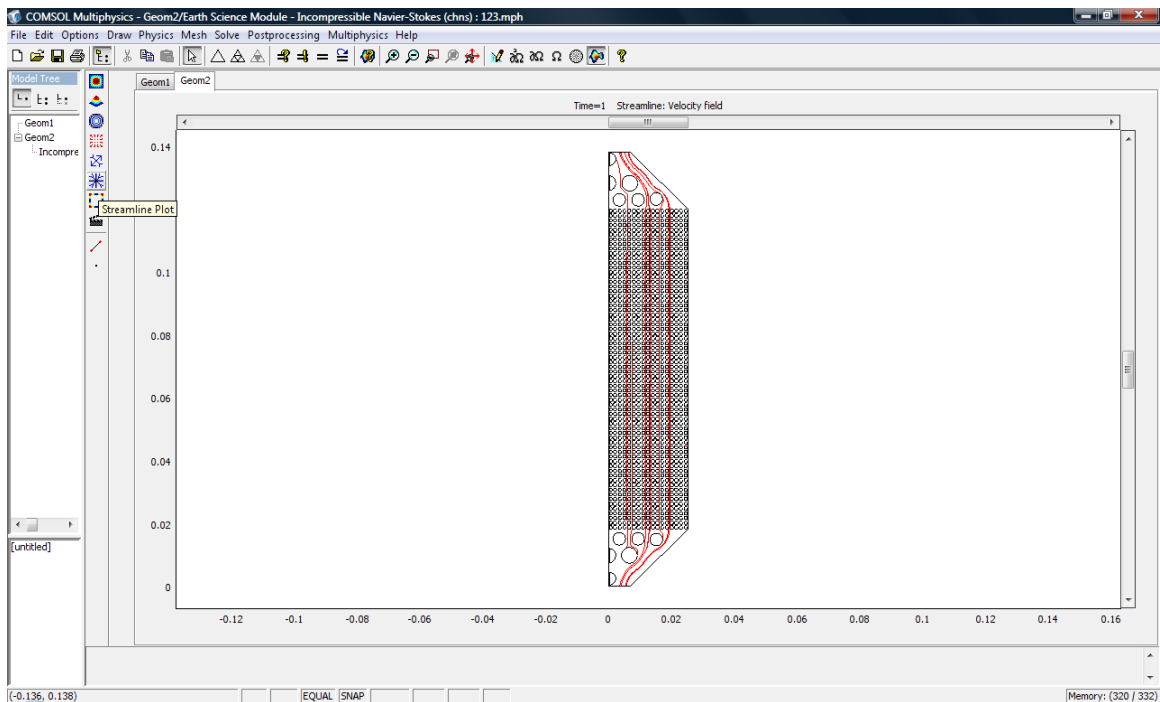
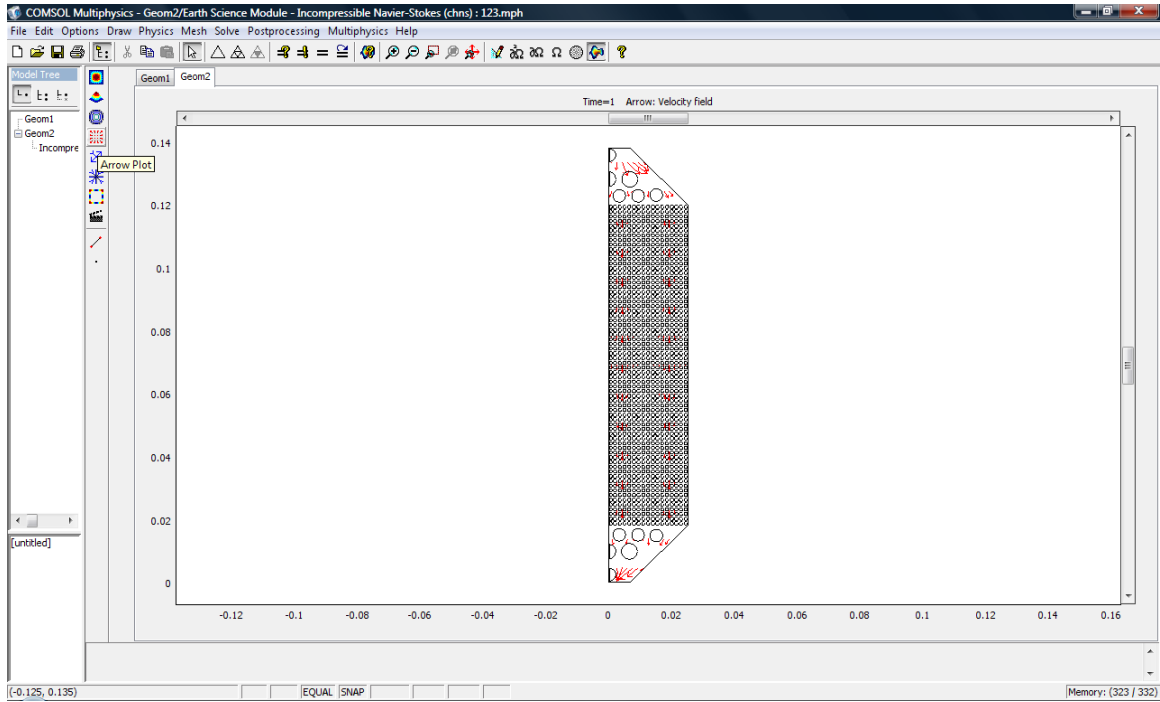


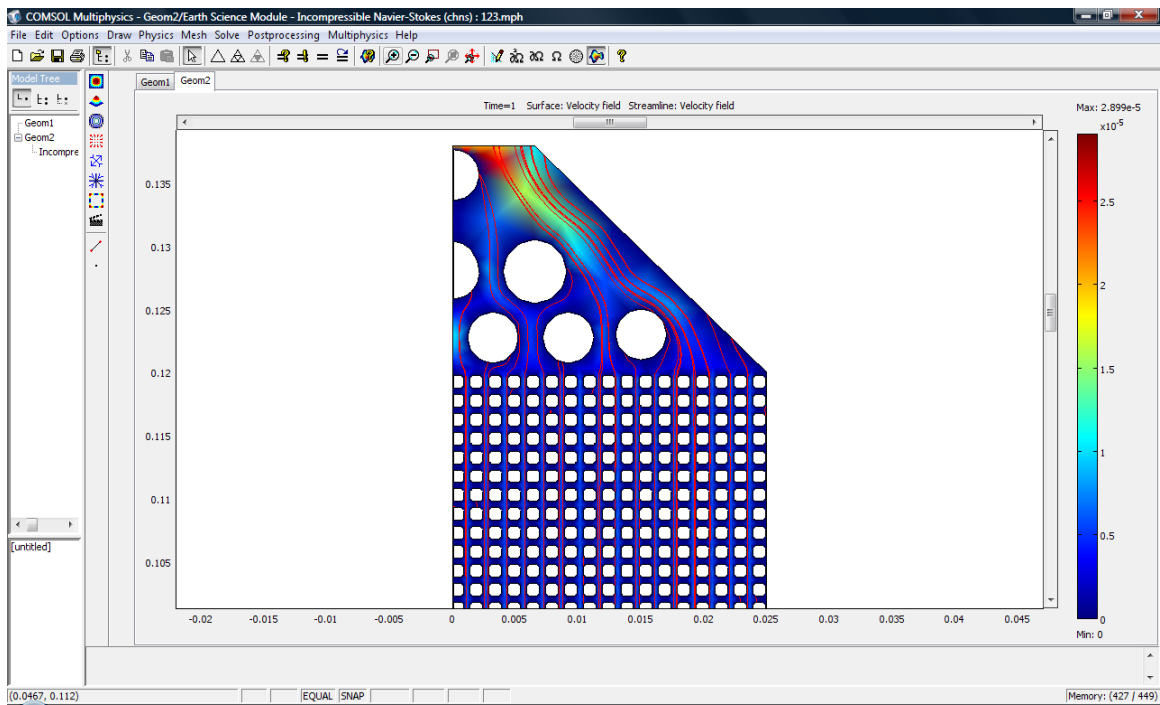
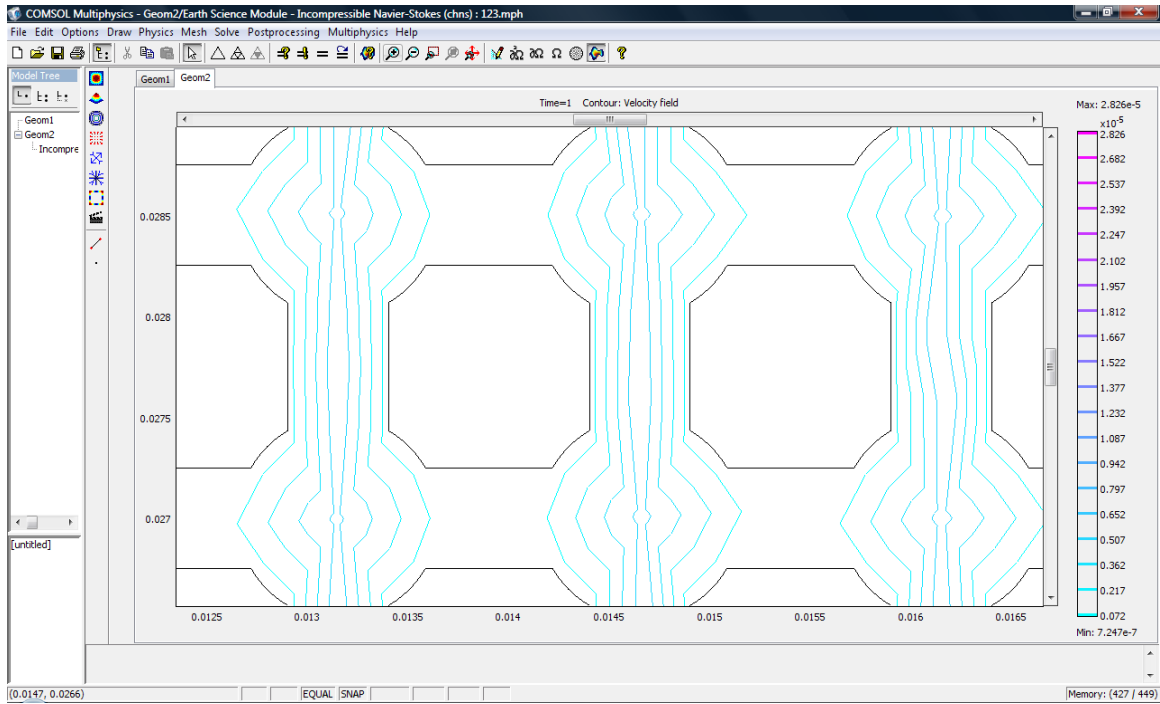


**Βήμα 8: Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων**



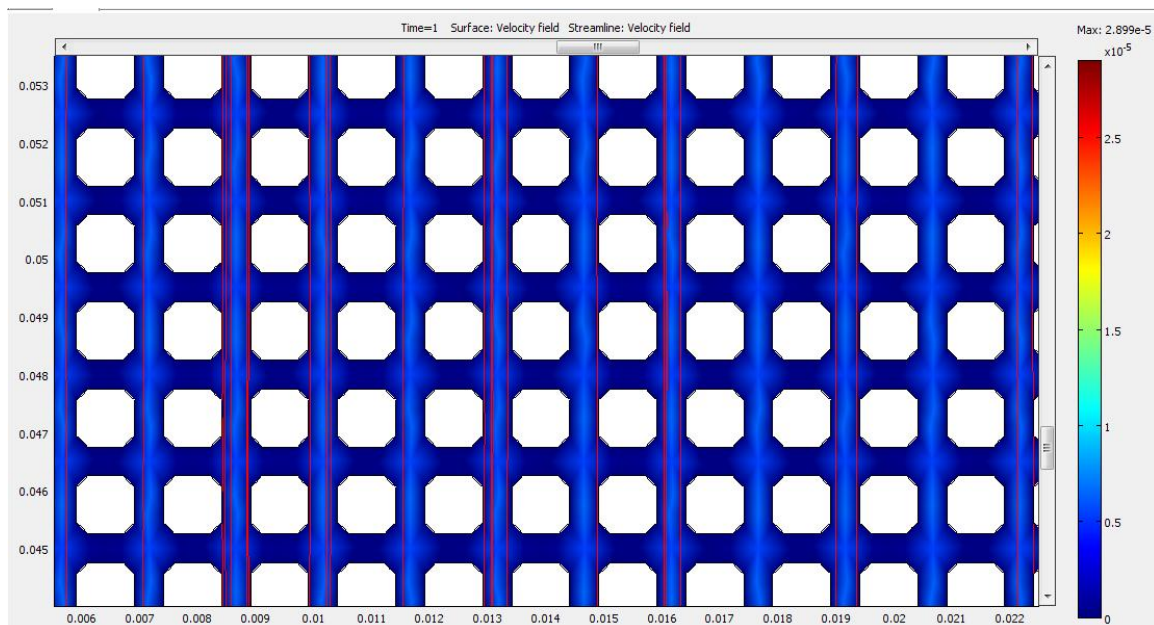






#### 4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για να γίνει κατανοητή η όλη διαδικασία της ροής παρατίθεται η παρακάτω εικόνα, στην οποία απεικονίζονται οι γραμμές ροής.



Επιλύθηκε η εξίσωση Navier-Stokes για να προσομοιωθεί η ροή μέσα στους πόρους του μοντέλου κάτω από συνθήκες κορεσμού. Οι γραμμές ροής συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Auset και Keller (2004) καθώς και των Cakmak et al. (2006). Το κεφάλαιο αυτό δημιουργήθηκε ώστε να προσφέρει την απαραίτητη πληροφορία για τη περαιτέρω προσομοίωση της μεταφοράς μάζας μέσω της εξίσωσης μεταγωγής-διασποράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:  
**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η προετοιμασία καθώς και όλα τα απαραίτητα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στόχος της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας δεν αποτελεί η διεξαγωγή ενός μόνο πειράματος, αλλά μιας σειράς πειραμάτων. Αναλυτικότερα, θεωρήθηκε σκόπιμο να μελετηθεί πειραματικά το φαινόμενο της μεταφοράς μάζας για μία μόνο ουσία κάθε φορά (κόκκινος δείκτης και ουρανίνη) στο δισδιάστατο γυάλινο δοκίμιο δικτύων πόρων.

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζεται με λεπτομέρεια ο πλήρης τεχνικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ο τρόπος χρήσης του και ο σκοπός του σε κάθε στάδιο του πειράματος. Επίσης, περιγράφονται με λεπτομέρεια η προετοιμασία των πειραμάτων καθώς και ο τρόπος που διεξήχθησαν, έτσι ώστε ο αναγνώστης να έχει σαφή εικόνα της πειραματικής διαδικασίας σε όλα της τα στάδια.

## **5.2 ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ**

Στο συγκεκριμένο τμήμα της εργασίας αναφέρεται ο τεχνικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας.

### **ΠΙΠΕΤΕΣ**

Χρησιμοποιήθηκαν πιπέτες όγκου από 1 mL έως 50 mL. Σκοπός της χρήσης τους ήταν η σωστή και ακριβής προετοιμασία πρότυπων διαλυμάτων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, καθώς και των ιχνηθετών.

### **ΠΟΤΗΡΙΑ ΖΕΣΕΩΣ**

Χρησιμοποιήθηκαν ποτήρια ζέσεως 400 mL για την παρασκευή των πρότυπων διαλυμάτων.

### **ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΥΡΙΓΓΕΣ**

Χρησιμοποιήθηκαν δύο σύριγγες, η μια στην αντλία σύριγγας, ώστε το πορώδες μέσο να είναι κορεσμένο με νερό και η δεύτερη στην στιγμιαία εισαγωγή του ιχνηθέτη. Ήταν από πλαστικό υλικό και με χωρητικότητες 20 mL και 1 mL αντίστοιχα.

### **ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΚΑΙ ΛΑΣΤΙΧΑ**

Για τη σύνδεση της εισόδου με την αντλία σύριγγας, την έξοδο του πειράματος, καθώς και την στιγμιαία εισαγωγή του δείκτη χρησιμοποιήθηκαν δύο βαλβίδες και λάστιχα κατάλληλης διαμέτρου.

### **ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΙΣΜΟΥ**

Για την αποφυγή διαφόρων προβλημάτων, όπως η αντανάκλαση του φωτός του δωματίου στο γυάλινο δοκίμιο και ακολούθως στις φωτογραφίες που πάρθηκαν, κατασκευάστηκε ξύλινο κουτί με κατάλληλη για κάθε πείραμα (ορατού και υπεριώδους φωτός) διάταξη φωτισμού. Λεπτομερής περιγραφή του συστήματος γίνεται σε επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου.



### **ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΚΑΙ ΤΡΙΠΟΔΟ**

Χρησιμοποιήθηκε φωτογραφική μηχανή Nikon D5000 και τρίποδο, ώστε να μην κινείται αυτή, για τη λήψη στιγμιότυπων κατά την διάρκεια του πειράματος.

### **ΑΝΤΛΙΑ ΣΥΡΙΓΓΑΣ**

Η παροχή νερού στο πορώδες μέσο έγινε με την βοήθεια αντλίας σύριγγας (Cole-Parmer® 74900-Series, Multichannel, Syringe Pumps). Λεπτομερής περιγραφή του συγκεκριμένου οργάνου γίνεται σε επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου.

### **ΒΑΣΗ ΑΝΤΛΙΑΣ ΣΥΡΙΓΓΑΣ**

Τοποθετήθηκε η αντλία σύριγγας σε βάση, έτσι ώστε να βρίσκεται στο ίδιο περίπου ύψος με το γυάλινο δοκίμιο στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα.

## **5.3 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**

### **5.3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΟΡΑΤΟ ΦΩΣ**

#### **5.3.1.1 Προετοιμασία πρότυπων διαλυμάτων**

Κατασκευάστηκαν πρότυπα διαλύματα με σκοπό την μετατροπή της έντασης του χρώματος κατά την διάρκεια του πειράματος σε σχέση με τη συγκέντρωσή του. Τα πρότυπα διαλύματα είναι διαλύματα γνωστής συγκέντρωσης τα οποία έχουν δημιουργηθεί και αναλυθεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες με τα προς ανάλυση διαλύματα του πειράματος.

Σκοπός της δημιουργίας των διαλυμάτων αυτών αποτελεί η κατασκευή μιας καμπύλης που να συσχετίζει την ένταση του χρώματος του κάθε διαλύματος με τη πραγματική του συγκέντρωση. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης οποιουδήποτε διαλύματος.

Τα πρότυπα διαλύματα που δημιουργήθηκαν μετά από ανάδευση αποτελούνταν από κόκκινο δείκτη και νερό σε ποτήρια ζέσεως, με ολικό όγκο υγρού 500 mL και για την ανάλυσή τους πάρθηκαν φωτογραφίες κάτω από τις ίδιες συνθήκες με αυτές του πειράματος. Δημιουργήθηκαν πρότυπα διαλύματα με ποσότητα κόκκινου δείκτη 7.0 gr, 6.0 gr, 5.0 gr, 4.0 gr, 3.0 gr, 2.0 gr, 1.0 gr, 0.5 gr και 0.2 gr.

Η καμπύλη βαθμονόμησης παρουσιάζεται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων που ακολουθεί.

#### **5.3.1.2 Προετοιμασία πειραμάτων**

Στο πρώτο είδος πειραμάτων μελετήθηκε το φαινόμενο μεταφοράς ρύπου (κόκκινου δείκτη) σε συνθήκες ορατού φωτός.

Για την διεξαγωγή, λοιπόν, του πειράματος αυτού χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο πορώδες μέσο το οποίο είχε κατασκευαστεί. Το δοκίμιο αυτό αρχικά καθαρίστηκε με αποσταγμένο νερό και στη συνέχεια για να αφαιρεθεί όλο το νερό πραγματοποιήθηκε διέλευση αέριου αζώτου. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε η

καθαρότητα του δοκιμίου και η βεβαιότητα ότι δεν θα υπάρχουν επιδράσεις στο αποτέλεσμα λόγω παρουσίας άλλων ουσιών.

Επόμενο στάδιο ήταν ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας της αντλίας σύριγγας.

Για τον λόγο αυτό ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- 1) Αρχικά ρυθμίστηκαν οι παράμετροι, ώστε να θέσουμε σε λειτουργία την αντλία, ως εξής:

➤ ON

**Main Menu**

- Rate = 0.4 mL/h
- Volume = 15.0 mL
- RS232: Baud Rate = 1200  
Address = 2
- Dia = 20.00 mm
- Table = Air – Tite, All pls  
20 cc 20.00 mm

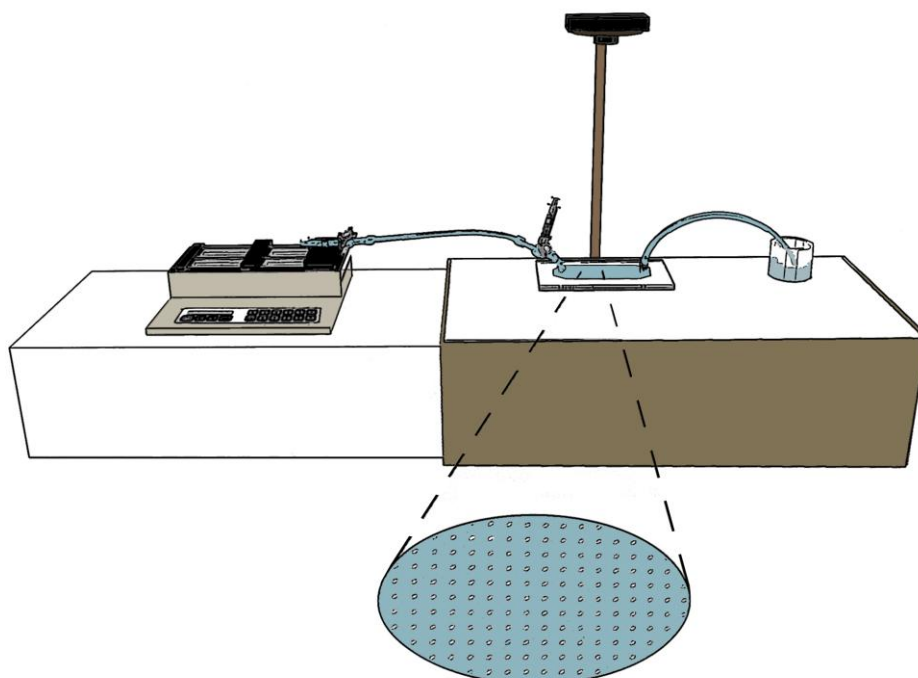
➤ Run

Επιλέχθηκε παροχή 0.4 mL/h του ενός πειράματος (Addendum 1, page 18, manual of Cole-Parmer® 74900-Series, Multichannel, Syringe Pumps), έτσι ώστε να είναι δυνατή η οπτική παρακολούθηση του φαινομένου με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Η σύριγγα ήταν πλαστική με διάμετρο 20.00 mm και χωρητικότητα 20.00 mm (Addendum 2, page 19, manual of Cole-Parmer® 74900-Series, Multichannel, Syringe Pumps).

- 2) Πριν τεθεί σε λειτουργία η αντλία τοποθετήθηκε ογκομετρικός κύλινδρος 10 mL για να συλλέξουμε και μετρήσουμε τον όγκο του νερού. Με το ξεκίνημα της αντλίας τέθηκε σε λειτουργία και το χρονόμετρο, έτσι ώστε να δούμε αν σε συγκεκριμένο χρόνο ο όγκος νερού που βρισκόταν στον ογκομετρικό κύλινδρο ήταν ο επιθυμητός.

Επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή της διάταξης ως εξής:

1. Αρχικά, το δοκίμιο τοποθετήθηκε πάνω στο σύστημα φωτισμού. Στο συγκεκριμένο πείραμα, το σύστημα φωτισμού αποτελούσαν ένα ξύλινο κουτί, επενδυμένο εσωτερικά με φελιζόλ τυλιγμένο με αλουμινόχαρτο, με λάμπες Philips TLD grafica Pro 18W/95. Η πάνω επιφάνειά του ήταν πλεξιγκλάς με αυτοκόλλητη επίστρωση γαλακτερού χρώματος (για επίτευξη του ομοιόμορφου της διάχυσης του φωτός).
2. Η αντλία σύριγγας τοποθετήθηκε σε μια βάση, έτσι ώστε να βρίσκεται στην ίδια περίπου ευθεία με το δοκίμιο.
3. Στην είσοδο και έξοδο του δοκιμίου προσαρμόστηκαν λάστιχα τα οποία κατέληγαν το μεν στην αντλία και το δε σε ποτήρι ζέσεως. Τοποθετήθηκαν επίσης δύο βαλβίδες, η μία κοντά στην είσοδο για να γίνει η στιγμιαία εισαγωγή του ιχνηθέτη και η άλλη στην σύριγγα της αντλίας.
4. Τέλος, η φωτογραφική μηχανή προσαρμόστηκε σε τρίποδο και σε κατάλληλη θέση πάνω από το δοκίμιο. Η φωτογραφική μηχανή ρυθμίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.



**Σχήμα 5.1:** Διάταξη για τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής σε γυάλινα δοκίμια και σε συνθήκες ορατού φωτός.

### 5.3.1.3 Λήψη φωτογραφιών

Το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε ως εξής:

- Αρχικά, θέσαμε σε λειτουργία την αντλία σύριγγας με παροχή 0.4 mL/h, ώστε να κορεστεί με νερό το πορώδες μέσο.
- Κάποια χρονική στιγμή, εισήχθηκε στιγμιαία 0.1 mL του ιχνηθέτη συγκέντρωσης 5.0 gr/500 mL.
- Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος λήφθηκαν φωτογραφίες κάθε 6 min. Η λήψη των φωτογραφιών έγινε σε σκοτεινό θάλαμο χρησιμοποιώντας μόνο το σύστημα φωτισμού που έχει περιγραφεί.

Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε όπως και το πρώτο, με μόνες διαφορές την παροχή που ήταν 2.0 mL/h και την λήψη των φωτογραφιών που έγινε κάθε 1 min.

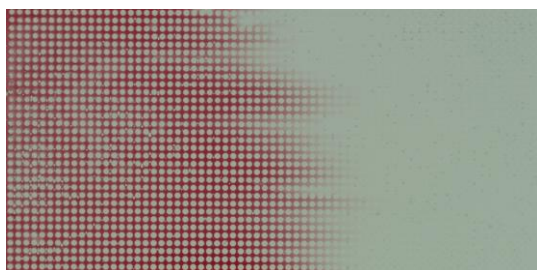
#### Φωτογραφίες πρώτου πειράματος



(α)



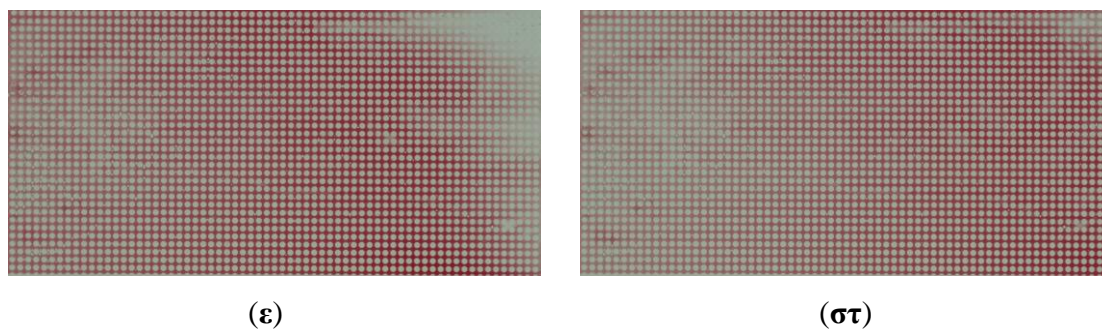
(β)



(γ)

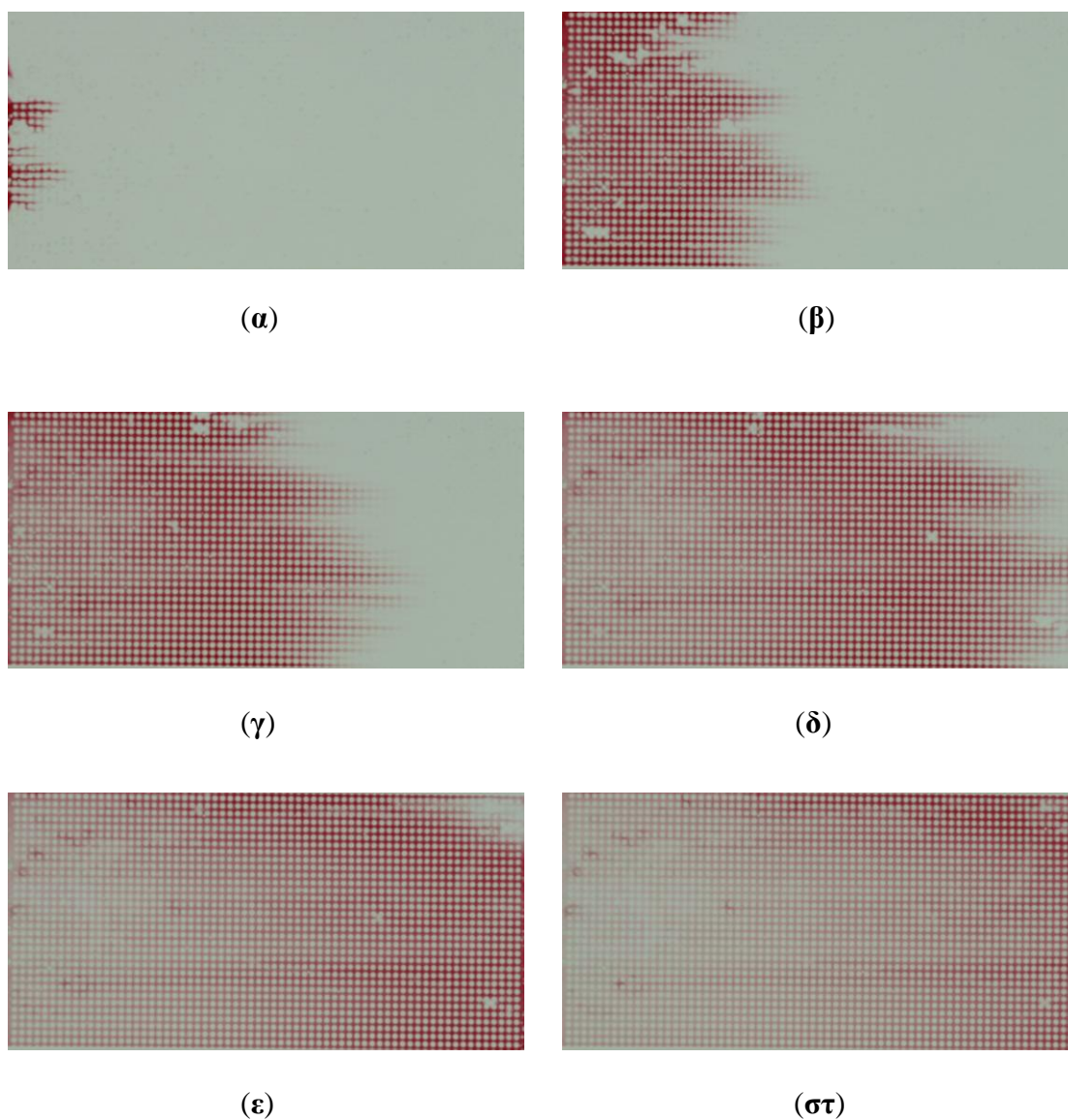


(δ)



**Εικόνα 5.1:** Φωτογραφίες μετά την εισαγωγή του ιχνηθέτη σε χρονικές στιγμές (α) 1 min, (β) 13 min, (γ) 25 min, (δ) 37 min, (ε) 49 min και (στ) 61 min.

Φωτογραφίες δεύτερου πειράματος



**Εικόνα 5.2:** Φωτογραφίες μετά την εισαγωγή του ιχνηθέτη σε χρονικές στιγμές (α) 1 min, (β) 4 min, (γ) 7 min, (δ) 10 min, (ε) 13 min και (στ) 16 min.



## **5.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΥΠΕΡΙΩΔΕΣ ΦΩΣ**

### **5.4.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ**

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια με τα προηγούμενα πειράματα. Η διαφορά αφορούσε τα εξής:

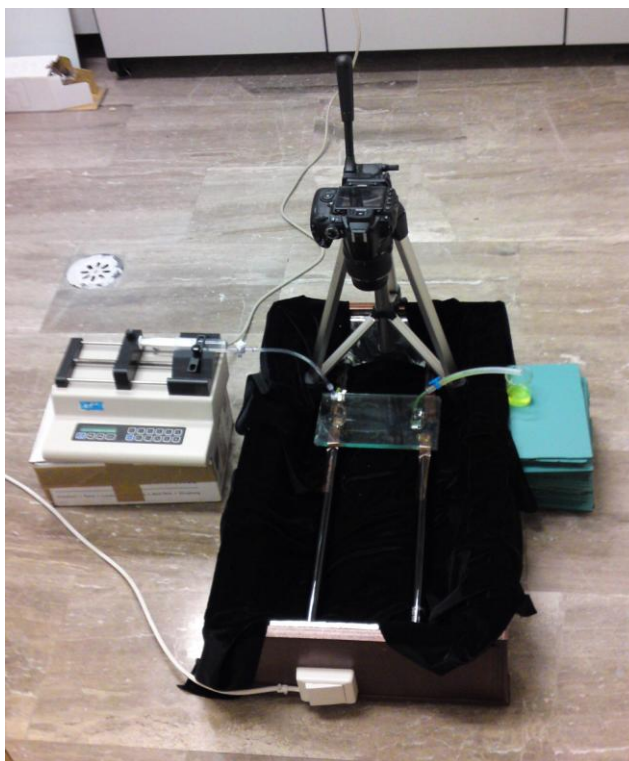
Τα πρότυπα διαλύματα που δημιουργήθηκαν αποτελούνταν από ουρανίνη (Fluorescein Sodium) και νερό σε ποτήρια ζέσεως, με ολικό όγκο υγρού 500 mL και για την ανάλυσή τους πάρθηκαν φωτογραφίες κάτω από τις ίδιες συνθήκες με αυτές του πειράματος. Δημιουργήθηκαν πρότυπα διαλύματα με ποσότητα ουρανίνης 0.1 gr, 0.05 gr και 0.005 gr.

Η καμπύλη βαθμονόμησης παρουσιάζεται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων που ακολουθεί.

### **5.4.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**

Στο δεύτερο είδος πειραμάτων μελετήθηκε το φαινόμενο μεταφοράς ρύπου (ουρανίνης) σε συνθήκες υπεριώδους φωτός.

Η προετοιμασία των πειραμάτων διέφερε σε σχέση με την αντίστοιχη σε ορατό φως κυρίως ως προς το σύστημα φωτισμού. Αρχικά, το δοκίμιο τοποθετήθηκε μέσα στο σύστημα φωτισμού και συγκεκριμένα κολλήθηκε με ειδική ταινία (ανθεκτική στη θερμότητα) πάνω στις λάμπες. Το σύστημα φωτισμού αποτελούσαν ένα ξύλινο κουτί, επενδυμένο εσωτερικά με μαύρο βελούδινο ύφασμα (για επίτευξη του ομοιόμορφου της διάχυσης του φωτός), με λάμπες Philips Black Light. Η πάνω επιφάνειά του ήταν ανοιχτή.



**Εικόνα 5.3:** Διάταξη για τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής σε γυάλινα δοκίμια και σε συνθήκες υπεριώδους φωτός.

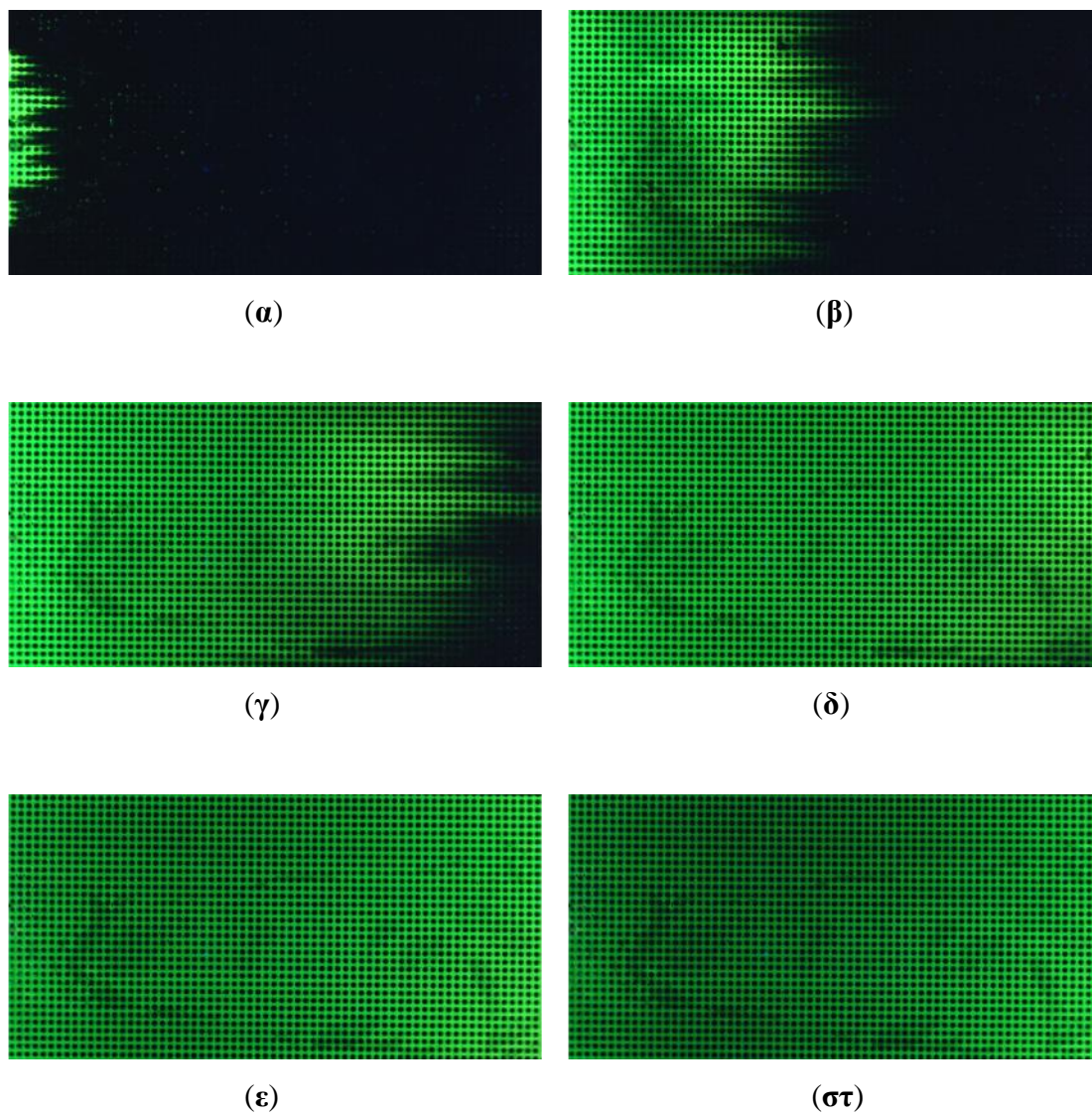
### 5.4.3 ΛΗΨΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ

Το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε ως εξής:

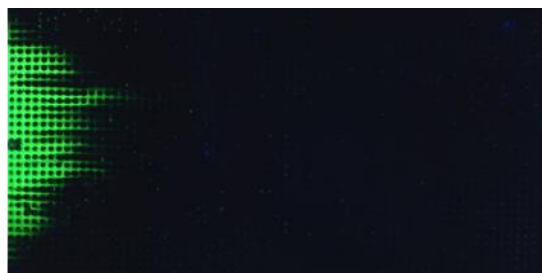
- Αρχικά, θέσαμε σε λειτουργία την αντλία σύριγγας με παροχή 2.0 mL/h, ώστε να κορεστεί με νερό το πορώδες μέσο.
- Κάποια χρονική στιγμή, εισήχθηκε στιγμιαία 0.1 mL του ιχνηθέτη συγκέντρωσης 0.15 gr/500 mL.
- Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος λήφθηκαν φωτογραφίες κάθε 2 min. Η λήψη των φωτογραφιών έγινε σε σκοτεινό θάλαμο χρησιμοποιώντας μόνο το σύστημα φωτισμού που έχει περιγραφεί.

Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε όπως και το πρώτο, με μόνες διαφορές την παροχή που ήταν 4.0 mL/h και την λήψη των φωτογραφιών που έγινε κάθε 1 min.

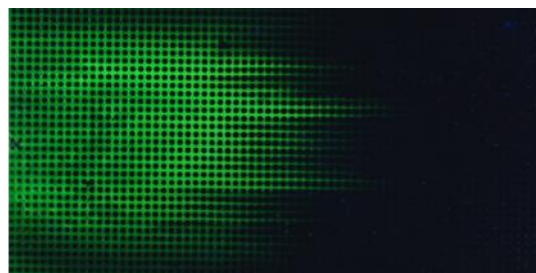


Φωτογραφίες πρώτου πειράματος

**Εικόνα 5.4:** Φωτογραφίες μετά την εισαγωγή του ιχνηθέτη σε χρονικές στιγμές (α) 1 min, (β) 5 min, (γ) 9 min, (δ) 13 min, (ε) 17 min και (στ) 21 min.

Φωτογραφίες δεύτερου πειράματος

(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

**Εικόνα 5.5:** Φωτογραφίες μετά την εισαγωγή του ιχνηθέτη σε χρονικές στιγμές (α) 1 min, (β) 3 min, (γ) 5 min, (δ) 7 min, (ε) 9 min και (στ) 11 min.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ -  
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

## 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η επεξεργασία των φωτογραφιών (image processing) έγινε με τη βοήθεια αλγορίθμου στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab 7.1 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων.

## 6.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στο ρόλο των πρότυπων διαλυμάτων και τη σημαντικότητά τους στην ανάλυση των φωτογραφιών του πειράματος. Με τη βοήθεια του toolbox Image Processing του προγράμματος Matlab 7.1 υπολογίστηκε η ένταση του χρώματος των πρότυπων διαλυμάτων.

Τα αποτελέσματα των πρότυπων διαλυμάτων περιέχονται στους πίνακες που ακολουθούν.

<b>ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ</b>	<b>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (gr/500 mL)</b>	<b>ΕΝΤΑΣΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ</b>
1	7	80
2	6	88
3	5	97
4	4	104
5	3	113
6	2	126
7	1	141
8	0.5	145
9	0.2	151

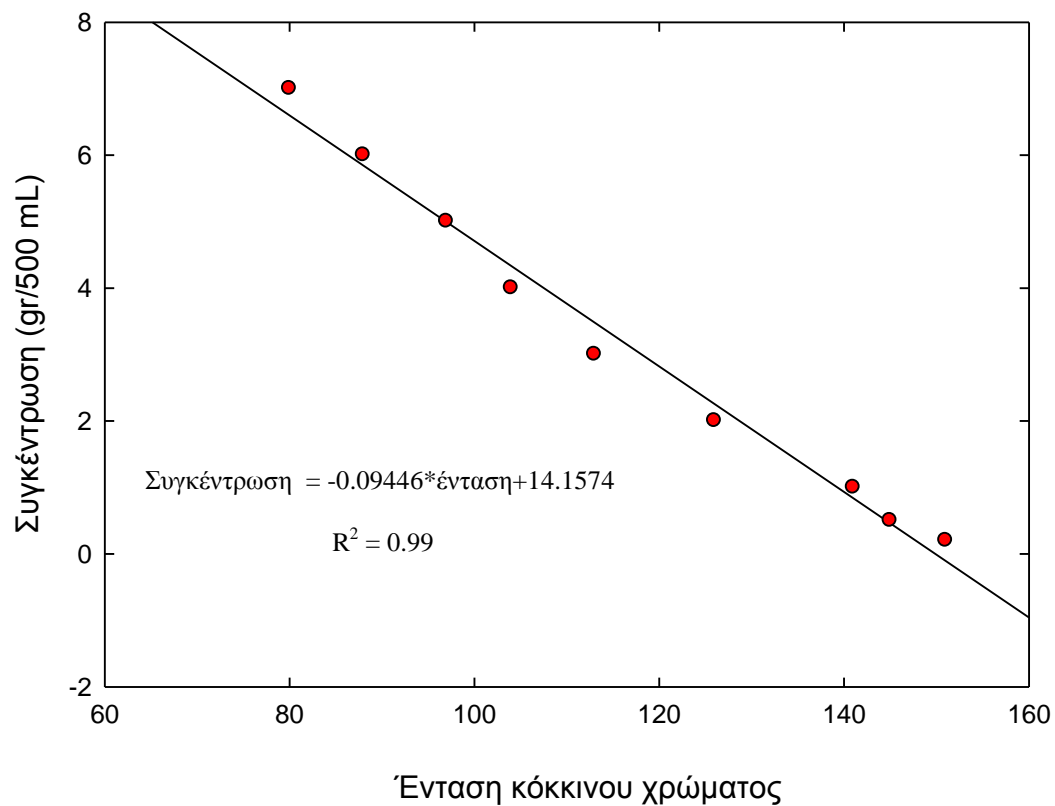
**Πίνακας 6.1:** Αποτελέσματα πρότυπων διαλυμάτων του κόκκινου δείκτη.

ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (gr/500 mL)	ΕΝΤΑΣΗ ΧΡΩΜΑΤΟΣ
1	0.1000	217.0000
2	0.0500	150.0000
3	5.0000e-3	20.0000

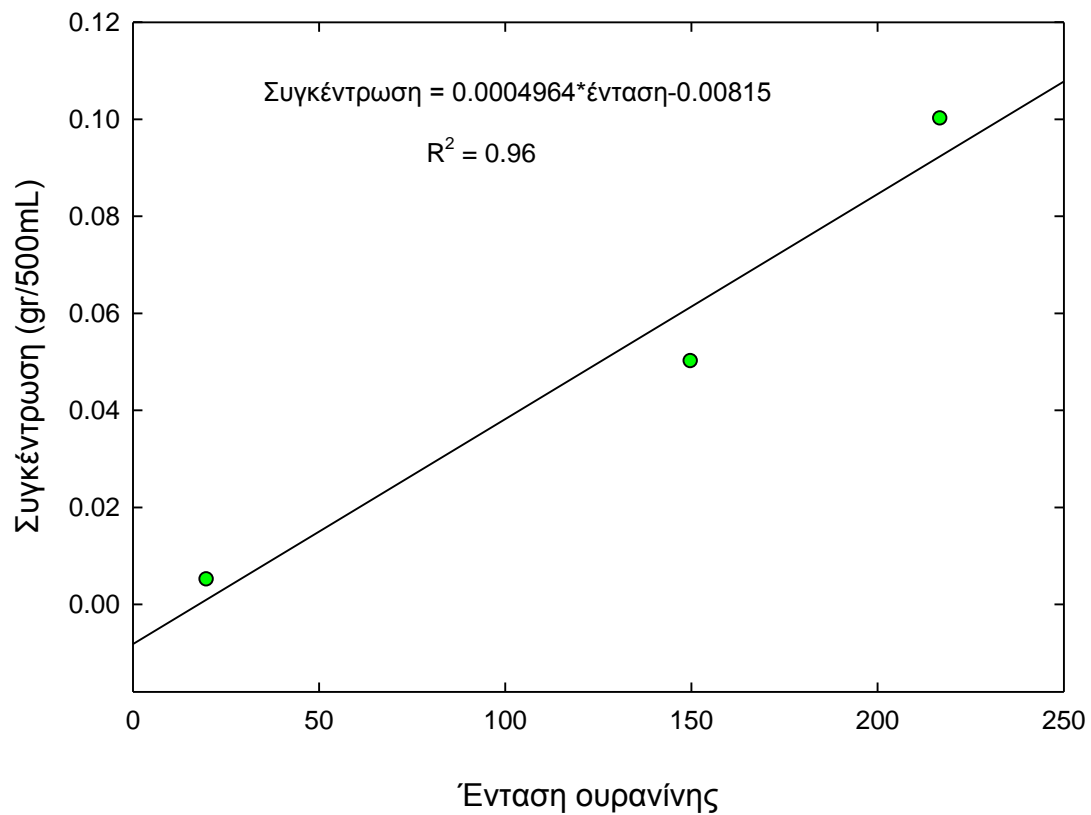
**Πίνακας 6.2:** Αποτελέσματα πρότυπων διαλυμάτων της ουρανίνης.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες βαθμονόμησης των πειραμάτων σε ορατό και υπεριώδες φως αντίστοιχα.

### Καμπύλη βαθμονόμησης



**Σχήμα 6.1:** Καμπύλη βαθμονόμησης πειραμάτων ορατού φωτός.

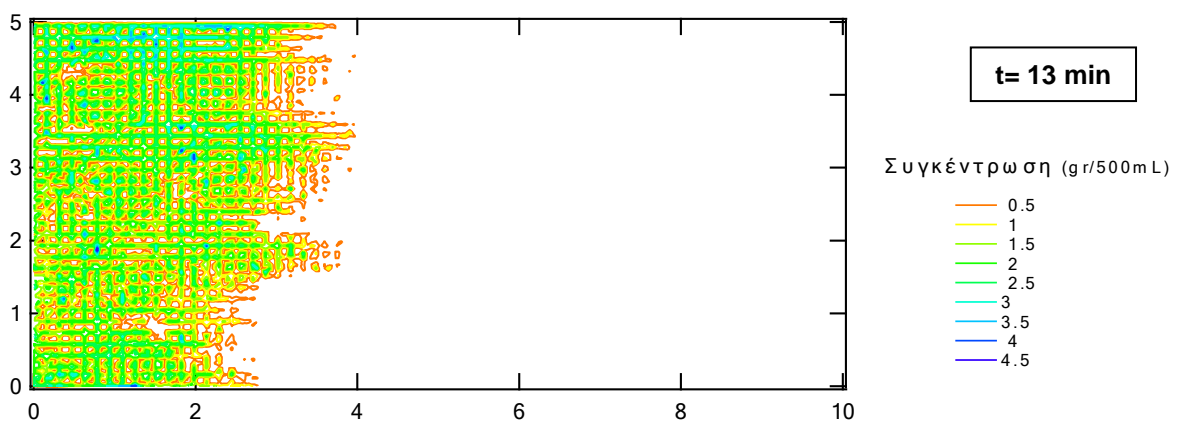
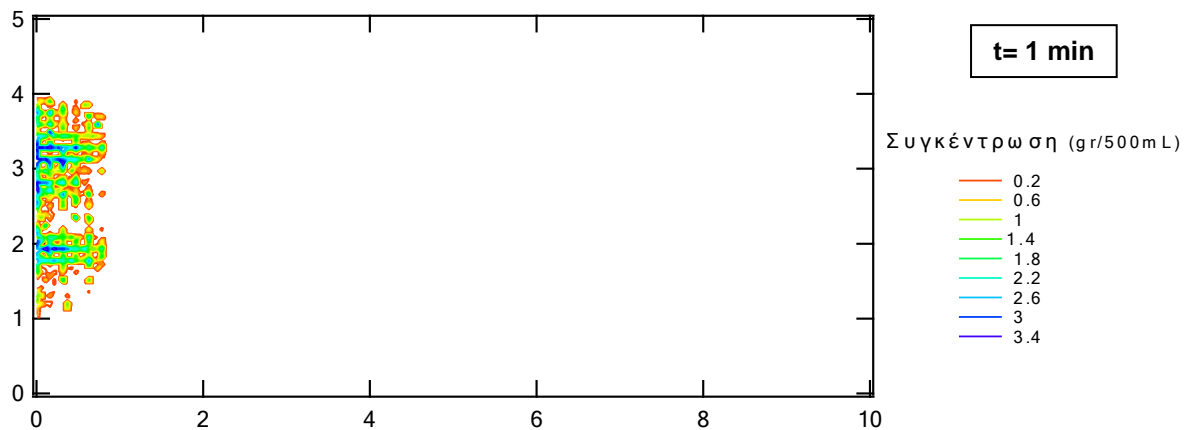
**Καμπύλη βαθμονόμησης****Σχήμα 6.2:** Καμπύλη βαθμονόμησης πειραμάτων υπεριώδους φωτός.

### 6.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

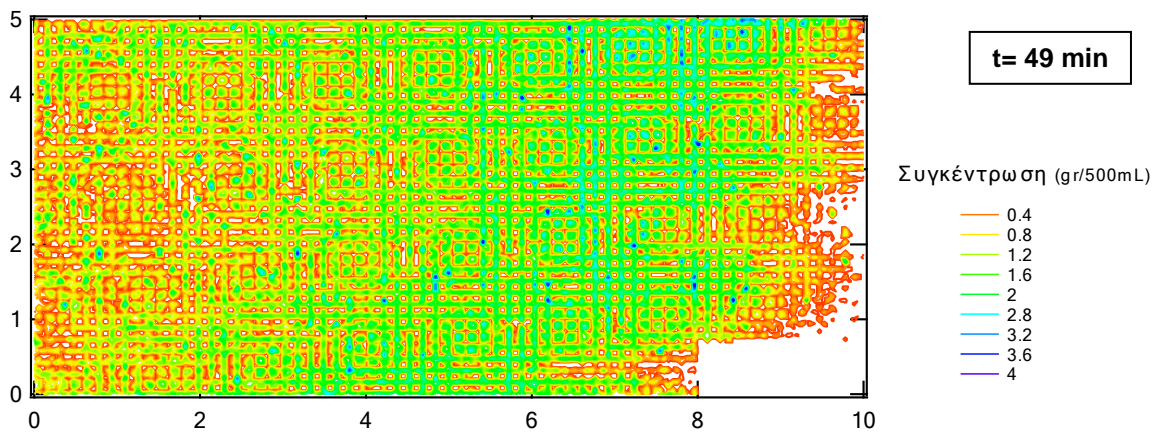
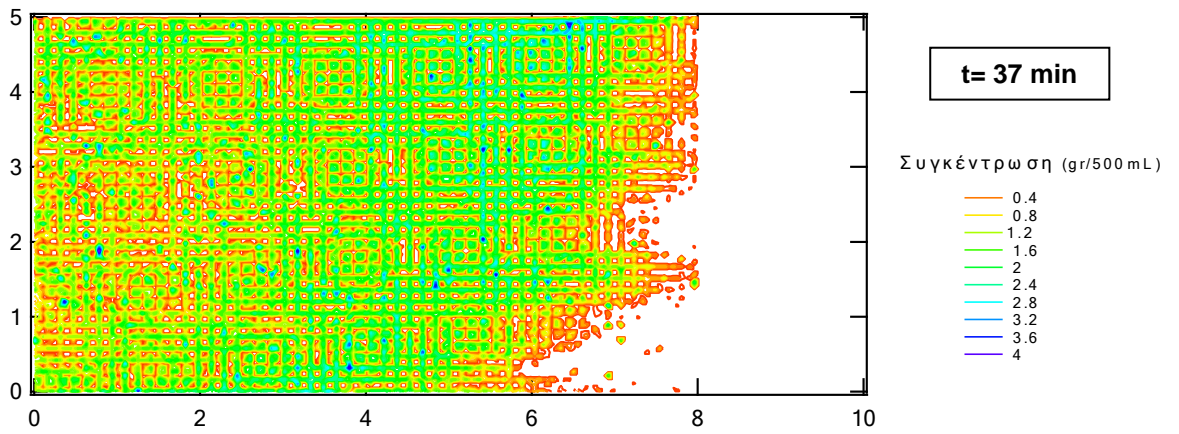
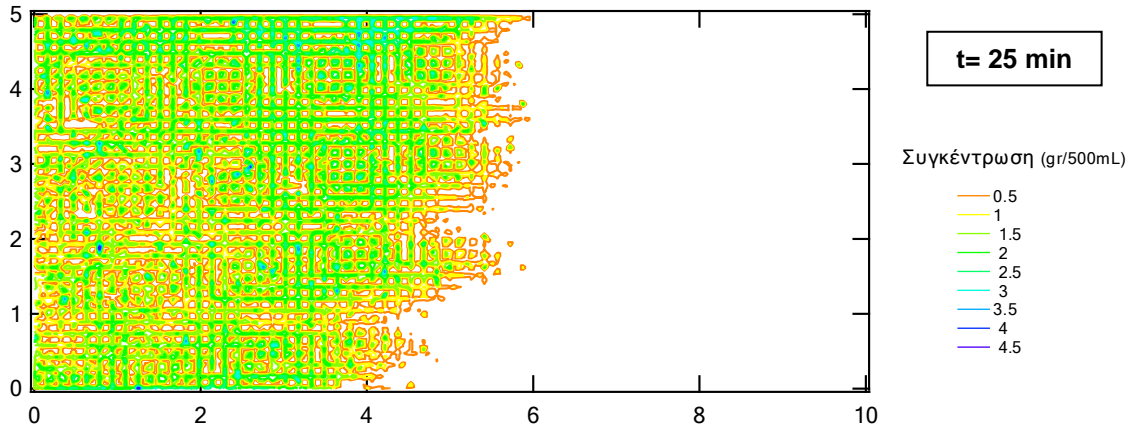
#### 6.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕ ΟΡΑΤΟ ΦΩΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν όλες οι απαραίτητες διαδικασίες για την διεξαγωγή του πειράματος. Στο συγκεκριμένο σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διάφορες χρονικές στιγμές του πειράματος σε συνθήκες ορατού φωτός όπως προέκυψαν από τον αλγόριθμο του Matlab 7.1 (Παράρτημα Γ) και την ανάλυσή τους από τα προγράμματα Igor Pro 6.0.

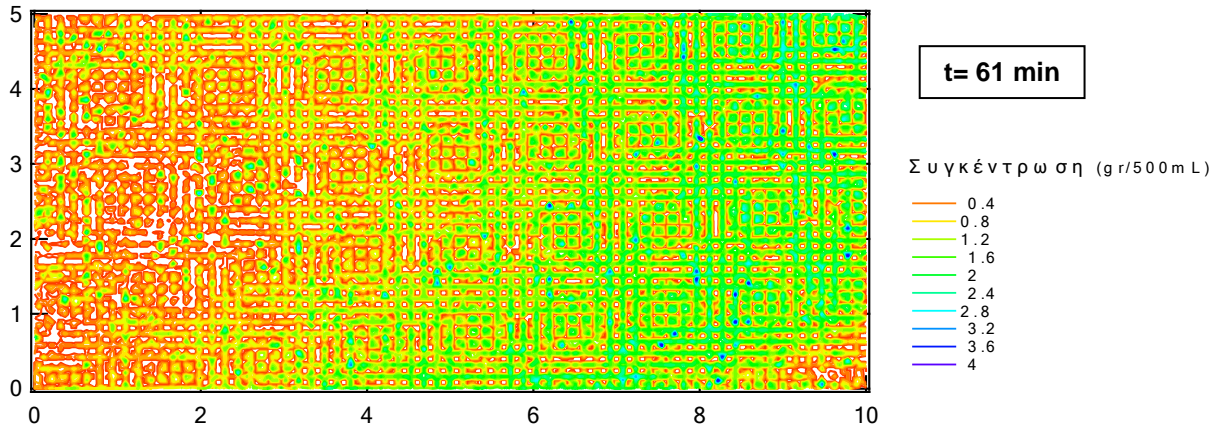
#### Αποτελέσματα πρώτου πειράματος



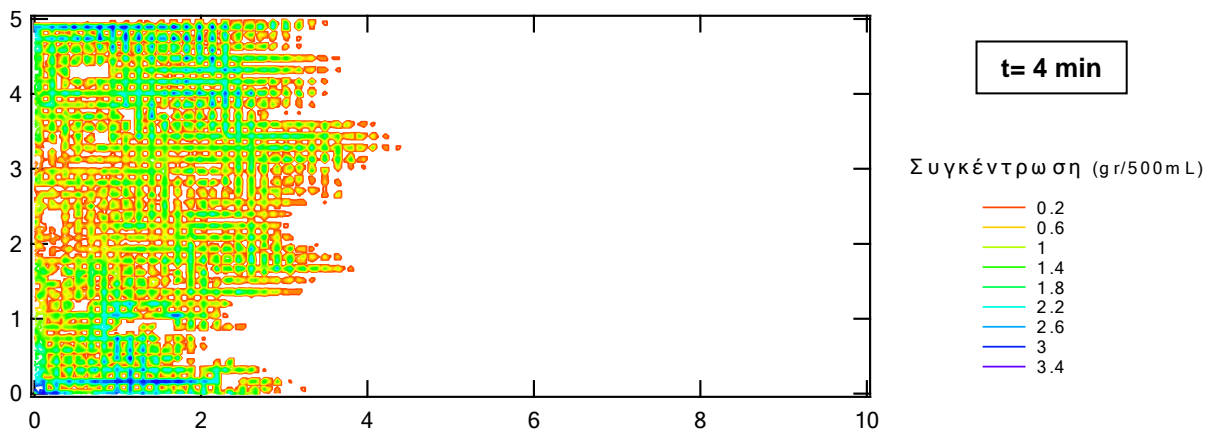
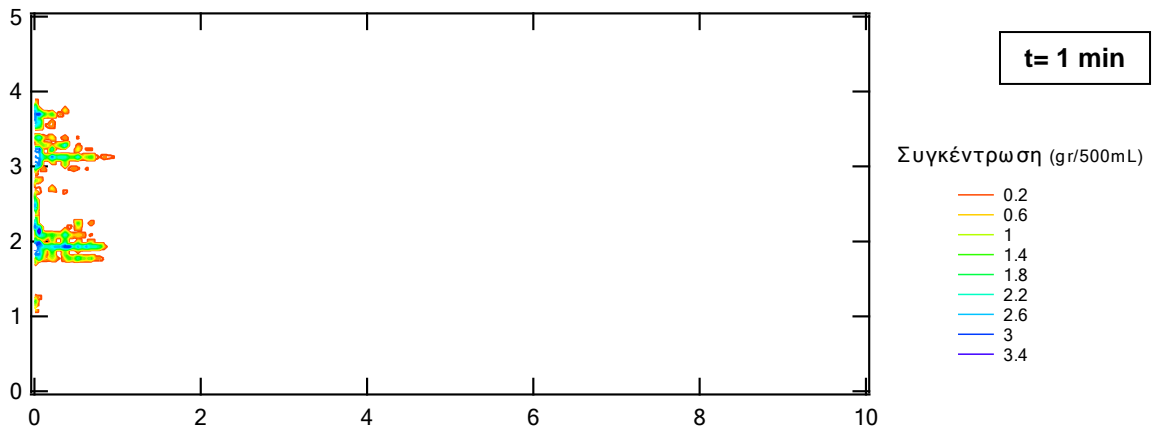


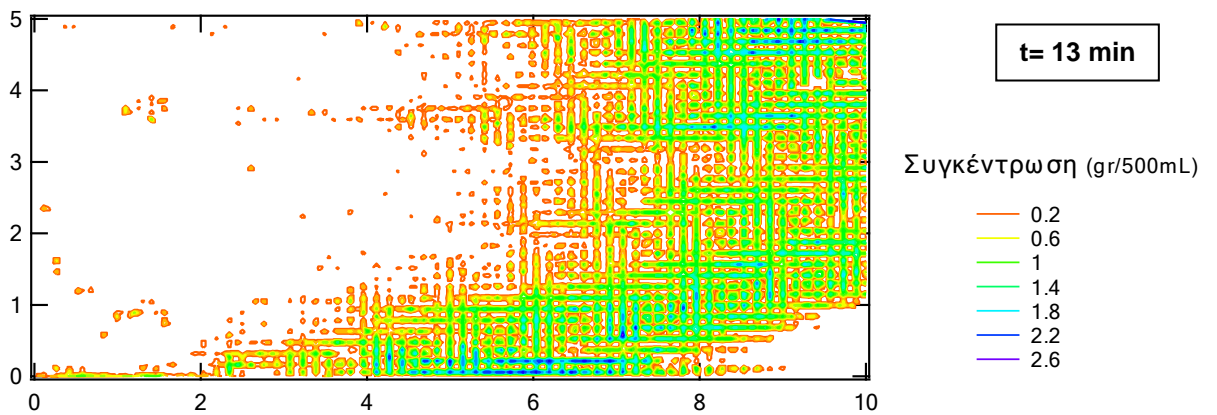
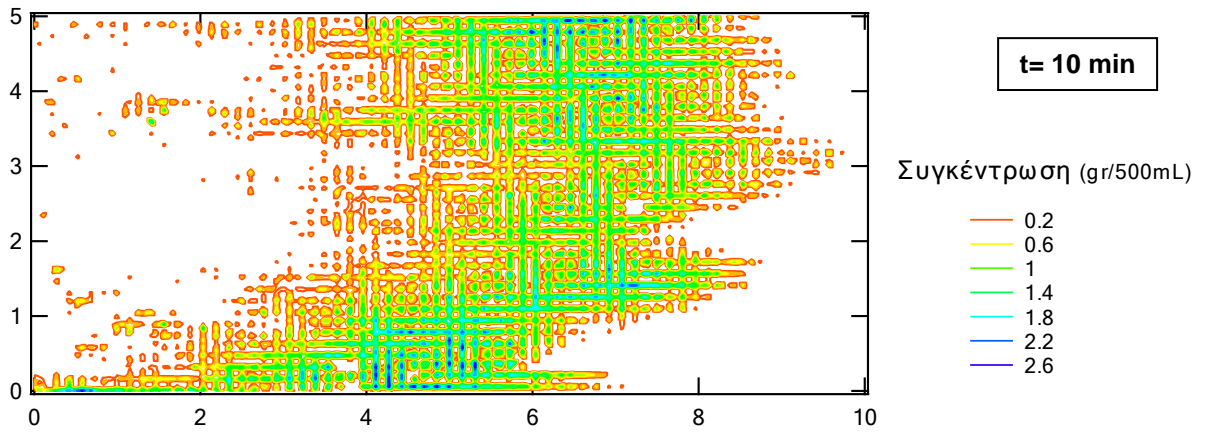
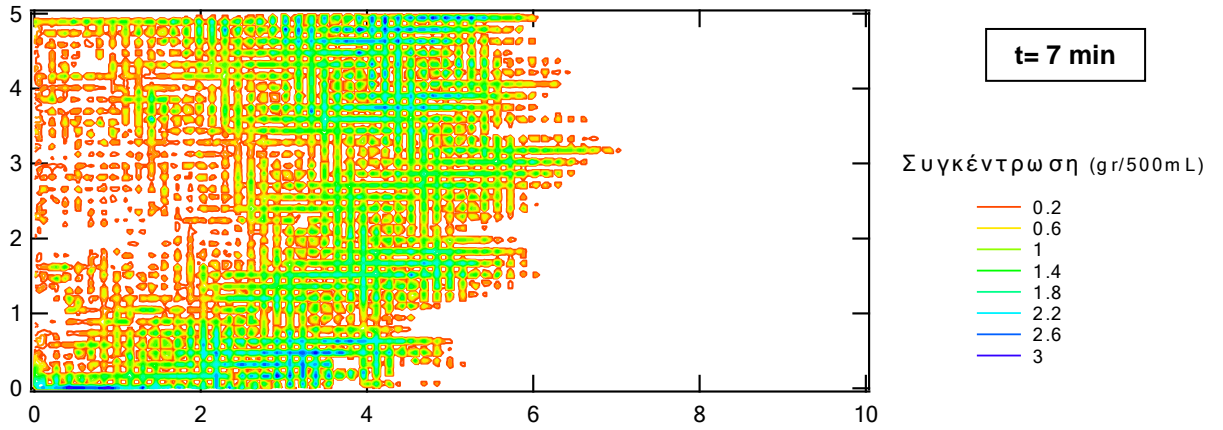


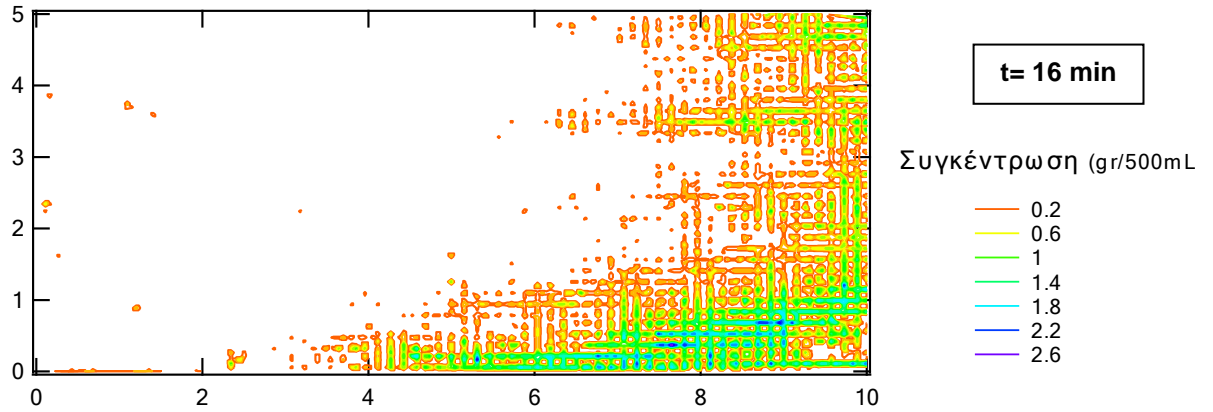




Αποτελέσματα δεύτερου πειράματος



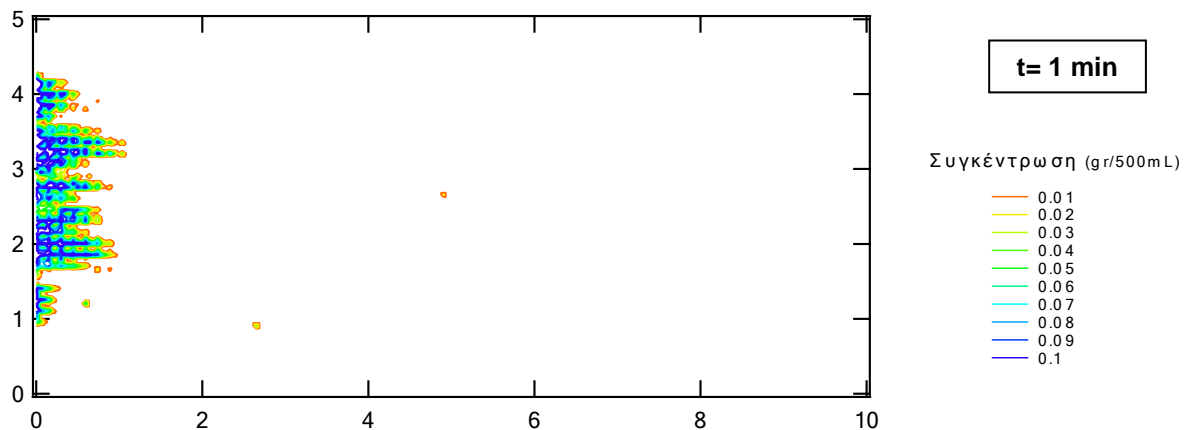


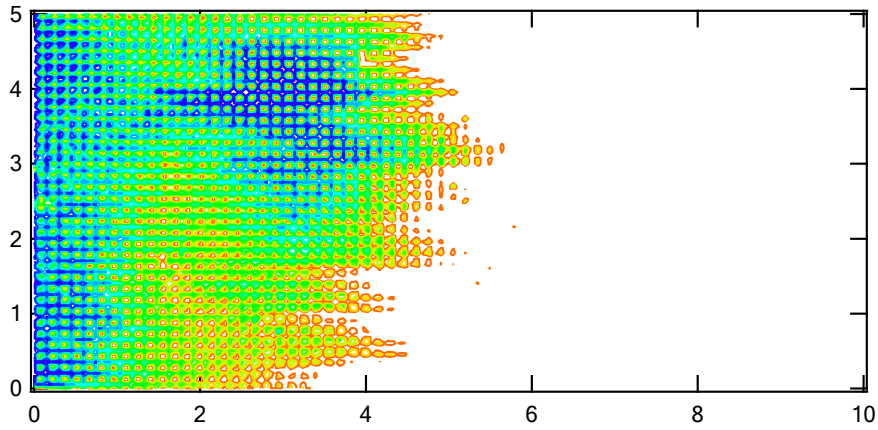


### 6.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕ ΥΠΕΡΙΩΔΕΣ ΦΩΣ

Στο συγκεκριμένο σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διάφορες χρονικές στιγμές του πειράματος σε συνθήκες υπεριώδους φωτός όπως προέκυψαν από τον αλγόριθμο του Matlab 7.1 (Παράρτημα) και την ανάλυσή τους από τα προγράμματα Igor Pro 6.0.

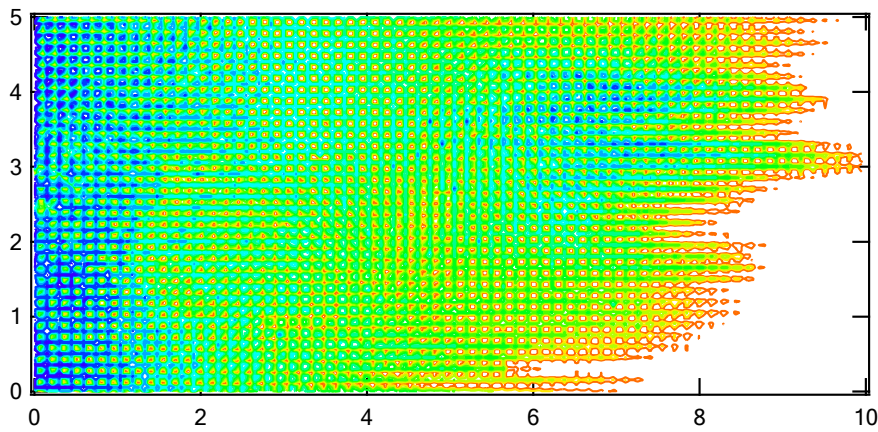
#### Αποτελέσματα πρώτου πειράματος





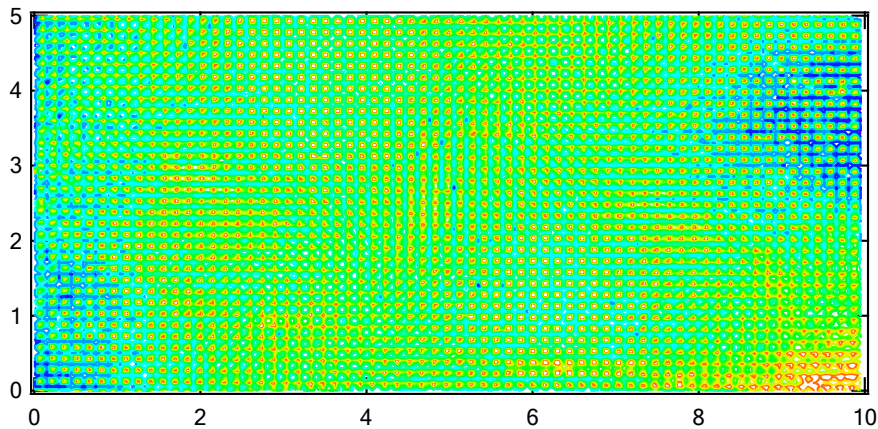
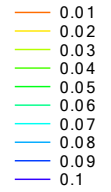
**t= 5 min**

Συγκέντρωση (gr/500mL)



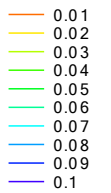
**t= 9 min**

Συγκέντρωση (gr/500mL)

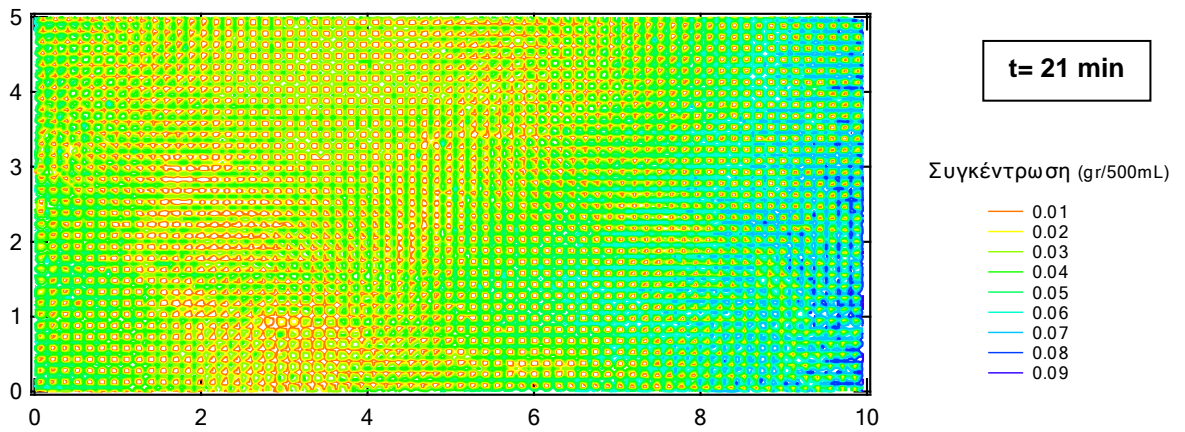
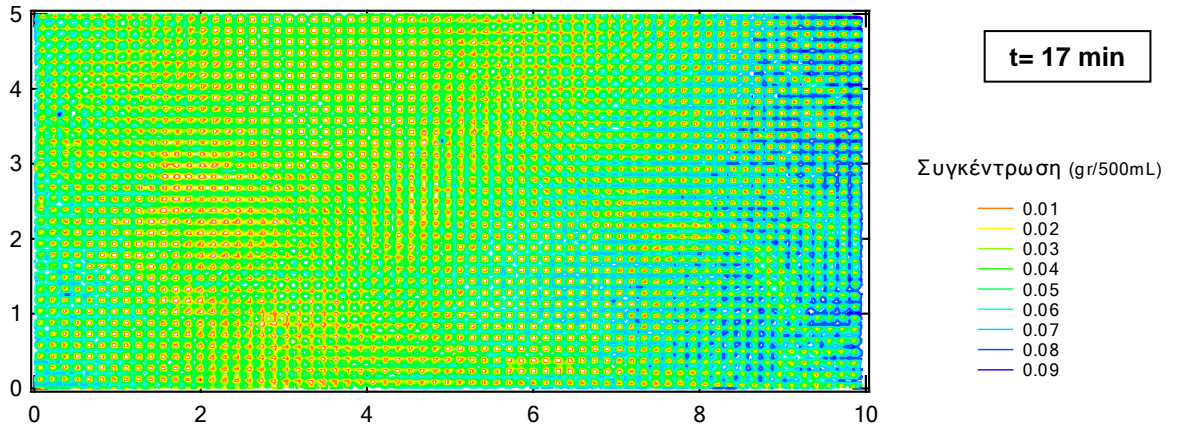


**t= 13 min**

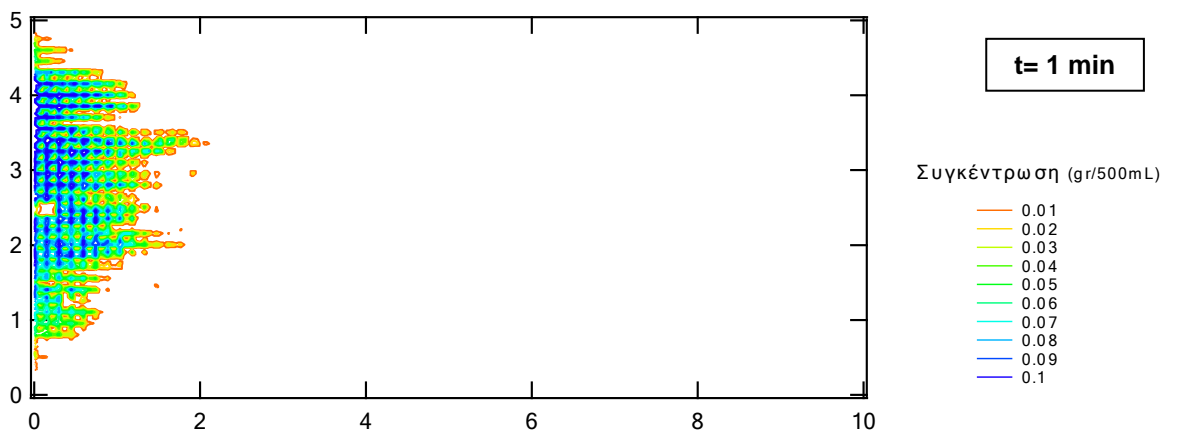
Συγκέντρωση (gr/500mL)

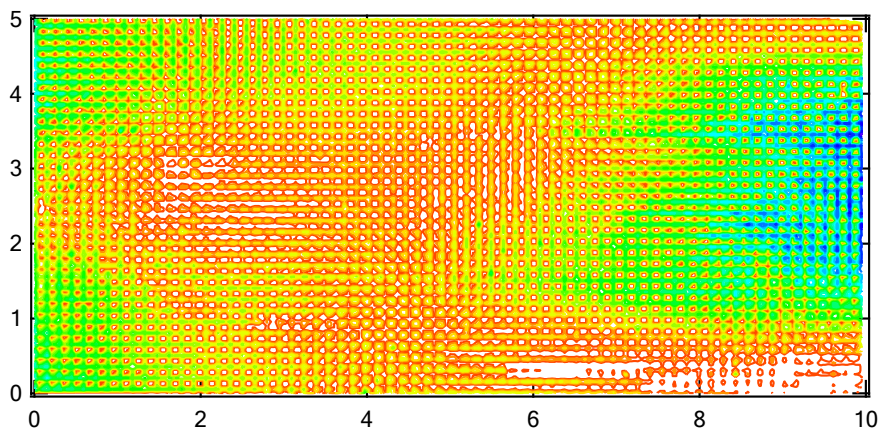
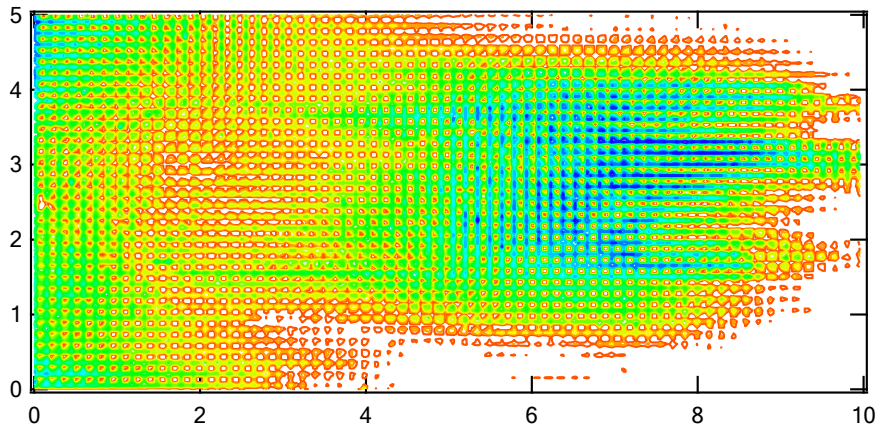
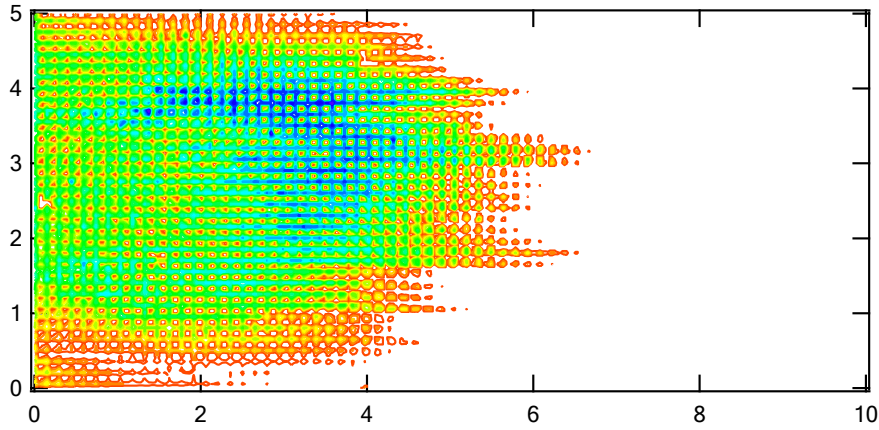


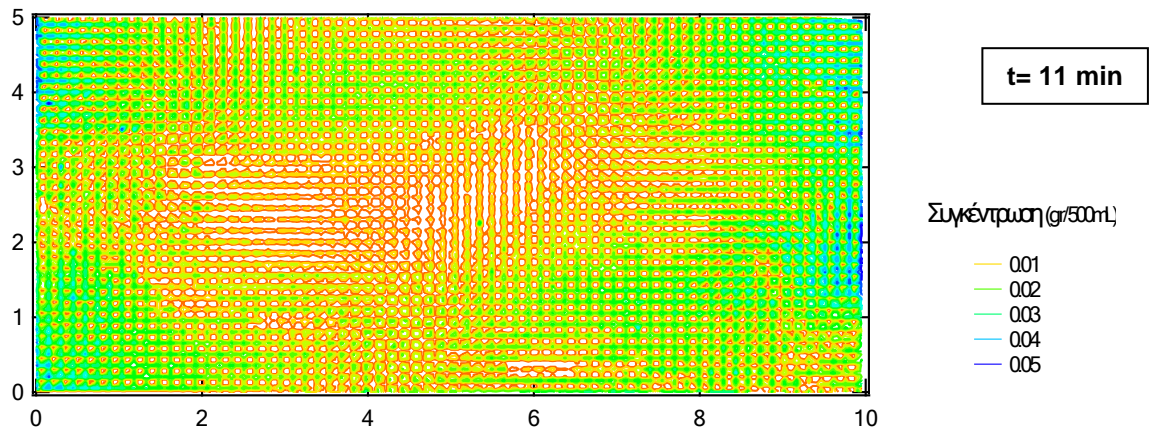
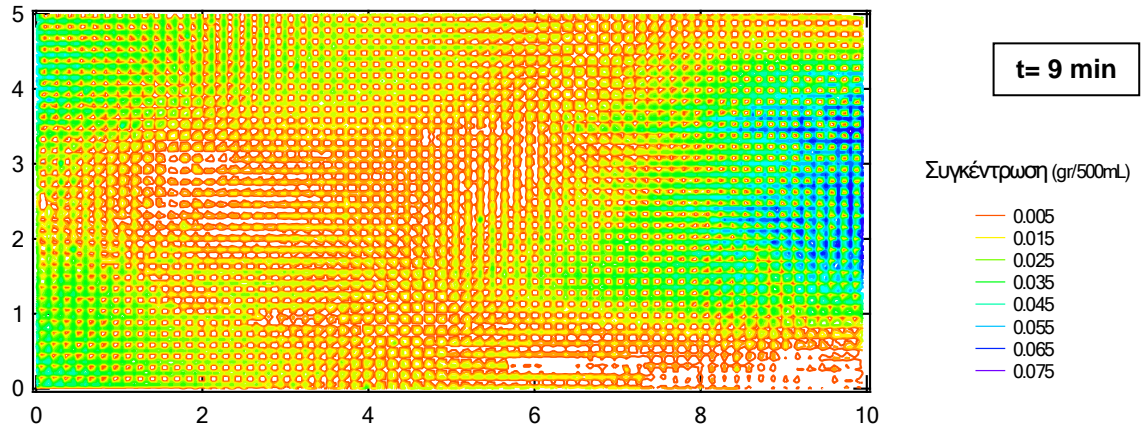




Αποτελέσματα δεύτερου πειράματος







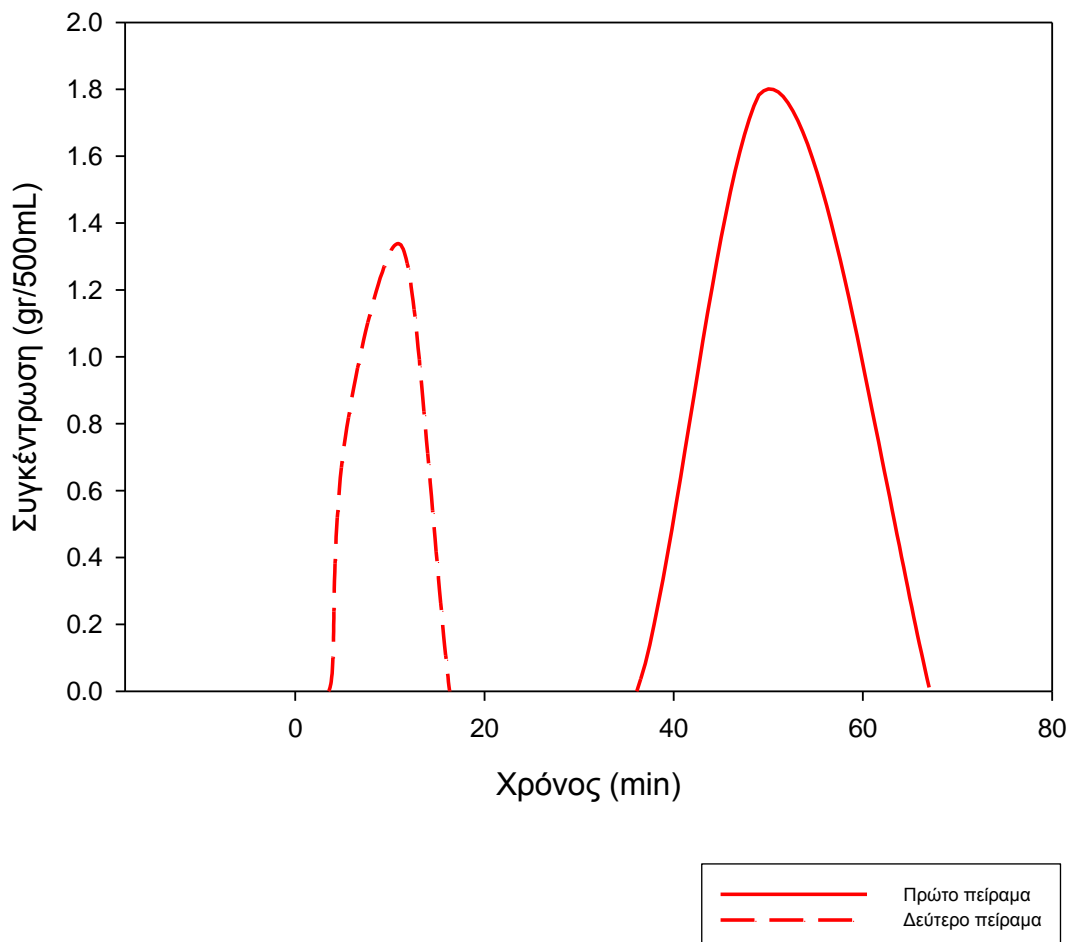
#### 6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα και να εξάγουμε συμπεράσματα μέσω αυτών ακολουθούν πίνακες των παραμέτρων που προκύπτουν από τα δύο ειδών πειράματα (ορατού και υπεριώδους φωτός) καθώς και διαγράμματα.

Επεξεργαστήκαμε δύο σημεία του δοκιμίου τα οποία έχουν ίδιο x και δύο σημεία που έχουν ίδιο y, ώστε να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

<u>Πρώτο πείραμα ορατού φωτός</u>		<u>Δεύτερο πείραμα ορατού φωτός</u>	
Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)	Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)
25.0000	0.0000	3.0000	0.0000
37.0000	0.0829	4.0000	0.1000
49.0000	1.7831	5.0000	0.7000
61.0000	0.8385	10.0000	1.3108
67.0000	0.0116	13.0000	1.0275
		16.0000	0.0829
		17.0000	0.0000

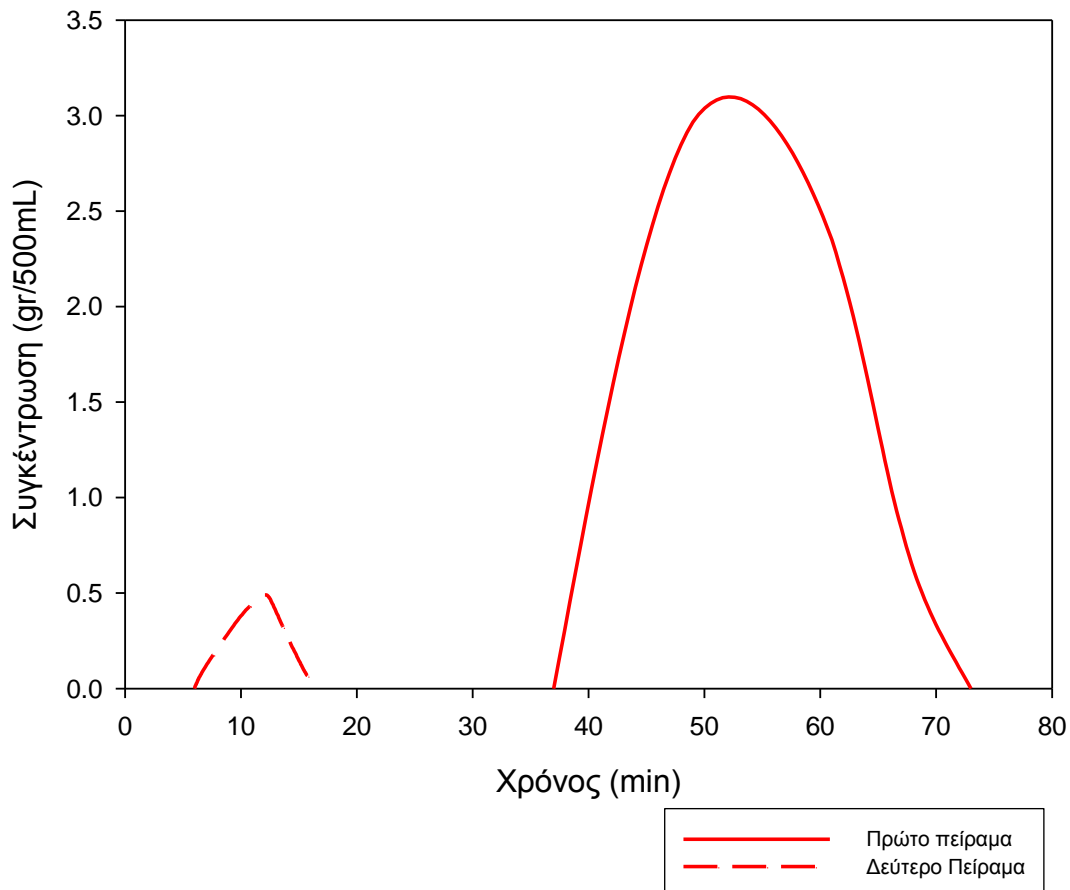
Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,2.7612).





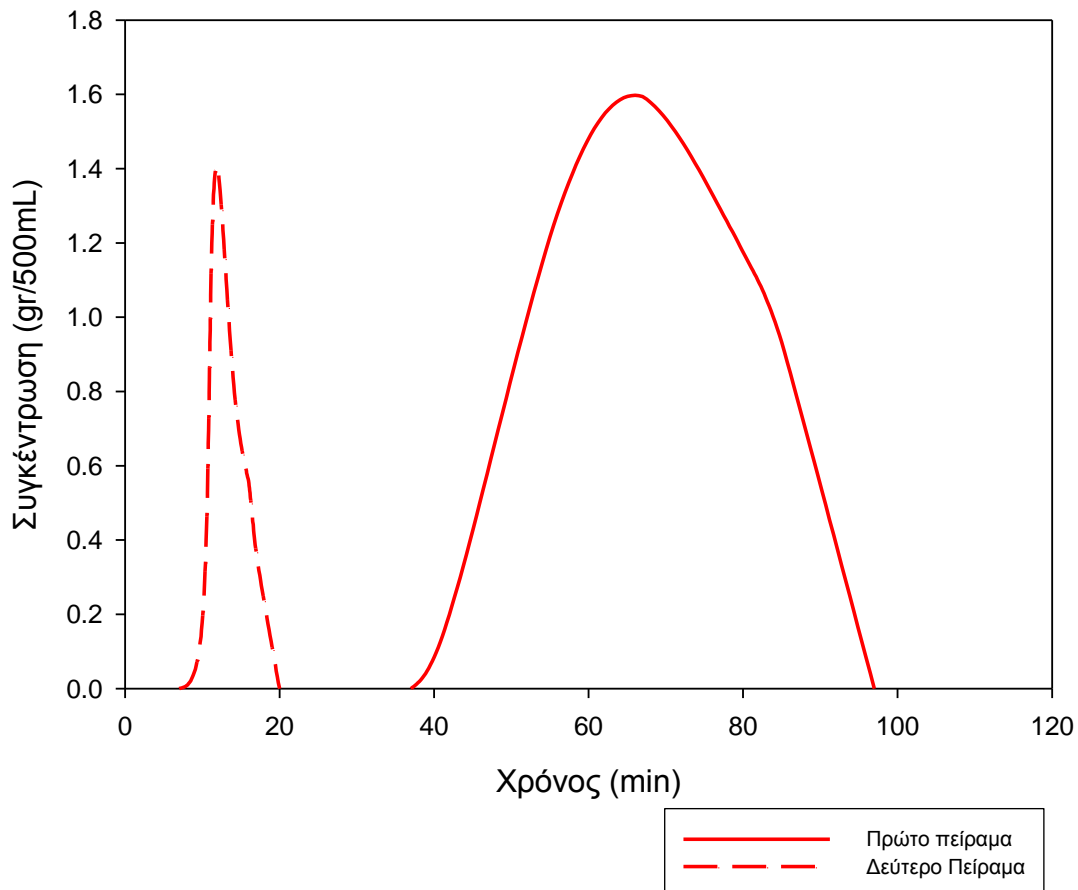
<u>Πρώτο πείραμα ορατού φωτός</u>		<u>Δεύτερο πείραμα ορατού φωτός</u>	
Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)	Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)
37.0000	0.0000	6.0000	0.0000
49.0000	2.9665	7.0000	0.1200
61.0000	2.3499	10.0000	0.3800
67.0000	0.8385	12.0000	0.4900
73.0000	0.0000	13.0000	0.4100
		15.0000	0.1500
		16.0000	0.0500
		17.0000	0.0000

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση  $(x,y)=(7.6492,1.0452)$ .



<u>Πρώτο πείραμα ορατού φωτός</u>		<u>Δεύτερο πείραμα ορατού φωτός</u>	
Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)	Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)
37.0000	0.0000	7.0000	0.0000
43.0000	0.2718	10.0000	0.1773
55.0000	1.2164	11.0000	0.9330
67.0000	1.5942	12.0000	1.4053
79.0000	1.2164	14.0000	0.8385
85.0000	0.9330	16.0000	0.5600
97.0000	0.0000	17.0000	0.3662
		20.0000	0.0000

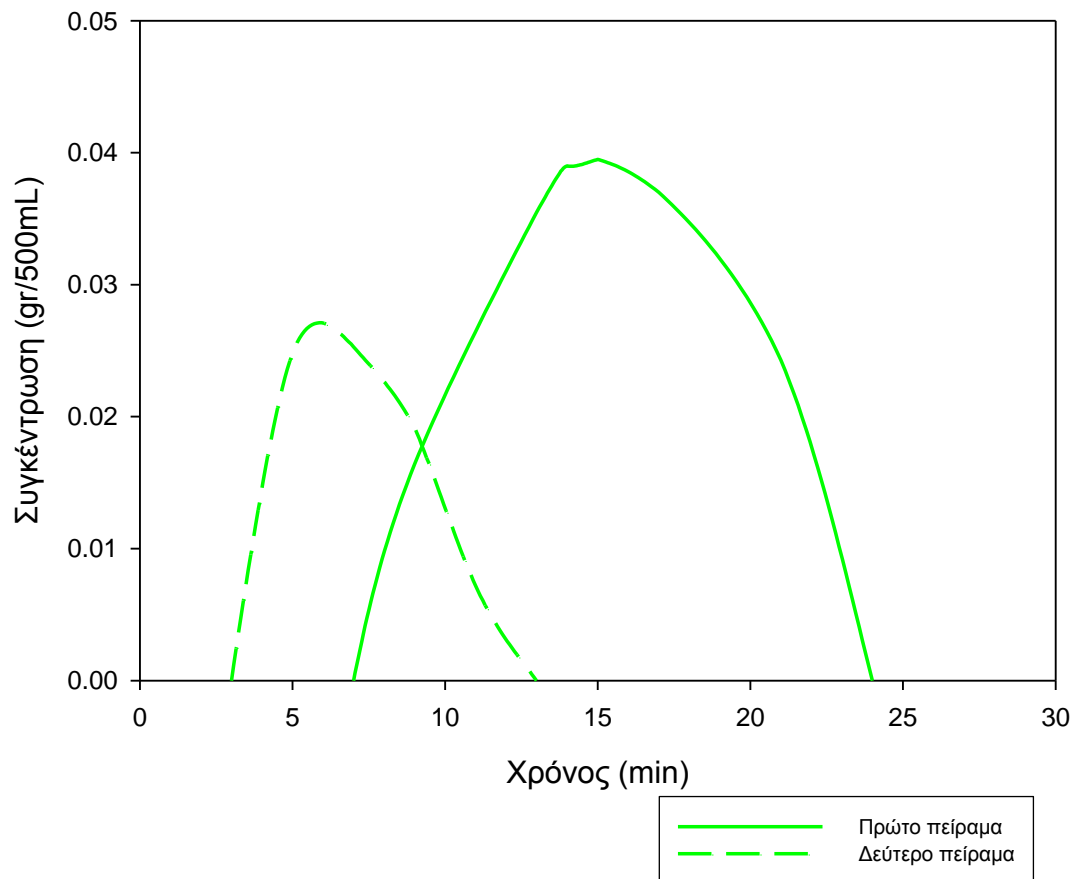
Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(9.0012,2.7612).



Πρώτο πείραμα υπεριώδους φωτόςΔεύτερο πείραμα υπεριώδους φωτός

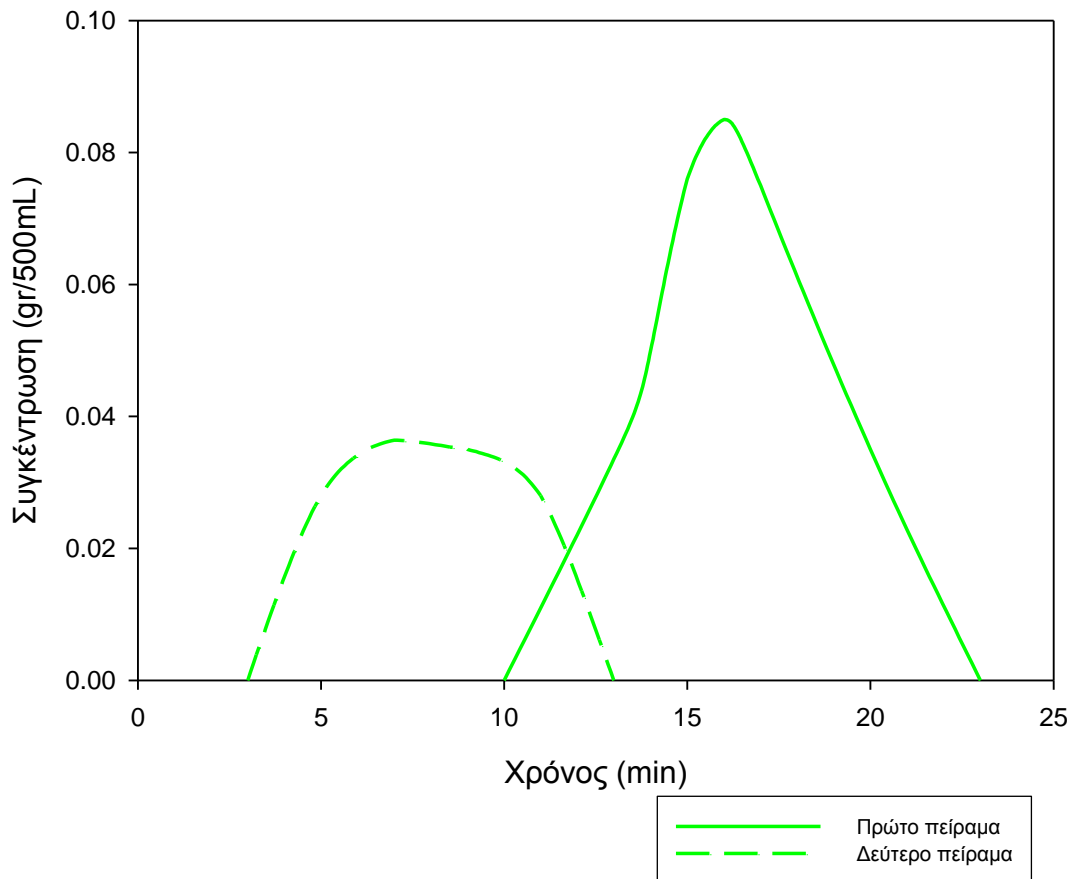
Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)	Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)
7.0000	0.0000	3.0000	0.0000
9.0000	0.0164	5.0000	0.0248
13.0000	0.0355	7.0000	0.0253
14.0000	0.0390	9.0000	0.0192
15.0000	0.0395	11.0000	7.2000e-3
17.0000	0.0370	13.0000	0.0000
21.0000	0.0243		
24.0000	0.0000		

**Πίνακας 6.6:** Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση  $(x,y)=(7.6492,2.7612)$ .



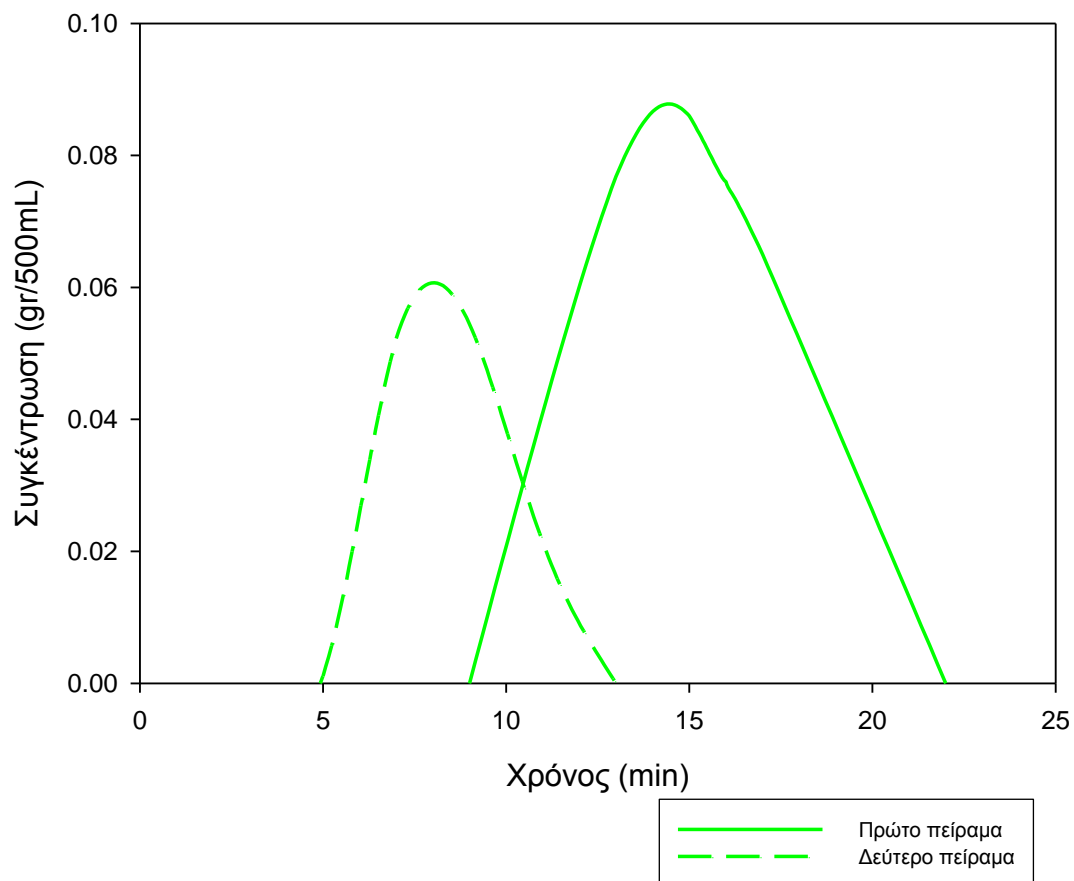
<u>Πρώτο πείραμα υπεριώδους φωτός</u>		<u>Δεύτερο πείραμα υπεριώδους φωτός</u>	
Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)	Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)
10.0000	0.0000	3.0000	0.0000
13.0000	0.0336	5.0000	0.0280
14.0000	0.0500	7.0000	0.0364
15.0000	0.0760	9.0000	0.0350
16.0000	0.0850	11.0000	0.0280
17.0000	0.0750	13.0000	0.0000
20.0000	0.0350		
23.0000	0.0000		

**Πίνακας 6.7:** Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση  $(x,y)=(7.6492,1.0452)$ .



<u>Πρώτο πείραμα υπεριώδους φωτός</u>		<u>Δεύτερο πείραμα υπεριώδους φωτός</u>	
Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)	Χρόνος (min)	Συγκέντρωση (gr/500mL)
9.0000	0.0000	3.0000	0.0000
13.0000	0.0768	5.0000	1.1000e-3
15.0000	0.0860	7.0000	0.0522
16.0000	0.0760	9.0000	0.0545
17.0000	0.0650	11.0000	0.0215
22.0000	0.0000	13.0000	0.0000

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(9.0012,2.7612).



Η μορφή των διαγραμμάτων στη γενική μορφή της και σε όλα τα πειράματα είναι ίδια. Παρουσιάζουν κανονική κατανομή, όπως και αναμενόταν διότι στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν η εισαγωγή του ιχνηθέτη ήταν στιγμιαία.

Η κανονική κατανομή είναι η σημαντικότερη κατανομή στους τομείς των πιθανοτήτων και της στατιστικής. Πολλοί αριθμητικοί πληθυσμοί, όπως τα ύψη, τα βάρη και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά, τα λάθη μέτρησης σε επιστημονικά πειράματα και τα αποτελέσματα διαφόρων δοκιμών, έχουν κατανομές οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν αρκετά ικανοποιητικά με μία καμπύλη κανονικής κατανομής (Χρυσικόπουλος, 2008).

Παρατηρώντας τα γραφήματα συμπεραίνουμε τα εξής:

- 1) Στο σημείο  $(x,y)=(7.6492,2.7612)$  η συγκέντρωση του ιχνηθέτη εμφανίζεται τη χρονική στιγμή των 37min ( π.χ. για το πείραμα με παροχή 0.4 mL/h και σε συνθήκες ορατού φωτός) και μηδενίζεται στα 67min, ενώ στο σημείο  $(x,y)=(9.0012,2.7612)$  η συγκέντρωση του ιχνηθέτη εμφανίζεται τη χρονική στιγμή των 43min και μηδενίζεται στα 97min. Απολύτως λογικό λοιπόν είναι η εμφάνιση του ιχνηθέτη, σε όλα τα διαφορετικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, να γίνεται πρώτα στις μικρότερες συντεταγμένες και έπειτα στις μεγαλύτερες, εφόσον η εισαγωγή του ρύπου και η ροή έγινε από την αριστερή πλευρά του δοκιμίου. Συμπερασματικά, το μέγεθος της ζώνης ρύπανσης μεγαλώνει και η συγκέντρωση του ρύπου ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου.
- 2) Παρατηρείται ότι στα πειράματα με τη μικρότερη παροχή η διασπορά είναι μεγαλύτερη και αυτό γίνεται αντιληπτό οπτικά από τη μορφή των κανονικών κατανομών, αλλά και από τον υπολογισμό των διασπορών σύμφωνα με τον τύπο:

$$s^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^{\nu} (t_i - \bar{t})^2$$

όπου  $s^2$ : η διασπορά

$\nu$ : το πλήθος των τιμών του χρόνου

$t$ : ο χρόνος

$\bar{t}$ : η μέση τιμή του χρόνου

	<u>ΔΙΑΣΠΟΡΑ (<math>s^2</math>)</u>			
	Πειράματα σε ορατό φως		Πειράματα σε υπεριώδες φως	
	Παροχή 0.4mL/h	Παροχή 2mL/h	Παροχή 2mL/h	Παροχή 4mL/h
Συντεταγμένες (x,y)				
(7.6492,2.7612)	151.90	29.06	28.25	11.67

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα υπολογισμού της διασποράς των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,2.7612).

- 3) Υπολογίζεται παρακάτω ότι οι συντελεστές τάσεων διασποράς (διαμήκης και εγκάρσιας) παραμένουν σταθεροί για τα πειράματα ίδιας ταχύτητας ανεξαρτήτου θέσης. Αυτό εξάλλου ήταν και το αναμενόμενο, διότι οι συντελεστές αυτοί αυξάνουν με την αύξηση της κλίμακας πεδίου. Η εξάρτηση των συντελεστών στην κλίμακα του πεδίου αποδίδεται στην ύπαρξη τοπικών ανομοιογενειών του πεδίου (Χρυσικόπουλος, 2008). Το πορώδες μέσο όμως στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα είναι ομοιογενές και ισότροπο, οπότε οι συντελεστές  $\alpha_L$  και  $\alpha_T$  θα πρέπει σε κάθε σημείο του δοκιμίου και για κάθε πείραμα να είναι οι ίδιοι.

	<u>Παροχή 2mL/h</u> (x,y)=(7.6492,1.0452)						
	$s^2$	$u$	$D_L$	$D_T$	$D_e$	$\alpha_L$	$\alpha_T$
Πείραμα ορατού φωτός	14.5	0.5775	1.3360	0.1825	32.28E-8	2.3134	0.3161
Πείραμα υπεριώδους φωτός	14.5	0.5775	1.3360	0.1825	3.72E-8	2.3134	0.3161

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα υπολογισμού των συντελεστών τάσεων διασποράς των δύο πειραμάτων στη θέση (x,y)=(7.6492,1.0452).

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό των παραμέτρων του Πίνακα 6.10 είναι οι εξής:

Αρχικά υπολογίστηκε η ενδοπορώδης ταχύτητα από τον τύπο:

$$u = \frac{Q}{A \cdot n}$$

όπου  $A = \text{πλάτος} \cdot \text{βάθος χάραξης} = 5\text{cm} \cdot 0.0195\text{cm} = 0.0975\text{cm}^2$  και

$n = \text{πορώδες δοκιμίου} = 0.592$  (Παράρτημα Α)

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι συντελεστές διαμήκης και εγκάρσιας υδροδυναμικής διασποράς ως εξής:

$$D_L = \frac{u^3 \cdot s^2}{2 \cdot y} \quad \text{και} \quad D_T = \frac{u^3 \cdot s^2}{2 \cdot x} \quad (\text{Domenico and Schwartz, 1998})$$

Χρησιμοποιώντας την εμπειρική σχέση Wike-Chang υπολογίστηκε ο συντελεστής μοριακής διάχυσης  $D_e$ :

$$D_{AB} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\psi_B m w_B)^{1/2} T}{\mu_B V_A^{0.6}}$$

όπου το διαχεόμενο Α είναι στο πείραμα ορατού φωτός ο κόκκινος δείκτης (Λακτόζη,  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) και στο πείραμα υπεριώδους φωτός η ουρανίνη. Ο διαλύτης Β το νερό ( $H_2O$ ) που γνωρίζουμε ότι  $\psi_B = \psi_{H_2O} = 2.6$  και το δυναμικό ιξώδες του νερού στους  $25^\circ C$  είναι  $\mu_w = 0.890 \times 10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2}$  (Χρυσικόπουλος, 2008). Επομένως το δυναμικό ιξώδες σε cp (centipoises) είναι:

$$\mu_B = \left( 0.890 \times 10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2} \right) \left( \frac{1cp}{0.001 N \cdot s / m^2} \right) = 0.890cp$$

Από τον περιοδικό πίνακα των στοιχείων βρίσκεται το μοριακό βάρος του νερού:

$$m_{w_{H_2O}} = 18.0152 \frac{g}{mol}$$



του κόκκινου δείκτη (Λακτόζη):

$$mw_{C_{12}H_{22}O_{11}} = 342.30 \frac{g}{mol}$$

και της ουρανίνης:

$$mw_{C_{20}H_{10}O_5Na_2} = 376.3 \frac{g}{mol}$$

Ο μοριακός όγκος του κόκκινου δείκτη είναι:

$$V_{C_{12}H_{22}O_{11}} = \frac{mw_{C_{12}H_{22}O_{11}}}{\rho_{C_{12}H_{22}O_{11}}} = \frac{342.30 \text{ g/mol}}{0.01 \text{ g/cm}^3} = 34230 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$

Ο μοριακός όγκος της ουρανίνης είναι:

$$V_{C_{20}H_{10}O_5Na_2} = \frac{mw_{C_{20}H_{10}O_5Na_2}}{\rho_{C_{20}H_{10}O_5Na_2}} = \frac{376.3 \text{ g/mol}}{0.0003 \text{ g/cm}^3} = 1254333 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$

Οι συντελεστές διάχυσης για τον κόκκινο δείκτη και την ουρανίνη αντίστοιχα είναι:

$$D_e = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(2.6 \cdot 18.0152)^{1/2} (273.15 + 25)}{(0.890)(34230)^{0.6}} = 32.28 \times 10^{-8} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \quad \text{και}$$

$$D_e = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(2.6 \cdot 18.0152)^{1/2} (273.15 + 25)}{(0.890)(1254333)^{0.6}} = 3.72 \times 10^{-8} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

Τέλος, υπολογίστηκαν οι συντελεστές διαμήκης και εγκάρσιας τάσης διασποράς σύμφωνα με τους τύπους:

$$D_L = D_e + \alpha_L u \Rightarrow \alpha_L = \frac{D_L - D_e}{u}$$

$$D_T = D_e + \alpha_T u \Rightarrow \alpha_T = \frac{D_T - D_e}{u}$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών καταγράφονται στον Πίνακα 6.10.

## 6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια τεχνική-μεθοδολογία υπολογισμού της υδροδυναμικής διασποράς ρύπων σε δισδιάστατα δίκτυα πόρων. Επίσης, επιχειρήθηκε η σύγκριση του φαινομένου αυτού με δύο διαφορετικούς ιχνηθέτες σε συνθήκες ορατού και υπεριώδους φωτός, αντίστοιχα. Πρόκειται για μια πρωτοπόρο τεχνική, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι στη διεθνή βιβλιογραφία είναι σχετικά περιορισμένο το αντικείμενο συζήτησης για το συγκεκριμένο θέμα. Πάντως, επισημαίνεται ότι ανάλογα πειράματα με χρήση ιχνηθέτη σε υπεριώδες φως έχουν πραγματοποιηθεί σύμφωνα με πρόσφατες εργασίες των Thomas και Chrysikopoulos(2009), αλλά το μέσο διασπορά των ρύπων ήταν διαφορετικό (στήλη) από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο προτεινόμενο μοντέλο (δισδιάστατο γυάλινο δοκίμιο δικτύου πόρων) της παρούσας εργασίας.



Η πρωτοποριακή αυτή τεχνική υπολογισμού της υδροδυναμικής διασποράς των ρύπων βασίστηκε και σε μεθοδολογίες σχετικές με την επεξεργασία εικόνας, διότι έπρεπε να υπολογιστεί η ένταση του χρώματος κάθε ιχνηθέτη σε κάθε σημείο και σε κάθε χρονική στιγμή, επειδή ακριβώς λειτουργεί ως δείκτης για την εξαγωγή συμπερασμάτων επί της παρούσας εργασίας. Το χρώμα του διαλύματος αλλάζει διότι, όταν δύο αναμίξιμα υγρά εκτοπίζουν το ένα το άλλο σε ένα πορώδες μέσο, παρατηρείται μικροσκοπική ανάμιξη στη διεπιφάνεια των δύο υγρών και το μήκος της μεταβατικής ζώνης αυξάνει με την πάροδο του χρόνου. Αυτό έγινε αντιληπτό με τη διεξαγωγή των πειραμάτων και συμφωνεί απόλυτα με τη θεωρητική προσέγγιση. Η ένταση του χρώματος του κάθε ιχνηθέτη μετατράπηκε μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης των πρότυπων διαλυμάτων σε συγκέντρωση. Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης, εξάλλου, είναι και ο στόχος του πειράματος, επειδή μπορεί κανείς να εκτιμήσει ποσοτικά το ρυπαντικό φορτίο και να αξιολογήσει σε μετέπειτα στάδια τις επιπτώσεις του φαινομένου ρύπανσης.

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα και υποδείξεις για μελλοντική έρευνα. Τα συμπεράσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

<b>1</b>	<p>Στην περίπτωση που η μεταφορά μάζας εξαρτάται από τις διαδικασίες μεταγωγής και υδροδυναμικής διασποράς, τότε:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ το μέγεθος της ζώνης ρύπανσης μεγαλώνει,</li> <li>▪ η συγκέντρωση του ρύπου ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου.</li> </ul>
<b>2</b>	<p>Στα πειράματα με τη μικρότερη ταχύτητα η διασπορά είναι μεγαλύτερη. Η παρατήρηση αυτή γίνεται αντιληπτή είτε οπτικά από τη μορφή των κανονικών κατανομών είτε από τον υπολογισμό των διασπορών που προηγείται.</p>
<b>3</b>	<p>Το πορώδες μέσο στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα είναι ομοιογενές και ισότροπο, οπότε οι συντελεστές <math>\alpha_L</math> και <math>\alpha_T</math> θα πρέπει σε κάθε σημείο του δοκιμίου και για κάθε πείραμα να είναι οι ίδιοι. Επαληθεύτηκε το αναμενόμενο, ότι δηλαδή οι συντελεστές τάσεων διασποράς (διαμήκης και εγκάρσιας) παραμένουν σταθεροί για τα πειράματα ίδιας ταχύτητας ανεξαρτήτου θέσης.</p>

Η εργασία αυτή αποτελεί όμως μια πολύ καλή βάση για περαιτέρω δραστηριότητες. Ακολουθούν προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον παρακάτω πίνακα:

<b>1</b>	<p>Η πραγματοποίηση πειραμάτων σε διαφορετικά δίκτυα πόρων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Η διαφοροποίηση θα μπορούσε να γίνει είτε με την χρησιμοποίηση διαφορετικών μοντέλων (παράλληλης δέσμης κυλινδρικών σωλήνων, ομοιόμορφων σφαιρών και θαλάμων-λαιμών), είτε με αλλαγή του πορώδους στο ίδιο μοντέλο.</p>
<b>2</b>	<p>Η αλλαγή της εισόδου του ιχνηθέτη στο κορεσμένο με νερό πορώδες μέσο.</p>
<b>3</b>	<p>Μελέτη της μεταφοράς κολλοειδών ή και υγρών μη υδατικής φάσης (NAPLs) σε πορώδη μέσα.</p>

Στο επίμετρο αυτής της συζήτησης, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθούν ορισμένες αντικειμενικές δυσκολίες που προέκυψαν τόσο κατά την εκτέλεση του πειράματος όσο και κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, με δεδομένο το γεγονός ότι πρόκειται για μια νέα μέθοδο υπολογισμού της υδροδυναμικής διασποράς ρύπων σε δισδιάστατα πορώδη μέσα, απαιτήθηκε πολύτιμος χρόνος:

- για την βιβλιογραφική ανασκόπηση σε αντικείμενο συναφές με το θέμα της διατριβής και τη συλλογή πληροφοριών και υλικού από διάφορους φορείς (Μηχανουργείο του Τμήματος Φυσικής, Υαλουργείο Πανεπιστημίου Πατρών)
- για την οργάνωση και σύσταση της κατάλληλης πειραματικής διάταξης (εύρεση οργάνων, παραγγελία υλικών, σύνδεση διάταξης κ.α.)
- για την κατασκευή του κατάλληλου δοκιμίου (προηγήθηκαν πολλές εκατοντάδες δοκιμών για την επιτυχή ολοκλήρωση του)
- για την εξοικείωση του χρήστη με τα λογισμικά πακέτα (Comsol, Matlab, AutoCad και Igor Pro) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (συμπεριλαμβανομένων και αυτών που τελικά κρίθηκε ότι δεν παρείχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα)
- για την ανάπτυξη συνεργασιών (π.χ. Ε.Ι.ΧΗ.Μ.Υ.Θ., Τμήμα Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, Εργαστήριο Μικροσκοπικής Ανάλυσης του Τμήματος Χημείας του Πανεπιστημίου Πατρών κ.α.).

Διαφαίνεται επομένως ότι η παρούσα εργασία αντιμετώπισε ποικίλες δυσκολίες ως προς τις απαιτήσεις του θέματος, λαμβάνοντας υπόψη και το περιορισμένο χρονοδιάγραμμα του ΜΠΣ του Τμήματος. Για τους ανωτέρω λόγους, δεν επιτεύχθηκαν όλοι οι αρχικοί στόχοι. Στα πρώιμα στάδια της εργασίας, θέλαμε να μελετήσουμε τη μεταφορά κολλοειδών στα δισδιάστατα αυτά δοκίμια. Για την πραγματοποίηση όμως αυτή θα έπρεπε, όπως και κάναμε, να ξεκινήσουμε μελετώντας πιο απλά συστήματα με ευκολότερα μετρήσιμους δείκτες-ιχνηθέτες. Ευελπιστούμε η παρούσα μελέτη να συνεχιστεί με την προσομοίωση των αποτελεσμάτων της μεταφοράς των ρύπων μέσω της εξίσωσης μεταγωγής-διασποράς που διέπει το συγκεκριμένο πείραμα.

# *ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ*

**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Γ. Καπέλλος, Γ. Σγούντζος, «Κατασκευή δισδιάστατων δικτύων πόρων σε γυάλινα δοκίμια», Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Καρατζάς Π. Γεώργιος, «Ροή Υπόγειων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων», Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Μπουντουβής Ανδρέας - Παπαϊωάννου Άγγελος - Ρήγου Βενετία (2005), «Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ανάλυση Φαινομένων Μεταφοράς με το Femlab 3.1», Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Χρυσικόπουλος Β. Κων/νος (2007), «Ειδικά Θέματα Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Χρυσικόπουλος Β. Κων/νος (2007), «Καθαρισμός Νερού», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

**ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- M. Auset and A.A. Keller, (2004), “Pore-scale processes that control dispersion of colloids in saturated porous media”, Water Resources Research, Vol. 40, pp. W03503.
- Bales, R. C., C. P. Gerba, G. H. Grondin, and S. L. Jensen (1989), Bacteriophage transport in sandy soil and fractured tuff, Appl. Environ. Microbiol., 55, 2061– 2067.
- Thomas Baumann and Charles J. Werth, (2004), “Visualization and Modeling of Polystyrol Colloid Transport in a silicon Micromodel”, Vadose Zone Journal, Vol. 3, pp. 434-443.
- Bear, J., Tsang, C.-F., deMarsily, G., 1993. Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Academic Press, San Diego, CA.
- M. E. Cakmak, Y. Zevi, V. L. Morales, B. Gao, J. L. Nieber and T. S. Steenhuis, (2006), “Pore scale modeling of colloid transport in unsaturated porous media with COMSOL”, USA.

- “Earth science Module”, (1994-2007), Comsol Multiphysics, Version 3.4, Model Library.
- “Earth science Module Comsol”, (1994-2007), Multiphysics, Version 3.4, User’s Guide.
- M. Y. Corapcioglu, P. Fedirchuk, (1999), “Glass bead micromodel study of solute transport”, *Journal of contaminant Hydrology* Vol. 36, pp. 209-230.
- P.A. Domenico and F.W. Schwartz (1998), “Physical and Chemical Hydrogeology”, J. Wiley & Sons, Inc.
- Dong, H., T. C. Onstott, M. F. DeFlaun, M. Fuller, T. D. Scheibe, S. H. Streger, R. K. Rothmel, and B. J. Mailloux (2002), Relative dominance of physical versus chemical effects on the transport of adhesion deficient bacteria in intact cores from South Oyster, Virginia, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 891–900.
- Harter, T., S. Wagner, and E. R. Atwill (2000), Colloid transport and filtration of *Cryptosporidium parvum* in sandy soils and aquifer sediments, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 62–70.
- Hemond, H. F & Fechner E. J., (1994), “*Chemical Fate And Transport In The Environment*”, Academic Press, Inc.
- Hornberger, G. M., A. L. Mills, and J. S. Herman (1992), Bacterial transport in porous media: Evaluation of a model using laboratory observations, *Water Resour. Res.*, 28, 915–938.
- Johnson, P. R., N. Sun, and M. Elimelech (1996), Colloid transport in geochemically heterogeneous porous media: Modeling and measurements, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 3284–3293.
- A.A Keller and M. Auset, (2007), “A review of visualization techniques of biocolloid transport processes at the pore scale under saturated and unsaturated conditions”, *Water Resources Research*, Vol. 30, pp. 1392-1407.
- Keller, A.A., Blunt, M., Roberts, P.V., 1998. Effect of fracture aperture variations on the dispersion of contaminants. *Water Resour. Res.* 35, 55–63.
- Klint, K.E., Tsakiroglou, C.D., 2000. A new method of fracture aperture characterization. In: Tsihrintzis, V.A., (Ed.), *Proceedings of the Protection and Restoration of the Environment V, Thassos Island, Greece*, vol. 1., pp. 127–136.

- “Matlab Image Processing Toolbox TM 6”, (1993-2009), User’s Guide, by the MathWorks, Inc.
- McDowell-Boyer, L. M., J. R. Hunt, and N. Sitar, Particle transport through porous media, *Water Resour. Res.*, 22, 1901– 1921, 1986.
- McGechan, M. B., N. J. Jarvis, P. S. Hooda, and A. J. A. Vinten (2002),
- Parameterization of the MACRO model to represent leaching of colloiddally attached inorganic phosphorus following slurry spreading, *Soil Use Manage.*, 18, 61– 67.
- Jarrod Miller and Harry Hogan (1997), “Dispersion”.
- M. McKellar and N.C. Wardlaw, (1982), “A method of making two-dimensional glass micromodels of pore systems”, *The Journal of Canadian Petroleum*, Vol. 21, pp. 39-41.
- Sahimi, M., 1995. *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock: From Classical Methods to Modern Approaches*, VCH, Weinheim.
- Sanya Sirivithayapakorn and Arturo Keller, (2003), “Transport of colloids in saturated porous media: A pore-scale observation of the size exclusion effect and colloid acceleration”, *Water Resources Research*, Vol. 39, No.4, 1109.
- M.A Theodoropoulou et al., (2003), “A new visualization technique for the study of solute dispersion in model porous media”, *Journal of Hydrology* Vol274, pp. 176-197.
- M. Thomas and C. Chrysikopoulos (2009), “A new method for in situ concentration measurement in packed-column transport experiments”, submitted in *Chemical Engineering Science* .

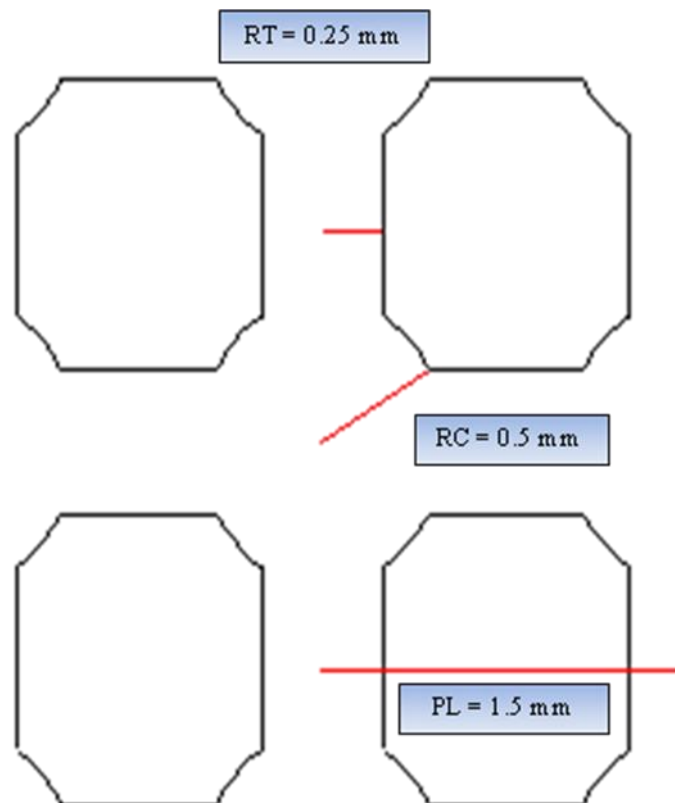


# *ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α*

## ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΡΩΝ

### 1<sup>ος</sup> Τρόπος

Τα τετραγωνικά κελιά που ακολουθούν (Σχήμα Π.Α.1) αποτελούν την δομική μονάδα του τετραγωνικού δικτύου που έχουμε κατασκευάσει.



**Σχήμα Π.Α.1:** Τετραγωνικά κελιά του δικτύου πόρων.

Σε αυτόν τον τρόπο κάνουμε δύο υποθέσεις. Πρώτον, ότι ο λόγος όγκων ισούται με το λόγο των αντίστοιχων επιφανειών, δηλαδή η μια διάσταση (βάθος) είναι σταθερή. Δεύτερον, ότι η βασική δομική μονάδα αποτελείται από ίσους μεταξύ τους θαλάμους και λαιμούς, που χαρακτηρίζονται από τα μέσα μεγέθη.

Πρώτα θα προσδιοριστεί το εμβαδό ενός θαλάμου ( $SC$ ) και ενός λαιμού ( $ST$ ) σε τετραγωνικό κελί:

$$SC = \frac{\pi \cdot (RC)^2}{6} = \frac{\pi \cdot (0.5)^2}{6} = 0.196 \text{ mm}^2 \quad ST = PL \cdot RT = 1.5 \cdot 0.25 = 0.375 \text{ mm}^2$$

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η αλληλοεπικάλυψη (SO) μεταξύ ενός λαιμού και ενός θαλάμου. Η γωνία (F) στον κυκλικό τομέα S1, είναι ίση με:

$$F = \sin^{-1}(RT/RC) = 30^\circ \quad \alpha = \frac{\pi \cdot F}{180} = 0.523 \text{ ακτίνια}$$

$$S0 = S1 + S2 = \frac{(RC)^2}{2} \cdot \alpha + \frac{RT}{2} \sqrt{(RC)^2 - (RT)^2} = 0.0654 + 0.0541 = 0.119 \text{ mm}^2$$

Η συνολική κενή επιφάνεια (SP), αφαιρώντας τις αλληλοεπικαλύψεις θα είναι:

$$SP = 4 \cdot (SC + ST) - 8 \cdot S0 = 2.284 - 0.952 = 1.332 \text{ mm}$$

Το εμβαδό του τετραγώνου είναι:

$$S_{\text{tetr}} = (PL)^2 = 2.25 \text{ mm}^2$$

Συνεπώς, το πορώδες της δομής αυτής είναι:

$$\begin{aligned} \text{porosity} &= \frac{\pi \cdot (RC)^2 + 4 \cdot (PL) \cdot (RT) - 8 \cdot \left( \frac{(RC)^2}{2} \cdot \alpha + \frac{RT}{2} \cdot \sqrt{(RC)^2 - (RT)^2} \right)}{(PL)^2} = \\ &= \frac{4 \cdot SC + 4 \cdot ST - 8 \cdot S0}{S_{\text{tetr}}} = \frac{SP}{S_{\text{tetr}}} = \frac{1.332}{2.25} = 0.592 \end{aligned}$$

Το βάθος χάραξης του δοκιμίου υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{\text{κεν}} = \text{Pore Volume} = 0.592 \text{ g} / 1 \text{ g/ml} = 0.592 \text{ ml ή cm}^3$$

$$N = \text{ο αριθμός των πόρων} = 2278$$

$$E_{\text{κεν}} = SP \cdot N = 1.332 \cdot 2278 = 3034.296 \text{ mm}^2 = 30.34 \text{ cm}^2$$

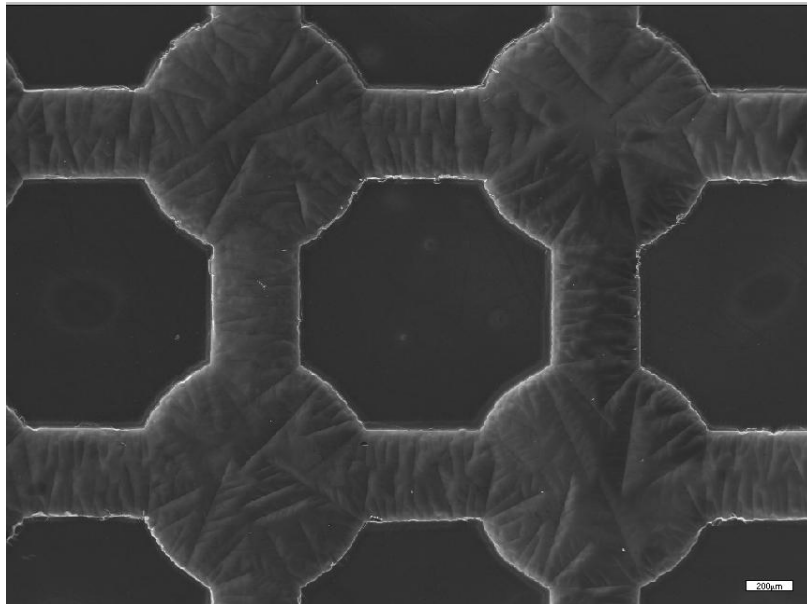
$$D = V_{\text{κεν}} / E_{\text{κεν}} = 0.592 / 30.34 = 0.0195122 \text{ cm} = 195.12 \text{ } \mu\text{m}$$

## 2<sup>ος</sup> Τρόπος

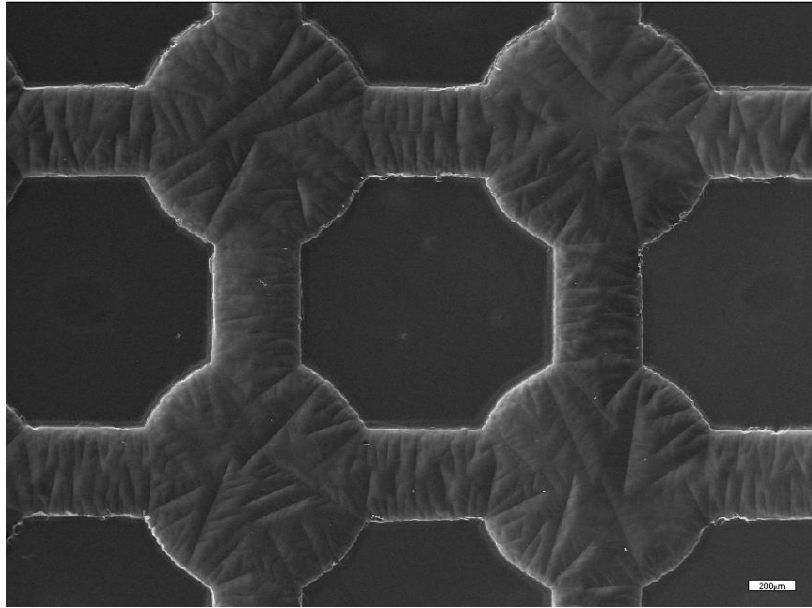
Υπολογίστηκε το πορώδες με την γραμμική ανάλυση (Line Scan) που πραγματοποιήθηκε με χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM). Στη συνέχεια ακολουθούν εικόνες του δικτύου πόρων από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



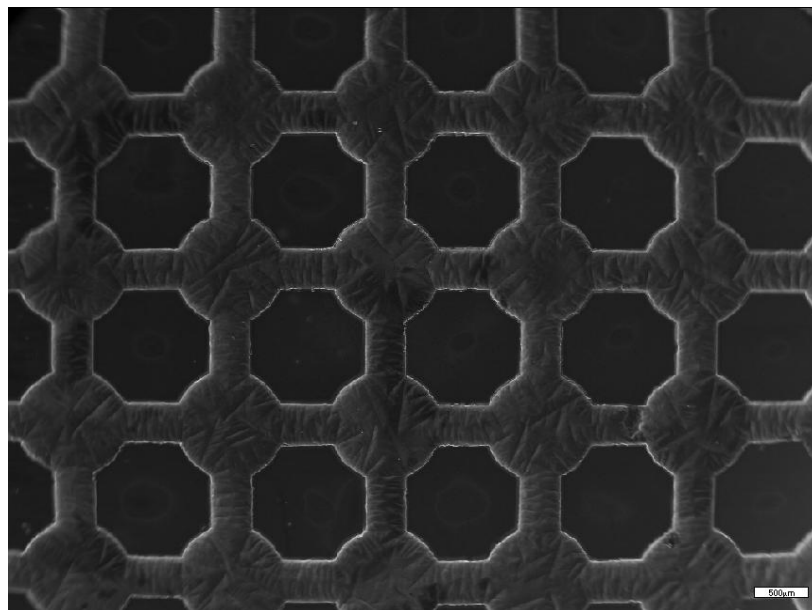
**Εικόνα Π.Α.1:** Τοπογραφική αποτύπωση του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 33x.



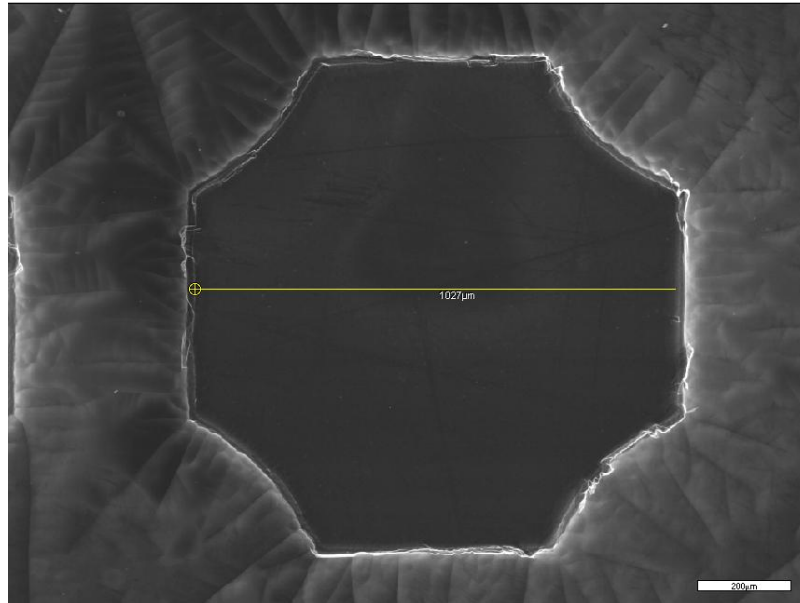
**Εικόνα Π.Α.2:** Secondary electron image (SEI) του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 33x.



**Εικόνα Π.Α.3:** Τοπογραφική αποτύπωση και SEI του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 33x.

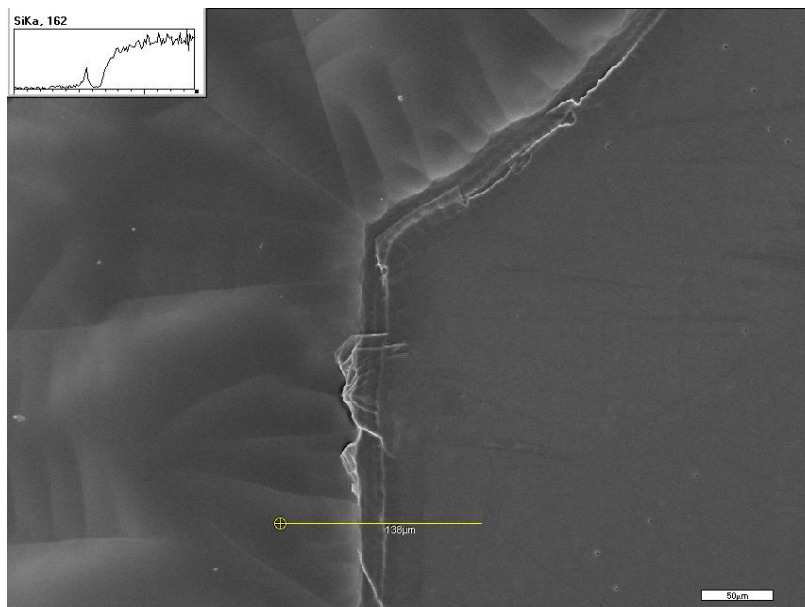


**Εικόνα Π.Α.4:** SEI του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 15x.

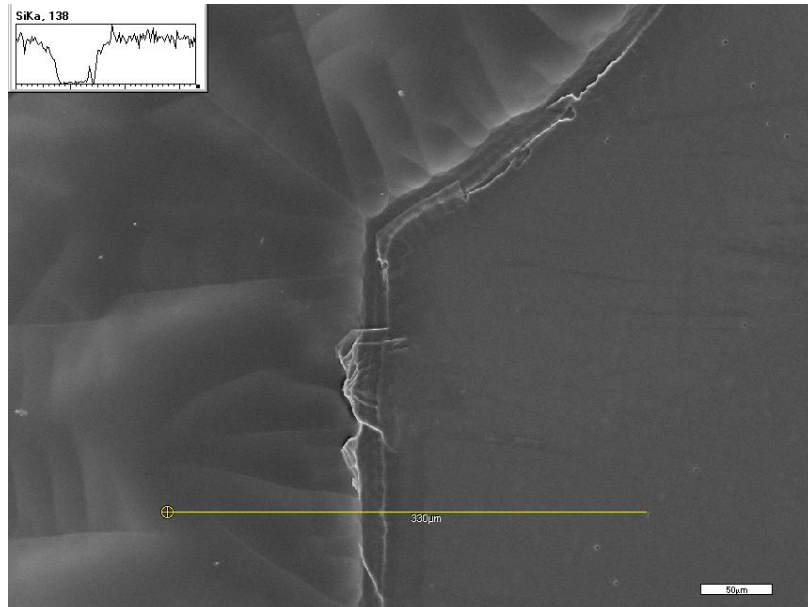


**Εικόνα Π.Α.5:** SEI του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 65x.

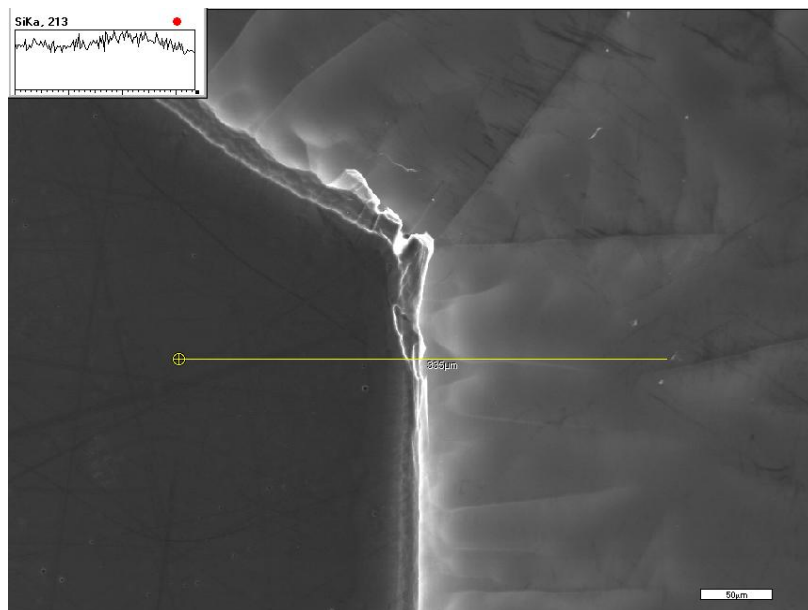
Με τη μέθοδο Line Scan μετράμε τη ποσότητα του πυριτίου που έχει το δείγμα μας κατά μήκος της ευθείας που έχουμε χαράξει.



**Εικόνα Π.Α.6:** Τοπογραφική αποτύπωση και SEI από την αριστερή πλευρά ενός τετραγωνικού κελιού του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 200x και με χρήση της μεθόδου Line Scan.

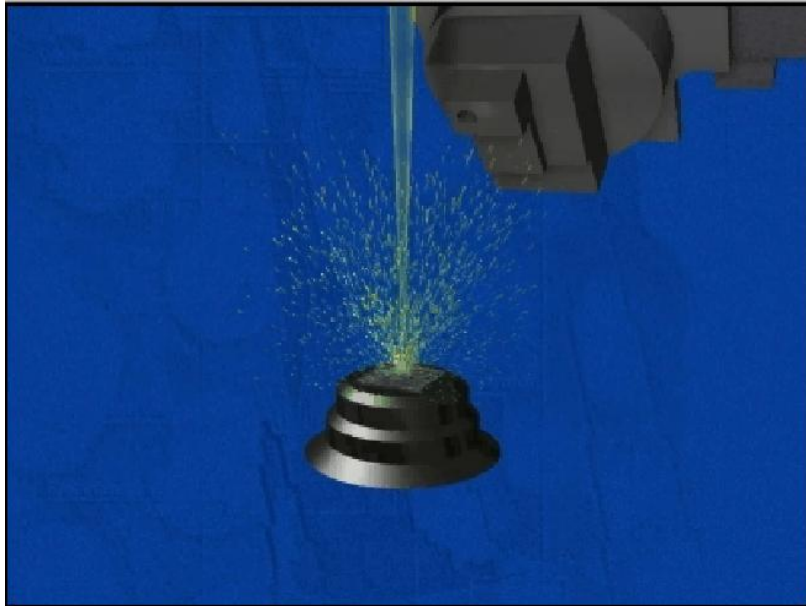


**Εικόνα Π.Α.7:** Τοπογραφική αποτύπωση και SEI από την αριστερή πλευρά ενός τετραγωνικού κελιού του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 200x και με χρήση της μεθόδου Line Scan σε μεγαλύτερη επιφάνεια.

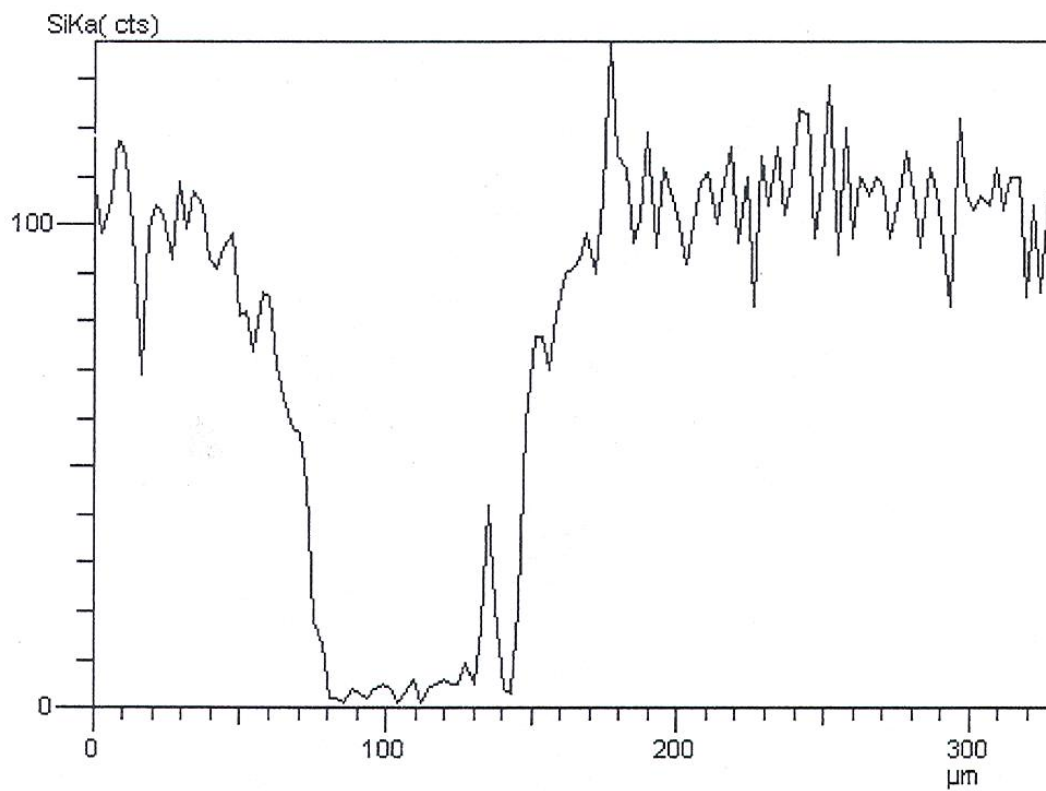


**Εικόνα Π.Α.8:** Τοπογραφική αποτύπωση και SEI από τη δεξιά πλευρά ενός τετραγωνικού κελιού του δικτύου πόρων με μεγέθυνση 200x και με χρήση της μεθόδου Line Scan.





**Εικόνα Π.Α.9:** Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του SEM.



**Σχήμα Π.Α.2:** Διάγραμμα μήκους με συγκέντρωση πυριτίου



Με τη γραμμική ανάλυση (Line Scan) γίνεται ανίχνευση του στοιχείου πυριτίου κατά μήκος της τομής και δίνει τη δυνατότητα ποσοτικής απεικόνισης του στοιχείου αυτού. Από τις εικόνες Π.Α.8, Π.Α.9, Π.Α.10 και το σχήμα Π.Α.1 διαπιστώνουμε ότι στην αριστερή πλευρά του τετραγωνικού κελιού εμφανίζονται υψηλότερες μετρήσεις πυριτίου, διότι ο detector βρίσκεται δεξιά του δείγματος και στην ευθεία που γίνεται η μέτρηση αρχικά η καταγραφή είναι μηδενική (χαμηλό ανάγλυφο) και μετά αυξάνεται (αύξηση ανάγλυφου) και στη δεξιά πλευρά του το σήμα του πυριτίου είναι σταθερό διότι η ευθεία που γίνεται η καταγραφή είναι χαμηλότερη.

Ο υπολογισμός του βάθους χάραξης του δοκιμίου γίνεται από το σχήμα 5 και ισούται με 180μm.

Συμπερασματικά, ο υπολογισμός του πορώδους στο δίκτυο πόρων που χρησιμοποιήθηκε θεωρείται αρκετά ακριβής εφόσον κατά τη σύγκριση των τιμών δεν παρατηρήθηκε μεγάλη απόκλιση.

*ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β*

## 1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα πειράματα μονοφασικής ροής του νερού έγιναν ακολουθώντας την εξής διαδικασία: αρχικά το γυάλινο δοκίμιο πόρων γεμίζει με απιονισμένο νερό προσέχοντας να μην υπάρχει εγκλωβισμένος αέρας με τη μορφή φυσαλίδων. Έπειτα με χρήση μιας αντλίας συριγγών πραγματοποιείται μονοφασική ροή νερού σε διάφορες παροχές. Κατά τη διάρκεια της εκτόπισης λαμβάνονται μετρήσεις διαφοράς πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του δοκιμίου με ένα διαφορικό μετρητή πίεσης. Οι μετρήσεις διαφοράς πίεσης λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (6sec) και καταγράφονται με τη βοήθεια ενός υπολογιστή. Ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη μόνιμης κατάστασης εξαρτάται από την παροχή του νερού που εισέρχεται στο δοκίμιο. Όταν οι μέσες τιμές των πιέσεων σταθεροποιηθούν μέσα σε ένα μικρό φάσμα τιμών, θεωρείται πως πλέον έχει επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση. Ως πτώση πίεσης της κάθε φάσης, λαμβάνεται η χρονομέση τιμή του αντίστοιχου συνεχούς σήματος που καταγράφεται στον υπολογιστή. Πρέπει να σημειωθεί πως ακόμη και σε μόνιμη κατάσταση οι τιμές παρουσιάζουν μια θορυβώδη συμπεριφορά (χαοτική) γύρω από μια αντίστοιχη μέση τιμή. Ωστόσο, οι τιμές είναι επαναλήψιμες και συνεπώς αξιόπιστες.

Το πείραμα επαναλήφθηκε δύο φορές και η επαναληψιμότητα ήταν άριστη σε όλες τις περιπτώσεις. Ακόμη, τα φαινόμενα ροής τόσο στην κλίμακα των πόρων όσο και στη μακροσκοπική κλίμακα είναι πάντα τα ίδια κάτω από τις ίδιες συνθήκες ροής.



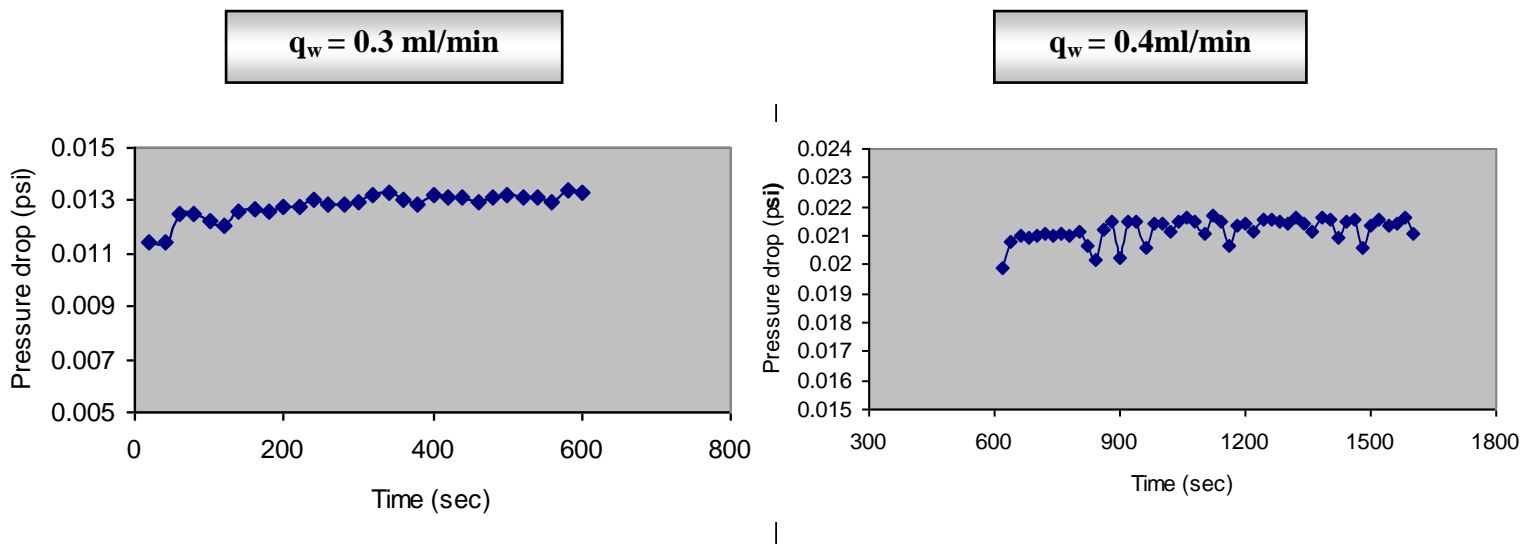
**Εικόνα Π.Β.1:** Πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή πειραμάτων ροής σε γυάλινα δοκίμια.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΝΕΡΟΥ- ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για τον υπολογισμό της διαπερατότητας του πορώδους δοκιμίου έγιναν πειράματα μονοφασικής ροής (νερού), με τις παρακάτω παροχές νερού:

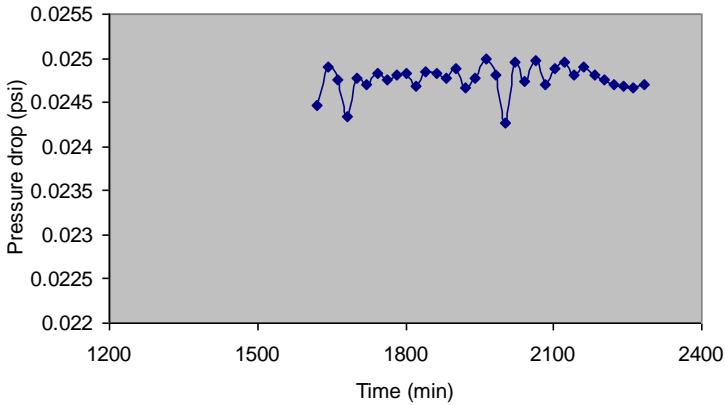
- 1)  $q_w = 0.3$  ml/min
- 2)  $q_w = 0.4$  ml/min
- 3)  $q_w = 0.5$  ml/min
- 4)  $q_w = 0.6$  ml/min

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ελήφθησαν μετρήσεις της διαφοράς πίεσης στη μόνιμη κατάσταση κατά μήκος του δοκιμίου και κατασκευάστηκε για κάθε πείραμα ένα διάγραμμα της μεταβολής της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου τα οποία και παρατίθενται:

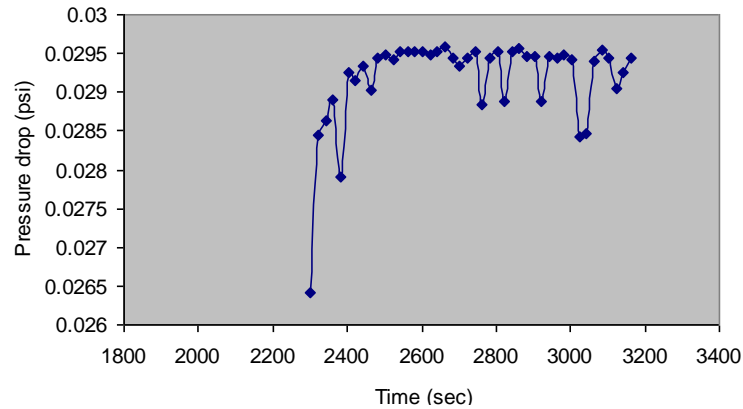


Σχήμα Π.Β.1: Διαγράμματα μεταβολής της πίεσης με το χρόνο σε διαφορετικές παροχές.

$q_w = 0.5 \text{ ml/min}$



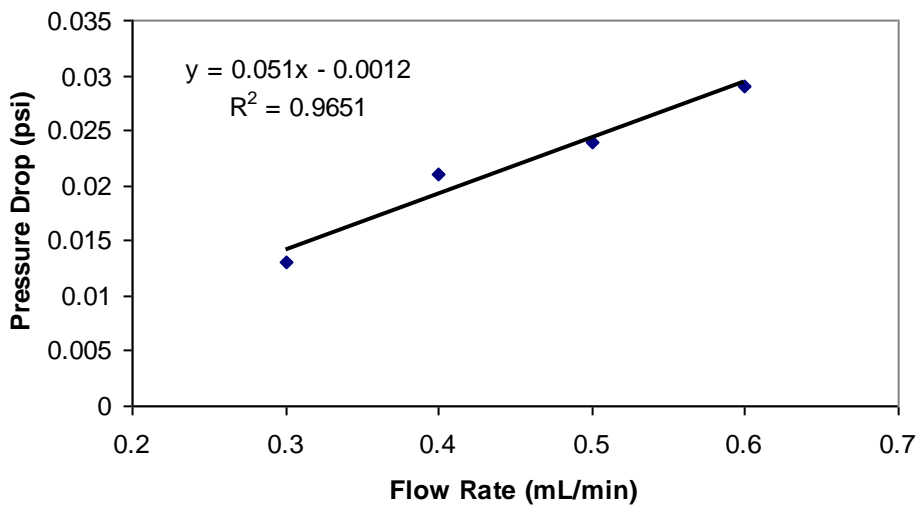
$q_w = 0.6 \text{ ml/min}$



Σχήμα Π.Β.2: Διαγράμματα μεταβολής της πίεσης με το χρόνο σε διαφορετικές παροχές.

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως στη μόνιμη κατάσταση η πτώση πίεσης κυμαίνεται μέσα σε ένα μικρό φάσμα τιμών και πως με αύξηση της παροχής του νερού λαμβάνονται όλο και πιο μεγάλες τιμές μεταβολής πίεσης.

Για τον υπολογισμό της διαπερατότητας αρχικά υπολογίστηκε η μέση τιμή για τη μεταβολή της πίεσης στη μόνιμη κατάσταση για κάθε πείραμα και οι τιμές αυτές αναπαραστάθηκαν σε ένα διάγραμμα σαν συνάρτηση της αντίστοιχης παροχής. Το διάγραμμα που κατασκευάστηκε φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα Π.Β.3: Διάγραμμα συσχέτισης της πίεσης σε συνάρτηση με τη παροχή σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης.

Παράμετροι Δοκιμίου			
Μήκος, l (m)	Πλάτος, b (m)	Βάθος, d (m)	Επιφάνεια, A (m)
0.1	0.05	$195 \times 10^{-6}$	$975 \times 10^{-8}$

Η κλίση της ευθείας που σχηματίζεται στο προηγούμενο διάγραμμα μας δίνει τη διαπερατότητα με βάση το νόμο του Darcy:

$$q = -\frac{K}{\mu} \cdot A \cdot \frac{\Delta P}{l}$$

Το δυναμικό ιξώδες του νερού στους 25°C είναι  $0.890 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ .

Για την μετατροπή των μονάδων είναι χρήσιμα τα εξής:

$$1 \text{ psi} = 6894.75 \text{ Pa}$$

$$\frac{\text{psi}}{\text{mL}/\text{min}} = 4.14 \times 10^{11} \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Κλίση ευθείας} = \frac{\Delta P}{q} = \frac{\mu \cdot l}{K \cdot A} = 0.051 \cdot 4.14 \cdot 10^{11} \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} = 0.21114 \cdot 10^{11} \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \Rightarrow$$

$$\eta \text{ απόλυτη διαπερατότητα του δοκιμίου θα είναι: } K = \frac{\mu \cdot l}{\text{κλίση} \cdot A} = 43.2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ ή}$$

43Da.

# *ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ*

# 1. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

```

close all;
clear all;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Obtain initial data
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

processpic=imread('DSC_0039.jpg'); %Read the image to process

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot the full image, the background image, and the subtracted image
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(1)
subplot(3,1,1)
imshow(processpic)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot the full image as red, blue, and green
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Y=zeros(964,1938);
figure(2)
subplot(3,1,1)
imshow(cat(3,processpic(:,:,1),Y,Y))
subplot(3,1,2)
imshow(cat(3,Y,processpic(:,:,2),Y))
subplot(3,1,3)
imshow(cat(3,Y,Y,processpic(:,:,3)))
pack;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Crop the subtracted image with matrix operations and separate RGB
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Split into RGB
Rsubpic=processpic(:,:,1);

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Obtain final data
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

conc=[7.0,6.0,5.0,4.0,3.0,2.0,1.0,0.5,0.2];
int=[80,88,97,104,113,126,141,145,151];
figure(3)
[p1,s,mu] = polyfit(int,conc,1);
concl = polyval(p1,int,s,mu);
plot(int,concl,'-',int,conc,'+')
legend('Fitted','Observed')
xlabel('Intensity');
ylabel('Concentration');
grid on
clear global imr;
clear global conc;
clear global result;
for k=1:964
    for l=1:1938
        cnew(k,l)=-0.09446*double(Rsubpic(k,l))+14.1574;
    end
end
%clear global Rsubpic;
fp = fopen('output.txt','w');
fprintf(fp,'y\tx\tcnew\r\n');
for i=1:10:964
    for j=1:10:1938
        fprintf(fp,'%7.4f\t%7.4f\t%5.4f\r\n',i*0.0052,j*0.0052,cnew(i,j));
    end
end
fclose(fp);

```

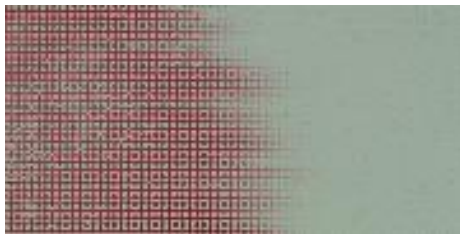


Figure 1

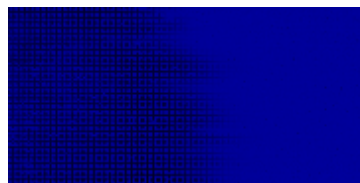
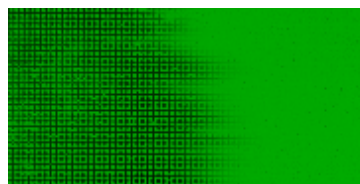


Figure 2

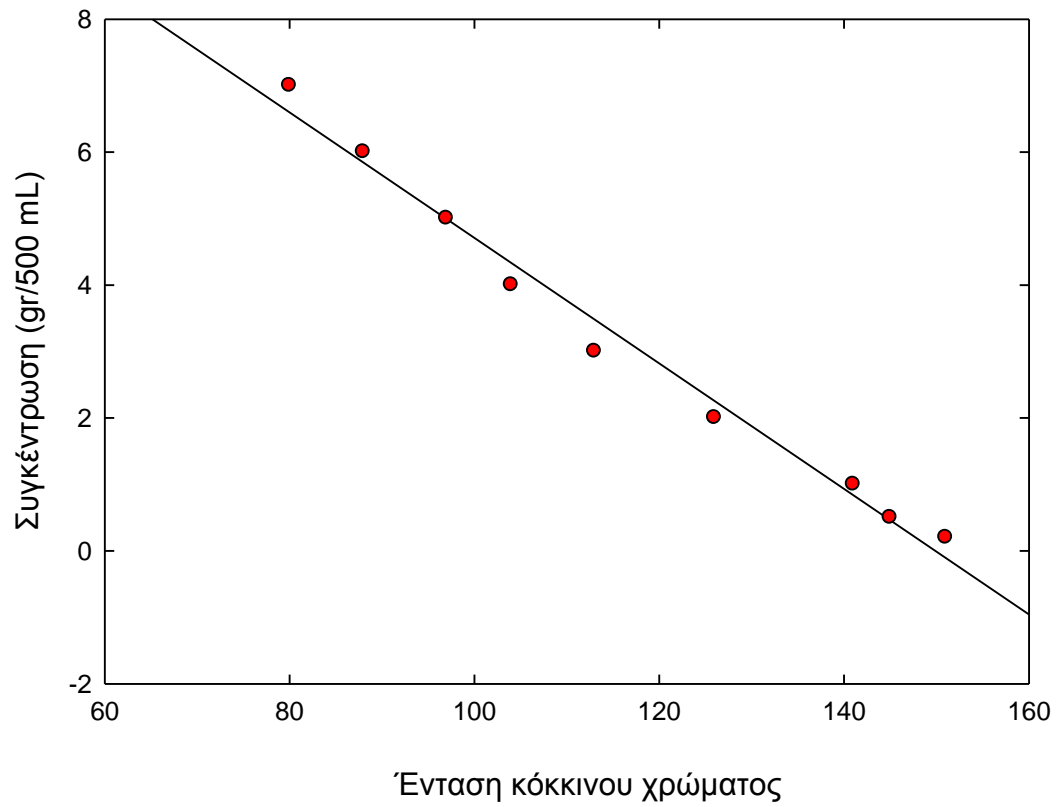
**Καμπύλη βαθμονόμησης**

Figure 3

## 2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ ΦΩΤΟΣ

```

close all;
clear all;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Obtain initial data
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

background=imread('DSC_0212.jpg'); %Read background image
processpic=imread('DSC_0184.jpg'); %Read the image to process
%Since these curves are scaled by mass injected it is crucial to have
%the entire curve.
subpic=imsubtract(processpic,background); %Subtract the background
%imtool(processpic) %open image tool to get bounding box for cropping

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot the full image, the background image, and the subtracted image
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(1)
subplot(3,1,1)
imshow(processpic)
subplot(3,1,2)
imshow(background)
subplot(3,1,3)
imshow(subpic)
clear global background;
clear global processpic;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plot the full image as red, blue, and green
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Y=zeros(1005,2032);
figure(2)
subplot(3,1,1)
imshow(cat(3,processpic(:, :, 1), Y, Y))
subplot(3,1,2)
imshow(cat(3, Y, processpic(:, :, 2), Y))
subplot(3,1,3)
imshow(cat(3, Y, Y, processpic(:, :, 3)))
pack;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Crop the subtracted image with matrix operations and separate RGB
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Split into RGB
Gsubpic=subpic(:,:,2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Obtain final data
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

conc=[0.1,0.05,0.005];
int=[217,150,20];
figure(3)
[p1,s,mu] = polyfit(int,conc,1);
concl = polyval(p1,int,s,mu);
plot(int,concl,'-',int,conc,'+')
legend('Fitted','Observed')
xlabel('Intensity');
ylabel('Concentration');
grid on
clear global imr;
clear global conc;
clear global result;
for k=1:1005
    for l=1:2032
        cnew(k,l)=0.000464*double(Gsubpic(k,l))-0.00815;
    end
end
%clear global Rsubpic;
fp = fopen('output.txt','w');
fprintf(fp,'y\tx\tcnew\r\n');
for i=1:10:1005
    for j=1:10:2032
        fprintf(fp,'%7.4f\t%7.4f\t%5.4f\r\n',i*0.0050,j*0.0049,cnew(i,j));
    end
end
fclose(fp);
```

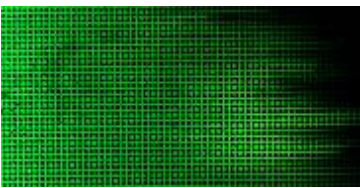
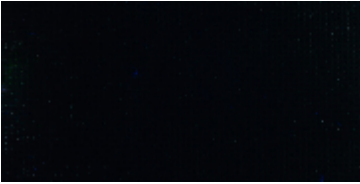


Figure 1

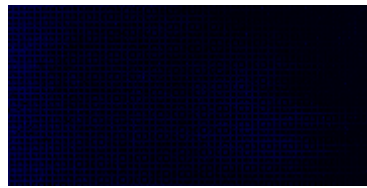
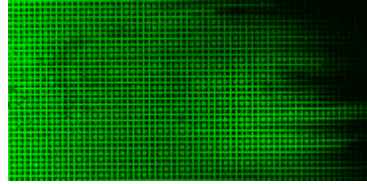
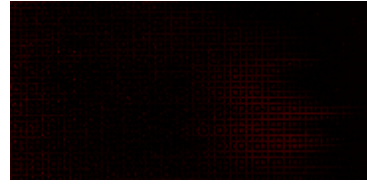


Figure 2

### Καμπύλη βαθμονόμησης

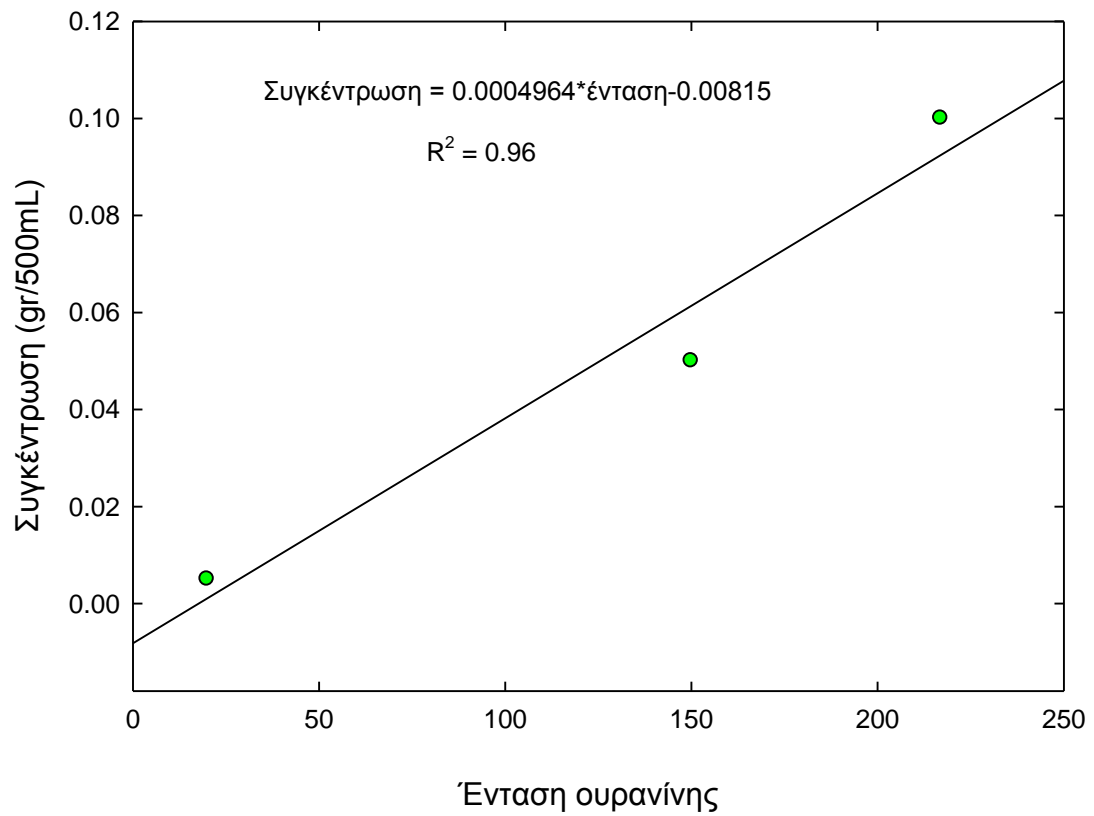


Figure 3