



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών**

**Τομέας II: Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης  
Διεργασιών και Συστημάτων**

**Υδραυλικά Χαρακτηριστικά και Κλιμάκωση Μεγέθους  
Περιοδικού Αναερόβιου Αντιδραστήρα με Ανακλαστήρες  
(PABR)**



**Γεώργιος Σεϊντής**

**ΑΜ: 05108083**

**Επιβλέπων καθηγητής: Γεράσιμος Λυμπεράτος**

Τριμελής επιτροπή:

**Βλυσίδης Απόστολος**

**Λυμπεράτος Γεράσιμος**

**Παπαθανασίου Αθανάσιος**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	9
Abstract .....	10
1 Εισαγωγή .....	11
1.1 Σκοπός .....	11
1.2 Αναερόβια χώνευση .....	12
1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση.....	13
1.3.1 <i>pH</i> .....	13
1.3.2 <i>Θερμοκρασία</i> .....	14
1.3.3 <i>Ιοντική ισχύς και αλμυρότητα</i> .....	14
1.3.4 <i>Θρεπτικά συστατικά</i> .....	14
1.3.5 <i>Τοξικές ουσίες</i> .....	14
1.4 Υδραυλικός χαρακτηρισμός συστημάτων .....	16
1.4.1 <i>Χρόνος Παραμονής</i> .....	16
1.4.2 <i>Κατανομή Χρόνου Παραμονής (KXII-RTD test)</i> .....	16
1.4.3 <i>Τύποι αντιδραστήρων αναερόβιας χώνευσης και υδραυλικά χαρακτηριστικά</i> .....	22
1.4.4 <i>Κλιμάκωση μεγέθους</i> .....	28
1.5 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) Προσομοίωση ροής με Comsol... .....	30
1.5.1 <i>Ιστορική Εξέλιξη της Μεθόδου</i> .....	30
1.5.2 <i>Γενική Περιγραφή της Μεθόδου</i> .....	30
1.5.3. <i>Εφαρμογή της Μεθόδου σε Προβλήματα Ρευστοδυναμικής</i> .....	31
1.5.4. <i>Το πρόγραμμα Comsol Multiphysics</i> .....	34
2. Μεθοδολογία .....	36
2.1 Διαδικασία εργαστηριακού πειράματος.....	36
2.1.1 <i>Ιχνηθέτης</i> .....	36
2.1.2 <i>Πειραματική διάταξη</i> .....	37
2.1.3 <i>Κύκλοι Πειραμάτων</i> .....	40
2.2 Πειράματα προσομοίωσης με Comsol .....	45
2.2.1 <i>Ορισμός της γεωμετρίας (Draw mode)</i> .....	45
2.2.2 <i>Ορισμός των φυσικών σχέσεων (Physics mode)</i> .....	53

2.2.3	<i>Δημιουργία πλέγματος (Mesh mode)</i> .....	59
2.2.4	<i>Μελέτη και Επίλυση (Study)</i> .....	62
3.	Αποτελέσματα-Συζήτηση .....	64
3.1	Κύκλοι Πειραμάτων .....	64
3.1.1	<i>Πειράματα χωρίς εναλλαγή τροφοδοσίας</i> .....	64
3.1.2	<i>Πειράματα με εναλλαγή τροφοδοσίας</i> .....	66
3.2	Επεξεργασία με λογισμικό Aquasim.....	69
3.3	Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	75
3.3.1	<i>Προσομοίωση Κατανομής Χρόνου Παραμονής</i> .....	75
4.	Συμπεράσματα- Προτάσεις για μελλοντική εργασία .....	84
	Προτάσεις για μελλοντική εργασία .....	85
5.	Βιβλιογραφία .....	86
	Ιστοσελίδες .....	90

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1:</b>	Επίδραση των ιόντων αμμωνίου/αμμωνίας στην αναερόβια χώνευση. ....	15
<b>Πίνακας 2:</b>	Δεδομένα για την καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 1-Πιλοτικός.....	41
<b>Πίνακας 3:</b>	Δεδομένα για την καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 1-Εργαστηριακός.....	42
<b>Πίνακας 4:</b>	Δεδομένα για την καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 2 Εργαστηριακός-Πιλοτικός. .. .....	44
<b>Πίνακας 5:</b>	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαστηριακού και πιλοτικού PABR. ....	46
<b>Πίνακας 6:</b>	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σωληνώσεων των αντιδραστήρων PABR.....	51
<b>Πίνακας 7:</b>	Υδραυλικός «νεκρός» χώρος για τους δυο κύκλους πειραμάτων. ....	68
<b>Πίνακας 8:</b>	Συγκριτικά στοιχεία για τους αντιδραστήρες με και χωρίς ανακλαστήρες.....	82

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<b>Διάγραμμα 1:</b>	Καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 1- Πιλοτικός. ....	41
<b>Διάγραμμα 2:</b>	Καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 1- Εργαστηριακός.....	43
<b>Διάγραμμα 3:</b>	Καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 2- Εργαστηριακός-Πιλοτικός. ....	45
<b>Διάγραμμα 4:</b>	Κατανομή F(t) -Πείραμα 1-Πιλοτικός χωρίς εναλλαγή. ....	65
<b>Διάγραμμα 5:</b>	Κατανομή F(t) -Πείραμα 1-Εργαστηριακός χωρίς εναλλαγή.....	65
<b>Διάγραμμα 6:</b>	Κατανομή F(t) -Πείραμα 2-Πιλοτικός με εναλλαγή. ....	66
<b>Διάγραμμα 7:</b>	Κατανομή F(t) -Πείραμα 2-Εργαστηριακός με εναλλαγή. ....	66
<b>Διάγραμμα 8:</b>	Πειραματική κατανομή χρόνου παραμονής χωρίς εναλλαγή σημείου εισόδου και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος Aquasim 2.0 με N=5 για τον PABR 15L.....	72
<b>Διάγραμμα 9:</b>	Πειραματική κατανομή χρόνου παραμονής χωρίς εναλλαγή σημείου εισόδου και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος Aquasim 2.0 με N=26 για τον PABR 80L.....	72
<b>Διάγραμμα 10:</b>	Πειραματική κατανομή χρόνου παραμονής με εναλλαγή του σημείου εισόδου και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος Aquasim 2.0 (a) με N=1 για τον PABR 15L.....	73
<b>Διάγραμμα 11:</b>	Πειραματική κατανομή χρόνου παραμονής με εναλλαγή του σημείου εισόδου και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος Aquasim 2.0 με N=2 για τον PABR 80L.....	74
<b>Διάγραμμα 12:</b>	Διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης στο σημείο εξόδου συναρτήσει του χρόνου για τους PABR 15 (a) και 80 L (b) όπως προέκυψαν από τη μοντελοποίηση με το πρόγραμμα COMSOL Multiphysics® Version 4.4.....	77
<b>Διάγραμμα 13:</b>	Διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης στο σημείο εξόδου συναρτήσει του χρόνου για τους PABR 15 (a) και 80 L (b) σε σχέση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος COMSOL Multiphysics® Version 4.4.....	78
<b>Διάγραμμα 14:</b>	Διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης στο σημείο εξόδου συναρτήσει του χρόνου για τους PABR 15 (a) και 80 L (b) με ανακλαστήρες σε σχέση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος COMSOL Multiphysics® Version 4.4. ....	81

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1:</b>	Διάσπαση της οργανικής ύλης κατά την Αναερόβια Χώνευση (Bioenergy International Magazine).....	12
<b>Σχήμα 2:</b>	Αναερόβιος χωνευτήρας πλήρους ανάμιξης.....	23
<b>Σχήμα 3:</b>	Ο αντιδραστήρας UASB και τα διάφορα μέρη του.....	24
<b>Σχήμα 4:</b>	Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και τρόπου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ABR. Στα αριστερά του σχήματος βρίσκεται το αρχικό σχέδιο του ABR αντιδραστήρα και στα δεξιά της εικόνας το πλέον σύνηθες σχέδιο.....	25
<b>Σχήμα 5:</b>	Δομή Περιοδικού Αναερόβιου Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (a) κάτοψη PABR, (b) πρόσοψη PABR. ....	27
<b>Σχήμα 6:</b>	Αριθμητικό μοντέλο για υπολογισμούς Ροής Ρευστών (Lewis et al., 2004).....	32
<b>Σχήμα 7:</b>	Τυπικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων-finite element mesh (edge-όριο πλέγματος, element-στοιχείο, node-κόμβος) (Lewis et al., 2004).....	33
<b>Σχήμα 8:</b>	Τυπικές γεωμετρίες πεπερασμένων στοιχείων (Σοφιανού, 2009). ....	33
<b>Σχήμα 9:</b>	Συντακτικός τύπος ιχνηθέτη Ponceau 4R (πηγή FAO) <sup>(1)</sup> .....	37
<b>Σχήμα 10:</b>	Γεωμετρία εσωτερικού κυλίνδρου εργαστηριακού PABR (Comsol).....	46
<b>Σχήμα 11:</b>	Γεωμετρία τοιχωμάτων ανακλαστήρα (Baffle) εργαστηριακού PABR. ....	47
<b>Σχήμα 12:</b>	Κατασκευή τοιχωμάτων ανακλαστήρων (Baffle) με εντολή Rotate.....	48
<b>Σχήμα 13:</b>	Κατασκευή τοιχωμάτων διαμερισμάτων (Wall) με εντολή Rotate.....	48
<b>Σχήμα 14:</b>	Κατασκευή ανακλαστήρων εργαστηριακού PABR με Χρήση Work Plane. ..	49
<b>Σχήμα 15:</b>	Κατασκευή ανακλαστήρων πιλοτικού PABR με Χρήση Work Plane. ....	49
<b>Σχήμα 16:</b>	Κατασκευή εξωτερικού κυλίνδρου εργαστηριακού PABR.....	50
<b>Σχήμα 17:</b>	Τελική γεωμετρία εργαστηριακού PABR. ....	52
<b>Σχήμα 18:</b>	Τελική γεωμετρία πιλοτικού PABR. ....	52
<b>Σχήμα 19:</b>	Ιδιότητες υλικού για το χώρο (domain) μελέτη.....	53
<b>Σχήμα 20:</b>	Ιδιότητες υλικού για τα όρια (boundaries) μελέτης.....	54
<b>Σχήμα 21:</b>	Εξίσωση και συνθήκες ροής για μόνιμες συνθήκες. ....	55
<b>Σχήμα 22:</b>	Πεδίο ιδιοτήτων ρευστού. ....	55
<b>Σχήμα 23:</b>	Συνθήκες στα όρια (boundaries) μελέτης.....	56
<b>Σχήμα 24:</b>	Πεδίο εισαγωγής συνθηκών εισόδου τροφοδοσίας.....	56

<b>Σχήμα 25:</b>	Πεδίο εισαγωγής συνθηκών εξόδου τροφοδοσίας. ....	57
<b>Σχήμα 26:</b>	Πεδίο μελέτης ΚΧΠ. ....	57
<b>Σχήμα 27:</b>	Συνθήκες μοντέλου συναγωγής και διάχυσης. ....	58
<b>Σχήμα 28:</b>	Πεδίο συνθηκών εισροής ιχνηθέτη.....	58
<b>Σχήμα 29:</b>	Πεδίο συνθηκών εκροής αντιδραστήρα. ....	59
<b>Σχήμα 30:</b>	Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων εργαστηριακού PABR. ....	60
<b>Σχήμα 31:</b>	Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πιλοτικού PABR. ....	60
<b>Σχήμα 32:</b>	Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων εργαστηριακού PABR με ανακλαστήρες. ....	61
<b>Σχήμα 33:</b>	Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πιλοτικού PABR με ανακλαστήρες. ....	61
<b>Σχήμα 34:</b>	Πεδίο μελέτης του πεδίου ροής για μόνιμη κατάσταση. ....	62
<b>Σχήμα 35:</b>	Πεδίο μελέτης κατανομής συγκέντρωσης με χρονική εξάρτηση. ....	63
<b>Σχήμα 36:</b>	Παράθυρα εργασιών στο περιβάλλον του AQUASIM 2.0. ....	70
<b>Σχήμα 37:</b>	Κατανομή συγκέντρωσης ιχνηθέτη μέσα στον PABR 15 L για (a) t=12h, (b) t=44h και (c) t=264h.....	75
<b>Σχήμα 38:</b>	Κατανομή συγκέντρωσης ιχνηθέτη μέσα στον PABR 80 L για (a) t=12h, (b) t=56h και (c) t=224h.....	76
<b>Σχήμα 39:</b>	Κατανομή συγκέντρωσης ιχνηθέτη μέσα στον PABR 15 L με ανακλαστήρες για (a) t=12h, (b) t=56h και (c) t=160h. ....	80
<b>Σχήμα 40:</b>	Κατανομή συγκέντρωσης ιχνηθέτη μέσα στον PABR 80 L με ανακλαστήρες για (a) t=12h, (b) t=54h και (c) t=184h. ....	80

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1:</b>	Κάτοψη εργαστηριακού PABR ενεργού όγκου 15 λίτρων. ....	38
<b>Εικόνα 2:</b>	Κάτοψη πιλοτικού PABR ενεργού όγκου 80 λίτρων. ....	38
<b>Εικόνα 3:</b>	Πειραματική διάταξη εργαστηριακού PABR.....	39
<b>Εικόνα 4:</b>	Πειραματική διάταξη πιλοτικού PABR.....	40

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή Γεράσιμου Λυμπεράτου, στον οποίο αποδίδω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση του θέματος, τις ανεκτίμητες συμβουλές του κατά τη διάρκεια των 15 αυτών μηνών, καθώς και για την εκπαιδευτική εμπειρία που μου προσέφερε μέσω της συμμετοχής μου σε εκπαιδευτικό σεμινάριο στην Πορτογαλία.

Επιπλέον, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επίκουρο καθηγητή Αθανάσιο Παπαθανασίου και τον καθηγητή Απόστολο Βλυσίδα για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή και για τις συμβουλές που μου προσέφεραν.

Ευχαριστώ επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα Χρήστο Λύτρα για την αμέριστη βοήθειά του, την τεχνική και επιστημονική υποστήριξη και τις κατευθύνσεις καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Μιχαλόπουλο για τη συνεργασία και τη βοήθεια που μου προσέφερε τόσο στο θεωρητικό, όσο και στο πειραματικό σκέλος της διπλωματικής εργασίας.

Από τις ευχαριστίες δεν θα μπορούσα να παραλείψω τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Πάσχο για τις χρήσιμες κατευθύνσεις όσον αφορά στο πείραμα προσομοίωσης με το πρόγραμμα Comsol Multiphysics.

Ευχαριστίες οφείλω και στους Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, Γιώργο Λύτρα, Γιώργο Μαλαβέτα και Δημήτρη Μαθιουδάκη για τη σημαντική συνεισφορά τους στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τη Νατάσα Χριστοπούλου για την τεχνική και ψυχολογική υποστήριξη και τη Δέσποινα Κούρτογλου, τον Γιάννη Ρούσσο, το Νίκο Παπαγεωργίου και το Βασίλη Χατζηχρήστο για την παρουσία τους σε όλη τη διάρκεια των εργαστηριακών πειραμάτων. Το τελευταίο και μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου για τη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



## Περίληψη

Ο Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (PABR) αποτελεί έναν ταχύρρυθμο αναερόβιο σύστημα που παρουσιάζει ευελιξία στη λειτουργία του. Σημαντική λειτουργική παράμετρο αποτελεί η συχνότητα εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης των υδραυλικών χαρακτηριστικών του PABR και η επίδραση της κλιμάκωσης μεγέθους σε αυτά τα χαρακτηριστικά μέσω πειραμάτων και μαθηματικής προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα Κατανομής Χρόνου Παραμονής (ΚΧΠ) σε βηματική μεταβολή στην τροφοδοσία (προσθήκη ιχνηθέτη χρωστικής ουσίας E124 γνωστής συγκέντρωσης) συναρτήσει της συχνότητας εναλλαγής για δύο αντιδραστήρες διαφορετικού μεγέθους. Χρησιμοποιήθηκαν ένας εργαστηριακός PABR ενεργού όγκου 15 λίτρων και ένας πιλοτικός PABR ενεργού όγκου 80 λίτρων. Πραγματοποιήθηκαν δυο κύκλοι πειραμάτων, όπου στον πρώτο μελετήθηκε η ροή χωρίς εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας και στο δεύτερο επιλέχθηκε περίοδος εναλλαγής  $T=2$  ημέρες. Και στους δυο κύκλους ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) παρέμεινε σταθερός και ίσος με  $(HRT)=4$  ημέρες. Ακολούθησε η μοντελοποίηση της ροής με την εύρεση του υδραυλικού «νεκρού» χώρου  $V_d$  % ο οποίος ήταν ίσος με 8,8 για τον εργαστηριακό και 7,5 για τον πιλοτικό στην περίπτωση της μη εναλλαγής, ενώ στην περίπτωση της εναλλαγής ήταν 66,1 και 20,8 αντίστοιχα. Στη συνέχεια έγινε χρήση του μοντέλου δοχείων σε σειρά μέσω του λογισμικού Aquasim 2.0, όπου προσδιορίστηκε ο ισοδύναμος αριθμός (N) αλληλουχίας αντιδραστήρων πλήρους ανάμειξης (CSTR). Στην περίπτωση των πειραμάτων χωρίς εναλλαγή ο αριθμός N CSTR σε σειρά για τον εργαστηριακό και πιλοτικό PABR υπολογίστηκε ότι ήταν  $N_{LAB}=5$  και  $N_{PILOT}=26$  αντίστοιχα, ενώ στην περίπτωση της εναλλαγής τροφοδοσίας οι αντίστοιχοι αριθμοί N ήταν  $N_{LAB}=1$  και  $N_{PILOT}=2$ . Αυτό σημαίνει ότι χωρίς εναλλαγή τροφοδοσίας ο πιλοτικός PABR λειτουργεί πρακτικά ως ABR, ενώ ο εργαστηριακός έχει μοτίβο ανάμειξης που βρίσκεται ανάμεσα στο μοντέλο ανάμειξης ενός CSTR και ενός Εμβολικής ροής (PFR). Στην περίπτωση της εναλλαγής οι δυο αντιδραστήρες λειτουργούν πρακτικά όπως ένας CSTR. Για την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ρεολογικής συμπεριφοράς των PABR, προσομοιώθηκε το πείραμα κατανομής χρόνου παραμονής χωρίς εναλλαγή του σημείου εισόδου για τους δύο αντιδραστήρες μέσω του προγράμματος COMSOL Multiphysics® Version 4.4. Τα αποτελέσματα προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κατανομή των πειραματικών δεδομένων και στις δύο περιπτώσεις. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση των ανακλαστήρων στη ρεολογική συμπεριφορά των αντιδραστήρων, η οποία φαίνεται να είναι πιο σημαντική όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του αντιδραστήρα.

## Abstract

PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor) is a highly rate anaerobic reactor whose function presents versatility under numerous operational conditions. A significant characteristic of the PABR constitute its flexibility regarding the switching frequency of the compartments' feed. In the present diploma thesis the outcomes of the studied hydraulic characteristics of the PABR are discussed, in parallel with the effect of scale up on those features. For the extraction of the abovementioned results both experimental and simulation methods were employed. Specifically, experiments of Residence Time Distribution (RTD) with step variation in compartments' feed (with addition of dye label named E124 of known concentration), against switching frequency for two reactors of different size were held. Initially, a lab-scale PABR reactor with effective volume of 15 liters was utilized, followed by a scaled up pilot one with effective volume of 80 liters. There were scheduled two experimental periods, where at the first one the flow without switching feed was studied and at the second one a two days switching period was selected. In both experimental periods the Hydraulic Retention Time (HRT) was kept fixed at four days. By modeling the flow with specific software the hydraulic "dead" space  $V_d\%$  was found, which was 8.8 for the lab reactor and 7.5 for the pilot one under no switching-feed conditions, whilst in the case of the 2-day switching period those values were estimated 66.1 and 20.8, respectively. Subsequently, the equal- sized ideal tanks-in-series model with the Aquasim 2.0 software was utilized, where number  $N$  of the Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR) was determined. Concerning the experiments with no switching-feed conditions, the number  $N$  of the CSTR in series for the lab and the pilot PABR was calculated with values 5 and 26, respectively, versus 1 and 2, in the case of the 2-day switching period. Consequently, in the absence of switching-feed conditions the pilot PABR functions practically as an Anaerobic Baffled Reactor, whereas the lab reactor presents a mixing pattern in-between the mixing model of a CSTR and a Plug Flow Reactor (PFR). Under switching-feed conditions the two reactors practically act both as a CSTR. In order to further investigate the special characteristics of the rheological performance of the PABR, simulations with COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> Version 4.4 software have been conducted, on the assumption of Retention Distribution Time without switching of the entrance' feed of the two reactors. The simulated curves approximate sufficiently the experimental one, in both reactors. The final stage of this thesis was focused on the baffles' impact at the rheological performance of the reactors, which seems to play a key role as the size of the reactor reduces.

# 1 Εισαγωγή

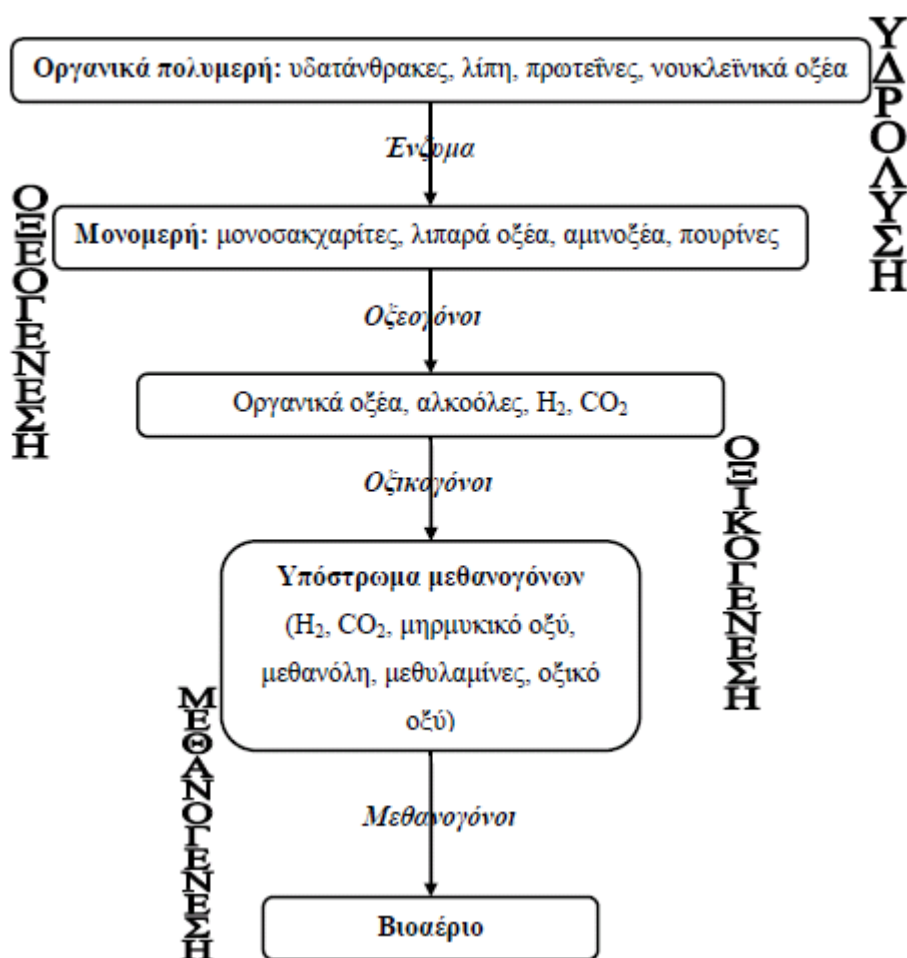
## 1.1 Σκοπός

Ο PABR είναι ένας καινοτόμος ταχύρρυθμος βιοαντιδραστήρας, σχεδιασμένος να λειτουργεί σε υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης. (Skiadas et al, 1998). Μοιάζει με έναν απλό αναερόβιο χωνευτήρα με ανακλαστήρες (Anaerobic Baffled Reactor, ABR) με τα διαμερίσματα τοποθετημένα κυκλικά. Η τροφοδοσία εισέρχεται στο βιοαντιδραστήρα διαμέσου των τεσσάρων διαμερισμάτων από τα οποία αποτελείται, διαδοχικά, έτσι ώστε το οργανικό φορτίο του αποβλήτου να "εκτίθεται" σε όλη την κατακρατούμενη βιομάζα του αντιδραστήρα. Αυτός ο τύπος λειτουργίας έχει το πλεονέκτημα ότι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί μπορούν να συγκρατηθούν ακόμη και στο πρώτο διαμέρισμα, ενώ αυτό δεν είναι δυνατό σε έναν απλό ABR, όπου μόνο τα οξυκογόνα βακτήρια υπερσχύουν στα πρώτα τμήματα του αντιδραστήρα κάτω από συνθήκες υψηλού ρυθμού οργανικής φόρτισης. Η βιομάζα είναι συγκεντρωμένη στο χαμηλότερο τμήμα του βιοαντιδραστήρα εξαιτίας του ότι δημιουργείται πυκνή βιομάζα και συσσωματώματα (granules) που συγκρατούνται λόγω της βαρύτητας, επιτρέποντας υψηλή ικανότητα απομάκρυνσης του ΧΑΟ (χημικά απαιτούμενου οξυγόνου). Συγχρόνως, όμως, δημιουργούνται ζητήματα στις συνθήκες καλής ανάμειξης λόγω ανομοιογενειών μεταξύ των διαμερισμάτων και αύξησης του «νεκρού» χώρου μέσα στον αντιδραστήρα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη των υδραυλικών χαρακτηριστικών του αντιδραστήρα PABR και των επιπτώσεων που επιφέρει στη ροή η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του. Η περίοδος εναλλαγής τροφοδοσίας, δηλαδή το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε το σημείο εισόδου της τροφοδοσίας να περάσει διαδοχικά από όλα τα διαμερίσματα του αντιδραστήρα, επιτρέπει ευελιξία στη λειτουργία του PABR. Ο PABR μπορεί να λειτουργήσει ως ένας απλός ABR, εάν η συχνότητα εναλλαγής τεθεί ίση με μηδέν, ενώ, στην περίπτωση υψηλής συχνότητας εναλλαγής, λειτουργεί ως ένας βιοαντιδραστήρας ανοδικής ροής ενός διαμερίσματος. Έχει δειχθεί ότι κάτω από υψηλούς ρυθμούς οργανικής φόρτισης, υψηλές συχνότητες λειτουργίας (ή ισοδύναμα χαμηλές τιμές της περιόδου λειτουργίας) οδηγούν σε υψηλότερη απόδοση (Σταματελάτου, 1999). Για την μελέτη των παραπάνω, εξετάστηκε η Κατανομή Χρόνου Παραμονής συναρτήσει της περιόδου εναλλαγής. Τέλος εξετάστηκαν οι αποκλίσεις που παρατηρούνται κατά την κλιμάκωση μεγέθους με στόχο την πρόβλεψη των προβλημάτων που δημιουργούνται κατά τη μελλοντική μετάβαση στη βιομηχανική κλίμακα.

## 1.2 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση, δηλαδή η αναερόβια μετατροπή οργανικών υποστρωμάτων σε μεθάνιο, αποτελεί μια πολύπλοκη βιοχημική διεργασία. Η αναερόβια χώνευση περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό μικροβιακών πληθυσμών, οι οποίοι συνδέονται μέσω των διάφορων υποστρωμάτων και των ιδιαίτερων προϊόντων τους. Η συνολική διεργασία μετατροπής, που παρουσιάζεται συνοπτικά στο **Σχήμα 1**, περιλαμβάνει άμεσες και έμμεσες συμβιωτικές σχέσεις μεταξύ διαφορετικών ομάδων μικροοργανισμών.



**Σχήμα 1:** Διάσπαση της οργανικής ύλης κατά την Αναερόβια Χώνευση (Κοψαχείλης, 2009).

Παρόλο που αυτές οι σχέσεις έχουν αποδοθεί με πολλούς τρόπους, η συνολική διεργασία μπορεί να αποδοθεί μέσα από εννέα (9) διακριτά βήματα, για κάθε ένα από τα οποία είναι υπεύθυνη συγκεκριμένη ομάδα μικροοργανισμών και των ενζυμικών βοηθημάτων τους. Τα βήματα αυτά έχουν ως εξής:

1) Ενζυμική υδρόλυση των οργανικών πολυμερών σε ενδιάμεσα οργανικά μονομερή, όπως σάκχαρα, λιπαρά οξέα και αμινοξέα

- 2) Ζύμωση των οργανικών μονομερών για τη παραγωγή υδρογόνου (ή μυρμηκικού οξέος), διτανθρακικού οξέος, πυροσταφυλικού οξέος, αλκοολών, και λιπαρών οξέων χαμηλού μοριακού βάρους (οξικού, βουτυρικού και προπιονικού)
- 3) Οξειδωση των ανηγμένων οργανικών προϊόντων σε υδρογόνο (ή μυρμηκικό οξύ), διτανθρακικό οξύ και οξικό οξύ μέσω των οξικογόνων βακτηριών που παράγουν υδρογόνο (obligate hydrogen-producing acetogens , OHPA)
- 4) Οξικογόνος αναπνοή του διτανθρακικού από ομοοξικούς μικροοργανισμούς (homocetogens,HA)
- 5) Οξειδωση των ανηγμένων οργανικών προϊόντων σε υδρογόνο (αλκοόλες, βουτυρικό και προπιονικό οξύ ) σε διτανθρακικό οξύ και οξικό οξύ μέσω των οξικογόνων βακτηριών που παράγουν υδρογόνο (obligate hydrogen-producing acetogens , OHPA)
- 6) Οξειδωση του οξικού οξέος προς διτανθρακικό οξύ από βακτήρια που ανάγουν νιτρικά ιόντα (nitrate-reducing bacteria, NRB) και από βακτήρια που ανάγουν θειικά ιόντα (sulfate-reducing bacteria, SRB)
- 7) Οξειδωση του υδρογόνου (ή του μυρμηκικού οξέος) από βακτήρια που ανάγουν νιτρικά ιόντα (nitrate-reducing bacteria, NRB) και από βακτήρια που ανάγουν θειικά ιόντα (sulfate-reducing bacteria, SRB)
- 8) Οξικοχρηστική ζύμωση μεθανίου
- 9) Μεθενογενής αναπνοή του διτανθρακικού οξέος.

### **1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση**

Η διεργασία της μεθανογένεσης μέσω αναερόβιας χώνευσης, εκτός από την ανάγκη για διαθέσιμο υπόστρωμα και τον κατάλληλο μικροβιακό πληθυσμό, επηρεάζεται και από τους βασικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως το pH, η θερμοκρασία, η ιοντική ισχύς ή αλατότητα, τα ιχνοστοιχεία, και από παράγοντες τοξικότητας ή παρεμποδιστικές ουσίες (Τσιμπερδώνης, 2014) Επίσης επηρεάζεται και από τις βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους του αντιδραστήρα στον οποίο πραγματοποιείται η διεργασία.

#### **1.3.1 pH**

Στις περισσότερες διεργασίες αναερόβιας χώνευσης, το βέλτιστο pH είναι το ουδέτερο, παρά το γεγονός ότι έχει αποδειχθεί ότι η μεθανογένεση πραγματοποιείται και σε αλκαλικά και όξινα περιβάλλοντα. Τυχόν αποκλείσεις από τη βέλτιστη τιμή, εάν δεν προκαλούνται από την εισροή του υποστρώματος, συνήθως είναι αποτέλεσμα της υπερβολικής παραγωγής οξικού οξέος ή της παραγωγής των βασικών προϊόντων της χώνευσης, όπως π.χ. τα οργανικά λιπαρά οξέα ή η αμμωνία.

### **1.3.2 Θερμοκρασία**

Όπως συμβαίνει με τις περισσότερες μικροβιακές διεργασίες, η μεθανογένεση εξαρτάται από τη θερμοκρασία, με τους ρυθμούς αντίδρασης γενικώς να αυξάνονται αυξανόμενης της θερμοκρασίας μέχρι του 60°C. Υπάρχουν δύο θερμοκρασιακές περιοχές βέλτιστης ανάπτυξης: Η μεσοφιλική (κοντά στους 35 °C) και η θερμοφιλική (55 με 60 °C) με μειωμένους ρυθμούς ανάπτυξης ανάμεσα στις δύο αυτές περιοχές βέλτιστου, κάτι που μπορεί να οφείλεται στην έλλειψη προσαρμογής σε αυτές τις συνθήκες.

### **1.3.3 Ιοντική ισχύς και αλμυρότητα**

Τα θεϊκά ιόντα παίζουν σημαντικό ρόλο στη βιωσιμότητα της μεθανογένεσης παρουσία ορισμένων υποστρωμάτων, κυρίως λόγω της ανταγωνιστικής σχέσης μεταξύ των βακτηρίων που ανάγουν τα θεϊκά ιόντα και των μεθανογόνων βακτηρίων. Η αλμυρότητα επηρεάζει τις ροές μεθανίου. Γενικότερα λαμβάνεται υπ' όψιν η ολική ιοντική ισχύς του διαλύματος, καθώς και άλλες ευδιάλυτες στο νερό χημικές ενώσεις που μπορούν να αποτελέσουν παρεμποδίστες στη διεργασία της μεθανογένεσης.

### **1.3.4 Θρεπτικά συστατικά**

Εκτός από τα απαραίτητα μακροθρεπτικά συστατικά (macronutrients) όπως ο άνθρακας και το άζωτο, είναι επίσης απαραίτητη η προσθήκη στο θρεπτικό μέσο συγκεκριμένων ιχνοστοιχείων (άζωτο, φώσφορος) για την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό των μικροοργανισμών, καθώς πολλοί από αυτούς δεν είναι σε θέση να συνθέσουν ορισμένες απαραίτητες βιταμίνες και αμινοξέα.

Επιπροσθέτως, άλλα ιχνοστοιχεία που είναι απαραίτητα για τις διάφορες συνθήκες της μεθανογένεσης είναι ο σίδηρος, το νικέλιο το μαγνήσιο, το ασβέστιο, το νάτριο, βάριο, το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο, σελήνιο και το κοβάλτιο.

### **1.3.5 Τοξικές ουσίες**

- **Πτητικά λιπαρά οξέα**

Η ύπαρξη τοξικών ουσιών ή η παρεμπόδιση των διεργασιών της μεθανογένεσης μπορεί να οφείλεται σε διάφορες περιστάσεις, όπως η δημιουργία ενδιάμεσων προϊόντων, όπως π.χ. πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs), η οποία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα δυσμενείς συνθήκες pH. Ενώ συνήθως η ανάπτυξη των μεθανογόνων μικροοργανισμών περιορίζεται από την υπερβολική συσσώρευση πτητικών οξέων, ειδικά του προπιονικού οξέως, έχει παρατηρηθεί πως η ξαφνική αύξηση της συγκέντρωσης είτε του βουτυρικού είτε του οξικού οξέος ενισχύει την διεργασία.

- **Αμμωνία**

Το αμμωνιακό άζωτο ( $\text{NH}_4+\text{N}^-$ ) ή τα ιόντα αμμωνίου ( $\text{NH}_4^+$ ), δύο ανηγμένες μορφές του αζώτου, εισάγονται μέσω της τροφοδοσίας στην αναερόβια ιλύ ή μπορούν να παραχθούν κατά τη διάρκεια της αναερόβιας αποικοδόμησης των αζωτούχων οργανικών ενώσεων όπως τα αμινοξέα και οι πρωτεΐνες. Η επιδράσεις που μπορεί να έχει το αμμωνιακό άζωτο/αμμωνία σε έναν αναερόβιο χώνευτήρα είναι θετικές και αρνητικές (**Πίνακας 1**).

**Πίνακας 1:** Επίδραση των ιόντων αμμωνίου/αμμωνίας στην αναερόβια χώνευση.

Ιόντα αμμωνίου ( $\text{NH}_4^+$ ) / Διαλυμένη αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ), N	Επίδραση
50-200mg/l	Ευεργετική
200-1000mg/l	Μη παρατηρούμενη
1000-3000mg/l	Παρεμποδιστική σε $\text{pH}>7$

- **Υδρόθειο**

Τα βακτηριακά κύτταρα χρειάζονται διαλυτό θείο ως θρεπτικό συστατικό και για να ικανοποιήσουν την ανάγκη αυτή χρησιμοποιούν διαλυτά ιόντα  $\text{HS}^-$ . Ωστόσο, οι υπερβολικές συγκεντρώσεις  $\text{HS}^-$  ή διαλυτού αέριου υδρόθειου ( $\text{H}_2\text{S}$ ) προκαλούν τοξικότητα. Το υδρόθειο είναι μία από τις πιο τοξικές ενώσεις για την αναερόβια χώνευση. Οι οξικογόνοι μικροοργανισμοί είναι αρκετά ευαίσθητοι στη παρουσία υδρόθειου. Τα μεθανογόνα βακτήρια είναι τα βακτήρια που είναι τα πιο επιρρεπή από την τοξικότητα του υδρόθειου. Τα μεθανογόνα βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο είναι ακόμα πιο ευαίσθητα στην τοξικότητα του υδρόθειου από τα αντίστοιχα οξικοχρηστικά.

- **Βαρέα Μέταλλα**

Πολυάριθμα βαρέα μέταλλα όπως το κοβάλτιο (Co), χαλκός (Cu), σίδηρος (Fe), νικέλιο (Ni), και ψευδαργύρος (Zn) βρίσκονται στα υγρά απόβλητα και στις λάσπες. Υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων στην ιλύ επηρεάζουν επιλογές της διάθεσης της ιλύος, επομένως και το κόστος.

- **Χρόνος Παραμονής**

Ο χρόνος παραμονής αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη πειραματική μελέτη της κατανομής του χρόνου παραμονής σε βιοαντιδραστήρα τύπου PABR και την επίδραση της κλιμάκωσης μεγέθους σε αυτήν.

## 1.4 Υδραυλικός χαρακτηρισμός συστημάτων

### 1.4.1 Χρόνος Παραμονής

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αναερόβια χώνευση είναι ο χρόνος παραμονής. Για να επιτευχθεί ικανοποιητική μετατροπή του σύνθετου οργανικού υποστρώματος σε  $\text{CH}_4$  και  $\text{CO}_2$ , ο πληθυσμός των βακτηριών στο χωνευτήρα θα πρέπει να είναι επαρκής σε ποσότητα και συγκέντρωση και επίσης ο χρόνος παραμονής να είναι επαρκής για το μεταβολισμό του υποστρώματος (Βλυσίδης, Λυμπεράτος, 2011).

Υπάρχουν δύο χρόνοι παραμονής σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα, ο χρόνος κατακράτησης στερεών (Solids Retention Time, SRT) και υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT). Ο SRT είναι ο μέσος χρόνος όπου τα βακτήρια (στερεά) βρίσκονται στον αναερόβιο χωνευτήρα και ο ορίζεται ως ο λόγος της μάζας των στερεών που περιέχονται στον αντιδραστήρα προς τη μάζα των στερεών που εξέρχονται ή/και καταναλώνονται από το σύστημα κάθε μέρα. Ο HRT είναι ο χρόνος που τα απόβλητα ή η λάσπη παραμένουν στον χωνευτήρα. Ως κύρια παράμετρος σχεδιασμού ενός αναερόβιου χωνευτήρα είναι ο SRT. Υψηλές τιμές SRT αυξάνουν την ικανότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, μειώνουν τον απαιτούμενο όγκο χώνευσης, αυξάνουν την ρυθμιστική ικανότητα του αντιδραστήρα, κάνοντας τον πιο ανθεκτικό στις απότομες αυξήσεις του οργανικού φορτίου της τροφοδοσίας και στη παρουσία τοξικών ενώσεων. Αναφορικά με τον HRT, από όλες τις λειτουργικές συνθήκες ενός αναερόβιου χωνευτήρα (θερμοκρασία, συγκέντρωση στερεών, και συγκέντρωση πτητικών στερεών της ιλύος τροφοδοσίας) είναι ίσως η σημαντικότερη λειτουργική κατάσταση που επηρεάζει τη μετατροπή των πτητικών στερεών σε αέρια προϊόντα.

### 1.4.2 Κατανομή Χρόνου Παραμονής (KXII-RTD test)

Ο σχεδιασμός ενός χημικού αντιδραστήρα βασίζεται στη γνώση αφ' ενός της χημικής αντίδρασης που θα γίνει, αφ' ετέρου του τρόπου με τον οποίο θα ρεύσουν τα διάφορα συστατικά μέσα σ' αυτόν. Ειδικότερα, μας ενδιαφέρει ο χρόνος, που θα παραμείνουν τα συστατικά μέσα στον αντιδραστήρα, συμμετέχοντας στην ή στις αντιδράσεις.

Στην ιδανική περίπτωση, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο αντιδραστήρας είναι:

- είτε *αυλωτός*, στον οποίο έχουμε συνθήκες *μετωπικής ροής* (plug flow): κάθε τμήμα του ρευστού εισέρχεται, παραμένει για δεδομένο χρονικό διάστημα στον αντιδραστήρα και εξέρχεται. Τέτοιοι είναι οι αυλωτοί αντιδραστήρες, που χρησιμοποιούνται συχνά με στερεά σωματίδια-καταλύτες ως πληρωτικό υλικό, ή για την ταχεία διέλευση ρευστού μέσα από θερμαινόμενη περιοχή, που ευνοεί κάποια αντίδραση.
- είτε *πλήρως αναμεμιγμένος*. Συνήθως είναι ένα αναδευόμενο δοχείο, στο οποίο επικρατούν ασυνεχείς (batch), ημι-συνεχείς (semi-batch) ή συνεχείς



(continuous) συνθήκες λειτουργίας. Στην πρώτη περίπτωση, ο αντιδραστήρας πληρούται με το ρευστό και αναδεύεται για όσο χρόνο απαιτείται από την αντίδραση. Στις άλλες περιπτώσεις, το ή τα ρευστά εισάγονται με κάποια συγκεκριμένη παροχή μέσα στον αντιδραστήρα, ενώ στη τελευταία περίπτωση το προϊόν απομακρύνεται και αυτό με σταθερή παροχή.

Στις δύο αυτές περιπτώσεις ιδανικής ροής, είναι σχετικά εύκολο να προσδιοριστεί ο μέσος χρόνος παραμονής του ρευστού και να γίνει όποιος υπολογισμός απαιτείται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και απόδοσης του αντιδραστήρα.

Στην πραγματικότητα, όμως, οι περισσότεροι αντιδραστήρες παρουσιάζουν λόγω κατασκευής αποκλίσεις από τους ιδανικούς τύπους ροής. Εμφανίζονται "νεκρές" περιοχές, όπου το ρευστό παραμένει παγιδευμένο ή περιοχές, τις οποίες "παρακάμπτει" το ρευστό εξαιρετικά γρήγορα (bypass), χωρίς να διέρχεται μέσα από όλον τον χώρο του αντιδραστήρα.

Συχνά, η ροή μέσα σε αυτούς μπορεί να προσομοιωθεί από κάποιο μοντέλο, που να αποτελεί κατάλληλο συνδυασμό των δύο ιδανικών τύπων. Η σύγκριση της θεωρητικής πρόβλεψης με πειραματικά αποτελέσματα μέτρησης της κατανομής χρόνου παραμονής προσδιορίζει το καταλληλότερο μοντέλο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τις ανάγκες του σχεδιασμού (Μαύρος 2012).

#### **1.4.2.1 Θεωρία πειραμάτων κατανομής χρόνων παραμονής**

Για ένα σύστημα συνεχούς ροής  $F(t)$  ορίζεται το κλάσμα όγκου του υγρού στην έξοδο που έχει παραμείνει στο σύστημα για χρόνο μικρότερο από  $t$ . Για συστήματα σταθερής πυκνότητας το κλάσμα όγκου ισούται με το κλάσμα βάρους και τότε  $F(t)$  ορίζεται το κλάσμα βάρους της εκροής που έχει παραμείνει στο σύστημα για χρόνο μικρότερο από  $t$ . Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, η πιθανότητα ενός στοιχειώδους όγκου υγρού που εισήλθε στο σύστημα τη χρονική στιγμή  $t = 0$  να έχει εξέλθει από το σύστημα μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$  ισούται με  $F(t)$ . Η πιθανότητα αυτού του στοιχειώδους όγκου να παραμείνει στο σύστημα και μετά τη χρονική στιγμή  $t$  ισούται με  $[1 - F(t)]$ . Άρα για χρόνο  $t = 0$  είναι  $F(t) = 0$  και για χρόνο  $t = \infty$  είναι  $F(t) = 1$ .

Αφού λοιπόν  $F(t + dt)$  είναι το κλάσμα του υγρού με χρόνο παραμονής μικρότερο από  $t + dt$  και  $F(t)$  είναι το κλάσμα του υγρού με χρόνο παραμονής μικρότερο από  $t$ , είναι προφανές ότι το διαφορικό του  $F(t)$ ,  $dF(t)$  θα είναι το κλάσμα της εκροής με χρόνο παραμονής μεταξύ  $t$  και  $t + dt$ . Η συνάρτηση  $dF(t)$  είναι γνωστή ως συνάρτηση κατανομής χρόνων παραμονής. Από τους νόμους των πιθανοτήτων ο μέσος χρόνος παραμονής,  $t_{av}$ , ισούται με :

$$t_{av} = \int_{F(t)=0}^{F(t)=1} t \cdot dF(t)$$

ή

$$t_{av} = \int_{t=0}^{t=\infty} t \cdot \left(\frac{dF(t)}{dt}\right) dt$$

Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση κατανομής χρόνων παραμονής στο χαρακτηρισμό ενός συστήματος θα πρέπει να μπορούμε να την προσδιορίσουμε πειραματικά. Αυτό γίνεται συνήθως με την επιβολή βηματικής ή παλμικής μεταβολής της συγκέντρωσης ενός αδρανούς συστατικού (ιχνηθέτη) στην είσοδο του συστήματος και την καταγραφή της συγκέντρωσης του συστατικού αυτού στην έξοδο του συστήματος ως συνάρτηση του χρόνου.

Οι τύποι ιχνηθετών που επιλέγονται στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ουσίες οι οποίες δεν αντιδρούν με τα σωματίδια της λάσπης, ώστε να γίνεται ανάκτηση αυτών στην έξοδο του συστήματος. Συνήθως χρησιμοποιούνται διαλύματα αλάτων και μετράται η συγκέντρωση κάποιου από τα ιόντα του. Έτσι έχουν χρησιμοποιηθεί διάλυματα NaCl (Tomlinson and Chambers, 1979, Asraf-Snir and Gitis, 2011), όπου ο μετρούμενος ιχνηθέτης είναι τα ιόντα Cl<sup>-</sup>. Σε άλλες εργασίες χρησιμοποιήθηκε διάλυμα LiCl (Liu et al., 2007, Levenspiel, 1972, Grobicki and Stuckey, 1992) και ο μετρούμενος ιχνηθέτης είναι τα ιόντα Li<sup>+</sup>. Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις (Ji et al., 2012) έχει αναφερθεί η χρησιμοποίηση διαλύματος NaF με τον μετρούμενο ιχνηθέτη να είναι τα ιόντα Cl<sup>-</sup>. Αν μελετάται η ΚΧΠ σε αντιδραστήρα χωρίς διεργασία, δηλαδή αν ο αντιδραστήρας είναι αρχικά γεμάτος με νερό, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ιχνηθέτης χρωστική ουσία και να μετράται η συγκέντρωσή της στην έξοδο.

Κατά την βηματική μεταβολή η συγκέντρωση του αδρανούς συστατικού στο ρεύμα εισόδου μεταβάλλεται ακαριαία και παραμένει στη νέα συγκέντρωση για "άπειρο" χρόνο. Κατά την παλμική μεταβολή μια σχετικά μικρή ποσότητα του αδρανούς συστατικού εγχέεται ακαριαία στο ρεύμα της τροφοδοσίας. Η σχετική απόκριση γραμμικών συστημάτων σε παλμική μεταβολή εισόδου ισούται με την παράγωγο της σχετικής απόκρισης τους σε βηματική μεταβολή.

Για συστήματα που υπόκεινται σε βηματική μεταβολή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο ρεύμα εισόδου ισχύει ότι

$$F(t) = \frac{C(t) - C_{\pi}}{C_{\mu} - C_{\pi}}$$

όπου:

C(t) η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην εκροή τη χρονική στιγμή t

$C_\pi$  η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην τροφοδοσία πριν τη μεταβολή

$C_\mu$  η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην τροφοδοσία μετά τη μεταβολή

Ενώ για συστήματα που υπόκεινται σε παλμική μεταβολή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο ρεύμα εισόδου είναι:

$$F(t) = \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q \cdot dt}{\int_0^\infty C(t) \cdot Q \cdot dt} = \frac{\int_0^t C(t) \cdot Q \cdot dt}{m_T}$$

και με παραγωγή προκύπτει ότι

$$\frac{dF(t)}{dt} = \frac{C(t) \cdot Q}{\int_0^\infty C(t) \cdot Q \cdot dt} = \frac{C(t) \cdot Q}{m_T}$$

όπου:

$C(t)$  η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στην εκροή τη χρονική στιγμή  $t$

$m_T$  η συνολική μάζα του ιχνηθέτη που προστέθηκε στην είσοδο

$Q$  η συνολική ογκομετρική παροχή στο σύστημα

Ο συνδυασμός των εξισώσεων δίνει

$$t_{av} = \frac{\int_0^\infty t \cdot C(t) \cdot Q \cdot dt}{\int_0^\infty C(t) \cdot Q \cdot dt}$$

Από τη στατιστική γνωρίζουμε ότι για συνεχή κατανομή η διακύμανση (δηλαδή η διασπορά της κατανομής γύρω από τη μέση τιμή) ορίζεται ως:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^\infty (x - \mu)^2 \cdot f(x) \cdot dx}{\int_0^\infty f(x) \cdot dx}$$

όπου:

$\mu$  η μέση τιμή

$x$  η ανεξάρτητη μεταβλητή

$f(x)dx$  η συνάρτηση κατανομής

Για την περίπτωση της απόκρισης σε παλμική μεταβολή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στο ρεύμα εισόδου, η διακύμανση στο χρόνο είναι

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - t_{av})^2 \cdot \frac{dF(t)}{dt} \cdot dt}{\int_0^{\infty} \frac{dF(t)}{dt} \cdot dt} = \int_0^{\infty} t^2 \cdot \frac{dF(t)}{dt} \cdot dt - t_{av}^2$$

Ο συνδυασμός των εξισώσεων της  $dF(t)/dt$  με την εξίσωση της διακύμανσης σε περίπτωση παλμικής μεταβολής, δίνει

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 \cdot C(t) \cdot Q \cdot dt}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot Q \cdot dt} - t_{av}^2$$

Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται συχνά για την προσομοίωση πραγματικών συστημάτων είναι η συστοιχία ιδανικών CSTR στη σειρά. Το σύστημα που κάθε φορά εξετάζεται αντικαθίσταται από  $n$  ιδανικούς CSTR (όγκου  $V_{CSTR}$ ) στη σειρά, των οποίων ο ολικός όγκος είναι ίσος με αυτόν του συστήματος ( $V_R$ )

$$V_R = n \cdot V_{CSTR}$$

Έτσι, κάθε αντιδραστήρας μπορεί να προσομοιωθεί από μια συστοιχία  $n$  ιδανικών CSTR στη σειρά ίσου συνολικού όγκου, η οποία δίνει στην απόκριση με τον πραγματικό αντιδραστήρα την ίδια διαταραχή. Η απόκριση  $n$  ιδανικών CSTR στη σειρά σε βηματική ή παλμική διαταραχή δίνεται από τη σχέση

$$\frac{dF(t)}{dt} = n \cdot e^{-n\tau} \cdot \frac{1}{(n-1)!} \cdot (n \cdot \tau)^{n-1}$$

όπου

$$\tau = t/t_{av}$$

Η διακύμανση της παραπάνω έκφρασης είναι

$$\sigma_\tau^2 = \int_0^{\infty} (\tau - 1)^2 \cdot \frac{n^{n+1}}{n!} \cdot e^{-n \cdot \tau} \cdot \tau^{n-1} \cdot d\tau = \frac{1}{n}$$

άρα

$$\sigma_t^2 = \frac{t_{av}^2}{n}$$

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί ο «νεκρός» χώρος του αντιδραστήρα. Από φυσική άποψη, ο νεκρός χώρος μπορεί να χωριστεί στις κατηγορίες του βιολογικού «νεκρού» χώρου και του υδραυλικού «νεκρού» χώρου (Young and Young, 1988). Ο βιολογικός «νεκρός» χώρος είναι ο όγκος που καταλαμβάνεται από την βιομάζα, μαζί με το «νεκρό» χώρο που προκαλούνται από την παρεμβολή των σωματιδίων βιομάζας στο μοτίβο ροής (δηλαδή η στάσιμη στρώση υγρού γύρω από τα σωματίδια).

Για τον αντιδραστήρα τύπου ABR έχει παρατηρηθεί (Grobicki and Stuckey, 1992) η ανάπτυξη «καναλιών» ροής μέσα στο στρώμα ενεργού ιλύος και στα τοιχώματα του αντιδραστήρα, όπου ένα μεγάλο ποσοστό της ροής διέρχεται μέσω αυτών των καναλιών μέχρι να συμβεί κάποια διαταραχή στην αναδιάταξη της βιομάζας (όπως μια ξαφνική πτώση ή αύξηση στο ρυθμό ροής). Σε χαμηλούς χρόνους παραμονής (κάτω από 20 h), η ταχεία δημιουργία φυσαλίδων αερίου και ο μεγαλύτερος βαθμός ρευστοποίησης των συσσωματώσεων της βιομάζας αποτρέπει, σε μεγάλο βαθμό, το σχηματισμό των καναλιών μέσα στην κλίνη. Ως εκ τούτου, είναι αναμενόμενη η σύνδεση του βιολογικού «νεκρού» χώρου με το φαινόμενο δημιουργίας καναλιών ροής, και η τάση του να μειώνεται με τη μείωση του Υδραυλικού Χρόνου Παραμονής (HRT) και την αύξηση της παραγωγής αερίου

Ο Υδραυλικός «νεκρός» χώρος εμφανίζεται κοντά σε φράγματα ροής, όπως οι ανακλαστήρες και σε γωνίες, όπου σχηματίζονται στάσιμες δίνες. Αυτές οι δίνες ενεργούν αποτελεσματικά ως ταμιευτήρες, μέσα και έξω από τις οποίες ο ιχνηθέτης διαχέεται αργά. Στη καμπύλη της συγκέντρωσης C, αυτό εμφανίζεται ως μια ομαλή «ουρά». Όσο μεγαλύτερος είναι ο υδραυλικός «νεκρός» χώρος, τόσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή της «ουράς». Έχει αποδειχθεί ότι ο υδραυλικός «νεκρός» χώρος αυξάνει με την αύξηση του αριθμού Reynolds (Young and Young, 1988), οπότε είναι αναμενόμενο ότι το φαινόμενο αυτό θα γίνει πιο σημαντικό σε χαμηλούς HRT. Παρόλ' αυτά δεν έχει παρατηρηθεί μια στατιστικά σημαντική αύξηση του «νεκρού» χώρου, καθώς μειώνεται ο HRT, απλώς παρατηρείται μια μικρή αύξηση για χαμηλούς HRT.

Στα πειράματα ΚΧΠ της παρούσας διπλωματικής υπήρχε μόνο νερό μέσα στον αντιδραστήρα οπότε υπολογίστηκε μόνο ο υδραυλικός «νεκρός» χώρος  $V_d$  μέσω του τύπου

$$V_d = \left(1 - \frac{\bar{t}}{HRT}\right) * 100\%$$

όπου  
 $\bar{t} = t_{av}$

### **1.4.3 Τύποι αντιδραστήρων αναερόβιας χώνευσης και υδραυλικά χαρακτηριστικά**

Στην αναερόβια χώνευση σημαντικό ρόλο παίζει και η επιλογή του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης μπορούμε να τα χωρίσουμε σε δύο μεγάλες κατηγορίες: Στα συμβατικά συστήματα και στα ταχύρρυθμα συστήματα. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος πραγματοποιείται με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος, καθώς και του αποβλήτου.

Ένα αποδοτικό αναερόβιο σύστημα πρέπει να έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά (Lettinga, 1995)

- Υψηλή κατακράτηση της ενεργού βιομάζας στον αντιδραστήρα, κατά την διάρκεια της λειτουργίας του.
- Επαρκής επαφή μεταξύ της βιομάζας και του διαθέσιμου προς χώνευση απόβλητου.
- Υψηλούς ρυθμούς αντιδράσεων και απουσία περιορισμών από φαινόμενα μεταφοράς.
- Η βιομάζα του να προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά του αποβλήτου
- Επικράτηση ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών για όλα τα είδη των μικροοργανισμών, στις επιβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες.

Στην επιλογή του κατάλληλου συστήματος, σημαντικό ρόλο παίζουν ορισμένα τεχνικοοικονομικά κριτήρια (κόστος, μέγεθος, υλικά κατασκευής), καθώς και ο τύπος διάθεσης των αποβλήτων.

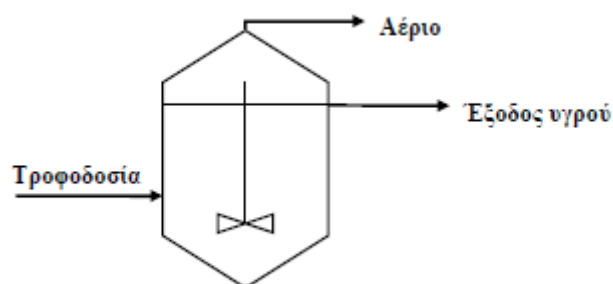
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι αντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται για αναερόβια χώνευση και τα βασικά τους υδραυλικά χαρακτηριστικά.

#### ***Αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)***

Η ιστορία εξέλιξης των αναερόβιων χωνευτήρων είναι στενά συνδεδεμένη με την προσπάθεια συσσώρευσης όσο το δυνατόν υψηλότερων συγκεντρώσεων ενεργούς αναερόβιας βακτηριακής μάζας μέσα στον χωνευτήρα, έτσι ώστε ο ρυθμός αποδόμησης των οργανικών υποστρωμάτων να μεγιστοποιηθεί και συνεπώς να ελαχιστοποιηθεί το κόστος εφαρμογής της αναερόβιας χώνευσης. Στόχος ήταν να σχεδιαστούν αντιδραστήρες όπου ο χρόνος παραμονής της βιομάζας να μην ελέγχεται από το χρόνο παραμονής του αποβλήτου. (Φεσά, 2011, Kleerebezem, 2003)

Χρονολογικά, αρχικά αναπτύχθηκαν αναερόβιες δεξαμενές πλήρους ανάδευσης οι οποίες μπορούν να επεξεργαστούν απόβλητα με υψηλές συγκεντρώσεις στερεών, αλλά απαιτούσαν μεγάλους χρόνους παραμονής, κα άρα δεν μπορούσαν να

χρησιμοποιηθούν σε απόβλητα με χαμηλό ρυπαντικό φορτίο (Φεσά, 2011, Kleerebezem, 2003, Lettinga et al., 1980 ).

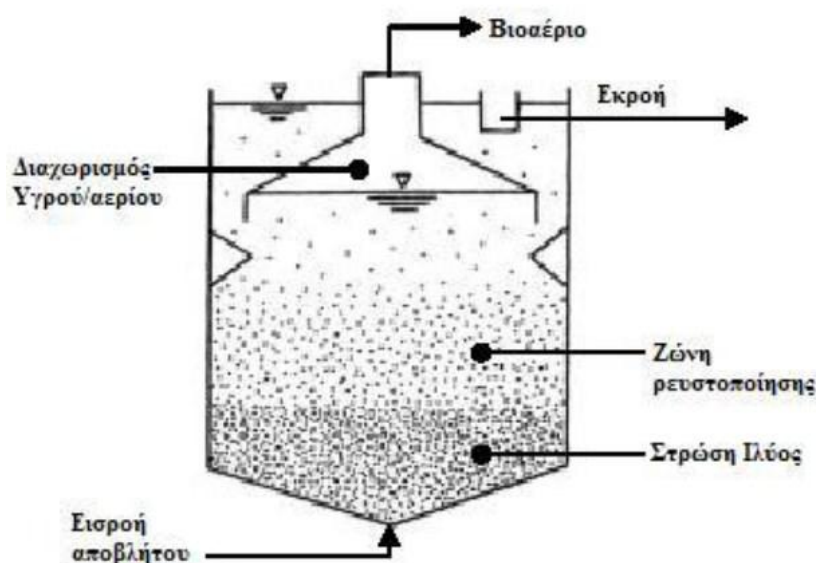


**Σχήμα 2:** Αναερόβιος χωνευτήρας πλήρους ανάμιξης.

Για να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής των στερεών ανεξάρτητα από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, οι πλήρους ανάδευσης αντιδραστήρες εξελίχθηκαν σε αντιδραστήρες πλήρους ανάδευσης με ανακυκλοφορία της λάσπης. Το κύριο πρόβλημα της εφαρμογής αυτής είναι ο δύσκολος διαχωρισμός της λάσπης από το επεξεργασμένο απόβλητο. Παρόλα αυτά παραμένει μια ικανοποιητική λύση για απόβλητα που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών ή/και λιπών. (Φεσά, 2011, Kleerebezem, 2003).

### ***Αντιδραστήρας ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, UASB)***

Στην δεκαετία του 1970, στην Ολλανδία, ο Lettinga και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν ένα ταχύρρυθμο αντιδραστήρα που ονομάζεται UASB. Ο αντιδραστήρας UASB είναι ένας αναερόβιος αντιδραστήρας που τροφοδοτείται από τον πυθμένα. Μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα μέρη (από τον πυθμένα προς την κορυφή): τη στρώση ιλύος, τη ζώνη ρευστοποίησης (fluidized zone), τον διαχωριστή υγρής/ αέριας απορροής και τη ζώνη κατακάθισης (**Σχήμα 3**). Στο διαμέρισμα της στρώσης ιλύος λαμβάνει χώρα το στάδιο της υδρόλυσης. Ο UASB είναι μακράν ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος ταχύρρυθμος αναερόβιος αντιδραστήρας για την επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών λυμάτων.



**Σχήμα 3:** Ο αντιδραστήρας UASB και τα διάφορα μέρη του.

Ο UASB αντιδραστήρας βασίζεται στο ότι η αναερόβια ιλύς έχει εγγενώς καλές ιδιότητες καθίζησης, εφόσον η ιλύς δεν έχει υποστεί υψηλή μηχανική ανάδευση. Η ίση κατανομή της ροής ιλύος και η επαρκώς υψηλή ταχύτητα ανόδου (up flow velocity) παρέχουν επαρκή ανάδευση στο σύστημα, σε συνδυασμό με την ανάδευση που προκαλεί η ανοδική πορεία του βιοαερίου που παράγεται. Η βιομάζα διατηρείται ως στρώση ιλύος ή ως μήτρα κροκίδων (granule matrix), και διατηρείται σε αιώρηση (suspension) με τον έλεγχο της ταχύτητας ανόδου.

Οι αντιδραστήρες UASB παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα (Hall, 1992, Κοψαχείλης, 2009):

- Λειτουργούν σε υψηλή συγκέντρωση βιομάζας και μεγάλους χρόνους παραμονής στερεών
- Ο σχεδιασμός τους είναι σχετικά απλός
- Δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για μεταφορά μάζας
- Απαιτείται μικρός όγκος χωνευτήρων
- Είναι εφικτή υψηλή απόδοση αφαίρεσης οργανικού φορτίου
- Παρουσιάζουν σταθερότητα σε διακυμάνσεις τροφοδοσίας, λόγω αυξημένης συγκέντρωσης βιομάζας
- Η έκλυση βιοαερίου εξασφαλίζει ομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα
- Ευνοείται ο σχηματισμός συμπαγών κόκκων βιομάζας.

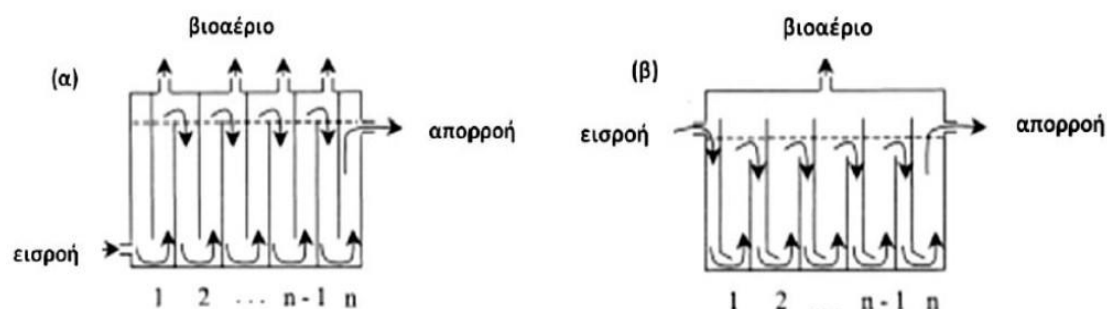


Τα μειονεκτήματα των UASB είναι τα εξής:

- Τα χαρακτηριστικά καθίζησης επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας
- Δεν είναι κατάλληλοι για απόβλητα με υψηλή συγκέντρωση στερεών
- Ο σχηματισμός συμπαγών κόκκων βιομάζας απαιτεί τον έλεγχο και τη ρύθμιση πολλών λειτουργικών παραμέτρων.

#### **Αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (Anaerobic Baffled Reactor, ABR)**

Ένας τύπος ταχύρυθμου αντιδραστήρα είναι ο αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (ABR), που αναπτύχθηκε από τον McCarty και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Stanford. Ο ABR αποτελεί μια σειρά αντιδραστήρων ανοδικής ροής διαμέσου στρώσεως ύλους (UASB), επειδή χωρίζεται σε πολλά διαμερίσματα (Σχήμα 4).



**Σχήμα 4:** Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και τρόπου λειτουργίας ενός αντιδραστήρα ABR. Στα αριστερά του σχήματος βρίσκεται το αρχικό σχέδιο του ABR αντιδραστήρα και στα δεξιά της εικόνας το πλέον σύνηθες σχέδιο.

Ένας τυπικός ABR αντιδραστήρας αποτελείται από μια σειρά από κατακόρυφους ανακλαστήρες που κατευθύνουν τα απόβλητα αρχικά προς τα κάτω και ύστερα πάνω από τους ανακλαστήρες αυτούς καθώς το απόβλητο κατευθύνεται από την είσοδο προς την απορροή. Η ροή αυτή του αποβλήτου (ανοδική και καθοδική) μειώνει την έκπλυση των βακτηρίων, γεγονός το οποίο επιτρέπει στον ABR να διατηρεί ενεργή βιολογική λάσπη χωρίς τη χρήση οποιωνδήποτε μέσων σταθεροποίησης (fixed media). Τα βακτήρια στο εσωτερικό του αντιδραστήρα έχουν την τάση να αυξάνονται και να καθιζάνουν, και ταυτόχρονα να παραγάγουν βιοαέριο σε κάθε διαμέρισμα, αλλά συνήθως κινούνται προς την έξοδο του αντιδραστήρα με ένα σχετικά αργό ρυθμό, με αποτέλεσμα ο αντιδραστήρας συχνά να παρουσιάζει SRT 100 ημέρες με HRT 20 ώρες. Η αργή οριζόντια κίνηση των αποβλήτων δίνει χρόνο στο απόβλητο να έρθει σε επαφή με την ενεργό βιομάζα καθώς αυτό διέρχεται μέσα από ABR αντιδραστήρες, οι οποίοι συνήθως παρουσιάζουν σύντομους υδραυλικούς χρόνους παραμονής (6-20 ώρες).

Ο ABR παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα (Hall, 1992, Κοψαχείλης, 2009):

- Χαρακτηρίζεται από απλό σχεδιασμό και φθηνή κατασκευή
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη κατασκευή για διαχωρισμό βιοαερίου-στερεών-υγρού
- Η εναλλασσόμενη ανοδική και καθοδική ροή ελαχιστοποιεί την έκπλυση της βιομάζας
- Μπορεί να λειτουργήσει για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να είναι απαραίτητη η αφαίρεση περίσσειας λάσπης
- Είναι σταθερός σε διαταραχές της οργανικής ή της υδραυλικής φόρτισης.

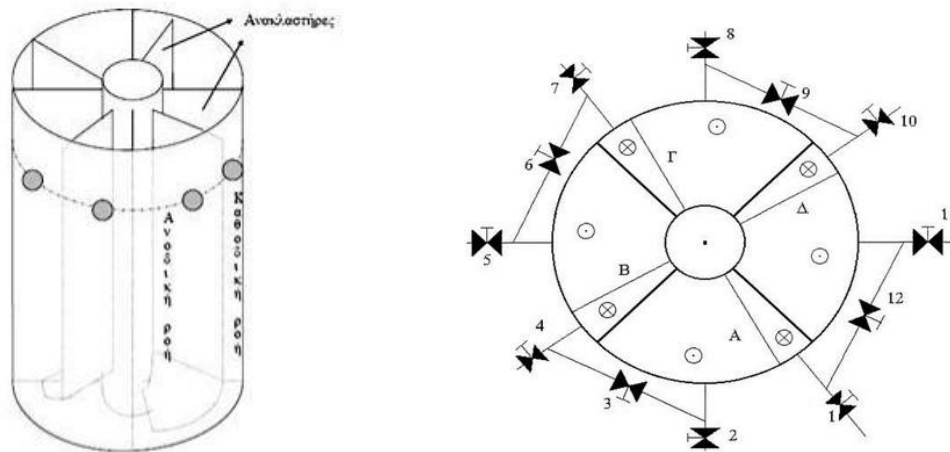
Τα μειονεκτήματα του ABR είναι:

- Είναι κατάλληλος μόνο για τη χώνευση αποβλήτων με μικρή συγκέντρωση στερεών
- Η κατακράτηση βιομάζας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά καθίζησης
- Ο χρόνος παραμονής των στερεών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής.

Ο αντιδραστήρας τύπου ABR στηρίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με τον αντιδραστήρα τύπου UASB, δηλαδή στην κατακράτηση της βιομάζας. Υπό προϋποθέσεις, ο ABR, θα μπορούσε να περιγραφεί από έναν αριθμό χωνευτήρων UASB σε σειρά (Σκιαδάς, 1998, Grobicki and Stuckey, 1992). Υδροδυναμικά ο UASB προσεγγίζει τον αντιδραστήρα συνεχούς λειτουργίας με ανάδευση τύπου CSTR, ενώ ο ABR με την προϋπόθεση ότι η παραγωγή βιοαερίου είναι έντονη (Σκιαδάς, 1998, Hall, 1985, 1992), μπορεί να προσομοιωθεί από έναν αριθμό CSTR στη σειρά ίσο με τον αριθμό των διαμερισμάτων του (Σκιαδάς, 1998, Bachmann et al., 1985, Grobicki and Stuckey, 1992). Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των διαμερισμάτων του, τόσο περισσότερο ο ABR προσεγγίζει τον αυλωτό αντιδραστήρα (PFR).

#### ***Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor)***

Ο αντιδραστήρας PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor) αναπτύχθηκε από τους Γεράσιμο Λυμπεράτο και Ιωάννη Σκιαδά στο Εργαστήριο Βιοχημικής Μηχανικής και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος (Παν/μο Πατρών, Τμ. Χημικών Μηχανικών). Είναι ένας ταχύρρυθμος, ευέλικτος αντιδραστήρας, ο οποίος μπορεί να επεξεργάζεται υψηλά οργανικά φορτία με μικρούς χρόνους παραμονής. Ο PABR αποτελείται από δύο (2) ομόκεντρα κυλινδρικά κομμάτια. Ο χώρος ανάμεσα στους δύο ομόκεντρους κυλίνδρους χωρίζεται σε τέσσερα (4) διαμερίσματα (compartments), έτσι ώστε η διάταξή του να μοιάζει με αυτή του ABR, μόνο που τα διαμερίσματα βρίσκονται σε κυκλική διάταξη, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5**.



**Σχήμα 5:** Δομή Περιοδικού Αναερόβιου Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (a) κάτοψη PABR, (b) πρόσοψη PABR.

Κάθε διαμέρισμα, όπως και στον αντιδραστήρα τύπου ABR, αποτελείται από δύο τμήματα: το τμήμα καθοδικής ροής (down flow section) και το τμήμα ανοδικής ροής (up flow section). Η τροφοδοσία εισέρχεται στο εκάστοτε διαμέρισμα μέσω μιας οπής στο πάνω μέρος του καθοδικού τμήματος, ανέρχεται στο ανοδικό τμήμα, εξέρχεται αυτού, και στη συνέχεια εισέρχεται στο επόμενο διαμέρισμα με τη βοήθεια εξωτερικών σωληνώσεων. Τέλος, εξέρχεται του αντιδραστήρα από το ανοδικό τμήμα του διαμερίσματος από όπου γίνεται η απορροή (effluent). Η ροή μεταξύ των διαμερισμάτων πραγματοποιείται σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Χαρακτηριστικό του αντιδραστήρα αυτού είναι η κυκλική εναλλαγή (αντίθετα από τη ροή) των διαμερισμάτων που τροφοδοτούνται. Η εναλλαγή αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια βανών (switching valves), οι οποίες είναι τοποθετημένες κατάλληλα στο σύστημα των εξωτερικών σωληνώσεων. Εκτρέποντας κατάλληλα τη ροή, οι βάνες ελέγχουν εάν το ρευστό που εξέρχεται από το τμήμα ανοδικής ροής ενός διαμερίσματος θα μεταφερθεί στο επόμενο διαμέρισμα ή θα αποτελέσει απορροή. Αντίστοιχα οι βάνες ελέγχουν εάν το καθοδικό μέρος ενός διαμερίσματος θα τροφοδοτηθεί με την απορροή του προηγούμενου ή από καινούργια τροφοδοσία.

Αναλυτικότερα (**Σχήμα 5**) όταν το διαμέρισμα που τροφοδοτείται είναι το Α (κάτω αριστερά), τότε το διαμέρισμα από το οποίο εξέρχεται η απορροή είναι το Δ, με τις βάνες 1, 3, 6, 9, 11, 12 να είναι ανοικτές και τις υπόλοιπες κλειστές. Ομοίως όταν στο διαμέρισμα Δ γίνεται η τροφοδοσία, η απορροή εξέρχεται από το διαμέρισμα Γ κ.ο.κ. Το διαμέρισμα τροφοδοσίας αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού σύμφωνα με μια περίοδο εναλλαγής  $T_{switch}$ , επομένως ανά ένα τέταρτο της περιόδου αυτής αλλάζει το τροφοδοτούμενο διαμέρισμα.

Η συχνότητα εναλλαγής της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα αποτελεί μία από τις κύριες παραμέτρους της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Στην ακραία περίπτωση όπου η συχνότητα εναλλαγής είναι μηδέν, ο αντιδραστήρας συμπεριφέρεται σαν αντιδραστήρας ABR, ενώ όταν η συχνότητα εναλλαγής τείνει στο άπειρο, η λειτουργία του αντιδραστήρα προσομοιάζει τη λειτουργία ενός αντιδραστήρα UASB.

Ρυθμίζοντας έτσι την συχνότητα εναλλαγής της τροφοδοσίας σε μία ενδιάμεση τιμή, ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε μια κατάσταση «ενδιάμεση» (“something between”) των δύο ακραίων καταστάσεων, γεγονός που του προσδίδει το πλεονέκτημα της ευελιξίας.

#### **1.4.4 Κλιμάκωση μεγέθους**

Η πειραματική μελέτη των προβλημάτων της Μηχανικής Ρευστών γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με τη χρησιμοποίηση κατασκευών εργαστηριακής ή ημιβιομηχανικής (πυλοτικής) κλίμακας οι οποίες προσομοιάζουν της πραγματικής κατασκευής. Η χρησιμοποιούμενη κατασκευή ονομάζεται μοντέλο (ή ομοίωμα) και η πραγματική κατασκευή πρότυπο (ή αρχέτυπο) (Παπαϊωάννου 2002).

Η αναγωγή των μεγεθών και γενικά η μεταφορά της γνώσης που αποκτιέται από την πειραματική έρευνα επί του μοντέλου στα αντίστοιχα μεγέθη και τη συμπεριφορά του προτύπου προϋποθέτουν την ύπαρξη ομοιότητας ανάμεσα στο μοντέλο και το πρότυπο. Διακρίνονται τρία είδη ομοιότητας, η γεωμετρική, η κινηματική και η δυναμική.

##### **Γεωμετρική Ομοιότητα**

Είναι η βασική και ίσως η πιο προφανής απαίτηση ομοιότητας. Για να υπάρχει γεωμετρική ομοιότητα μεταξύ μοντέλου και προτύπου πρέπει και τα δύο να έχουν το ίδιο σχήμα και όλες οι αντίστοιχες γραμμικές διαστάσεις τους να συνδέονται με τον ίδιο παράγοντα κλίμακας  $k_l$ :

$$k_l = \frac{l_\mu}{l_\pi}$$

Όταν υφίσταται γεωμετρική ομοιότητα, όλες οι αντίστοιχες γωνίες μοντέλου και προτύπου πρέπει να είναι ίσες. Όταν το μοντέλο και το πρότυπο είναι γεωμετρικά όμοια, ο λόγος αντίστοιχων επιφανειών τους είναι ίσος με το τετράγωνο του γεωμετρικού παράγοντα κλίμακας:

$$\frac{A_\mu}{A_\pi} = k_l^2$$

Και ο λόγος αντίστοιχων όγκων τους είναι ίσος με τον κύβο του  $k_l$ :

$$\frac{V_\mu}{V_\pi} = k_l^3$$

Γεωμετρικά σημεία του μοντέλου και του προτύπου τα οποία βρίσκονται στην ίδια σχετική θέση ονομάζονται ομόλογα σημεία

##### **Κινηματική Ομοιότητα**

Αναφέρεται στις ροές μοντέλου και προτύπου. Για να υπάρχει κινηματική ομοιότητα πρέπει οι ταχύτητες σε αντίστοιχα σημεία των δύο ροών να έχουν την ίδια διεύθυνση και τα μέτρα τους να συνδέονται με τον ίδιο παράγοντα κλίμακας,  $k_u$ :

$$k_u = \frac{u_\mu}{u_\pi}$$

Η κινηματική ομοιότητα απαιτεί ο προσανατολισμός της ροής σε σχέση με το αντικείμενο να είναι ο ίδιος. Αν δύο ροές είναι κινηματικά όμοιες, η διάταξη των ροϊκών γραμμών των αντίστοιχων πεδίων ροής σχετίζεται με ένα σταθερό παράγοντα κλίμακας. Αν ληφθεί υπόψη ότι οι ακραίες ροϊκές γραμμές διαμορφώνονται από τα όρια των στερεών σωμάτων με τα οποία το ρευστό έρχεται σε επαφή, συμπεραίνεται ότι όταν δύο ροές είναι κινηματικά όμοιες πρέπει να είναι και γεωμετρικά όμοιες (Παπαϊωάννου 2002).

### ***Δυναμική Ομοιότητα***

Είναι η πιο περιοριστική απαίτηση ομοιότητας και έχει να κάνει με την κατανομή των δυνάμεων στα πεδία ροής του μοντέλου και του προτύπου. Για να υπάρχει δυναμική ομοιότητα πρέπει όλα τα είδη των δυνάμεων που ενεργούν σε αντίστοιχα σημεία των δύο πεδίων ροής να είναι παράλληλες και τα μέτρα τους να συνδέονται παντού με τον ίδιο παράγοντα κλίμακας,  $k_F$ :

$$k_F = \frac{F_\mu}{F_\pi}$$

Η ύπαρξη δυναμικής ομοιότητας μεταξύ των ροών μοντέλου και προτύπου προϋποθέτει και την ύπαρξη τόσο γεωμετρικής όσο και κινηματικής ομοιότητας.

Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ΚΧΠ δεν πληρούσαν τα κριτήρια γεωμετρικής ομοιότητας. Ο πιλοτικός PABR σχεδιάστηκε με βάση την ανταπόκριση στα πρότυπα της μελλοντικής κατασκευής σε βιομηχανική κλίμακα. Για το λόγο αυτό διατηρήθηκε το ύψος του στα ίδια επίπεδα με τον εργαστηριακό. Επίσης αυξήθηκε η αναλογία ακτίνων των ομόκεντρων κυλίνδρων, ώστε το bath να μπει στο εσωτερικό του πιλοτικού σε σχέση με τον εργαστηριακό που βρισκόταν στο εξωτερικό.

## 1.5 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

### Προσομοίωση ροής με Comsol

#### 1.5.1 Ιστορική Εξέλιξη της Μεθόδου

Οι πρώτες αναφορές στη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, εντοπίζονται στον τομέα της μηχανικής των κατασκευών και την ανάλυσή τους (structural analysis). Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων διαδόθηκε στον κόσμο των μηχανικών χάρη στις δημοσιεύσεις των Αργύρη και Kelsey και θεμελιώθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1950 από τους Αργύρη, Turner και Clough (Lewis et al., 2004). Αργότερα το 1960 και το 1970 επεκτάθηκε σε προβλήματα Μεταφοράς Θερμότητας, ρευστών, προβλήματα ελαστικότητας αλλά και μη γραμμικά προβλήματα. Το 1980 αρχίζει να διαδίδεται και να χρησιμοποιείται ευρέως από τον Πανεπιστημιακό κόσμο, τους Μηχανικούς και πολλές επιχειρήσεις. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 η μέθοδος βρίσκει πεδία εφαρμογής σε πολύπλοκα προβλήματα Ρευστομηχανικής και Ηλεκτρομαγνητισμού (Σοφιανού,2009)

Σήμερα θεωρείται ως μία από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις στις επιστήμες του 20<sup>ού</sup> αιώνα και έχει καθολική εφαρμογή σε πληθώρα προβλημάτων της μηχανικής. Ορισμένοι από τους κλάδους εφαρμογής της είναι η ρευστομηχανική, η θερμοδυναμική, η ακουστική, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η εμβιομηχανική και η σεισμολογία <sup>(1)</sup>. Συνδυαστικά με την μείωση μάλιστα του κόστους των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την αύξηση της υπολογιστικής μνήμης και ισχύος, βρίσκει εφαρμογή στην πλειονότητα των προβλημάτων των Μηχανικών επικουρικά με άλλα προγράμματα (CAD, CAM).

#### 1.5.2 Γενική Περιγραφή της Μεθόδου

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία μέθοδος με την οποία ένα συνεχές σύστημα με άπειρους βαθμούς ελευθερίας προσεγγίζεται από ένα σύστημα στοιχείων με καθορισμένο αριθμό αγνώστων. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους σε *διακεκριμένα σημεία* (discrete points) (Lewis et al., 2004). Έτσι, τα πλέον πολύπλοκα προβλήματα φυσικής και μηχανικής μπορούν να προσεγγιστούν με συστήματα πεπερασμένου αριθμού εξισώσεων. Η μέθοδος προσεγγίζει την λύση με μία παραμετροποιημένη δοκιμαστική συνάρτηση. Αντικαθιστώντας στο πρόβλημα, επιλύονται οι προκύπτουσες εξισώσεις ελαχιστοποιώντας το ολοκλήρωμα του παραμένουστος σφάλματος ως προς τις παραμέτρους, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσέγγιση.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι επιτυγχάνεται καλύτερη συνολική προσέγγιση της λύσης, αφού ελαχιστοποιείται το ολοκληρωτικό σφάλμα. Πρακτικά η περιοχή ενδιαφέροντος με τη διαδικασία της **διακριτοποίησης** (discretization), διαιρείται σε μικρότερα πεπερασμένα στοιχεία και προσεγγίζεται λύση -με μικρού βαθμού πολυώνυμο-, σε κάθε ένα από αυτά. Από τότε που η μέθοδος αυτή επέτρεψε ένα είδος ελευθερίας στη σχηματοποίηση των στοιχείων ή των υποπεριοχών, είναι εφικτή μία

ακριβής αναπαράσταση των οριακών συνθηκών ακόμη και ενός πολύπλοκου πεδίου ορισμού (domain). Η πληθώρα των συστημάτων της επιστήμης των Μηχανικών θα μπορούσαν να απλοποιηθούν με την υποδιαίρεσή τους σε μικρότερα στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία μπορούν εύκολα να αναλυθούν από βασικές αρχές και με τον συνδυασμό όλων αυτών των αρχών, αναδομείται η ανάλυση του πλήρους αρχικού συστήματος. Τα συστήματα αυτά αναφέρονται ως discrete systems (διακριτά συστήματα) (Lewis et al., 2004). Στις περιπτώσεις όπου τα χαρακτηριστικά του προβλήματος μπορούν να επιλυθούν με αξιόπιστες απλοποιημένες εξισώσεις, το πρόβλημα μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας έναν πεπερασμένο αριθμό συνιστωσών.

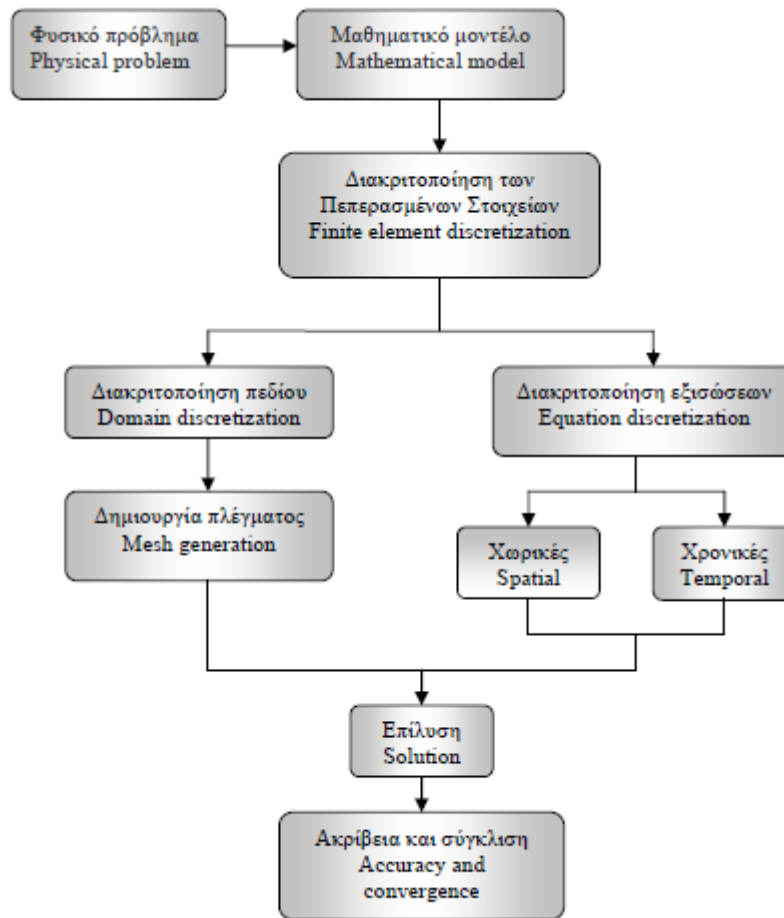
Τα βήματα που ακολουθούνται κατά την ανάλυση των διακριτών συστημάτων είναι τα ακόλουθα:

- Εξιδανίκευση του προβλήματος - Idealization of system, διαδικασία κατά την οποία το σύστημα θεωρείται ιδανικά ως ένα σύνολο από μεμονομένα στοιχεία.
- Χαρακτηριστικά των στοιχείων - Element characteristics, δηλαδή η διαδικασία της καταγραφής των θεμελιωδών χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου.
- Η συναρμολόγηση - Assembly, όπου ένα σύνολο ταυτόχρονων εξισώσεων διαμορφώνονται μέσω της συναρμολόγησης των χαρακτηριστικών των στοιχείων για τις άγνωστες μεταβλητές.
- Η επίλυση των εξισώσεων - Solution of equations, όπου οι εξισώσεις επιλύονται ταυτόχρονα με σκοπό να καθοριστούν όλες οι μεταβλητές (Lewis et al., 2004).

Η σημαντικότητα της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, έγκειται στο ότι βρίσκει εφαρμογή σε τέτοιες περιπτώσεις και σε συνδυασμό με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή έχει κατορθώσει την αριθμητική εξιδανίκευση και την επίλυση των συνεχών συστημάτων σε συστηματική βάση. Το γεγονός αυτό έχει πρακτική επίδραση και εφαρμογή τόσο σε κλασικές διαδικασίες όσο και σε πολύπλοκα προβλήματα της επιστήμης των Μηχανικών.

### ***1.5.3. Εφαρμογή της Μεθόδου σε Προβλήματα Ρευστοδυναμικής***

Παρά το γεγονός ότι αναφορικά με τα προβλήματα Ρευστοδυναμικής είναι διαθέσιμο ένα πλήθος αναλυτικών λύσεων, σε πρακτικό επίπεδο εξαιτίας της γεωμετρίας και των οριακών συνθηκών, τα προβλήματα γίνονται τόσο πολύπλοκα που η αναλυτική μέθοδος επίλυσής τους δεν ενδείκνυται. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα προβλήματα Ροής Ρευστών επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων. Ένα αριθμητικό μοντέλο για προβλήματα Ροής Ρευστών ξεκινά με την διατύπωση του φυσικού μοντέλου του προβλήματος (**Σχήμα 6**).



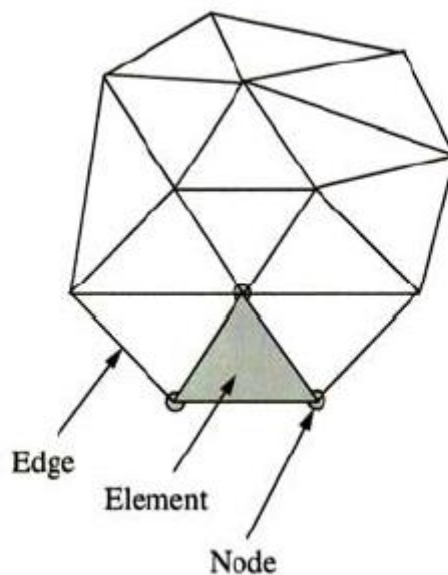
**Σχήμα 6:** Αριθμητικό μοντέλο για υπολογισμούς Ροής Ρευστών (Lewis et al., 2004).

Σύμφωνα με το διάγραμμα, το ένα μέρος του προβλήματος διεκπεραιώνεται με την διακριτοποίηση του πεδίου, ενώ το άλλο εκτελεί τη διακριτή διαδικασία προσέγγισης των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Τελικά με τον συνδυασμό των δύο προκύπτει η τελική λύση του προβλήματος.

Σε αντίθεση με μια αναλυτική επίλυση, η οποία επιτρέπει τον καθορισμό της ροής σε κάθε σημείο του ρευστού, μια αριθμητική λύση την καθιστά ικανή μόνο σε συγκεκριμένα σημεία (discrete points). Η απόρροια του γεγονότος αυτού είναι ότι σε κάθε αριθμητική ανάλυση πρέπει καταρχήν να καθορίζονται αυτά τα σημεία. Αυτό επιτυγχάνεται με τον διαχωρισμό της μελετώμενης περιοχής σε ένα πλήθος μικρότερων περιοχών. Τα σημεία αυτά ονομάζονται κομβικά σημεία (nodal points) και ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων τους πλέγμα (mesh or grid, **Σχήμα 7**). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κάθε σημείο αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περιοχή που το περιβάλλει, και τα χαρακτηριστικά ροής και ανάμειξής του είναι μια μέτρηση των μεγεθών αυτών που κατανέμεται στην περιοχή αυτή. Η ακρίβεια των υπολογισμών εξαρτάται κατά πολύ από τον αριθμό των καθορισμένων κομβικών σημείων, τα οποία ελέγχουν τον αριθμό των στοιχείων που δημιουργούνται. Η

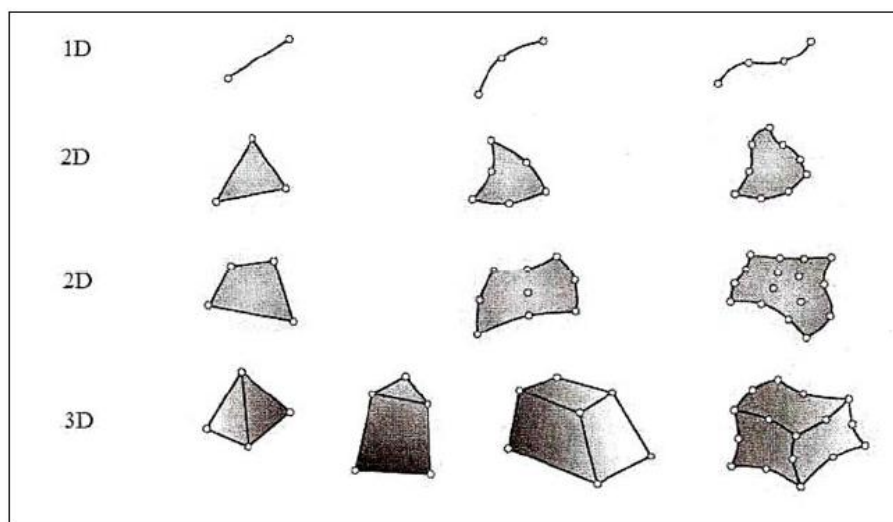


ακρίβεια προσεγγίζει μία ορθή τιμή όσο το μέγεθος του πλέγματος (mesh size) προσεγγίζει το μηδέν (Παπαλαζάρου, 2010).



**Σχήμα 7:** Τυπικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων-finite element mesh (edge-όριο πλέγματος, element-στοιχείο, node-κόμβος) (Lewis et al., 2004)

Στο **Σχήμα 8** παρουσιάζονται τυπικά γεωμετρικά σχήματα πεπερασμένων στοιχείων που κατηγοριοποιούνται με βάση τη χωρική διάσταση που μελετάται (μονοδιάστατη, διδιάστατη, τρισδιάστατη).



**Σχήμα 8:** Τυπικές γεωμετρίες πεπερασμένων στοιχείων (Σοφιανού, 2009).

#### 1.5.4. Το πρόγραμμα *Comsol Multiphysics*

Το Comsol Multiphysics <sup>[2]</sup> είναι ένα εμπορικό πρόγραμμα το οποίο βοηθά στην επίλυση προβλημάτων εφαρμοσμένης μηχανικής καθώς και την αριθμητική προσέγγιση λύσεων μαθηματικών εξισώσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Το περιβάλλον προσομοίωσης του Comsol Multiphysics δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης όλων των βημάτων που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη ενός μοντέλου. Καθορίζει τη γεωμετρία, ορίζει σταθερές και οριακές συνθήκες, διακριτοποιεί, καθώς και απεικονίζει γραφικά αποτελέσματα.

Παράλληλα έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί διάφορες μελέτες στο ίδιο μοντέλο. Για παράδειγμα έχει τη δυνατότητα να μελετήσει ένα μοντέλο ως προς το πεδίο ροής και ως προς το μοτίβο ανάμειξης, δημιουργώντας διάφορα επίπεδα (layers), τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους για την επίλυση προβλημάτων συνδυασμένων πεδίων (Τζεδάκη, 2011).

Το εργαλείο Comsol Multiphysics 4.4 παρέχει ένα πλήρες περιβάλλον που επιτρέπει τη διεξαγωγή όλων των βημάτων μιας διαδικασίας μοντελοποίησης. Το γραφικό περιβάλλον χρήσης περιέχει λειτουργίες για σχεδίαση των μοντέλων, την εισαγωγή εικόνων και σχεδίων, τον ορισμό των ιδιοτήτων και των εξισώσεων των υλικών, τη δημιουργία πλέγματος, την επίλυση του προβλήματος, και τέλος την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Παπαγιαννόπουλος, 2008). Η διαδικασία μοντελοποίησης αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- **Ορισμός της γεωμετρίας (Draw mode).** Γίνεται εισαγωγή της γεωμετρίας της υπό μελέτη κατασκευής είτε από σχεδιαστικά προγράμματα (Auto-CAD, Rhinoceros, Pro Engineer) είτε με απευθείας σχεδιασμό από το πρόγραμμα Comsol. Το τελικό σχέδιο συντίθεται μέσω συνδυασμού γεωμετρικών σχημάτων με εφαρμογή άλγεβρας Boole.
- **Ορισμός των φυσικών σχέσεων και παραμέτρων τόσο στο εσωτερικό του μοντέλου, όσο και στα όρια του (Physics mode).** Η γεωμετρία και τα στοιχεία που αυτή διαθέτει, δηλαδή σημεία, κορυφές, μονοδιάστατα και διδιάστατα όρια, χώροι, αποκτούν φυσικό νόημα ορίζοντας φυσικές παραμέτρους σε καθένα από αυτά. Μέσα σε αυτή τη διαδικασία περιλαμβάνεται και το πεδίο **Υλικά (Materials)**, όπου μέσα από μια μεγάλη βάση δεδομένων ορίζονται τα υλικά των επιφανειών και των χώρων.
- **Δημιουργία πλέγματος (Mesh mode).** Το μοντέλο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία και ετοιμάζεται το πλέγμα. Υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής διαφόρων τύπων έτοιμων πλεγμάτων με διαφορετική ποιότητα ή η κατασκευή αυτόνομου πλέγματος. Από αυτήν την διαδικασία γίνεται εύρεση των βαθμών ελευθερίας που υποδεικνύουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Στην περίπτωση πολύπλοκων προβλημάτων γίνεται επανασχεδιασμός του πλέγματος.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιεί το πλέγμα για να επανασχεδιάζεται είναι δύο. Η κανονικοποίηση του πλέγματος (mesh refinement) και η προσαρμογή του πλέγματος

(mesh adaption). Η πρώτη αποτελεί τεχνική γεωμετρικής φύσης και προσπαθεί να διατηρήσει το πλέγμα όσο το δυνατόν πιο κανονικό προκειμένου να αποφευχθούν οι παραμορφώσεις και οι συμπίεσεις. Στην κανονικοποίηση του πλέγματος απαιτείται ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των κόμβων του πλέγματος σε κάθε υπολογιστικό βήμα. Σε προβλήματα αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε ρευστό και στερεό, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις επιλύονται στους στερεούς κόμβους με αλγόριθμους Lagrange ενώ οι κόμβοι ρευστού θεωρούνται σταθεροί ή ανανεώσιμοι βάσει κάποιας διαδικασίας παρεμβολής.

Η προσαρμογή του πλέγματος έχει ως στόχο τον προσδιορισμό του βέλτιστου υπολογιστικού πλέγματος προκειμένου να επιτευχθεί συγκεκριμένη ακρίβεια λύσης. Στη διαδικασία αυτή ο αριθμός των κόμβων καθώς και η συνδεσιμότητα των στοιχείων παραμένουν σταθερά. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή στη ρευστομηχανική, επειδή λαμβάνει υπόψη της την κατεύθυνση κίνησης ενός ρευστού (Σέμπου, 2014).

- **Μελέτη και Επίλυση (Study).** Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα προς επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Εδώ επιλέγεται η εξέταση της διεργασίας ανάλογα με τη χρονική εξάρτηση. Υπάρχει η δυνατότητα μελέτης σε μόνιμη κατάσταση, χρονικά εξαρτώμενης, τριγωνομετρικής συνάρτησης, κ.λπ. Τέτοιου είδους προγράμματα που επιλύουν ονομάζονται solver και χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους για τις επιλύσεις.
- **Παρουσίαση και Επεξεργασία των αποτελεσμάτων (Post-processing mode-Results).** Γίνεται εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε διάφορες μορφές, όπως διαγράμματα, βίντεο, κατανομές των υπό μελέτη παραμέτρων στην κατασκευή, ώστε να μπορεί να γίνει επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων. Το πρόγραμμα που αναλαμβάνει αυτόν το ρόλο ονομάζεται post processor (μετεπεξεργαστής).

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1 Πειραματική Διαδικασία

Στα πειράματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος της βηματικής επιβολής ιχνηθέτη, δηλαδή απότομη αύξηση του σήματος εισόδου (συγκέντρωση) από μια τιμή σε μια μεγαλύτερη και διατήρηση της τιμής αυτής καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα γινόταν δειγματοληψία από την εκροή του αντιδραστήρα και καταγράφονταν η απορρόφησή του με χρήση φασματοφωτόμετρου.

Ως χρόνος ολοκλήρωσης της πειραματικής διαδικασίας ορίστηκαν οι τρεις Υδραυλικοί Χρόνοι Παραμονής (ΥΧΠ-HRT). Σε αυτόν το χρόνο αναμένεται, εμπειρικά, η συγκέντρωση εξόδου να έχει ξεπεράσει το 95% της συγκέντρωσης εισόδου, δηλαδή να έχει επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση. Για το συγκεκριμένο τύπο αντιδραστήρα επιλέχθηκε ως υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT)=4 d. Σύμφωνα με προηγούμενες προσομοιώσεις (Skiadas et al, 2000) και πειράματα (Stamatelatos et al, 2003, Liu et al, 2009) φαίνεται ότι εκεί ο PABR λειτουργεί επιτυχώς όσον αφορά την παραγωγικότητα του βιοαερίου (L βιοαερίου/ L αντιδραστήρα/ d) και τον Οργανικό Ρυθμό Φόρτισης (OLR).

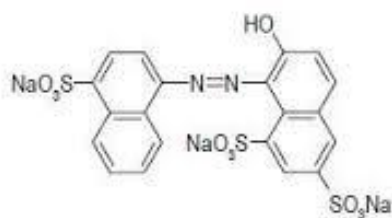
Για να εξεταστεί η επίδραση της περιόδου εναλλαγής της τροφοδοσίας (T) στα υδραυλικά χαρακτηριστικά του PABR διεξήχθησαν 2 κύκλοι πειραμάτων. Ο πρώτος περιλάμβανε πειράματα Κατανομής Χρόνου Παραμονής (ΚΧΠ-RTD) χωρίς εναλλαγή της εισόδου τροφοδοσίας και ο δεύτερος αφορούσε πειράματα RTD με εναλλαγή. Ως περίοδος εναλλαγής επιλέχθηκε T=2d για τους ίδιους λόγους που ορίστηκαν παραπάνω για την επιλογή του HRT. Επίσης εξετάστηκε η επίδραση της κλιμάκωσης μεγέθους στα υδραυλικά χαρακτηριστικά και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο αντιδραστήρες, ένας εργαστηριακός και ένας πιλοτικός.

#### 2.1.1 Ιχνηθέτης

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ως ιχνηθέτης η ουσία Ponceau 4R με χημική ονομασία (λατινικά)

*Trisodium-2-Hydroxy-1-(4-Sulfonato-1-Naphthylazo)-6,8-Naphthalenedisulfonate,*

χημικό τύπο  $C_{20}H_{11}N_2Na_3O_{10}S_3$  και συντακτικό τύπο όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα.



**Σχήμα 9:** Συντακτικός τύπος ιχνηθέτη Ponceau 4R (πηγή FAO) <sup>(3)</sup>

Πρόκειται για συνθετική, ερυθρή χρωστική ουσία που παρασκευάζεται σε μορφή σκόνης και χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στη ζαχαροπλαστική και στη βιομηχανία τροφίμων με την κωδική ονομασία E124. Έχει μοριακό βάρος 604,48 g/mol και συντελεστή διάχυσης στο νερό  $D_C = 4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη στην έξοδο του αντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε φωτομετρική ανάλυση με χρήση φορητού φασματοφωτόμετρου της εταιρείας HACH με κωδική ονομασία DR 2800<sup>TM</sup> <sup>(4)</sup>, αφού ο ιχνηθέτης είναι ερυθρού χρώματος και παρουσιάζει μέγιστη απορρόφηση στα 505-510nm. Για την εύρεση της εξάρτησης μεταξύ συγκέντρωσης και απορρόφησης κατασκευάστηκαν υδατικά διαλύματα του ιχνηθέτη, γνώστης συγκέντρωσης, και μετρήθηκε η απορρόφηση. Μέσω επεξεργασίας των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον Microsoft Office Excel 2007 κατασκευάστηκαν οι καμπύλες αναφοράς, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή των τιμών απορρόφησης των δειγμάτων σε τιμές συγκέντρωσης. Στη συνέχεια παρασκευάστηκε η τροφοδοσία υδατικού διαλύματος Ponceau 4R συγκέντρωσης 34 mg/L.

### 2.1.2 Πειραματική διάταξη

Χρησιμοποιήθηκαν δύο αντιδραστήρες PABR. Ο πρώτος ήταν ένας αντιδραστήρας PABR εργαστηριακής κλίμακας κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και ενεργού όγκου 15 λίτρων, ο οποίος έχει αναλογία ακτινών ομόκεντρων κυλίνδρων ίση με 1 προς 4,1. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1** αποτελείται από τις εξωτερικές σωληνώσεις και τέσσερις (4) συστοιχίες ηλεκτροβανών που ρυθμίζουν την εισερχόμενη τροφοδοσία του διαλύματος ιχνηθέτη και την εκροή του αντιδραστήρα.



**Εικόνα 1:** Κάτοψη εργαστηριακού PABR ενεργού όγκου 15 λίτρων.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένας πιλοτικός PABR κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και ενεργού όγκου 80 λίτρων ο οποίος περιλαμβάνει εσωτερικό υδατόλουτρο και αναλογία ακτινών ομόκεντρων κυλίνδρων ίση με 1 προς 1,952. Όσον αφορά την κλιμάκωση μεγέθους, πραγματοποιήθηκαν μετατροπές στο σχήμα του πιλοτικού αντιδραστήρα σε σχέση με αυτό του εργαστηριακού, ώστε να προσαρμοστεί ο τρόπος λειτουργίας του σε συνθήκες βιομηχανικής παραγωγής. Συγκεκριμένα διατηρήθηκε το ύψος του αντιδραστήρα στα ίδια επίπεδα με τον εργαστηριακό και σε αυτό οφείλεται η διαφορετική αναλογία ακτινών ομόκεντρων κυλίνδρων (**Εικόνα 2**).



**Εικόνα 2:** Κάτοψη πιλοτικού PABR ενεργού όγκου 80 λίτρων.

Οι αντιδραστήρες τροφοδοτούνταν από το δοχείο τροφοδοσίας του ιχνηθέτη που έχει όγκο 120 λίτρα. Στην περίπτωση της εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας, αυτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δικτύου σωληνώσεων που ήταν συνδεδεμένο

με τις τέσσερις (4) εισόδους τροφοδοσίας των αντιδραστήρων. Για την τροφοδοσία των αντιδραστήρων χρησιμοποιήθηκαν περισταλτικές αντλίες.

Η περισταλτική που χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδότηση του πιλοτικού PABR είναι ο τύπος PR1 της εταιρείας SEKO και έχει μέγιστη παροχή 1L/h. Η ρύθμιση της παροχής έγινε χειροκίνητα στα 0,83 L/h. Η βαθμονόμησή της περιλάμβανε την χρονομέτρηση της εκροής συγκεκριμένου όγκου (100 mL) από τον αντιδραστήρα. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων γινόταν τακτικός έλεγχος (ανά 6 ώρες) για την αξιοπιστία ως προς τη μέτρηση παροχής της αντλίας και δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις. Όσον αφορά την περισταλτική αντλία που χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδότηση του εργαστηριακού PABR, είναι η Masterflex της εταιρείας Cole-Palmer Instrument Company (CP), χρησιμοποιείται για μικρές παροχές και ρυθμίστηκε ηλεκτρονικά στα 2,6 mL/min ή 156 mL/h. Στις ακόλουθες Εικόνες φαίνονται οι πειραματικές διατάξεις των δυο αντιδραστήρων.



**Εικόνα 3:** Πειραματική διάταξη εργαστηριακού PABR όπου φαίνονται: 1. ο αντιδραστήρας, 2. οι συστοιχίες των ηλεκτροβανών, 3. το δοχείο τροφοδοσίας και 4. η περισταλτική αντλία.



**Εικόνα 4:** Πειραματική διάταξη πιλοτικού PABR όπου φαίνονται: 1. ο αντιδραστήρας, 2. οι συστοιχίες των ηλεκτροβανών, 3. το δοχείο τροφοδοσίας, 4. η δοσομετρική αντλία, 5. το δοχείο συλλογής της εκροής, 6. ο σωλήνας τροφοδοσίας και 7. η εκροή του αντιδραστήρα.

### 2.1.3 Κύκλοι Πειραμάτων

#### *Πειράματα χωρίς εναλλαγή τροφοδοσίας*

Το πείραμα ΚΧΠ χωρίς εναλλαγή για τον πιλοτικό PABR διεξήχθη το Δεκέμβριο του 2013 ενώ για τον εργαστηριακό το Φεβρουάριο του 2014. Το πρώτο πείραμα έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, ενώ το δεύτερο στο χώρο του εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.

#### **Πιλοτικός PABR**

Αρχικά έγινε προετοιμασία των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την καμπύλη αναφοράς. Παρασκευάζεται λευκό διάλυμα, ή τυφλό δείγμα (blank). Το διάλυμα αυτό έχει υποστεί όλες ακριβώς τις επεξεργασίες όπως και το άγνωστο, αλλά δεν περιέχει τον ιχνηθέτη. Η κυψελίδα που περιέχει το λευκό διάλυμα ονομάζεται και κυψελίδα αναφοράς και είναι κατασκευασμένη από γυαλί, επειδή χρησιμοποιείται για μετρήσεις σε μήκη κύματος του ορατού φωτός.

Από το αρχικό διάλυμα ιχνηθέτη ( $\Delta_1$ ) έγινε αραιώση σε αποσταγμένο νερό με αναλογία 1:10, δηλαδή παρασκευάστηκε

$$0,1 \text{ mL } (\Delta_1) + 0,9 \text{ mL H}_2\text{O} = 1 \text{ mL αραιωμένου διαλύματος } (\Delta_2)$$

Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν 10 πρότυπα διαλύματα από το διάλυμα  $\Delta_2$  με νερό του δικτύου σε συγκεκριμένες αναλογίες Έπειτα πραγματοποιήθηκε μέτρηση

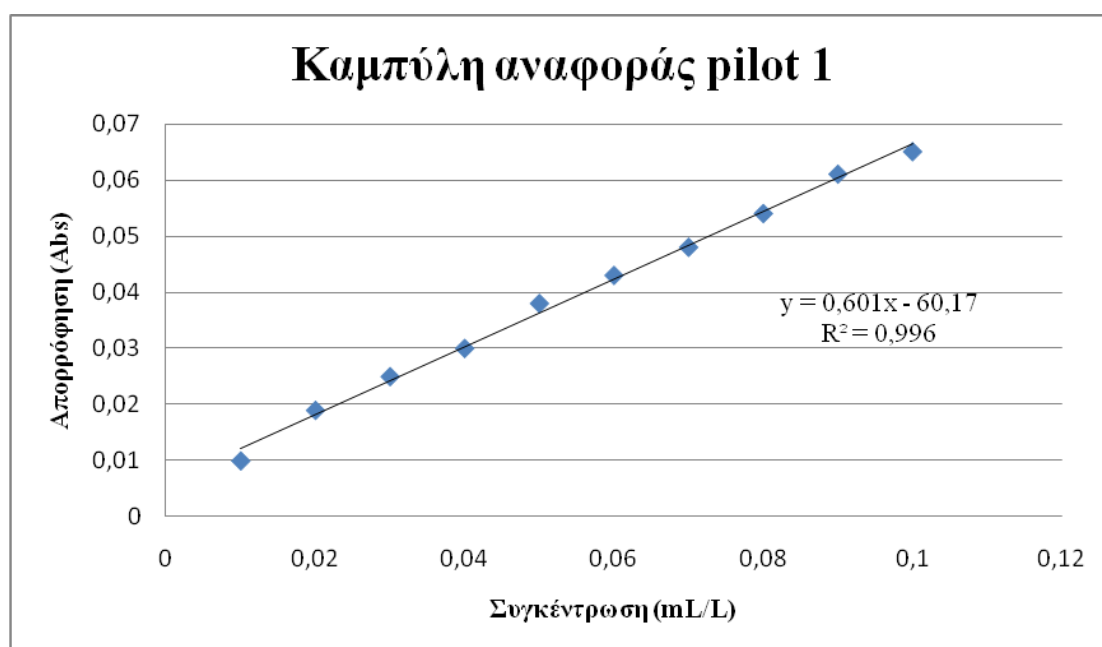


απορρόφησης των δειγμάτων στο φασματοφωτόμετρο στα 507 nm (**Πίνακας 2**) όπου ο ιχνηθέτης εμφανίζει μέγιστο μήκος απορρόφησης ( $\lambda_{\max}$ ).

Τέλος κατασκευάστηκε η καμπύλη αναφοράς (calibration curve). Η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη γραφική απεικόνιση των αριθμητικών τιμών της απορρόφησης (A) σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του ιχνηθέτη, σε πρότυπα διαλύματα. <sup>3,4</sup> (**Διάγραμμα 1**).

**Πίνακας 2:** Δεδομένα για την καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 1-Πιλοτικός

Όγκος διαλύματος $\Delta_2$ (mL)	Όγκος $H_2O$ αραίωσης (mL)	Όγκος τελικών διαλυμάτων $\Delta_3$ (mL)	Απορρόφηση (Abs)
0,01	100	100,01	0,01
0,02	100	100,02	0,019
0,03	100	100,03	0,025
0,04	100	100,04	0,03
0,05	100	100,05	0,038
0,06	100	100,06	0,043
0,07	100	100,07	0,048
0,08	100	100,08	0,054
0,09	100	100,09	0,061
0,1	100	100,1	0,065



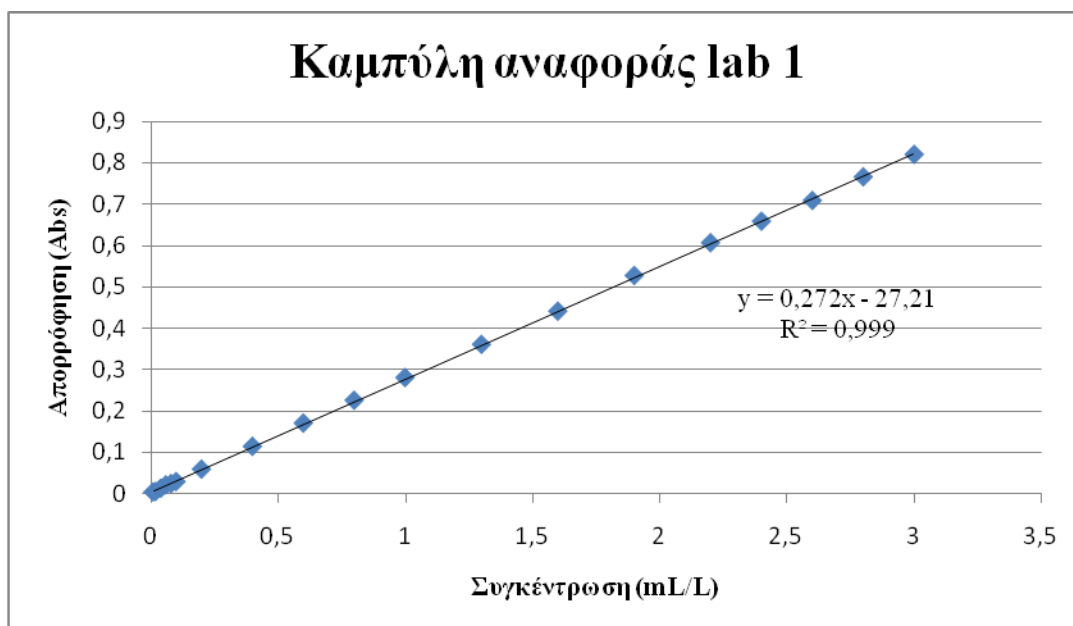
**Διάγραμμα 1:** Καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 1- Πιλοτικός.

### Εργαστηριακός PABR

Στην περίπτωση του εργαστηριακού PABR το διάλυμα του ιχνηθέτη που αγοράστηκε από την ίδια εταιρεία παραγωγής είχε μικρότερη περιεκτικότητα σε ιχνηθέτη. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαίο να κατασκευαστούν περισσότερα πρότυπα αραιωμένα διαλύματα, έτσι ώστε να είναι ανιχνεύσιμο όλο το εύρος των συγκεντρώσεων του πειράματος. Τα αντίστοιχα δεδομένα για την καμπύλη αναφοράς του ιχνηθέτη καθώς και η καμπύλη αναφοράς βρίσκονται στον **Πίνακα 3** και στο **Διάγραμμα 2** αντίστοιχα.

**Πίνακας 3:** Δεδομένα για την καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 1-Εργαστηριακός

Όγκος διαλύματος Δ <sub>2</sub> (mL)	Όγκος H <sub>2</sub> O αραιώσης (mL)	Όγκος τελικών διαλυμάτων Δ <sub>3</sub> (mL)	Απορρόφηση (Abs)
0,01	100	100,01	0,005
0,02	100	100,02	0,006
0,04	100	100,04	0,014
0,06	100	100,06	0,022
0,08	100	100,08	0,025
0,1	100	100,1	0,03
0,2	100	100,2	0,06
0,4	100	100,4	0,115
0,6	100	100,6	0,171
0,8	100	100,8	0,226
1	100	101	0,281
1,3	100	101,3	0,361
1,6	100	101,6	0,441
1,9	100	101,9	0,527
2,2	100	102,2	0,606
2,4	100	102,4	0,658
2,6	100	102,6	0,708
2,8	100	102,8	0,765
3	100	103	0,819



**Διάγραμμα 2:** Καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 1- Εργαστηριακός.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, γίνονταν δειγματοληψία από την εκροή των αντιδραστήρων ανά 15 λεπτά με ογκομετρικό κύλινδρο των 10 mL. Η ποσότητα που λαμβανόταν ήταν διπλάσια της χωρητικότητας της κυψελίδας (περίπου 3-4 mL), ώστε να υπάρχει αρκετό και αντιπροσωπευτικό δείγμα.

Στη συνέχεια ακολουθούσε η φωτομέτρηση του δείγματος με χρήση της γυάλινης κυψελίδας. Οι μετρήσεις καταγράφονταν σε φύλλο Microsoft Office Excel 2007 και μέσω των ευθειών, που εξήχθησαν από τις καμπύλες βαθμονόμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, γινόταν μετατροπή στην αντίστοιχη τιμή της συγκέντρωσης.

#### ***Πειράματα με εναλλαγή τροφοδοσίας***

Το πείραμα ΚΧΠ με εναλλαγή τροφοδοσίας διεξήχθη τον Ιούλιο του 2014 στις εγκαταστάσεις του Ημιβιομηχανικού Εργαστηρίου της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ για τον πιλοτικό PABR και τον εργαστηριακό PABR ταυτόχρονα. Η διαδικασία ήταν ίδια με αυτήν που περιγράφηκε στα πειράματα χωρίς εναλλαγή. Εξαίρεση αποτελεί το γεγονός ότι οι δειγματοληψίες πραγματοποιούνταν ανά 30 λεπτά, αφού η εμπειρία του προηγούμενου κύκλου πειραμάτων έδειξε ότι η δειγματοληψία, ανά 15 λεπτά, διαδοχικών δειγμάτων εκροών δεν επέφερε μεγάλες αποκλίσεις στις μετρήσεις.

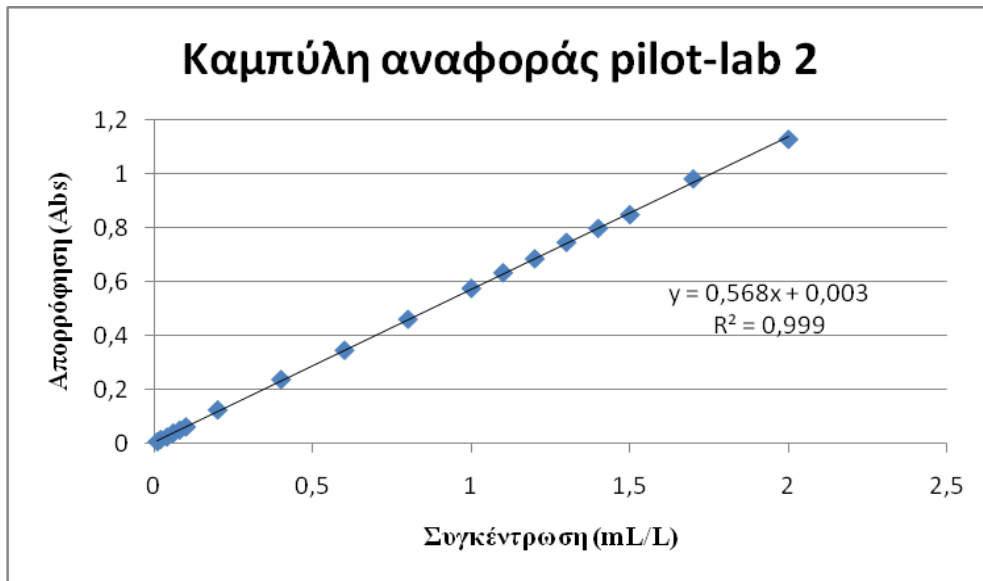
Για την εναλλαγή της τροφοδοσίας των διαμερισμάτων του εργαστηριακού PABR, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά δώδεκα (12) ηλεκτροκίνητες σφαιρικές βάνες. Οι βάνες αυτές είχαν δύο λειτουργίες: Χειροκίνητη (Manual) και Αυτόματη (Auto). Ο χειρισμός αυτών των βανών γινόταν στη θέση Auto και πραγματοποιούνταν με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο υπολογιστής, στον οποίο έχει ενσωματωθεί ειδική κάρτα επικοινωνίας, μέσω ενός προγράμματος χειρισμού (Σκιαδάς 1998), έλεγχε τις βάνες και επομένως καθιστούσε δυνατό τον έλεγχο της περιόδου

εναλλαγής της τροφοδοσίας (T=2d) αλλά και τον τρόπο εναλλαγής της τροφοδοσίας. Όσον αφορά τον τρόπο εναλλαγής επιλέχθηκε η αντίθετη με τη φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού, έτσι ώστε η εναλλαγή να πραγματοποιείται αντίθετα με τη ροή του ρευστού.

Τα δεδομένα για την καμπύλη αναφοράς του ιχνηθέτη καθώς και η καμπύλη αναφοράς παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4** και στο **Διάγραμμα 3** αντίστοιχα. Τα στοιχεία είναι κοινά για τους δυο αντιδραστήρες καθώς χρησιμοποιήθηκε το ίδιο διάλυμα ιχνηθέτη.

**Πίνακας 4:** Δεδομένα για την καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 2

Όγκος διαλύματος $\Delta_2$ (mL)	Όγκος $H_2O$ αραίωσης (mL)	Όγκος τελικών διαλυμάτων $\Delta_3$ (mL)	Απορρόφηση (Abs)
0,01	100	100,01	0,005
0,02	100	100,02	0,013
0,04	100	100,04	0,022
0,06	100	100,06	0,037
0,08	100	100,08	0,048
0,1	100	100,1	0,06
0,2	100	100,2	0,123
0,4	100	100,4	0,236
0,6	100	100,6	0,345
0,8	100	100,8	0,46
1	100	101	0,575
1,1	100	101,1	0,633
1,2	100	101,2	0,685
1,3	100	101,3	0,746
1,4	100	101,4	0,798
1,5	100	101,5	0,849
1,7	100	101,7	0,982
2	100	102	1,129



Διάγραμμα 3: Καμπύλη αναφοράς-Πείραμα 2- Εργαστηριακός-Πιλοτικός.

## 2.2 Πειράματα προσομοίωσης με Comsol

Τα πειράματα προσομοίωσης έγιναν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε περιβάλλον Comsol Multiphysics 4.4. και πραγματοποιήθηκαν δυο κύκλοι με τέσσερα πειράματα προσομοίωσης. Ο πρώτος κύκλος περιλαμβάνει την προσομοίωση της ροής των αντιδραστήρων χωρίς εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας και με αφαίρεση των υπό γωνία ανακλαστήρων στο κάτω μέρος των διαμερισμάτων καθόδου. Στο δεύτερο κύκλο προστέθηκαν οι ανακλαστήρες με σκόπο τη μελέτη επίδρασής τους στη ρεολογική συμπεριφορά των αντιδραστήρων μέσω σύγκρισης με τον πρώτο κύκλο προσομοιώσεων.

Αρχικά έγιναν μετρήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δυο αντιδραστήρων. Στη συνέχεια η σχεδιάσή τους πραγματοποιήθηκε απευθείας μέσω του πεδίου σχεδιασμού (Draw mode) του Comsol. Ακολούθησε ο ορισμός των φυσικών σχέσεων και παραμέτρων (Physics mode), όπου εκτός της προσθήκης ιδιοτήτων υλικών στη γεωμετρία (Material), έγινε εισαγωγή των μαθηματικών μοντέλων μελέτης της ροής και ο προσδιορισμός των ορίων του συστήματος. Ακολούθησε η κατασκευή του πλέγματος (Mesh mode). Τέλος επιλέχθηκε το είδος της μελέτης-επίλυσης που θα επακολουθήσει με τον ορισμό των παραμέτρων της χρονικής εξάρτησης (Study mode).

### 2.2.1 Ορισμός της γεωμετρίας (Draw mode)

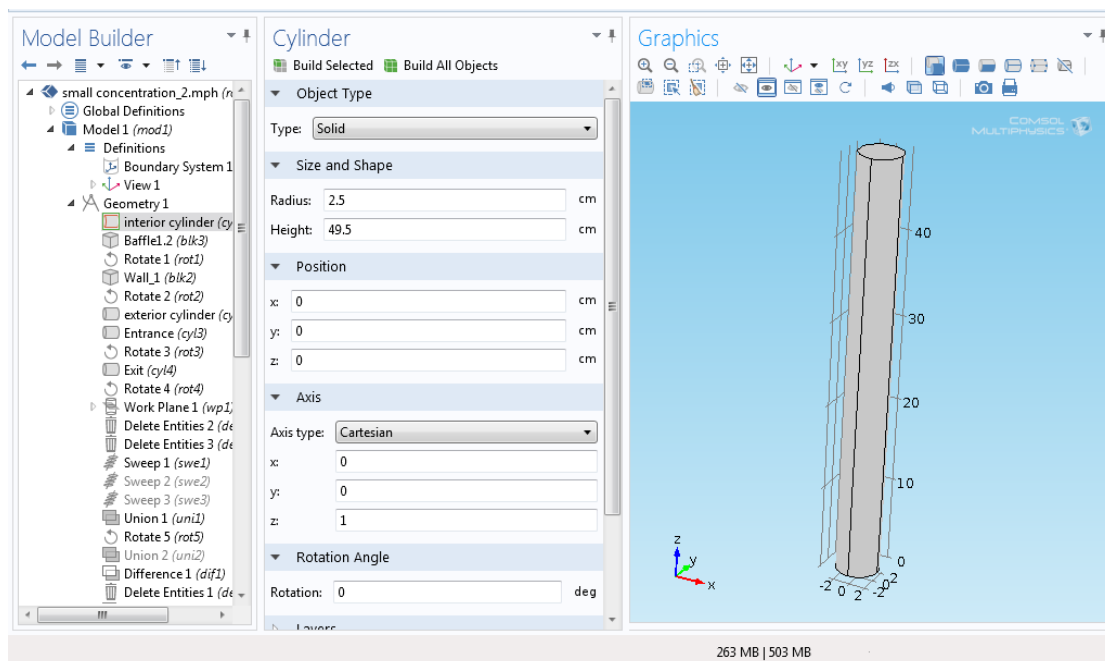
Ο ορισμός της γεωμετρίας αποτελεί το πρώτο κρίσιμο βήμα για τη συνέχεια της προσομοίωσης. Στόχος είναι η αναπαράσταση του χώρου στο οποίο δρα το ρευστό. Αυτό θα πρέπει να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση των απλούστερων γεωμετρικών σχημάτων και την όσο το δυνατόν μικρότερη επεξεργασία τους με άλγεβρα Boole, έτσι ώστε να προκύψουν λιγότεροι βαθμοί ελευθερίας και να μειωθεί ο χρόνος των υπολογισμών.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαστηριακού και πιλοτικού PABR που εισάγονται στο πεδίο Geometry.

**Πίνακας 5:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαστηριακού και πιλοτικού PABR.

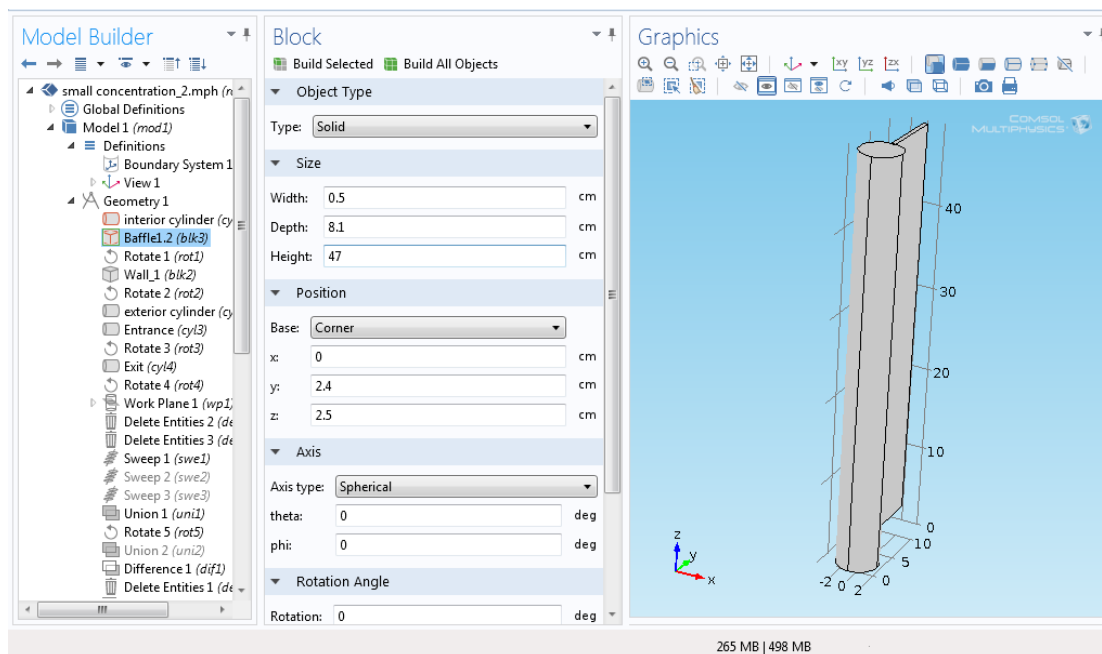
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Εσωτερικός κύλινδρος		Εξωτερικός κύλινδρος		Τοιχώματα Ύψος/ Πλάτος/ Πάχος (cm)	
	Ακτίνα (cm)	Ύψος (cm)	Ακτίνα (cm)	Ύψος (cm)	Διαμερισμάτων (Wall)	Ανακλαστήρα (Baffle)
<b>Εργαστηριακός PABR</b>	2,5	49,5	10,5	49,5	49,5/8/0,5	47/8/0,5
<b>Πιλοτικός PABR</b>	12,5	55,7	24,5	55,7	55,7/12/0,5	45,9/8/0,5

Το σχέδιο επιλέχθηκε να κατασκευαστεί σε τρισδιάστατη απεικόνιση, διότι το ρευστό δρα στον τρισδιάστατο χώρο μέσω των σωληνώσεων και των διαμερισμάτων του PABR. Ορίστηκε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και ως αρχή των αξόνων το κέντρο των ομόκεντρων κυλίνδρων. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά τα πεδία εισαγωγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών για τον εργαστηριακό PABR. Τα ίδια βήματα ακολουθήθηκαν και για τον πιλοτικό PABR. Αρχικά κατασκευάζεται ο εσωτερικός κύλινδρος (bath) των PABR με την εντολή Geometry → Cylinder (**Σχήμα 10**).



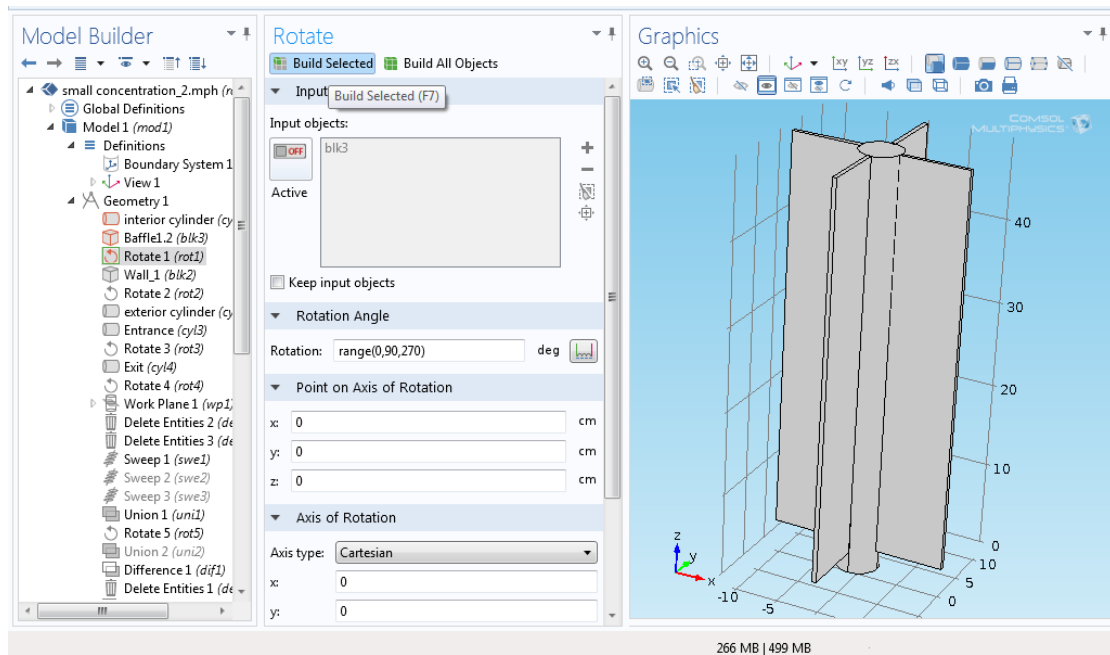
**Σχήμα 10:** Γεωμετρία εσωτερικού κυλίνδρου εργαστηριακού PABR (Comsol).

Στη συνέχεια κατασκευάζονται τα τοιχώματα που χωρίζουν τον αντιδραστήρα σε διαμερίσματα (Wall) και τα τοιχώματα των ανακλαστήρων (Baffle) μέσω της εντολής Block. Τα Baffles τοποθετούνται 2,5 cm πάνω από τον πυθμένα για τον εργαστηριακό PABR (Σχήμα 11) και 9,8 cm για τον πιλοτικό PABR και 0,1 cm προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Η τελευταία κίνηση γίνεται για να μη δημιουργηθούν άσκοπες γραμμές (edges) κατά τη συναρμολόγηση των στοιχείων.

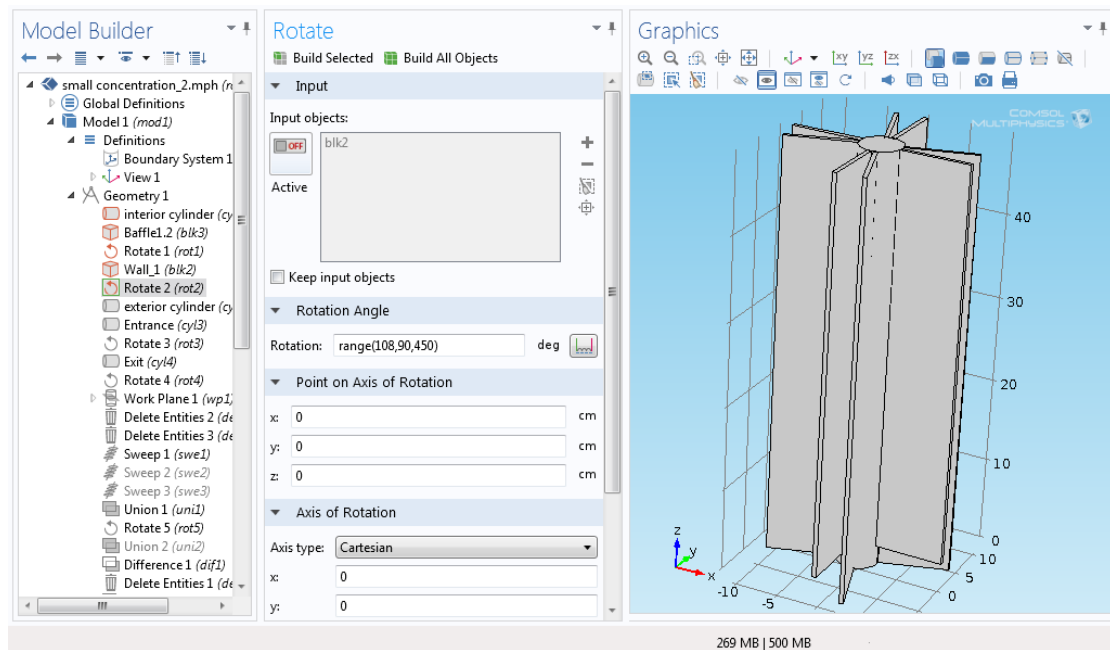


**Σχήμα 11:** Γεωμετρία τοιχωμάτων ανακλαστήρα (Baffle) εργαστηριακού PABR.

Για να αποφευχθεί η κατασκευή του κάθε τοιχώματος ξεχωριστά, επιλέγεται η εντολή Geometry → Transforms → Rotate και για το κατασκευασμένο τοίχωμα του ανακλαστήρα (Rotate 1) (Σχήμα 12) και του διαμερίσματος (Rotate 2) (Σχήμα 13) ορίζεται ως βήμα περιστροφής οι 90 μοίρες. Οι τιμές του βήματος είναι τέτοιες ώστε η κλίση των τοιχωμάτων των ανακλαστήρων (Baffle) σε σχέση με αυτά των διαμερισμάτων να είναι 18 μοίρες για τον εργαστηριακό και 19 μοίρες για τον πιλοτικό PABR.



**Σχήμα 12:** Κατασκευή τοιχωμάτων ανακλαστήρων (Baffle) με εντολή Rotate.

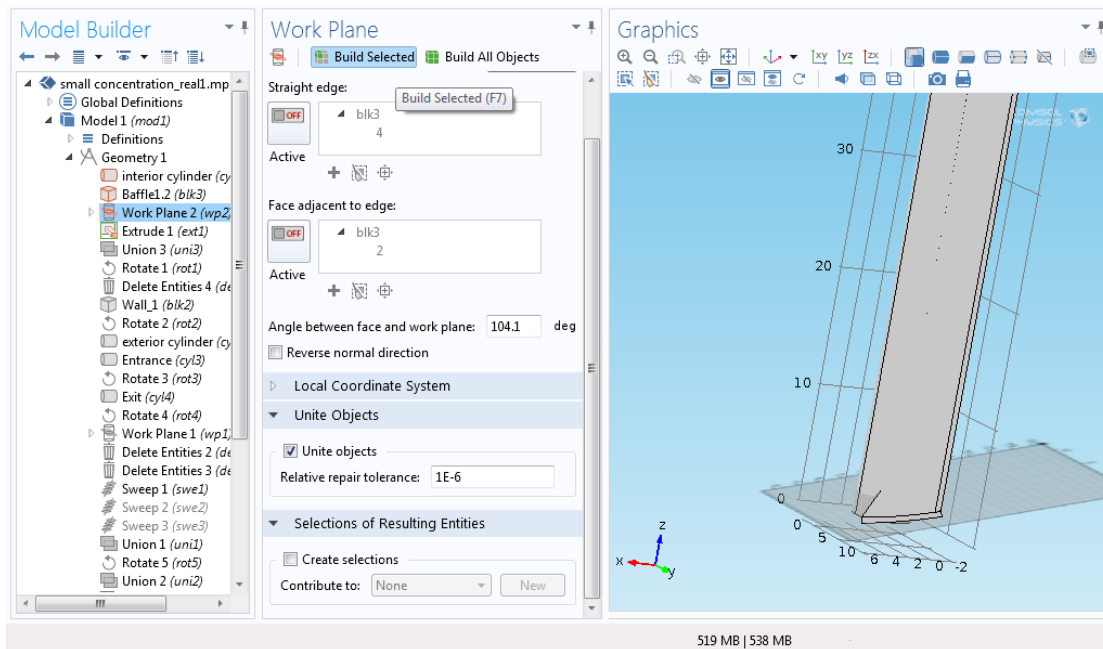


**Σχήμα 13:** Κατασκευή τοιχωμάτων διαμερισμάτων (Wall) με εντολή Rotate.

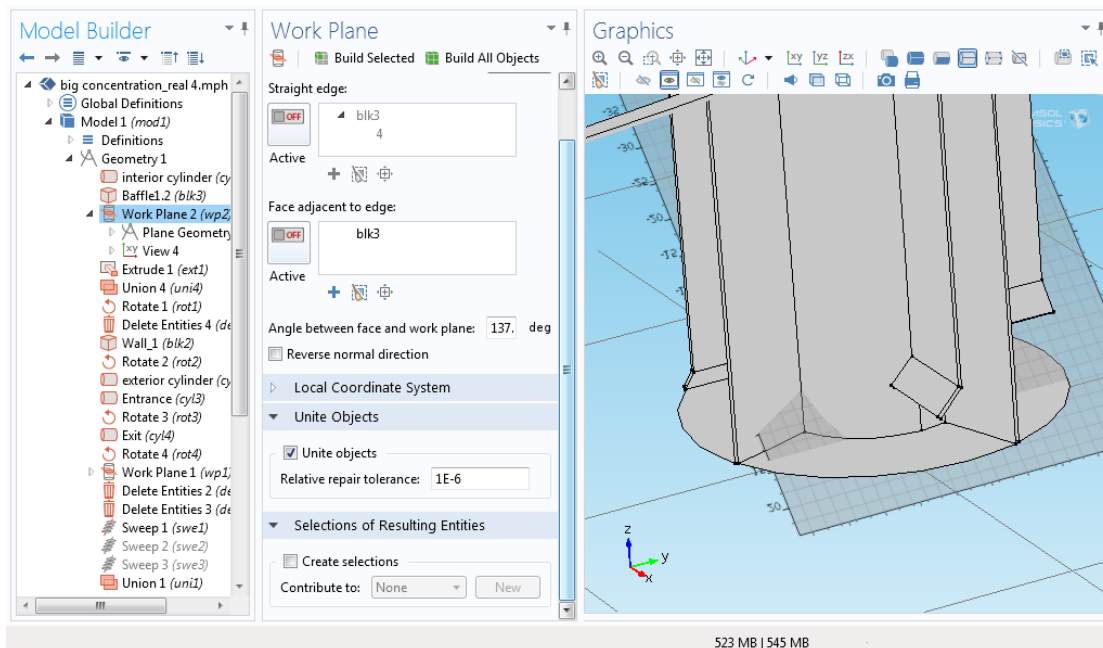
Η κατασκευή των ανακλαστήρων στην περίπτωση του δεύτερου κύκλου πειραμάτων προσομοίωσης απαιτούσε την εργασία πάνω στην επιφάνεια των τοιχωμάτων των ανακλαστήρων. Αυτό κατέστη δυνατό με την εντολή Geometry → Work plane. Η επιφάνεια των ανακλαστήρων του εργαστηριακού PABR έχει σχήμα τραπέζιου με τη μια πλευρά να αποτελεί τόξο του εξωτερικού κυλίνδρου του αντιδραστήρα. Το τόξο σχεδιάστηκε, ώστε η επιφάνεια του ανακλαστήρα να καλύπτει το 1/3 του διαμερίσματος προς το μέρος της ανοδικής ροής. Η επιφάνεια των ανακλαστήρων του πιλοτικού PABR έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου. Οι ανακλαστήρες



έχουν κλίση ως προς τα θετικά του άξονα z των τοιχωμάτων 104,1 μοίρες για τον εργαστηριακό (Σχήμα 14) και 137 μοίρες για τον πιλοτικό (Σχήμα 15). Για την κατασκευή του ανακλαστήρα του εργαστηριακού PABR σχεδιάστηκε τόξο του κύκλου 36 μοιρών σε μορφή Solid με βάση την εντολή Plane Geometry → Circle από το πεδίο Work plane. Αντίστοιχα ο ανακλαστήρας του πιλοτικού PABR σχεδιάστηκε με την εντολή Plane Geometry → Rectangle.



**Σχήμα 14:** Κατασκευή ανακλαστήρων εργαστηριακού PABR με Χρήση Work Plane.

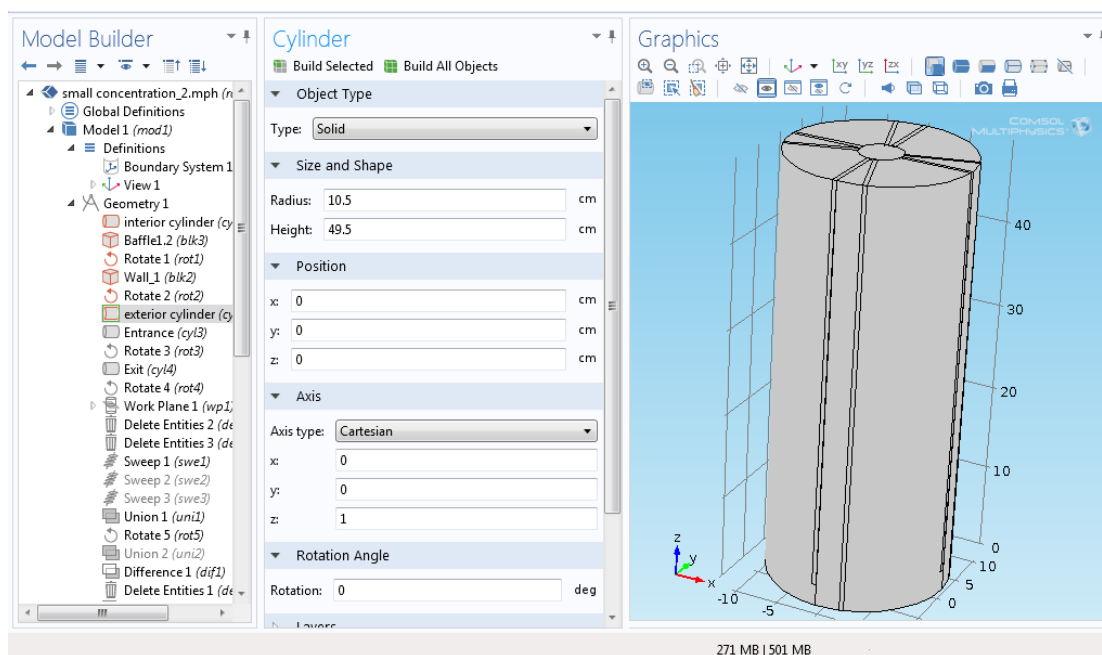


**Σχήμα 15:** Κατασκευή ανακλαστήρων πιλοτικού PABR με Χρήση Work Plane.

Σημειώνεται ότι οι ανακλαστήρες κατασκευάστηκαν με αρχή το κέντρο του αντιδραστήρα που ορίστηκε προηγουμένως, ώστε να αποφευχθούν και πάλι άσκοπες γραμμές κατά τη συναρμολόγηση. Έπειτα επιχειρήθηκε η ένταξη των ανακλαστήρων στο τρισδιάστατο σχήμα. Για τη μετατροπή τους σε τρισδιάστατα σχήματα επιλέχθηκε η εντολή Geometry → Extrude, όπου ορίστηκε και το πάχος τους στα 0,5 cm. Στη συνέχεια έγινε ένωση του τοιχώματος με τον ανακλαστήρα με χρήση άλγεβρας Boole και την εντολή Geometry → Boolean operations → Union και με την εντολή Rotate κατασκευάστηκαν και τα υπόλοιπα τοιχώματα των ανακλαστήρων με τη ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε για τα πειράματα χωρίς ανακλαστήρες.

Η χρήση άλγεβρας Boole και της μετατροπής του σχεδίου σε 3D δημιουργεί γραμμές (edges) και κορυφές (points) που μπορούν να επιφέρουν αποτυχία στη διαδικασία της κατασκευής πλέγματος (Mesh). Για το λόγο αυτό έγινε «καθαρισμός» της γεωμετρίας από αυτά τα στοιχεία με χρήση της εντολής Geometry → Delete Entities

Η διαδικασία συνεχίστηκε με την κατασκευή του εξωτερικού κυλίνδρου του αντιδραστήρα με χρήση της εντολής Cylinder (**Σχήμα 16**).



**Σχήμα 16:** Κατασκευή εξωτερικού κυλίνδρου εργαστηριακού PABR.

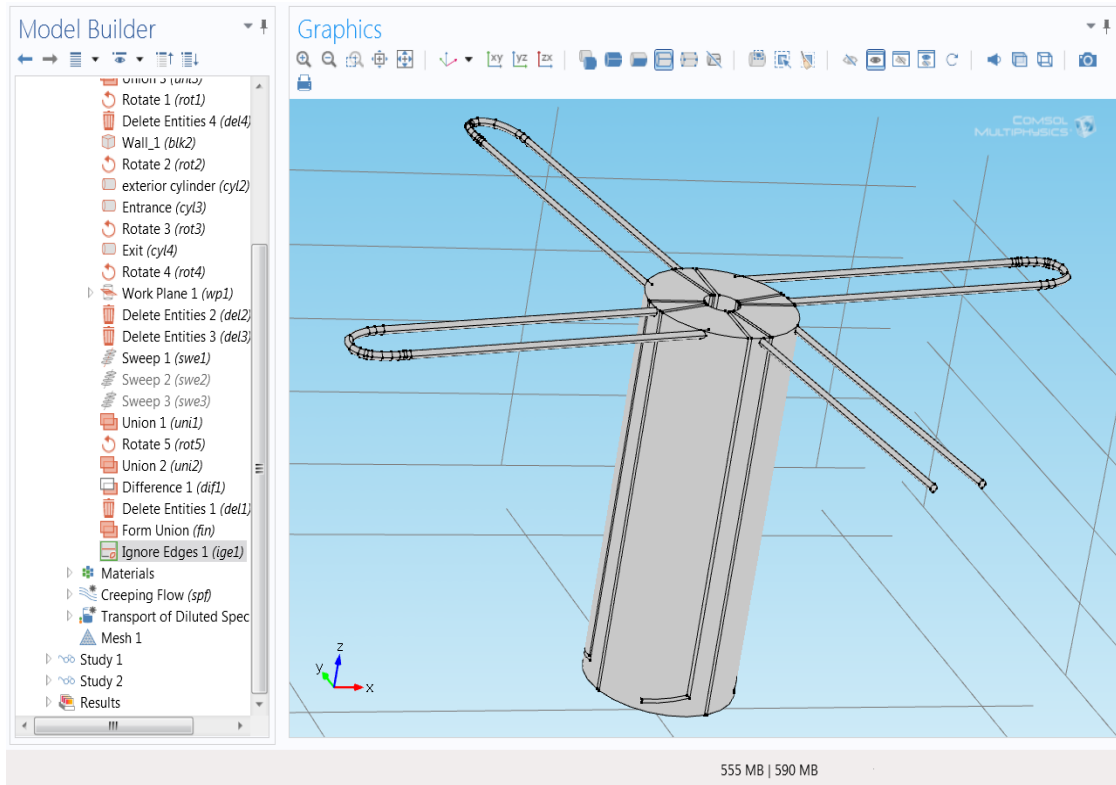
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν οι εξωτερικές σωληνώσεις οι οποίες συνδέουν τα διαμερίσματα μεταξύ τους. Οι συστοιχίες βανών δεν συμπεριλήφθηκαν στην απεικόνιση του σχεδίου διότι δε συμμετέχουν στα πειράματα χωρίς εναλλαγή τροφοδοσίας. Το μόνο μέρος που περιλαμβάνεται είναι το μήκος των σωληνώσεων τους. Η γεωμετρία των σωληνώσεων τροποποιήθηκε με στόχο την απλοποίηση των υπολογισμών. Έτσι, οι εισόδους και οι εξόδους σχεδιάστηκαν ως ευθείες σωληνώσεις οι οποίες συνδέονται με μια τοξωτή σωληνώση. Τα μήκη των εισόδων και εξόδων των διαμερισμάτων για τους δυο αντιδραστήρες παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6**.

**Πίνακας 6:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σωληνώσεων των αντιδραστήρων PABR.

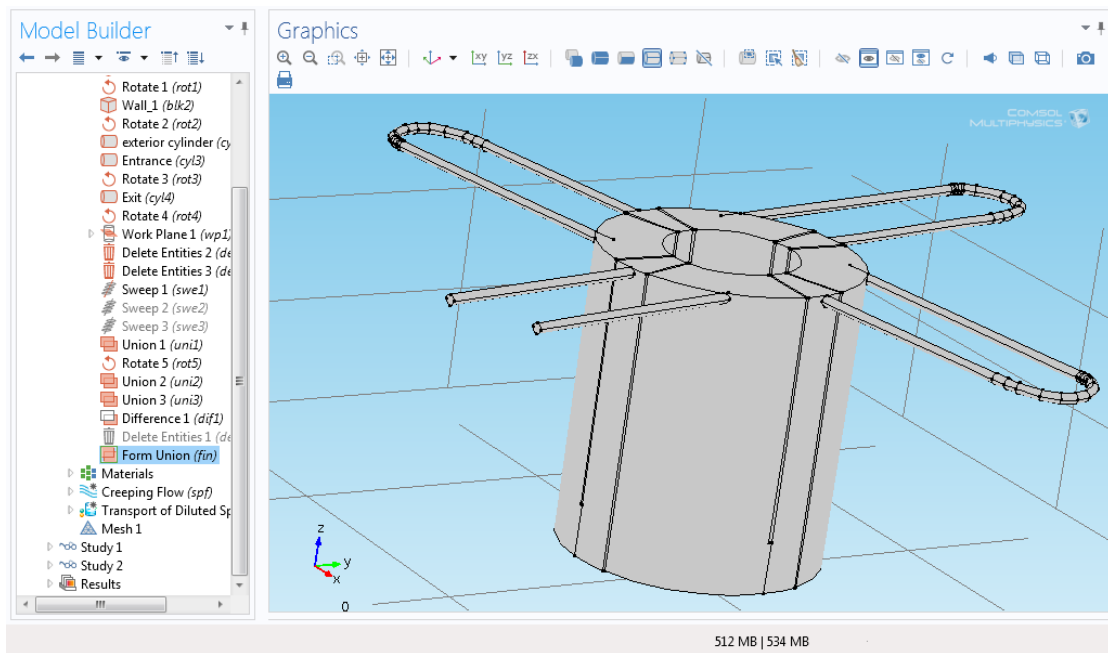
Αντιδραστήρες	Ακτίνα/Μήκος Εισόδου (cm)	Ακτίνα/Μήκος Εξόδου (cm)
<b>Εργαστηριακός PABR</b>	0,5/42	0,5/45
<b>Πιλοτικός PABR</b>	0,96/42	0,96/45

Η είσοδος και η έξοδος του αντιδραστήρα τοποθετήθηκαν παράλληλα στην κορυφή του αντιδραστήρα και στο μέσο του τόξου του διαμερίσματος καθοδικής ροής στο εξωτερικό του τοιχώματος του εξωτερικού κυλίνδρου. Η σύνδεση των δυο αντιδραστήρων έγινε με χρήση ενός δεύτερου Workplane που τοποθετήθηκε κάθετα στις διατομές εισόδου και εξόδου (στο επίπεδο xy) και στο μέσο τους. Εκεί χρησιμοποιήθηκε η εντολή Plane Geometry → Bézier Polygon και κατασκευάστηκαν δυο κομμάτια του τύπου ανοικτής καμπύλης (open curve) , ένα cubic που απεικονίζει την τοξωτή σωλήνωση και μια ευθεία (linear) που συνδέει την τοξωτή σωλήνωση με την έξοδο του αντιδραστήρα. Έπειτα, αφού έγινε και πάλι «καθαρισμός» της γεωμετρίας από τις άχρηστες γραμμές και κορυφές, πραγματοποιήθηκε μετατροπή της ανοικτής καμπύλης σε τρισδιάστατο σχήμα με χρήση της εντολής Geometry → Sweep και «οδηγό» τη διατομή εισόδου. Ακολούθησε η ένωση με την εντολή Union και η κατασκευή των υπόλοιπων συνδέσεων με την εντολή Rotate και βήμα 90 μοίρες.

Η συναρμολόγηση της κατασκευής ολοκληρώθηκε με την ένωση (εντολή Union) των σωληνώσεων με τον εξωτερικό κύλινδρο και η εμφάνιση του χώρου στο οποίο δρα το ρευστό με την εντολή Geometry → Boolean operations → Difference. Ακολούθησε ένας ακόμη «καθαρισμός» της γεωμετρίας και η εντολή Form Union, ώστε να οριστούν οι χώροι μελέτης της διεργασίας (**Σχήματα 17 και 18**). Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Geometry → Virtual operations → Ignore Edges για τις γραμμές που βρίσκονται μεταξύ των διαμερισμάτων καθόδου και ανόδου, ώστε να μην αναγνωρίζονται κατά τη μελέτη ως εμπόδια στη ροή.



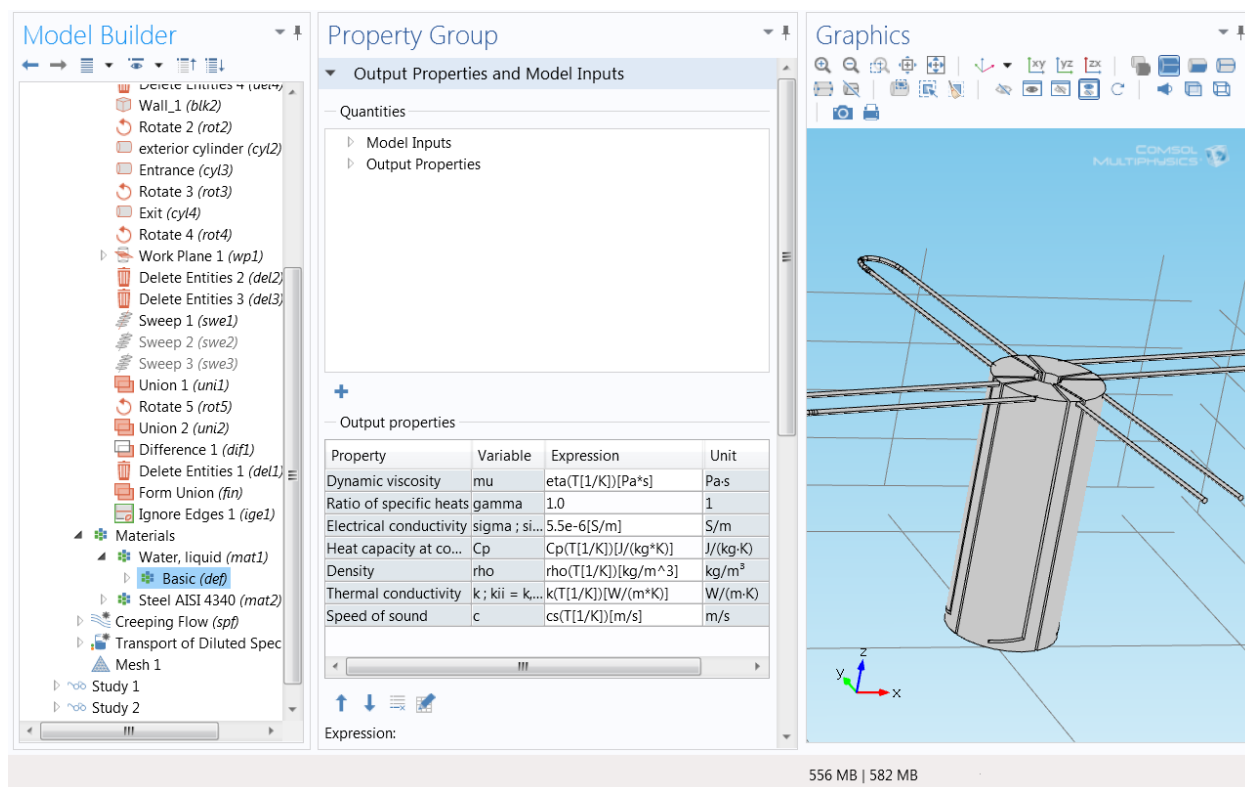
**Σχήμα 17:** Τελική γεωμετρία εργαστηριακού PABR.



**Σχήμα 18:** Τελική γεωμετρία πιλοτικού PABR.

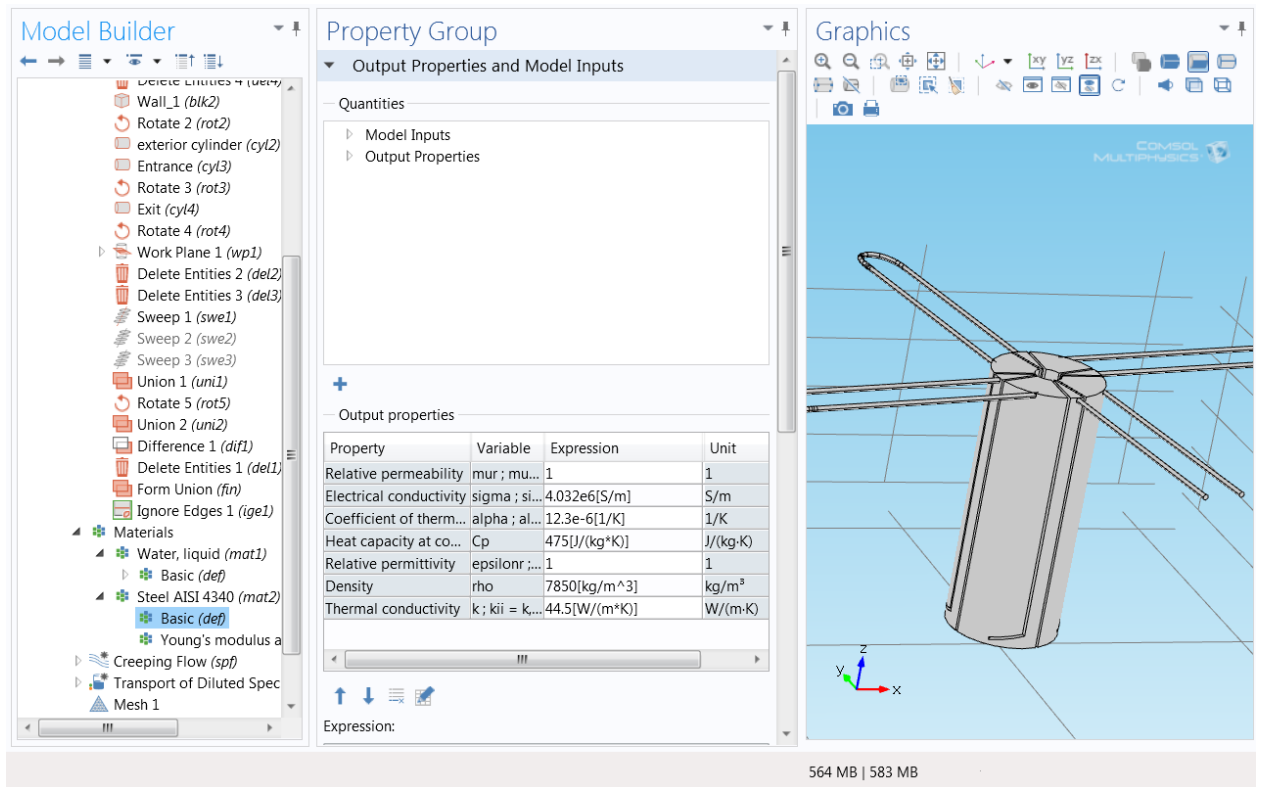
## 2.2.2 Ορισμός των φυσικών σχέσεων (Physics mode)

Αρχικά στο πεδίο Materials έγινε εισαγωγή των υλικών και των ιδιοτήτων τους πάνω στο χώρο (domain) του αντιδραστήρα και στα όριά (boundaries) του. Από τη βιβλιοθήκη των υλικών (Model library) επιλέχθηκε το νερό στη μορφή Water, liquid για όλο το χώρο (domain) της γεωμετρίας, αφού πριν αρχίσει το πείραμα ΚΧΠ ο αντιδραστήρας ήταν πληρωμένος με νερό. Οι ιδιότητες του υλικού φαίνονται στο **Σχήμα 19**.



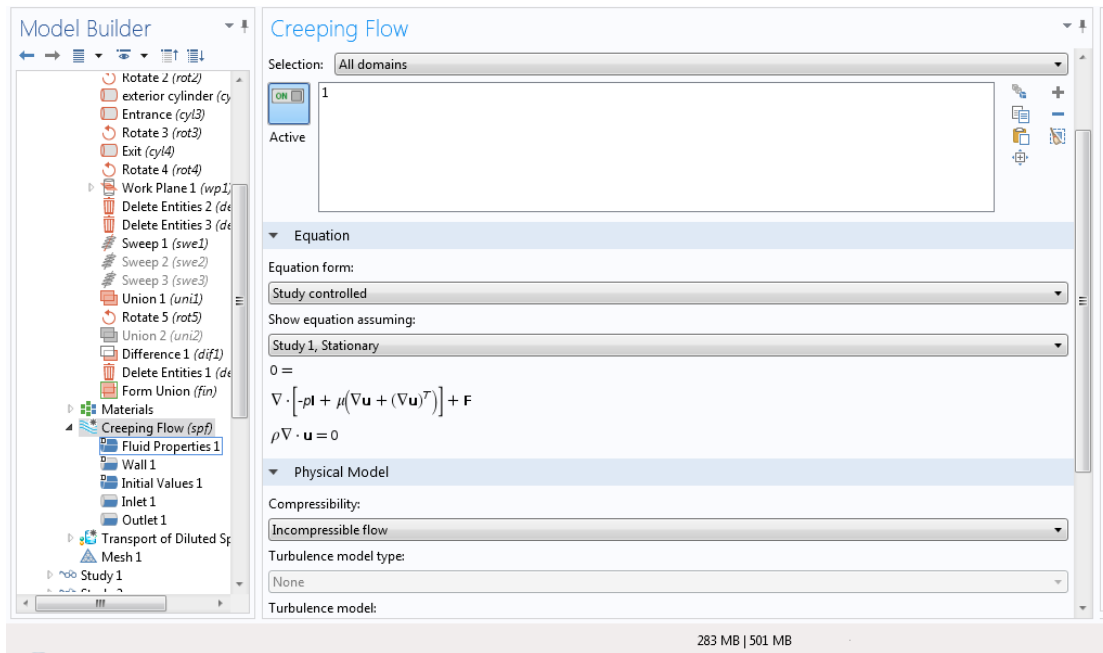
**Σχήμα 19:** Ιδιότητες υλικού για το χώρο (domain) μελέτη.

Από την ίδια βιβλιοθήκη υλικών επιλέχθηκε το ατσάλι με ονομασία Steel AISI 4340 και εφαρμόστηκε σε όλα τα όρια (boundaries) της γεωμετρίας. Αυτό συνέβη διότι ο αντιδραστήρας είναι φτιαγμένος από ανοξείδωτο ατσάλι. Για την απλοποίηση των υπολογισμών θεωρήθηκε το ίδιο υλικό και για τις σωληνώσεις. Οι ιδιότητες του υλικού των τοιχωμάτων και των σωληνώσεων φαίνεται στο **Σχήμα 20**.



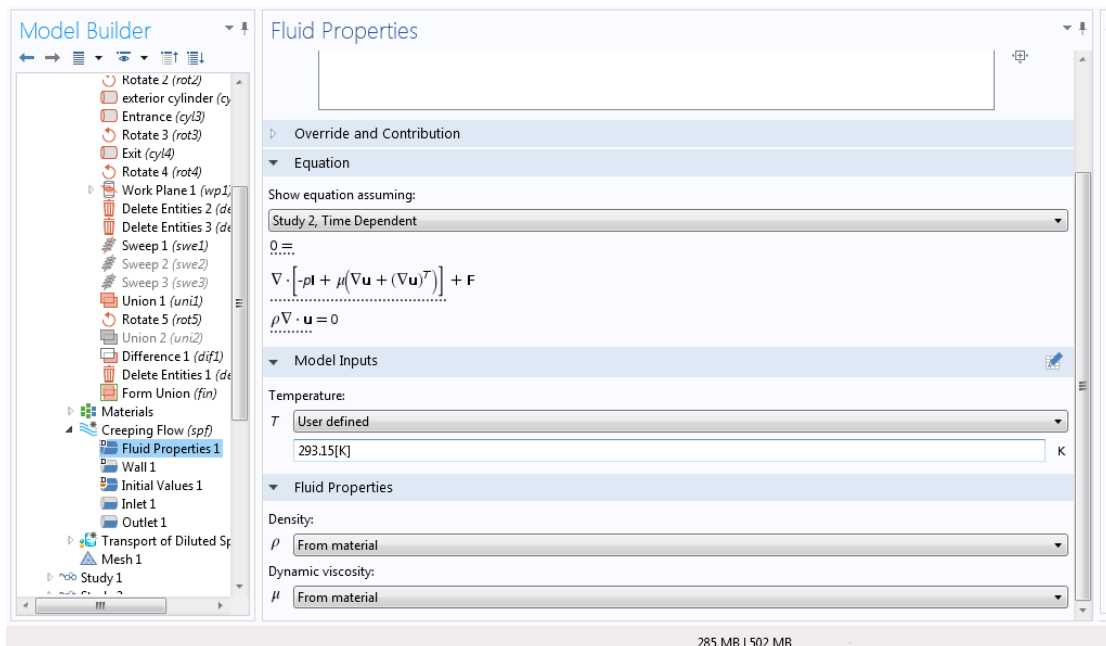
**Σχήμα 20:** Ιδιότητες υλικού για τα όρια (boundaries) μελέτης.

Ακολούθησε ο ορισμός του φυσικού μοντέλου της προσομοίωσης. Αρχικά υπολογίστηκε ο τύπος ροής των αντιδραστήρων, ο οποίος είναι ροή Stokes (αριθμός Reynolds  $\ll 1$ ). Για την εύρεση της κατανομής της ταχύτητας σε κάθε σημείο του χώρου του ρευστού επιλέχθηκε το φυσικό μοντέλο Creeping Flow. Η εξίσωση της ταχύτητας επιλέχθηκε να εξαρτάται από την πρώτη μελέτη προσομοίωσης (Study 1) η οποία πραγματοποιείται για μόνιμες συνθήκες ροής. Αυτό έγινε διότι πριν αρχίσει το πείραμα αλλά και καθόλη τη διάρκειά του η παροχή του ρευστού ήταν σταθερή. Επίσης η ροή θεωρείται ασυμπίεστη (Incompressible flow) αφού μέσα στο χώρο του αντιδραστήρα ρέει υδατικό διάλυμα το οποίο είναι πρακτικά ασυμπίεστο (**Σχήμα 21**).



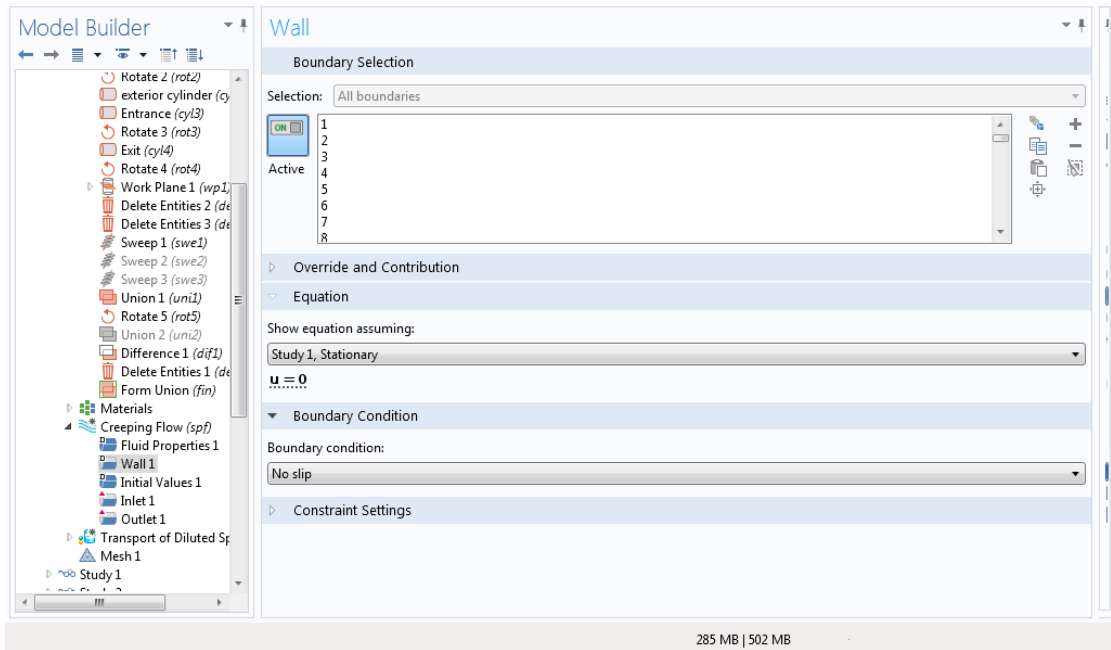
**Σχήμα 21:** Εξίσωση και συνθήκες ροής για μόνιμες συνθήκες.

Επειδή το ρευστό που ρέει κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι υδατικό διάλυμα με διαρκώς αυξανόμενη συγκέντρωση του ιχνηθέτη επιλέχθηκε η χρονικά εξαρτώμενη (Study 2, Time dependent) μελέτη για τις ιδιότητες του ρευστού (Σχήμα 22).



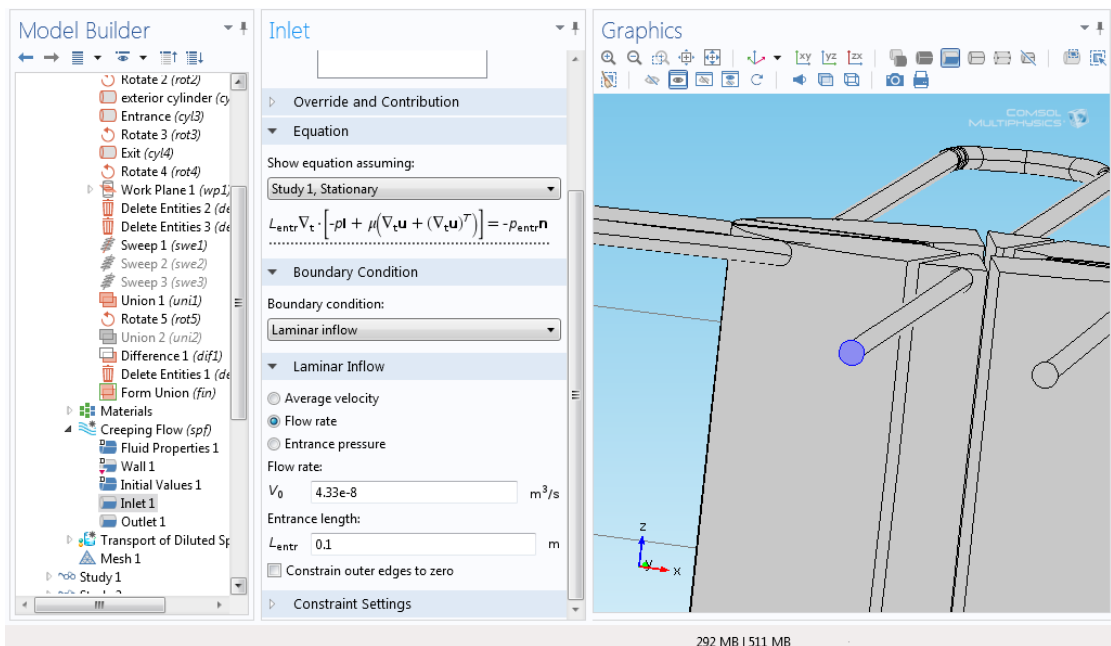
**Σχήμα 22:** Πεδίο ιδιοτήτων ρευστού.

Για τα τοιχώματα του αντιδραστήρα και των σωληνώσεων (Wall), δηλαδή τα όρια (boundaries) μελέτης επιλέχθηκε η συνθήκη μη ολίσθησης (no slip) (Σχήμα 23).



**Σχήμα 23:** Συνθήκες στα όρια (boundaries) μελέτης.

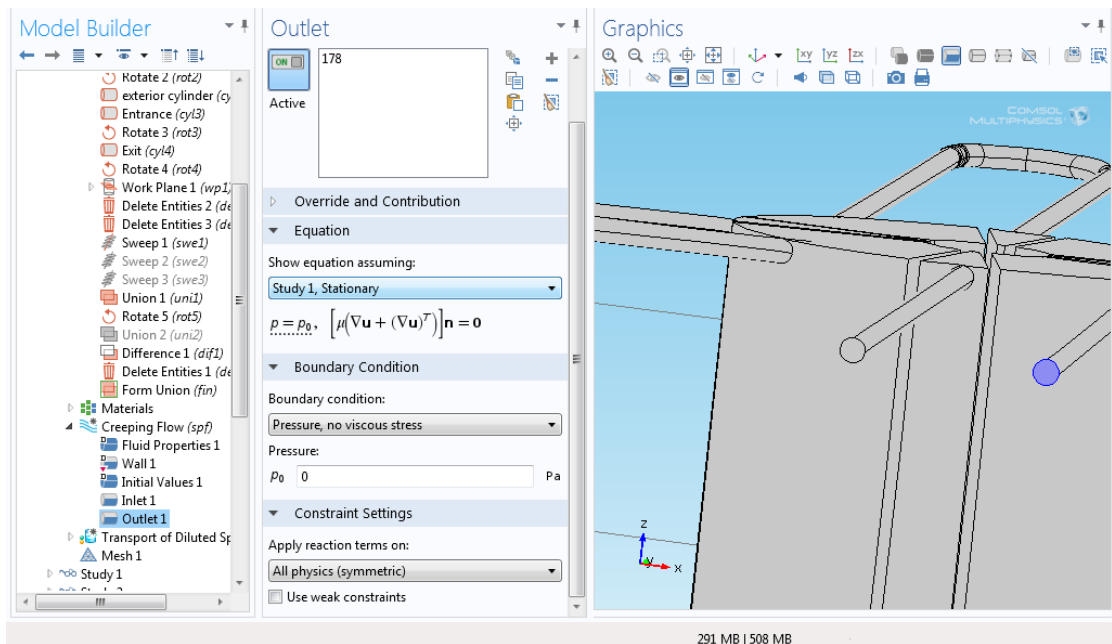
Στην είσοδο της τροφοδοσίας επιλέχθηκε η στρωτή μόνιμη εισροή (Laminar inflow) για το αντίστοιχο όριο του συστήματος (μπλε χρώμα) χωρίς συνθήκες αντιρροής και με παροχή εισόδου που υπολογίστηκε με βάση το χρόνο παραμονής (4d) (**Σχήμα 24**).



**Σχήμα 24:** Πεδίο εισαγωγής συνθηκών εισόδου τροφοδοσίας.

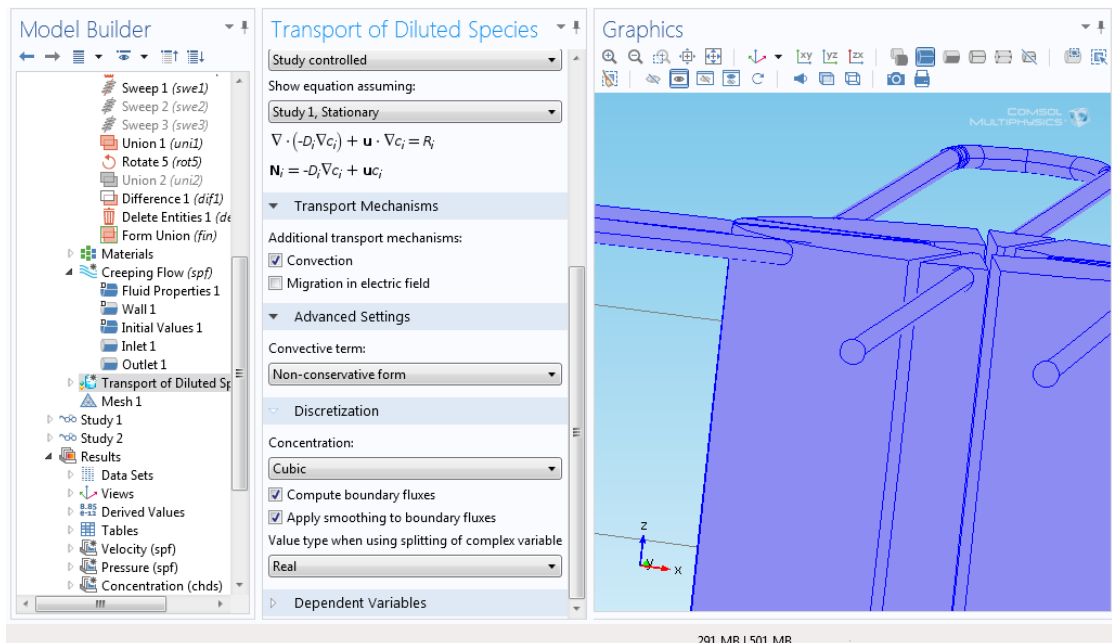
Για την έξοδο του αντιδραστήρα επιλέχθηκε το αντίστοιχο όριο (μπλε χρώμα) και ως συνθήκη η εντολή Pressure, no viscous stress, διότι το ρευστό εκρέει σε περιβάλλον δωματίου και εξαρτάται μόνο από την παροχή της αντλίας (**Σχήμα 25**).





**Σχήμα 25:** Πεδίο εισαγωγής συνθηκών εξόδου τροφοδοσίας.

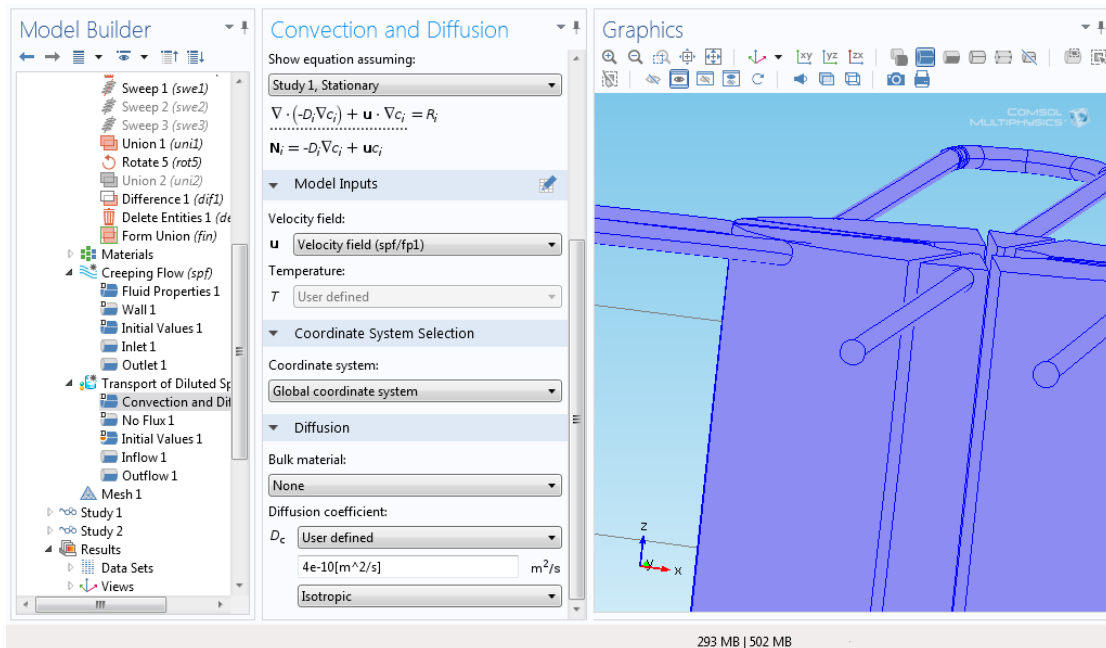
Το φυσικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να προσομοιάσει την Κατανομή του Χρόνου Παραμονής σε περιβάλλον Comsol Multiphysics 4.4 είναι αυτό με την ονομασία Transport of Diluted Species. Ο μηχανισμός μεταφοράς της μάζας του ιχνηθέτη μέσα στο νερό που βρίσκεται στον αντιδραστήρα είναι αυτός της συναγωγής (convection) σε μόνιμες συνθήκες (**Σχήμα 26**).



**Σχήμα 26:** Πεδίο μελέτης ΚΧΠ.

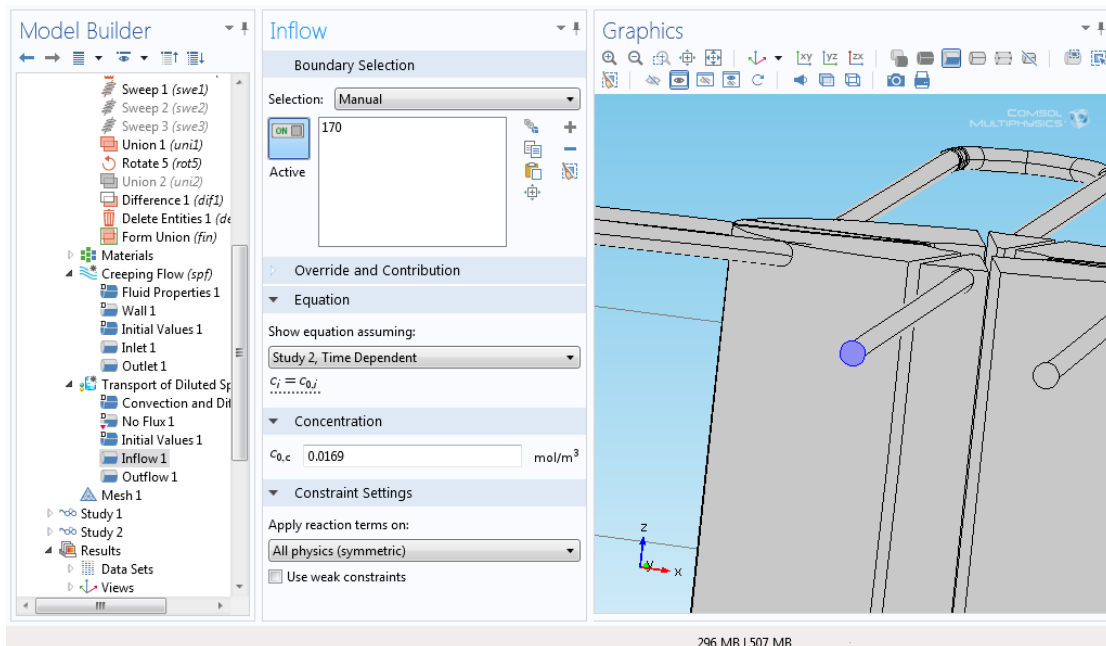
Για τη μελέτη του μοντέλου συναγωγής και διάχυσης (diffusion) επιλέγεται το πεδίο της ταχύτητας να παίρνει τιμές από τα αποτελέσματα της μελέτης ροής (Creeping

flow). Όσον αφορά το μοντέλο διάχυσης θεωρήθηκε ισοτροπική και για τον ιχνηθέτη ορίστηκε συντελεστής διάχυσης ίσος με  $4e^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (Σχήμα 27).

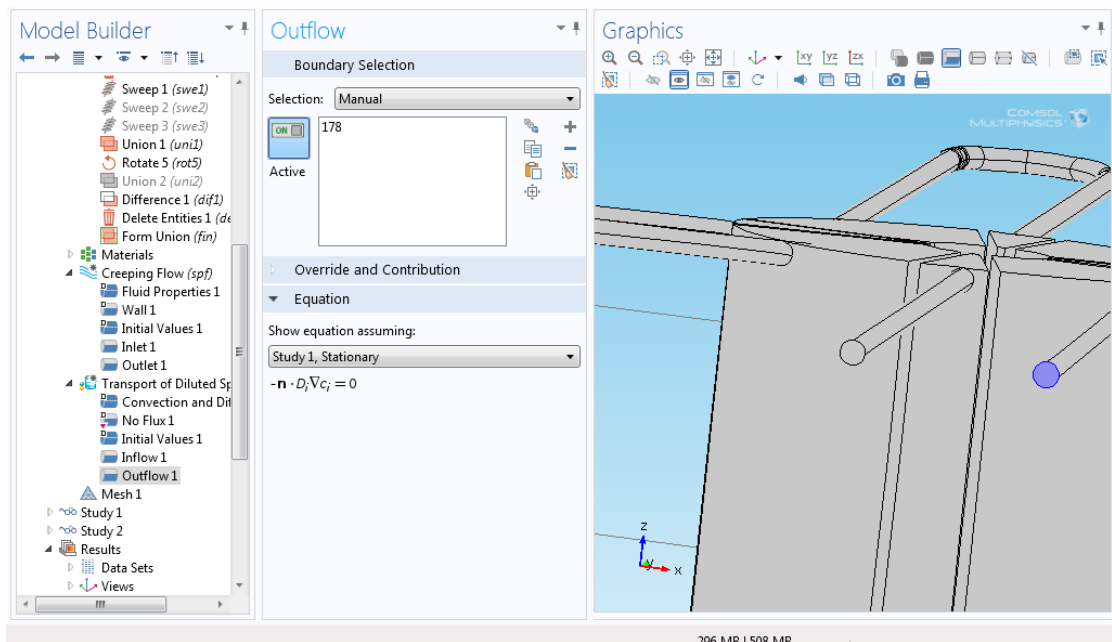


Σχήμα 27: Συνθήκες μοντέλου συναγωγής και διάχυσης.

Στο πεδίο συνθηκών εισροής του διαλύματος ιχνηθέτη ορίστηκε το αντίστοιχο σημείο με χρονικά εξαρτώμενη μελέτη και με αρχική συγκέντρωση  $0,0169 \text{ mol/m}^3$  (Σχήμα 28), ενώ στο πεδίο συνθηκών εκροής ορίστηκαν μόνιμες συνθήκες, αφού η διάχυση της ουσίας συμβαίνει μόνο στην είσοδο (Σχήμα 29).



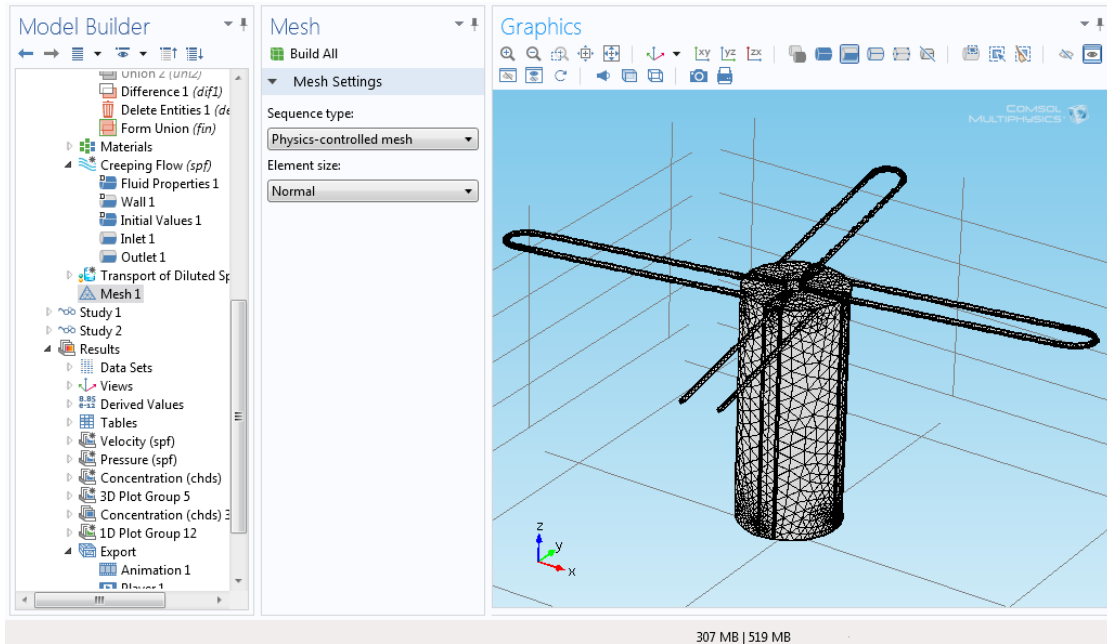
Σχήμα 28: Πεδίο συνθηκών εισροής ιχνηθέτη.



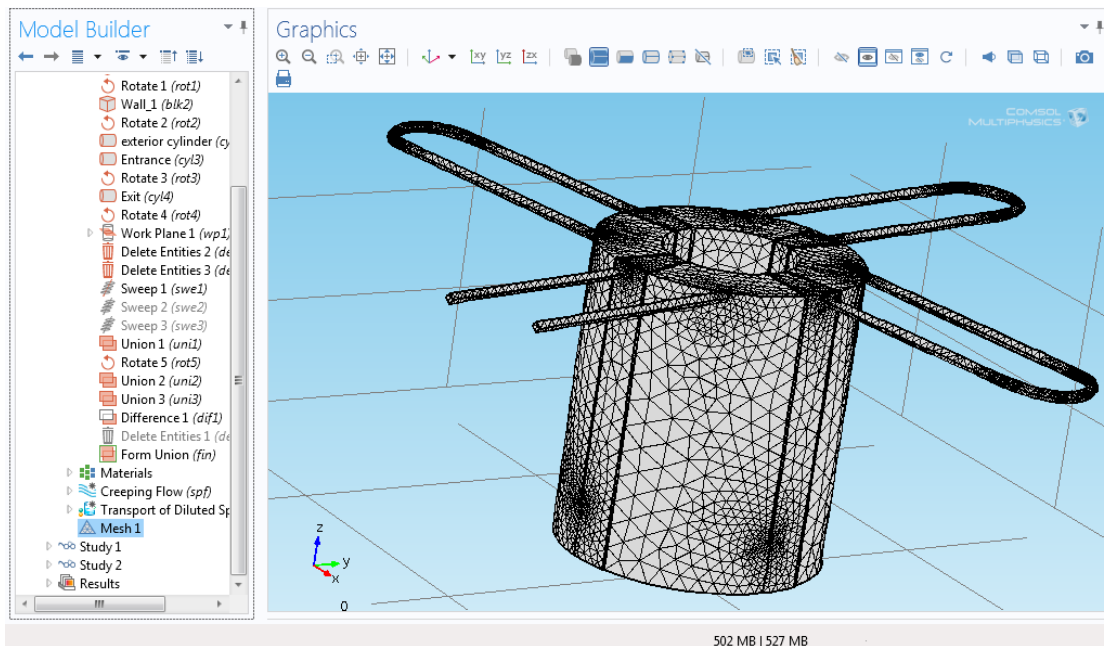
Σχήμα 29: Πεδίο συνθηκών εκροής αντιδραστήρα.

### 2.2.3 Δημιουργία πλέγματος (Mesh mode)

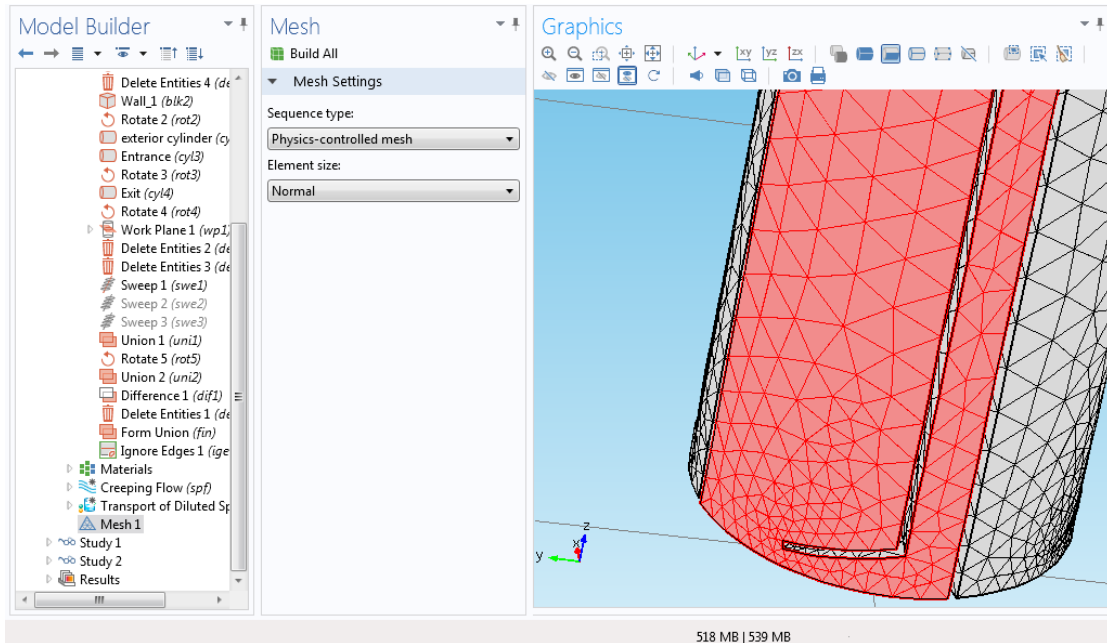
Ακολούθησε η δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Mesh) με επιλογή του φυσικά ελεγχόμενου πλέγματος και με κανονικό μέγεθος στοιχείων. Τα στοιχεία που κατασκευάζονται είναι σχήματος ισόπλευρου τριγώνου. Η προσέγγιση αυτή μειώνει σε ένα βαθμό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αφού έχει σχετικά μικρό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων (κακή ποιότητα). Όμως στην προσπάθεια να γίνει μια ελεγχόμενη δημιουργία πλέγματος με περισσότερο αριθμό στοιχείων οδήγησε σε αποτυχία κατασκευής του πλέγματος λόγω μικρού μεγέθους ασυνεχειών στη γεωμετρία του αντιδραστήρα που προέκυψαν από την εφαρμογή άλγεβρας Boole και την ένωση μεταξύ καμπυλών και γραμμών. Τα προβλήματα ασυνέχειας ήταν μεγαλύτερα στις περιοχές σύνδεσης των σωληνώσεων με τον εξωτερικό κύλινδρο και στους ανακλαστήρες. Τα αποτελέσματα για τα πλέγματα στις τέσσερις περιπτώσεις γεωμετριών φαίνονται στα **Σχήματα 30-33**.



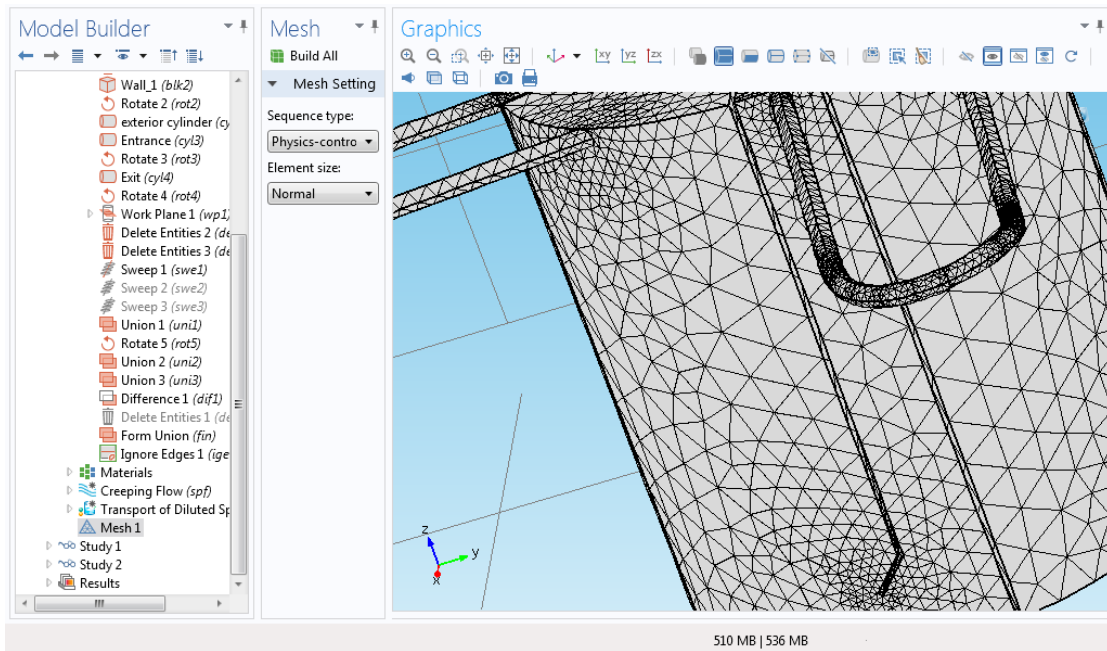
Σχήμα 30: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων εργαστηριακού PABR.



Σχήμα 31: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πιλοτικού PABR.



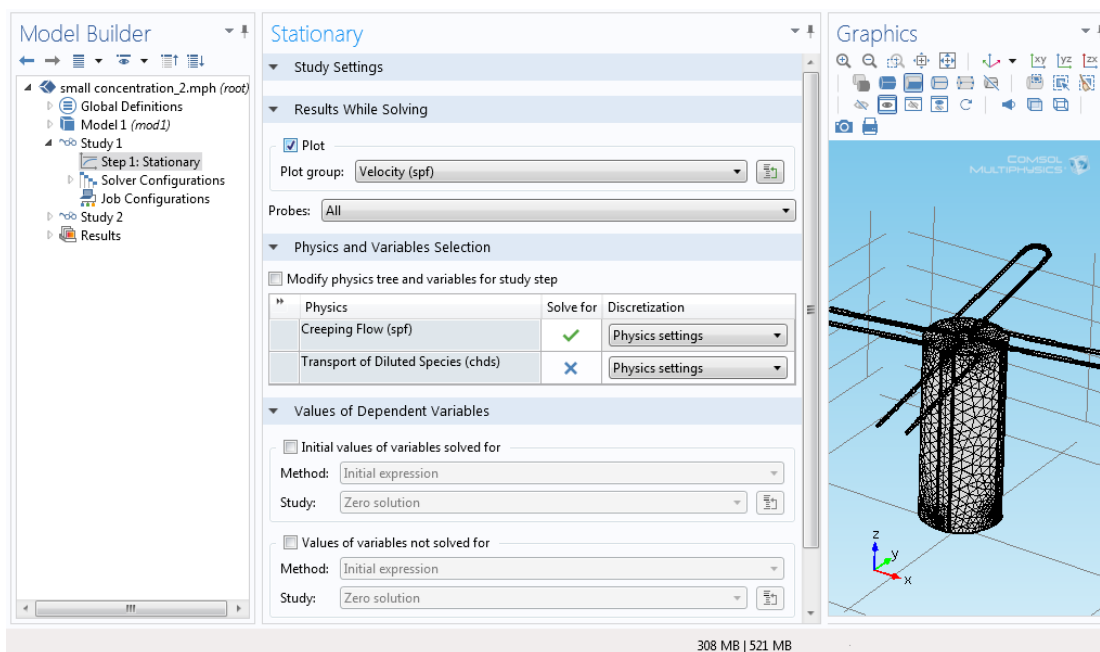
**Σχήμα 32:** Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων εργαστηριακού PABR με ανακλαστήρες.



**Σχήμα 33:** Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πιλοτικού PABR με ανακλαστήρες.

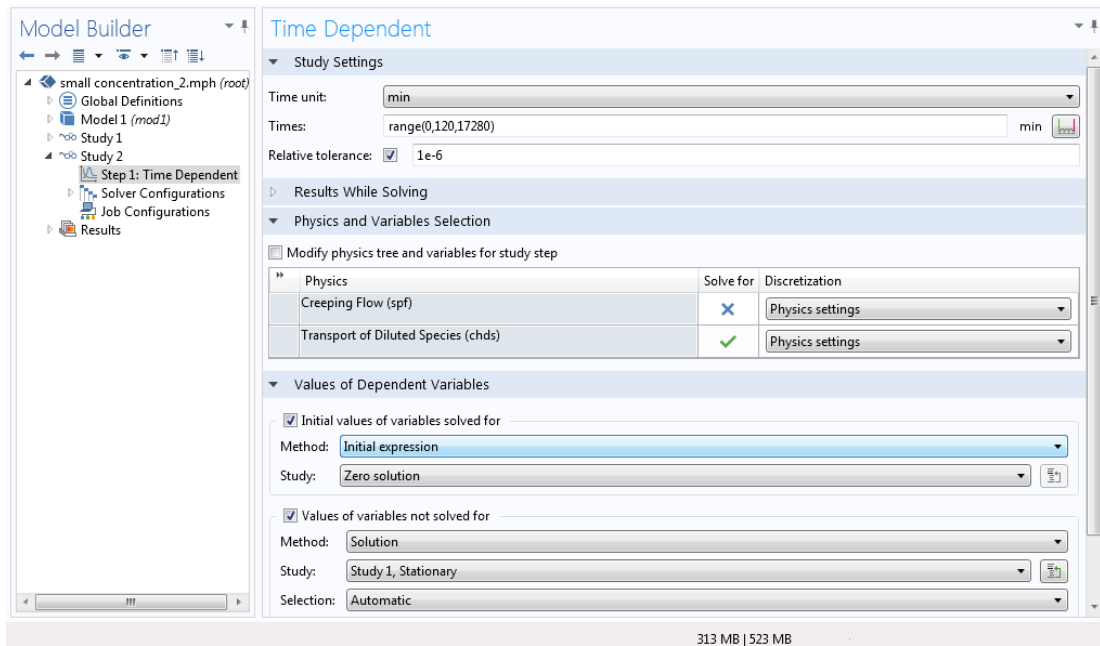
## 2.2.4 Μελέτη και Επίλυση (Study)

Επιλέχθηκαν δυο τύποι μελέτης. Η πρώτη μελέτη ήταν για μόνιμες συνθήκες (Stationary) και αφορούσε την επίλυση του πεδίου ροής και την εξαγωγή αποτελεσμάτων για την κατανομή της ταχύτητας και της πίεσης. Έτσι επιλέχθηκε για επίλυση μόνο το φυσικό μοντέλο Creeping flow και με αρχικές συνθήκες αυτές που ορίστηκαν μέσα στο μοντέλο. Το πεδίο μελέτης για μόνιμη κατάσταση φαίνεται στο Σχήμα 34.



Σχήμα 34: Πεδίο μελέτης του πεδίου ροής για μόνιμη κατάσταση.

Η δεύτερη μελέτη αφορούσε τη χρονική εξάρτηση (Time dependent) της διάχυσης του ιχνηθέτη μέσα στο χώρο του ρευστού, έτσι ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα για την κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη μέσα στον αντιδραστήρα για χρονικό διάστημα 12 ημερών. Έτσι ορίστηκε η αρχή και το τέλος της επίλυσης και το βήμα επίλυσης που ήταν 120 min (2 h). Επίσης μελετήθηκε μόνο το φυσικό μοντέλο συναγωγής και διάχυσης (Transport of diluted species) με εισαγωγή αποτελεσμάτων από την επίλυση του πεδίου ροής της μελέτης για μόνιμη κατάσταση. Ως αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν αυτές που περιγράφονται στο μοντέλο συναγωγής και διάχυσης (Σχήμα 35).



**Σχήμα 35:** Πεδίο μελέτης κατανομής συγκέντρωσης με χρονική εξάρτηση.

### 3. Αποτελέσματα-Συζήτηση

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δυο κύκλων πειραμάτων. Αρχικά ακολουθείται η επίλυση των εξισώσεων για την εύρεση της Κατανομής Χρόνου παραμονής. Αυτό πραγματοποιήθηκε με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος Aquasim όπου αναπτύχθηκε το μοντέλο N αντιδραστήρων πλήρους ανάμειξης (CSTR) σε σειρά.

Μέσω της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος, επιχειρήθηκε η προσομοίωση της ροής εντός των αντιδραστήρων για διάφορες τιμές του N. Κριτήριο για την επιλογή του N, δηλαδή της βέλτιστης σύγκλισης, αποτέλεσε η ελαχιστοποίηση του μέσου όρου του τετραγώνου της διαφοράς των πειραματικών δεδομένων από τα αποτελέσματα του μοντέλου  $(C_{\text{μοντέλου}} - C_{\text{exp}})^2$  με βάση το μοντέλο δοχείων σε σειρά.

#### 3.1 Κύκλοι Πειραμάτων

Στα πειράματα χωρίς εναλλαγή της εισόδου τροφοδοσίας ο αντιδραστήρας αναμένεται να λειτουργεί ως αντιδραστήρας εμβολικής ροής (PFR), δηλαδή με τον ίδιο τρόπο που λειτουργεί και ένας Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (ABR). Στην περίπτωση της εναλλαγής της εισόδου τροφοδοσίας ο PABR αναμένεται να λειτουργεί ως αντιδραστήρας πλήρους ανάμειξης (CSTR), λόγω της ομοιόμορφης παροχής τροφοδοσίας στα τέσσερα διαμερίσματά του. Έτσι θα πλησιάζει τον τρόπο λειτουργίας ενός Αντιδραστήρα ανοδικής ροής διαμέσου στρώσης ιλύος (UASB) (Skiadas 1995).

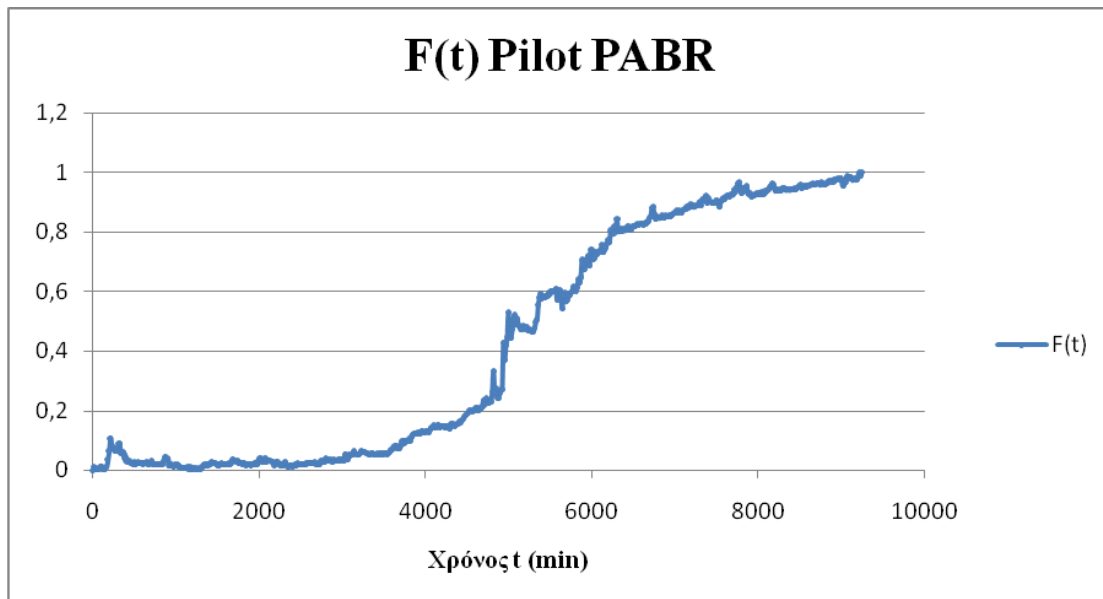
##### 3.1.1 Πειράματα χωρίς εναλλαγή τροφοδοσίας

Τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων που εξήχθησαν από το πείραμα μετατράπηκαν σε τιμές κατανομής F, η οποία είναι το πηλίκο της συγκέντρωσης σε κάθε χρονική στιγμή C προς τη μέγιστη συγκέντρωση, δηλαδή τη συγκέντρωση εισόδου  $C_{in}$ .

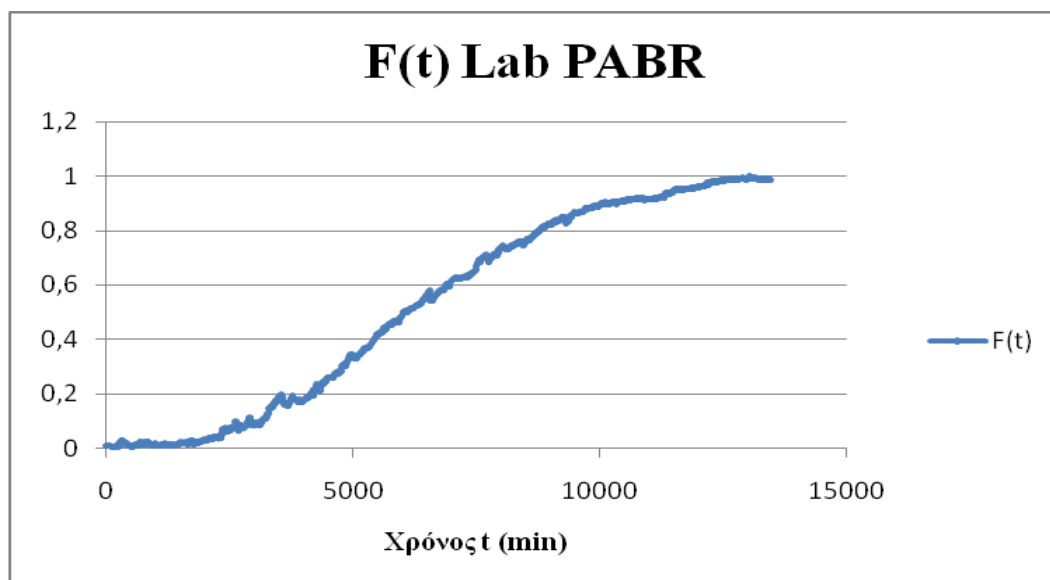
$$F_{(t^*)} = \frac{C}{C_{in}}$$

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα της κατανομής F σε συνάρτηση με το χρόνο t. Σημειώνεται ότι οι χρονικές στιγμές είναι διακριτές, δηλαδή το χρονικό διάστημα μεταξύ των δειγματοληψιών ήταν σταθερό και ίσο με 15 λεπτά.





**Διάγραμμα 4:** Κατανομή F(t) -Πείραμα 1-Πιλοτικός χωρίς εναλλαγή.

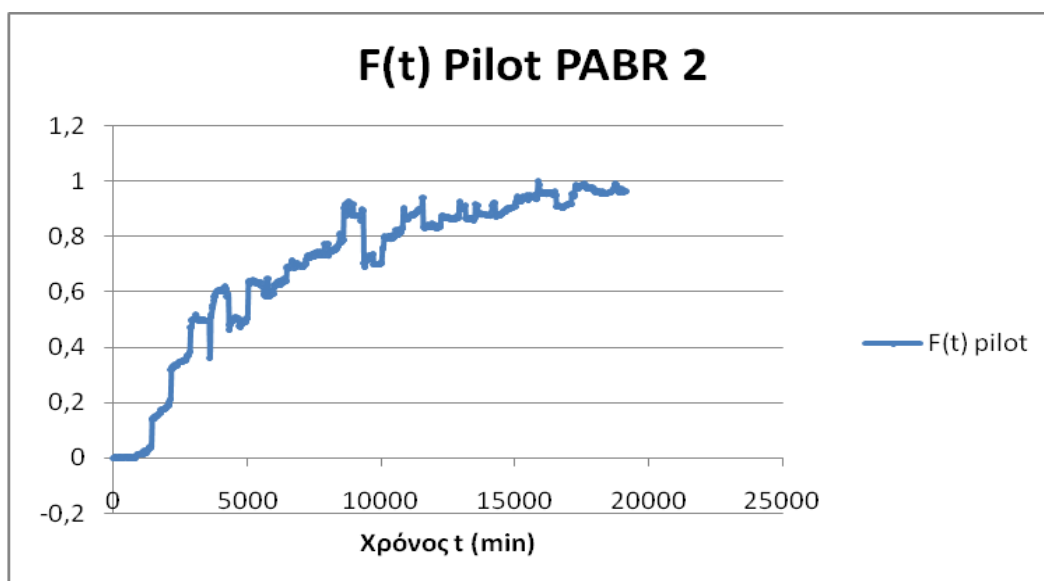


**Διάγραμμα 5:** Κατανομή F(t) -Πείραμα 1-Εργαστηριακός χωρίς εναλλαγή.

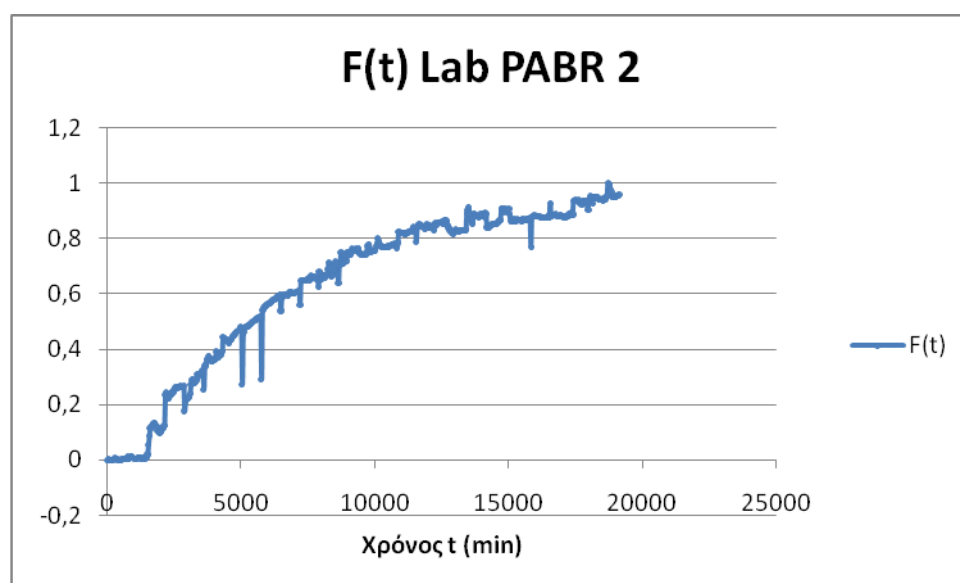
Παρατηρείται ότι για τους δυο αντιδραστήρες ο χρόνος ολοκλήρωσης των πειραμάτων ήταν σημαντικά μικρότερος από τον εμπειρικό χρόνο ολοκλήρωσης, δηλαδή  $3 \text{ HRT} = 12 \text{ d}$ . Για τον πιλοτικό αντιδραστήρα η συγκέντρωση εξόδου εξισώθηκε με τη συγκέντρωση εισόδου μέσα σε  $\sim 1,67 \text{ HRT}$ . Ο αντίστοιχος πραγματικός χρόνος ολοκλήρωσης για τον εργαστηριακό αντιδραστήρα ήταν  $\sim 2,34 \text{ HRT}$ .

### 3.1.2 Πειράματα με εναλλαγή τροφοδοσίας

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα με εναλλαγή τροφοδοσίας για τον πιλοτικό και εργαστηριακό PABR φαίνονται στα Διαγράμματα 6 & 7 αντίστοιχα.



**Διάγραμμα 6:** Κατανομή F(t) -Πείραμα 2-Πιλοτικός με εναλλαγή.



**Διάγραμμα 7:** Κατανομή F(t) -Πείραμα 2-Εργαστηριακός με εναλλαγή.

Στην περίπτωση της εναλλαγής παρατηρείται ότι και στα δυο πειράματα ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι μεγαλύτερος από το χρόνο σχεδιασμού, δηλαδή ~3,3 HRT. Αυτό είναι αναμενόμενο, διότι η περιοδική τροφοδότηση των τεσσάρων εισόδων οδηγεί μεν σε καλύτερη ανάμειξη και πιο απότομη αύξηση της συγκέντρωσης της εκροής αλλά δυσχεραίνει την επίτευξη της εξίσωσης της συγκέντρωσης εισόδου με τη συγκέντρωση εξόδου. Επίσης και στις δυο περιπτώσεις αντιδραστήρων ο χρόνος που απαιτείται ώστε η εκροή να αποκτήσει το 10% της συγκέντρωσης εισόδου είναι

σημαντικά μικρότερος από ότι στα πειράματα χωρίς εναλλαγή (1590 min έναντι 2070 min για τον εργαστηριακό και 1440 min έναντι 3795 min).

Βέβαια η απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των των αποτελεσμάτων που αφορούν τον PABR εργαστηριακής και πιλοτικής κλίμακας είναι σημαντική και αποτελεί ένδειξη ότι μπορεί να εμφανίζεται λόγω της κλιμάκωσης μεγέθους. Έχει παρατηρηθεί ότι η κλιμάκωση μεγέθους επιφέρει αλλαγές στη ροή (αριθμός Reynolds) και ειδικά σε περιπτώσεις ροής με τη συμμετοχή ανακλαστήρων (Malcolm Pirnie, 1991).

Τέλος στα δυο διαγράμματα παρατηρούνται κάποιες ξαφνικές διαταραχές, όπου η συγκέντρωση μειώνεται ξαφνικά και μετά από σύντομο χρονικό διάστημα επανέρχεται σε ανοδική τάση. Το γεγονός αυτό συνέβη λόγω της αρχής λειτουργίας του PABR. Ο PABR λειτουργεί με την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων, αφού τα γεμάτα διαμερίσματά του συνδέονται μεταξύ τους μέσω εξωτερικών βανών και σωληνώσεων. Παρατηρήθηκε ότι αν κάποια από τις συστοιχίες των βανών βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από το έδαφος σε σχέση με τις άλλες, τότε το διαμέρισμα που τροφοδοτεί έχει χαμηλότερη στάθμη. Την ίδια στιγμή η συστοιχία των βανών που βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το έδαφος συσσωρεύει ρευστό στο διαμέρισμα που τροφοδοτεί. Αν γίνει εναλλαγή της εισόδου τροφοδοσίας στη συστοιχία που τροφοδοτούσε το συσσωρευμένο διαμέρισμα, τότε γίνεται έκπλυση του αντιδραστήρα με το πλεονάζον ρευστό να εκρέεται και έτσι να μειώνεται ή να αυξάνεται απότομα η συγκέντρωση της εκροής.

Για το λόγο αυτό έγινε βαθμονόμηση της συστοιχίας των βανών με χρήση αλφαδιού, έτσι ώστε να βρίσκονται όλες στο ίδιο ύψος. Η ρύθμιση του ύψους έγινε μέσω των τριπόδων πάνω στα οποία είναι βιδωμένες οι συστοιχίες.

### Εύρεση Υδραυλικού «νεκρού» χώρου

Πραγματοποιήθηκε μαθηματική επεξεργασία μέσω του υπολογιστικού προγράμματος Origin 8.0. Σκοπός ήταν , αρχικά, η κατασκευή του διαγράμματος  $F(t)$ , ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του διαγράμματος  $E(t)$  μέσω διαφορίσης του διαγράμματος  $F(t)$  (επίλυση του τύπου 1).

$$E = \frac{dF}{dt} \quad (1)$$

Έπειτα έγινε διερεύνηση της εξίσωσης που προσομοιάζει καλύτερα την κατανομή  $E$  (fitting). Δοκιμάστηκαν διάφοροι πιθανοί τύποι μη γραμμικών καμπύλων όπως η συναρτηση Boltzmann, η σιγμοειδής καμπύλη και η εκθετική. Συγκεκριμένα, από τη γραμμή εντολών, πατούμε την επιλογή

Analysis → Fitting → Nonlinear curve fit

και εκεί γίνεται η δοκιμή των καμπύλων μέσω στατιστικών δοκιμών (ANOVA). Κριτήριο επιλογής της κατάλληλης καμπύλης ήταν η μεγιστοποίηση του  $R^2 (>0,99)$  και να έχει επιτευχθεί σύγκλιση της καμπύλης με τα πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος της κατανομής  $C_{βημ}$  από τον τύπο (2)

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} \quad (2)$$

Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατός ο υπολογισμός του Υδραυλικού «νεκρού» χώρου του αντιδραστήρα (hydraulic dead space) με βάση τον τύπο 3

$$V_d = \left(1 - \frac{\bar{t}}{HRT}\right) * 100\% \quad (3)$$

Τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν μαζί με τα στοιχεία από το πείραμα με εναλλαγή στον **Πίνακα 7**.

**Πίνακας 7:** Υδραυλικός «νεκρός» χώρος για τους δυο κύκλους πειραμάτων.

Αντιδραστήρας/Πείραμα	Υδραυλικός «νεκρός» χώρος $V_d\%$
Εργαστηριακός χωρίς εναλλαγή	8,8
Εργαστηριακός με εναλλαγή	66,1
Πιλοτικός χωρίς εναλλαγή	7,5
Πιλοτικός με εναλλαγή	20,8

Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν για την περίπτωση της μη εναλλαγής συμφωνούν με την εργασία των Liu et al. (2007), οι οποίοι διεξήγαγαν πειράματα ΚΧΠ σε ΡΑΒΡ ενεργού όγκου 18L (παρόμοια χωρητικότητα με του εργαστηριακού) και για  $T=\infty$  (ως ΑΒΡ) ο «νεκρός» χώρος ήταν  $V_d=9,11\%$ .

Επίσης τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με αυτά των Li et al. (2015). Τα πειράματα που πραγματοποιήσαν αφορούσαν έναν παραδοσιακό ΑΒΡ και έναν καινοτόμο ΑΒΡ (ΟΦΡ), όπου οι ανακλαστήρες του έχουν πτυχώσεις (σχήμα ακορντεόν), οι οποίες οδηγούν σε αύξηση της τυρβώδους ροής και μειώνουν έτσι το «νεκρό» χώρο  $V_d$ . Οι ΥΧΠ ήταν σημαντικά μικρότεροι (4-10 h), παρόλα αυτά οι αντίστοιχες τιμές  $V_d$  ήταν κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα και συγκεκριμένα 9,78 % για τον κλασσικό ΑΒΡ και 6,54% για τον ΟΦΡ

Τέλος τα πειραματικά αποτελέσματα είχαν μικρότερες τιμές «νεκρού» χώρου σε σχέση με πειράματα ΚΧΠ σε ΑΒΡ με αντίστοιχους ΥΧΠ (Grobicki και Stuckey, 1991).

Η σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων των πειραμάτων με εναλλαγή έγιναν με τους αντίστοιχους «νεκρούς» χώρους που μετρήθηκαν σε πειράματα ΚΧΠ ενός CSTR και ενός UASB. Έτσι ο «νεκρός» χώρος  $V_d$  του πιλοτικού συμφωνεί με τη

λειτουργία ενός UASB (26,5%) (Peña et al, 2006), ενώ του εργαστηριακού με τη λειτουργία ενός CSTR (52,5%) (Torres et al, 2000).

Παρατηρείται ότι η επίδραση της εναλλαγής τροφοδοσίας στην αύξηση του «νεκρού» χώρου είναι καταλυτική. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός ότι η εναλλαγή των εισόδων του ρευστού προκαλούν διαταραχή στην ταχύτητα ροής. Έτσι σε σημεία του αντιδραστήρα, όπως τα τοιχώματα, οι γωνίες μεταξύ των τοιχωμάτων και των ανακλαστήρων αλλά και των ομόκεντρων κυλίνδρων, το ρευστό έρχεται σε επαφή με τις περισσότερες ακίνητες επιφάνειες ή ανακλάται σε αυτές με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας ροής. Ειδικά στην περίπτωση του εργαστηριακού, η μικρή αναλογία ακτίνων συμβάλλει στη συμμετοχή μεγαλύτερου ποσοστού ακίνητων σωματιδίων ρευστού. Εκτός τούτου το σχήμα των ανακλαστήρων του εργαστηριακού έχει πιο απότομες γωνίες σε σχέση με τον πιλοτικό. Τέλος σε αυτά προστίθεται το γεγονός ότι ίσως να αυξάνεται ο αριθμός των επιβραδυνόμενων σωματιδίων ρευστού μέχρι η εισερχόμενη ροή και η ροή μέσα στον αντιδραστήρα να αποκτήσουν ξανά την ίδια διεύθυνση.

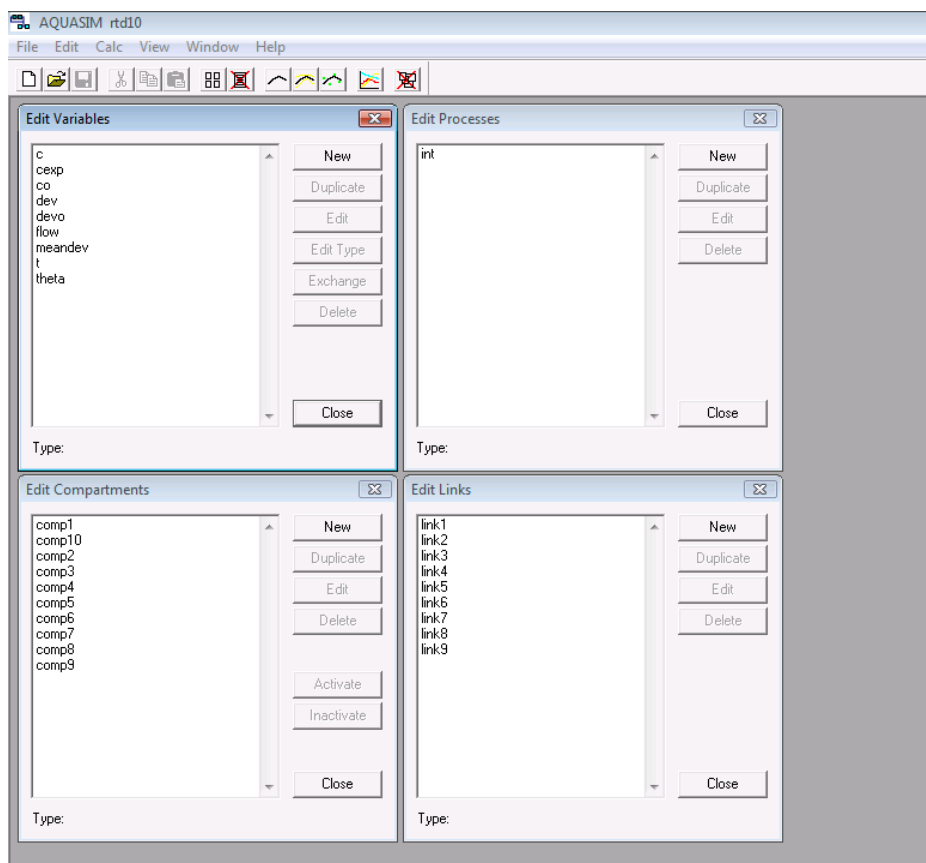
Μετά την εύρεση των βασικών υδραυλικών παραμέτρων ακολούθησε η μοντελοποίηση της ροής του PABR με βάση το Μοντέλο Δοχείων σε Σειρά μέσω του λογισμικού AQUASIM 2.0.

### **3.2 Επεξεργασία με λογισμικό Aquasim**

Το λογισμικό AQUASIM αναπτύχθηκε στο Ομοσπονδιακό Πολυτεχνείο της Ζυρίχης, Ελβετία (Eidgenössische Technische Hochschule, ETH, Zürich) και συγκεκριμένα στο Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο της Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Ελβετία (EAWAG). Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε από τους Reichert και συνεργάτες (Reichert 1994,1995,1998) και η χρήση του αφορά την προσομοίωση υδατικών συστημάτων. Η πρώτη έκδοση του λογισμικού (AQUASIM 1.0.) χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τους σκοπούς του Ινστιτούτου. Η δεύτερη έκδοση (AQUASIM 1.0.0.1.) είναι διαθέσιμη για το ευρύ κοινό μέσω της ιστοσελίδας του ινστιτούτου. Επίσης έχει αναπτυχθεί η νέα έκδοση AQUASIM 2.0, η οποία είναι η πλατφόρμα στην οποία έγινε η μοντελοποίηση.

Το λογισμικό περιέχει ένα σύστημα συνήθων διαφορικών, μερικών διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων. Η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιείται με τη χρήση του αλγορίθμου DASSL (Petzold 1983).

Η διαδικασία μοντελοποίησης με το λογισμικό AQUASIM 2.0 απαιτεί τον ορισμό των συνθηκών σε τέσσερα πεδία: μεταβλητές, διαδικασία, διακριτά στοιχεία (διαμερίσματα) και συνδέσεις στοιχείων. Τα πεδία αυτά βρίσκονται με τη μορφή παραθύρων τα οποία ορίζουν το πρόβλημα που θα λύσει το πρόγραμμα (**Σχήμα 36**).



**Σχήμα 36:** Παράθυρα εργασιών στο περιβάλλον του AQUASIM 2.0.

### Μεταβλητές

Ορίστηκαν οι εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου. Συγκεκριμένα:

- Χρόνος t. Ορίστηκε το μέγεθος και η μονάδά μέτρησης (min)
- Συγκέντρωση μοντέλου c. Ορίστηκαν οι μονάδες μέτρησης ( $\text{kg/m}^3$ ), το είδος της (dynamic, volume) και τα όρια ακρίβειας των εξαγόμενων μετρήσεων.
- Πειραματική συγκέντρωση cexp. Εισάγονται τα δεδομένα του πειράματος δηλαδή η στήλη με τις χρονικές στιγμές των δειγματοληψιών και οι πειραματικές μετρήσεις της συγκέντρωσης. Ορίζονται τα όρια της τυπικής αποκλίσης και το είδος του κριτηρίου παρεμβολής. Επιλέχθηκε η γραμμική παρεμβολή.
- Παράμετροι που εξετάζονται. Πρόκειται για την τυπική απόκλιση (dev), το είδος της ροής (flow), το μέσο όρο της τυπικής απόκλισης και τον αδιάστατο αριθμό ( $\theta$ ).

### Διαμερίσματα

Τα διαμερίσματα (compartments) σε αυτό το λογισμικό προσομοιάζουν (το καθένα) τη συμπεριφορά ενός CSTR. Από αυτό το παράθυρο επιλέγουμε ποιον αριθμό N

ισοδύναμων CSTR στη σειρά θα εξετάσουμε για να δούμε αν συγκλίνει στην κατανομή  $F(t)$  του εκάστοτε πειράματος. Στο καθένα από αυτά ορίζονται οι αρχικές συνθήκες, όπως η αρχική συγκέντρωση και ο όγκος του που κάθε φορά προκύπτει από το πηλίκο του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα με τον αριθμό των διαμερισμάτων που επιλεγόταν.

### Συνδέσεις

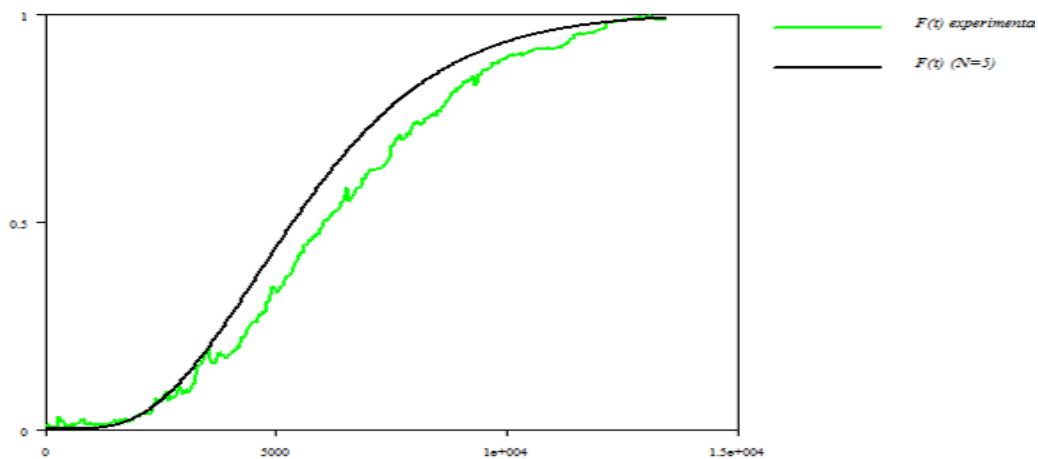
Το χωρίο αφορά τον τρόπο σύνδεσης των διακριτών διαμερισμάτων, όπου πέρα από αυτό ορίζονται η εισροή και εκροή του του αντιδραστήρα

### Διαδικασία

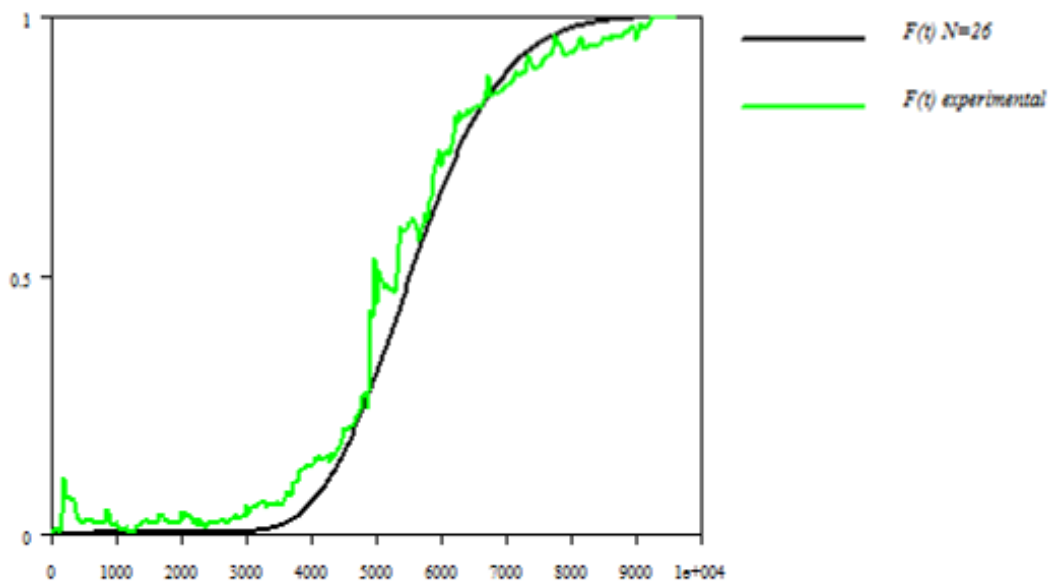
Σε αυτό το παράθυρο τοποθετούνται οι προς επίλυση διαδικασίες. Στην περίπτωση μας ήταν η γραμμική παρεμβολή (interpolation)

Στη συνέχεια επιλέγεται η κατασκευή γραφικής παράστασης (plot), πάνω στην οποία κατασκευάζεται η πειραματική κατανομή  $F(t)$  και η κατανομή από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου για διάφορες τιμές του  $N$ . Παράλληλα μέσω της εντολής «plot to list» τα δεδομένα του μοντέλου μεταφέρονται σε περιβάλλον Excel. Μέσω της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος, επιχειρήθηκε η προσομοίωση της ροής εντός των αντιδραστήρων για διάφορες τιμές του  $N$ . Κριτήριο για την επιλογή του  $N$ , δηλαδή της βέλτιστης σύγκλισης, αποτέλεσε η ελαχιστοποίηση του μέσου όρου του τετραγώνου της διαφοράς των πειραματικών δεδομένων από τα αποτελέσματα του μοντέλου  $(C_{\text{μοντέλου}} - C_{\text{exp}})^2$ .

Στα **Διαγράμματα 8** και **9** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος χωρίς εναλλαγή σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω του υπολογιστικού προγράμματος Aquasim 2.0 για το μοντέλο  $N$  αντιδραστήρων CSTR σε σειρά.



**Διάγραμμα 8:** Πειραματική κατανομή χρόνου παραμονής χωρίς εναλλαγή σημείου εισόδου και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος Aquasim 2.0 με  $N=5$  για τον PABR 15L.



**Διάγραμμα 9:** Πειραματική κατανομή χρόνου παραμονής χωρίς εναλλαγή σημείου εισόδου και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος Aquasim 2.0 με  $N=26$  για τον PABR 80L.

Παρατηρείται ότι στα πειράματα χωρίς εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας ( $HRT=4d$ ), ο PABR των 15L προσομοιάζεται βέλτιστα από το μοντέλο των  $N=5$  αντιδραστήρων σε σειρά. Ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος αλλά παρόμοιος σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των Liu et al. (2007), όπου ο αντίστοιχος αριθμός είναι  $N=7,15$ . Επίσης βρίσκεται πολύ κοντά στον πραγματικό αριθμό διαμερισμάτων

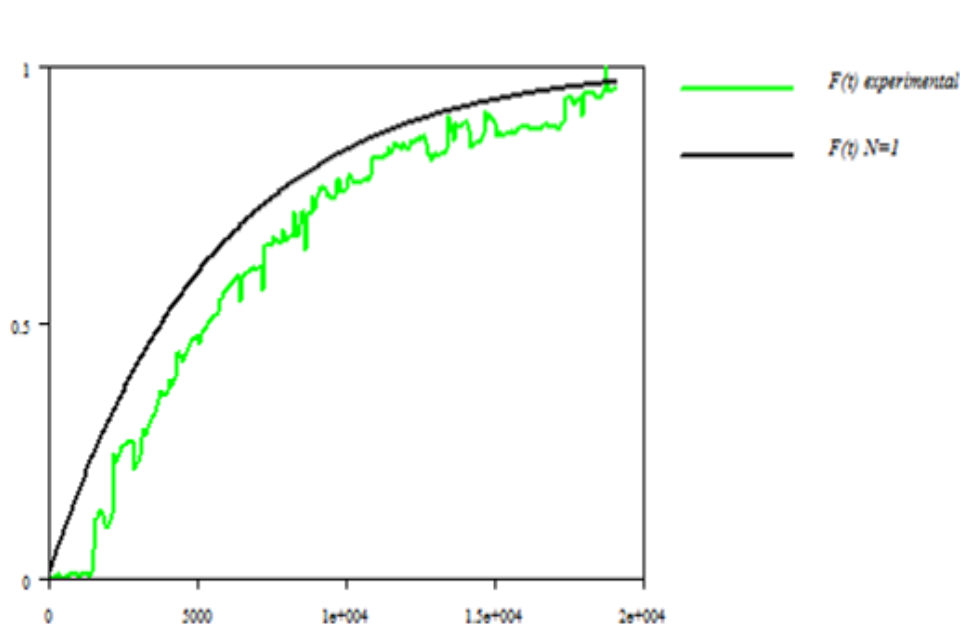


(4), γεγονός που σημαίνει ότι κάθε διαμέρισμα του εργαστηριακού έχει πολύ καλή αναμειξιμότητα. Φαίνεται, λοιπόν, ότι το μοτίβο ανάμειξης του εργαστηριακού είναι ανάμεσα στο μοντέλο εμβολικής ροής και της πλήρους ανάμειξης.

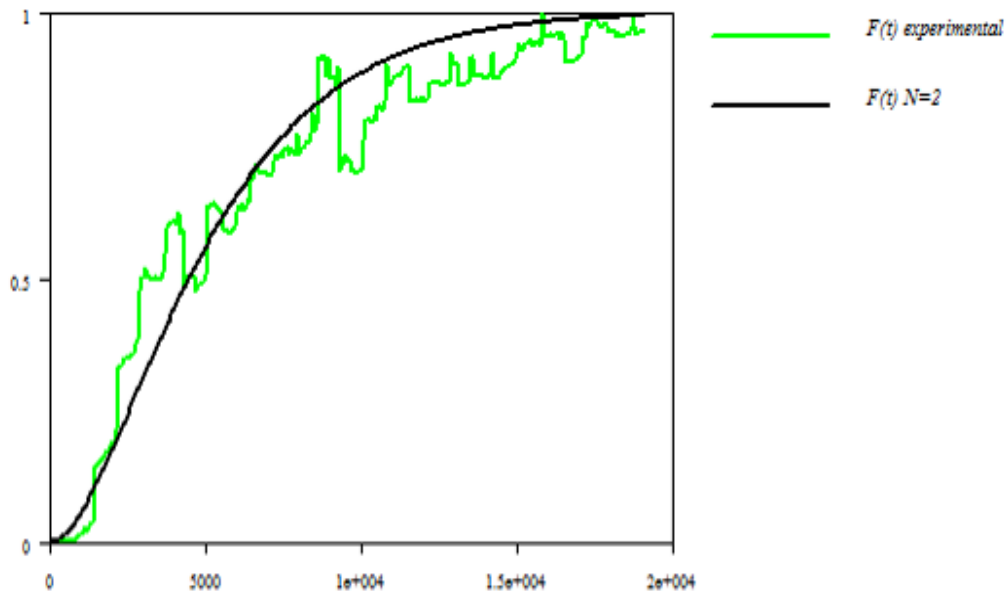
Όσον αφορά τον PABR των 80L προσομοιάζεται βέλτιστα από το μοντέλο των  $N=26$  αντιδραστήρων σε σειρά, προσεγγίζοντας ουσιαστικά την εμβολική ροή. Η προσέγγιση της εμβολικής ροής ίσως οφείλεται στο σχεδιασμό των ανακλαστήρων, ο οποίος ακολουθεί το καθοδικό πεδίο ροής, δημιουργώντας συγκεκριμένα προφίλ συγκεντρώσεων και διατηρώντας τη διαστρωμάτωσή τους.

Αντίθετα, λόγω τεχνικής αδυναμίας, οι ανακλαστήρες στον εργαστηριακό έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε το ρευστό που βρίσκεται στο καθοδικό τμήμα του διαμερίσματος να πηγαίνει στον πυθμένα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί καλές συνθήκες ανάμειξης αλλά καθιστά δυσκολότερη την ανάπτυξη ροϊκών γραμμών που να ανταποκρίνονται στο προφίλ συγκεντρώσεων που αναφέρθηκε παραπάνω.

Στα **Διαγράμματα 10 & 11** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα του πειράματος με εναλλαγή σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω του υπολογιστικού προγράμματος Aquasim 2.0 για το μοντέλο  $N$  αντιδραστήρων CSTR σε σειρά.



**Διάγραμμα 10:** Πειραματική κατανομή χρόνου παραμονής με εναλλαγή του σημείου εισόδου και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος Aquasim 2.0 (a) με  $N=1$  για τον PABR 15L.



**Διάγραμμα 11:** Πειραματική κατανομή χρόνου παραμονής με εναλλαγή του σημείου εισόδου και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος Aquasim 2.0 με  $N=2$  για τον PABR 80L.

Στα πειράματα με εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας ( $HRT=4days$ ,  $T=2days$ ), η συμπεριφορά των δύο αντιδραστήρων γίνεται παρόμοια. Ο PABR των 15L συγκλίνει με τη συμπεριφορά ενός ( $N=1$ ) αντιδραστήρα πλήρους ανάμειξης, ενώ ο PABR των 80L συγκλίνει με το μοντέλο των  $N=2$  αντιδραστήρων πλήρους ανάμειξης σε σειρά. Από τα ανωτέρω Διαγράμματα παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των δυο αντιδραστήρων έγκειται στο γεγονός ότι ο πιλοτικός PABR είναι πιο επιρρεπής στις διαταραχές, με αποτέλεσμα την αργή απόκριση του συστήματος σε αντίθεση με τον εργαστηριακό, ο οποίος ανταποκρίνεται πιο άμεσα, λόγω του ευέλικτου μοτίβου ανάμειξης που διαθέτει.

### 3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης Comsol Multiphysics

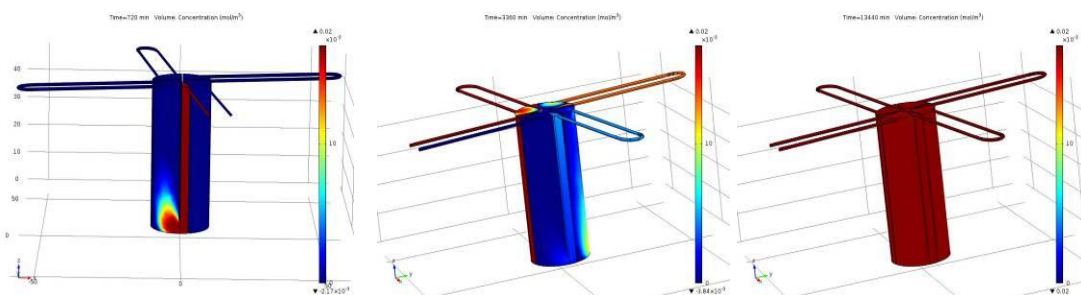
Για την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ρεολογικής συμπεριφοράς των PABR, προσομοιώθηκε το πείραμα κατανομής χρόνου παραμονής χωρίς εναλλαγή του σημείου εισόδου για τους δύο αντιδραστήρες μέσω του προγράμματος COMSOL Multiphysics® Version 4.4. Επίσης, με γνώμονα τα δεδομένα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία, εξετάστηκε η επίδραση των ανακλαστήρων στη ρεολογική συμπεριφορά για την περίπτωση του εργαστηριακού PABR.

#### 3.3.1 Προσομοίωση Κατανομής Χρόνου Παραμονής

Από την προσομοίωση προέκυψαν τα τρισδιάστατα σχήματα που απεικονίζουν την κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη σε κάθε σημείο του ωφέλιμου όγκου των αντιδραστήρων για κάθε χρονική στιγμή, από το χρόνο  $t=0$  έως και το τέλος του πειράματος, δηλαδή μετά από το πέρας τριών χρόνων παραμονής ( $t=12$  days).

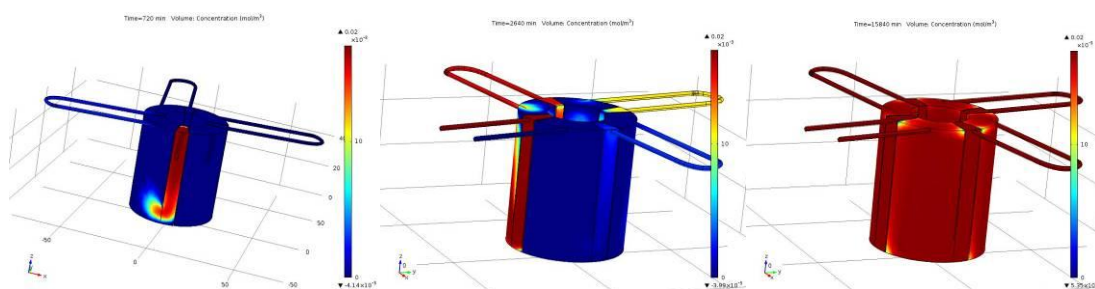
Το προφίλ της συγκέντρωσης αντικατοπτρίζεται με χρήση των χρωμάτων του ορατού. Έτσι η μηδενική συγκέντρωση μέσα στο χώρο του αντιδραστήρα αντιστοιχεί στο χώρο που είναι χρωματισμένος με μπλε χρώμα. Καθώς τα χρώματα πηγαίνουν προς το κόκκινο η συγκέντρωση αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη συγκέντρωση, η οποία εκφράζεται με κόκκινο χρώμα.

Στο **Σχήμα 37** παρουσιάζεται η κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη μέσα στον εργαστηριακό αντιδραστήρα των 15L για τις χρονικές στιγμές  $t=12$  h,  $t=44$  h και  $t=264$  h. Η πρώτη χρονική στιγμή ( $t=12$ h) αντιστοιχεί στο αρχικό στάδιο της προσομοίωσης, όπου ο ιχνηθέτης διαχέεται από την κάθοδο προς την άνοδο του πρώτου διαμερίσματος. Η δεύτερη χρονική στιγμή ( $t=44$ h) αντιστοιχεί στην πρώτη μη μηδενική μέτρηση συγκέντρωσης στην έξοδο του αντιδραστήρα, ενώ η τελευταία χρονική στιγμή ( $t=264$ h) αναφέρεται στην πρώτη μέτρηση όπου η συγκέντρωση εξόδου εξισώνεται με την αρχική συγκέντρωση (συγκέντρωση εισόδου).



**Σχήμα 37:** Κατανομή συγκέντρωσης ιχνηθέτη μέσα στον PABR 15 L για (a)  $t=12$ h, (b)  $t=44$ h και (c)  $t=264$ h.

Στο **Σχήμα 38** παρουσιάζεται η κατανομή της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη μέσα στον πιλοτικό αντιδραστήρα των 80L και οι αντίστοιχες χρονικές στιγμές είναι  $t=12$  h,  $t=56$  h και  $t=224$  h

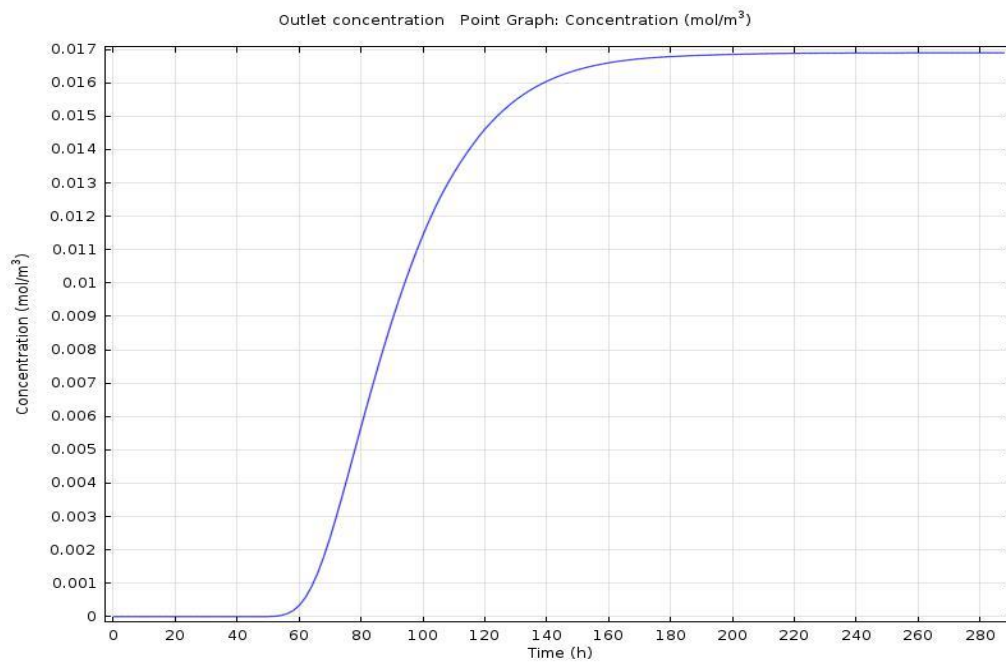
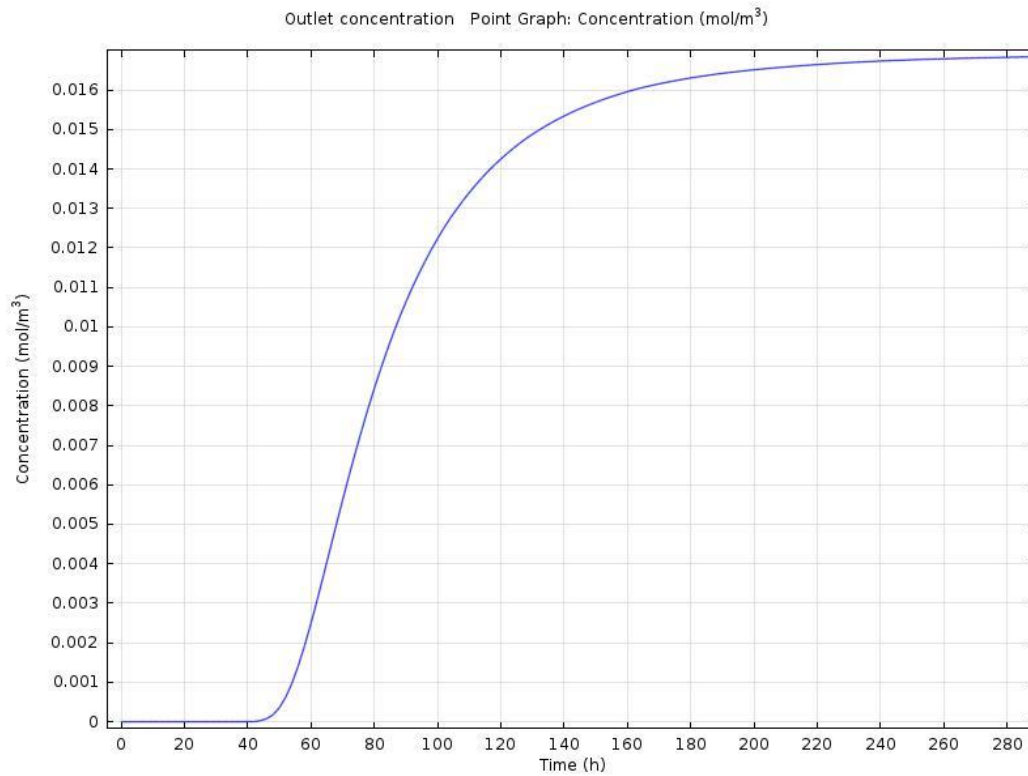


**Σχήμα 38:** Κατανομή συγκέντρωσης ιχνηθέτη μέσα στον PABR 80 L για (a)  $t=12$ h, (b)  $t=56$ h και (c)  $t=224$ h.

Στα **Διάγραμμα 12** παρουσιάζονται τα διαγράμματα των κατανομών συγκέντρωσης για τους δυο αντιδραστήρες, όπως προέκυψαν από το μοντέλο προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι ο πιλοτικός PABR προσομοιάζει περισσότερο την εμβολική ροή. Αυτό συμβαίνει, καταρχάς, λόγω του γεγονότος ότι ο ιχνηθέτης καθυστερεί περισσότερο να φτάσει στην έξοδο (~23% του HRT) σε σχέση με τον εργαστηριακό (~18% του HRT). Αυτό μπορεί να οφείλεται στην κλιμάκωση μεγέθους. Όπως φαίνεται στο σχήμα η μεγαλύτερη αναλογία ακτινών ομόκεντρων κυλίνδρων εντείνει τα φαινόμενα «νεκρού χώρου» και αυτό συμβαίνει στις γωνίες που σχηματίζονται ανάμεσα στα τοιχώματα των ανακλαστήρων και των ομόκεντρων κυλίνδρων.

Εκτός τούτου το αποτέλεσμα της εμβολικής ροής για τον πιλοτικό PABR επιβεβαιώνεται από το χρόνο που απαιτείται για να εξισωθεί η συγκέντρωση στην έξοδο με την συγκέντρωση στην είσοδο. Συγκεκριμένα ο πιλοτικός απαιτεί 1,75 HRT ενώ ο εργαστηριακός απαιτεί 2,29 HRT. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι αφότου το ρευστό με μηδενική συγκέντρωση εξέρχεται από τον πιλοτικό αντιδραστήρα, τα υπόλοιπα εξερχόμενα γειτονικά στρώματα ρευστού έχουν συνεχώς αυξανόμενες συγκεντρώσεις με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η προσέγγιση της μέγιστης συγκέντρωσης (συγκέντρωση εισόδου). Στον εργαστηριακό PABR επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων ρευστού με αποτέλεσμα να έχουν παραπλήσιες συγκεντρώσεις και να καθυστερεί η προσέγγιση της μέγιστης τιμής. Να σημειωθεί ότι ο χρόνος ολοκλήρωσης υπολογίστηκε με την αφαίρεση του χρονικού διαστήματος, όπου ο αντιδραστήρας έχει μηδενική συγκέντρωση στην εκροή.

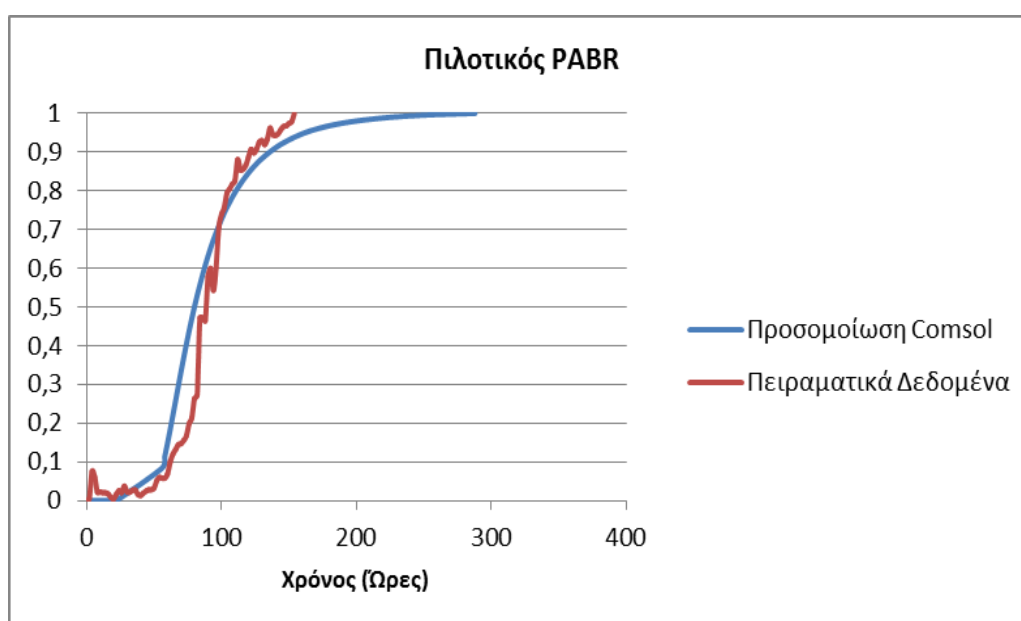
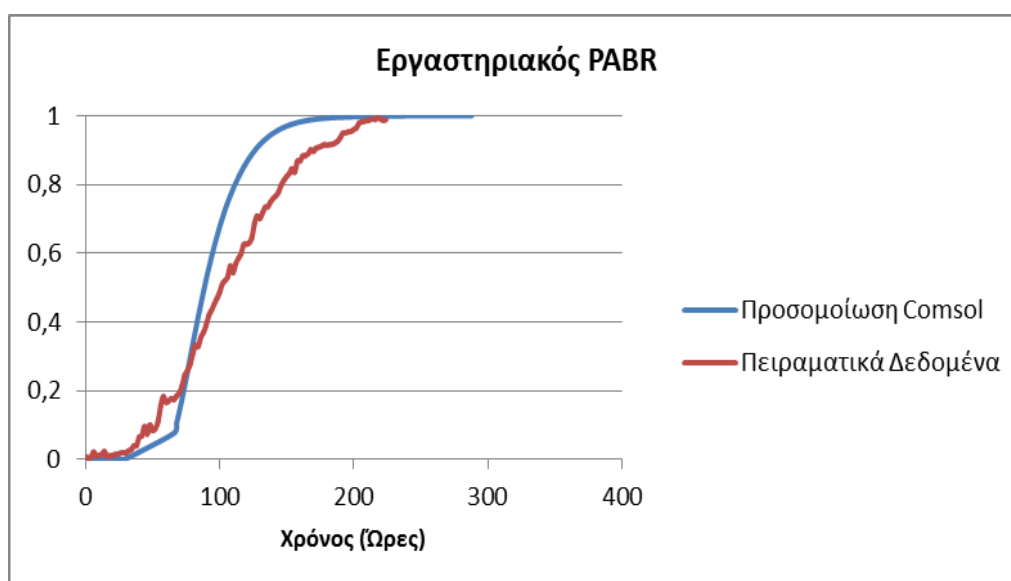
Τέλος, παρατηρείται ότι ο πιλοτικός καθυστερεί να δημιουργήσει πλατώ στη μέγιστη συγκέντρωση (0,67 HRT έναντι 0,25 HRT του εργαστηριακού). Το πλατώ αυτό συνδέεται άμεσα με τους «νεκρούς» χώρους ροής ρευστού. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλατώ τόσο περισσότερες τιμές συγκέντρωσης απέχουν από το μέσο της κατανομής  $t_{\text{mean}}$  με αποτέλεσμα την αύξηση του  $V_d$ . Έτσι δυσχεραίνεται η καλή ανάμειξη του ρευστού και σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη απόκλιση από το μοντέλο πλήρους ανάμειξης εμφανίζεται η παραπάνω διαφορά μεταξύ των PABR.



**Σχήμα 5**

**Διάγραμμα 12:** Διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης στο σημείο εξόδου συναρτήσει του χρόνου για τους PABR 15 (a) και 80 L (b) όπως προέκυψαν από τη μοντελοποίηση με το πρόγραμμα COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> Version 4.4.

Στο **Διάγραμμα 13** παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τα διαγράμματα της κατανομής της (ανηγμένης στη μονάδα) συγκέντρωσης στο σημείο εξόδου συναρτήσει του χρόνου για τους PABR 15 και 80 L αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση μέσω του υπολογιστικού προγράμματος COMSOL Multiphysics® Version 4.4. Στις καμπύλες προσομοίωσης που κατασκευάστηκαν με εξαγωγή των δεδομένων από περιβάλλον Comsol σε περιβάλλον Excel αφαιρέθηκαν κάποιες αρχικές μετρήσεις της προσομοίωσης στις οποίες η σύγκλιση του μοντέλου είχε αποτύχει, ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Το γεγονός αυτό προκάλεσε τα φαινόμενα ασυνέχειας που παρατηρούνται στις αρχικές μετρήσεις. Επίσης σημειώνεται ότι το βήμα προσομοίωσης ήταν 60 λεπτά και για το λόγο αυτό στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνονται μόνο οι μετρήσεις προσομοίωσης με τις αντίστοιχες πειραματικές.



**Διάγραμμα 13:** Διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης στο σημείο εξόδου συναρτήσει του χρόνου για τους PABR 15 (a) και 80 L (b) σε σχέση με τα

αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος COMSOL Multiphysics® Version 4.4.

Παρατηρείται ότι η κατανομή της συγκέντρωσης εξόδου, όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση, προσεγγίζει ικανοποιητικά την κατανομή των πειραματικών δεδομένων και στις δύο περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τον πιλοτικό PABR προσεγγίζουν καλύτερα την κατανομή των πειραματικών δεδομένων σε σχέση με αυτά του εργαστηριακού PABR και επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι η ροή του PABR των 80L προσεγγίζει την εμβολική, όταν δεν εναλλάσσεται το διαμέρισμα της τροφοδοσίας. Η ελαφρά απόκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν τον εργαστηριακό PABR μπορεί ενδεχομένως να εξηγηθεί από τις μικρές απλοποιήσεις που έγιναν στο τρισδιάστατο σχέδιο της προσομοίωσης, που πιθανώς επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα όσο μικρότερος είναι ο όγκος του αντιδραστήρα.

### **Επίδραση Ανακλαστήρων στη ρεολογική συμπεριφορά**

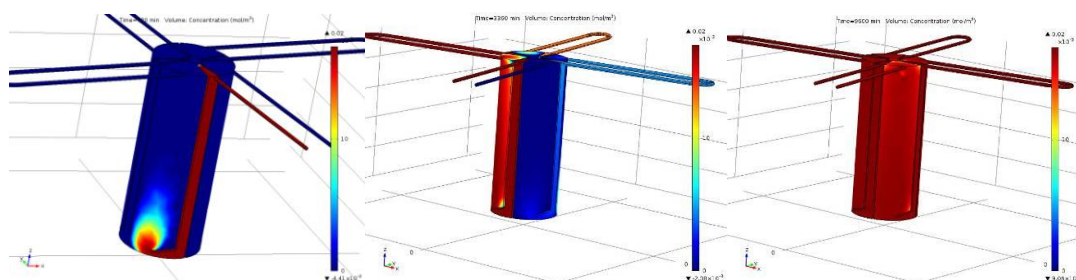
Οι ανακλαστήρες προστίθενται στις δεξαμενές ώστε να μειώσουν την ικανότητα του διαλύματος να κινείται με ταχύτητα από την εισροή προς την εκροή. Ο στόχος του σχεδιασμού των ανακλαστήρων εξαρτάται από το αν η δεξαμενή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για διαχωρισμό ή για χημική διεργασία. Γενικά οι ανακλαστήρες χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες για να επιτύχουν συνθήκες καλής ανάμειξης σε καθεμιά από τις ζώνες ανάκλασης (Malcolm Pirnie, 1991).

Στην περίπτωση του PABR χρησιμοποιούνται με τη μορφή θυροφραγμάτων που αποθαρρύνουν τα φαινόμενα αντιρροής και επιτυγχάνουν συνθήκες καλής ανάμειξης μεταξύ των ζωνών ανάκλασης, δηλαδή των περιοχών ανοδικής και καθοδικής ροής. Έτσι είναι δυνατή η αντικατάσταση της παραγωγής ενέργειας ανάμειξης από τους αναδευτήρες με απευθείας παραγωγή κινητικής ενέργειας από τη ροή του ρευστού διαμέσου των ανακλαστήρων.

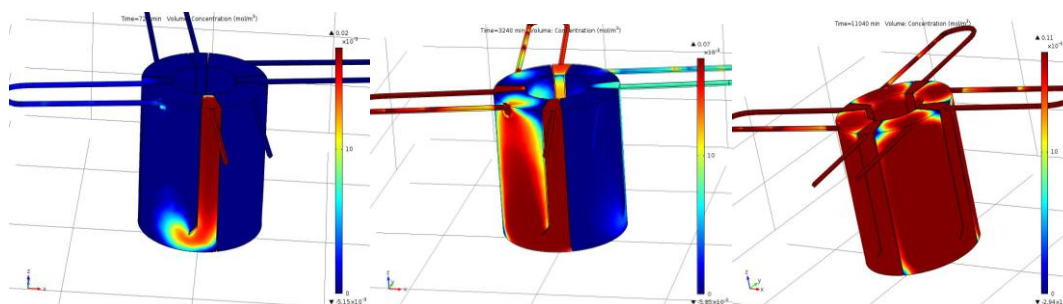
Η πολυπλοκότητα της ρεολογικής συμπεριφοράς που δημιουργείται αναπόφευκτα σε αντιδραστήρες με ανακλαστήρες απαιτεί τη μοντελοποίηση με υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD model). Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής μπορούν να εξάγουν συμπεράσματα για το σχεδιασμό των γεωμετρικών παραμέτρων των ανακλαστήρων που είναι το πλάτος, η κλίση και η απόσταση αυτών από τα τοιχώματα των διαμερισμάτων.

Για το λόγο αυτό επαναλήφθηκαν τα προηγούμενα πειράματα προσομοίωσης για τους δυο PABR. Αφού τροποποιήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους με την προσθήκη ανακλαστήρων που είχαν κλίση  $42,5^\circ$  ως προς την παράλληλη στα τοιχώματα του διαμερίσματος ευθεία, εξετάστηκε η επίδρασή τους στη ρεολογική συμπεριφορά των αντιδραστήρων μέσω προσομοίωσης με το πρόγραμμα Comsol 4.4 και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά των περιπτώσεων χωρίς ανακλαστήρες.

Στα **Σχήματα 39 & 40** και παρουσιάζονται οι κατανομές της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη μέσα στον εργαστηριακό και στον πιλοτικό αντιδραστήρα των και οι αντίστοιχες χρονικές στιγμές είναι  $t=12$  h,  $t=56$  h,  $t=160$  h και  $t=12$  h,  $t=54$  h και  $t=184$  h.



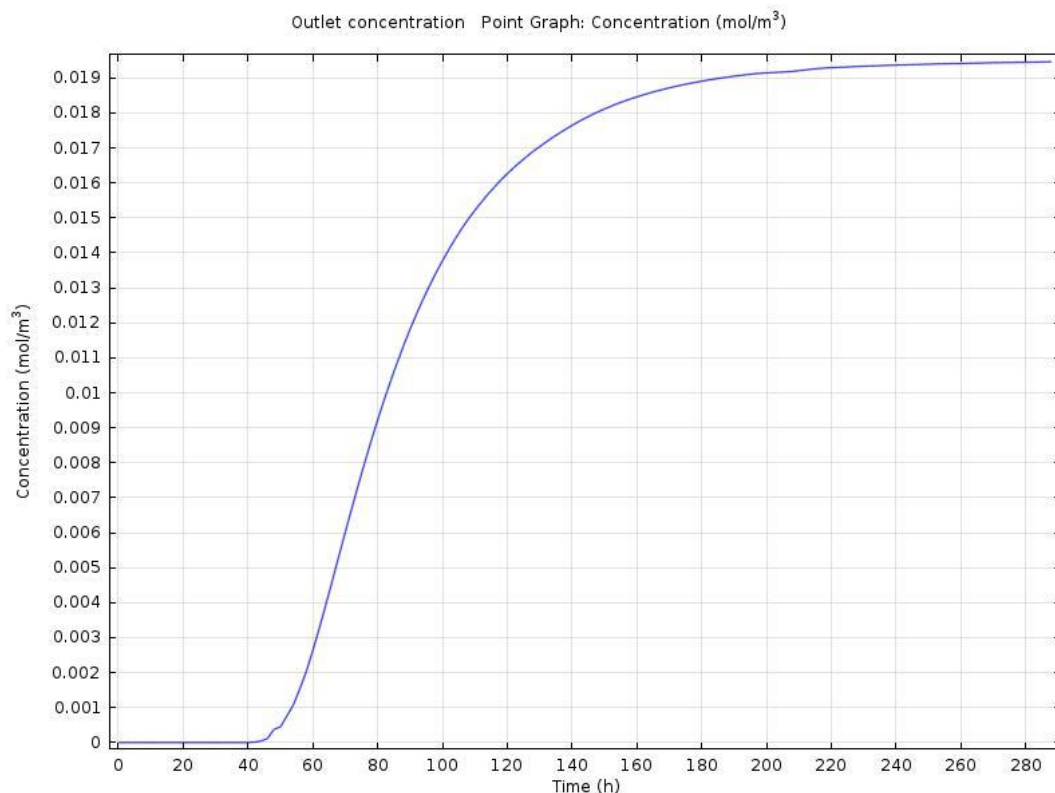
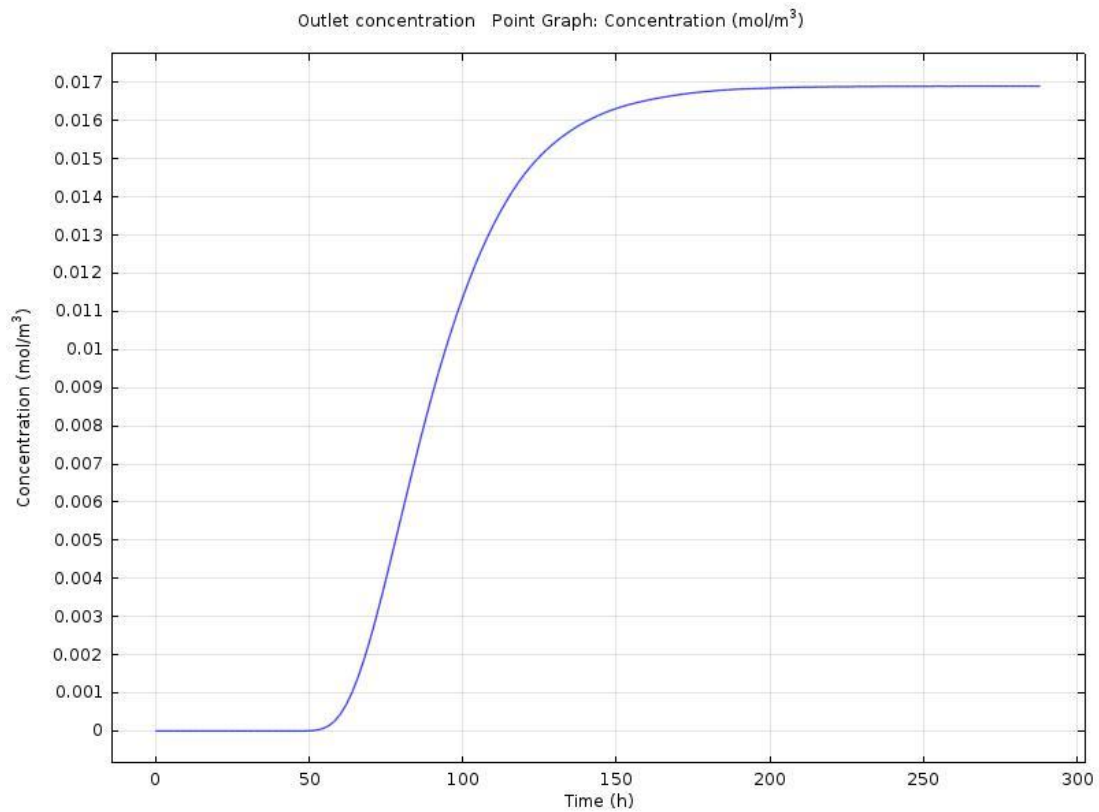
**Σχήμα 39:** Κατανομή συγκέντρωσης ιχνηθέτη μέσα στον PABR 15 L με ανακλαστήρες για (a)  $t=12$ h, (b)  $t=56$ h και (c)  $t=160$ h.



**Σχήμα 40:** Κατανομή συγκέντρωσης ιχνηθέτη μέσα στον PABR 80 L με ανακλαστήρες για (a)  $t=12$ h, (b)  $t=54$ h και (c)  $t=184$ h.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα των κατανομών συγκέντρωσης για τους δυο αντιδραστήρες με ανακλαστήρες όπως προέκυψαν από το μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 14**.





**Διάγραμμα 14:** Διαγράμματα κατανομής της συγκέντρωσης στο σημείο εξόδου συναρτήσει του χρόνου για τους PABR 15 (a) και 80 L (b) με ανακλαστήρες σε σχέση με τα αποτελέσματα του μοντέλου του προγράμματος COMSOL Multiphysics® Version 4.4.

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με και χωρίς ανακλαστήρες θα γίνει χρήση των στοιχείων του **Πίνακα 8**.

**Πίνακας 8:** Συγκριτικά στοιχεία για τους αντιδραστήρες με και χωρίς ανακλαστήρες

Αντιδραστήρες	Ποσοστό % του $t_c$ (1 <sup>η</sup> μη μηδενική συγκέντρωση)	Χρόνος (HRT) ώστε $C_{out}=C_{in}$	Πλατώ μέγιστης συγκέντρωσης (HRT)
Εργαστηριακός χωρίς ανακλαστήρες	18	2,29	0,25
Εργαστηριακός με ανακλαστήρες	24	1,1	1,33
Πιλοτικός χωρίς ανακλαστήρες	23	1,75	0,67
Πιλοτικός με ανακλαστήρες	23	1,35	1,1

Παρατηρείται ότι ο χρόνος που απαιτείται για την αντίχρεωση της πρώτης μη μηδενικής συγκέντρωσης είναι παρόμοιος σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό σημαίνει ότι δεν εξαρτάται από την ύπαρξη ανακλαστήρων αλλά ούτε επηρεάζεται από την κλιμάκωση μεγέθους. Πράγματι ο χρόνος αυτός αναφέρεται στη «βέλτιστη» διαδρομή που ακολουθούν τα σωματίδια του ρευστού για να φτάσουν από την είσοδο στην έξοδο και περιορίζεται από τον ΥΧΠ και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα.

Όσον αφορά το χρόνο που απαιτείται για να εξισωθεί η συγκέντρωση στην έξοδο με την συγκέντρωση στην είσοδο έχει μειωθεί και στις δυο περιπτώσεις και είναι παρόμοιος. Συγκεκριμένα ο πιλοτικός απαιτεί 1,35 HRT ενώ ο εργαστηριακός απαιτεί 1,1 HRT. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι όντως η ύπαρξη ανακλαστήρων παίζει κυρίαρχο ρόλο στην ανάπτυξη καλής ανάμειξης μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων ρευστού και υποκαθιστά με επιτυχία την μηχανική ανάδευση. Η επίδραση είναι πιο σημαντική όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του αντιδραστήρα, αφού, όπως φαίνεται, στην περίπτωση του εργαστηριακού PABR με ανακλαστήρες ο χρόνος ανάμειξης των στρωμάτων ρευστού μειώθηκε πάνω από το μισό. Επίσης, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ροπή του εργαστηριακού προς το μοντέλο εμβολικής ροής, αφού λόγω των ανακλαστήρων έχει μικρότερο χρόνο ανάμειξης των στρωμάτων ρευστού ακόμα και από τον πιλοτικό.

Τέλος, παρατηρείται ότι τα πλατώ της μέγιστης συγκέντρωσης που δημιουργούνται είναι παραπλήσια για τους δυο αντιδραστήρες (1,1 HRT για τον πιλοτικό έναντι 1,33 HRT για τον εργαστηριακό), αλλά με αυξητικές τάσεις. Ειδικά, στην περίπτωση του

εργαστηριακού, το πλατώ μέγιστης συγκέντρωσης έχει πενταπλασιαστεί. Τα παραπάνω ερμηνεύονται και στις δυο περιπτώσεις ως αύξηση του  $V_d$ . Η ύπαρξη των ανακλαστών δημιουργεί καλές συνθήκες ανάμειξης αλλά δυσχεραίνει τις συνθήκες ροής με αποτέλεσμα την αύξηση των «νεκρών» χώρων λόγω της μείωσης κινητικής ενέργειας των στοιχείων του ρευστού από τη σύγκρουση με τα διάφορα τοιχώματα του αντιδραστήρα.

#### 4. Συμπεράσματα- Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων κατανομής χρόνου παραμονής για τους δύο PABR 15L και 80L, προκύπτει ότι η κλιμάκωση μεγέθους και οι μετατροπές στο σχέδιο του αντιδραστήρα επιδρούν σημαντικά στη ρεολογική συμπεριφορά του PABR, όταν δεν εναλλάσσεται το σημείο εισόδου της τροφοδοσίας, δηλαδή όταν ο PABR λειτουργεί πρακτικά ως ABR. Επίσης παρουσιάζει παρόμοιες τιμές «νεκρού» χώρου ρευστού ( $V_d$ ) με τον ABR. Στην περίπτωση αυτή, η ροή εντός του αντιδραστήρα των 80L προσεγγίζει αρκετά την εμβολική. Στην περίπτωση που εναλλάσσεται το σημείο εισόδου της τροφοδοσίας, η κλιμάκωση μεγέθους και οι τροποποιήσεις στο σχέδιο του αντιδραστήρα δεν επιδρούν σε τόσο μεγάλο βαθμό, καθώς πρακτικά εντός των δύο PABR προσεγγίζεται ικανοποιητικά η πλήρης ανάμειξη. Όμως το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερους «νεκρούς» χώρους ρευστού. Ο πιλοτικός αντιδραστήρας των 80L, παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα να μπορεί να προσομοιάζει τη ρεολογική συμπεριφορά ενός CSTR ή ενός ABR, ανάλογα με τη συχνότητα εναλλαγής του σημείου εισόδου της τροφοδοσίας. Αυτό τον καθιστά λιγότερο επιρρεπή σε θέματα ροής σε σχέση με τον εργαστηριακό αφού παρουσιάζει μικρότερες τιμές του  $V_d$ .

Από την τρισδιάστατη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος COMSOL Multiphysics® Version 4.4 για την περίπτωση μη εναλλαγής του σημείου τροφοδοσίας, επιβεβαιώθηκε η προσέγγιση της ροής του πιλοτικού PABR με την εμβολική, ενώ στην περίπτωση του εργαστηριακού PABR παρατηρήθηκε ελαφρά απόκλιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά, που ενδεχομένως οφείλεται στις απλοποιήσεις που έγιναν στο τρισδιάστατο σχέδιο, οι οποίες ενδεχομένως επηρεάζουν περισσότερο όσο μικρότερη είναι η κλίμακα μεγέθους.

Επίσης φαίνεται ότι οι ανακλαστήρες επιδρούν σημαντικά στη ρεολογική συμπεριφορά του PABR. Δημιουργούν πολύ καλές συνθήκες ανάμειξης αλλά παράλληλα επηρεάζουν τις συνθήκες ροής με αποτέλεσμα την ανάπτυξη «νεκρών» χώρων ρευστού. Για αυτό το λόγο η ύπαρξη τους στο σχεδιασμό ενός PABR είναι απαραίτητη αλλά βασικός στόχος θα πρέπει να είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός του πλάτους και της κλίσης, ώστε να μη διαταράσσεται το μοτίβο ανάμειξης.

## Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Για τους παράπανω λόγους κρίνεται αναγκαία η επέκταση της επίδρασης των παραμέτρων σχεδιασμού και της κλιμάκωσης μεγέθους στα υδραυλικά χαρακτηριστικά του PABR.

Αρχικά προτείνεται η ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης ροής για την περίπτωση της λειτουργίας του PABR με εναλλαγή του σημείου τροφοδοσίας. Αυτό θα οδηγήσει σε πιο ασφαλή συμπεράσματα για την αλληλεπίδραση των ανακλαστήρων και της περιόδου εναλλαγής στις συνθήκες ανάμειξης. Στη συνέχεια θα είναι δυνατό να αναπτυχθεί μια μελέτη βελτιστοποίησης του μοτίβου ανάμειξης, όπου βασικές σχεδιαστικές παράμετροι θα είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανακλαστήρων και η περίοδος εναλλαγής.

Επίσης προτείνεται να εξεταστεί η ρεολογική συμπεριφορά των PABR σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας. Αυτό θα συμβεί με την πραγματοποίηση παλμικών πειράματων Κατανομής Χρόνου Παραμονής (ΚΧΠ) στους δυο PABR με συνεχή τροφοδοσία αποβλήτου και σε διαφορετικούς Υδραυλικούς Χρόνους Παραμονής (ΥΧΠ). Σκοπός θα είναι η ανάπτυξη του μοντέλου δοχείων σε σειρά και του μοντέλου Διασποράς που θα οδηγήσει στην εύρεση του συνολικού νεκρού χώρου του αντιδραστήρα, δηλαδή του αθροίσματος υδραυλικού «νεκρού» χώρου ( $V_d$ ) βιολογικού «νεκρού» χώρου. Ο πρώτος είναι συνάρτηση του μοτίβου ροής και ο δεύτερος της συσσώρευσης βιομάζας και της βιολογικής δραστηριότητας.

Τέλος επιθυμητή θα ήταν η παραπάνω μελέτη ρεολογικής συμπεριφοράς να διεξαχθεί στα πλαίσια σχεδιασμού ενός PABR βιομηχανικής κλίμακας που θα έχει σαν αποτέλεσμα την πρόληψη αστοχιών που προκαλούνται στη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και στις συνθήκες λειτουργίας από την κλιμάκωση μεγέθους. Σε αυτό το στόχο θα μπορούσε να συνεισφέρει η διαστατική ανάλυση ομοιότητας που θα επιτυγχάνει τη διατήρηση των επιθυμητών γεωμετρικών, υδραυλικών και βιοχημικών παραμέτρων, έτσι ώστε να απελευθερώσει τη διαδικασία ενσωμάτωσης αυτού του ταχύρρυθμου και καινοτόμου συστήματος στην βιομηχανία επεξεργασίας αποβλήτων και την παραγωγή και ανάκτηση ενέργειας.

## 5. Βιβλιογραφία

### 5.1 Ελληνική βιβλιογραφία

Asraf-Snir, M., Gitis, V., 2011. Tracer studies with fluorescent-dyed microorganisms—a new method for determination of residence time in chlorination reactors. *Chem. Eng. J.* 166, 579–585.

Bachmann A., Beard V. L., McCarty P.L., 1985. Performance characteristics of the Anaerobic Baffled Reactor. *Water Res.* Vol. 19. No. I, pp. 99-106

Foxon K.M., S Pillay, T. Lalbahadur, N. Rodda, F. Holder and CA Buckley 2004. The anaerobic baffled reactor (ABR): An appropriate technology for on-site sanitation, *Water SA* Vol. 30 No. 5

Grobicki A. M. W. (1989) Hydrodynamic characteristics and performance of the anaerobic baffled reactor. Ph.D. dissertation, Department of Chemical Engineering, Imperial College, London, U.K.

Grobicki A. M. W. and Stuckey D. C. (1991) Performance of the anaerobic baffled reactor under steady state and shock loading conditions. *Biotechnol. Bioeng.* 37, 344-355.

Grobicki A. M. W. and Stuckey D. C. (1992) Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor. *Wat. Res.* 26, 371-378.

Habeeb S. A., AB. Aziz Bin Abdul Latiff , Zulkifli Bin Ahmad 2010. A Review on Properties of the Digestion Process in the Up-Flow Anaerobic Sludge Bed (UASB) Reactor, *Canadian Journal on Environmental, Construction and Civil Engineering* Vol. 1, No. 3, 58-61

Hall, E.R. 1985. Non-Intrusive estimation of active volume in anaerobic reactors. *Water Poll. Res. J. Canada*, 20, 44-54

Hall, E.R. 1992. Anaerobic treatment of wastewaters in suspended growth and fixed film processes, *In: Water Quality Management Library*, Ed. Malina, J.F. and Pohland, F.G., Technomic Publishing Company.

Ji, J.Y., Zheng, K., Xing, Y.J., Zheng, P. 2012. Hydraulic characteristics and their effects on working performance of compartmentalized anaerobic reactor. *Bioresour. Technol.* 116, 47–52.

Kleerebezem, Robbert, Macarie Herve 2003. Treating industrial wastewater: Anaerobic digestion comes of age. *Chemical engineering*, 110(4), 56-63.

Lettinga, G. (1995), Anaerobic digestion and wastewater treatment systems, *Antonie van Leeuwenhoek* 67, 3-28.

Lettinga G. and Hulshoff P. L. W. (1991). UASB-process design for various types of wastewaters. *Water Science and Technology*, 24, 87-107.

Lettinga, G.; Van Velsen, A. F. M.; Hobma, S. W.; De Zeeuw, W.; Klapwijk, A. (1980). Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment , especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 22(4):, 699-734.

Levenspiel O., 1974. *Chemical Reaction Engineering*, 2nd edition. Wiley, New York

Levenspiel O., 1999. *Chemical Reaction Engineering*, 3<sup>rd</sup> Ed., J. WileyandSohs, NewYork (απόδοση στα Ελληνικά: *Μηχανική Χημικών Διεργασιών* (Πομόνης Φ., κ.ά.), εκδ. Κωσταράκη, Αθήνα 2011).

Lewis R.W., Nithiarasu P., Seetharamu K.N., 2004. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. Wiley, New York

Li Sheng-nan, Nan Jun, Li Hao-yu, Meng Yao 2015. Comparative analyses of hydraulic characteristics between the different structures of two anaerobic baffled reactors (ABRs), *Ecological Engineering*, 82, 138-144

Malcolm Pirnie, Inc., and HDR Engineering, Inc. 1991. *Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources*. AWWA, Denver CO.

Metcalf & Eddy, Inc. 2006. *Μηχανική υγρών αποβλήτων, Επεξεργασία & Επαναχρησιμοποίηση*, 4η έκδοση, Τόμος Α, Εκδόσεις Τζιόλα

Pcsok,Shiedls,Cairns and Wc William. *Σύγχρονες Μέθοδοι στην Χημική Ανάλυση*. (απόδοση στα Ελληνικά: Σταύρος Βολιώτης, Εκδόσεις: Γ.Α. Πνευματικός ,Αθήνα 1980).

Peña M.R., Mara D.D., Avella G.P. 2006. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates, *Water Res.*, 40 (3), pp. 445–452

Petzold, L. 1983. *A description of DASSL: A differential/algebraic system solver*. In Stepleman, R. e., editor, *Scientific Computing*, pages 65-68. IMACS / North-Holland, Amsterdam

Price W.J., 1969. *Analytic Atomic Absorption Spectrometry*, Dekker,New York,Vol.1

Reichert, P., 1994. AQUASIM - A tool for simulation and data analysis of aquatic systems, *Water Sci. Tech.*, 30(2), 21-30,

Rittman B. E. and McCarty P. L. 2001. *Environmental Biotechnology: Principles and applications*, McGraw-Hill.

Shuler Michael L., Fikret Kargi 2005, *Μηχανική Βιοδιεργασιών Βασικές Έννοιες*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Skiadas I.V, K. Stamatelatou, G.Lyberatos 2000. Modeling of the Periodic Anaerobic Baffled Reactor (PABR) based on the retaining factor concept, *Water Research*. Vol. 34, No. 15, 3725-3736,

Skiadas I.V, G.Lyberatos 1998. The Periodic Anaerobic Baffled Reactor, *Water Research Pergamon Press*. Vol. 38, 401-408

Speece, R.E. 1983. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment, *Environmental Science Technology*, 17, 416A-426A

Stamatelatou K, Vavilin V., Lyberatos G. 2002. Performance of a glucose fed periodic anaerobic baffled reactor under increasing organic loading conditions: 1. Experimental results, *Bioresource Technology* Vol.88, 131-136

Stamatelatou K, Vavilin V., Lyberatos G. 2002. Performance of a glucose fed periodic anaerobic baffled reactor under increasing organic loading conditions: 2. Model prediction, *Bioresource Technology* Vol.88, 137-142

Stamatelatou K., Skiadas I.V, Lyberatos G. 2003. On the behavior of the periodic anaerobic baffled reactor (PABR) during the transition from carbohydrate to protein-based feedings, *Bioresource Technology* Vol.32, 321–326

Stuckey D. C. 1983. *Anaerobic digestion in developing countries*. In *Advances in Fermentation*. Chelsea College, London

Tomlinson, E.J., Chambers, B., 1979. Effect of longitudinal mixing on the settleability of activated sludge. *WRC Technical Report*. WRC.

Torres J. J., Soler A., Saez J.and Llorens M. 2000. Hydraulic performance of a deep stabilisation pond fed at 3.5m depth, *Water Res.*, 34 (3), pp. 1042–1049

Xiao-lei Liu, Ren Nan-qi,, Wan Chun-li 2007. Hydrodynamic characteristics of a four-compartment periodic anaerobic baffled reactor. *Journal of Environmental Sciences* Vol 19, 1159–1165

Xiao-lei Liu, Nan-qi Ren, Yixing Yuan 2009. Performance of a periodic anaerobic baffled reactor fed on Chinese traditional medicine industrial wastewater. *Bioresource Technology* Vol. 100,104–110

Yi Jing Chan, Mei Fong Chong, Chung Lim Law, D.G. Hassell 2009. A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal* Vol. 155, 1–18

Young H.W., Young J.C., Hydraulic characteristics of upflow anaerobic filters. *J.Environ. Eng.* 114 (1988) 621–638.



## 5.2 Ελληνική βιβλιογραφία

Βλυσίδης Α. και Λυμπεράτος Γ., 2011. *Περιβαλλοντική Μηχανική Μέρος III: Επεξεργασία στερεών και ημιστερεών αποβλήτων*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Γρηγοροπούλου Ε. και Λυμπεράτος Γ., 2013. *Περιβαλλοντική Μηχανική Μέρος II: Επεξεργασία υγρών αποβλήτων*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Κοψαχείλης, Α., 2009. *Αναερόβια Χώνευση υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου σε ένα Περιοδικό Αναερόβιο Αντιδραστήρα με Ανακλαστήρες (PABR) και κλασματοποίηση των εκροών*. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Βιολογίας και Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μαύρος, Π.Π., 2012. *Κατανομές Χρόνου Παραμονής*. Εργαστήριο Γενικής και Ανόργανης Χημικής Τεχνολογίας, Τμήμα Χημείας, Α.Π.Θ

Παπαγιαννόπουλος Γ., 2008. *Θερμικός Έλεγχος και Μοντελοποίηση Θερμικής Συμπεριφοράς Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων*. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών. Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Παπαϊωάννου Α. Θ., 2002. *Μηχανική των Ρευστών*. Τόμος I, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Κοράλι, Αθήνα,.

Παπαλαζάρου Α., 2010. *Μοντελοποίηση και έλεγχος απόδοσης πλακοειδούς εναλλάκτη θερμότητας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Δ.Π.Θ., Ξάνθη

Σαβογλίδης Γ., 2010. *Αλγόριθμοι αυτόματου ελέγχου και βελτιστοποίησης με εφαρμογή σε αναερόβιους αντιδραστήρες*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών

Σέμπου Α., 2014. *Προτυποποίηση και υπολογιστική προσομοίωση φαινομένων διάχυσης στη ξήρανση φρούτων*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Σοφιανού Β., 2009. *Μελέτη, σχεδιασμός και κατασκευή ιατρικών εργαλείων με χρήση προγράμματος CAD/CAM και 3-D εκτυπωτή*. Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Δ.Π.Θ., Ξάνθη

Σταματελάτου, Κ., 1999. *Βελτιστοποίηση Συστημάτων Αναερόβιας Χώνευσης*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών

Τζεδάκη, Α., 2011. *Στατική μελέτη υδραυλικής περιστρεφόμενης βάσης φωτοβολταϊκών δυο αξόνων*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

Τσιμπερδώνης, Α., 2014., *Αναερόβια Χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα σε Περιοδικό Αναερόβιο Αντιδραστήρα με Ανακλαστήρες*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Φεσά, Χ., 2011, *Αναερόβια χώνευση αποβλήτων τυπογραφείου χαρτονομισμάτων*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ

## Ιστοσελίδες

1. “Ειδικά Κεφάλαια Ανάλυσης Φορέων με Πεπερασμένα Στοιχεία”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.  
[http://mycourses.ntua.gr/course\\_description/index.php?cidReq=CIVIL1056](http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php?cidReq=CIVIL1056)  
(2010).
2. <http://www.comsol.com/>
3. <http://www.fao.org/ag/agn/jecfa-additives/details.html;jsessionid=1AF9DFF2D0F71547C4B03B8A2F0DFC20?id=324>
4. <http://au.hach.com/dr-2800-portable-spectrophotometer-with-lithium-ion-battery/product-details?id=14533795902>