

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

<<ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΟΞΥΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΕΡΙΣΤΗΡΩΝ
PULSAR>>

ΓΚΙΚΑΣ ΑΔΑΜ-ΠΕΤΡΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
Ν. ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Ε. ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ
Β. ΓΚΕΚΑΣ

ΧΑΝΙΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	σελ 4
1 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ – ΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	σελ 5
1.1 Διαδικασίες επεξεργασίας	
1.2 Είδη δευτεροβάθμιας επεξεργασίας	
1.3 Σύστημα ενεργού ιλύος :	
1.4 Οξυγόνωση	
2 ΑΕΡΙΣΜΟΣ – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΞΥΓΟΝΩΣΗΣ	σελ 8
2.1 Μέθοδοι αερισμού	
2.2.1 Επιφανειακοί αεριστήρες	
2.2.2 Διαχύτηρες	
2.3 Στατικοί αεριστήρες (στατικός αεριστήρας τύπου Pulsar)	
3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΟΞΥΓΟΝΟΥ $K_L a$ ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	σελ 13
3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το $K_L a$	
3.2 Μέθοδοι προσδιορισμού του ρυθμού οξυγόνωσης σε πραγματικές συνθήκες	
3.2.1 Μέθοδοι σε σταθερές συνθήκες	
3.2.2 Δυναμική μέθοδος	
3.3 Λύση της εξίσωσης ορισμού του $K_L a$	
3.4 Εύρεση παραμέτρων	
4 AIRLIFT ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ - ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΗΡΕΣΤΕΡΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	σελ 18
4.1 Airlift αντιδραστήρες	
4.2 Παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός airlift αντιδραστήρα	
4.3 Παράμετροι διαμορφώσιμοι από τον μελετητή	
4.4 Στατικοί διαχύτες	
4.5 Διαμόρφωση μοντέλου	
4.6 Διατύπωση εξισώσεων	
5 ΜΕΘΟΔΟΣ DIRECT SEARCH	σελ 23
5.1 Περιγραφή μεθόδου	
5.2 Αλγόριθμος direct search	
5.3 Εφαρμογή στο αντικείμενο	
5.3.1 Απλή προσέγγιση	
5.3.2 Σύνθετη προσέγγιση	

5	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ – ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	σελ 27
6.1	Τοποθεσία-δεξαμενή-μετρήσεις	
6.2	Συνθήκες πειράματος	
6.3	Πτερύγιο διασποράς	
6.4	Περιορισμοί παραμέτρων	
6.5	Εφαρμογή μεθόδου	
6.5.1	Απλή προσέγγιση	
6.5.2	Σύνθετη προσέγγιση	
6.6	Σύγκλιση παραμέτρων	
7	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ– ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	σελ 30
7.1	Απλή προσέγγιση	
7.1.1	Αποτελέσματα	
7.1.2	Παρατηρήσεις	
7.2	Σύνθετη προσέγγιση	
7.2.1	Αποτελέσματα	
7.2.2	Παρατηρήσεις	
8	ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	σελ 44
8.1	Σταθερό F_R	
8.2	Μηδενικό F_L	
8.3	Επέκταση ορίων	
8.4	Τελικό συμπέρασμα	
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	σελ 62
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	σελ 63
	Δεδομένα πειραμάτων	
	Προγράμματα Matlab	

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα καίρια περιβαλλοντικά προβλήματα της αστικής κοινότητας είναι αυτό των υγρών αποβλήτων. Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους επεξεργασίας υγρών αποβλήτων βασίζεται στη διεργασία της ενεργού ιλύος. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί καλλιέργειες μικροοργανισμών για να διαλύσει τις οργανικές ουσίες των αποβλήτων. Για να λειτουργήσει σωστά και αποδοτικά μια μονάδα ενεργού ιλύος ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η σωστή οξυγόνωση που επιτρέπει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται ένα νέο σύστημα στατικών αεριστήρων που χρησιμοποιήθηκε στην πιλοτική δεξαμενή αερισμού στο ΚΕΡΕΦΥΤ. Ο βασικός σκοπός της μελέτης είναι να υπολογισθεί ο ρυθμός οξυγόνωσης K_{La} στη δεξαμενή. Για να επιτευχθεί αυτό, διαμορφώθηκε ένα μοντέλο το οποίο περιγράφει τη διεργασία που λαμβάνει χώρα. Το μοντέλο αυτό βασίζεται εν μέρει στη λειτουργία των airlift αντιδραστήρων, οι οποίοι είναι συγγενείς με το σύστημα που εξετάζουμε. Για τον υπολογισμό των αγνώστων παραμέτρων του μοντέλου, μεταξύ των οποίων βρίσκεται και ο ρυθμός οξυγόνωσης, δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα στη MATLAB, που εφαρμόζει τον αλγόριθμο direct search. Η διαδικασία αυτή υπολογίζει τις παραμέτρους των εξισώσεων, αντιπαραβάλλοντας τα δεδομένα του πεδίου με τις προβλέψεις του μοντέλου και δοκιμάζοντας διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων επιλεγμένων με στατιστικό τρόπο.

Η διενέργεια αυτής της διαδικασίας για την περίπτωση μας, έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα :

	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
K_{La} (1/h)	13,9	11,8	10,7	14
C^* (g/m ³)	10,17	11,79	12,53	12,05
FL (m ³ /h)	600	600	600	600
FR (m ³ /h)	234	216	223	243
λ (%)	94,3	83,9	78,6	88,1
SSE	10,77	8,76	8,78	13,5

Έγιναν κάποιες συμπληρωματικές προσεγγίσεις, με αλλαγές στη δομή του προγράμματος και στη μορφή του μοντέλου. Κατέληξαν όμως σε μη φυσιολογικές τιμές για κάποιες από τις παραμέτρους και συνεπώς απορρίφθηκαν.

1 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ – ΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Ένα από τα πιο προφανή και καίρια περιβαλλοντικά προβλήματα της σύγχρονης αστικής κοινότητας είναι αυτό της επεξεργασίας και διάθεσης των υγρών αποβλήτων. Του νερού δηλαδή, που έχει μολυνθεί από τη χρήση του σε κατοικίες, εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Η απ' ευθείας διάθεση στους αποδέκτες ή η συσσώρευση των αποβλήτων στην πηγή τους σπάνια αποτελεί πλέον ικανοποιητική λύση. Αυτό οφείλεται στον σημαντικό όγκο τους αλλά και στην ποικιλία των ουσιών που περιέχουν. Τα ανεπεξέργαστα λύματα φέρουν πλήθος παθογόνων μικροοργανισμών με επικίνδυνες συνέπειες στην υγεία. Κατά την αποδόμηση του οργανικού υλικού, που είναι ένα από τα κύρια συστατικά των αστικών υγρών αποβλήτων, παράγονται δύσσομα αέρια. Επίσης το οργανικό υλικό είναι πολύ πιθανό να δημιουργήσει πρόβλημα ευτροφισμού (υπέρμετρης ανάπτυξης της φυτικής βλάστησης) σε υδατικούς φορείς (λίμνες, ποτάμια). Για αυτούς τους λόγους έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πρόληψης, επεξεργασίας και διάθεσης που βοηθούν στο να δέχονται οι τελικοί αποδέκτες τη μικρότερη δυνατή επιβάρυνση.

Οι προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση γίνονται εδώ και αρκετά χρόνια. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ευαισθητοποίηση που δημιουργεί λόγω το συγκεκριμένο θέμα και στον σημαντικό όγκο των υγρών αποβλήτων που απαιτεί άμεση αντιμετώπιση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων να έχουν αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό και να πετυχαίνουν όλο και μεγαλύτερες αποδόσεις καθαρισμού. Νέα συστήματα κάνουν την εμφάνισή τους καθημερινά και μικροαλλαγές ή βελτιώσεις σε παλιότερα βελτιστοποιούν το αποτέλεσμα. Η ερώτηση που τίθεται λοιπόν είναι ποιες ουσίες είναι αυτές που πρέπει να απομακρυνθούν, τι επίπτωση έχουν στο περιβάλλον και σε ποιο ποσοστό θα πρέπει να γίνει η απομάκρυνση ώστε να μην υπάρξει πρόβλημα στον τελικό αποδέκτη.

1.1 Διαδικασίες επεξεργασίας

Η βασική ιδέα πίσω από τις διαδικασίες επεξεργασίας είναι η εξής : διαχωρισμός των ανεπιθύμητων ουσιών από το καθαρό νερό με τη βοήθεια φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ελεγχόμενες συνθήκες. Αυτό επιτυγχάνεται με το πέρασμα των αποβλήτων μέσα από μια σειρά δεξαμενών/αντιδραστήρων, σε κάθε μια από τις οποίες αφαιρούνται κάποια από τα ρυπαντικά συστατικά. Οι διεργασίες αυτές μπορεί να επιταχύνουν μια φυσική μέθοδο αυτοκαθαρισμού με μηχανικά μέσα ή μπορεί να χρησιμοποιούν χημικές ουσίες και μικροοργανισμούς για να διασπάσουν τις

ρυπογόνες ουσίες σε ακίνδυνες. Η τυποποίηση έχει χωρίσει τις διεργασίες επεξεργασίας σε τρεις κατηγορίες : πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια κάθε μια από τις οποίες αντιμετωπίζει μια διαφορετική κατηγορία ουσιών. Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται σε σειρά και με τη σειρά ενώ όσο μεγαλώνει ο βαθμός της επεξεργασίας αυξάνει και η καθαρότητα του υγρού που στη συνέχεια θα διατεθεί στον αποδέκτη.

Πρωτοβάθμια : Φυσικές κατά βάση διεργασίες όπως εσχάρωση, επίπλευση, διήθηση. Ουσιαστικά ρόλος της είναι μια πρώτη απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών με τη χρήση φυσικών μεθόδων.

Δευτεροβάθμια : Εδώ γίνεται διάσπαση του οργανικού κλάσματος σε ανόργανες ουσίες με τη βοήθεια μικροοργανισμών. Οι μικροοργανισμοί που εισάγονται στη δεξαμενή των αποβλήτων καταναλώνουν τις οργανικές ουσίες και τις μεταβολίζουν σε ανόργανα υλικά. Η διαδικασία αυτή μπορεί να λάβει χώρα παρουσία ή απουσία οξυγόνου (αερόβια ή αναερόβια). Επίσης οι μικροοργανισμοί μπορεί να βρίσκονται σε αιώρηση μέσα στα απόβλητα (ενεργός ιλύς, λίμνες) ή προσκολλημένοι σε κάποια επιφάνεια (βιολογικά φίλτρα, βιολογικοί δίσκοι).

1.2 Είδη δευτεροβάθμιας επεξεργασίας

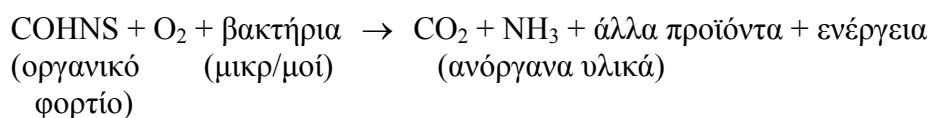
Αναερόβια επεξεργασία : Γίνεται σε δύο στάδια. Τα βακτήρια που παράγουν οξέα διασπούν τους υδατάνθρακες, τις πρωτεΐνες και τα λίπη σε οργανικά οξέα και αλκοόλες. Στη συνέχεια τα προϊόντα αυτά καταναλώνονται από τα μεθανογενή βακτήρια και παράγονται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Συνήθως η αναερόβια επεξεργασία χρησιμοποιείται ως συνέχεια της αερόβιας για την περαιτέρω επεξεργασία της λάσπης, ή για απόβλητα με σημαντικό βιολογικό φορτίο. Είναι αργή διαδικασία αλλά το υπόλοιπο λάσπης είναι σχετικά μικρό.

Αερόβια επεξεργασία : Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται για το δευτεροβάθμιο καθαρισμό. Είναι ταχύτερη από την αναερόβια και το προϊόν της είναι συνήθως κατάλληλο προς διάθεση. Το απόβλητο αναμιγνύεται με καλλιέργειες μικροοργανισμών. Στη δεξαμενή εισάγεται παράλληλα αέρας για να επιτευχθεί οξυγόνωση του υγρού. Αυτό είναι σημαντικό για την επιβίωση και τη σωστή ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Σε αυτό το περιβάλλον οι ρυπαντές (BOD, άζωτο, φώσφορος) παραλαμβάνονται από τους μικροοργανισμούς και μετατρέπονται σε ανόργανες ουσίες (διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο κλπ) ο διαχωρισμός των οποίων από την υγρή φάση είναι απλός. Μέρος των καταναλωνόμενων ρυπαντών χρησιμοποιείται και για την αύξηση της βιομάζας των μικροοργανισμών. Συνήθως για την αερόβια επεξεργασία χρησιμοποιούνται αεριζόμενες δεξαμενές, βιοφίλτρα, βιόπυργοι, περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι και μέθοδοι ενεργού ιλύος.

1.3 Σύστημα ενεργού ιλύος

Είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος αερόβιας επεξεργασίας σε βιολογικούς καθαρισμούς. Λειτουργεί ως εξής : στη δεξαμενή/αντιδραστήρα που εισάγεται το προς επεξεργασία απόβλητο βρίσκεται σε αιώρηση μικροβιακή καλλιέργεια. Συνήθως χρησιμοποιούνται τα βακτήρια των γενών *Pseudomonas*, *Zoogloea*, *Achromobacter* *Nocardia* *Flavobacterium* κ.α. και τα νιτροδοποιητικά βακτήρια *Nitrosomonas* και

Nitrobacter τα οποία βοηθούν στην οξείδωση της αμμωνίας. Το ανάμικτο υγρό (mixed liquor), όπως ονομάζεται το περιεχόμενο του αντιδραστήρα, εφοδιάζεται επίσης με αέρα, για να επιτευχθεί ικανοποιητική οξυγόνωση του υγρού. Η παρακάτω εξίσωση παρουσιάζει συνοπτικά τη αερόβια διεργασία :



Τα βακτήρια χρησιμοποιούν τις οργανικές ουσίες και την εκλυόμενη ενέργεια για να παράγουν καινούρια βιομάζα. Όταν δεν υπάρχουν οι οργανικές ουσίες τα κύτταρα βρίσκονται σε κατάσταση ενδογενούς αναπνοής.

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η διαδικασία σε επίπεδο κυττάρου είναι η βιοκροκίδωση. Η βιομάζα (βακτήρια, πρωτόζωα, μύκητες) συσσωματώνεται με στερεά συστατικά και δημιουργούνται τολύπες διαμέτρου 50-300 μm . Στο κέντρο των τολύπων βρίσκονται ανόργανα υλικά ενώ στο εξωτερικό συγκεντρώνονται οι οργανισμοί που συμμετέχουν στη διαδικασία του καθαρισμού. Τα διαλυμένα οργανικά συστατικά προσλαμβάνονται από τους μικροοργανισμούς που είναι συγκεντρωμένοι στα εξωτερικά στρώματα των βιοκροκίδων. Αυτοί είναι και οι οργανισμοί που μπορούν να επιβιώσουν σε ένα τέτοιο σύστημα.

1.4 Οξυγόνωση

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία μιας μονάδας αερόβιας επεξεργασίας είναι η παροχή οξυγόνου. Έχει φανεί ότι η έλλειψη επαρκούς ποσότητας οξυγόνου μειώνει σημαντικά την απόδοση της διεργασίας. Προφανώς αυτό συμβαίνει διότι σε αυτή την περίπτωση το οξυγόνο είναι ο περιοριστικός παράγοντας στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Αντίθετα η επαρκής οξυγόνωση του υγρού είναι πιθανό να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση ακόμα και στην περίπτωση που κάποια από τις υπόλοιπες παραμέτρους δεν είναι ικανοποιητική. Ενώ όμως είναι θετικό το συμπέρασμα ότι η καλή οξυγόνωση βελτιώνει την απόδοση και συνεπώς μπορούμε να επικεντρώσουμε την προσοχή σε αυτή την παράμετρο πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι η παροχή του οξυγόνου αποτελεί μια από τις πιο <<ακριβές>> παραμέτρους της διαδικασίας. Περίπου το 50% της λειτουργικής ισχύος του συστήματος καταναλώνεται στο σύστημα παροχής αέρα. Είναι προφανές λοιπόν ότι ένα σωστό σύστημα αερισμού θα πρέπει να συνδυάζει μεγάλη μεταφορά οξυγόνου από την αέρια στην υγρή φάση με χαμηλό λειτουργικό κόστος (χαμηλή παροχή αέρα).

2 ΑΕΡΙΣΜΟΣ – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΞΥΓΟΝΩΣΗΣ

Σκοπός του αερισμού στα συστήματα ενεργού ιλύος είναι η παροχή της απαιτούμενης από τους μικροοργανισμούς ποσότητας οξυγόνου για να επιτευχθεί η κατανάλωση των οργανικών ουσιών. Παράλληλα όμως, η παροχή αέρα αναδεύει το υγρό στη δεξαμενή αερισμού με αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερη ανάμιξη και ομοιόμορφη διασπορά των μικροοργανισμών.

Ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου από την αέρια στην υγρή φάση δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C)$$

όπου : C η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο υγρό
 $K_L a$ ο συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου από την αέρια στην υγρή φάση ή ρυθμός οξυγόνωσης
 C^* η συγκέντρωση κορεσμού του υγρού σε οξυγόνο
 C η συγκέντρωση οξυγόνου στο υγρό

Η σταθερά $K_L a$ επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, την ανάμιξη, το βάθος του υγρού και τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου.

2.1 Μέθοδοι αερισμού

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι αερισμού μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές που βασίζονται στη διοχέτευση φυσαλίδων αέρα στα απόβλητα από τις οποίες το οξυγόνο μεταφέρεται στα απόβλητα και αυτές που δεν εισάγουν αέρα στο υγρό αλλά με μηχανική ανάδευση επιταχύνουν τη μεταφορά οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στο υγρό. Στην πρώτη μέθοδο χρησιμοποιούνται αεροσυμπιεστές που διοχετεύουν τον αέρα σε ειδικές διατάξεις σχηματισμού φυσαλίδων. Στη δεύτερη μέθοδο χρησιμοποιούνται μηχανικές διατάξεις ανάδευσης (επιφανειακοί-μηχανικοί αεριστήρες). Στη συγκεκριμένη μελέτη έχουμε ασχοληθεί με την πρώτη κατηγορία.

2.2.1 Επιφανειακοί αεριστήρες

Στον αερισμό με επιφανειακούς αεριστήρες η μεταφορά οξυγόνου γίνεται από την ατμόσφαιρα στα απόβλητα μέσω της τυρβώδους επιφάνειας που δημιουργείται από την ανάδευσή τους. Τα απόβλητα καθώς αναδεύονται απομακρύνονται ακτινικά από τον αεριστήρα με συνεχώς μειούμενη ταχύτητα και η μεταφορά οξυγόνου είναι μέγιστη στη φτερωτή του αεριστήρα και μειώνεται σταδιακά μακρινά από αυτή. Οι βασικοί τύποι επιφανειακών αεριστήρων είναι τρεις : χαμηλής ταχύτητας (ακτινικής ροής), υψηλής ταχύτητας (αξονικής ροής) και οριζόντιοι περιστρεφόμενοι αεριστήρες (βούρτσες).

Οι χαμηλής ταχύτητας επιφανειακοί αεριστήρες έχουν σχετικά υψηλή απόδοση μεταφοράς οξυγόνου και δυνατότητα χρήσης σε διαφορετικής γεωμετρίας δεξαμενές. Χρησιμοποιούνται στις ίδιες περιπτώσεις όπως οι διαχυτήρες. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η ευελιξία που παρέχουν στη διαστασιολόγηση της δεξαμενής και η μεγάλη ικανότητα ανάμιξης. Τα μειονεκτήματά τους είναι η μείωση της θερμοκρασίας στη δεξαμενή (πιθανότητα δημιουργίας πάγου σε ψυχρή ατμόσφαιρα), το υψηλό αρχικό κόστος και οι αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης.

Οι υψηλής ταχύτητας επιφανειακοί αεριστήρες χρησιμοποιούνται κυρίως στις αεριζόμενες λίμνες. Έχουν χαμηλό αρχικό κόστος και προσαρμόζονται εύκολα σε διάφορες στάθμες αποβλήτων. Μειώνουν όμως τη θερμοκρασία των αποβλήτων, έχουν μικρή ικανότητα ανάμιξης και δυσκολίες στη συντήρηση.

Οι οριζόντιοι περιστρεφόμενοι αεριστήρες πέρα από τη μεταφορά οξυγόνου με τη διατάραξη της επιφάνειας των αποβλήτων προκαλούν και την κίνηση των αποβλήτων σε οριζόντια διεύθυνση. Χρησιμοποιούνται συνήθως στις οξειδωτικές τάφρους. Έχουν μέτριο αρχικό κόστος και ευκολία πρόσβασης για συντήρηση. Δημιουργούν όμως περιορισμούς όσον αφορά τη γεωμετρία της δεξαμενής και δείχνουν μειωμένη απόδοση κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας.

2.2.2 Διαχυτήρες

Οι διαχυτήρες, που είναι τοποθετημένοι κοντά στον πυθμένα της δεξαμενής, απελευθερώνουν φυσαλίδες αέρα, που κινούνται προς την επιφάνεια μεταφέροντας οξυγόνο στη μάζα των αποβλήτων. Η μεταφορά οξυγόνου γίνεται κυρίως κατά το σχηματισμό της φυσαλίδας και λίγο μετά την απελευθέρωσή της από το διαχυτήρα. Η απόδοση της μεταφοράς οξυγόνου επηρεάζεται κυρίως από το μέγεθος των φυσαλίδων, τη διάταξη των διαχυτήρων και τη γεωμετρία της δεξαμενής. Γενικά όσο μειώνεται το μέγεθος των φυσαλίδων τόσο μεγαλώνει η απόδοση της μεταφοράς οξυγόνου, λόγω της αύξησης του εμβαδού της διαχωριστικής επιφάνειας αέρα αποβλήτου για δεδομένο όγκο αποβλήτου.

Η απόδοση μεταφοράς οξυγόνου $\epsilon\%$ των διαχυτήρων ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας απορροφούμενου από τα απόβλητα οξυγόνου στη μονάδα του χρόνου προς τη μάζα παρεχόμενου στα απόβλητα οξυγόνου στη μονάδα του χρόνου.

Οι βασικοί τύποι διαχυτήρων είναι δύο, οι πορώδεις και οι μη πορώδεις. Οι πορώδεις παράγουν λεπτές-μέσες φυσαλίδες με τη διαβίβαση αέρα μέσα από ένα πορώδες μέσο και έχουν σχήμα σωλήνα, πλάκας ή θόλου. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι επιτυγχάνουν καλή ανάμιξη, διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία στη δεξαμενή αερισμού και παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της παροχής αέρα. Τα μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό αρχικό κόστος, το υψηλό κόστος συντήρησης, το ότι απαιτούν φίλτρα αέρα ώστε να αποφεύγεται το φράξιμο των πόρων και το ότι δημιουργούν περιορισμούς για τη γεωμετρία της δεξαμενής όταν υπάρχει σπειροειδής ροή.

Οι μη πορώδεις παράγουν μέσες χοντρές φυσαλίδες από στόμια. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι δεν φράζουν, διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία και έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης. Τα μειονεκτήματα είναι το υψηλό αρχικό κόστος, η χαμηλή σχετικά απόδοση και η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.

Οι μη πορώδεις διαχύτες χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες. Τους διαχύτες σταθερού στομίου, τους διαχύτες με βαλβίδα στο στόμιο, τους διάτρητους πλαστικούς σωλήνες και τους στατικούς αεριστήρες με τους οποίους και ασχολούμαστε στην παρούσα μελέτη.

2.3 Στατικοί αεριστήρες

Είναι συσκευές διασποράς αέρα σε υγρό, οι οποίες αποτελούνται από κατακόρυφο σωλήνα που περιέχει διαφράγματα ή πτερωτές έτσι ώστε ο αέρας να διασπάται σε μικρότερες φυσαλίδες. Η παροχή του αέρα γίνεται στη βάση του αεριστήρα με σωληνώσεις. Η διέλευση του αέρα μέσα από τον αεριστήρα δημιουργεί παράλληλα ανακύκλωση της υγρής φάσης (κάθετη σπειροειδής ροή). Αν και η απόδοση των στατικών αεριστήρων δεν είναι πολύ μεγάλη, έχει παρατηρηθεί στην πράξη ότι παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου.

Στατικός αεριστήρας τύπου Pulsar :

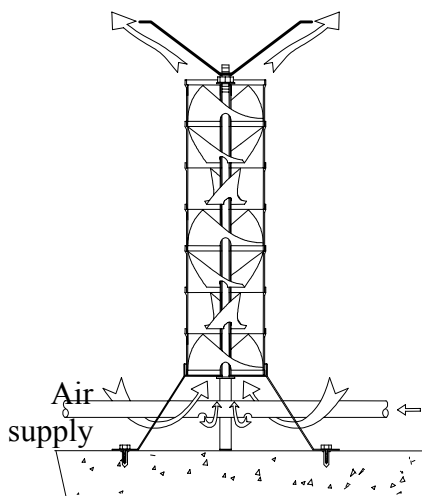
Οι στατικοί αεριστήρες χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Τα πειράματα στην παρούσα εργασία έγιναν σε πιλοτική δεξαμενή αερισμού όγκου 150 m³ εφοδιασμένη με τους στατικούς διαχύτες PULSAR (AQUA, Α. Χουρδάκης, Ηράκλειο Κρήτης). Ο διαχύτης Pulsar συνδυάζει υψηλές αποδόσεις σε εκμετάλλευση αέρα με μεγάλες παροχές ανακύκλωσης λυμάτων χωρίς να παρουσιάζει προβλήματα εμφράξεων και ασταθούς λειτουργίας. Είναι κατασκευασμένος από όμοια πλαστικά στοιχεία τα οποία περιέχουν ειδικά μελετημένα διαφράγματα και συνδέονται σταθερά μεταξύ τους με τη βοήθεια κεντρικού άξονα πάνω σε μεταλλική βάση από ανοξείδωτο χάλυβα. Τα πλαστικά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε τα διαδοχικά πτερύγια που περιέχονται σε αυτά να δημιουργούν στο σύνολό τους δυο ασυνεχείς ψευδοελικοειδείς διαδρομές.

Το γεωμετρικό σχήμα του πτερυγίου και η σχετική τους τοποθέτηση είναι βασικά στοιχεία για την υψηλή απόδοση της συσκευής. Σε κάθε ψευδοελικοειδή διαδρομή, δυο διαδοχικά πτερύγια έχουν σταθερή σχετική γωνία μεταξύ τους πάνω στο

οριζόντιο επίπεδο 45° . Τα επίπεδα όμως των δύο διαδοχικών πτερυγίων δεν είναι παράλληλα μεταξύ τους με αποτέλεσμα οι φυσαλίδες του αέρα στην άνοδό τους να ακολουθούν τις μεταβαλλόμενες κλίσεις των επιπέδων των πτερυγίων και να δέχονται ισχυρές διατμητικές τάσεις, με συνέπεια τη διαίρεσή τους σε μικρότερες. Επιπλέον το σχήμα των πτερυγίων είναι τέτοιο ώστε να οδηγούν συνεχώς το μίγμα αέρα-υγρού προς την περίμετρο, αντιδρώντας στην φυσική του τάση για συγκέντρωση στο κέντρο, το οποίο αξονικά φαίνεται να είναι φραγμένο.

Το κενό που αφήνουν τα πτερύγια μεταξύ τους κατακόρυφα και το οποίο δημιουργεί ασυνέχειες στις ψευδοελικοειδείς οδούς, επιτρέπει τη μεταφορά μαζών από τη μια οδό στην άλλη με ευνοϊκή επίδραση στην όλη απόδοση του συστήματος, αλλά και εξισορρόπηση των ανισομερών φορτίσεων των δυο ελικοειδών διαδρομών, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν καθόλου κραδασμοί στην κατασκευή.

Ο αέρας τροφοδοτείται στο διαχύτη από δύο μεγάλης διαμέτρου τρύπες στη βάση του και η πτώση πίεσης του αέρα όπως τροφοδοτείται στον διαχύτη είναι αμελητέα (μερικά cm H_2O) σε σχέση με την πτώση πίεσης που παρατηρείται στους διαχύτες λεπτής φυσαλίδας. Παρουσιάζει επίσης ευκολία στην τοποθέτησή του και ανάλογα με το βάθος του ρευστού, μπορούν εύκολα να προστίθενται ή να αφαιρούνται στοιχεία για την επίτευξη της καλύτερης τεχνικής και οικονομικής λύσης [2]. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται ο στατικός διαχύτης Pulsar.



Σχήμα 1: Σχεδιάγραμμα ενός διαχύτη PULSAR με 7 στοιχεία με δύο πτερύγια ανάμειξης στην κορυφή.

Για τους πορώδεις διαχύτες αέρα, λόγω του μαλακού αερισμού η στοιβάδα των επιφανειακά ενεργών ουσιών είναι αυξημένη και ισχυρή σε αντίθεση με τον Pulsar όπου οι ισχυρές διατμητικές δυνάμεις λόγω τριβής του αέρα στα πτερύγια και των συγκρούσεων των φυσαλίδων μεταξύ τους η στοιβάδα είναι χαλαρή με αποτέλεσμα να ευνοείται η διάχυση οξυγόνου.

Συνολικά τα πλεονεκτήματα των αεριστήρων Pulsar, σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες είναι τα εξής :

- Εξαιρετικά αξιόπιστο σύστημα αερισμού.
- Αυτορυθμιζόμενο (μεταβολές παροχής και φορτίου)
- Ελάχιστη συντήρηση χωρίς ειδικές γνώσεις.
- Εξαιρετική ποιότητα επεξεργασμένου νερού ($BOD_5 < 15 \text{ ppm}$) χωρίς την χρήση χημικών.
- Ελάχιστη παραγωγή περίσσειας βιολογικής ιλύος.
- Καμιά ενόχληση από οσμές, θόρυβο και έντομα.
- Εύκολα επεκτάσιμο. Χαμηλό κατασκευαστικό κόστος & λειτουργικά έξοδα.

3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΟΞΥΓΟΝΟΥ $K_L a$ – ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Όπως προαναφέραμε η μεταφορά οξυγόνου από την αέρια φάση στην υγρή (στην περίπτωση μας από τις φυσαλίδες στα απόβλητα) περιγράφεται από τη σχέση :

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι παράμετροι $K_L a$ και C^* είναι καθοριστικής σημασίας για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός συστήματος αερισμού. Το $K_L a$ επίσης χρησιμοποιείται τελικά ως βασική παράμετρος σχεδιασμού ενός συστήματος αερισμού και ως επαρκές μέτρο αξιολόγησης της απόδοσής του. Ο ογκομετρικός ή συνολικός συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου (volumetric or overall oxygen mass transfer coefficient) χρησιμοποιείται συχνά για να συγκρίνει την αποδοτικότητα της οξυγόνωσης σε βιοαντιδραστήρες ή δεξαμενές αερισμού καθώς και την ικανότητα ανάδευσης των συστημάτων που αυτοί διαθέτουν.

Ο συντελεστής $K_L a$ είναι το γινόμενο του φαινομένου μέσου χωρικού συντελεστή μεταφοράς οξυγόνου στην υγρή φάση K_L (m/sec) επί το εμβαδόν διεπιφάνειας ανα μονάδα όγκου (1/m).

3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το $K_L a$

Το a επηρεάζεται από το gas-holdup (η αυξημένη κατακράτηση αέρα αυξάνει το συνολικό εμβαδόν της διεπιφάνειας) και την κατανομή της διαμέτρου των φυσαλίδων μέσα στο σώμα της υγρής φάσης (οι μικρότερου μεγέθους φυσαλίδες έχουν μεγαλύτερη έκταση διεπιφάνειας). Μεγάλες ογκομετρικές παροχές αέρα προκαλούν συνένωση των φυσαλίδων με αποτέλεσμα τη μείωση του a . Επίσης με την αύξηση της διαμέτρου των φυσαλίδων αυξάνεται και η ταχύτητα ανόδου τους με συνέπεια τη μείωση του χρόνου παραμονής της αέριας φάσης στη δεξαμενή. Αυτό μειώνει την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου. Παρόμοιο αποτέλεσμα έχει και η μεγάλη ταχύτητα ανακύκλωσης του υγρού. Σημαντική επίδραση στο a φαίνεται να έχει και το βάθος βύθισης των διαχυτών. Η αύξηση του βάθους ή υδροστατική πίεση μεγαλώνει και συνεπώς μειώνεται το μέγεθος των φυσαλίδων. Τέλος το μέγεθος και η συγκέντρωση της στερεάς φάσης έχουν σημαντική επίδραση στην συνένωση των φυσαλίδων και την κατακράτηση αέρα.

Το K_L επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία. Η διάχυση του οξυγόνου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Γενικά η αύξηση του K_{La} σε σχέση με τη θερμοκρασία των 20°C εκτιμάται από τη σχέση :

$$K_{La(T)} = K_{La(20)} (1,028)^{T-20}$$

Όπου T η θερμοκρασία σε $^\circ\text{C}$

Έχει δειχθεί ότι ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου παραμένει σταθερός σε θερμοκρασίες $20-50^\circ\text{C}$ στους airlift αντιδραστήρες. Οι ρυπαντικές ουσίες που περιέχονται στο απόβλητο επίσης επηρεάζουν τη μεταφορά οξυγόνου στην κύρια μάζα του υγρού, αλλά κυρίως επιδρούν στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού. Τα οργανικά μειώνουν τη διάχυση του οξυγόνου στο υγρό και επηρεάζουν τις ιδιότητες και το μέγεθος της διεπιφάνειας. Οι τασιενεργές ενώσεις επιδρούν επίσης στη διεπιφάνεια αερίου υγρού.

Ο πειραματικός προσδιορισμός του K_L και του a είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Ο υπολογισμός του γινομένου K_{La} όμως είναι σχετικά εύκολος. Μπορεί να γίνει είτε από πειραματικές και εμπειρικές συσχετίσεις είτε με βάση πειραματικές μετρήσεις. Ο πρώτος τρόπος όμως έχει μεγάλο περιθώριο λάθους και πρέπει να χρησιμοποιείται περισσότερο ως μέτρο σύγκρισης (ενδεικτική τιμή).

3.2 Μέθοδοι προσδιορισμού του ρυθμού οξυγόνωσης σε πραγματικές συνθήκες

Έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό του K_{La} . Οι περισσότερες διεξάγονται σε καθαρό νερό και γίνεται προσπάθεια να προσομοιωθούν κατά το δυνατό οι πραγματικές συνθήκες. Τα πειράματα αυτά είναι επαναλήψιμα και οι συνθήκες ορίζονται με ακρίβεια και μπορούν να ελεγχθούν εύκολα. Αυτό δίνει ικανοποιητική ακρίβεια στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Πρέπει όμως να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι το αποτέλεσμα που δίνουν οι δοκιμές σε νερό θα έχει κάποια διαφορά από το συντελεστή οξυγόνωσης σε πραγματικές συνθήκες. Όταν το σύστημα λειτουργεί παρουσία αποβλήτων, βιομάζας και των προϊόντων της το K_{La} μεταβάλλεται. Αυτό κάνει αναγκαία τη διεξαγωγή πειραμάτων και κατά την πραγματική λειτουργία του συστήματος.

Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του K_{La} σε πραγματικές συνθήκες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες : τις μεθόδους σταθερών συνθηκών και τις δυναμικές μεθόδους.

3.2.1 Μέθοδοι σε σταθερές συνθήκες

Βασίζονται στην παραδοχή της σταθερής με το χρόνο συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου. Οι βασικότερες μέθοδοι σε σταθερές συνθήκες είναι η στατική μέθοδος και μέθοδος ισοζυγίου μάζας αέριας φάσης.

Η πρώτη βασίζεται στην απλοποίηση της εξίσωσης-ορισμού του $K_L a$ που επιφέρει η παραδοχή σταθερών συνθηκών.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C^* - C) - qx \Rightarrow K_L a = \frac{qx}{C^* - C}$$

όπου qx η κατανάλωση οξυγόνου από τους μικροοργανισμούς και C η χωρικά μέση συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου για τον όγκο ελέγχου

Η μέθοδος ισοζυγίου μάζας αέριας φάσης βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο ρεύμα εισόδου και εξόδου. Θεωρώντας πλήρη ανάδευση και σταθερές συνθήκες για την αέρια φάση, το έλλειμμα του οξυγόνου από το αέριο ρεύμα κατά μήκος της πορείας του στον αντιδραστήρα θα πρέπει να είναι ίσο με το ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται στην υγρή φάση.

3.2.2 Δυναμική μέθοδος

Η παροχή αέρα σταματάει ώστε να καταναλωθεί το οξυγόνο από τη βιομάζα. Στη συνέχεια ξαναρχίζει και γίνονται μετρήσεις της συγκέντρωσης με το χρόνο μέχρι το σύστημα να επιστρέψει στις αρχικές συνθήκες. Αυτή η μέθοδος μας επιτρέπει ταυτόχρονο υπολογισμό του $K_L a$ και του qx . Στην πρώτη φάση (χωρίς παροχή αέρα)

υπολογίζουμε το qx : $\frac{dC}{dt} = -qx \Rightarrow C = C_0 - qx\Delta t$. Η κλίση της ευθείας μας δίνει το

qx το οποίο θεωρείται σταθερό κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στη δεύτερη φάση (παροχή αέρα) το ισοζύγιο μάζας είναι : $\frac{dC}{dt} = K_L a(C^* - C) - qx$. Η εξίσωση αυτή

λύνεται αναλυτικά. Αντιπαραβάλλοντας τα δεδομένα με την εξίσωση μπορούμε χρησιμοποιώντας κάποια στατιστική μέθοδο να υπολογίσουμε τα $K_L a$ και C^* .

Η συγκέντρωση κορεσμού του υγρού σε οξυγόνο επίσης επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων. Αυτοί είναι η θερμοκρασία, η πίεση, το γραμμομοριακό κλάσμα του οξυγόνου στην αέρια φάση, τα διαλυμένα άλατα και τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου. Όσον αφορά τη συσχέτιση του C^* με τη θερμοκρασία και την αλατότητα η βιβλιογραφία προσφέρει αρκετά ακριβείς τιμές. Γενικά η διαλυτότητα που ουσιαστικά ταυτίζεται με το C^* μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και την αύξηση της αλατότητας. Η μεταβολή της πίεσης (αύξηση με το βάθος) προκαλεί επίσης αύξηση του C^* όπως φαίνεται από το νόμο του Henry, η σταθερά του Henry όμως δεν είναι εύκολα υπολογίσιμη πειραματικά. Η επίδραση των χαρακτηριστικών των λυμάτων συνήθως εκτιμάται με τη χρήση του παράγοντα β που ορίζεται από τη σχέση $\beta = C^*_{\text{λυμάτων}} / C^*_{\text{νερού}}$. Η πειραματική του μέτρηση είναι επίσης δύσκολη.

3.3 Λύση της εξίσωσης ορισμού του $K_L a$

Μια προσέγγιση του $K_L a$ με τη βοήθεια πειραματικών μετρήσεων μπορεί να γίνει με τη βοήθεια της εξίσωσης μεταφοράς μάζας του οξυγόνου. Η εξίσωση αυτή μπορεί να λυθεί αναλυτικά και να έρθει στη μορφή $C = f(t)$. Το f θα περιέχει ως παραμέτρους τα

C^* και $K_L a$. Συνεπώς συγκρίνοντας τη χρονοσειρά των μετρήσεων του πεδίου με τη μορφή της εξίσωσης μπορούμε να προσδιορίσουμε τις άγνωστες παραμέτρους. Τη συγκέντρωση κορεσμού σε οξυγόνο του υγρού C^* μπορούμε να το βρούμε από πίνακες με δεδομένη τη θερμοκρασία σε κάθε πείραμα. Μπορούμε όμως να την υπολογίσουμε με τη μέθοδο που αναφέρεται στη συνέχεια παράλληλα με το $K_L a$ θεωρώντας την άγνωστη παράμετρο. Κάναμε αυτή την επιλογή για να πετύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το C^* μπορεί να επηρεαστεί και από άλλους παράγοντες πέρα από τη θερμοκρασία τους οποίους δεν μπορούμε να εκτιμήσουμε με αρκετή ακρίβεια. Οι τιμές των πινάκων πάντως θα μας χρησιμεύσουν ως σημείο αναφοράς. Θα είναι χρήσιμο να έχουμε μια ιδέα για τον αριθμό που περιμένουμε ώστε να θέσουμε και κατάλληλους περιορισμούς στον αλγόριθμο αναζήτησης του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων.

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης γίνεται ως εξής :

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C)$$

Η εξίσωσή μας είναι της μορφής $y' = A + By$ με $y = C$, $A = K_L a C^*$ και $B = -K_L a$

Η διαφορική εξίσωση $y' = A + By$ είναι γραμμική συνεπώς η γενική της λύση θα είναι $y = y_0 + y_p$

Όπου y_0 η γενική λύση της ομογενούς εξίσωσης
 y_p μια οποιαδήποτε ειδική λύση

Η ομογενής $y' = -By$ είναι χωριζομένων μεταβλητών και λύνεται ως εξής :

$$\frac{dy}{dt} = -By \Rightarrow$$

$$\frac{dy}{y} = -B dt \Rightarrow$$

$$\int \frac{dy}{y} = \int -B dt \Rightarrow$$

$$\ln y = -B t \Rightarrow$$

$$y_0 = R e^{-Bt}$$

όπου R μια αυθαίρετη σταθερά

Από τη στιγμή που η εξίσωσή μας είναι γραμμική, μια ειδική λύση της αποτελεί μια σταθερή ποσότητα, έστω M . Αντικαθιστώντας στην αρχική εξίσωση έχουμε :

$$M' = A - BM \Rightarrow$$

$$M = \frac{A}{B}$$

Η γενική λύση της εξίσωσής μας λοιπόν θα είναι :

$$y = \frac{A}{B} + R e^{-Bt}$$

Για να λυθεί το πρόβλημα αρχικών τιμών (εύρεση της αυθαίρετης σταθεράς R) χρησιμοποιούμε την αρχική συνθήκη $y(0)=0$ που ισχύει στην περίπτωση μας. Έχουμε λοιπόν :

$$0 = \frac{A}{B} + R \Rightarrow$$

$$y = \frac{A}{B} + \frac{A}{B} e^{-Bt} \Rightarrow$$

$$C = C^* - C^* \exp(-K_L a t) \Rightarrow$$

$$C = C^*(1 - \exp(-K_L a t))$$

3.4 Εύρεση παραμέτρων

Έχοντας την αναλυτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς οξυγόνου θα αντιπαραβάλλουμε τα αποτελέσματά της με τα δεδομένα του πεδίου για διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων C^* και $K_L a$. Ο συνδυασμός που θα μας δίνει την μικρότερη απόκλιση από τη χρονοσειρά των δεδομένων του πεδίου θα είναι αυτός που προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα. Ως μέτρο της απόκλισης θα χρησιμοποιήσουμε την ποσότητα SSE.

$$SSE = \sum (C_{\text{δεδομένων}} - C_{\text{μοντέλου}})^2$$

Η λεπτομερειακή ανάλυση της μεθόδου υπολογισμού των παραμέτρων (Direct Search) γίνεται στο κεφάλαιο 5.

Η παρουσίαση και τα συμπεράσματα που βγήκαν από τα αποτελέσματα της μεθόδου αναλύονται στο κεφάλαιο 7.

4 AIRLIFT ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ - ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΗΡΕΣΤΕΡΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η προαναφερθείσα μέθοδος μας δίνει μια πρώτη προσέγγιση για τις τιμές του K_{La} και του C^* . Μια καλύτερη προσέγγιση των παραμέτρων μας, θα ήταν εφικτή με τη χρήση ενός πιο ολοκληρωμένου και συστηματικού μοντέλου. Η υδροδυναμική συμπεριφορά των στατικών διαχυτών είναι συγγενής με αυτή των airlift αντιδραστήρων. Συνεπώς ένα μοντέλο που θα βασίζεται στη λειτουργία των αντιδραστήρων αυτών θα έδινε μια καλή προσομοίωση του συστήματός μας.

4.1 Airlift αντιδραστήρες

Οι airlift αντιδραστήρες έχουν ευρεία χρήση σε χημικές ή βιολογικές διεργασίες. Συνδυάζουν καλή λειτουργία με μικρό λειτουργικό κόστος. Έχουν υψηλή απόδοση αερισμού και ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου είναι πολλαπλάσιος αυτού που επιτυγχάνεται σε συμβατικά συστήματα αερισμού. Κύριο χαρακτηριστικό της δομής τους είναι η παρουσία ενός κατακόρυφου σωλήνα τοποθετημένου στο κέντρο τους (draft tube) που ρυθμίζει την κυκλοφορία της ροής. Η διοχέτευση του αέρα γίνεται από διαχυτήρες (spargers). Η παροχή του αέρα διοχετεύει οξυγόνο και συντελεί στην καλή ανάμιξη του υγρού. Η περιοχή του αντιδραστήρα μέσα στην οποία διαχέεται ο αέρας λέγεται air-riser και μπορεί να βρίσκεται μέσα ή έξω από το σωλήνα. Οι φυσαλίδες ανέρχονται στο air-riser και παρασύρουν μαζί το υγρό σε κάθετη ροή. Παράλληλα παρατηρείται μια αντίθετη κίνηση ίσου ποσού της υγρής φάσης μέσα στο downcomer. Στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα υπάρχει συχνά ένας μεγάλος όγκος με σκοπό το διαχωρισμό των φάσεων αν είναι επιθυμητή η αποδέσμευση της ροής στον downcomer από φυσαλίδες. Οι airlift αντιδραστήρες χωρίζονται σε εσωτερικού και εξωτερικού βρόχου ανάλογα με τη θέση του air-riser σε σχέση με τον κεντρικό σωλήνα.

Η ροή ανακύκλωσης της υγρής φάσης στους αντιδραστήρες οφείλεται στη διαφορά του όγκου αέρα ανάμεσα στον air-riser και τον downcomer που δημιουργεί διαφορά στην πυκνότητα της υγρής φάσης, με αποτέλεσμα η υγρή φάση να ανακυκλώνεται. Η πυκνότητα είναι πάντα μικρότερη στον riser συνεπώς η ροή ανέρχεται σε αυτόν και κατέρχεται στον downcomer. Ο καλός διαχωρισμός υγρής-αέριας φάσης στη ζώνη διαχωρισμού δημιουργεί μεγάλη ροή της υγρής φάσης. Για να επιτευχθεί αυτός ο διαχωρισμός σε αντιδραστήρα εσωτερικού βρόχου χρειάζεται προσεκτικός σχεδιασμός. Πρέπει να κρατηθεί σε χαμηλά επίπεδα η ταχύτητα της υγρής φάσης στην είσοδο του downcomer για να αποφευχθεί η διείδυση φυσαλίδων σε αυτόν. Για να γίνει αυτό η ζώνη διαχωρισμού πρέπει να έχει μεγάλο όγκο.

4.2 Παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός airlift αντιδραστήρα

Η κατακράτηση αέριας φάσης (gas hold-up) ϵ_G που αποτελεί μέτρο της παρουσίας της αέριας φάσης στον αντιδραστήρα και ισούται με το λόγο του όγκου της αέριας φάσης προς τον συνολικό όγκο. Πειραματικά μετράται με τη μανομετρική μέθοδο.

Η ταχύτητα διάκενου υγρής φάσης (linear liquid velocity) U_{LD} που είναι ο λόγος της ροής της υγρής φάσης προς το εμβαδόν διατομής λαμβάνοντας υπόψη και την παρουσία των φυσαλίδων (μείωση της διατομής κατά ποσό ίσο με το gas hold-up). Υπολογίζεται συνήθως με τη μέθοδο μέτρησης αγωγιμότητας.

Οι χρόνοι ανακύκλωσης (circulation time) t_c και ανάμιξης (mixing time) t_m που υπολογίζονται από τις καμπύλες απόκρισης του μετρητή ηλεκτρικής αγωγιμότητας ή του pHμέτρου.

Η διάμετρος των φυσαλίδων (bubble diameter) d_b που σχετίζεται άμεσα με τη μεταφορά οξυγόνου στην υγρή φάση όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Η κατανομή του μεγέθους των φυσαλίδων έχει επίδραση και στις υπόλοιπες παραμέτρους.

Οι παραπάνω ιδιότητες είναι δυνατόν να επηρεαστούν από το σχεδιαστή-ερευνητή μέσω των λειτουργικών, των γεωμετρικών και των φυσικοχημικών συνθηκών που θα επιβάλλει στο σύστημά του.

4.3 Παράμετροι διαμορφώσιμοι από τον μελετητή

Η βασική λειτουργική παράμετρος που επηρεάζει τις ιδιότητες λειτουργίας του αντιδραστήρα είναι η επιφανειακή ταχύτητα αέρα (superficial gas velocity) u_{GR} που ορίζεται ως ο λόγος της ογκομετρικής παροχής αέρα προς το εμβαδό της διατομής του riser και μπορεί να μεταβληθεί εύκολα μέσω της αλλαγής της παροχής αέρα. Αύξηση του u_{GR} επιφέρει αύξηση της κατακράτησης αέρα, μείωση του χρόνου παραμονής και ανακύκλωσης των φυσαλίδων στον riser και αύξηση της γραμμικής ταχύτητας της υγρής φάσης.

Από τις γεωμετρικές παραμέτρους η βασικότερη είναι ο λόγος διατομής του downcomer προς τη διατομή του riser k . Ουσιαστικά η παράμετρος που μεταβάλλεται είναι η διατομή του downcomer. Για σταθερή επιφανειακή ταχύτητα αύξηση του k σημαίνει μεγάλη γραμμική ταχύτητα και αύξηση του όγκου του υγρού στον riser σε σχέση με τον συνολικό όγκο. Για μεγάλες παροχές αέρα η μεταβολή του k επιδρά λιγότερο στις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Σημαντική γεωμετρική παράμετρος είναι και το μέγεθος της ζώνης διαχωρισμού (disengagement zone), για την επίδραση της οποίας όμως η βιβλιογραφία δίνει αντιφατικά συμπεράσματα.

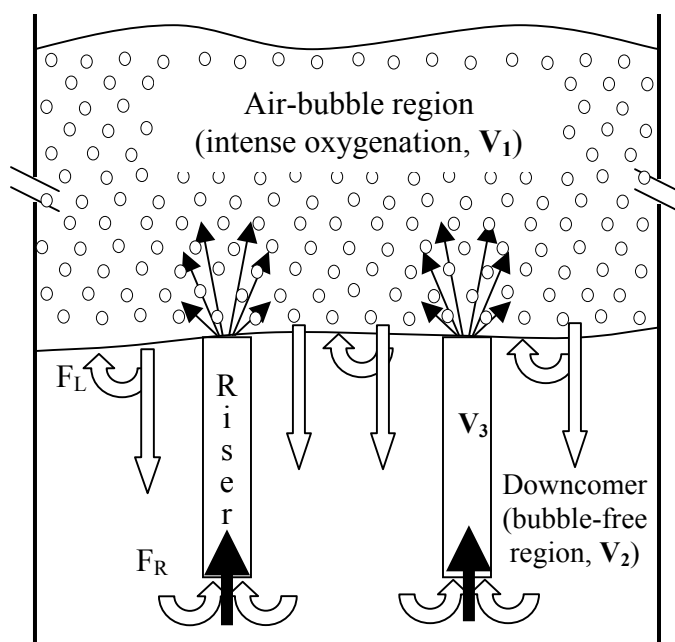
4.4 Στατικοί διαχύτες

Η ροή στους στατικούς διαχύτες είναι παρόμοια με αυτή των airlift αντιδραστήρων εσωτερικού βρόχου. Υπάρχει ο διαχωρισμός των τριών τμημάτων air-riser, downcomer και separator zone αλλά υπάρχουν και διαφορές. Οι περιοχές της ζώνης διαχωρισμού και του downcomer δεν οριοθετούνται από τοιχώματα ώστε να είναι ελεγχόμενη η μορφή της ροής. Η παρουσία διαφραγμάτων μέσα στο σώμα του διαχύτη και πτερυγίων στην κορυφή του οδηγεί τις φυσαλίδες σε μεγάλη ακτινική διασπορά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ιδιόμορφου air-riser. Η ροή επηρεάζεται από γειτονικούς αεριστήρες και από τυχαίες δευτερεύουσες ροές. Ο λόγος του όγκου του διαχύτη σε σχέση με το συνολικό είναι πολύ μικρός. Το γεγονός αυτό αυξάνει την ένταση της ανακυκλοφορίας. Στους στατικούς διαχύτες υπάρχει δυνατότητα παραγωγής λεπτών φυσαλίδων, πράγμα που επηρεάζει την υδροδυναμική του συστήματος.

4.5 Διαμόρφωση μοντέλου

Η σχέση στην οποία βασίζεται η προσέγγιση που έγινε στο Κ₁α στο προηγούμενο κεφάλαιο εκφράζεται για όγκο ελέγχου ίσο με τον συνολικό όγκο της δεξαμενής και προϋποθέτει κάποιες παραδοχές. Η πιο ουσιαστικές είναι η πλήρης ανάμιξη του διαλυμένου οξυγόνου και η ομοιογένεια στην υδροδυναμική συμπεριφορά και στη μεταφορά μάζας του συστήματος. Στην περίπτωση των στατικών διαχυτών, οι παραδοχές αυτές δεν ισχύουν με αποτέλεσμα τα αποτελέσματά μας να μην είναι απολύτως αξιόπιστα. Η αδυναμία αυτή γίνεται πιο προφανής μετά τη μελέτη των συγγενών με το σύστημά μας airlift αντιδραστήρων.

Η λύση λοιπόν που προτάθηκε είναι η διαμερισματοποίηση του όγκου ελέγχου σε τμήματα παρόμοια με αυτά ενός airlift αντιδραστήρα. Η δεξαμενή δηλαδή θα διαιρεθεί νοητά σε air-riser (ο χώρος μέσα στον διαχύτη), downcomer (ο χώρος έξω από το διαχύτη από τον πυθμένα μέχρι το ύψος του διαχύτη) και separator zone (ο χώρος από το ύψος του διαχύτη και πάνω). Για κάθε έναν από αυτούς τους χώρους θα διατυπωθούν τα ισοζύγια μάζας για το οξυγόνο.



Στην Περιοχή 1 έχουμε έντονη ανάμειξη και παρουσία φυσαλίδων (Air bubble region), στην Περιοχή 2 έχουμε οξυγόνωση της υγρής φάσης χωρίς φυσαλίδες αλλά με την κυκλοφορία του μερικώς κορεσμένου υγρού από την περιοχή 1 (Downcomer) και στην Περιοχή 3 ένα τμήμα της συνολικής ροής υγρού από την περιοχή 1 εισέρχεται στον διαχύτη και έρχεται σε εντονότατη ανάμειξη με τον αέρα που εισέρχεται (Riser). Η συνολική ροή της υγρής φάσης από την περιοχή 1 στην 2 είναι $(F_L + F_R)$. Από αυτή θεωρούμε ότι F_R (m^3/h) πηγαίνουν στην είσοδο του διαχύτη (riser) ενώ F_L (m^3/h) επιστρέφουν με χαμηλότερη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) στην περιοχή 1. Η συγκέντρωση του DO εξόδου μπορεί να θεωρηθεί ως συγκέντρωση εισόδου για τον επόμενο όγκο ελέγχου κατά τη φορά της ροής.

4.6 Διατύπωση εξισώσεων

Στην περιοχή 1 (air bubble region) αν θεωρήσουμε τέλεια ανάμειξη και δεν λάβουμε υπόψη την αμελητέα οξυγόνωση του υγρού από την ατμόσφαιρα μέσω της επιφάνειας, η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου C_1 δίδεται από την εξίσωση (Καλογεράκης et al. ,2002):

$$\frac{dC_1}{dt} = (k_L a) (C^* - C_1) + \frac{F_R}{V_1} (C_{\text{riser}} - C_1) + \frac{F_L}{V_1} (C_2 - C_1)$$

όπου : F_R η ογκομετρική παροχή του νερού που εισέρχεται στην περιοχή 2 από την περιοχή 1 και αφού αναμειγνύεται, εισέρχεται στον Riser
 F_L η παροχή που εισέρχεται στην περιοχή 2 και αφού αναμειγνύεται, επιστρέφει στη 1
 $K_L a$ ο συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου από τις φυσαλίδες στην υγρή φάση
 V_1 ο όγκος της περιοχής 1
 C^* η συγκέντρωση κορεσμού του υγρού σε οξυγόνο
 C_{riser} η συγκέντρωση οξυγόνου στην έξοδο του διαχύτη (riser)

Στην περιοχή 2 (downcomer) θεωρούμε ότι η ανάμειξη λόγω της κυκλοφορίας της υγρής φάσης είναι αρκετά υψηλή και ότι στην περιοχή αυτή δεν υπάρχουν φυσαλίδες οπότε το ισοζύγιο μάζας για το διαλυμένο οξυγόνο C_2 μας δίνει :

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{F_L + F_R}{V_2} (C_1 - C_2)$$

όπου : V_2 ο όγκος της υγρής φάσης/περιοχής 2

Στην περιοχή 3 (riser) κάνουμε την παραδοχή ψευδο-μονίμων (quasi-steady state) συνθηκών. Η ανάμειξη και οξυγόνωση που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή αυτή είναι πολύ έντονες συνεπώς η παραδοχή αυτή είναι θεμιτή. Μπορούμε λοιπόν να εκφράσουμε την συγκέντρωση εξόδου του riser C_{riser} μέσω της σχέσης :

$$C_{\text{riser}} = \lambda C^* + (1 - \lambda) C_2$$

όπου λ το ποσοστό προσέγγισης συνθηκών κορεσμού στην έξοδο του riser.

Οι παραδοχές που έχουμε κάνει γράφοντας αυτές τις εξισώσεις είναι οι εξής : Η ροή της υγρής φάσης F_L είναι κοινή για όλους τους επιμέρους όγκους ελέγχου. Η συγκέντρωση κορεσμού του υγρού σε οξυγόνο C^* δεν μεταβάλλεται στα τρία διαμερίσματα, παρόλο που είναι συνήθως μεγαλύτερο του C^* με βάση τους πίνακες για τη θερμοκρασία λειτουργίας.

Η παράλληλη λύση των τριών αυτών εξισώσεων, θα γίνει με αριθμητικό τρόπο με τη βοήθεια του πακέτου MATLAB. Η αναλυτική λύση δεν είναι δυνατή. Το αποτέλεσμα θα μας δώσει μια πιο σωστή εικόνα της λειτουργίας του συστήματος των διαχυτών. Ακολουθώντας στη συνέχεια παρόμοια διαδικασία με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου θα αντιπαραβάλλουμε τα δεδομένα του μοντέλου μας με τα δεδομένα του πειράματος. Έτσι θα βρούμε το συνδυασμό των παραμέτρων που μας δίνει την καλύτερη προσέγγιση στην πραγματικότητα (μικρότερη απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα). Οι παράμετροι σε αυτή την περίπτωση είναι περισσότεροι. Το $K_L a$ και το C^* παραμένουν και προστίθενται το F_L , το F_R και το λ . Η ανάλυση αυτή θα γίνει με την μέθοδο direct search που αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

5 ΜΕΘΟΔΟΣ DIRECT SEARCH

Για να εντοπίσουμε το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων στις δύο περιπτώσεις που μας απασχολούν, για να βρούμε δηλαδή τις παραμέτρους που θα δίνουν στο μοντέλο μας την καλύτερη προσέγγιση στις τιμές των πειραματικών μετρήσεων, θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο direct search.

Η μέθοδος direct search είναι στην ουσία ένας στατιστικός αλγόριθμος με επαναληπτικές διαδικασίες που για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων υπολογίζει ένα μέγεθος κριτηρίου, ένα μέγεθος δηλαδή που εκφράζει το κατά πόσο οι παράμετροι έχουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Στην περίπτωση μας το μέγεθος αυτό θα είναι η απόκλιση (SSE) των τιμών του μοντέλου από τις πειραματικές τιμές.

$$SSE = \sum (C_{\text{δεδομένων}} - C_{\text{μοντέλου}})^2$$

Η απόκριση της μεθόδου είναι το σύνολο των παραμέτρων που οδηγούν σε αποτελέσματα με το μικρότερο SSE. Ο τρόπος με τον οποίο η μέθοδος επιλέγει τις παραμέτρους των δοκιμών είναι στατιστικός αλλά ελεγχόμενος για να αποφευχθεί η διενέργεια περιττών υπολογισμών, πράγμα που σίγουρα θα συνέβαινε εάν δοκιμάζαμε τυχαία σύνολα παραμέτρων. Αποτελείται από δύο βρόχους, τον ένα μέσα στον άλλο.

5.1 Περιγραφή μεθόδου

Αρχικά περιορίζουμε τις παραμέτρους μας ($K_1, K_2 \dots K_n$) δίνοντας στο πρόγραμμα μέγιστες και ελάχιστες τιμές (K_{\min}, K_{\max}). Μια εκτίμηση των ακραίων τιμών μπορεί να γίνει από βιβλιογραφικές αναφορές, από προηγούμενες μετρήσεις και από εμπειρικές σχέσεις. Στην περίπτωση που δεν έχουμε επαρκή στοιχεία είναι καλό να αφήνουμε μεγάλα περιθώρια στις παραμέτρους.

Εδώ αρχίζει ο εξωτερικός βρόχος. Δίνουμε μια πρώτη προσέγγιση στις παραμέτρους μας (K_{opt}). Το πιο λογικό είναι να χρησιμοποιήσουμε το μέσο του διαστήματος που έχουμε ορίσει ως διακύμανση των παραμέτρων. Δίνουμε επίσης ένα μέγεθος διακύμανσης (r) για κάθε παράμετρο. Το μέγεθος αυτό θα ορίζει μέσα σε ποια όρια θα κινείται η στατιστική διαλογή των τιμών για κάθε παράμετρο. Στην ουσία ορίζουμε ένα χώρο με αριθμό διαστάσεων n ίσο με τον αριθμό των παραμέτρων, μέσα στον οποίο αυτές μπορούν να κινούνται. Το κέντρο του χώρου αυτού έχει ως συντεταγμένες το πρώτο σετ παραμέτρων. Στην εφαρμογή μας επιλέξαμε το αρχικό r ίσο με το 20% της βασικής μας διακύμανσης. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε παράμετρο

στην αρχική προσέγγιση του εξωτερικού βρόχου καλύπτεται το 40% της βασικής διακύμανσης.

Η μέθοδος δίνει σε κάθε παράμετρο μια τυχαία τιμή μέσα στα προκαθορισμένα όρια, παίρνει δηλαδή ένα τυχαίο σημείο του n -διάστατου χώρου. Αυτό γίνεται προσθέτοντας στην ισχύουσα προσέγγιση τη διακύμανση πολλαπλασιασμένη με έναν τυχαίο αριθμό που κυμαίνεται από -1 μέχρι 1 . Στη συνέχεια υπολογίζει το μέγεθος κριτηρίου SSE. Η διαδικασία αυτή (εσωτερικός βρόχος) ακολουθείται για όσες φορές επιλέξουμε. Στην επιλογή του αριθμού (i) των επαναλήψεων του εσωτερικού βρόχου πρέπει να ληφθεί υπόψη ο αριθμός των παραμέτρων και η διακύμανση που τους έχουμε επιτρέψει. Όσο περισσότερες παραμέτρους έχουμε και όσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα με την οποία μπορούμε να τις περιορίσουμε τόσο μεγαλύτερος πρέπει να είναι και ο αριθμός των τυχαίων συνδυασμών που πρέπει να δοκιμαστούν για να έχουμε αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα.

Έχοντας λύσει τις εξισώσεις μας και υπολογίσει το SSE i φορές, η μέθοδος βρίσκει σε ποιο σύνολο παραμέτρων αντιστοιχεί το ελάχιστο SSE. Το σύνολο αυτό καταχωρείται ως η καινούρια προσέγγιση των παραμέτρων. Παράλληλα η διακύμανση r μειώνεται με ένα παράγοντα της επιλογής μας (για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έχει εκλεγεί παράγοντας μείωσης της διακύμανσης ίσος με 0,9). Δημιουργούμε δηλαδή έναν καινούριο χώρο με κέντρο το νέο σεντ παραμέτρων και μικρότερο από τον προηγούμενο. Στο σημείο αυτό η διαδικασία επιστρέφει στον εξωτερικό βρόχο οι επαναλήψεις του οποίου (j) επηρεάζουν περισσότερο την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.

Η μετακίνηση του κεντρικού σημείου μπορεί να οδηγήσει σε χώρους τα όρια των οποίων ξεφεύγουν από τα αρχικά καθορισμένα όρια για τις παραμέτρους. Για να αποφευχθούν τιμές των παραμέτρων έξω από τα αρχικά καθορισμένα όρια πρέπει να τεθεί μια δικλείδα μέσα στον εσωτερικό βρόχο η οποία στην περίπτωση υπέρβασης θα διαλέγει μια καινούρια τιμή για την παράμετρο.

5.2 Αλγόριθμος direct search

Στη συνέχεια παρατίθεται ο αλγόριθμος με μαθηματικές εκφράσεις (οι συμβολισμοί με bold γραμματοσειρά αναφέρονται σε διανύσματα) :

1. Παίρνουμε μια αρχική εκτίμηση για τα K και διαλέγουμε το αρχικό μέγεθος περιοχής για τα K . Τα καταχωρούμε στα διανύσματα **K_{opt}** και **r** . Διαλέγουμε τον αριθμό των επαναλήψεων του εσωτερικού βρόχου i τον αριθμό των επαναλήψεων του εξωτερικού βρόχου j και τον παράγοντα μείωσης της διακύμανσης (r) γ .
2. Ορίζουμε το $j = 1$
3. Ορίζουμε το $i = 1$

4. Διαλέγουμε τιμές για τις παραμέτρους από τη σχέση : $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{opt} + \theta \mathbf{r}$
Όπου θ μια τυχαία τιμή μεταξύ -1 και 1 . Το θ αλλάζει για κάθε παράμετρο και κάθε επανάληψη.
5. Υπολογίζουμε το μέγεθος κριτηρίου, αυξάνουμε το i κατά 1 και γυρνάμε στο βήμα 2.
6. Συγκρίνουμε τις τιμές του μεγέθους κριτηρίου και αποθηκεύουμε τις παραμέτρους \mathbf{K} που δίνουν το ελάχιστο στο \mathbf{K}_{opt} .
7. Πολλαπλασιάζουμε τα \mathbf{r} με το γ , αυξάνουμε το j κατά 1 και γυρνάμε στο βήμα 3.

Για την εφαρμογή μας ορίζουμε 200 επαναλήψεις του εσωτερικού βρόχου και 50 επαναλήψεις του εξωτερικού.

Μέσα στον εσωτερικό βρόχο βρίσκεται η διαδικασία υπολογισμού της χρονοσειράς των δεδομένων του μοντέλου μας. Η διαδικασία αυτή και ο αριθμός των παραμέτρων είναι τα στοιχεία που αλλάζουν στις δύο εφαρμογές μας.

5.3 Εφαρμογή στην υπο μελέτη περίπτωση

5.3.1 Απλή προσέγγιση

Στην απλή προσέγγιση που βασίζεται στην αναλυτική λύση της εξίσωσης ορισμού του $K_L a$, η χρονοσειρά των δεδομένων του μοντέλου υπολογίζεται εάν εισάγουμε στην εξίσωση $C = C^* (1 - \exp(-K_L a t))$ τις χρονικές τιμές των δεδομένων του πειράματος. Είναι σημαντικό να εισάγουμε στο μοντέλο τις ίδιες χρονικές τιμές με τα δεδομένα ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των χρονοσειρών. Οι δύο παράμετροί μας σε αυτή την περίπτωση είναι το $K_L a$ και το C^* . Το πρόγραμμα της MATLAB που διενεργεί τους υπολογισμούς παρατίθεται στο παράστημα.

5.3.2 Σύνθετη προσέγγιση

Στην προσέγγιση που βασίζεται στο σύστημα των εξισώσεων, τα πράγματα είναι κάπως πιο περίπλοκα. Οι εξισώσεις μας δεν λύνονται αναλυτικά συνεπώς πρέπει να λυθούν αριθμητικά και επίσης πρέπει να επιλυθούν παράλληλα.

$$\frac{dC_1}{dt} = (k_L a) (C^* - C_1) + \frac{F_R}{V_1} (C_{riser} - C_1) + \frac{F_L}{V_1} (C_2 - C_1)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{F_L + F_R}{V_2} (C_1 - C_2)$$

$$C_{riser} = \lambda C^* + (1 - \lambda) C_2$$

Τα δεδομένα συγκέντρωσης επίσης αποτελούνται από δύο σειρές C1 και C2. Η λύση μπορεί να γίνει με τη χρήση μιας ρουτίνας του MATLAB η οποία επιλύει διαφορικές εξισώσεις. Επιλέξαμε την ODE45. Η ρουτίνα αυτή έχει ως είσοδο το σύστημα των εξισώσεων, τις αρχικές συνθήκες συγκέντρωσης και τα χρονικά δεδομένα. Η έξοδός της είναι τα δύο διανύσματα της χρονοσειράς των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Το SSE σε αυτή την περίπτωση είναι :

$$SSE = \sum [(C1_{\text{δεδομένων}} - C1_{\text{μοντέλου}})^2 + (C2_{\text{δεδομένων}} - C2_{\text{μοντέλου}})^2]$$

Οι παράμετροι προς υπολογισμό είναι οι : K_{La} , C^* , F_R , F_L , λ

6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ – ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

6.1 Τοποθεσία-δεξαμενή-μετρήσεις

Τα πειραματικά δεδομένα μας λάβαμε από την πιλοτική μονάδα που πρόσφατα κατασκευάστηκε στο ΚΕΡΕΦΥΤ (Μεταμόρφωση, Αττικής) και έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί μία μικρή πόλη (~1500 κατοίκων). Η δεξαμενή είναι εξοπλισμένη με 6 μονάδες στατικών διαχυτών PULSAR και έχει επιφάνεια εμβαδού 16 m² και βάθος περίπου 9 m. Η κύρια λεκάνη αερισμού μπορεί να δουλέψει ανεξάρτητα (μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν SBR).

Τα πειράματα που θα μελετήσουμε διενεργήθηκαν σε καθαρό νερό. Αρχικά έγινε διακοπή της παροχής του αέρα και έγινε προσθήκη θειώδους νατρίου και ιόντων κοβαλτίου ως καταλύτη για την απομάκρυνση του διαλυμένου οξυγόνου. Όταν το DO έγινε περίπου μηδέν, άρχισε η παροχή του αέρα και γίνονταν μετρήσεις του DO. Οι μετρήσεις του διαλυμένου οξυγόνου γίνονταν ανά 0,5 min και σε τρία διαφορετικά βάθη (0,5m, 4,5m & 8.5 m). Τα δύο πρώτα είναι μέσα στην περιοχή έντονης ανάμειξης και παρουσίας φυσαλίδων ενώ το τρίτο είναι σε απόσταση περίπου 30 cm από το πυθμένα της λεκάνης αερισμού.

6.2 Συνθήκες πειράματος

Τα πειραματικά δεδομένα που επεξεργαζόμαστε στην παρούσα εργασία προέρχονται από τέσσερα διαφορετικά πειράματα που έλαβαν χώρα μέσα στον τελευταίο χρόνο. Έχουμε λοιπόν τέσσερα σετ δεδομένων για τα οποία κάποιες επιπλέον πληροφορίες φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

	Ημερομηνία	Θερμοκρασία °C	Παροχή αέρα (m ³ /h)
RUN 1	4/10/2002	25	234
RUN 2	30/11/2002	18	225
RUN 3	17/1/2003	14	243
RUN4	17/1/2003	14	243

Τα δεδομένα συγκέντρωσης των τεσσάρων πειραμάτων παρατίθενται στο παράρτημα.

6.3 Πτερύγιο διασποράς

Στην άκρη του riser συνήθως τοποθετείται ένα πτερύγιο το οποίο συμμετέχει στη διαδικασία της διασποράς και την κάνει πιο έντονη. Το πτερύγιο αυτό μπορεί να είναι διαφόρων ειδών και ο σχεδιασμός του επιδρά στον συνολικό ρυθμό οξυγόνωσης. Το σταθερό πτερύγιο είναι πιο αποτελεσματικό από το αντίστοιχο ελεύθερα περιστρεφόμενο. Τα αποτελέσματα μέχρι στιγμής δείχνουν ότι το σταθερό κωνικό πτερύγιο είναι το καλύτερο (μέγιστη διαφορά ~10%) αλλά πολύ πλησίον είναι και το πιο απλό. Στο πρώτο από τα πειράματά μας (RUN 1) χρησιμοποιήθηκε σταθερό πτερύγιο, στο δεύτερο (RUN 2) ελεύθερα περιστρεφόμενο και στα δύο τελευταία (RUN 3, RUN 4) σταθερό κωνικό πτερύγιο.

Τα δεδομένα των μετρητών οξυγόνου 1 και 3 παρατηρήσαμε ότι βρίσκονταν πολύ κοντά και συνεπώς τα θεωρήσαμε κατά την μαθηματική ανάλυση ως μια σειρά δεδομένων στην οποία καταχωρήσαμε το μέσο όρο των δύο σειρών. Έχουμε λοιπόν στην ουσία δύο σειρές δεδομένων συγκέντρωσης, μια που εκφράζει το διαλυμένο οξυγόνο στην περιοχή 1 (disengagement zone) και μια που εκφράζει το διαλυμένο οξυγόνο στην περιοχή 2 (downcomer). Αυτό ισχύει αφού έχουμε παραδεχτεί ότι υπάρχει πλήρης ανάμιξη σε κάθε έναν από αυτούς τους χώρους.

6.4 Περιορισμοί παραμέτρων

Οι περιορισμοί που θα θέσουμε για τις παραμέτρους μας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Τα εύρη των τιμών που επιτρέψαμε είναι συνάρτηση της αβεβαιότητας που έχουμε για κάθε μέγεθος. Όσον αφορά το K_{La} τα μόνα δεδομένα που είχαμε προήλθαν από παρελθοντικές μετρήσεις με το ίδιο σύστημα. Για το C^* επιτρέψαμε διακύμανση γύρω από τις τιμές της βιβλιογραφίας. Το F_R περιορίστηκε από την παροχή αέρα στο σύστημα (δε θα ήταν δυνατό να την υπερβαίνει). Για το F_L και το λ δεν έχουμε κάποιο περιοριστικό παράγοντα υπόψη συνεπώς επιτρέπουμε μεγάλο πλαίσιο διακύμανσης.

	Ελάχιστο	Μέγιστο
K_{La} (1/h)	7	16
C^* (g/m ³)	7	16
F_L (m ³ /h)	200	600
λ	0,6	1

Οι περιορισμοί των παραμέτρων παραμένουν σταθεροί για όλα τα πειράματα εκτός από αυτούς του F_R ο οποίος αλλάζει αφού μεταβάλλεται η παροχή του αέρα σε κάθε πείραμα.

F_R (m ³ /h)	Ελάχιστο	Μέγιστο
RUN1	100	234
RUN2	100	225
RUN3	100	243
RUN4	100	243

6.5 Εφαρμογή μεθόδου

6.5.1 Απλή προσέγγιση

Στην περίπτωση της απλής προσέγγισης θα υπολογίσουμε τις παραμέτρους μας ξεχωριστά για κάθε περιοχή, θα βρούμε δηλαδή το συντελεστή οξυγόνωσης και τη συγκέντρωση κορεσμού του υγρού σε οξυγόνο στη ζώνη διαχωρισμού και στον downcomer. Χρησιμοποιήσαμε 100 επαναλήψεις για τον εσωτερικό βρόχο και 50 για τον εξωτερικό.

Εισάγοντας λοιπόν τα δεδομένα συγκέντρωσης και τους περιορισμούς των παραμέτρων στο πρόγραμμά μας για κάθε πείραμα και κάθε περιοχή θα έχουμε τελικά μια σειρά από προσεγγίσεις για τις παραμέτρους. Συγκεκριμένα για το C* θεωρήσαμε καλό να συμπεριλάβουμε στην ανάλυσή μας και τις τιμές που προτείνει η βιβλιογραφία με βάση τη θερμοκρασία. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπως και τα συμπεράσματα που βγήκαν από αυτά αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.5.2 Σύνθετη προσέγγιση

Στην περίπτωση της σύνθετης προσέγγισης, οι εξισώσεις μας θα αποθηκευθούν σε ξεχωριστό αρχείο το οποίο θα καλείται σε κάθε επανάληψη. Αυτή τη φορά οι προσεγγίσεις των παραμέτρων θα αναφέρονται στο συνολικό όγκο του συστήματος και όχι σε κάθε διαμέρισμά του ξεχωριστά. Χρησιμοποιήσαμε 200 επαναλήψεις για τον εσωτερικό βρόχο και 50 για τον εξωτερικό. Ως αρχικές συνθήκες στη ρουτίνα επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων δώσαμε τις πρώτες τιμές κάθε πειράματος. Ως χρονικά δεδομένα για τη λύση δώσαμε τα πειραματικά έτσι ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση της χρονοσειράς του μοντέλου με αυτή των πειραματικών δεδομένων.

6.6 Σύγκλιση παραμέτρων

Προσθέσαμε στο πρόγραμμα υπολογισμού των παραμέτρων μια εποπτική λειτουργία. Του ζητήσαμε να αποθηκεύει τις τιμές των παραμέτρων μετά από κάθε επανάληψη του εξωτερικού βρόχου. Αυτό θα μας επιτρέψει να γνωρίζουμε τις διακρίσεις τη κάθε παραμέτρου όπως και μετά από πόσες επαναλήψεις η κάθε παράμετρος συγκλίνει στην σωστή τιμή. Δε θεωρήσαμε αναγκαίο να εφαρμόσουμε αυτή την προσθήκη σε όλα τα πειράματα. Μπορούμε να πούμε με αρκετή σιγουριά ότι η μορφή και η ταχύτητα σύγκλισης δε θα μεταβάλλεται σημαντικά ανάμεσα σε διαφορετικά πειράματα και διαφορετικά μοντέλα. Αυτό ισχύει γιατί η σύγκλιση είναι κατά βάση στοιχείο του προγράμματος και όχι του μοντέλου ή των δεδομένων και επηρεάζεται ουσιαστικά από τη δομή του προγράμματος και τις παραμέτρους που αφορούν αυτό. Θα εφαρμόσουμε λοιπόν την πρόσθετη αυτή λειτουργία ενδεικτικά στο πρώτο πείραμα για τις πέντε παραμέτρους.

7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Απλή προσέγγιση

Θεωρούμε το σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση $\frac{dC}{dt} = K_L a (C^* - C)$.

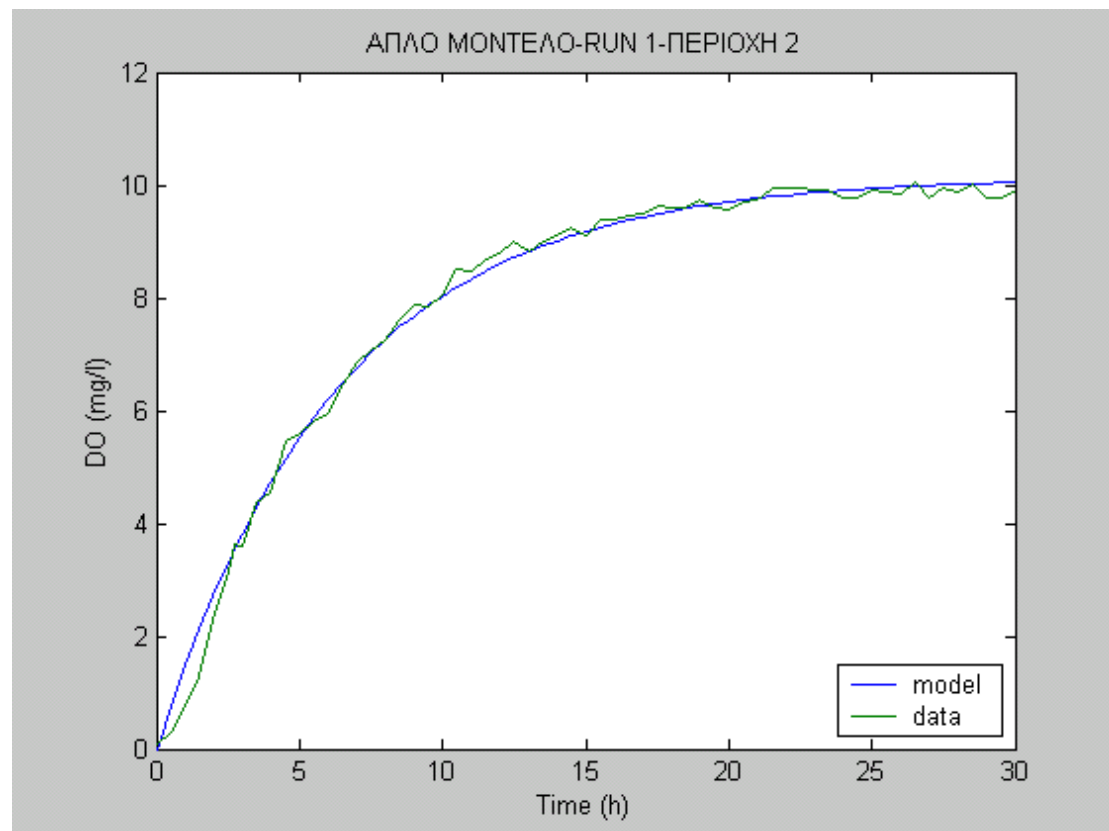
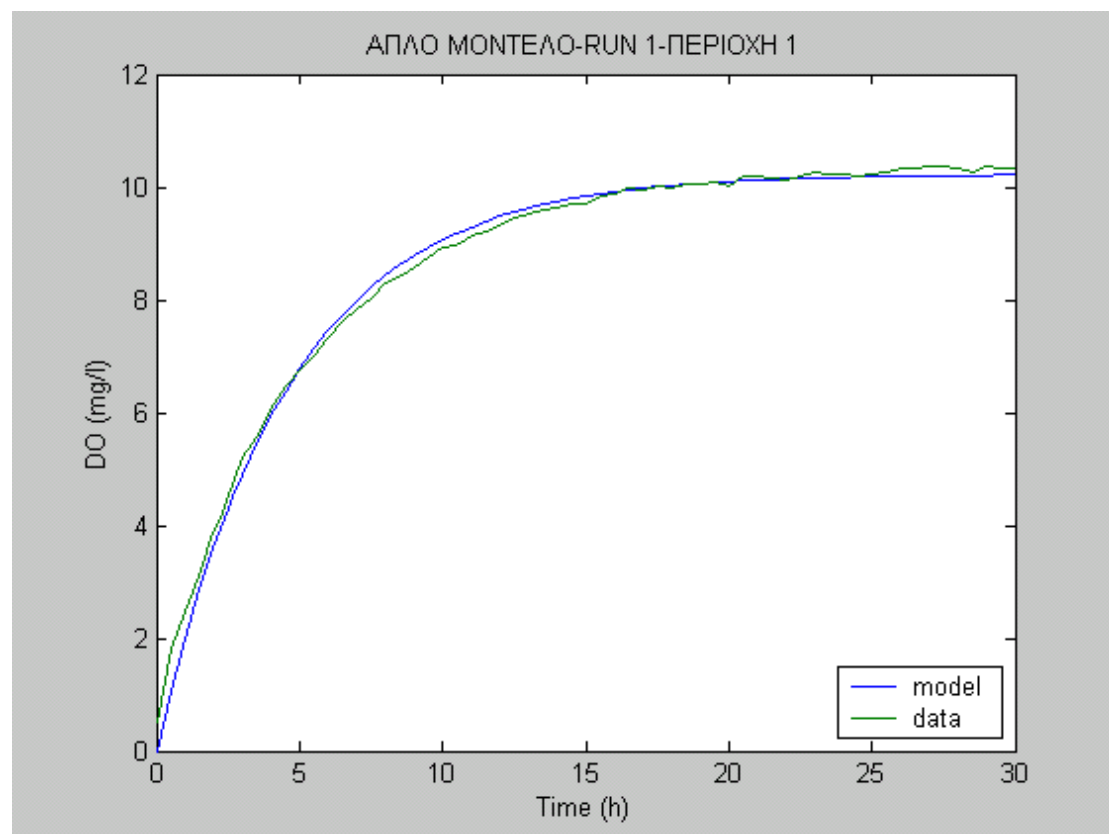
7.1.1 Αποτελέσματα

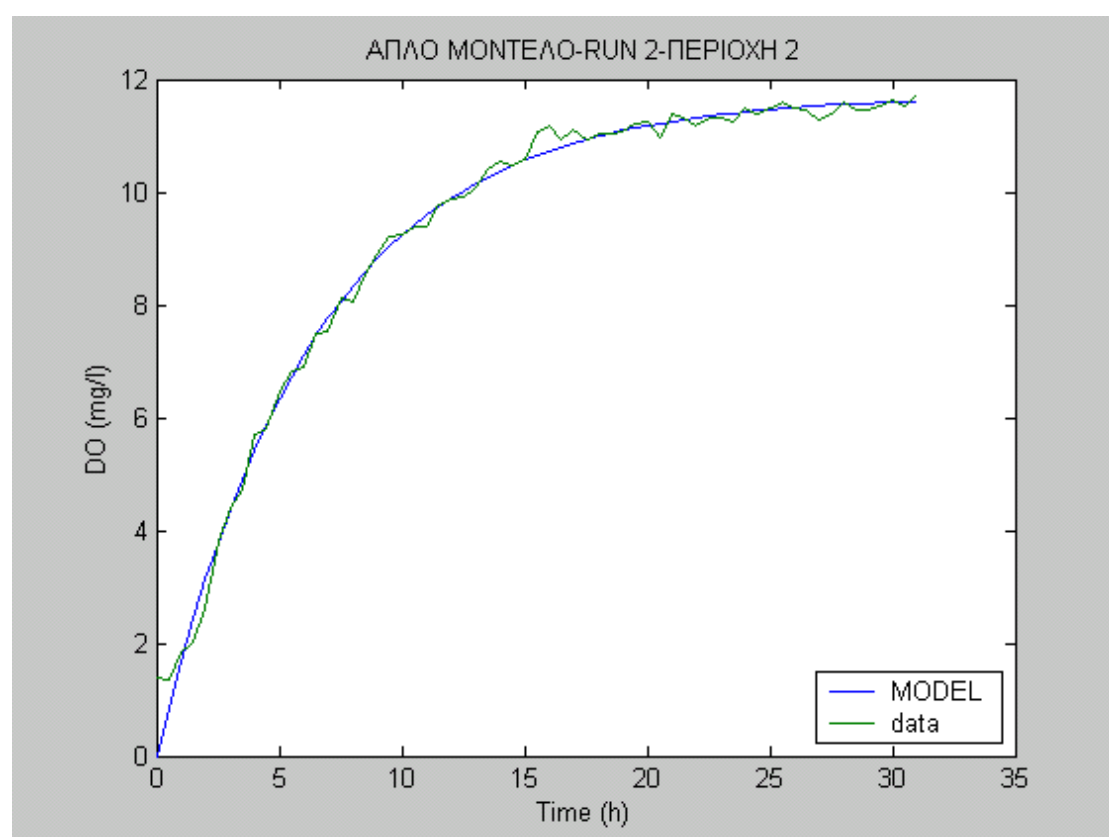
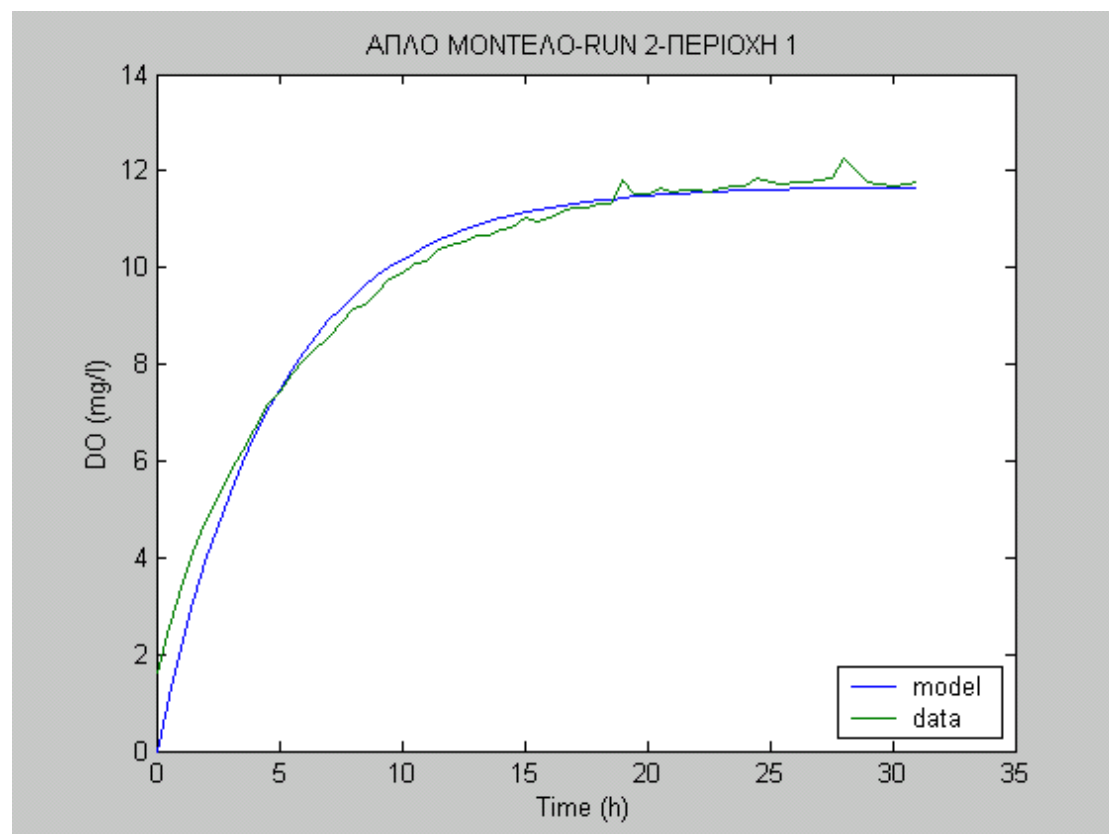
Στην απλή προσέγγιση έχουμε δύο σετ αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα τέσσερα πειράματα.

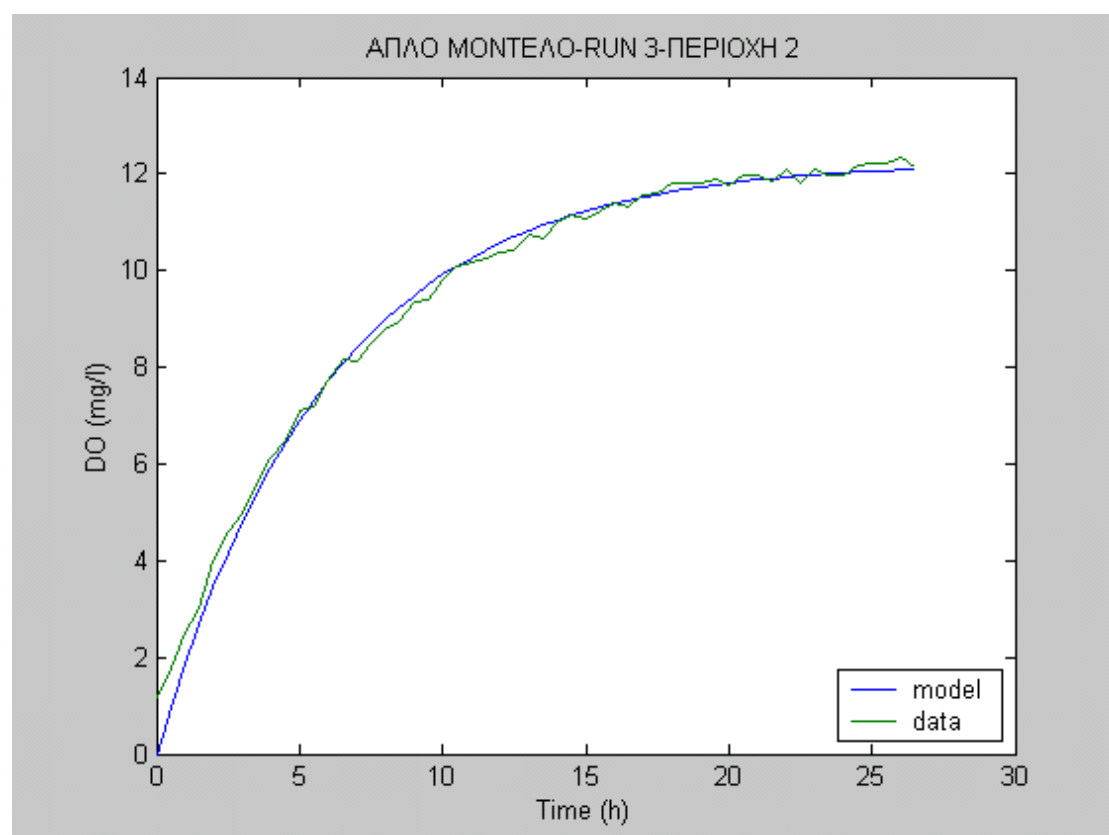
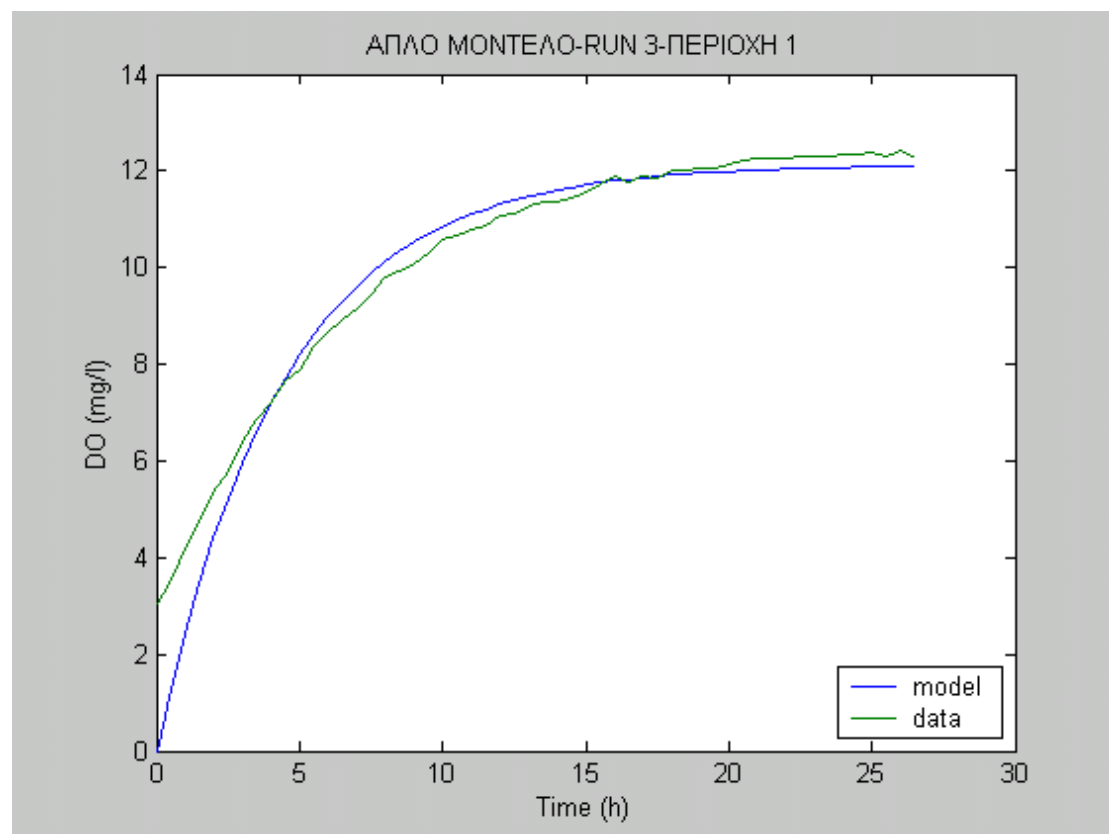
	RUN 1		RUN 2	
	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 1	Περιοχή 2
$K_L a$ (1/h)	13	9,4	12,2	9,3
C^* (g/m ³)	10,22	10,13	11,68	11,7
SSE	2,2	2,8	10,9	3,8

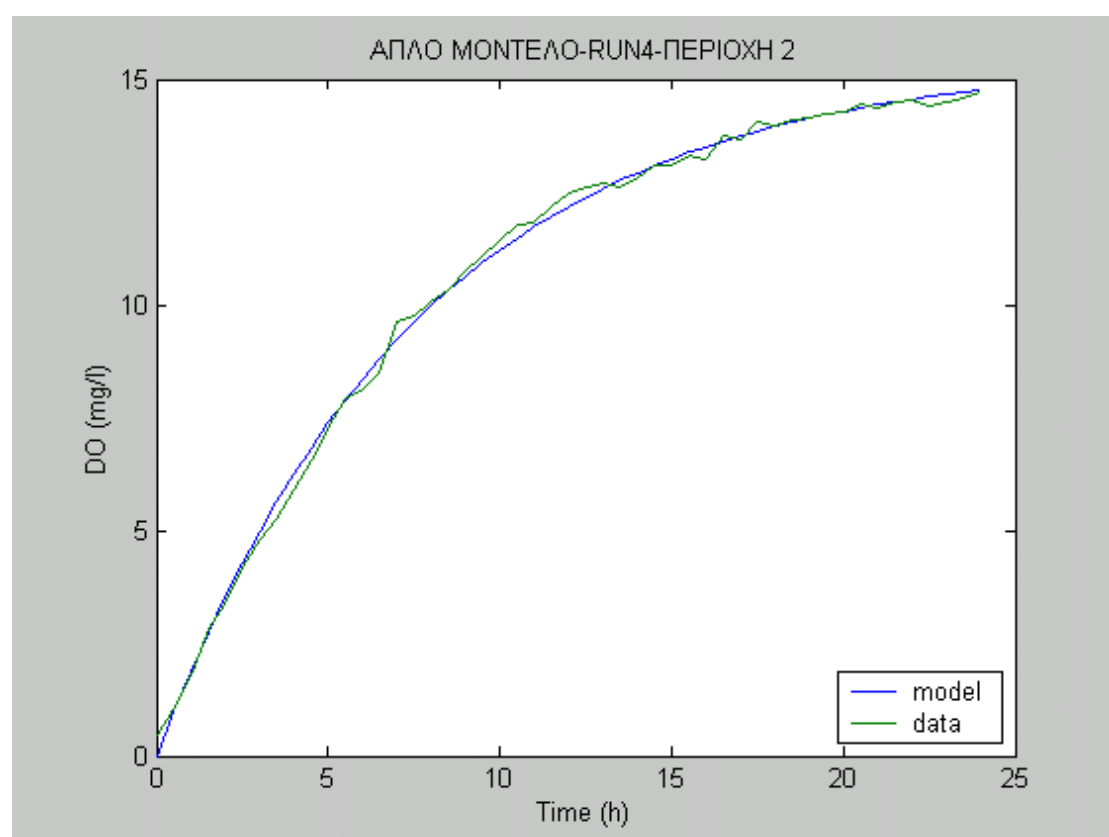
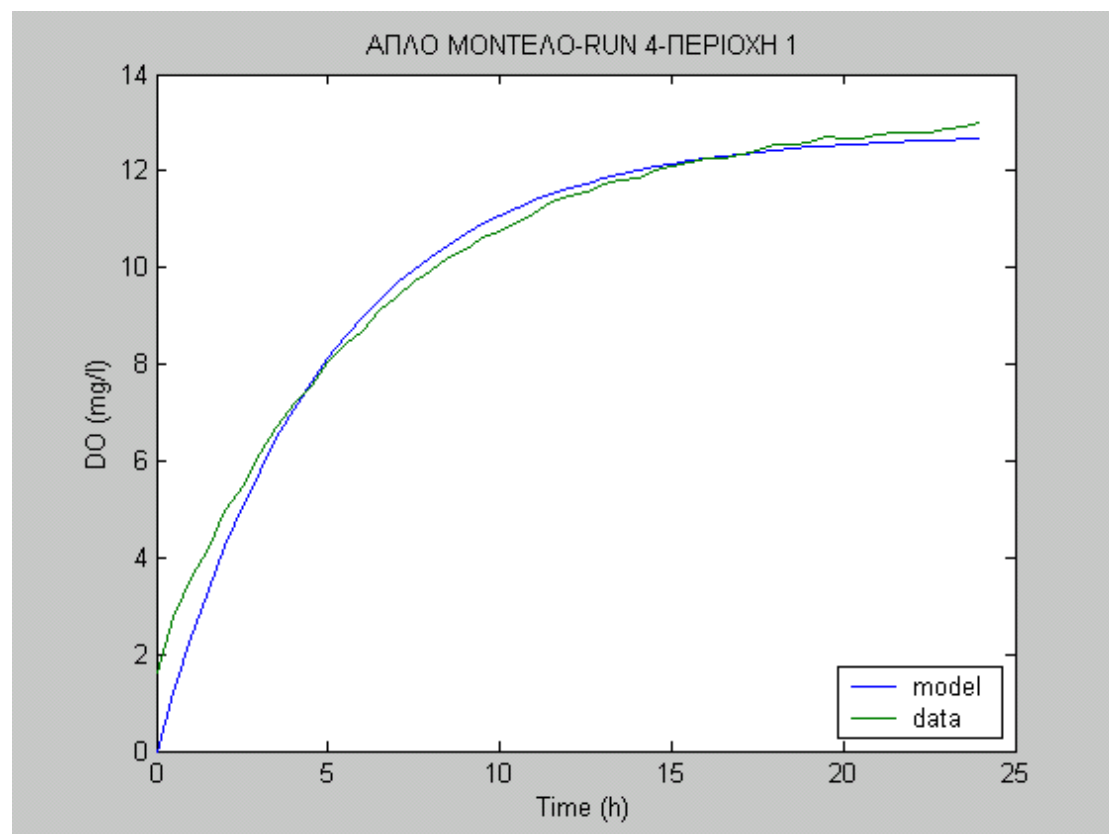
	RUN 3		RUN 4	
	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 1	Περιοχή 2
$K_L a$ (1/h)	13,5	9,9	12,1	7,8
C^* (g/m ³)	12,1	12,2	12,8	15,4
SSE	23,7	4,2	9,6	1,6

Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται τα διαγράμματα αντιπαράθεσης των δεδομένων των πειραμάτων με τα αποτελέσματα του μοντέλου





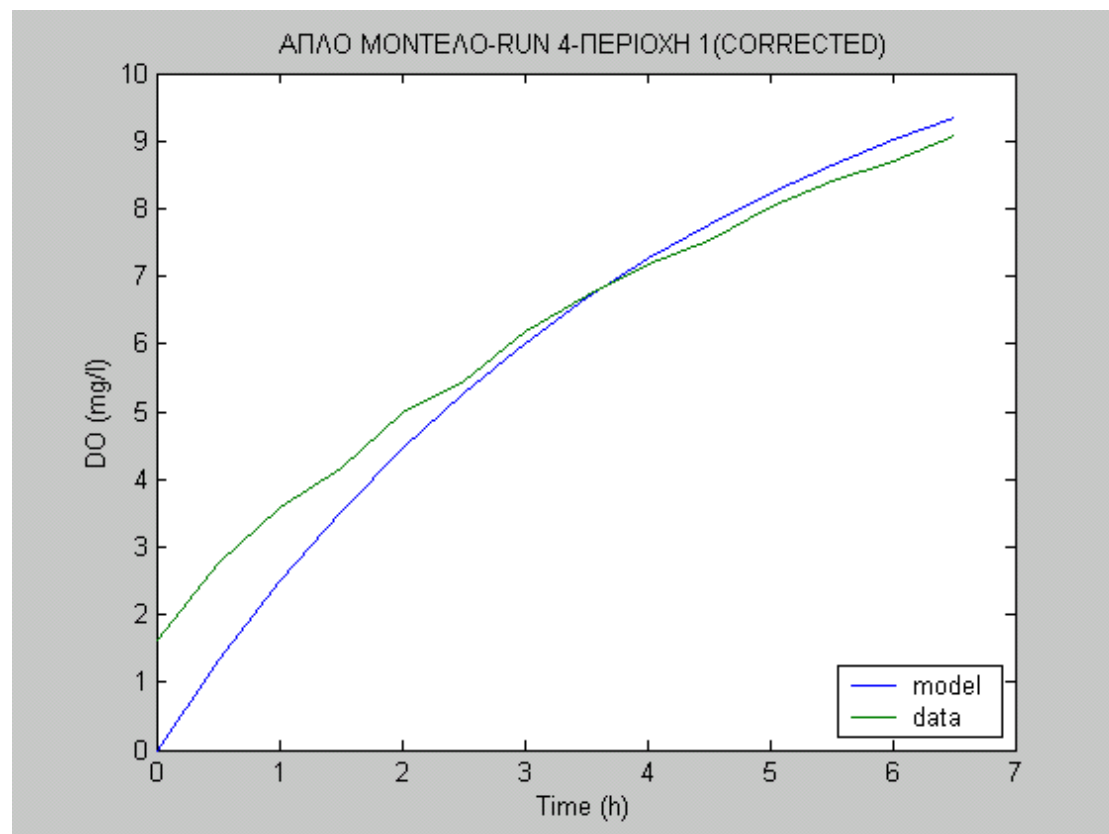


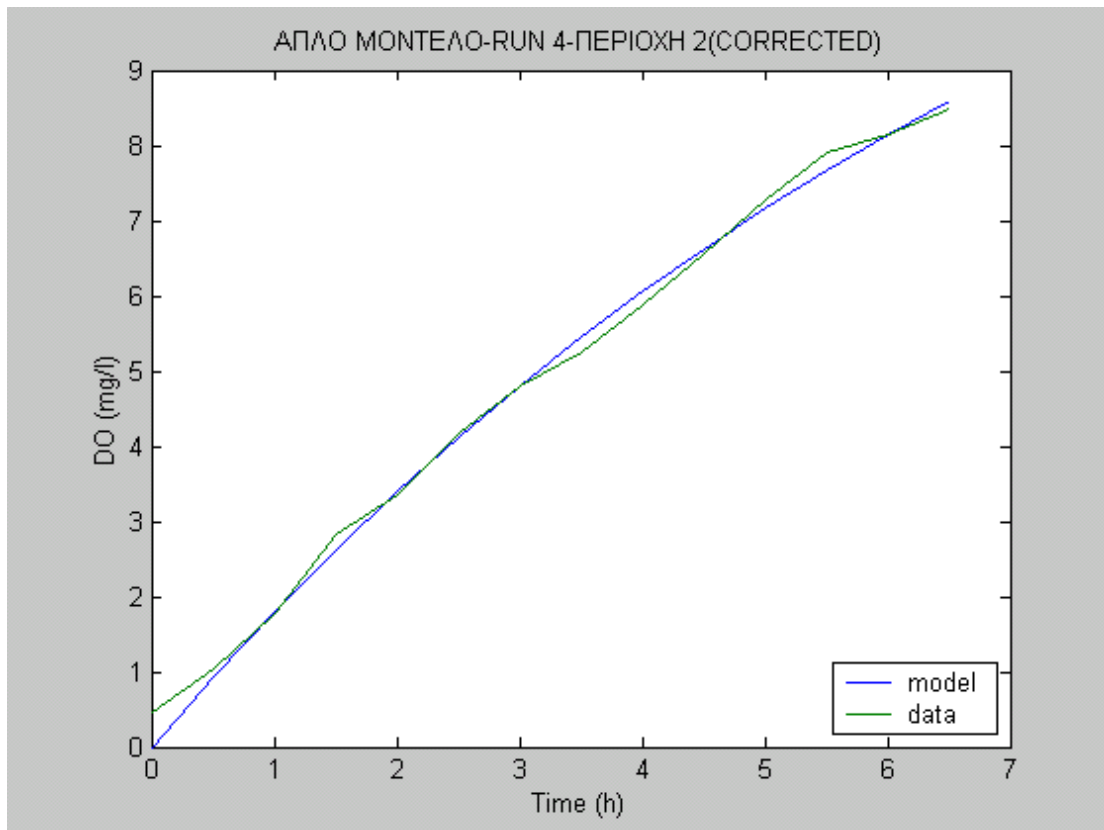


Παρατηρώντας τα δεδομένα εισόδου του τέταρτου πειράματος, παρατηρήσαμε ότι μετά από τα πρώτα 7 λεπτά, η συγκέντρωση του downcomer φαίνεται να ανέρχεται σημαντικά και να υπερβαίνει αυτή της ζώνης διαχωρισμού. Αυτή η ιδιάζουσα συμπεριφορά, λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι η απόκλιση είναι σχετικά έντονη, υποθέτουμε ότι οφείλεται σε λάθος του συστήματος. Για το λόγο αυτό επαναλάβαμε τη διαδικασία αφαιρώντας τα δεδομένα που δεν φαίνονται φυσιολογικά.

	RUN 4 corrected	
	Περιοχή 1	Περιοχή 2
$K_L a$ (1/h)	14	7,3
C^* (g/m ³)	11,2	15,7
SSE	6,9	0,4

Παρατηρούμε ότι η σύγκλιση των δεδομένων της εξίσωσης με αυτά του πειράματος είναι καλύτερη για τη διορθωμένη εκδοχή του τέταρτου πειράματος.





Απο θερμοδυναμικής άποψης, η συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου στο νερό είναι :

	C*
25°C	7,92
18°C	9,54
14°C	10,37

7.1.2 Παρατηρήσεις

Γενικά παρατηρείται αρκετά μικρότερο $K_L a$ στον downcomer από τη ζώνη διαχωρισμού. Αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί η βασική διαδικασία της οξυγόνωσης γίνεται στην περιοχή 1. Η περιοχή 2 οξυγονώνεται μέσω της ανακύκλωσης της υγρής φάσης. Η μεταβολή του $K_L a$ ανάμεσα στα πειράματα δεν είναι πολύ σημαντική με εξαίρεση το τέταρτο. Αυτό μπορούμε αισιόδοξα να το αποδώσουμε ως καλή λειτουργία του προγράμματός μας, θεωρώντας το τέταρτο πείραμα λιγότερο αξιόπιστο.

Το C^* από την άλλη δεν μεταβάλλεται σημαντικά ανάμεσα στις δύο περιοχές, πράγμα που σημαίνει ότι η επίδραση της υδροστατικής πίεσης είναι αμελητέα. Παρατηρούμε όμως μεγάλες αποκλίσεις από τις θερμοδυναμικές τιμές. Συγκεκριμένα σε όλα τα πειράματα το υπολογισμένο C^* εμφανίζεται κατά 20% μεγαλύτερο. Φαίνεται επίσης από τις υπολογισμένες τιμές ότι όσο η θερμοκρασία χαμηλώνει, το

C^* ανεβαίνει. Αυτό είναι επίσης αναμενόμενο αφού η διαλυτότητα αυξάνει όσο μειώνεται η θερμοκρασία.

7.2 Σύνθετη προσέγγιση

Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε το μηχανιστικό μοντέλο που προκύπτει από τη λύση των εξισώσεων :

$$\frac{dC_1}{dt} = (k_L a) (C^* - C_1) + \frac{F_R}{V_1} (C_{\text{riser}} - C_1) + \frac{F_L}{V_1} (C_2 - C_1)$$

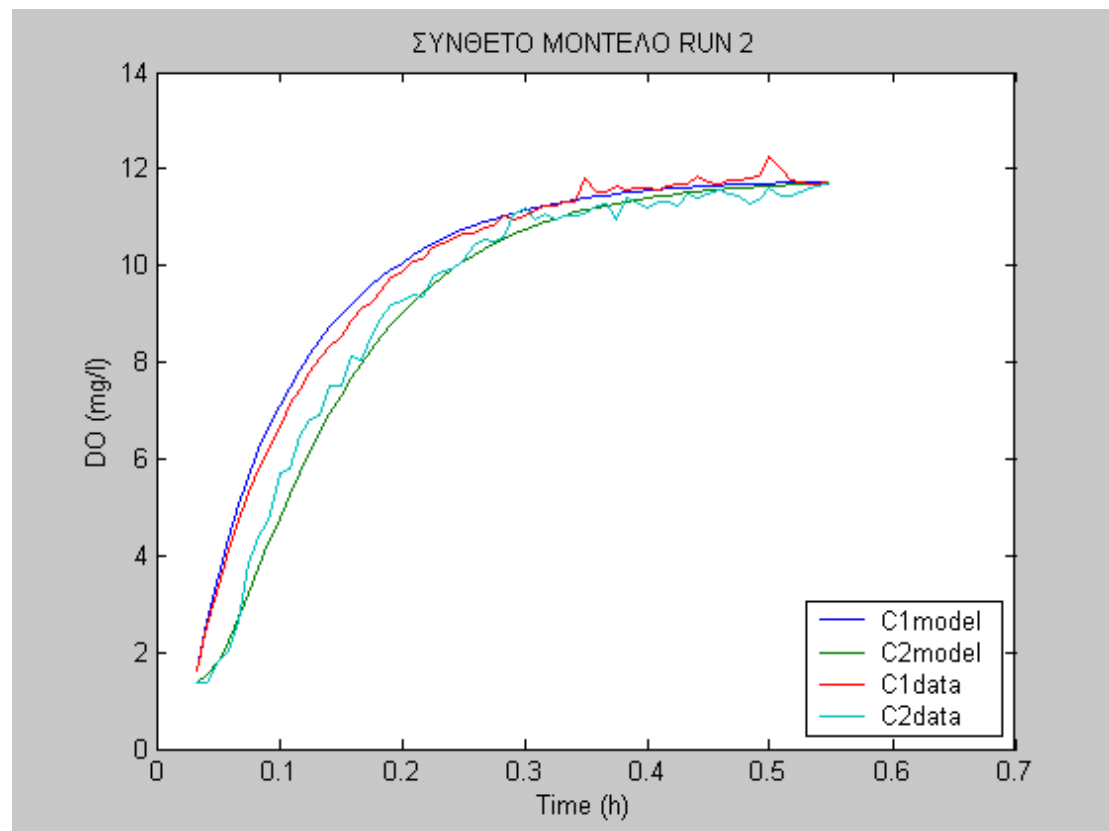
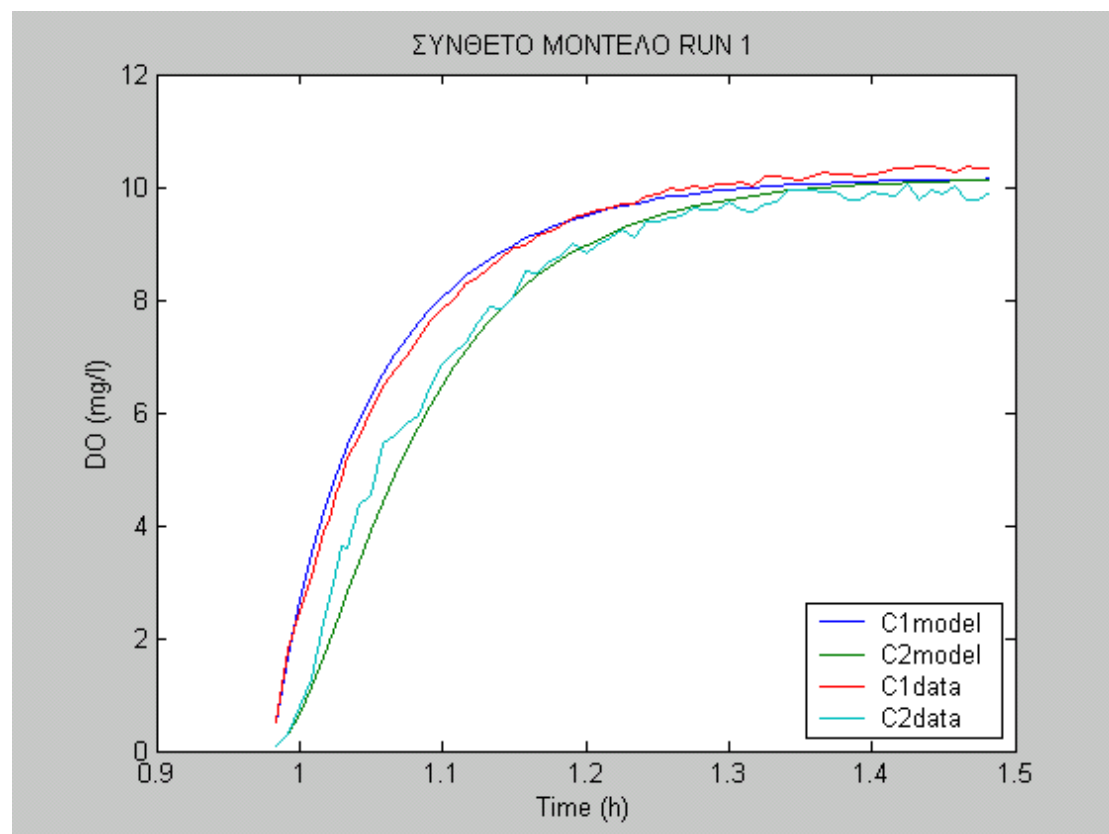
$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{F_L + F_R}{V_2} (C_1 - C_2)$$

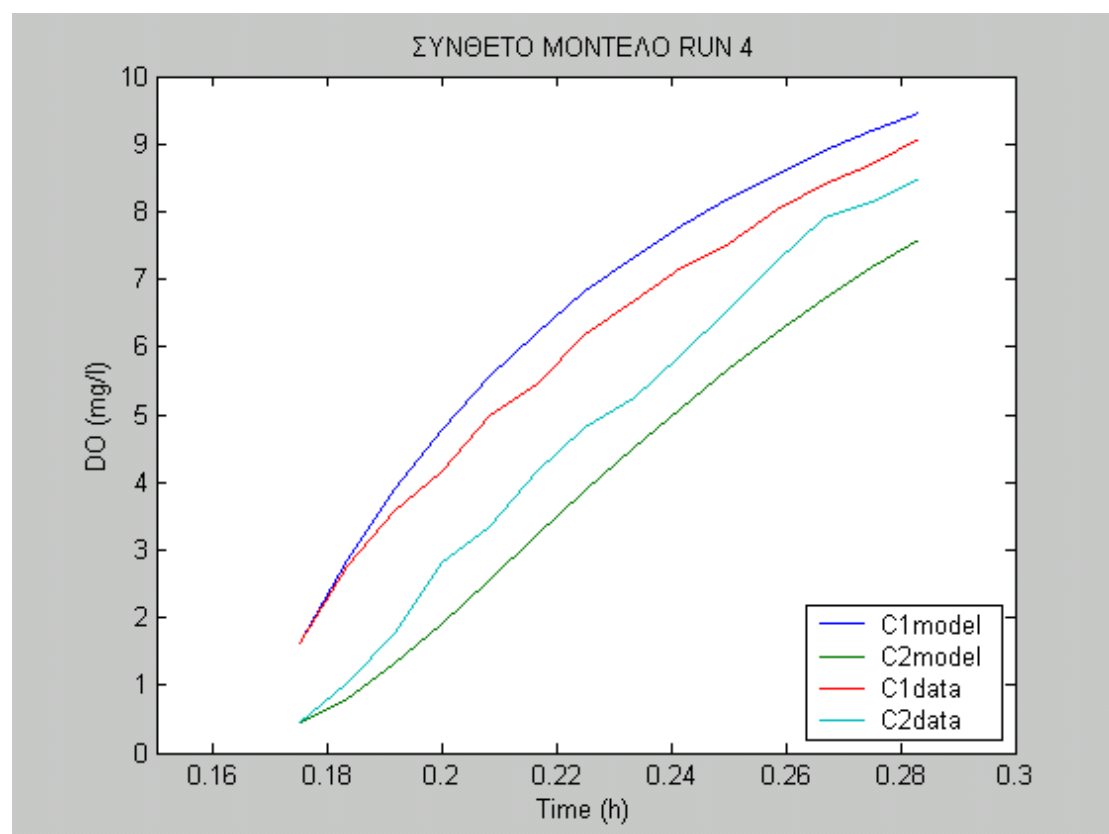
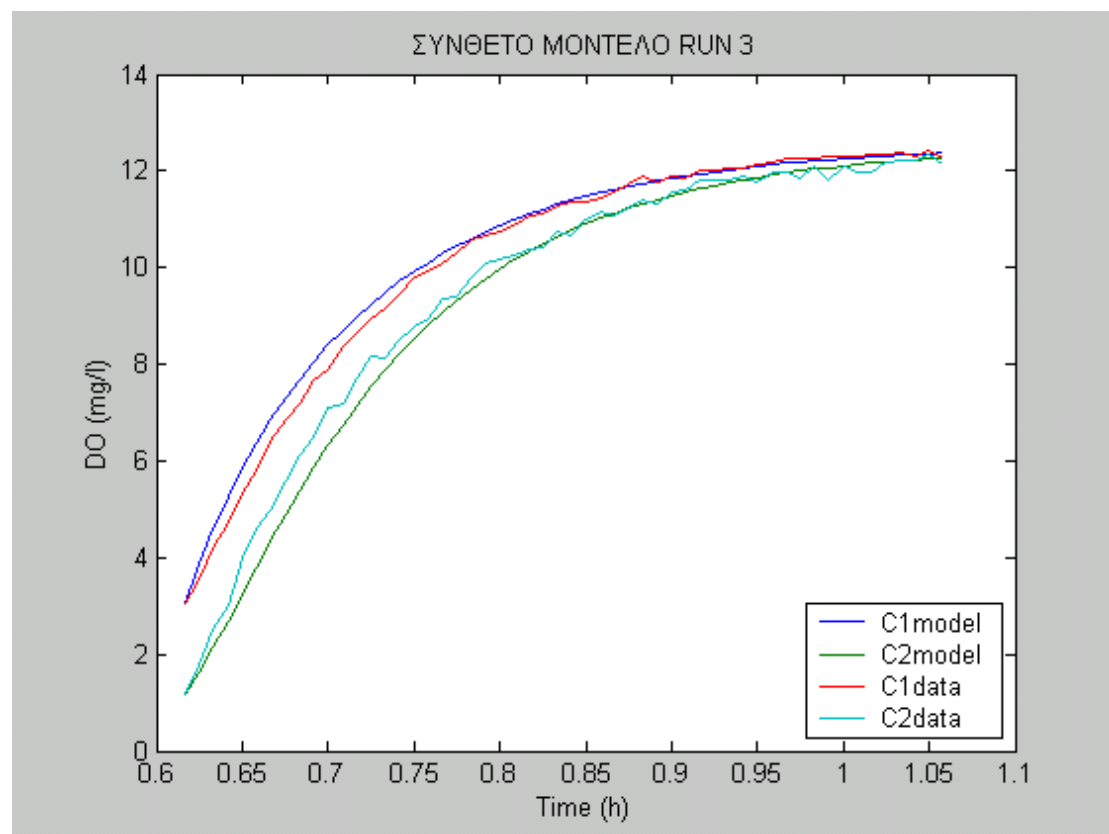
$$C_{\text{riser}} = \lambda C^* + (1 - \lambda) C_2$$

7.2.1 Αποτελέσματα

Στη σύνθετη προσέγγιση έχουμε ένα σετ αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα τέσσερα πειράματα.

	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
$K_L a$ (1/h)	15,2	11,8	10,7	15
C^* (g/m ³)	10,17	11,79	12,53	12,05
F_L (m ³ /h)	600	600	600	600
F_R (m ³ /h)	234	216	223	243
λ (%)	87,3	83,9	78,6	88,1
SSE	10,77	8,76	8,78	13,5





7.2.2 Παρατηρήσεις

Τα αποτελέσματα για το K_{La} έχουν κάποια συνάφεια, αλλά δεν ταυτίζονται. Όσον αφορά τη σχέση τους με τα αποτελέσματα της απλής προσέγγισης, παρατηρούμε ότι στα πειράματα 1 και 3 το αποτέλεσμα της σύνθετης προσέγγισης είναι μεγαλύτερα από αυτά της απλής ενώ στα πειράματα 2 και 4 είναι μικρότερο. Σε όλα τα πειράματα εκτός του τρίτου τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντινά.

Για το C^* παρατηρείται πάλι αυξημένες τιμές σε σχέση με τις τιμές κορεσμού (η εμφάνιση υπέρκορου διαλύματος υπο παρόμοιες συνθήκες έχει παρατηρηθεί). Οι τιμές είναι αρκετά κοντά σε αυτές της απλής προσέγγισης.

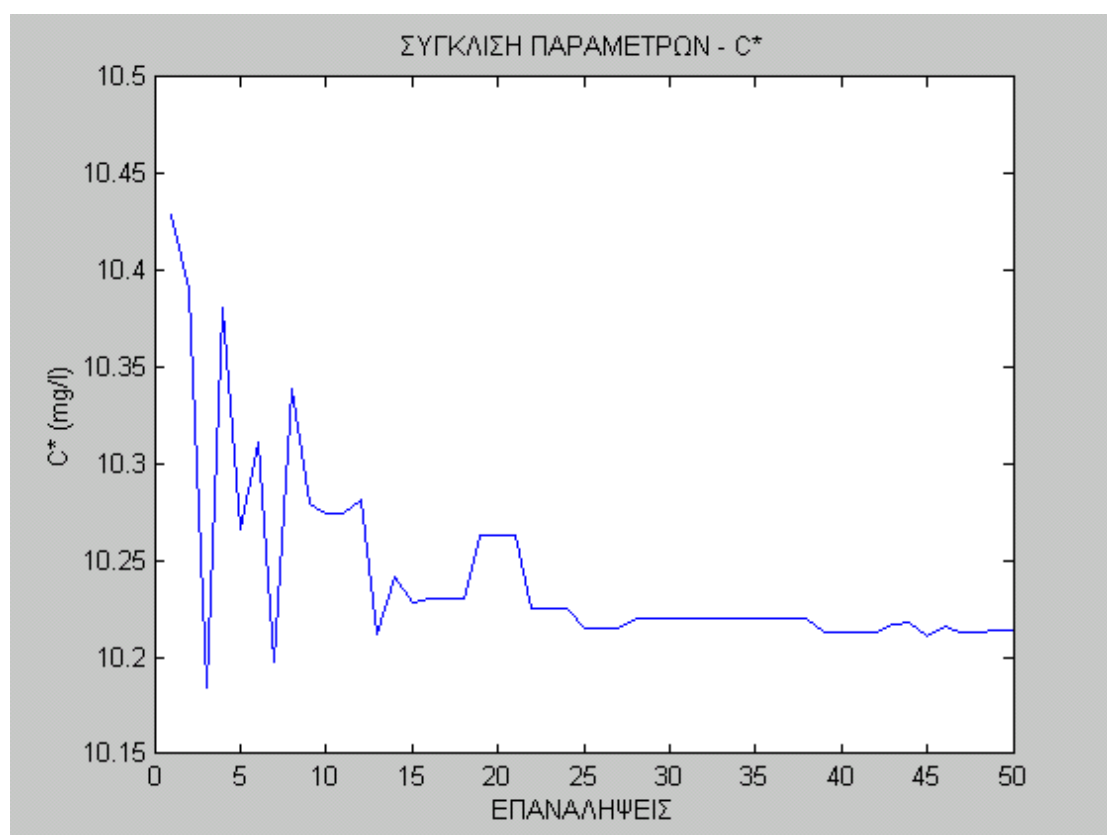
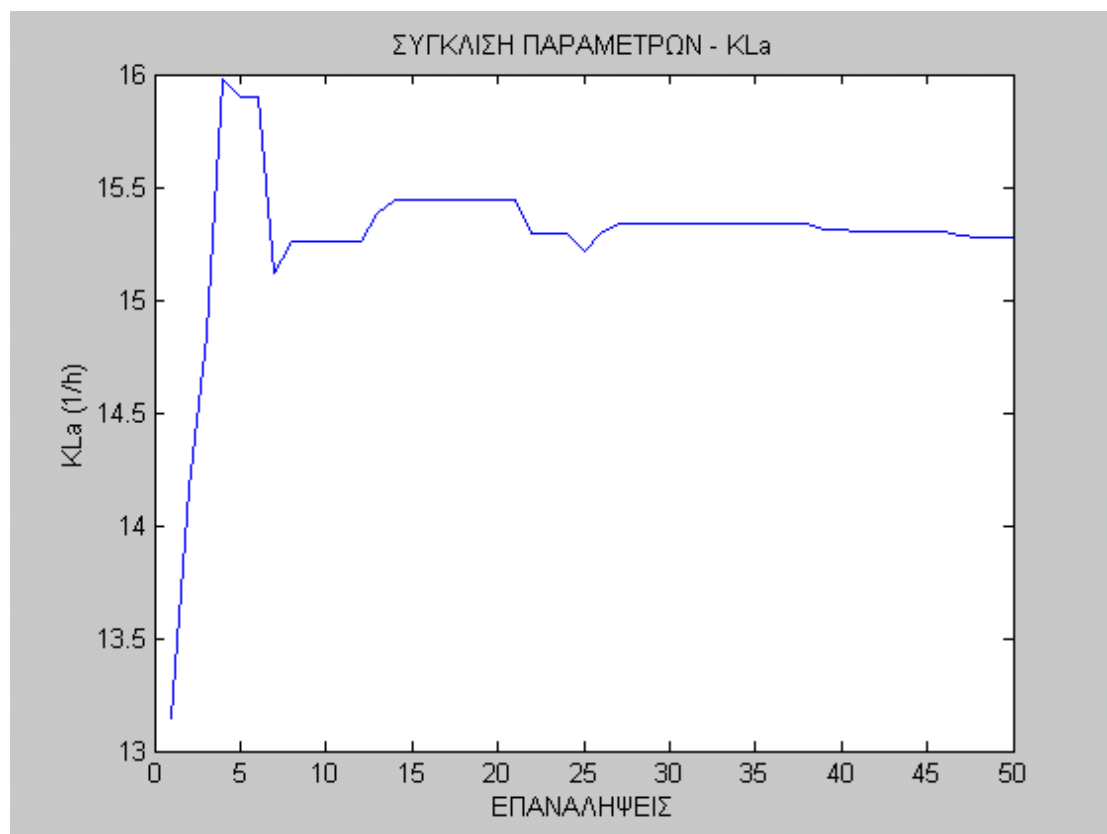
Για το F_L οι τιμές που μας δίνει το πρόγραμμα τείνουν να αποκτήσουν την περιοριστική τιμή που εισάγαμε.

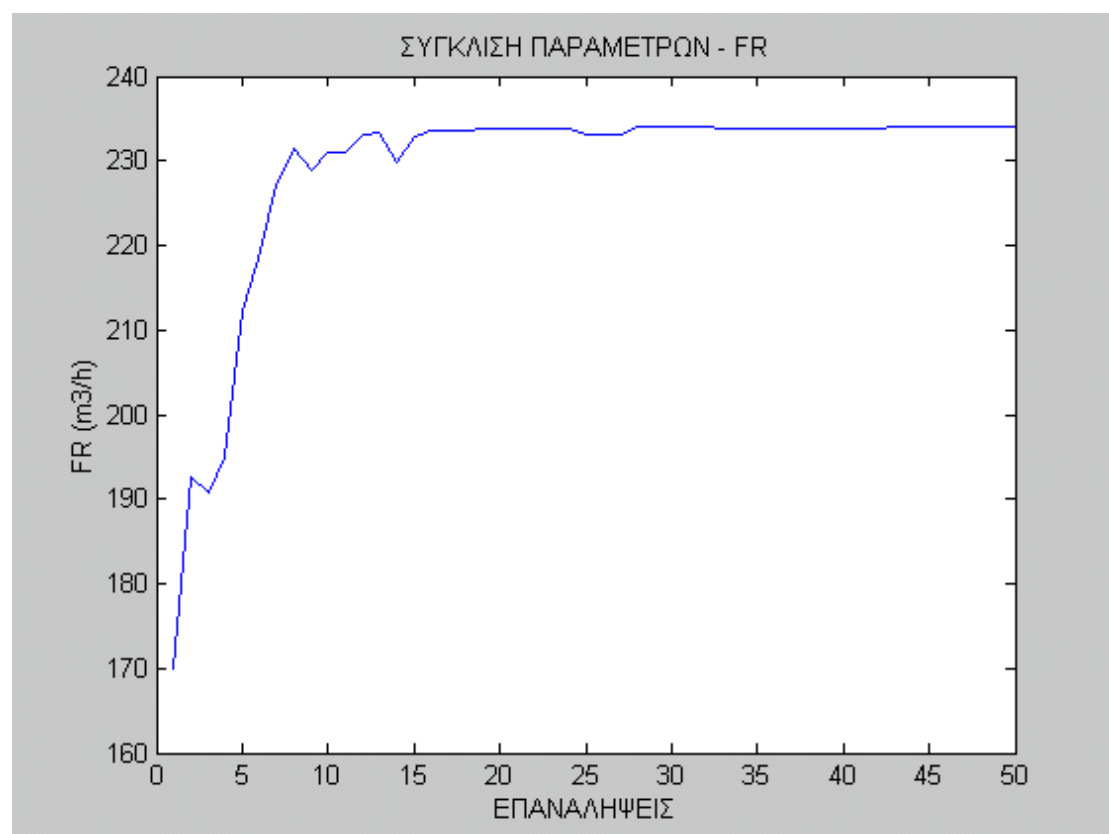
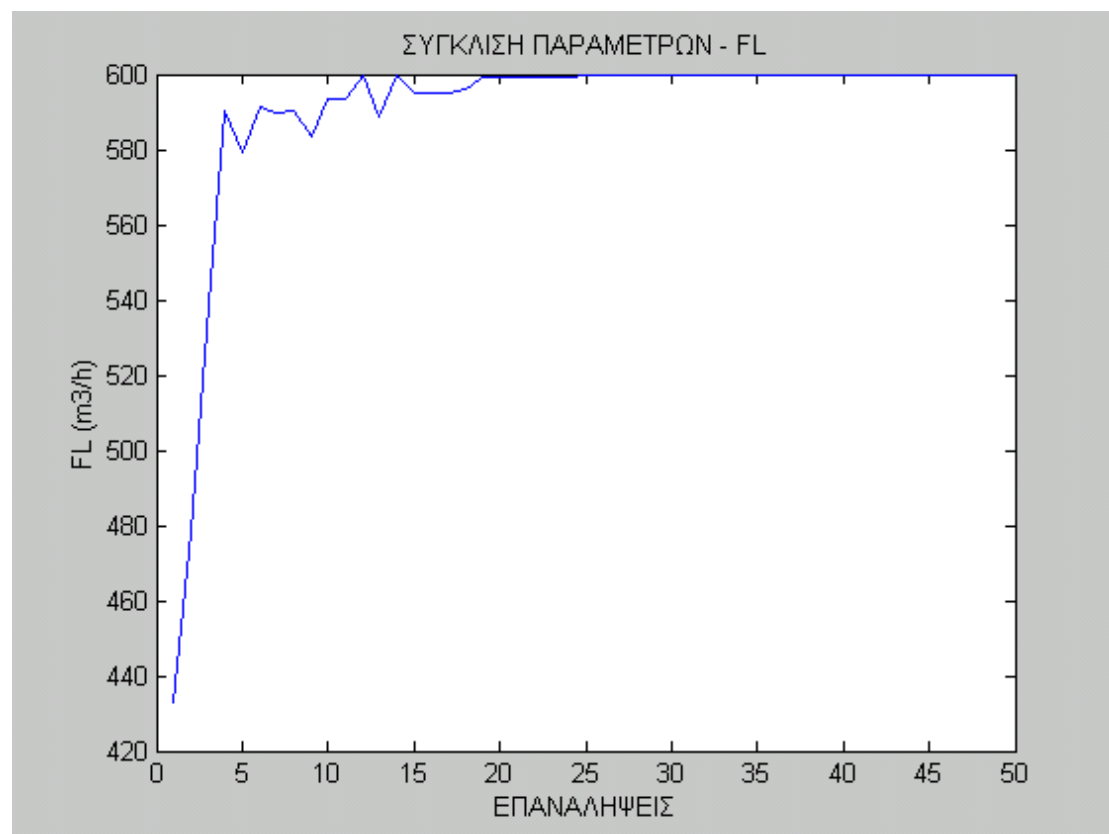
Για το F_R ισχύει περίπου το ίδιο για τους διαφορετικούς περιορισμούς κάθε πειράματος.

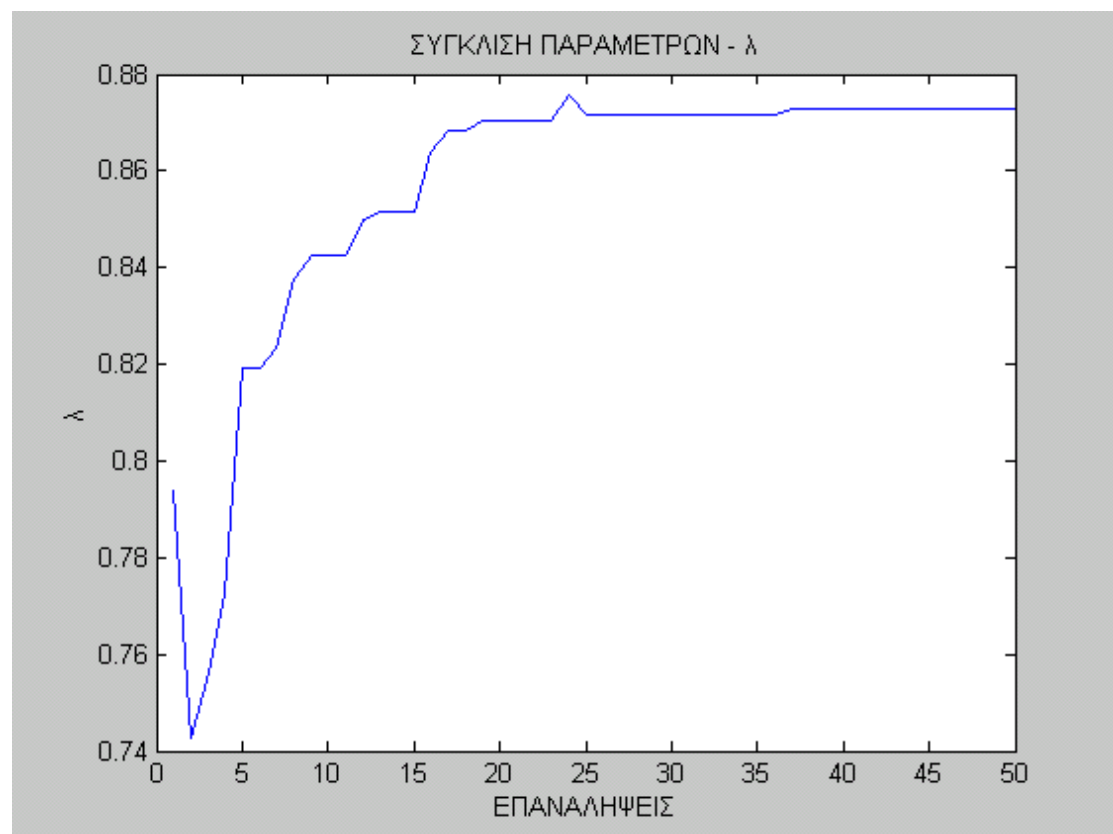
Το ότι οι δύο αυτές παράμετροι καταλήγουν σε τιμές κοντά στα όρια που θέσαμε στο πρόγραμμα δημιουργούν ανησυχίες για το κατά πόσο θα ήταν θεμιτό να επεκτείνουμε τα όρια αυτά. Αυτό όμως δε θα ήταν σωστό διότι το F_R περιορίζεται από την παροχή του αέρα και για το F_L μια τιμή υπερτριπλάσια του F_R θα ήταν υπερβολική. Ως δοκιμή αυξήσαμε τα όρια στις παραμέτρους αυτές και πετύχαμε σχετικά μικρή απόκλιση αλλά με μείωση του αποτελέσματος για το K_{La} .

Το λ παρουσιάζει μια διακύμανση από 78 μέχρι 94 επί τοις εκατό, με μέγιστη τιμή για το πρώτο πείραμα. Θα μπορούσαμε ίσως να πούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση στο βαθμό κορεσμού του υγρού στην έξοδο του riser.

Τα διαγράμματα της προσέγγισης των παραμέτρων στις τελικές τους τιμές, έχουν γίνει μόνο για το πρώτο πείραμα της σύνθετης προσέγγισης. Μας δείχνουν ότι οι παράμετροι παραμένουν σχετικά αμετάβλητες μετά από περίπου 25-30 επαναλήψεις του εξωτερικού βρόχου.







8 ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Θεωρήθηκε θεμιτό, λαμβάνοντας υπόψη και την αδυναμία εξαγωγής απόλυτων συμπερασμάτων απο την μέχρι τώρα ανάλυση, να διεξάγουμε κάποιες επιπλέον αναλύσεις. Αυτές οι αναλύσεις αποτελούνται απο μεταβολές στα όρια των παραμέτρων μας και τροποποιήσεις/απλοποιήσεις της αρχικής μορφής του μοντέλου.

1) Σταθερό F_R

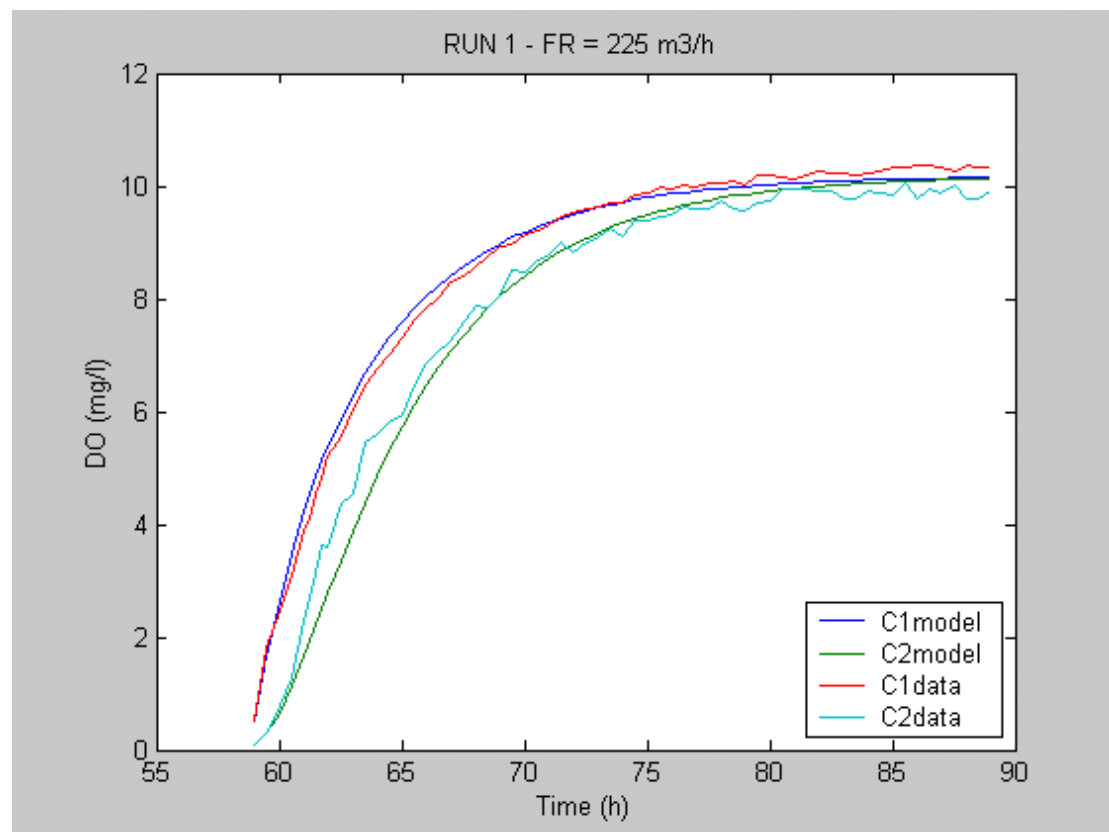
Μια πρώτη σκέψη είναι να αφαιρέσουμε απο τη διαδικασία το F_R , να του δώσουμε δηλαδή μια σταθερή τιμή και να μη το θεωρούμε άγνωστη παράμετρο. Η τιμή αυτή θα ήταν λογικό να τοποθετηθεί κοντά σε αυτή της παροχής. Η σκέψη πίσω απο αυτή την απόπειρα είναι οτι μπορεί η αφαίρεση του F_R απο τους υπολογισμούς θα μειώσει την πολυπλοκότητα του συστήματος και θα αποκτήσουμε καλύτερες τιμές για τις υπόλοιπες παραμέτρους. Θα δώσουμε λοιπόν στο F_R τις τιμές 225, 250 και 275 m³/h. Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση είναι :

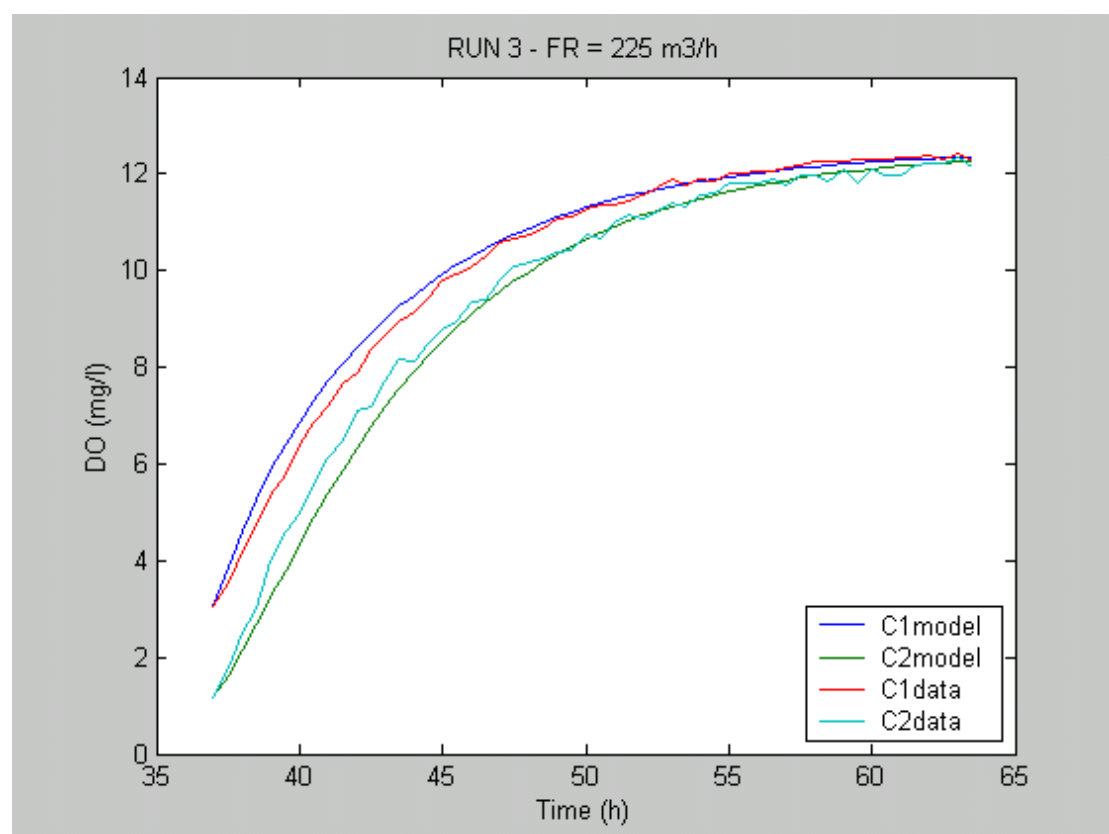
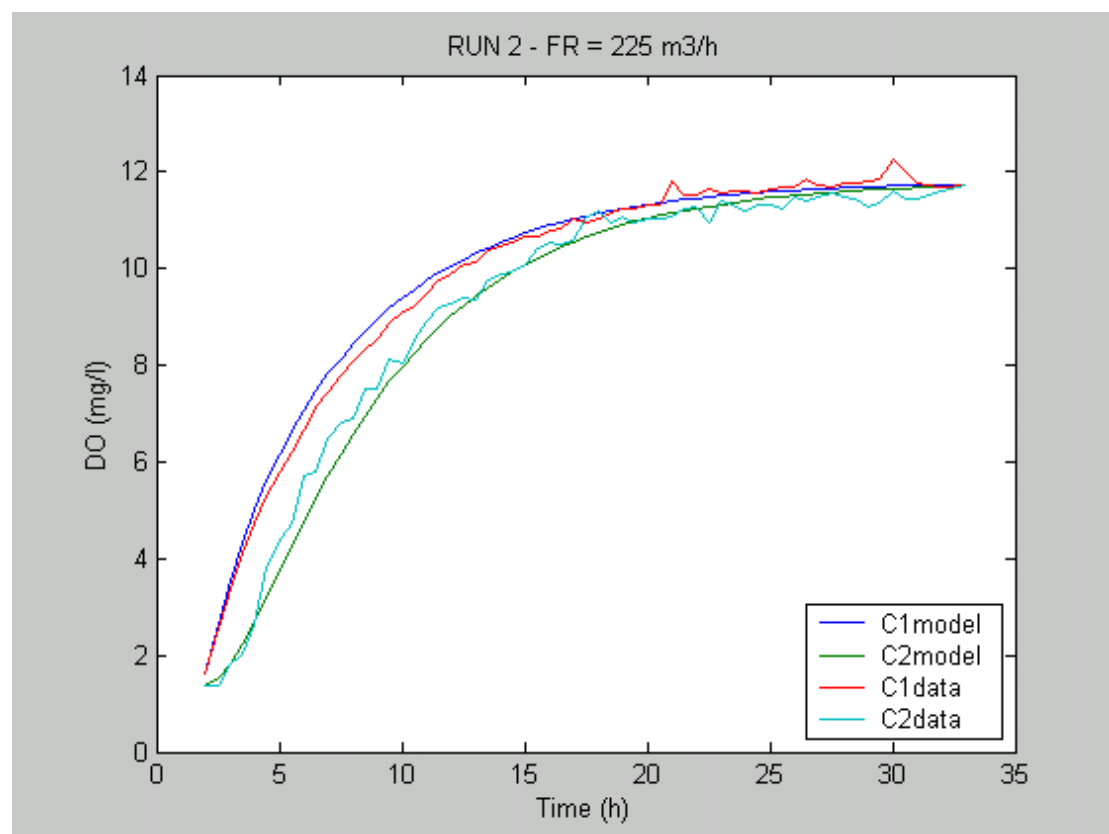
RUN 1			
	FR = 225 m3/h	FR = 250 m3/h	FR = 275 m3/h
Kla (1/h)	13,9	13,9	13,9
C* (g/m3)	10,1	10,1	10,16
FL (m3/h)	600	600	600
λ (%)	96	91	80,2
SSE	11,2	10,1	9,4

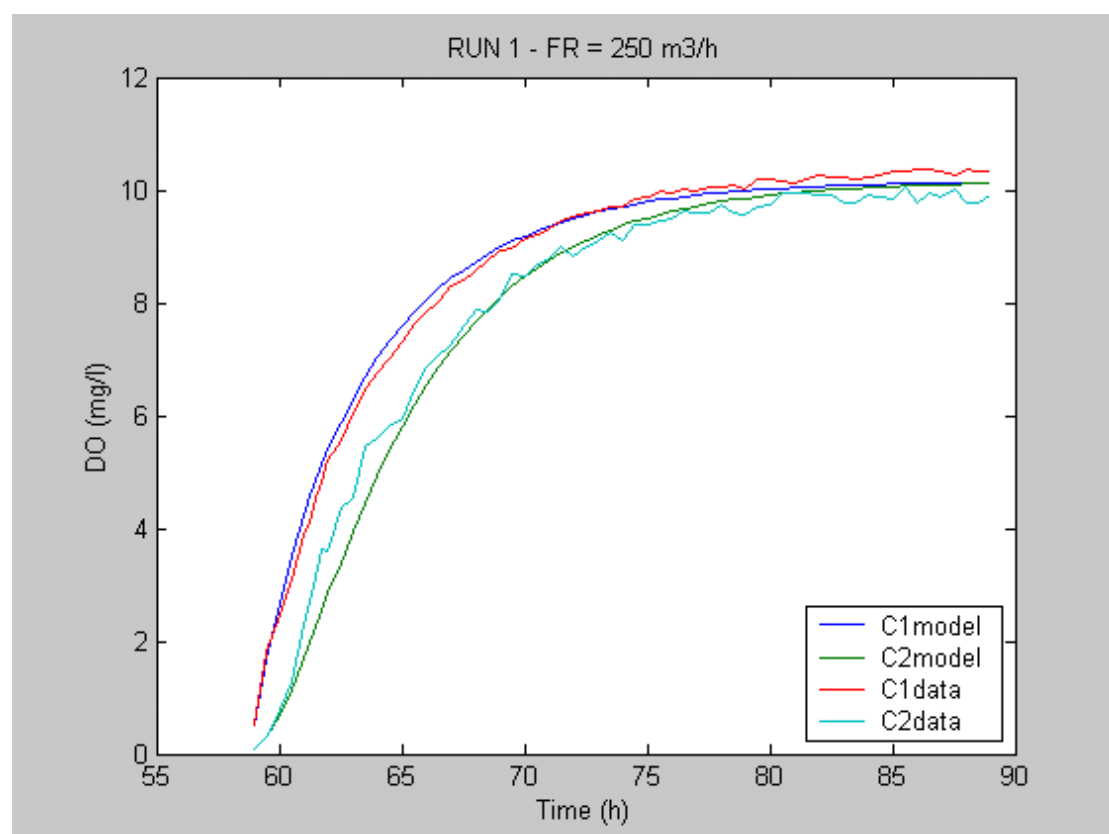
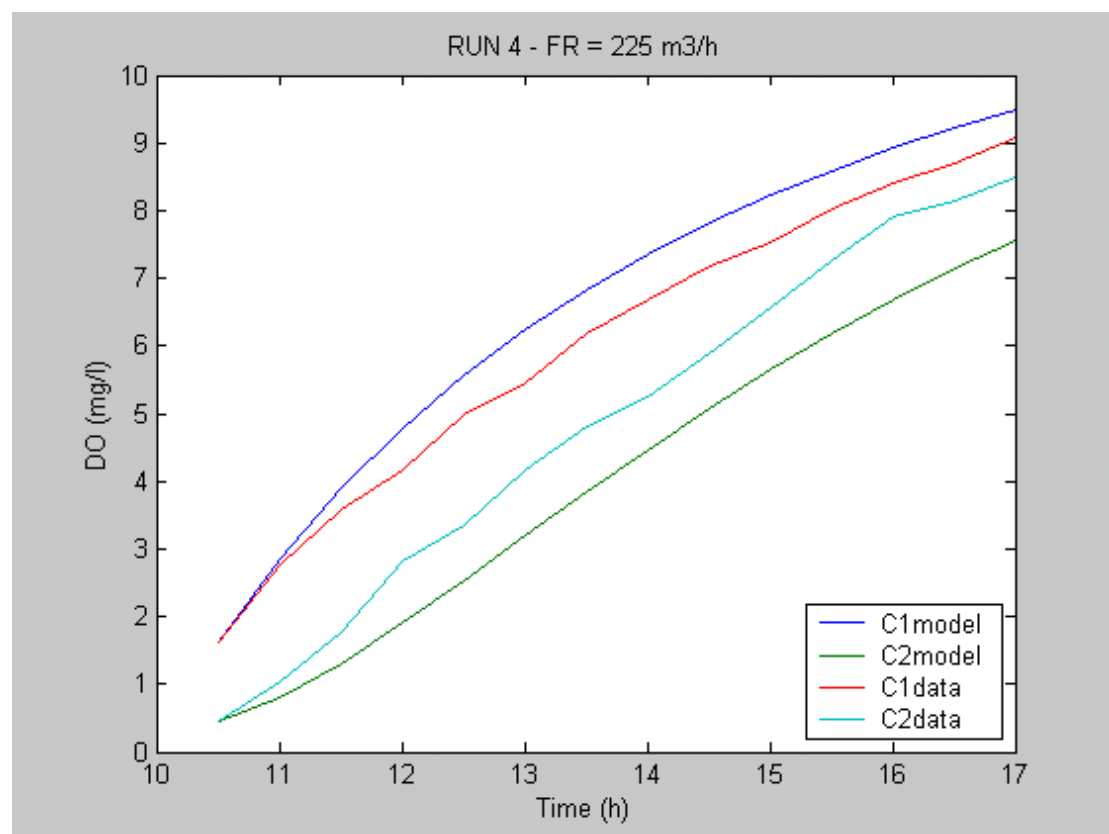
RUN 2			
	FR = 225 m3/h	FR = 250 m3/h	FR = 275 m3/h
Kla (1/h)	11,7	11,3	10,8
C* (g/m3)	1,18	17,8	11,8
FL (m3/h)	600	600	600
λ (%)	82,4	83,8	90,3
SSE	8,5	7,7	7,1

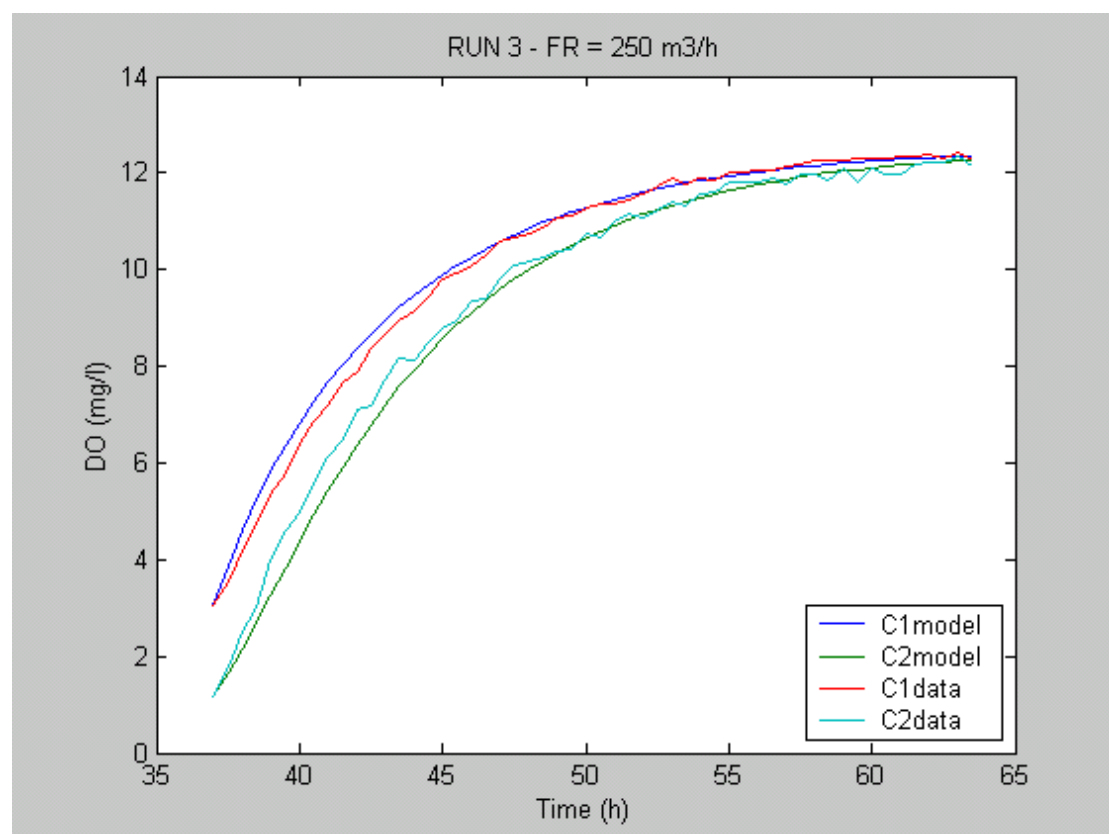
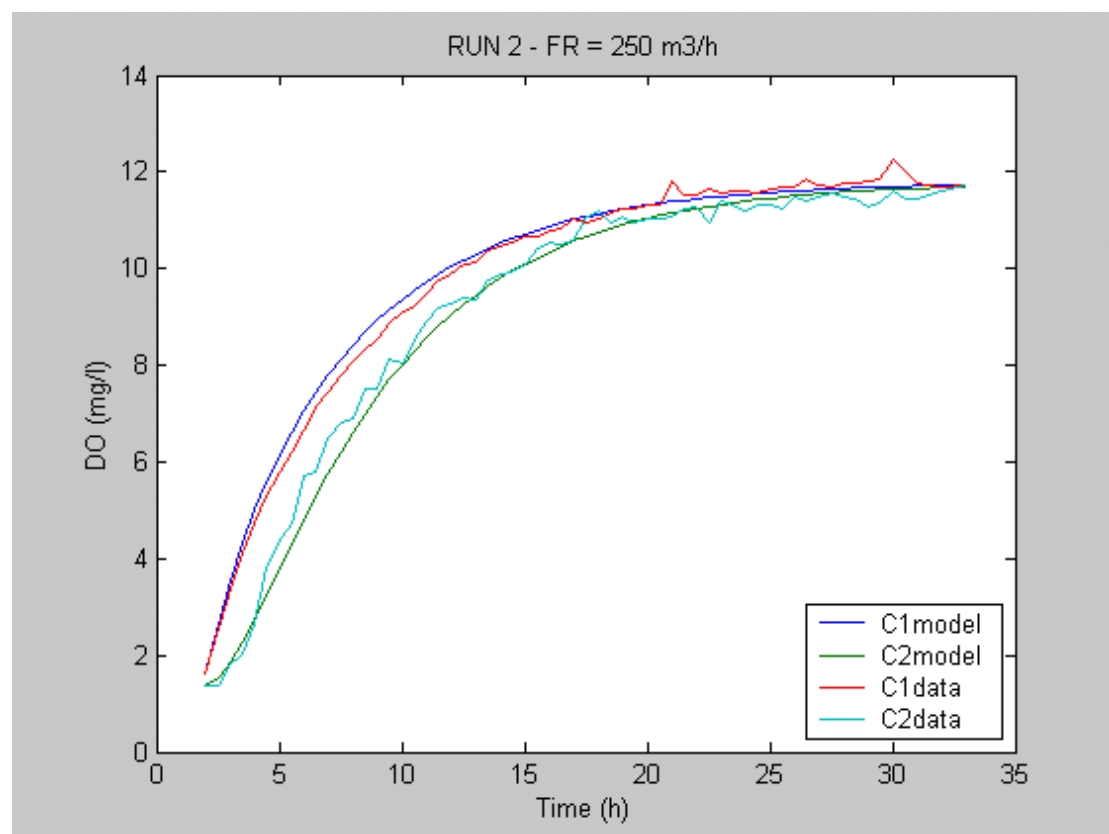
RUN 3			
	FR = 225 m3/h	FR = 250 m3/h	FR = 275 m3/h
K _{la} (1/h)	10,3	10,3	9,9
C* (g/m3)	12,5	12,5	12,5
FL (m3/h)	600	600	600
λ (%)	95	82	84,7
SSE	8,7	7,8	6,9

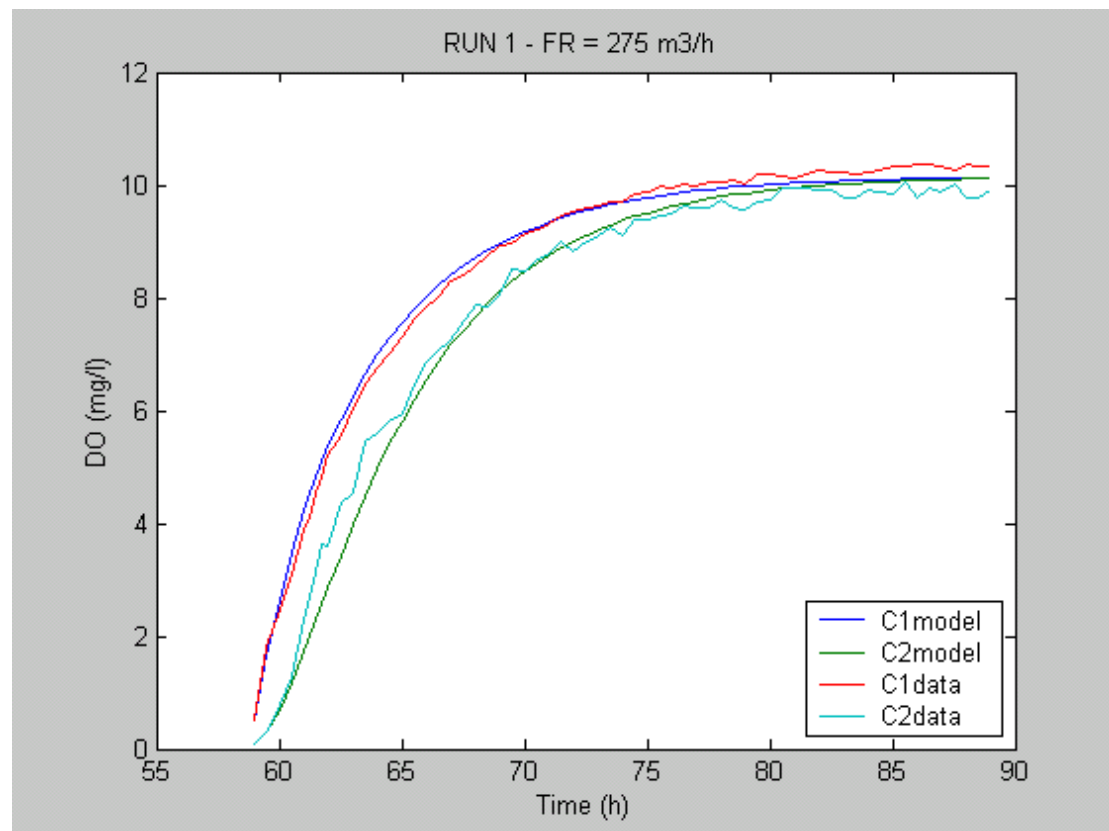
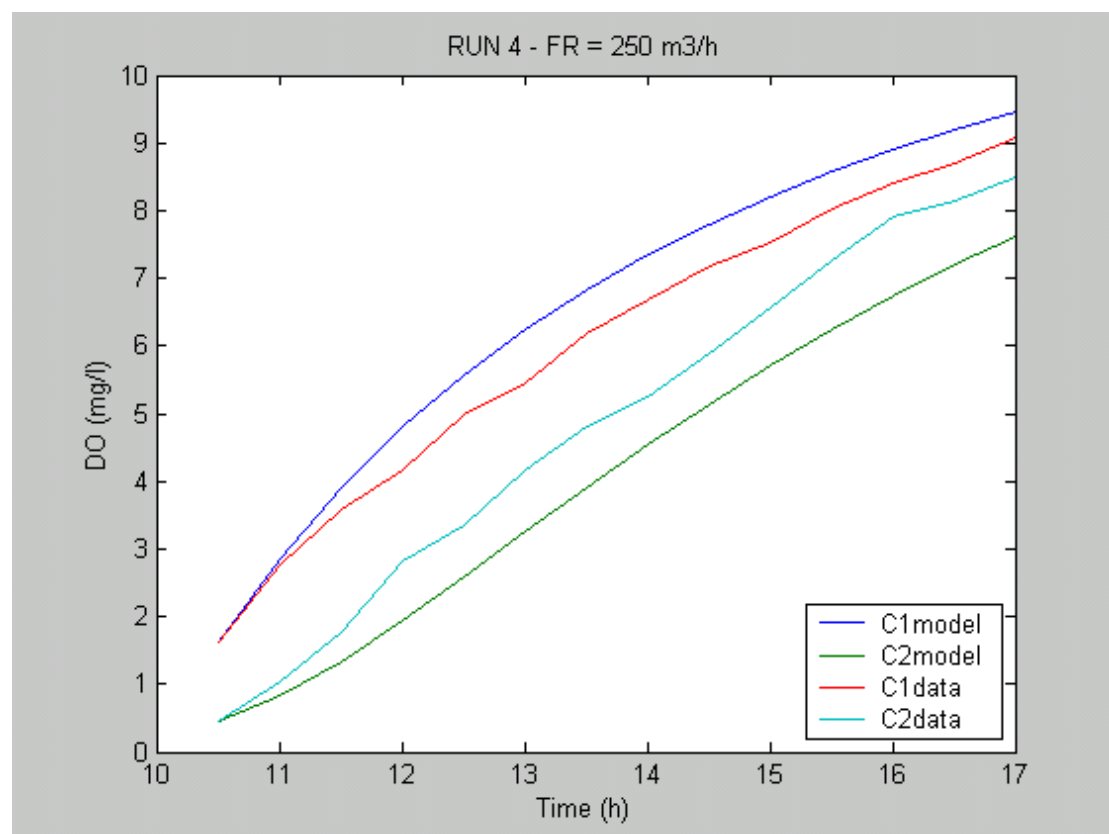
RUN 4			
	FR = 225 m3/h	FR = 250 m3/h	FR = 275 m3/h
K _{la} (1/h)	13,8	13,9	13,9
C* (g/m3)	12,1	12	12
FL (m3/h)	600	600	600
λ (%)	89	89	77,7
SSE	14,4	13	12

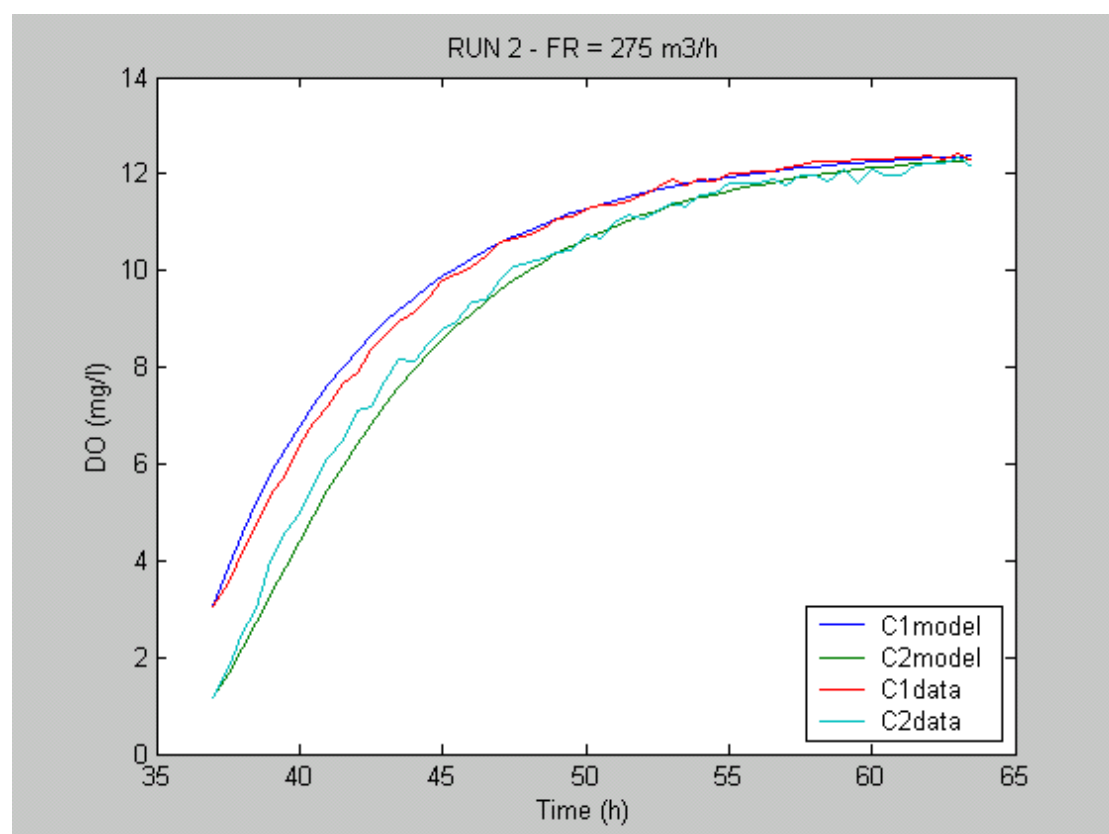
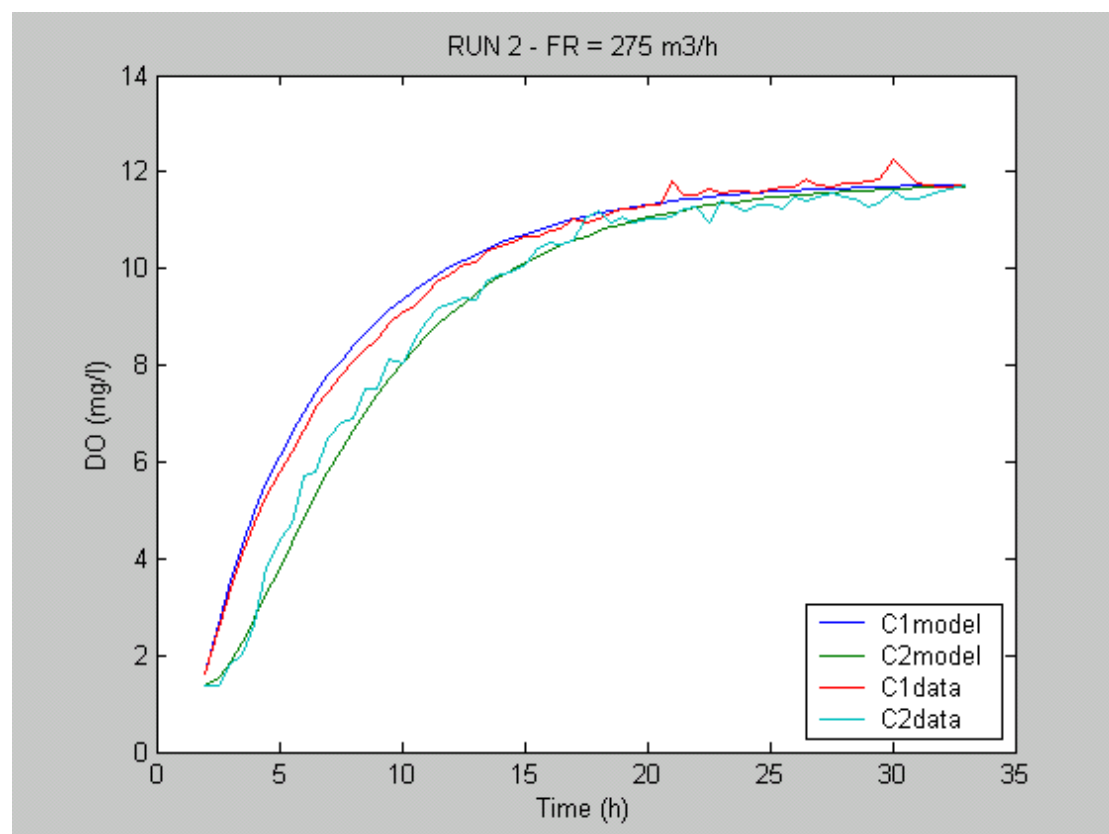


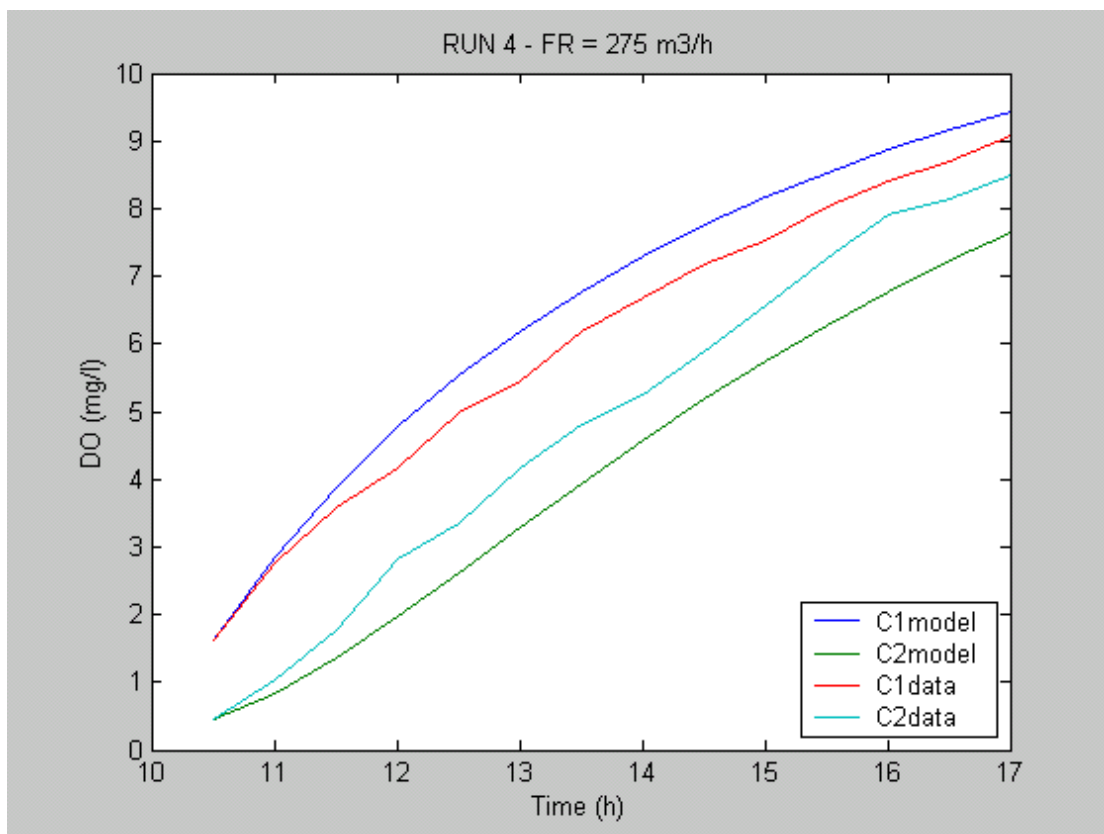












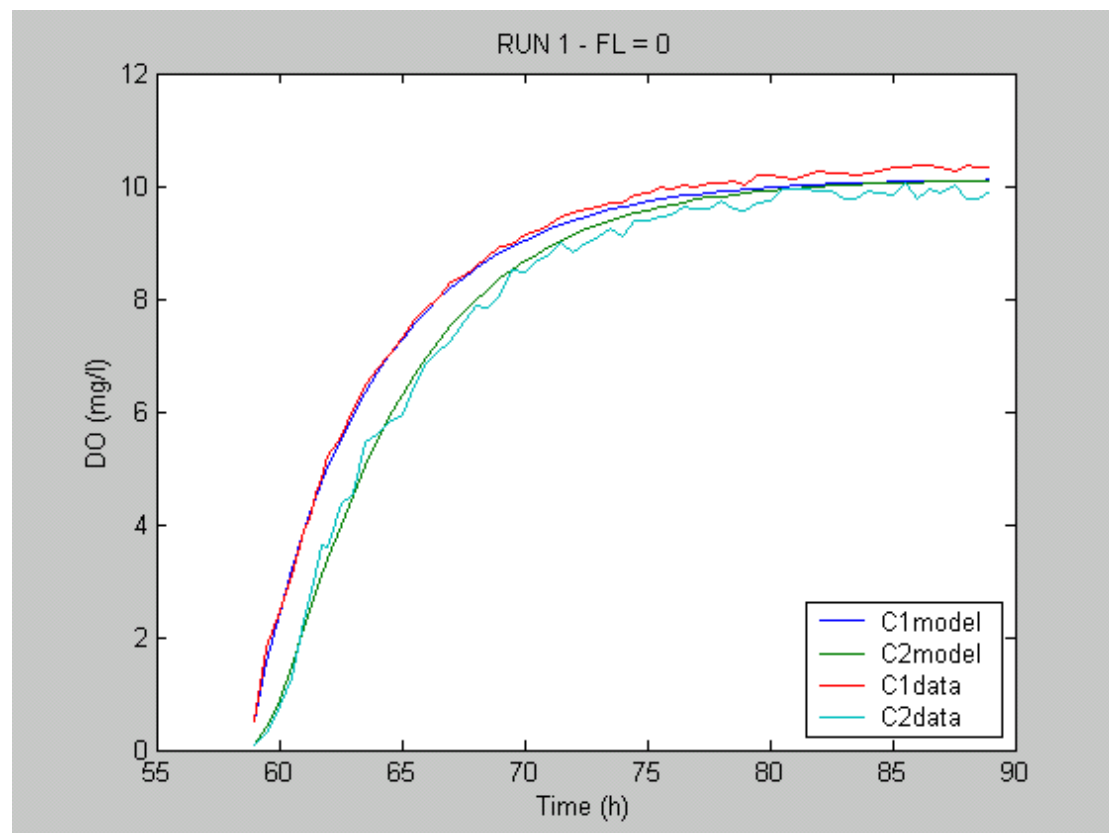
Παρατηρούμε ότι οι αλλαγές σε σχέση με τις προηγούμενα υπολογισμένες τιμές με περιορισμένο F_R δεν είναι πολύ σημαντικές. Επίσης δεν παρουσιάζεται ουσιαστική μεταβολή για τις διάφορες τιμές του F_R . Αυτό σημαίνει ότι η υπόθεσή μας δεν στέκει και ότι η ύπαρξη περισσότερων παραμέτρων δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Μπορεί αυτό να μη βοηθάει σε εξαγωγή νέων συμπερασμάτων σχετικά με τις παραμέτρους, μας λέει όμως ότι τα αποτελέσματα του προγράμματος δεν επηρεάζονται από την πολυπλοκότητά του, πράγμα που είναι θετικό.

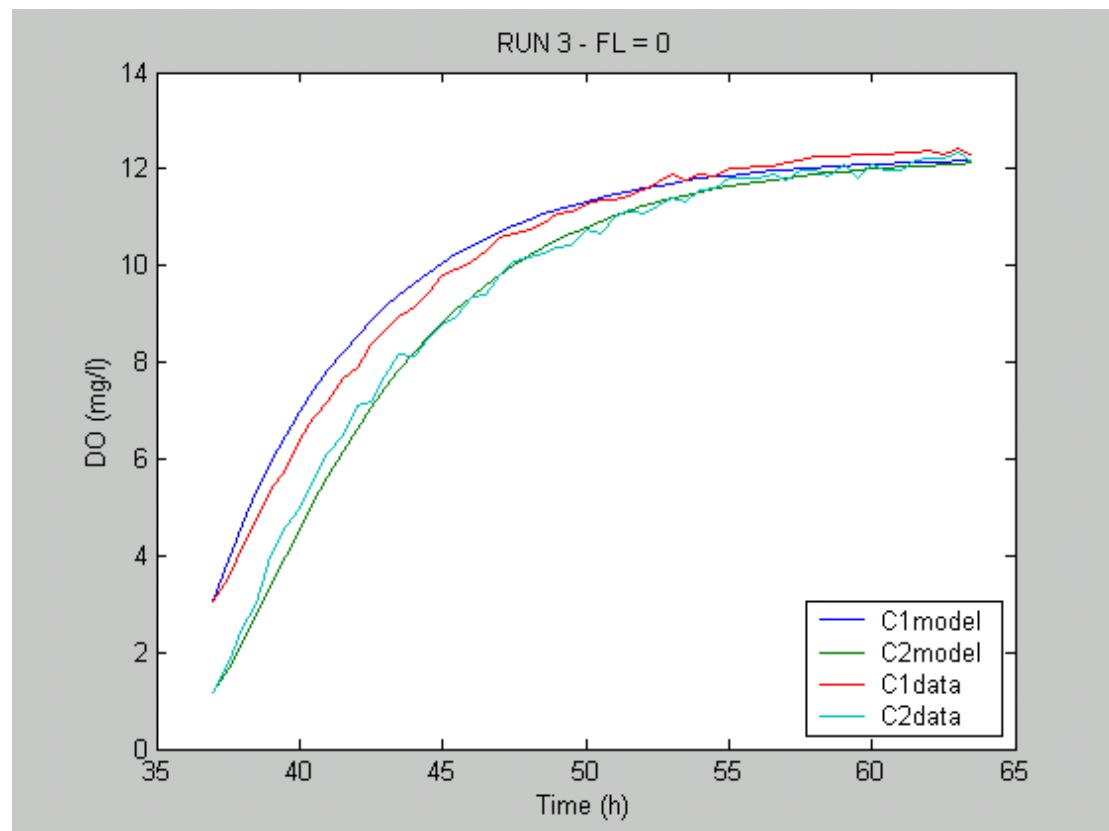
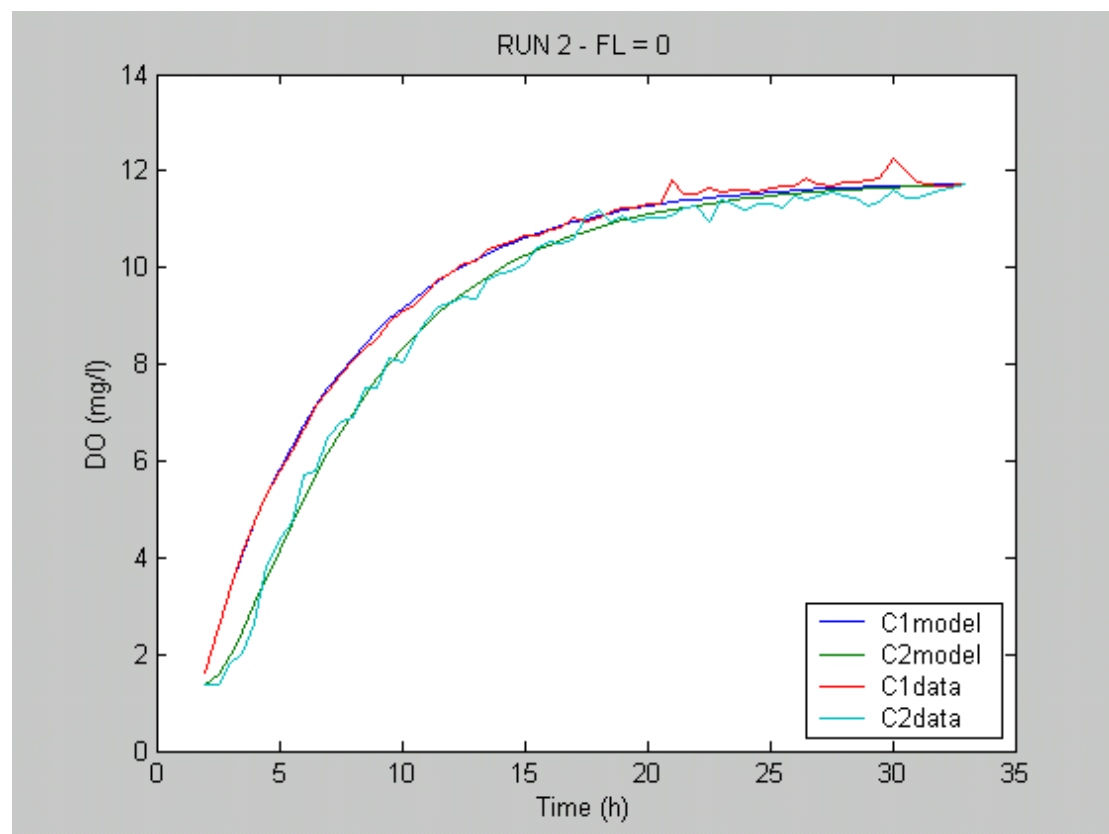
2) Μηδενικό F_L

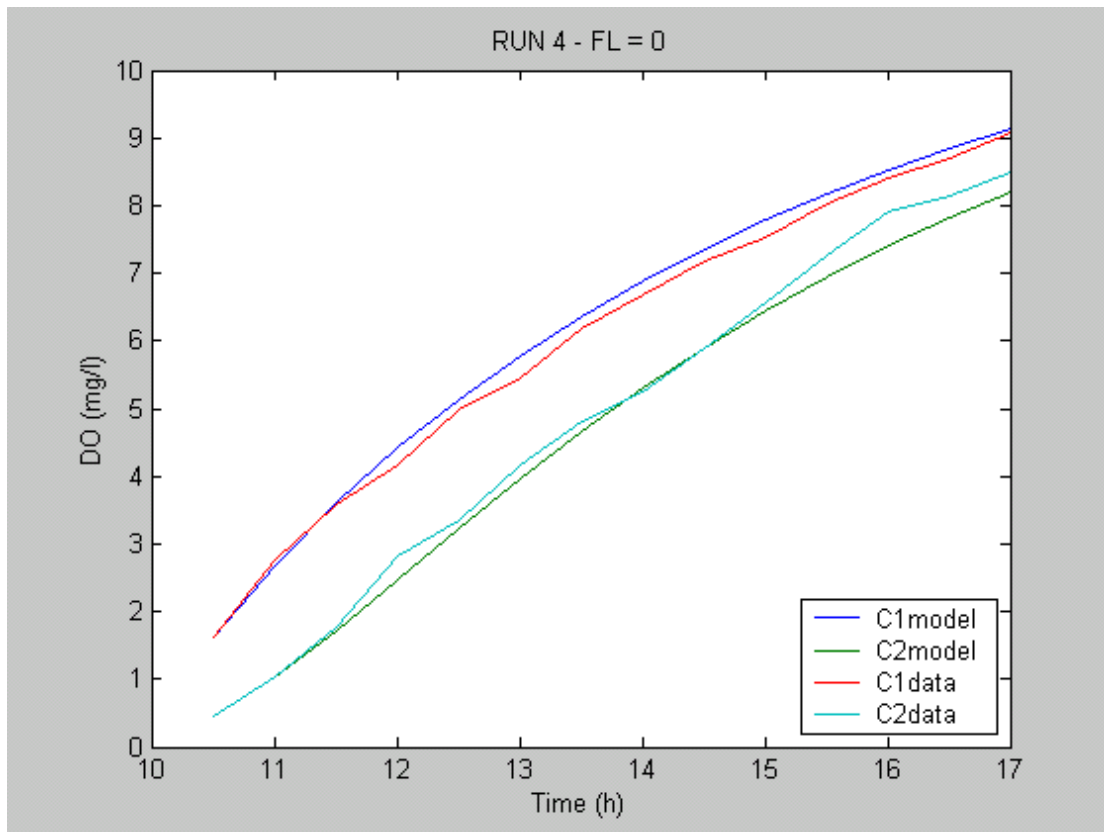
Ένα άλλο ενδεχόμενο είναι μια αλλαγή στο ίδιο το μοντέλο. Η θεώρηση ότι το F_L είναι μηδενικό. Θα υποθέσουμε δηλαδή ότι δεν υπάρχει μεταφορά της υγρής φάσης από την περιοχή 1 στην περιοχή 2. Σε αυτή την περίπτωση θα έχουμε βέβαια πολύ μεγάλο F_R (το οποίο δεν θα εκφράζει πλέον την παροχή του αέρα) οπότε θα αυξήσουμε και το όριο για αυτή την παράμετρο. Η προσέγγιση αυτή στοχεύει περισσότερο στον υπολογισμό του $K_L a$ και του λ (το C^* όπως είδαμε δεν επηρεάζεται σημαντικά από αλλαγές των υπολοίπων παραμέτρων), μια και οι άλλες δύο παράμετροι δεν εκφράζουν πλέον απόλυτα συγκεκριμένα μεγέθη. Χρησιμοποιούνται περισσότερο ως σταθερές που βελτιστοποιούνται για την καλύτερη βαθμονόμηση του μοντέλου. Θα μικρύνουμε επίσης το κάτω όριο του λ σε 40% διότι η αύξηση του F_R μάλλον θα μειώσει την ικανότητα κορεσμού του υγρού στην έξοδο του riser. Ούτως ή άλλως η πιο χαλαρή μορφή της προσέγγισης που επιχειρούμε επιβάλλει και πιο χλαρή

αντιμετώπιση των παραμέτρων. Τα αποτελέσματα που μας δίνει η νέα αυτή προσπάθεια φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
K _{la} (1/h)	8,17	7	7	8,5
C* (g/m ³)	10,13	11,8	12,24	11,96
FR (m ³ /h)	1434	1285	905	1500
λ (%)	43,7	41	60	40
SSE	4,5	3,3	8,3	1,2







Παρατηρούμε ότι ο μηδενισμός του F_L μας δίνει τιμές για το K_{La} πολύ μικρότερες από αυτές που είχαμε για την κανονική λειτουργία του μοντέλου. Το C^* παραμένει πρακτικά ανεπηρέαστο (είναι η λιγότερο ευαίσθητη παράμετρος του συστήματος), το F_R όπως περιμέναμε αυξήθηκε κατά πολύ και έγινε υπερπολλαπλάσιο της παροχής, ενώ το λ μειώθηκε επίσης σημαντικά. Παρατηρούμε πάντως ότι έχουμε τελικά μικρότερη απόκλιση από την κανονική προσέγγιση.

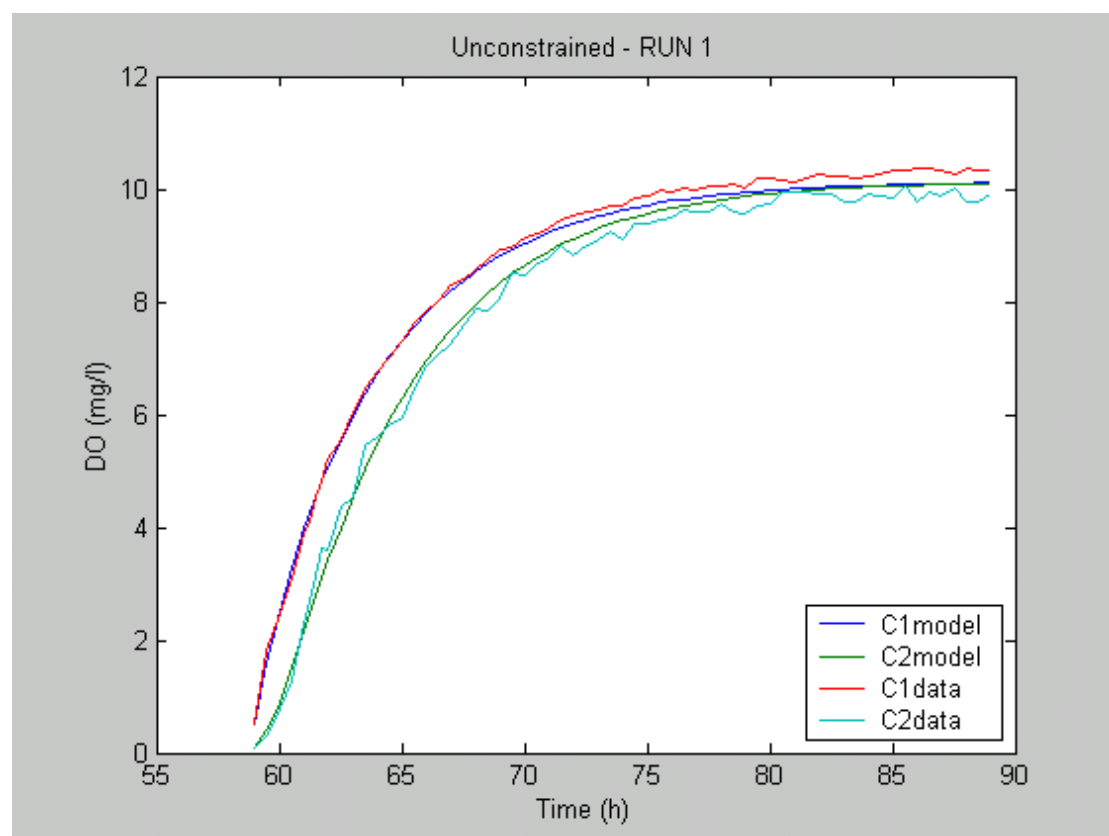
3) Επέκταση ορίων (υπολογισμός παραμέτρων χωρίς περιορισμούς)

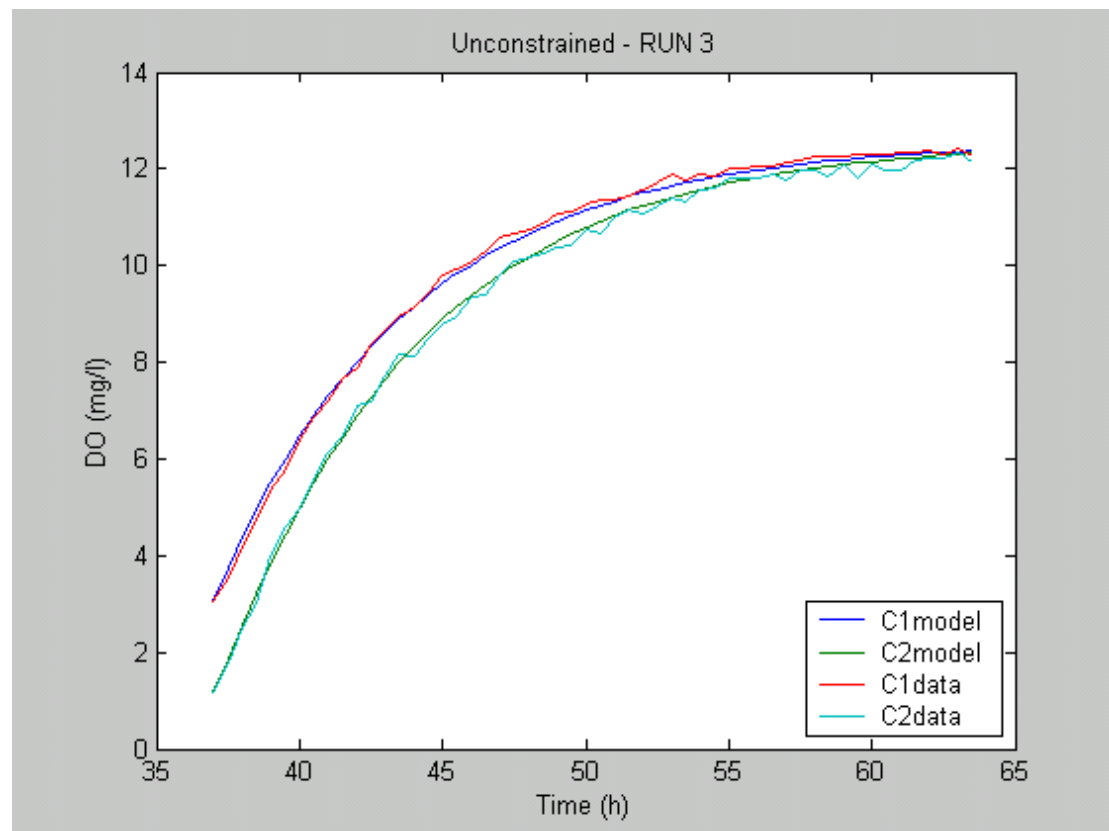
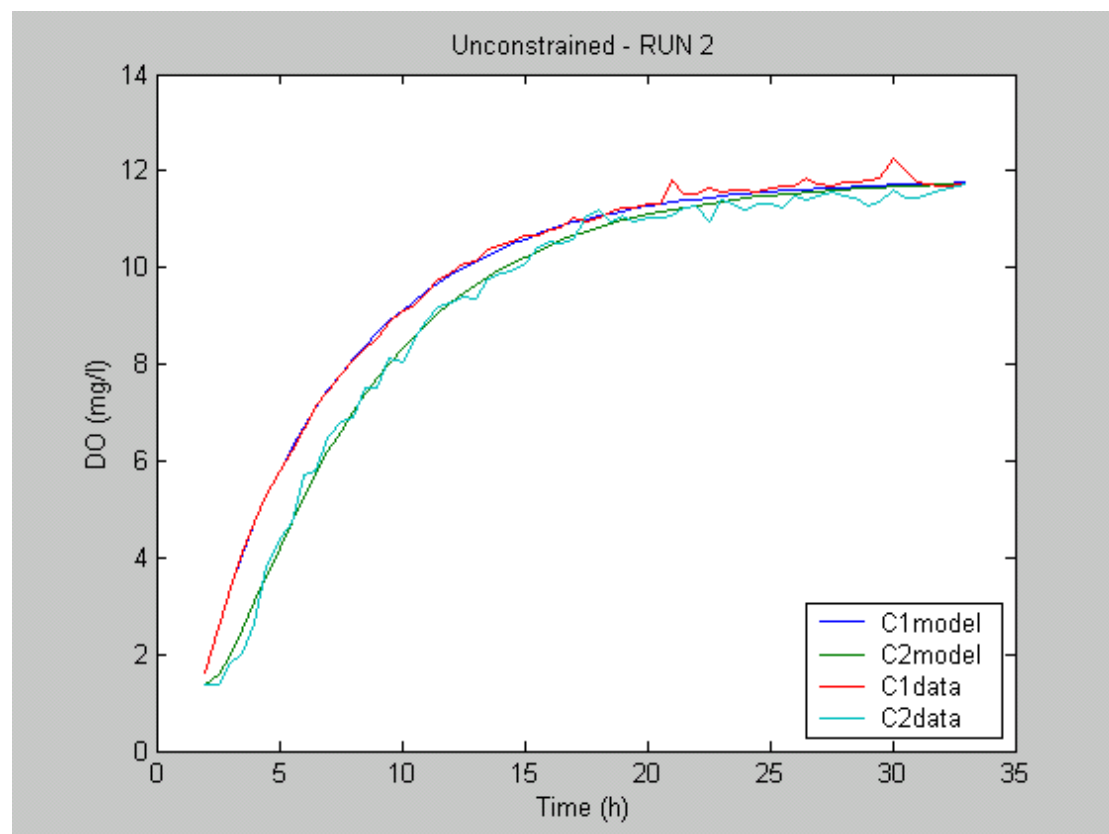
Παρατηρούμε ότι κάποια από τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στα όρια. Αυτό σημαίνει ότι εάν οι περιορισμοί μας ήταν πιο ελαστικοί τα αποτελέσματα μπορεί να ήταν διαφορετικά και η απόκλιση μικρότερη. Κάνουμε λοιπόν το εξής πείραμα : Δίνουμε αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις για τις παραμέτρους μας έτσι ώστε να μη φτάνουν τα αποτελέσματα στα όρια για να δούμε τι αποτέλεσμα θα έχει αυτό στο σύστημά μας. Αυτή η προσέγγιση αντιμετωπίζει όλες τις παραμέτρους με απόλυτη χαλαρότητα όσον αφορά τα μεγέθη που εκφράζουν και προσανατολίζεται στον υπολογισμό του K_{La} και στην εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων. Από τη στιγμή που μεγαλώνουμε το εύρος των παραμέτρων, θα αυξήσουμε και τις επαναλήψεις του εσωτερικού βρόχου, έτσι ώστε το στατιστικό δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό. Οι καινούριες διακυμάνσεις έχουν ως εξής :

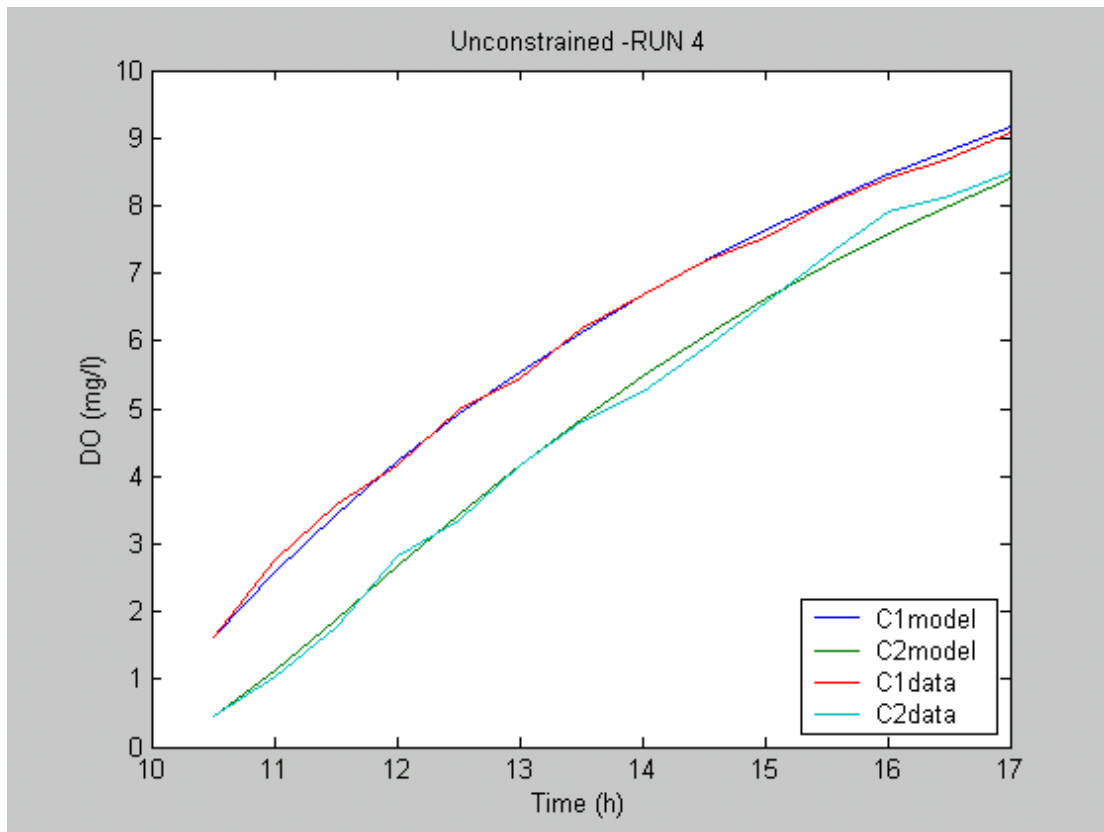
	min	max
K _{la} (1/h)	3	20
C* (g/m ³)	7	16
FL (m ³ /h)	0	2000
FR (m ³ /h)	0	2000
λ (%)	0,2	1

Τα αποτελέσματα για τους καινούριους περιορισμούς είναι :

	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
K _{la} (1/h)	10,86	8,9	10,2	9,1
C* (g/m ³)	10,14	11,8	12,6	13,3
FL (m ³ /h)	913	700	1190	1452
FR (m ³ /h)	484	622	203	494
λ (%)	85,5	56,7	72,7	67,1
SSE	4,36	3,3	1,62	0,4







Παρατηρούμε κάποια μείωση στο $K_L a$. Τα F_L και F_R είναι αρκετά αυξημένα αλλά το F_R δεν υπερβαίνει το διπλάσιο της παροχής. Το λ είναι κάπως μειωμένο. Η απόκλιση είναι πάλι αρκετά μικρότερη από αυτή των αρχικών περιορισμών. Τρέχοντας το πρόγραμμα για δεύτερη φορά για τις ίδιες τιμές, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι κάπως αλλαγμένα. Αυτό είναι ιδιαίτερα άσχημο γιατί μειώνει σημαντικά την αξιοπιστία τους. Το φαινόμενο αυτό δεν είχε παρατηρηθεί προηγουμένως, συνεπώς καταλήγουμε ότι ούτε αυτή η προσέγγιση μας δίνει σημαντικές πληροφορίες.

4) Διαφορετική θεώρηση όγκων

Η επόμενη διαφοροποίηση του μοντέλου που επεξεργαστήκαμε ήταν η μεταβολή των όγκων των περιοχών. Μέχρι τώρα θεωρούσαμε το όριο μεταξύ των περιοχών 1 και 2 στο οριζόντιο επίπεδο που περνάει από τις κορυφές των αεριστήρων. Τώρα, θεωρώντας και πάλι το F_L μηδενικό, θα υποθέσουμε ότι η περιοχή των φυσαλίδων εκτείνεται πιο χαμηλά. Συγκεκριμένα θα μελετήσουμε τις περιπτώσεις που η περιοχή 1 φτάνει στα 1.5, 1 και 0.5 m από τον πυθμένα (η αρχική τιμή ήταν 2). Ουσιαστικά η επέκταση της περιοχής 1 παίρνει το ρόλο της παροχής ανακυκλοφορίας F_L . Θεωρούμε δηλαδή ότι ο χώρος στον οποίο γινόταν η επανακυκλοφορία ταυτίζεται με την περιοχή ανάμιξης. Τα αποτελέσματα είναι :

	RUN 1			
	V1/V2=6,3/2	V1/V2=6,8/1,5	V1/V2=7,3/1	V1/V2=7,8/0,5
K _{La} (1/h)	8,17	9,9	10	10,8
C* (g/m ³)	10,13	10,1	10,1	10,1
FR (m ³ /h)	1434	1070	726	370
λ (%)	43,7	41	50	60
SSE	4,5	4,7	5	5,3

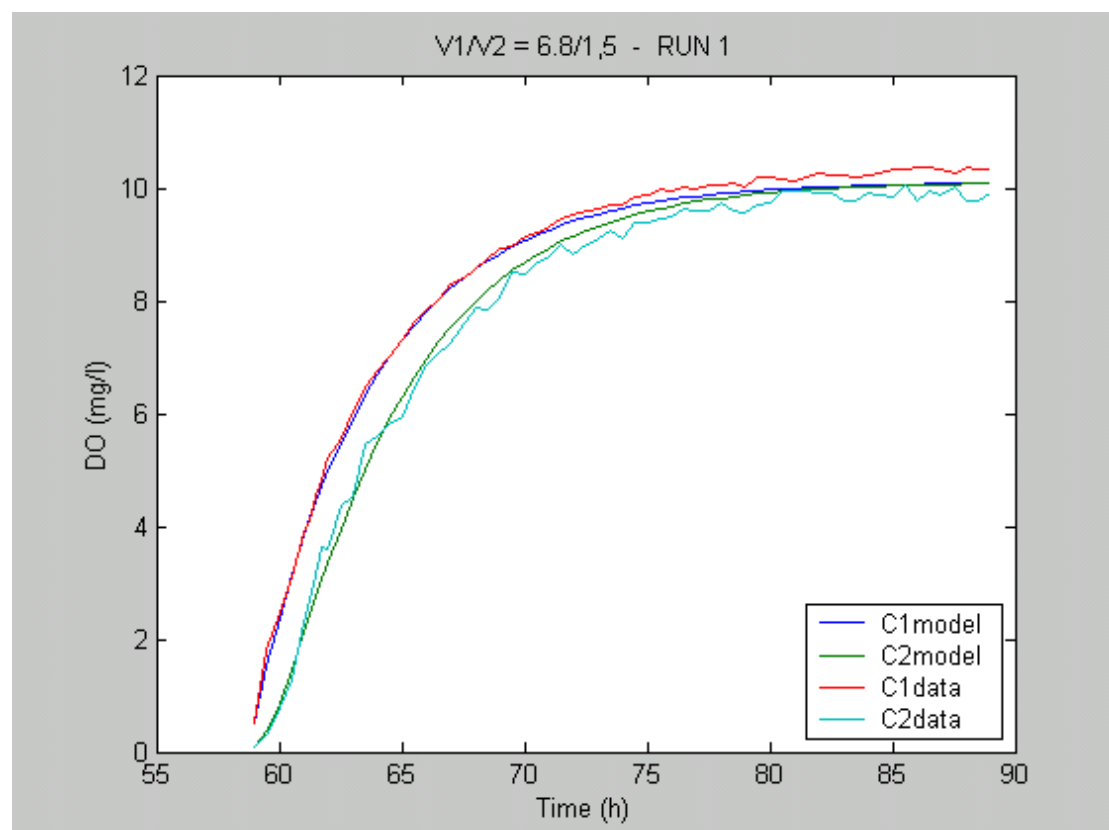
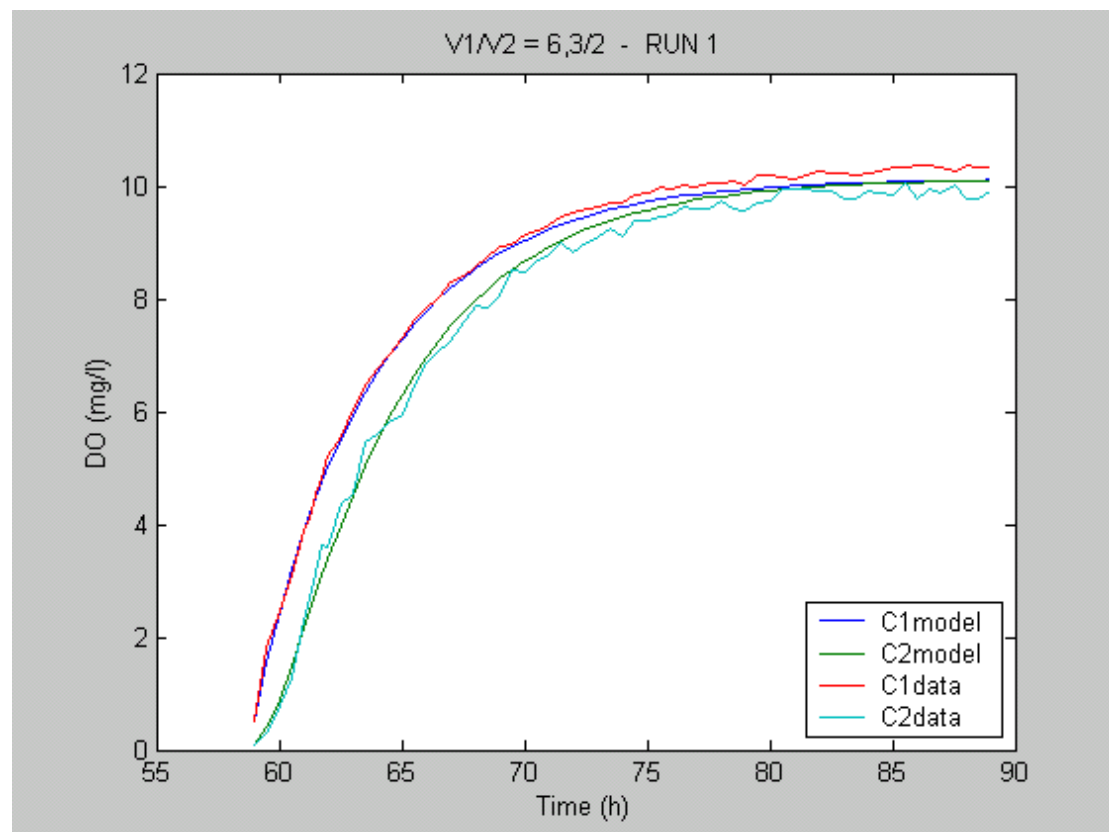
	RUN 2			
	V1/V2=6,3/2	V1/V2=6,8/1,5	V1/V2=7,3/1	V1/V2=7,8/0,5
K _{La} (1/h)	7	7,7	7,2	8
C* (g/m ³)	11,8	11,8	11,8	11,7
FR (m ³ /h)	1285	1000	692	352
λ (%)	41	41	59,2	78,2
SSE	3,3	3,4	3,5	3,6

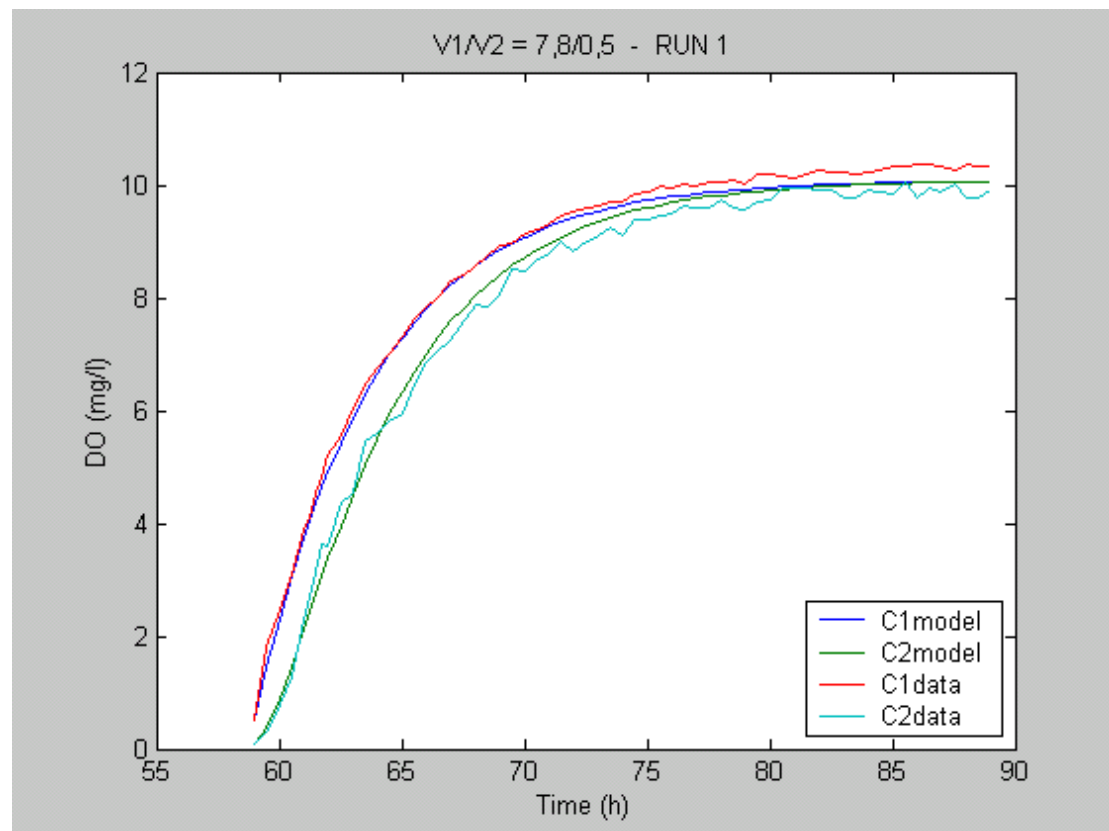
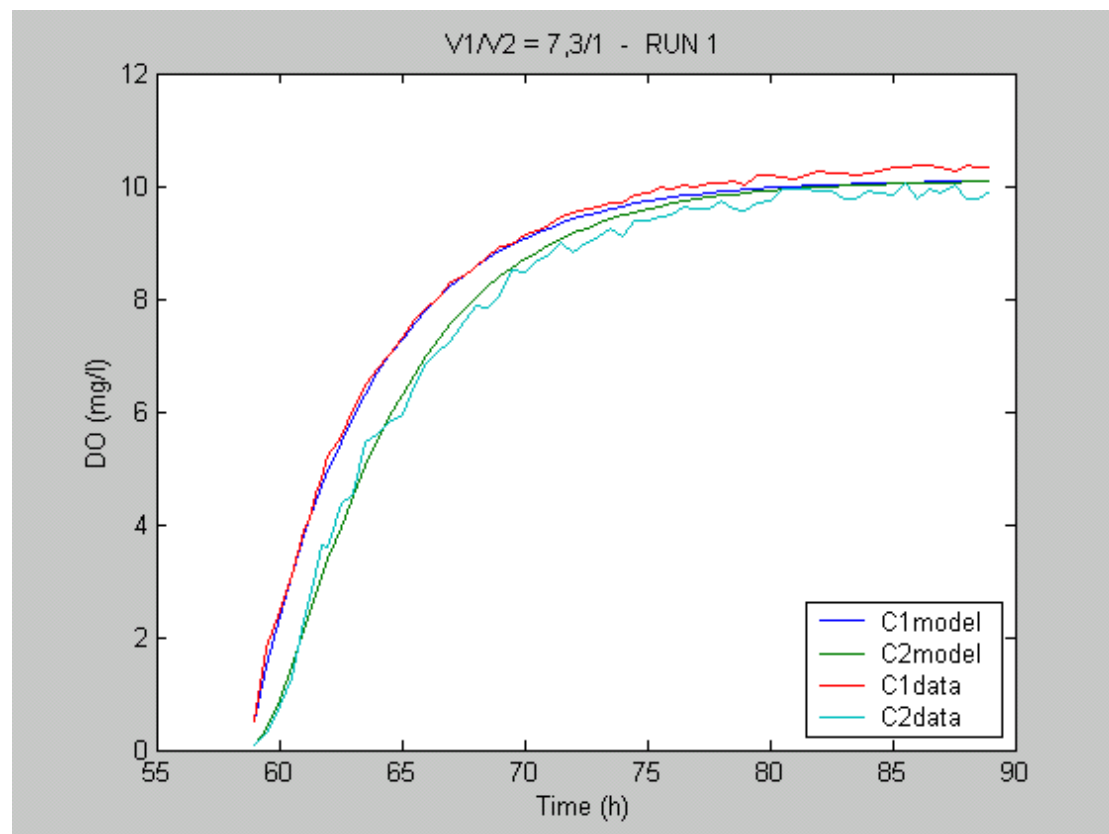
	RUN 3			
	V1/V2=6,3/2	V1/V2=6,8/1,5	V1/V2=7,3/1	V1/V2=7,8/0,5
K _{La} (1/h)	7	7	7,1	7,1
C* (g/m ³)	12,24	12,3	12,4	12,5
FR (m ³ /h)	905	753	602	321
λ (%)	60	60,1	60	86,8
SSE	8,3	4,9	2,4	1,8

	RUN 4			
	V1/V2=6,3/2	V1/V2=6,8/1,5	V1/V2=7,3/1	V1/V2=7,8/0,5
K _{La} (1/h)	8,5	7,1	7,4	9
C* (g/m ³)	11,96	12,5	12,8	12,7
FR (m ³ /h)	1500	1417	978	486
λ (%)	40	40,1	43,7	46,9
SSE	1,2	0,4	0,4	0,4

Όσον αφορά το K_{La} όσο μεγαλώνει το βάθος στο οποίο εκτείνεται η περιοχή 1 αυξάνεται αλλά δεν φτάνει τις τιμές που είχε για F_L διάφορο του μηδενός. Θα περιμέναμε όσο η περιοχή 1 μεγαλώνει τα αποτελέσματά μας να πλησιάζουν αυτά της απλής προσέγγισης και αυτό συμβαίνει, αλλά μένουν πάντα σε χαμηλότερες τιμές. Το F_R και το λ παρουσιάζουν αύξηση με το βάθος.

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα για το πρώτο πείραμα :





8.4 Τελικά συμπεράσματα

Τα σημαντικά προβλήματα πρόβλεψης που δημιουργεί τελικά το μοντέλο συνδυασμένο με το πρόγραμμα οφείλονται στο κλασσικό πρόβλημα των μαθηματικών προσεγγίσεων : Το σύστημα των εξισώσεων (μοντέλο) όπως και ο αλγόριθμος direct search (πρόγραμμα) είναι μαθηματικά κατασκευάσματα, προορισμένα να επεξεργάζονται τιμές και να δίνουν αποτελέσματα. Το κατά πόσο τα μοντέλα αναπαριστούν την πραγματικότητα και οι αλγόριθμοι βρίσκουν πραγματικά μεγέθη είναι συχνά αμφίβολο.

Στη δική μας περίπτωση τα δεδομένα εισαγωγής ήταν οι περιορισμοί των παραμέτρων. Απο τη μια (αυστηροί περιορισμοί) είχαμε το ενδεχόμενο μιας ταυτολογικής ανάλυσης, όπου θα δίναμε τις τιμές που θα μας έβγαζε τελικά το πρόγραμμα. Απο την άλλη (χαλαροί περιορισμοί) μια σειρά σχεδόν τυχαίων αποτελεσμάτων.

Είναι προφανές ότι το μαθηματικό μοντέλο μπορεί να δίνει μικρή απόκλιση απο τα δεδομένα για περισσότερα απο ένα σύνολα παραμέτρων. Εναπόκειται στην κρίση και την εμπειρία του μελετητή να επιλέξει το σωστό. Σε καμία περίπτωση δεν μπορούμε να θεωρήσουμε τη μαθηματική διαδικασία ένα μαύρο κουτί που δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς δεύτερη σκέψη.

Η λύση λοιπόν που προτείνεται είναι να συνδιάσουμε το πρόγραμμα με τους λογικούς και εμπειρικούς περιορισμούς των μεγεθών του μοντέλου. Είναι η πιο λογική απόφαση, θεωρώντας δεδομένο ότι εμπιστευόμαστε τη δυνατότητα των παραμέτρων να εκφράζουν συγκεκριμένα μεγέθη, ότι εμπιστευόμαστε δηλαδή την ορθότητα του μοντέλου.

Τελικά δεν μπορούμε να στηρίξουμε κάποια απο τις άλλες επιλογές, που δίνουν μεν καλύτερη προσέγγιση στα δεδομένα αλλά καταλήγουν σε μη φυσιολογικές τιμές μερικών παραμέτρων. Λαμβανουμε υπόψη και το γεγονός ότι δεν αποκλείεται το μαθηματικό σύστημα να δίνει ελάχιστο για περισσότερα απο ένα σύνολα παραμέτρων, μόνο ένα απο τα οποία θα ανταποκρίνεται στην εφαρμογή μας. Θα δεχθούμε τα αρχικά αποτελέσματα του προγράμματος, με τους φυσικούς περιορισμούς που θέσαμε, με μια επιφύλαξη ότι οι τιμές για το K_{La} και το λ μπορεί να είναι μικρότερες. Θα ήταν χρήσιμη μια μελλοντική πιο εκτενής μελέτη των παραμέτρων αυτών για την πιο σωστή διαμόρφωση των περιορισμών τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Α. Στάμου, <<Βασικές αρχές και σχεδιασμός συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων>>, ΤΕΕ, 1994
- 2 Water environment federation (ASCE manual and report on engineering practice) <<Design of municipal wastewater treatment plants>>
- 3 Γ. Οικονομίδης, Διπλωματική εργασία με τίτλο <<Εκτίμηση της μεταφοράς οξυγόνου σε πιλοτική δεξαμενή αερισμού εφοδιασμένη με στατικούς διαχυτές Pulsar>>
- 4 Ν. Καλογεράκη, <<Τεχνική βιοχημικών διεργασιών-Πανεπιστημιακές σημειώσεις>>
- 5 J.M Smith, <<Μηχανική χημικών διεργασιών>>
- 6 AQUA, <<Στατικοί διαχυτήρες λεπτής φυσαλίδας Pulsar>>
- 7 Α. Αιβαζίδη, <<Περιβαλλοντική μικροβιολογία>> Ξάνθη 1999
- 8 C.Freitas, J.A. Texeira, ‘Hydrodynamic studies in an airlift reactor with an enlarged degassing zone’ Bioprocess engineering, 18, pp 267-279, 1998
- 9 M. Gavrilescu, R.Z. Tudose, ‘Hydrodynamics of non-Newtonian liquids in external loop airlift bioreactors’, Bioprocess engineering, 18, pp 83-89, 1998
- 10 Luus, R & Jaakola THI, AIChE J. “Optimization by direct search and systematic reduction of the search region” 1973 19 760-766
- 11 Πρακτικά συνεδρίου HELECO’03, 30 Ιαν – 2 Φεβρ, 2003, Αθήνα. Σελ 328-335
<< ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΟΞΥΓΟΝΩΣΗΣ ΣΕ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΤΙΚΟΥΣ ΔΙΑΧΥΤΕΣ PULSAR>>
Ν. Καλογεράκης, Ι.Μ. Οικονομίδης, Α. Χουρδάκης, Ε. Γιδάρκος,
Γ. Χατζηκωνσταντίνου και Δ. Αγγίδης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ MATLAB

RUN 1			
Time (h)	DO 1 (mg/l)	DO 2 (mg/l)	DO 3 (mg/l)
59	0,22	0,08	0,79
59,5	1,65	0,29	1,97
60	2,18	0,79	2,79
60,5	2,95	1,27	3,29
61	3,7	2,31	4,06
61,25	3,94	2,71	4,33
61,5	4,43	3,14	4,66
61,75	4,68	3,62	4,94
62	5,18	3,61	5,27
62,5	5,53	4,38	5,6
63	5,99	4,56	6,1
63,5	6,38	5,44	6,59
64	6,68	5,61	6,8
64,5	7,02	5,79	7,01
65	7,35	5,93	7,29
65,5	7,64	6,49	7,62
66	7,85	6,86	7,84
66,5	8	7,08	8,04
67	8,31	7,24	8,3
67,5	8,45	7,6	8,37
68	8,59	7,87	8,57
68,5	8,75	7,84	8,75
69	9,01	8,05	8,85
69,5	8,91	8,5	9,03
70	9,17	8,46	9,14
70,5	9,24	8,7	9,16
71	9,34	8,79	9,27
71,5	9,46	8,99	9,43
72	9,58	8,84	9,48
72,5	9,68	8,99	9,48
73	9,72	9,1	9,51
73,5	9,81	9,24	9,59
74	9,78	9,09	9,64
74,5	9,91	9,38	9,74
75	9,92	9,37	9,8
75,5	10,13	9,45	9,83
76	10,05	9,49	9,81
76,5	10,15	9,63	9,89
77	10,06	9,59	9,87
77,5	10,12	9,58	10
78	10,16	9,72	9,97
78,5	10,14	9,6	10,03
79	10,12	9,57	9,93
79,5	10,31	9,71	10,05
80	10,34	9,74	10,02
80,5	10,29	9,94	10,03
81	10,23	9,94	10,04
81,5	10,31	9,93	10,07

82	10,27	9,9	10,29
82,5	10,25	9,92	10,18
83	10,33	9,78	10,13
83,5	10,29	9,78	10,13
84	10,31	9,91	10,18
84,5	10,39	9,89	10,16
85	10,47	9,84	10,22
85,5	10,41	10,05	10,23
86	10,39	9,78	10,34
86,5	10,38	9,95	10,36
87	10,44	9,88	10,25
87,5	10,33	10,01	10,19
88	10,42	9,76	10,31
88,5	10,51	9,78	10,19
89	10,38	9,92	10,31

RUN 2			
Time (h)	DO 1 (mg/l)	DO 2 (mg/l)	DO 3 (mg/l)
2,0	1,44	1,38	1,76
2,5	2,41	1,36	2,71
3,0	3,14	1,83	3,60
3,5	3,83	2,03	4,42
4,0	4,45	2,62	4,99
4,5	5,07	3,81	5,54
5,0	5,71	4,40	5,87
5,5	6,07	4,72	6,34
6,0	6,42	5,71	6,90
6,5	7,11	5,81	7,15
7,0	7,30	6,47	7,55
7,5	7,67	6,81	7,90
8,0	7,93	6,88	8,22
8,5	8,23	7,50	8,40
9,0	8,49	7,53	8,56
9,5	8,81	8,14	8,90
10,0	9,13	8,04	9,12
10,5	9,45	8,53	8,98
11,0	9,51	8,89	9,44
11,5	9,80	9,20	9,70
12,0	9,88	9,26	9,86
12,5	10,06	9,38	10,14
13,0	10,16	9,37	10,13
13,5	10,37	9,78	10,41
14,0	10,42	9,87	10,48
14,5	10,57	9,92	10,55
15,0	10,66	10,10	10,70
15,5	10,68	10,41	10,68
16,0	10,77	10,54	10,79
16,5	10,85	10,48	10,83

17,0	11,15	10,57	10,89
17,5	10,90	11,06	10,98
18,0	11,02	11,18	11,05
18,5	11,25	10,93	11,09
19,0	11,18	11,09	11,31
19,5	11,32	10,94	11,18
20,0	11,33	11,02	11,29
20,5	11,30	11,04	11,31
21,0	12,31	11,08	11,34
21,5	11,48	11,22	11,55
22,0	11,54	11,26	11,51
22,5	11,70	10,97	11,62
23,0	11,71	11,40	11,43
23,5	11,74	11,33	11,48
24,0	11,74	11,19	11,49
24,5	11,63	11,33	11,53
25,0	11,75	11,33	11,51
25,5	11,63	11,23	11,75
26,0	11,69	11,50	11,67
26,5	11,91	11,40	11,76
27,0	11,83	11,49	11,66
27,5	11,82	11,58	11,59
28,0	11,83	11,48	11,73
28,5	11,85	11,46	11,69
29,0	11,84	11,28	11,79
29,5	11,90	11,37	11,81
30,0	12,64	11,59	11,91
30,5	12,12	11,46	11,87
31,0	11,80	11,45	11,72
31,5			
32,0	11,75	11,62	11,60
32,5			
33,0	11,82	11,72	11,67

RUN 3			
Time (h)	DO 1 (mg/l)	DO 2 (mg/l)	DO 3 (mg/l)
37,0	2,70	1,18	3,40
37,5	3,29	1,77	3,82
38,0	3,97	2,50	4,42
38,5	4,60	3,00	4,86
39,0	5,16	4,01	5,52
39,5	5,60	4,61	5,97
40,0	6,32	4,98	6,52
40,5	6,73	5,59	7,00
41,0	6,95	6,14	7,40
41,5	7,58	6,49	7,76
42,0	7,63	7,11	8,09
42,5	8,26	7,20	8,48

43,0	8,59	7,73	8,75
43,5	8,82	8,16	9,03
44,0	9,05	8,12	9,25
44,5	9,36	8,48	9,48
45,0	9,72	8,78	9,87
45,5	9,91	8,96	9,92
46,0	10,04	9,34	10,18
46,5	10,23	9,40	10,33
47,0	10,52	9,81	10,63
47,5	10,66	10,09	10,66
48,0	10,72	10,16	10,81
48,5	10,84	10,24	10,92
49,0	11,04	10,37	11,13
49,5	11,08	10,43	11,14
50,0	11,29	10,74	11,27
50,5	11,33	10,66	11,41
51,0	11,35	11,01	11,38
51,5	11,41	11,17	11,45
52,0	11,49	11,07	11,63
52,5	11,68	11,24	11,80
53,0	11,80	11,41	11,95
53,5	11,80	11,31	11,76
54,0	11,91	11,56	11,86
54,5	11,90	11,60	11,83
55,0	12,04	11,82	11,96
55,5	12,04	11,80	11,96
56,0	12,04	11,82	12,05
56,5	12,13	11,89	11,98
57,0	12,12	11,76	12,13
57,5	12,22	11,98	12,17
58,0	12,29	11,99	12,27
58,5	12,28	11,86	12,27
59,0	12,30	12,11	12,20
59,5	12,32	11,82	12,25
60,0	12,33	12,10	12,27
60,5	12,34	11,98	12,25
61,0	12,30	11,98	12,42
61,5	12,41	12,17	12,30
62,0	12,41	12,20	12,33
62,5	12,41	12,22	12,22
63,0	12,49	12,35	12,35
63,5	12,34	12,14	12,14

RUN 4			
Time (h)	DO 1 (mg/l)	DO 2 (mg/l)	DO 3 (mg/l)
10,5	1,22	0,46	2,02
11,0	2,59	1,04	2,93
11,5	3,46	1,78	3,70

12,0	3,97	2,82	4,38
12,5	4,90	3,36	5,05
13,0	5,22	4,18	5,70
13,5	6,09	4,81	6,27
14,0	6,58	5,25	6,81
14,5	7,01	5,89	7,36
15,0	7,43	6,57	7,64
15,5	7,99	7,27	8,09
16,0	8,38	7,90	8,41
16,5	8,60	8,14	8,80
17,0	9,08	8,49	9,10
17,5	9,36	9,61	9,45
18,0	9,61	9,76	9,83
18,5	9,91	10,07	9,96
19,0	10,28	10,34	10,15
19,5	10,41	10,77	10,33
20,0	10,60	11,09	10,65
20,5	10,77	11,44	10,73
21,0	11,02	11,78	10,90
21,5	11,10	11,83	11,16
22,0	11,30	12,15	11,38
22,5	11,51	12,47	11,45
23,0	11,60	12,61	11,50
23,5	11,68	12,68	11,76
24,0	11,84	12,60	11,75
24,5	11,90	12,85	11,83
25,0	12,01	13,11	12,01
25,5	12,14	13,11	12,05
26,0	12,17	13,31	12,16
26,5	12,31	13,24	12,22
27,0	12,33	13,73	12,22
27,5	12,38	13,66	12,34
28,0	12,50	14,06	12,33
28,5	12,57	13,98	12,53
29,0	12,56	14,12	12,52
29,5	12,66	14,14	12,54
30,0	12,72	14,24	12,73
30,5	12,71	14,29	12,66
31,0	12,76	14,44	12,62
31,5	12,77	14,37	12,73
32,0	12,80	14,51	12,80
32,5	12,89	14,53	12,72
33,0	12,82	14,40	12,76
33,5	12,96	14,48	12,81
34,0	12,93	14,57	12,93
34,5	12,95	14,70	13,04