



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Διπλωματική εργασία**  
***«Εκτίμηση του ρυθμού οξυγόνωσης ( $k_L a$ ) με σύστημα παραγωγής***  
***νανοφουσαλίδων»***

**Μπίσδα Αργυρώ**  
**2017**

**Εξεταστική Επιτροπή**

Καθηγητής Νικόλαος Καλογεράκης (Επιβλέπων)

Επίκουρη Καθηγήτρια Δανάη Βενιέρη

Μεταδιδακτορική ερευνήτρια Ελένη Μανουσάκη

Καθηγητής Ευάγγελος Διαμαντόπουλος (Αναπληρωτικό Μέλος)

## Ευχαριστίες

---

Πριν την παρουσίαση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους εκείνους που συνέβαλλαν ουσιαστικά στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Αρχικά στον κ. Νικόλαο Καλογεράκη, διευθυντή του Εργαστηρίου Βιοχημικής Μηχανικής & Περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας και επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη στιγμή και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα ιδιαίτερα ενδιαφέρον και πρωτότυπο και την συνολική του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Βενιέρη και την κα. Μανουσάκη που δέχτηκαν να είναι μέλη της επιτροπής αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Στη συνέχεια, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην κα. Αριάδνη Παντίδου για την συνεχή και αμέριστη βοήθεια και στήριξη της στην υλοποίηση του πειράματος και όλης της εργασίας μου.

Οι ευχαριστίες αυτές θα ήταν ελλειπείς αν δεν ευχαριστούσα όλους μου τους φίλους (δεν αναφέρω κάποιον συγκεκριμένα για να μην υπάρξουν παρεξηγήσεις) για την συμπαράσταση, την στήριξη και την δύναμη που μου έδιναν από την άρχη των σπουδών μου.

Οφείλω επίσης ένα ευχαριστώ στην οικογένεια μου, αλλά κυρίως στους γονείς μου Θανάση και Γιώτα και στον αδερφό μου Πέτρο για την στήριξη, την κατανόηση και τη συμπαράσταση σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με στόχο την εκτίμηση του ρυθμού οξυγόνωσης ( $k_{La}$ ) με σύστημα παραγωγής νανοφουσαλίδων. Αρχικά το σύστημα για την διεξαγωγή των πειραμάτων αποτελούνταν από τη συσκευή παραγωγής νανοφουσαλίδων, ένα ενυδρείο για την τοποθέτηση του νερού και της συσκευής και μία σύνδεση για την παροχή του αέρα και τη λειτουργία της συσκευής. Στη διάταξη αυτή οι πειραματικές παράμετροι που εξετάστηκαν είναι αυτές της ροής αέρα (L/min), ρυθμού περιστροφής (RPM) και του όγκου νερού (L). Επίσης μελετήθηκε η περίπτωση όπου σειρά πειραμάτων με την ίδια παροχή αέρα και όγκο νερού πραγματοποιούνταν για το σύνολο των ρυθμών περιστροφής.

Επειδή ύστερα από την ολοκλήρωση κάθε πειράματος σκοπός ήταν ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς μάζας ( $k_{La}$ ), κάθε πείραμα ακολουθούσε την παρακάτω διαδικασία. Αφού ο εξεταζόμενος όγκος νερού τοποθετούνταν στο ενυδρείο διοχετευόταν αέριο άζωτο για την μείωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) σε πολύ χαμηλό επίπεδο (κοντά στο 0%). Έπειτα επιλεγόταν η ροή αέρα και ο ρυθμός περιστροφής και η συσκευή παραγωγής νανοφουσαλίδων έμπαινε σε λειτουργία. Οι μετρήσεις του διαλυμένου οξυγόνου λαμβάνονταν κάθε 30sec.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με αλλαγή νερού, προέκυψε ότι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $k_{La}$ ) παίρνει μεγαλύτερες τιμές στην χαμηλότερη εξεταζόμενη ροή (2.5L/min) αλλά μία επίσης αξιοσημείωτη αύξηση παρατηρείται αυξάνοντας την τιμή του ρυθμού περιστροφής (RPM). Ακόμα, ο υποδιπλασιασμός του όγκου (4,5L) αποδεικνύει ότι προκαλεί μία αρκετά μεγάλη άνοδο στο  $k_{La}$  σε σχέση με τα πειράματα που ο όγκος ήταν ίσος με 9L.

Όσον αφορά τη διεξαγωγή των πειραμάτων χωρίς αλλαγή νερού από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε αντίστοιχη συμπεριφορά του συντελεστή μεταφοράς μάζας ( $k_{La}$ ) ως προς την εξεταζόμενη ροή (η βέλτιστη και σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε η μικρότερη  $F_{air}=2,5L/min$ ). Σε αντίθεση με την παραπάνω παρατήρηση οι υπόλοιπες εξεταζόμενες παράμετροι, του όγκου νερού και του ρυθμού περιστροφής, δεν έδειξαν να ακολουθούν συγκεκριμένο μοτίβο ώστε να ήταν δυνατό να εξαχθεί συγκεκριμένη παρατήρηση.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως όσον αφορά τα πειράματα χωρίς αλλαγή νερού οι χαμηλές τιμές του  $k_{La}$  σε συνδυασμό με την σταθερότητα που ακολουθούσε η διαδικασία για όλες τις δοκιμές υποδηλώνουν την παρουσία και σταθερότητα των νανοφουσαλίδων. Αυτό μπορεί να στηριχθεί στην ιδιότητα τους να δημιουργούν μορφή κελύφους, μέσω των δεσμών υδρογόνου που αναπτύσσονται στην διεπαφή αερίου-νερού, και έτσι να κρατούν τον αέρα εντός τους για αρκετό χρονικό διάστημα.

## Περιεχόμενα

---

Περίληψη .....	ii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	1
1.1 Μικρο-και νανοφυσαλίδες .....	1
1.2 Μηχανισμός σταθεροποίησης των νανοφυσαλίδων .....	5
1.3 Μέτρηση των νανοφυσαλίδων .....	6
1.4 Χρήση MNBs στο νερό και οι επιδράσεις στις ιδιότητες του .....	6
2.1: Φυσική των μικρο και νανοφυσαλίδων .....	7
2.2 Μέθοδοι για την παραγωγή MBs και NBs .....	9
2.3 Εφαρμογές των Νανοφυσαλίδων .....	11
2.3.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές .....	12
1.5 Συντελεστής μεταφοράς μάζας .....	13
1.5.1 Μεταφορά Μάζας από Αέρια σε Υγρή Φάση (Gas-Liquid Mass Transfer) .....	13
1.5.2 Συσχετίσεις για το KLa .....	16
Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία.....	19
3.1 Πειραματική διάταξη .....	19
3.2 Πειραματικές συνθήκες .....	20
Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία των μετρήσεων- αποτελέσματα .....	23
4.1 Πειράματα με όγκο 9 L.....	24
4.1.1 Πειράματα με ροή αέρα 2,5L/min και αλλαγή νερού .....	24
4.1.2 Πειράματα με ροή αέρα 2,5L/min χωρίς αλλαγή νερού .....	26
4.1.3 Πειράματα με ροή αέρα 3,5L/min και αλλαγή νερού .....	29
4.1.4 Πειράματα με ροή αέρα 3,5L/min χωρίς αλλαγή νερού .....	31
4.1.5 Πειράματα με ροή αέρα 5,0L/min και αλλαγή νερού .....	33
4.1.5 Πειράματα με ροή αέρα 5,0L/min χωρίς αλλαγή νερού .....	34
4.2 Πειράματα με όγκο 4,5 L.....	36
4.2.1 Πειράματα με ροή αέρα 2,5L/min και αλλαγή νερού .....	36

4.2.1 Πειράματα με ροή αέρα 2,5L/min χωρίς αλλαγή νερού .....	38
4.2.3 Πειράματα με ροή αέρα 3,5L/min και αλλαγή νερού .....	39
4.2.4 Πειράματα με ροή αέρα 3,5L/min χωρίς αλλαγή νερού .....	41
4.2.5 Πειράματα με ροή αέρα 5,0 L/min και αλλαγή νερού .....	43
4.2.5 Πειράματα με ροή αέρα 5,0 L/min χωρίς αλλαγή νερού .....	45
4.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	46
Κεφάλαιο 6:Συμπεράσματα .....	54
Κεφάλαιο 7:Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	56
Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία .....	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.2 .....	98

## Εικόνες

Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα των μάκρο, μικρο και νανοφουσαλίδων (Ashutosh Agarwal, 2011) .....	1
Εικόνα 2: Κατανομή του μεγέθους των μικροφουσαλίδων. (Tsuge, Micro-and Nanobubbles FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, 2014) .....	3
Εικόνα 3: Διαφοροποίηση μεγέθους μεταξύ μικροφουσαλίδων και νανοφουσαλίδων.....	4
Εικόνα 4: Παραγωγή νανοφουσαλίδων ως κατάλοιπο της κατάρρευσης μικροφουσαλίδων.Η αύξηση του ζ δυναμικού δείχνει την συσσώρευση των ιόντων κατά τη συρρίκνωση διασύνδεσης αέρα- νερού. (Tsuge, Micro-and Nanobubbles FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, 2014).....	5
Εικόνα 5: Διάγραμματα μεταβολής της διαμέτρου φουσαλίδας με το χρόνο και του ζ-δυναμικού με τη διάμετρο φουσαλίδας (Ashutosh Agarwal, 2011).....	7
Εικόνα 6: Αύξηση της εσωτερικής πίεσης του αερίου των μικροφουσαλίδων κατά τη διάρκεια της συρρίκνωσης (Ashutosh Agarwal, 2011) .....	8
Εικόνα 7: Γεννήτρια τύπου αποσυμπίεσης σε συνθήκες υπερκορεσμού (Ashutosh Agarwal, 2011) .....	9
Εικόνα 8: Γεννήτρια παραγωγής μικροφουσαλίδων (MARUI, 2010).....	10

Εικόνα 9: Γεννήτρια παραγωγής μικροφουσαλίδων με αντλία δίνης (MARUI, 2010) .....	11
Εικόνα 10: Οξυγόνωση αντιδραστήρα .....	14
Εικόνα 11: Γεννήτρια παραγωγής νανοφουσαλίδων (nanobubbler).....	19
Εικόνα 12: Πολύμετρο για τη μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) .....	20
Εικόνα 13: Πείραμα για όγκο $V=9L$ στους ρυθμούς περιστροφής 2300 και 1500RPM.....	21
Εικόνα 14: Φωτογραφίες των πειραμάτων για όγκο $V=4.5L$ στους ρυθμούς περιστροφής 2300 και 1500RPM.....	22

## Πίνακες

Πίνακας 1. Οι συνθήκες της πειραματικής διαδικασίας .....	22
Πίνακας 2. Οι τιμές του $k_{La}$ για πειραματικές συνθήκες $F_{air}=3,5L/min$ /2000RPM / $V=4,5L$ .	24
Πίνακας 3: Τιμές του $k_{La}$ για όγκο $V=9L$ και ροή αέρα $2,5L/min$ . .....	26
Πίνακας 4:Πίνακας $k_{La}$ για $V=9L$ και $F_{air}=2.5L/min$ χωρίς αλλαγή νερού. ....	28
Πίνακας 5:Συντελεστές μεταφοράς μάζας για $V=9L$ και $F_{air}=3.5L/min$ .....	30
Πίνακας 6:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=9L$ και $F_{air}=3.5L/min$ . ....	32
Πίνακας 7:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=9L$ και $F_{air}=5L/min$ . ....	34
Πίνακας 8:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=9L$ και $F_{air}=5L/min$ χωρίς αλλαγή νερού. ....	36
Πίνακας 9:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=4.5L$ και $F_{air}=2.5L/min$ . ....	37
Πίνακας 10:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=4.5L$ και $F_{air}=2.5L/min$ χωρίς αλλαγή νερού. ....	39
Πίνακας 11:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=4.5L$ και $F_{air}=3.5L/min$ . ....	41
Πίνακας 12:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=4.5L$ και $F_{air}=3.5L/min$ χωρίς αλλαγή νερού. ....	42
Πίνακας 13:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=4.5L$ και $F_{air}=5L/min$ . ....	44
Πίνακας 14:Πειραματικά $k_{La}$ για $V=4.5L$ και $F_{air}=5L/min$ χωρίς αλλαγή νερού. ....	46
Πίνακας 15:Πίνακας πειραματικών $k_{La}$ για όγκο $V=4.5L$ με και χωρίς αλλαγή νερού. ....	48
Πίνακας 16:Πίνακας πειραματικών $k_{La}$ για όγκο ίσο με $V=9L$ με και χωρίς αλλαγή νερού. .	49
Πίνακας 17:Πίνακας με τους εκθέτες που υπολογίστηκαν για τα πειραματικά δεδομένα. ...	52

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

---

Οι νανοφουσαλίδες είναι μικροσκοπικές φουσαλίδες μεγέθους  $<200\text{nm}$  , οι οποίες έχουν αποκτήσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζουν πλήθος χαρακτηριστικών που τις διαφοροποιούν από τις συνήθεις μακροφουσαλίδες όπως η στασιμότητα στην υγρή φάση, η αυξημένη διαλυτότητα των αερίων σε υγρά και η υψηλή ειδική τους περιοχή που τις καθιστούν αρκετά ενδιαφέρουσες για περαιτέρω μελέτη. Εξαιτίας αυτών των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, η έρευνα πάνω στον τομέα έχει παρουσιάσει μεγάλη άνοδο και έχει δείξει πλήθος ενθαρρυντικών εφαρμογών. Οι νανοφουσαλίδες εφαρμόζονται στην γρηγορότερη ανάπτυξη των φυτών, στην απομάκρυνση ιών από ζώα , στην ιατρική για την μεταφορά γονιδίου αλλά και στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και ως μέθοδος απολύμανσης μολυσμένου νερού. Ωστόσο, πολλά ερωτήματα σχετικά με την σταθεροποίηση και την παραμονή του “εγκλωβισμένου” αέρα μέσα στην νανοφουσαλίδα παραμένουν αναπάντητα.

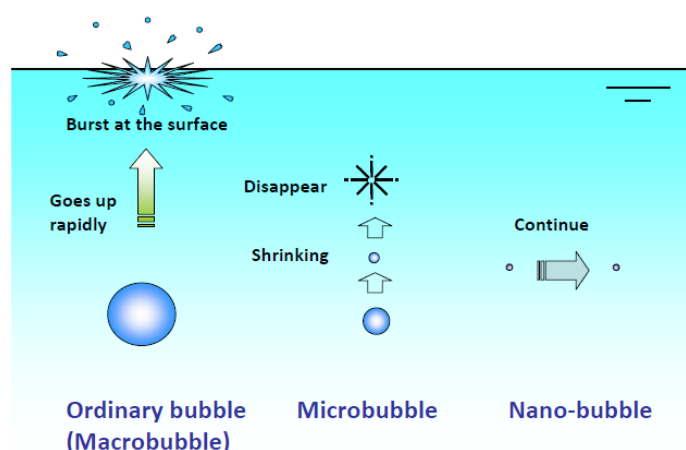
Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά την εκτίμηση του ρυθμού οξυγόνωσης ( $k_{ia}$ ) με τη βοήθεια συστήματος παραγωγής νανοφουσαλίδων. Ο ρυθμός οξυγόνωσης ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες που επιλέχθηκαν να εξεταστούν και ήταν η ροή αέρα, ο ρυθμός περιστροφής του συστήματος παραγωγής νανοφουσαλίδων και ο όγκος νερού παρουσιάζει μεταβολές ιδιαίτερα στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για αρκετές δοκιμές χωρίς να γίνει αλλαγή του όγκου νερού. Πρέπει να τονιστεί βέβαια ότι ένας βασικός παράγοντας είναι η συσκευή παραγωγής νανοφουσαλίδων που χρησιμοποιήθηκε διότι οι συνθήκες που δείχνουν την βέλτιστη συμπεριφορά του ρυθμού οξυγόνωσης πιθανότατα να είναι τελείως διαφορετικές σε μία άλλη συσκευή. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι πολλά από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων δεν μπορούν να συγκριθούν με αντίστοιχα παλαιότερων μελετών διότι το συγκεκριμένο θέμα δεν έχει εξεταστεί ξανά γι’ αυτό και παρουσιάστηκαν δυσκολίες στην εξήγηση τους λόγω της έλλειψης βιβλιογραφίας.

## Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 1.1 Μικρο-και νανοφυσαλίδες

Οι φυσαλίδες είναι φορείς του αέρα που περιβάλλεται από νερό οι οποίες ανεβαίνουν στην επιφάνεια του νερού και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Αυτές οι φυσαλίδες είναι αρκετά γνωστές και οικείες σε όλους, αλλά πρόσφατα έγινε πιο ξεκάθαρο ότι οι μικρότερες φυσαλίδες έχουν μία δυνατότητα για πλήθος νέων εφαρμογών που θα έχουν μεγάλη επιρροή στην καθημερινή ζωή, καθώς και για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. (Tsuge, 2014)

Οι μικρο και νανο-φυσαλίδες (MNBs= μικρο και νανοφυσαλίδες) παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που τις καθιστούν ιδιαίτερες σε σχέση με τις συνηθισμένες φυσαλίδες (μακρο-φυσαλίδες), λόγω της μειωμένου μεγέθους διαμέτρου τους. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των μικρο και νανοφυσαλίδων MNBs είναι η υψηλή ειδική τους περιοχή (επιφάνεια ανά όγκο) και η υψηλή στασιμότητα στην υγρή φάση, οι οποίες αυξάνουν την διάλυση του αερίου. Επιπλέον, αναφέρεται ότι όταν μικροφυσαλίδες κατάρρουν, συμβαίνει παραγωγή ελευθέρων ριζών, λόγω της υψηλής πυκνότητας των ιόντων στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού λίγο πριν από την κατάρρευση. Στα χαρακτηριστικά των μικρο-νάνοφυσαλίδων περιλαμβάνεται η αυξημένη διαλυτότητα των αερίων σε υγρά, μειωμένη τριβή, είτε αρνητικά ή θετικά ζ- δυναμικά και η παραγωγή ελεύθερων ριζών, οδηγώντας σε πολλές ελπιδοφόρες εφαρμογές. Μερικές από τις εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν την επεξεργασία των λυμάτων του μολυσμένου νερού με επίπλευση αέρα, μειώνοντας την τριβή των ρέοντων υγρών. (F. Y. Ushikubo et al, 2010)



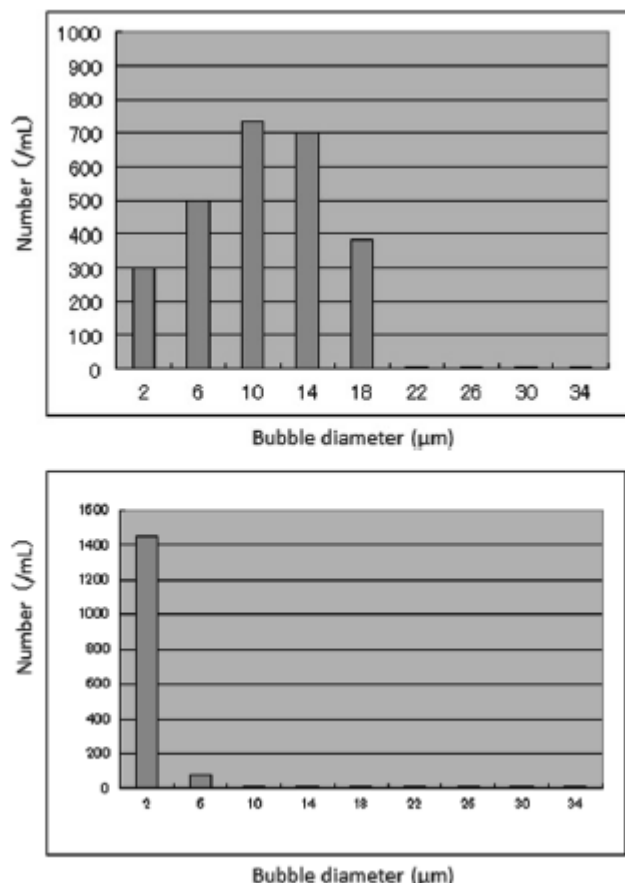
Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα των μάκρο, μικρο και νανοφυσαλίδων (Agarwal et al, 2011)

Πιο συγκεκριμένα, οι μικροφυσαλίδες είναι μικροσκοπικές φυσαλίδες με διάμετρο μικρότερη από 50μm, οι οποίες κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους προς την επιφάνεια του νερού μειώνονται σε μέγεθος και τελικά εξαφανίζονται –συρρικνώνονται κάτω από αυτήν λόγω της ταχείας διάλυσης του εσωτερικού αέρα που εγκλωβίζουν. Όσο μικρότερες



είναι οι φυσαλίδες τόσο αυξάνεται και ο ρυθμός συρρίκνωσης τους και έτσι εκείνες με διαστάσεις νανοκλίμακας εξαφανίζονται σχεδόν ακαριαία. Ωστόσο, μέσα από πειραματικές μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας σταθεροποιημένων νανοφυσαλίδων με την κατάρρευση μικροφυσαλίδων σε υδατικά διαλύματα ηλεκτρολυτών. Αυτό βοήθησε στην ανακάλυψη αρκετών εκπληκτικών ιδιοτήτων των υδατικών διαλυμάτων μετά την διασπορά των μικροφυσαλίδων στο νερό. (Tsuge,2014)

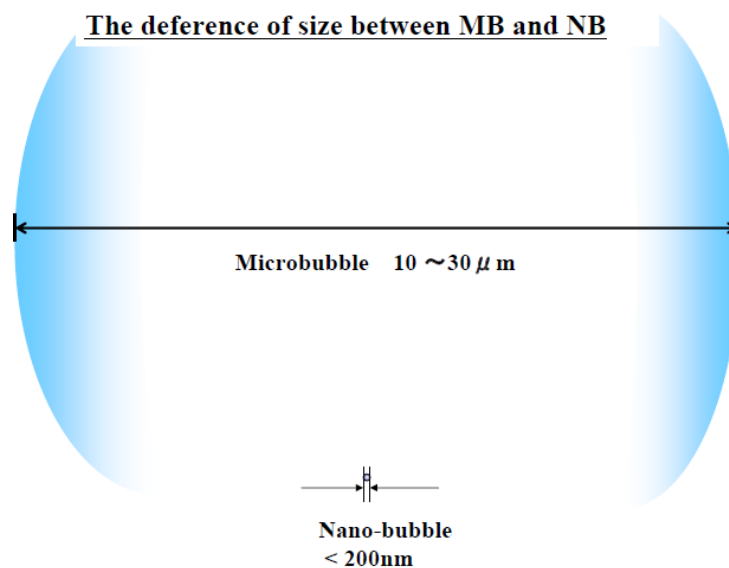
Οι μικροφυσαλίδες είχαν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στον τομέα της γεωργίας γύρω στο 2000, και τα θετικά αποτελέσματα που έφεραν έχουν γνωστοποιηθεί στην καλλιέργεια του εδάφους με ντομάτες και στην υδροπονική καλλιέργεια ριζών από αγρότες. Εντούτοις, ο μηχανισμός για την βελτίωση της παραγωγικότητας ήταν άγνωστος. Είχαν ήδη γίνει προσπάθειες για να ερμηνευθεί ο μηχανισμός που βασίζεται στις διασκορπισμένες μικροφυσαλίδες, αλλά ήταν δύσκολο να υπάρξουν άμεσα αποτελέσματα των μικροφυσαλίδων για τα σχέδια που είχαν γίνει σχετικά με αυτές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος των μικροφυσαλίδων έχουν την τάση να εξαφανίζονται χωρίς να φτάσουν στις ρίζες των φυτών. Επιπλέον, μέσω εργαστηριακών πειραμάτων με υγρό μετρητή σωματιδίων, έχει αναγνωρισθεί το σημείο ύπαρξης σταθεροποιημένων μικροσκοπικά αντικειμένων μικρότερα από την συνήθη κατανομή μεγέθους μικροφυσαλίδων. Ενώ η γεννήτρια μικροφυσαλίδων ήταν σε λειτουργία, η παρατηρούμενη κατανομή έδειξε ένα ευρύ σημείο αιχμής γύρω στα 10μm. Όμως μετά την διακοπή της γεννήτριας, κατάφεραν να αναγνωρίσουν την εμφάνιση μιας απότομης κορυφής κοντά στο κατώτερο όριο της μέτρησης των 2μm, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2, το άνω διάγραμμα δείχνει την κατανομή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της γεννήτριας μικροφυσαλίδων, και το κάτω την κατανομή μετά τη διακοπή λειτουργίας της. Αυτή η κορυφή μεγάλωνε σύμφωνα με την εξαφάνιση της κορυφής των μικροφυσαλίδων, και στην συνέχεια διατηρούνταν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα σωματίδια που αναφέρονται ως αιχμή σταθεροποιήθηκαν με χρόνο ημιζωής από μερικές ώρες ως αρκετές μέρες ανάλογα με τις συνθήκες του νερού αλλά έτειναν να εξαφανιστούν ταχέως από την λειτουργία της γεννήτριας μικροφυσαλίδων. Εξετάζοντας αυτά τα αποτελέσματα, έχουν προταθεί αρκετές ιδέες για την δημιουργία σταθεροποιημένων μικροσκοπικών φυσαλίδων (νανοφυσαλίδων) ως αποτέλεσμα της κατάρρευσης μικροφυσαλίδων. Επίσης, δεδομένου ότι η μικροσκοπική φυσαλίδα θα πρέπει να είναι ασταθής λόγω της ταχείας διάλυσης του αερίου που οφείλεται στην πίεση του εσωτερικά παγιδευμένου αέρα, απαιτούνταν περισσότερη συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με τον μηχανισμό σταθεροποίησης. Μέσω της παρατήρησης του ζήτη δυναμικού κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης των μικροφυσαλίδων, έχει αποδειχθεί ότι το ιοντικό νέφος γύρω από τη συρρίκνωση των φυσαλίδων στην διεπαφή με το περιβάλλον νερό μπορεί να συμβάλλει στην σταθεροποίηση των καταλοίπων καταστέλλοντας την διάλυση του αερίου στο περιβάλλον νερό. (Tsuge,2014)



**Εικόνα 2: Κατανομή του μεγέθους των μικροφουσαλίδων. (Tsuge,2014)**

Σε διάφορους τομείς της επιστήμης, ο όρος του nanobubble δεν είναι νέος. Ο μηχανισμός των νανοφουσαλίδων σε διεπαφές στερεού-υγρού έχει μελετηθεί χρησιμοποιώντας την τεχνική απεικόνισης της ατομικής δύναμης μικροσκοπικά. Αυτές οι φουσαλίδες είναι διστακτικά σταθεροποιημένες, και πολλοί ερευνητές προσπαθούν να αποσαφηνίσουν τον μηχανισμό σταθεροποίησης. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται συμβατικά για φουσαλίδες αέρα κάτω από 1μm, που πιθανότατα να παράγονται από ακτινοβολία υπερήχων ή έχουν συσταθεί υπό την επίδραση του επιφανειοδραστικού. Από την άλλη πλευρά, οι φουσαλίδες που παρουσιάζονται εδώ είναι μικροσκοπικές φουσαλίδες που δημιουργούνται από διασπορά μικροφουσαλίδων σε ένα υδατικό διάλυμα. Αυτές οι φουσαλίδες είναι διστακτικά σταθεροποιημένες ως χύμα νανοφουσαλίδες, αλλά οι κατοχυρωμένες με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας εφευρέσεις έχουν τη δυνατότητα για σταθεροποίηση τους πιο έντονα. Έχουν επίσης πετύχει μακροπρόθεσμη σταθερότητα με την εισαγωγή της τεχνολογίας σύμπτυξης των μικροφουσαλίδων. Η τεχνολογία των μικροφουσαλίδων έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά στον τομέα της διαχείρισης υδατικών λυμάτων όσον αφορά την παραγωγή ριζών υδροξυλίου μέσω της κατάρρευσης μικροφουσαλίδων. Βρέθηκε λοιπόν η μέθοδος της συμπίκνωσης του ιοντικού νέφους σχετικά με την διεπαφή αερίου-νερού της κατάρρευσης μικροφουσαλίδων. Η κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας εφεύρεση χρησιμοποιεί ένα φυσικό ερέθισμα για την αύξηση της ταχύτητας κατάρρευσης των μικροφουσαλίδων και

κατά συνέπεια, για τον σχηματισμό ενός άκαμπτου ιοντικού κυττάρου γύρω από την φυσαλίδα για την καταστολή της διάλυσης αερίου από την φυσαλίδα. Δύο τύποι νανοφυσαλίδων είναι τώρα διαθέσιμοι στο εμπόριο: οι νανοφυσαλίδες με οξυγόνο και οι νανοφυσαλίδες με όζον. Έχουν διαφορετικές λειτουργίες, και η έρευνα εφαρμογής βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη σε ένα πλήθος τομέων, όπως η ιατρική και η βιομηχανία τροφίμων. Οι νανοφυσαλίδες είναι αόρατες και το μικρό τους αυτό μέγεθος προκαλεί τη δυσκολία μέτρησης τους. Λαμβάνοντας υπόψη τις περαιτέρω εφαρμογές των νανοφυσαλίδων για την αξιολόγηση της μεθόδου η μέτρηση τους αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για την σωστή χρήση τους στα διάφορα πεδία. (Tsuge,2014)

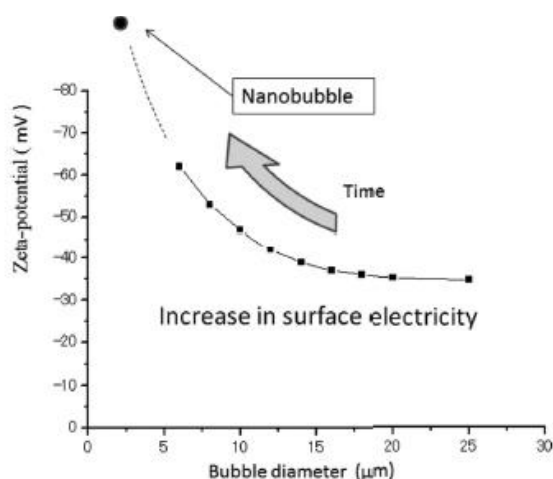


**Εικόνα 3: Διαφοροποίηση μεγέθους μεταξύ μικροφυσαλίδων και νανοφυσαλίδων.**

Πρόσφατα, η εφαρμογή της τεχνολογίας των μικρο και νανοφυσαλίδων έχει επικεντρωθεί κατά πολύ σε βιολογικές διεργασίες. Το νερό που περιέχει νανοφυσαλίδες έχει αναφερθεί ότι επιταχύνει την ανάπτυξη των φυτών και οστρακοειδών και έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στην αερόβια καλλιέργεια της ζύμης. Η παροχή μικροφυσαλίδων αέρα οδήγησε στην καλύτερη καλλιέργεια στρειδιών (*Heterocapsa circularisquama*) όσον αφορά το μέγεθος και την γεύση τους. Αντίστοιχες μελέτες έδειξαν ότι όταν τα κύτταρα κολεόπτρου κριθαριού επέπλευσαν σε νερό μετά την παραγωγή των νανοφυσαλίδων οξυγόνου, τα κυτταροπλασματικά ποσοστά ροής στο εσωτερικό των κυττάρων επιταχύνθηκαν. Επιπλέον, οι νανοφυσαλίδες μπορούν να παρέχουν ένα μηχανισμό μεταφοράς για την παράδοση φυσικού αερίου σε μια μεμβράνη ή κύτταρο και έτσι να επηρεάσουν τη δομή της μεμβράνης. Και τα δύο αποτελέσματα μεταβάλλουν σημαντικά τη λειτουργία των κυττάρων. (S. Liu et al, 2013)

## 1.2 Μηχανισμός σταθεροποίησης των νανοφουσαλίδων

Επειδή η φουσαλίδα είναι ένα σώμα αερίου περικυκλωμένο από νερό, το εσωτερικό του φυσικού αέρα βρίσκεται υπό πίεση λόγω της επιφανειακής τάσης της διεπαφής αέρα-νερού. Το εσωτερικό του φυσικού αερίου μικρότερων φουσαλίδων είναι πιο έντονα συμπιεσμένο, και μικροσκοπικές φουσαλίδες συρρικνώνονται κάτω από το νερό, λόγω της διάλυσης του αερίου. Έτσι είναι προφανές, από μία καθαρά φυσική άποψη, ότι μια μικροσκοπική φουσαλίδα με διαστάσεις νανοκλίμακας εξαφανίζεται σχεδόν ακαριαία. Αλλά τώρα γίνονται αντιληπτά τα σταθεροποιημένα nanobubbles σε υδατικά διαλύματα μετά τη διασπορά μικροφουσαλίδων. Σε αυτή τη φάση εξετάζεται η επίδραση των ιόντων γύρω από την φουσαλίδα ως μηχανισμός σταθεροποίησης. Το επιφανειακό ηλεκτρικό φορτίο είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την κατανόηση των ιδιοτήτων των μικροφουσαλίδων και νανοφουσαλίδων. Σε ένα κελί ηλεκτροφόρησης, οι μικροφουσαλίδες κινούνται προς το ηλεκτρόδιο με αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Το επιφανειακό φορτίο κάθε μικροφουσαλίδας μπορεί να προσδιοριστεί από την ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης της με την παρουσία ενός ηλεκτρικού δυναμικού και μπορεί να αξιολογηθεί με την αξία του ζήτα δυναμικού. (Tsuge,2014)



**Εικόνα 4: Παραγωγή νανοφουσαλίδων ως κατάλοιπο της κατάρρευσης μικροφουσαλίδων. Η αύξηση του ζ δυναμικού δείχνει την συσσώρευση των ιόντων κατά τη συρρίκνωση διασύνδεσης αέρα- νερού. (Tsuge,2014)**

Σε αποσταγμένο νερό, μικροφουσαλίδες είναι ηλεκτρικά φορτισμένες σε ένα ζ δυναμικό περίπου στα 35mV. Η τιμή αυτή μπορεί να μεταβληθεί σύμφωνα με τις συνθήκες του νερού. Τα προσροφημένα OH<sup>-</sup> και H<sup>+</sup> είναι παράγοντες ζωτικής σημασίας που επηρεάζουν το φορτίο διασύνδεσης αερίου- νερού: τα ιόντα ηλεκτρολύτη προσελκύονται στην διεπαφή με την ηλεκτροστατική δύναμη και παράγουν ένα διπλό ηλεκτρικό στρώμα. Τα ζ δυναμικά των μικροφουσαλίδων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες νερού είναι παρόμοια, ανεξαρτήτως του μεγέθους τους. Ως εκ τούτου, η ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου γύρω από την διεπαφή αερίου-νερού είναι ίδια ανα μονάδα επιφανείας. Ωστόσο, οι παρατηρήσεις της κατάρρευσης των μικροφουσαλίδων με την πάροδο του χρόνου έχουν δείξει ότι το ζ δυναμικό αυξάνει ανάλογα με το ποσοστό της συρρίκνωσης, το οποίο είναι το ίδιο

αντιστρόφως ανάλογο του μεγέθους των φυσαλίδων (εικόνα 4). Αυτές οι παρατηρήσεις υποδηλώνουν ότι ο ρυθμός της κίνησης των ιόντων ηλεκτρολύτη στο νερό δεν είναι επαρκώς υψηλός για να αντισταθμίσει την αύξηση του ποσοστού της συρρίκνωσης των μικροφυσαλίδων. Κατα συνέπεια, είναι πιθανό ότι ορισμένη περίσσεια ιόντων παγιδεύονται στην διεπαφή αερίου-νερού, αυξάνοντας έτσι το ζ δυναμικό κατά την διαδικασία της συρρίκνωσης.

Η επιταχυνόμενη αύξηση των ζ δυναμικών μιας μικροφυσαλίδας δείχνει την ακραία συσσώρευση των ιόντων κατά τη διάρκεια του τελικού σταδίου της διαδικασίας κατάρρευσης. Η αφαλάτωση είναι ένα γνωστό φαινόμενο στο οποίο η διαλυτότητα μιας ουσίας σε ένα ορισμένο διαλύτη μειώνεται από την παρουσία μιας δεύτερης διαλυμένης ουσίας όταν διαλύεται στον διαλυτικό μέσο. Επίσης, στην περίπτωση του συσσωρευμένου ιοντικού νέφους στην κατάρρευση της μικροφυσαλίδας, τα ιόντα του ηλεκτρολύτη αποσπών από το μόριο του αερίου από την γύρω περιοχή της φυσαλίδας και κατα συνέπεια η αέρια διάλυση κατατέλλεται έντονα. Αυτή είναι μια τωρινή εξήγηση των νανοφυσαλίδων σε υδατικά διαλύματα. (Tsuge,2014)

### 1.3 Μέτρηση των νανοφυσαλίδων

Λαμβάνοντας υπόψη την εφαρμογή των νανοφυσαλίδων σε ένα ευρύ πλαίσιο πεδίων, είναι πολύ σημαντικό να καθοριστεί η μέθοδος μέτρησης των νανοφυσαλίδων. Οι νανοφυσαλίδες που δημιουργούνται από την κατάρρευση μικροφυσαλίδων θα μπορούσαν να αναλυθούν με περίθλαση λέιζερ, ανάλογα με την κατάσταση δημιουργίας. Εάν τα σωματίδια φωτίζονται με λέιζερ, η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός κυμαίνεται σε ένα ποσοστό που εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων και τα μικρότερα σωματίδια μετακινούνται ταχύτερα. Αναλύοντας την ένταση των διακυμάνσεων, μπορεί να αξιολογηθεί η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Η κορυφή μπορεί να επιβεβαιωθεί σε επίπεδο μεταξύ των 300nm και του 1μm. Από την άλλη πλευρά, για τις φυσαλίδες που σταθεροποιούνται σε μικρότερο επίπεδο, απαιτούνται άλλες συσκευές μέτρησης όπως Δυναμική Σκέδαση Φωτός (DLS). Δυστυχώς όμως αυτές οι συσκευές μέτρησης για τα νανოსωματίδια κατά κύριο λόγο δεν μπορούν να διακρίνουν μεταξύ στερεών σωματιδίων και φυσαλίδων αερίου, έτσι ώστε να ληφθεί μία απόφαση από μια συνολική προοπτική, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο αυτές τις οπτικές μεθόδους, αλλά και τη μέτρηση άλλων φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τις νανοφυσαλίδες. (Tsuge,2014)

### 1.4 Χρήση MNBs στο νερό και οι επιδράσεις στις ιδιότητες του

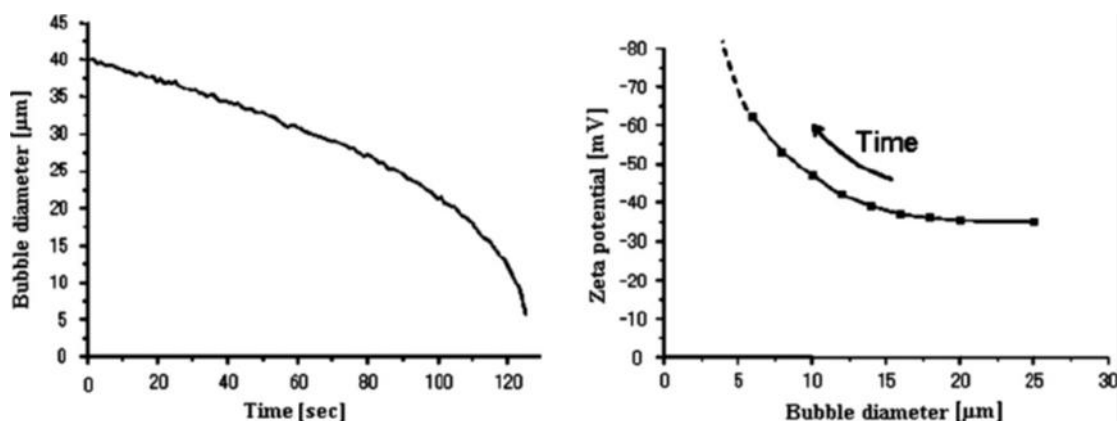
Η χρήση των MNBs σε νερό έχει αναφερθεί ότι είναι αποτελεσματική για την επιτάχυνση του μεταβολισμού σε οστρακόδερμα και λαχανικά, καθώς και σε αερόβια καλλιέργεια του ζυμομύκητα, την επιτάχυνση της ανάπτυξης και την αύξηση της απόδοσης των προϊόντων. Αυτή η αποτελεσματικότητα, ωστόσο, δεν μπορεί να εξηγηθεί μόνο από την αύξηση της

συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (DO) , με τη χρήση μικρο και νανοφουσαλίδων στο διάλυμα για την υδροπονική καλλιέργεια του μαρουλιού, παρατηρείται επιτάχυνση της ανάπτυξης σε σύγκριση με μαρούλια που καλλιεργούνται σε διάλυμα που περιέχει ίδια DO συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου αλλά χωρίς MNBs. Ως εκ τούτου, οι νανοφουσαλίδες θα μπορούσαν να παίξουν ένα σημαντικό ρόλο στην φυσιολογική δραστηριότητα των κυττάρων. (F. Y. Ushikubo et al,2010)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (DO) και ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται φαίνεται να αποτελεί ένα καθοριστικό παράγοντα όχι μόνο για την αποτελεσματικότητα των νανοφουσαλίδων αλλά και για τον τρόπο σταθεροποίησής τους. Συνεπώς αξίζει να μελετηθεί ο ρυθμός μεταφοράς μάζας από την αέρια στην υγρή φάση και να εξεταστεί κατά πόσον ο συντελεστής μεταφοράς μάζας μπορεί να επηρεαστεί από την ύπαρξη νανοφουσαλίδων ή και αντίστροφα.

## 2.1:Φυσική των μικρο και νανοφουσαλίδων

Αρχικά υπήρχε η άποψη ότι οι νανοφουσαλίδες θα μπορούσαν να έχουν υψηλή επιφανειακή τάση, έτσι το αέριο θα πρέπει να «πιεστεί έξω» της νανοφουσαλίδας μέσα σε μικροδευτερόλεπτα μετά τον σχηματισμό τους. Ωστόσο, μπορούν να σχηματίσουν νανοφουσαλίδες ελεύθερα και να παραμείνουν σταθερές για μεγάλες χρονικές περιόδους κάτω από τις σωστές συνθήκες. Η σταθερότητα των νανοφουσαλίδων προκύπτει από μια χαμηλότερη διεπιφανειακή καμπυλότητα από το αναμενόμενο λόγω της υψηλής γωνίας επαφής.(A. Agarwal et al,2011)(A. Gurung et al,2016)

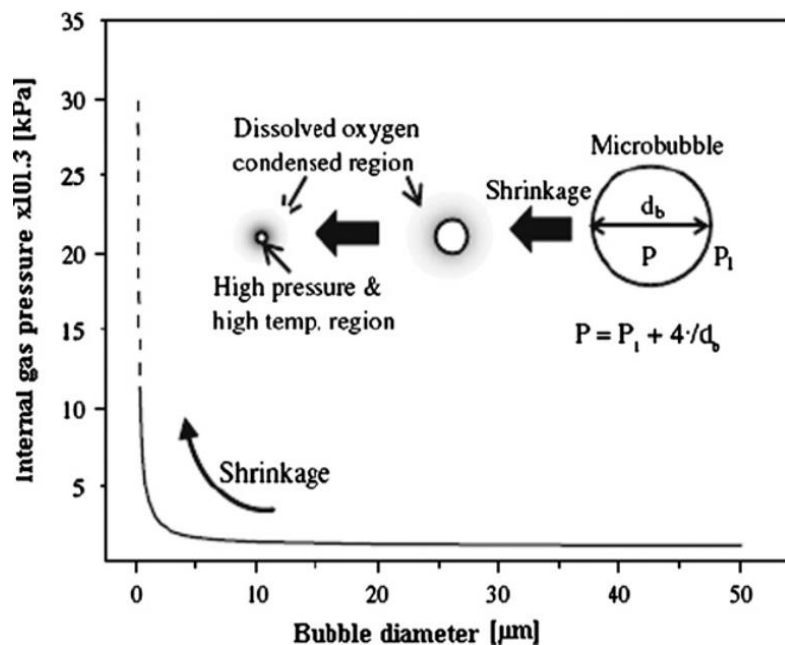


**Εικόνα 5: Διάγραμματα μεταβολής της διαμέτρου φουσαλίδας με το χρόνο και του ζ-δυναμικού με τη διάμετρο φουσαλίδας.(A. Agarwal et al,2011)**

Μείωση του μεγέθους των μικροφουσαλίδων κάτω από την επιφάνεια του νερού έχει ως αποτέλεσμα υψηλές εσωτερικές πιέσεις στο εσωτερικό των μικροφουσαλίδων, η οποία είναι ευθέως ανάλογη προς την διάμετρο της φουσαλίδας. Η σχέση μεταξύ της πίεσης και της διαμέτρου εκφράζεται από την εξίσωση Young-Laplace (Εικόνα 6)

$$P = P_I + \frac{4\sigma}{db}$$

όπου  $P$  είναι η πίεση του αερίου,  $P_l$  είναι η πίεση του υγρού, το  $\sigma$  είναι η επιφανειακή τάση του υγρού και  $d_b$  είναι η διάμετρος της φυσαλίδας. Σύμφωνα με το νόμο του Henry, η ποσότητα του διαλυμένου αερίου γύρω από μια συρρικνωμένη φυσαλίδα αυξάνει με την αύξηση της πίεσης του αερίου. (A. Agarwal et al, 2011) (A. Gurung et al, 2016)



**Εικόνα 6: Αύξηση της εσωτερικής πίεσης του αερίου των μικροφυσαλίδων κατά τη διάρκεια της συρρίκνωσης (A. Agarwal et al, 2011)**

Βρέθηκε ότι η επιφανειακή τάση και η τάση ατμών ήταν σταθερή ανεξάρτητα από το μέγεθος της φούσκας. Έτσι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι προϋπόθεση για την διατήρηση της σταθεροποίησης της νανοφυσαλίδας είναι ότι η υγρή φάση θα πρέπει να είναι κάτω από ένα μεγάλο κενό ή υψηλή τάση εφελκυσμού. Επομένως, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, οι νανοφυσαλίδες δεν θα πρέπει να είναι σε κατάσταση ισορροπίας σε ατμοσφαιρική πίεση λόγω της υψηλής τους εσωτερικής πίεσης. (F. Y. Ushikubo et al, 2010)

Ωστόσο, η ισχύς της Εξίσωσης για νανο-φυσαλίδες δεν έχει ομοφωνία στη βιβλιογραφία. Μπορεί να μην εφαρμόζεται θεωρώντας μια σταθερή επιφανειακή τάση του υγρού, αφού η επιφανειακή τάση επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την καμπυλότητα της διεπαφής και την εσωτερική πίεση του αερίου σε κλίμακα nano. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε θεωρητικά ότι η επιφανειακή τάση σε σταγόνες πρέπει να μειωθεί σημαντικά σε μικρά μεγέθη. Δηλαδή, η επιφανειακή τάση αλλάζει με την καμπυλότητα στην διεπιφάνεια αερίου-υγρού. Μια χαμηλότερη ένταση επιφάνειας στη διεπαφή της νανο-φυσαλίδας θα έχει ως αποτέλεσμα μία χαμηλότερη εσωτερική πίεση, η οποία θα μπορούσε να συμβάλλει στη σταθεροποίηση των φυσαλίδων. (F. Y. Ushikubo et al, 2010)

Επιπλέον, το αρνητικό ζ-δυναμικό είχε σχέση με το δίκτυο του δεσμού υδρογόνου στην διεπιφάνεια αερίου-υγρού που έχει μια διαφορετική δομή από εκείνη του χύδην νερού. Η μεταβολή του δεσμού υδρογόνου στο οποίο έχει αναφερθεί ότι ένας "σκληρός

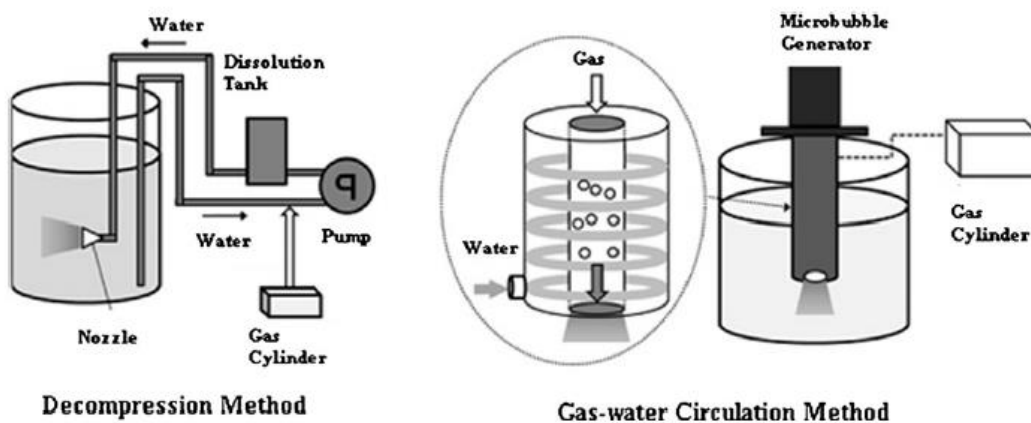


δεσμός υδρογόνου"στην διεπιφάνεια αερίου-υγρού, ανιχνεύεται από την υπέρυθρη φασματοσκοπία. Η αλλαγή στη δομή του νερού στη διασύνδεση θα μπορούσε να είναι μια υπόδειξη για να εξηγήσει τη σταθεροποίηση των νανοφουσαλίδων.(F. Y. Ushikubo et al,2010)

## 2.2 Μέθοδοι για την παραγωγή MBs και NBs

Ο σχηματισμός, η ανάπτυξη και η κατάρρευση των μικροφουσαλίδων σε διάλυμα συχνά αναφέρεται ως σπηλαίωση. Με βάση τον τρόπο της παραγωγής, η σπηλαίωση σε γενικές γραμμές κατατάσσεται σε τέσσερις κατηγορίες, δηλαδή ακουστική, υδροδυναμική, οπτική και σπηλαίωση σωματιδίων. Η σπηλαίωση που προκαλείται από το πέρασμα των υπερηχητικών κυμάτων λεγόμενη ακουστική σπηλαίωση, ενώ σπηλαίωση λόγω των διακυμάνσεων της πίεσης στο υγρό που ρέει είναι όπως ονομάζεται υδροδυναμική σπηλαίωση. Ακουστική και υδροδυναμική σπηλαίωση μπορεί να οδηγήσει στις επιθυμητές φυσικές και χημικές μεταβολές σε ένα διάλυμα, αλλά η οπτική και η σπηλαίωση σωματιδίων είναι ανίκανες να επιφέρουν κάποια αλλαγή στην πρακτική λύση.(A. Agarwal et al,2011)

Σήμερα, λίγες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή μικρο και νανοφουσαλίδων. Οι δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι βασίζονται στην αποσυμπίεση και την κυκλοφορία φυσικού αερίου-νερού(Εικόνα 7).Για την γεννήτρια τύπου αποσυμπίεσης,συνθήκες υπερκορεσμού για τη διάλυση του φυσικού αερίου δημιουργήθηκαν σε υψηλή πίεση στα 304-405 kPa.



**Εικόνα 7: Γεννήτρια τύπου αποσυμπίεσης και με κυκλοφορία φυσικού αερίου-νερού. (A. Agarwal et al,2011)**

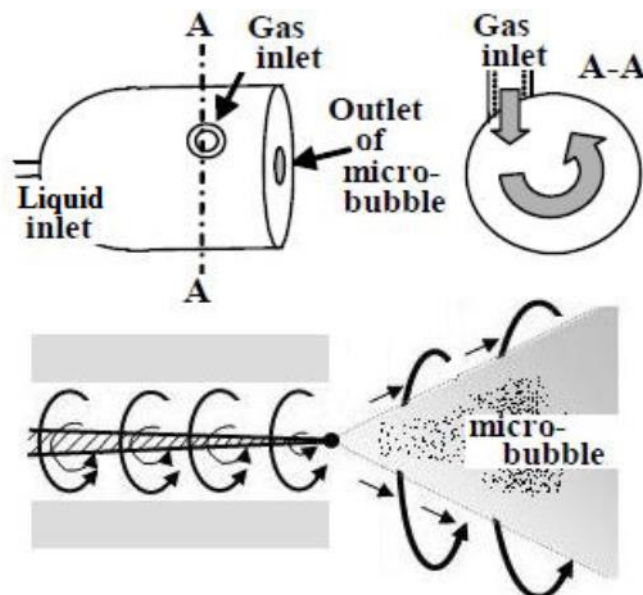
Σε τέτοια υψηλή πίεση, το υπερκορεσμένο αέριο είναι εξαιρετικά ασταθές και τελικά δραπετεύει έξω από το νερό. Σαν αποτέλεσμα, μεγάλος αριθμός των μικροφουσαλίδων θα μπορούσαν να δημιουργηθούν αμέσως. Ωστόσο, για την φυσικού αερίου-νερού γεννήτρια τύπου κυκλοφορίας,το αέριο εισάγεται στο στρόβιλο νερού, και φουσαλίδες αερίου στη συνέχεια αναλύονται σε μικροφουσαλίδες με το χωρισμό της δίνης. Η παραγωγή των μικροφουσαλίδων όζοντος μέσω αποσυμπίεσης έχει βρεθεί να είναι πιο αποτελεσματική



από ό, τι μέσω της κυκλοφορίας του φυσικού αερίου-νερού.(A. Agarwal et al,2011)(A. Gurung et al,2016)

Εκτός από τη χρήση αερίου αποσυμπίεσης και νερού κυκλοφορίας ως μεθόδους για την παραγωγή μικροφουσαλίδων, ηλεκτρόδιο παλλαδίου συζευγμένο με υπερήχους έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή νανοφουσαλίδων με μία μέση διάμετρο 300-500 nm. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η παραγωγή των μονοδιασπαρμένων μικροφουσαλίδων και νανοφουσαλίδων χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μεθόδους εξακολουθούν να παραμένουν μια σημαντική πρόκληση.(A. Agarwal et al,2011) (A. Gurung et al,2016)

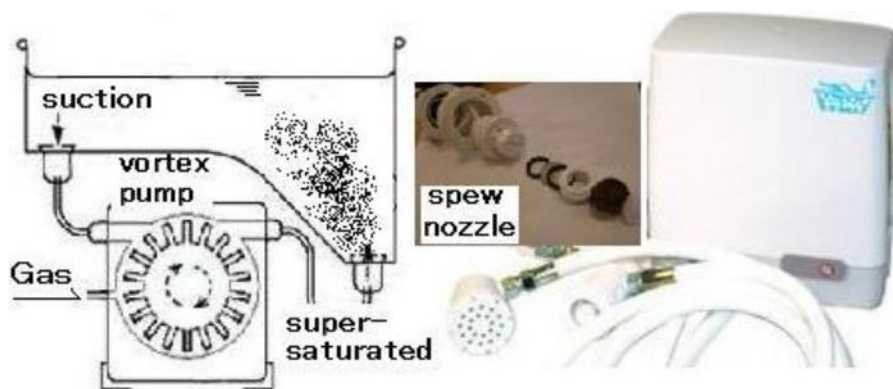
Μερικές ακόμα μέθοδοι παραγωγής φουσαλίδων στο νερό που πρέπει να αναφερθούν είναι η παροχή αερίου μέσω μικρών πόρων και η διάτμηση αερίου με περιστρεφόμενες λεπίδες. Ωστόσο, είναι δύσκολο να δημιουργηθούν μικροφουσαλίδες μικρότερες από 50  $\mu\text{m}$  σε διάμετρο



**Εικόνα 8: Γεννήτρια παραγωγής μικροφουσαλίδων (MARUI, 2010)**

αποτελεσματικά. Μία αποτελεσματική γεννήτρια μικροφουσαλίδων φαίνεται στην εικόνα 8, στην οποία το υγρό εισάγεται στη συσκευή με μια αντλία σπειροειδώς κατά μήκος του τοίχου, όπου προκαλείται η φυγόκεντρος δύναμη από την κυκλοφορία εισάγει αέριο από την εισόδου αερίου και μία δίνη αερίου σχηματίζεται κατά μήκος του κεντρικού άξονα. Το σώμα του φυσικού αερίου διαχωρίζεται σε λεπτές φουσαλίδες στην έξοδο για το σχηματισμό μικροφουσαλίδων. (MARUI, 2010)

Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεσματικής γεννήτριας φαίνεται στο σχήμα 9, όπου το φυσικό αέριο εισάγεται από την εισόδου αερίου εντός της κυκλοφορίας του υγρού στο εσωτερικό της αντλίας δίνης, και διαλύεται σε υπερκορεσμένο επίπεδο από μια υψηλή πίεση που προκαλείται στο διασπείρουν-ακροφύσιο. Οι μικροφουσαλίδες που παράγονται από τον υπερκορεσμό αερίου-υγρού από τη μείωση της πίεσης κατά την εκτός του ακροφυσίου ενισχύονται με τον στροβιλισμό και προκαλούνται επίσης στην εκροή-ακροφυσίου. (MARUI, 2010)



Εικόνα 9: Γεννήτρια παραγωγής μικροφουσαλίδων με αντλία δίνης (MARUI, 2010)

## 2.3 Εφαρμογές των Νανοφουσαλίδων

- **1. Μεταφορά γονιδίου** - Νανοφουσαλίδες μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως ένα αποτελεσματικό μέσο διανομής γονιδίων χωρίς τη χρήση ιών. Όταν οι νανοφουσαλίδες υποβάλλονται σε επεξεργασία με υπερήχους, είναι σε θέση να ταλαντεύονται και συντονίζονται σε διάφορες συχνότητες. Αυτή η ιδιότητα του συντονισμού των νανοφουσαλίδων μπορεί να εφαρμοστεί στον τομέα της παροχής γονιδίου. Λόγω του μικρού μεγέθους, η νανοφουσαλίδα που φέρει το γονίδιο που μας ενδιαφέρει μπορεί να υποβληθεί σε εξαγγείωση από τα αιμοφόρα αγγεία. Η εξαγγείωση επιτρέπει στις νανοφουσαλίδες να εισέλθουν ελεύθερα στον περιβάλλοντα ιστό, και να παραδώσουν το γονίδιο που μεταφέρεται από αυτές με ένα εξαιρετικά συγκεκριμένο τρόπο, χωρίς καμία εισβολή.
- **2. Χορήγηση φαρμάκων στα καρκινικά κύτταρα** – plasmonic νανοφουσαλίδες είναι εκείνες που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες λόγω της έκθεσης σε ακτινοβολία παλμού λέιζερ. Ως αποτέλεσμα, ένα λεπτό στρώμα εξερωμένου υγρού σχηματίζεται στην επιφάνεια του κυττάρου.

Οι χρυσές νανοφουσαλίδες χρησιμοποιούνται για τον σκοπό της παροχής φαρμάκων μέσα καρκινικά κύτταρα. Τα χημειοθεραπευτικά φάρμακα ενσωματώνονται μέσα σε αυτές τις νανοφουσαλίδες. Για τα χημειοθεραπευτικά φάρμακα που απαιτούνται να χορηγηθούν για τη θεραπεία του καρκίνου, αυτές οι νανοφουσαλίδες μπορούν να εισαχθούν στο εσωτερικό του όγκου με τη βοήθεια του λέιζερ. Οι μεμβράνες όγκων ανοίγουν, και οι νανοφουσαλίδες απορροφούνται. Τα χημειοθεραπευτικά φάρμακα στη συνέχεια απελευθερώνεται στο εσωτερικό του όγκου.

- **3. Πρόληψη της ασφυξίας** - Οι ασθενείς που πάσχουν από αναπνευστικά προβλήματα ή, εκείνα τα άτομα που πάσχουν από χαμηλά επίπεδα οξυγόνου μπορεί να αντιμετωπίσουν την κατάσταση αυτή με τη χρήση νανοφουσαλίδων οξυγόνου που εγχέονται απ'ευθείας στην κυκλοφορία του αίματος. Αυτή η μέθοδος της άμεσης εισαγωγής οξυγόνου παρακάμπτει την αναπνοή, και μπορούν να

χορηγηθούν σε επείγουσες ιατρικές καταστάσεις, όπως το εγκεφαλικό επεισόδιο, εγκεφαλική αιμορραγία, ή καρδιακή προσβολή.

- **4. Επεξεργασία λυμάτων** - Νανοφουσαλίδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα αποτελεσματικό μέσο για τη θεραπεία των λυμάτων.

Εργασίας ενός εργοστασίου λυμάτων νανοφουσαλίδων

- Η παροχή λυμάτων εισάγεται σε μια δεξαμενή που περιέχει νανοφουσαλίδες.
- Αυτό το μίγμα νανοφουσαλίδων που περιέχει και στη συνέχεια εισάγεται μέσα στη δεξαμενή ανάμιξης η οποία περιέχει ιλύ πλούσια σε μικροοργανισμούς.
- Οι μικροοργανισμοί που υπάρχουν στην ιλύ ενεργοποιούνται από τα nanobubbles, αρχίζοντας έτσι μια διαδικασία επεξεργασίας τριών σταδίων :
- Βιολογική επεξεργασία - Ενεργοί μικροοργανισμοί που υπάρχουν στην ιλύ αποσυντίθενται τη βιολογική αποικοδόμηση αποβλήτων που υπάρχουν στα λύματα.
- Χημική επεξεργασία – Αυτά τα βιολογικώς επεξεργασμένα λύματα στη συνέχεια υποβάλλεται σε αντίδραση οξείδωσης στην δεξαμενή οξείδωσης επαφής. Με την παρουσία των ριζών υδροξυλίου (OH<sup>-</sup>), υπεροξείδιο, όζον κ.λπ., χημικές οργανικές ακαθαρσίες, τα βαρέα μέταλλα, κλπ αναλύονται. Το τελικό προϊόν αυτής της χημικής επεξεργασίας είναι ο σχηματισμός του νερού.
- Φυσική αγωγή – Αυτά τα χημικώς επεξεργασμένα λύματα εισάγονται σε ένα κάρβουνο που περιέχει δεξαμενή προσρόφησης η οποία αφαιρεί τα υπόλοιπα στερεών ακαθαρσιών μέσα από τη διαδικασία της προσρόφησης.
- **5. Απομάκρυνση των ιών από τα στρείδια** – Οι νανοφουσαλίδες όζοντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο για την απομάκρυνση του ιού από τα στρείδια. Ο Norovirus είναι ένας ιός που μολύνει τα στρείδια. Απελευθερώνει μια τοξίνη η οποία οδηγεί σε αποχρωματισμό, αποκρουστική μυρωδιά, και κάνει τα στρείδια ακατάλληλα για κατανάλωση. Τα στρείδια που έχουν μολυνθεί από norovirus μπορούν να εμποτιστούν με νανοφουσαλίδες όζοντος, και ο ιός μπορεί να εξαλειφθεί. (Divya Narayan, 2014)

### 2.3.1 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Στον περιβαλλοντικό τομέα η διάδοση των νανοφουσαλίδων είναι ραγδαία με την απολύμανση να αποτελεί έναν βασικό τομέα χρήσης τους όπως αναλύεται και παρακάτω.

#### Water disinfection-Απολύμανση του νερού

Η παραγωγή των υψηλής δραστηριότητας ελευθέρων ριζών και των αναταράξεων που συνδέονται με τις υπό κατάρρευση μικροφουσαλίδες παρέχει μεγάλες δυνατότητες για την απολύμανση του νερού. Η υδροδυναμική σπηλαίωση έχει αποδειχθεί ότι είναι μία πολύ αποδοτική τεχνική για την απολύμανση του νερού, σε σύγκριση με την ακουστική σπηλαίωση. Ωστόσο, η μελέτη εργαστηριακής κλίμακας δείχνει ότι το κόστος της

υδροδυναμικής σπηλαίωσης για την απολύμανση του νερού εξακολουθεί να είναι υψηλότερο από τις συμβατικές μεθόδους της χλωρίωσης και του οζονισμού.

Η επίδραση των μικροφυσαλίδων όζοντος στην *Escherichia coli* διερευνήθηκαν κάτω από διάφορες συνθήκες. Έχει βρεθεί ότι η ταχύτερη κινητική απολύμανσης της *E. coli* με μικροφυσαλίδες όζοντος παρατηρήθηκε, πως οδηγεί σε μειωμένο μέγεθος του αντιδραστήρα και μικρή δόση όζοντος σε σύγκριση με τη συμβατική απολύμανση με όζον για την ίδια την αποτελεσματικότητα της απολύμανσης αδρανοποίησης της. Σε αυτή τη διαδικασία οι ρίζες  $\text{OH}^-$  και τα κρουστικά κύματα που δημιουργούνται από την κατάρρευση των μικροφυσαλίδων έχουν θεωρηθεί ως η κύρια αιτία για την αδρανοποίηση των κολοβακτηριδίων, ενώ η ειδική συμβολή του κάθε αποτελέσματος προς αδρανοποίηση των κολοβακτηριδίων εξακολουθεί να παραμένει άγνωστη. Επιπλέον, η υψηλή απενεργοποίηση της αποτελεσματικότητας της *E. coli* έχει επίσης επιτευχθεί στην απολύμανση του νερού από μικροφυσαλίδες που παράγονται μέσω της υδροδυναμικής σπηλαίωσης. (A. Agarwal et al, 2011) (A. Gurung et al, 2016)

## 2.4 Συντελεστής μεταφοράς μάζας

### 2.4.1 Μεταφορά Μάζας από Αέρια σε Υγρή Φάση (Gas-Liquid Mass Transfer)

Όταν σε μία από τις δύο φάσεις (π.χ. την υγρή) έχουμε κατανάλωση του  $\text{O}_2$ , και επομένως, η συγκέντρωση είναι χαμηλότερη από αυτή του  $\text{CO}_2$ , τότε έχουμε μεταφορά μάζας από την άλλη φάση (δηλαδή από την αέρια φάση στην υγρή).

Ο ρυθμός μεταφορά μάζας ανά μονάδα επιφάνειας (flux,  $J_{\text{O}_2}$ ) μεταξύ δύο φάσεων μπορεί να υπολογιστεί από τη θεωρία των δύο στρωμάτων (two film theory). Δεδομένου ότι δεν υπάρχει συσσώρευση  $\text{O}_2$  στα στρώματα έχουμε:

$$J_{\text{O}_2} = K_g(p_{\text{O}_2} - p_{i\text{O}_2}) = k_L(c_{\text{O}_2}^i - c_{\text{O}_2})$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση ισορροπίας στη διεπιφάνεια,

$$p_{\text{O}_2}^i = H * c_{\text{O}_2}^i$$

$$J_{\text{O}_2} = \frac{\left(\frac{p_{\text{O}_2} - c_{\text{O}_2}}{H}\right)}{\left(\frac{1}{H k_g} + \frac{1}{k_L}\right)} \rightarrow$$

Καταλήγουμε στη σχέση:

$$J_{\text{O}_2} = k_L(c_{\text{O}_2}^* - c_{\text{O}_2}) \quad \text{ή}$$

$$J_{\text{O}_2} = k_g(p_{\text{O}_2} - p_{\text{O}_2}^*)$$

όπου,

$c_{O_2}^*$  = η συγκέντρωση  $O_2$  στην υγρή φάση που βρίσκεται σε ισορροπία με την αέρια φάση

$c_{O_2}$  = η συγκέντρωση του  $O_2$  στην υγρή φάση και  $K_L$ ,  $K_g$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{H k_g} + \frac{1}{k_L}.$$

Πολύ συχνά( σχεδόν πάντα στην περίπτωση των αντιδραστήρων) η αντίσταση στη μεταφορά μάζας στην αέρια φάση σχετικά με αυτή στη υγρή φάση (  $p_{O_2}^i \approx p_{O_2}$ ), επομένως

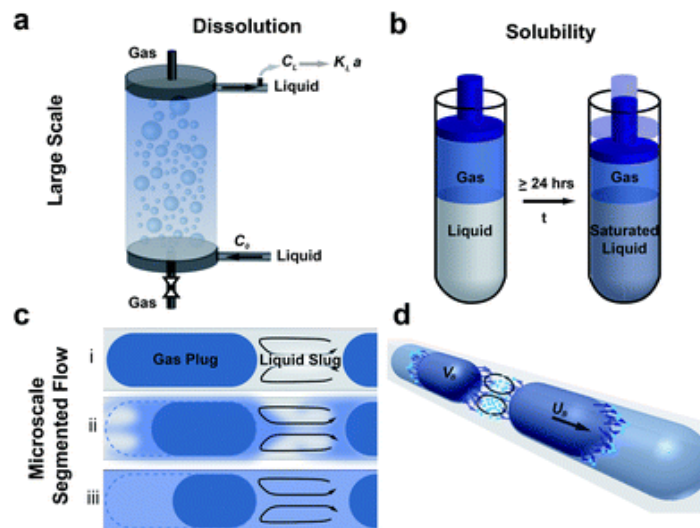
$$K_L \approx k_L$$

$$J_{O_2} = k_L (c_{O_2}^* - c_{O_2})$$

Το  $J_{O_2}$  έχει μονάδες  $[mg/(m^2 * h)]$  ή  $[mmol/(m^2 * h)]$  , δηλαδή, ρυθμός μεταφοράς ανά μονάδα διεπιφάνειας.

Οξυγόνωση Βιοαντιδραστήρων(Gas-Liquid Mass Transfer ):

Η οξυγόνωση ενός βιοαντιδραστήρα (Gas-Liquid Mass Transfer) γίνεται συνήθως με την παροχή αέρος που περνά μέσα από την υγρή φάση με τη μορφή φυσαλίδων.



**Εικόνα 10: Οξυγόνωση αντιδραστήρα**

Εκτός από την περίπτωση ανάπτυξης pellet-growth μυκήτων ή ακινητοποιημένων κυττάρων (immobilized cells), η αντίσταση στη μεταφορά διαλυμένου οξυγόνου μέσω του υγρού σώματος γύρω από το κύτταρο (liquid film around the cells) από την υγρή φάση στη μεμβράνη του κυττάρου είναι αμελητέα. Επομένως, το ισοζύγιο μάζας για το διαλυμένο οξυγόνο στην υγρή φάση είναι:

$$\frac{d(Vc_{O_2})}{dt} = k_L A_T (c^* - c_{O_2}) + r_{O_2} * V$$

$$\frac{d(Vc_{O_2})}{dt} = k_L \left( \frac{A_T}{V} \right) (c^* - c_{O_2}) - q_{O_2} x$$

όπου,

$q_{O_2}$  : [ mg-  $O_2$  / (g-cells \* h) ] = ο ειδικός ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου

$A_T$ : το συνολικό εμβαδόν της διεπιφάνειας αέριας/υγρής φάσης

Το εμβαδόν επιφάνειας ανά μονάδα όγκου( surface area per unit volume) είναι μία πολύ χρήσιμη λειτουργική παράμετρος που ορίζεται ως:

$$a = \frac{A_T}{V}, \text{ με μονάδες } [m^{-1}] \text{ ή } [m^2/m^3]$$

Προφανώς, το  $a$  εξαρτάται από τον αριθμό και τη διάμετρο των φυσαλίδων που δημιουργούνται στο βιοαντιδραστήρα και από την ένταση της ανάδευσης που έχουμε. Το ισοζύγιο μάζας για το οξυγόνο γίνεται:

$$\frac{d(c_{O_2})}{dt} = k_L a (c^* - c_{O_2}) - q_{O_2} x$$

Η δυναμική συμπεριφορά του  $CO_2$  είναι πολύ ταχύτερη σε σχέση με τον αριθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών. Επομένως, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός βιοαντιδραστήρα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είμαστε σε ψευδό-μόνιμη κατάσταση (QSS) ως προς τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου:

$$\frac{d(c_{O_2})}{dt} = 0 \Rightarrow OUR = q_{O_2} x = k_L a (c^* - c_{O_2})$$

όπου  $OUR$  [mmol- $O_2$ / (g-dw-cells\*h)] είναι ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου. Ο ειδικός ρυθμός κατανάλωσης  $Q_{O_2}$  , εξαρτάται προφανώς από το είδος του αερόβιου μικροοργανισμού καθώς επίσης και από τις συνθήκες καλλιέργειας.

Η μέθοδος του δυναμικού Αερισμού (gassing-in method):

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε τον βιοαντιδραστήρα γεμάτο με νερό ή διάλυμα θρεπτικών ουσιών(περιοριστικό υπόστρωμα και άλλες θρεπτικές ουσίες συμπεριλαμβανομένων και των αλάτων). Δεν υπάρχουν ζωντανά κύτταρα στο διάλυμα. Γι' αυτό το λόγο πολύ συχνά ερευνητές χρησιμοποιούν σωματίδια από αδρανή υλικά που έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα ζωντανά κύτταρα( μέγεθος και ειδικό βάρος ).

Ξεκινώντας από μία χαμηλή τιμή του διαλυμένου οξυγόνου( όχι αναγκαστικά μηδέν), αρχίζει η παροχή αέρος και έχουμε σταδιακή αύξηση του διαλυμένου οξυγόνου το οποίο μπορούμε να μετράμε πολύ εύκολα(D.O. probe). Από το ισοζύγιο μάζας (με  $x=0$ ) έχουμε:

$$\frac{d(c_{O_2})}{dt} = k_L a (c^* - c_{O_2})$$

$$\frac{d(c^* - c_{O_2})}{dt} = -k_L a (c^* - c_{O_2})$$

$$\frac{d(c^* - c_{O_2})}{(c^* - c_{O_2})} = -k_L a dt$$

$$\frac{(c^* - c_{O_2})_t}{(c^* - c_{O_2})_0} = e^{-(k_L a)t}$$

$$\ln(c^* - c_{O_2}(t)) = -(k_L a)t + \ln(c^* - c_{O_2}(0))$$

Επομένως από το γράφημα του  $\ln(c^* - c_{O_2}(t))$  ως προς το χρόνο  $t$ , υπολογίζεται άμεσα το “ $k_L a$ ”.

Είναι αρκετά ενδιαφέρον το γεγονός ότι για τον υπολογισμό του  $k_L a$  δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε την αρχική συνθήκη  $c_{O_2}(0)$ . ( Ν.Καλογεράκης,2013).

## 2.4.2 Συσχετίσεις για το $K_L a$

Υπάρχουσες συσχετίσεις του συντελεστή μεταφοράς μάζας σε τροφοδοτούμενους με αέρα βιοαντιδραστήρες είναι της μορφής:

$$k_L a \approx \left(\frac{P_g}{V_R}\right)^{0.4} (u_s)^{0.5} (N)^{0.5}$$

Όπου  $P_g$  είναι η ισχύς που μεταφέρεται από τον αναδευτήρα στην υγρή φάση για αεριζόμενο βιοαντιδραστήρα,  $V_R$  είναι ο όγκος του βιοαντιδραστήρα (της υγρής φάσης),  $u_s$  είναι η φαινομενική ταχύτητα (superficial velocity) του αέρα που ορίζεται ως  $F_{air}/A_R$  όπου  $F_{air}$  είναι η ογκομετρική παροχή του αέρα και  $A_R$  το εμβαδόν της διατομής του βιοαντιδραστήρα [ $=\pi(D_R)^2/4$ ,  $D_R$  =διάμετρος αντιδραστήρα] και τέλος  $N$  είναι ο ρυθμός περιστροφής του αναδευτήρα (RPM).

Η απαιτούμενη ισχύ για τον αεριζόμενο βιοαντιδραστήρα ( $P_g$ ) υπολογίζεται από τις κάτωθι συσχετίσεις.

$$P_g \sim \left( \frac{P_U^2 N D_i^3}{F_{air}^{0.56}} \right)^{0.45}$$

Όπου  $D_i$  είναι η διάμετρος του αναδευτήρα και  $P_u$  είναι η απαιτούμενη ισχύ σε μη αεριζόμενο βιοαντιδραστήρα. Για τυρβώδεις συνθήκες, έχουμε ότι:

$$P_U \sim N^3 D_i^5$$

Το  $k_L a$  μπορεί να μετρηθεί πειραματικά με διαφορετικούς τρόπους, όπως η μέθοδος της οξυγόνωσης (gassing-in method), η μέθοδος της χημικής οξείδωσης (sulfite oxidation method) και η μέθοδος της δυναμικής οξυγόνωσης (dynamic method-respirometer approach).

Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην υγρή φάση αυξάνει με βάση την σχέση

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C^* - C_L)$$

Όπου  $C^*$  είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στην υγρή φάση σε ισορροπία με την αέρια φάση. Η τιμή του  $C^*$  μπορεί να βρεθεί από πίνακες φυσικοχημικών δεδομένων.

Από την επίλυση της ανωτέρω διαφορικής εξίσωσης έχουμε

$$\ln \frac{(C^* - C_L)}{(C^* - C_{L0})} = -k_L a (t - t_0)$$

Όπου  $C_{L0}$  είναι η τιμή του  $C_L$  την χρονική στιγμή  $t_0$ . Από την ανωτέρω εξίσωση προκύπτει ότι η τιμή του  $k_L a$  μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής στο διάγραμμα του  $\ln(C^* - C_L)$  ως προς  $t$ .

Ο αισθητήρας του διαλυμένου οξυγόνου στο εργαστήριο μας παρέχει την συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ως ποσοστό. Δηλαδή, για ένα τέλεια βαθμονομημένο όργανο, ισχύει η κάτωθι σχέση:

$$DO = \left( \frac{C_L}{C^*} \right) 100(\%)$$

Αντικαθιστώντας στην βασική μας εξίσωση έχουμε

$$\ln \left( \frac{100 - DO}{100 - DO_0} \right) = -k_L a (t - t_0)$$

και επομένως η τιμή του  $k_L a$  μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής στο διάγραμμα του  $\ln(100 - DO)$  ως προς  $t$ .



Ανάλυση αποτελεσμάτων με μη βαθμονομημένο μετρητή DO:

1. Υποθέτουμε όταν το διαλυμένο οξυγόνο είναι 0% ο μετρητής δείχνει μια τιμή διαφορετική του μηδενός και την οποία συμβολίζουμε με  $DO_{0\%}$ .
2. Υποθέτουμε όταν το διαλυμένο οξυγόνο είναι 100% ο μετρητής δείχνει μια τιμή διαφορετική του 100% και την οποία συμβολίζουμε  $DO_{100\%}$ .

Επομένως η ένδειξη του διαλυμένου οξυγόνου (DO) από τον μετρητή θα συσχετίζεται με την συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου ως εξής:

$$\frac{C_L}{C^*} = \frac{DO - DO_{0\%}}{DO_{100\%} - DO_{0\%}}$$

και συνεπώς η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μπορεί να υπολογιστεί ως

$$C_L = C^* * \left( \frac{DO - DO_{0\%}}{DO_{100\%} - DO_{0\%}} \right)$$

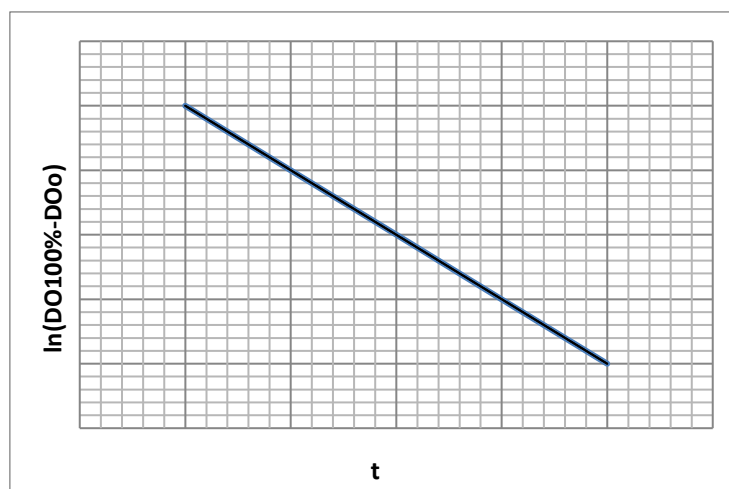
Αντικαθιστώντας στην εξίσωση

$$\ln\left(\frac{C^* - C_L}{C^* - C_{LO}}\right) = -k_L a(t - t_0)$$

Έχουμε

$$\ln\left(\frac{DO_{100\%} - DO}{DO_{100\%} - DO_0}\right) = -k_L a(t - t_0)$$

Παρατηρούμε ότι η τελευταία εξίσωση δεν είναι συνάρτηση του  $DO_{0\%}$ ! Είναι επίσης προφανές ότι η τιμή του  $k_L a$  μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας γραμμής στο διάγραμμα του  $\ln(DO_{100\%} - DO_0)$  ως προς  $t$ . (Ν.Καλογεράκης,2013).



Διάγραμμα 1:Διάγραμμα απεικόνισης του τρόπου υπολογισμού του  $k_L a$ .

## Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία

---

### 3.1 Πειραματική διάταξη

Στα πλαίσια αυτής διπλωματικής εργασίας, η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε όπως φαίνεται στην εικόνα 11, αποτελείται από γεννήτρια παραγωγής νανοφουσαλίδων (nanobubbler), ένα ενυδρείο διαστάσεων 30x30x40cm, δύο διαχυτήρες για την παροχή του αζώτου και ένα ροόμετρο για την ρύθμιση της παροχής του αέρα.



**Εικόνα 11: Γεννήτρια παραγωγής νανοφουσαλίδων (nanobubbler)**

Η μέτρηση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου πραγματοποιούνταν με πολύμετρο και ηλεκτρόδιο με αισθητήρα για τη μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου (HACH HQ30d).



**Εικόνα 12: Πολύμετρο για τη μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου (DO)**

Αρχικά επιλέγεται η απαιτούμενη ποσότητα νερού (4,5L ή 9L) για την διεξαγωγή του πειράματος η οποία προστίθεται μέσα στο ενυδρείο και έπειτα τοποθετείται μέσα σε αυτό το σύστημα των 2 διαχυτήρων για την παροχή του αέριου αζώτου. Μέσω των διαχυτήρων πραγματοποιείται παροχή αζώτου σε όλο τον όγκο του νερού που έχει επιλεγεί και διευκολύνεται η εισροή του και η γρηγορότερη απομάκρυνση του διαλυμένου οξυγόνου από την υγρή φάση. Όταν η τιμή του διαλυμένου οξυγόνου φτάσει σε αρκετά χαμηλό επίπεδο (της τάξης του 8-10%) διακόπτεται η παροχή αζώτου. Σε αυτό το σημείο εισάγεται μέσα στο ενυδρείο το όργανο δημιουργίας nanobubbles και αφού, μέσω του ροόμετρου, ρυθμιστεί η παροχή αέρα και ο ρυθμός περιστροφής (RPM) στην επιθυμητή τιμή ξεκινά η παροχή αέρα. Με τη βοήθεια του πολύμετρου, γίνεται καταγραφή του διαλυμένου οξυγόνου ανά 30 δευτερόλεπτα μέχρις ότου το ποσοστό να φτάσει περίπου στο 100%.

Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος για να πραγματοποιηθεί νέα δοκιμή απομακρύνεται το νερό από το ενυδρείο και επαναλαμβάνεται η αρχική διαδικασία. Η πειραματική διαδικασία επαναλαμβάνονταν με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω ή χωρίς την αλλαγή νερού μετά από κάθε δοκιμή πραγματοποιώντας όλες τις δοκιμές για τους διαφορετικούς ρυθμούς ανάδευσης (2300-1500 RPM) με το αρχικό νερό.

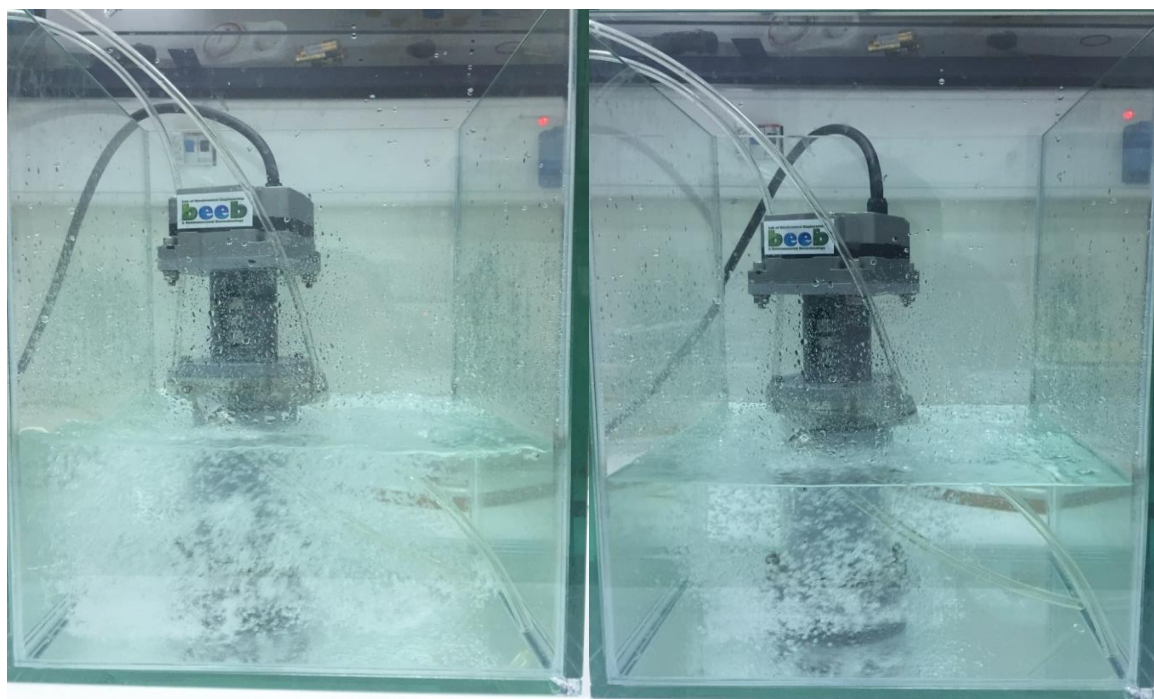
Τα αποτελέσματα της ανωτέρω διαδικασίας ταξινομούνται σε πίνακες και αφού υποστούν την κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων του DO κατασκευάζεται διάγραμμα  $\ln(100-DO)$  ως προς τον χρόνο  $t$  η κλίση του οποίου είναι ο δείκτης μεταφοράς μάζας  $KLa$  που αποτελεί και το αρχικό αποτέλεσμα για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες συγκρίσεις και να εξαχθούν αποτελέσματα.

### **3.2 Πειραματικές συνθήκες**

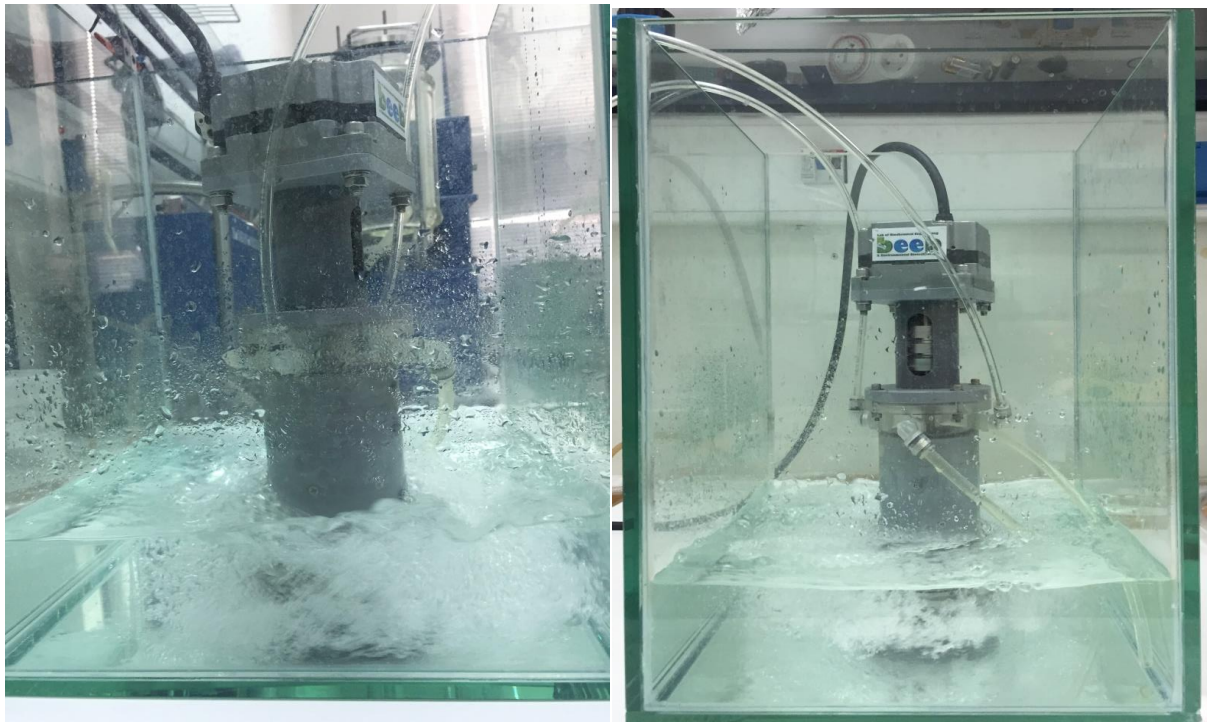
Το σύνολο των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της παροχής του αέρα, του ρυθμού ανάδευσης καθώς και της ποσότητας νερού που τοποθετούνταν στο ενυδρείο.

Αρχικά ο εξεταζόμενος όγκος νερού επιλέχθηκε να είναι ίσος με 9L, μεταβάλλοντας την παροχή του αέρα από 2,5L/min έπειτα σε 3,5L/min και τέλος σε 5L/min. Ο ρυθμός περιστροφής επιλέχθηκε να εξεταστεί για τις τιμές από 1500 έως 2300 RPM με διαφορά ανά 100RPM. Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω πειραμάτων υποδιπλασιάστηκε ο όγκος, δηλαδή  $V=4,5L$  και ακολουθήθηκε η παραπάνω διαδικασία για τις παροχές αέρα και ρυθμούς περιστροφής που αναφέρθηκαν. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να τονιστεί πως μετά από την διεξαγωγή ενός πειράματος, δηλαδή μέτρηση του DO σε συγκεκριμένο όγκο, παροχή αέρα και ρυθμό περιστροφής, η επόμενη πειραματική μέτρηση διεξαγόταν με άλλο φρέσκο νερό.

Μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων για το σύνολο των ρυθμών περιστροφής για μία συγκεκριμένη ροή αέρα και έναν καθορισμένο όγκο νερού η διαδικασία επαναλαμβανόταν χωρίς να γίνει αλλαγή του αρχικού όγκου του νερού. Πιο συγκεκριμένα, οι δοκιμές ξεκινούσαν για ορισμένη παροχή αέρα και όγκο από τον μέγιστο ρυθμό περιστροφής (2300RPM) έως τον ελάχιστο (1500RPM) συνεχόμενα. Τυπικές φωτογραφίες από την αλλαγή των πειραματικών συνθηκών φαίνονται παρακάτω. Επιλέχθηκαν 2 τυπικές τιμές ρυθμού περιστροφής για κάθε αλλαγή στην παροχή του αέρα η μέγιστη 2300 και η ελάχιστη 1500 για τους 2 όγκους των 9L και των 4,5L.



**Εικόνα 13: Πείραμα για όγκο  $V=9L$  στους ρυθμούς περιστροφής 2300 και 1500RPM.**



Εικόνα 14: Φωτογραφίες των πειραμάτων για όγκο  $V=4.5L$  στους ρυθμούς περιστροφής 2300 και 1500RPM.

Πίνακας 1. Οι συνθήκες της πειραματικής διαδικασίας

Πειραματικές συνθήκες	
Ροή αέρα (L/min)	2.5, 3.5, 5
Ρυθμός περιστροφής(RPM)	2300-1500
Όγκος νερού(L)	4.5 , 9

## Κεφαλαίο 4:Επεξεργασία των μετρήσεων- αποτελέσματα

Οι μετρήσεις που λαμβάνονταν για το διαλυμένο οξυγόνο(DO) ήταν εκφρασμένες σε mg/L. Συνεπώς η αρχική μέτρηση μετατρέποταν σε ποσοστό(%) για τον υπολογισμό του  $k_{La}$  με τον εξής τρόπο:

Για παράδειγμα έστω ότι είχαμε σε θερμοκρασία  $T=17,7^{\circ}\text{C}$  και  $\text{DO}=0.92\text{mg/L}$

$$C_{O_2} = \frac{0.92\text{mg}}{\text{L}} \Rightarrow \text{DO} = \frac{C_{O_2}}{C_{O_2(100\%)}} = \frac{0.92(\frac{\text{mg}}{\text{L}})}{9.44(\frac{\text{mg}}{\text{L}})} * 100\% = 9.75\%$$

Όπου το  $\text{DO}_{100\%}$  είναι η τιμή που έχει το διαλυμένο οξυγόνο όταν βρίσκεται στο 100% στις περιβαλλοντικές συνθήκες που ισχύουν τη στιγμή που διεξάγεται το πείραμα.

Το ποσοστό που υπολογίστηκε,στη συνέχεια γίνεται

$$\ln(100 - \text{DO}) = \ln(100 - 9.75) = 4.50$$

Που ουσιαστικά αποτελεί τιμή για την κατασκευή του διαγράμματος  $\ln(100-\text{DO})$  ως προς  $x$ . Η κλίση της ευθείας (χωρίς να λάβουμε υπόψη μας το αρνητικό πρόσημο) από το παραπάνω γράφημα είναι ο πειραματικός συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $k_{La}$ ) που επιδιώχθηκε να υπολογιστεί.

Αυτή ήταν η επεξεργασία στην οποία υποβαλλόταν το σύνολο των μετρήσεων η οποία φαίνεται πιο αναλυτικά στους πίνακες που παρατίθενται στο παράρτημα για κάθε πειραματική δοκιμή χωριστά.

Επειδή οι πειραματικές μετρήσεις εμπεριέχουν κάποιο σφάλμα είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του τυπικού σφάλματος  $\sigma_x$ . Για τον υπολογισμό του  $\sigma_x$  επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η ίδια πειραματική δοκιμή 6 φορές σε ρυθμό περιστροφής 2000RPM, παροχή αέρα  $F_{air}=3.5\text{L/min}$  και όγκο  $V=4.5\text{L}$ .

Ο τύπος με τον οποίο υπολογίστηκε το τυπικό σφάλμα είναι:

$$\sigma_x = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{\sum d^2}{n(n-1)}$$
$$d = x - x_{avg}$$

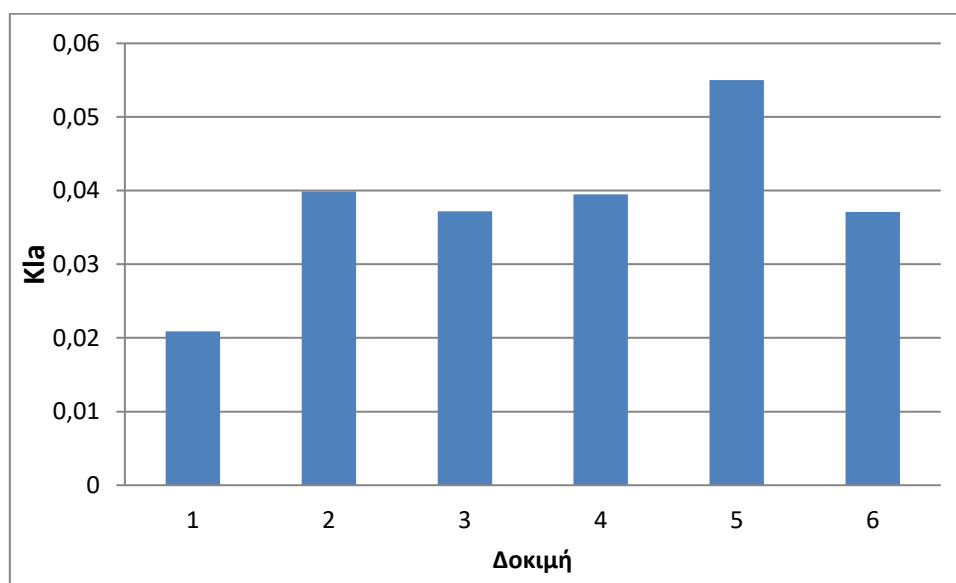
Όπου  $n$  είναι ο αριθμός των μετρήσεων (στην συγκεκριμένη περίπτωση  $n=6$ ),  $x_{avg}$  ο μέσος όρος των μετρήσεων,  $x$  η εκάστοτε μέτρηση. Οι πίνακες καθώς και τα διαγράμματα των  $k_{La}$  που προέκυψαν από τις 6 δοκιμές βρίσκονται στο παράρτημα.



**Πίνακας 2. Οι τιμές του  $k_{La}$  για πειραματικές συνθήκες Fair=3,5L/min /2000RPM /V=4,5L**

<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ: Fair=3,5L/min 2000RPM V=4,5L</b>						
<b>Δοκιμή</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b><math>k_{La}</math></b>	0,0209	0,0399	0,0372	0,0395	0,055	0,0371

Με χρήση του προγράμματος excel υπολογίστηκε το  $(k_{La})_{avg} = 0.0383 \text{ min}^{-1}$  και η τυπική απόκλιση (standard error)  $\sigma k_{La} = 0.0108 \text{ min}^{-1}$ .



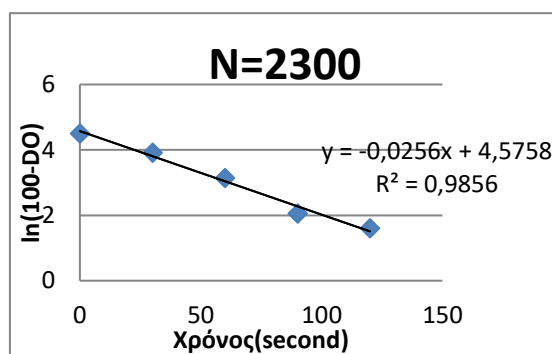
**Διάγραμμα 2: Διαγράμμο υπολογισμού του τυπικού σφάλματος**

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων για το σύνολο των πειραμάτων.

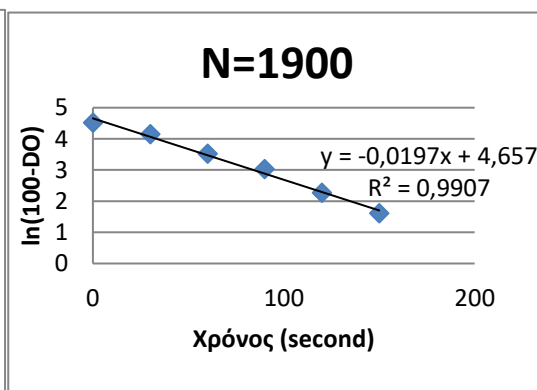
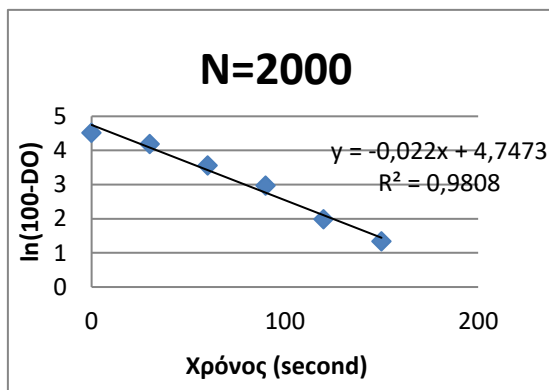
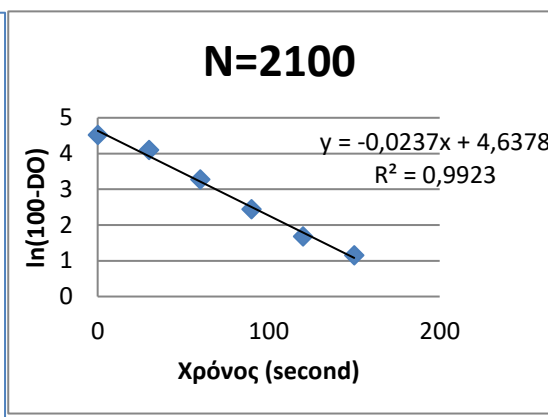
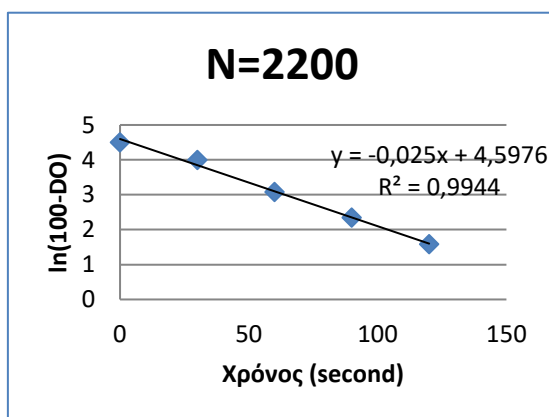
## **4.1 Πειράματα με όγκο 9 L**

### **4.1.1 Πειράματα με ροή αέρα 2,5L/min και αλλαγή νερού**

Για όγκο  $V=9L$  και ροή αέρα Fair=2,5L/min κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα για ρυθμούς περιστροφής από 2300 -1500 RPM.

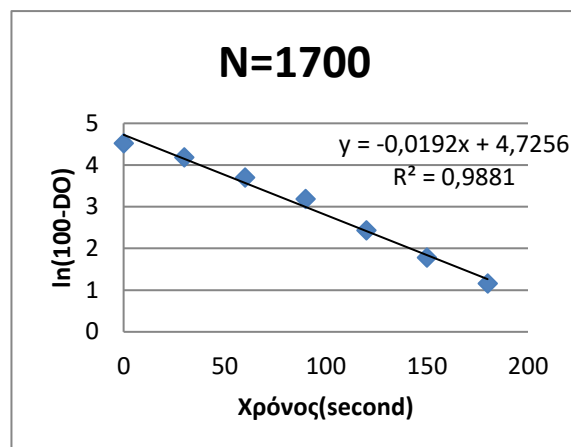
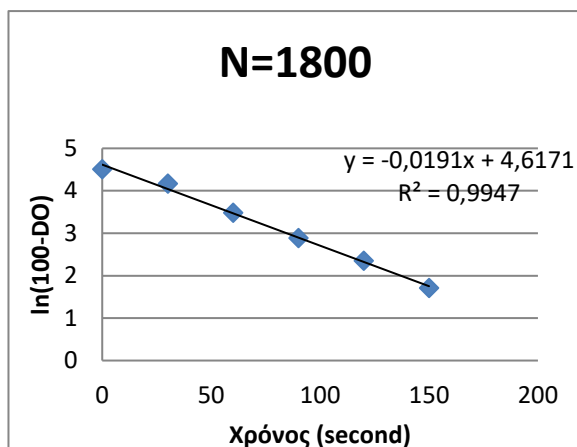


Διάγραμμα 3:Υπολογισμός του K<sub>la</sub> για ρυθμό περιστροφής N=2300.

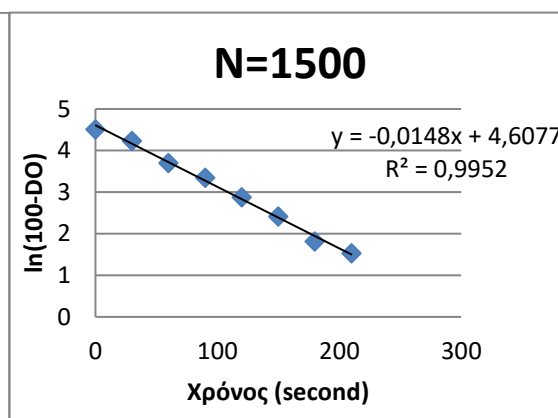
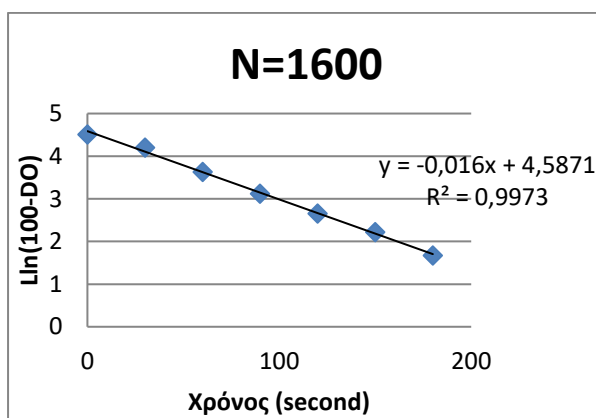


Διάγραμμα 4:Υπολογισμός του K<sub>la</sub> για ρυθμούς περιστροφής 2200-1900rpm.





Διάγραμμα 5: Υπολογισμός του  $k_{La}$  για ρυθμούς περιστροφής 1800 και 1700rpm.



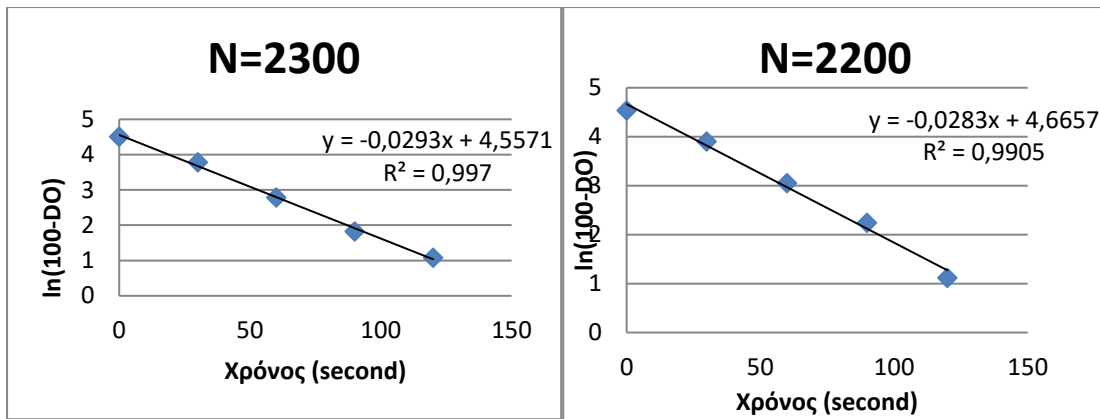
Διάγραμμα 6: Υπολογισμός του  $k_{La}$  για ρυθμούς περιστροφής 1800 και 1700rpm.

Πίνακας 3: Τιμές του  $k_{La}$  για όγκο  $V=9L$  και ροή αέρα 2,5L/min.

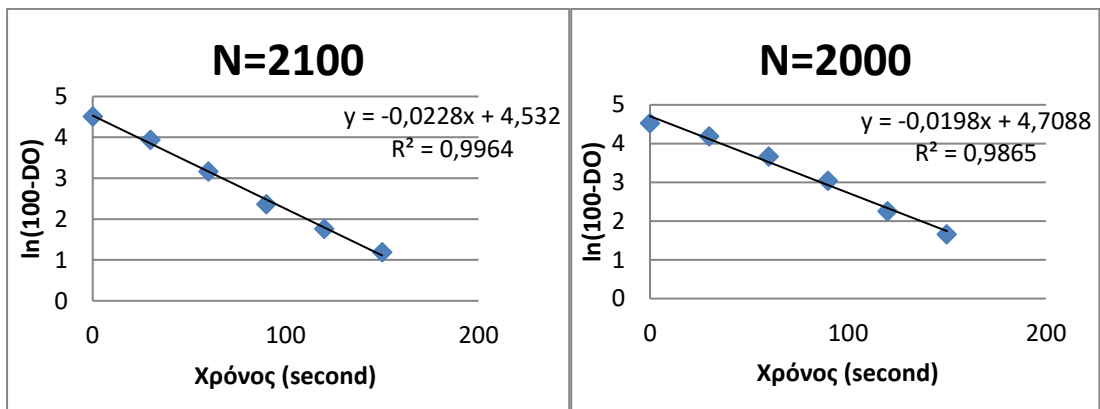
V=9L	Rpm								
Ροή αέρα =2,5L/min	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0148	0,016	0,0192	0,0191	0,0197	0,022	0,0237	0,025	0,0267

#### 4.1.2 Πειράματα με ροή αέρα 2,5L/min χωρίς αλλαγή νερού

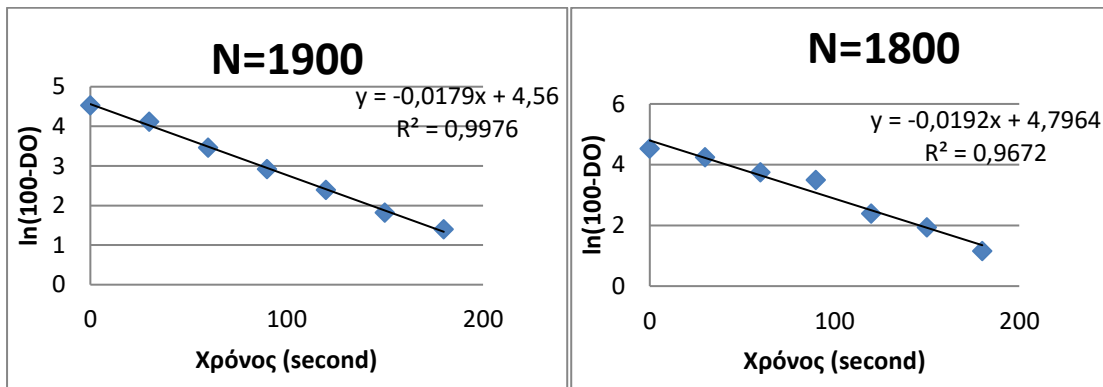
Ακολουθούν τα διαγράμματα για όγκο  $V=9L$  και ροή αέρα  $F_{air}=2,5L/min$  χωρίς να γίνει αλλαγή του νερού για το σύνολο των δοκιμών.



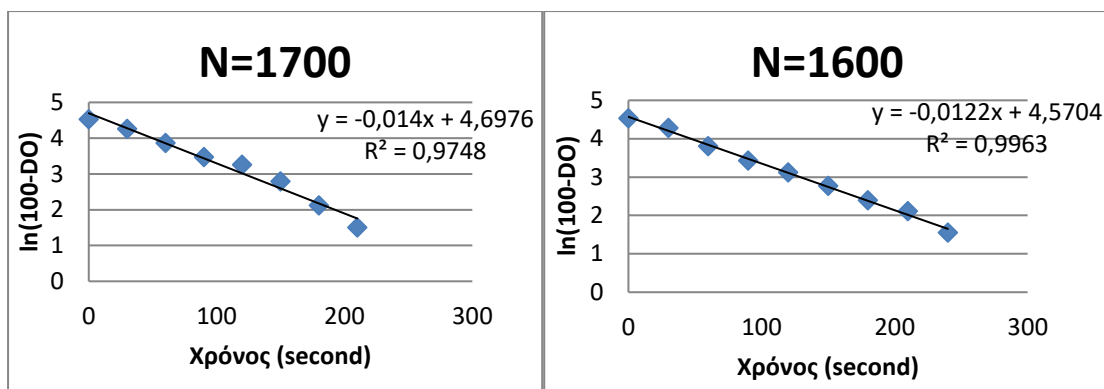
Διάγραμμα 7:Υπολογισμός  $k_{ia}$  για ρυθμούς περιστροφής 2300 και 2200RPM.



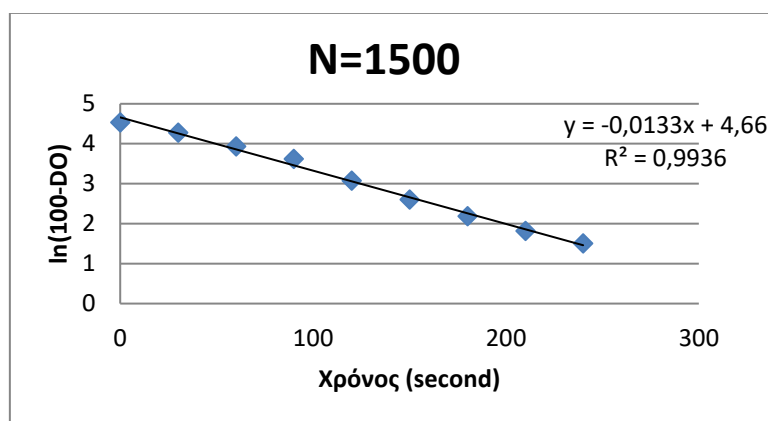
Διάγραμμα 8:Υπολογισμός  $k_{ia}$  για τους ρυθμούς περιστροφής 2100 και 2000RPM.



Διάγραμμα 9: Υπολογισμός  $k_{ia}$  για τους ρυθμούς περιστροφής 1900 και 1800RPM.



Διάγραμμα 10:Υπολογισμός του  $k_{La}$  για ρυθμούς περιστροφής 1700-1600RPM.

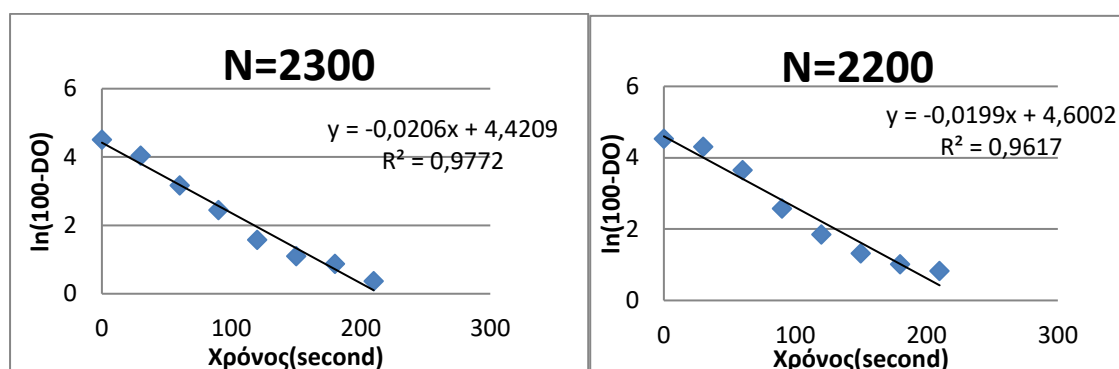


Διάγραμμα 11:Υπολογισμός του  $k_{La}$  στον ρυθμό περιστροφής 1500.

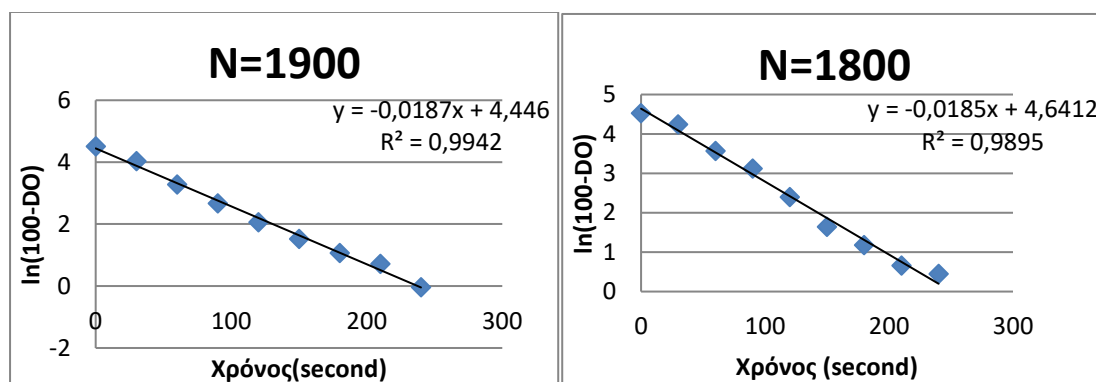
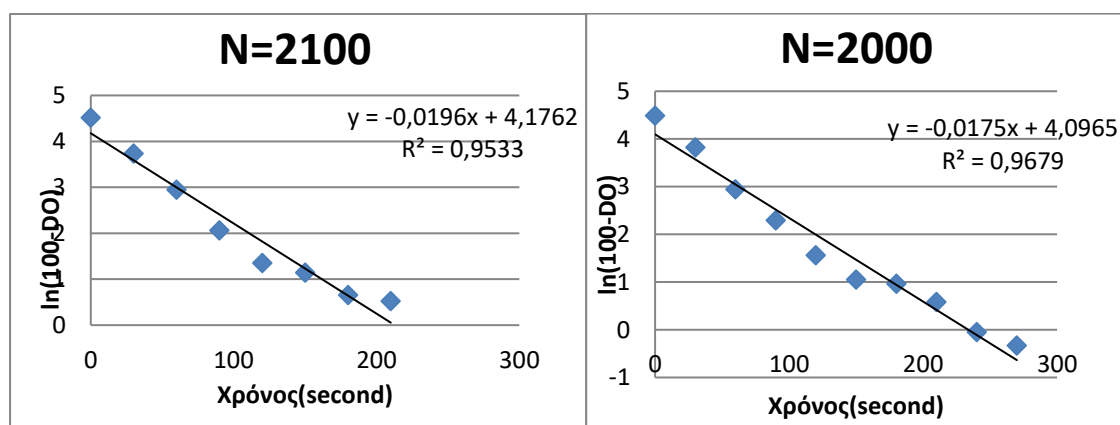
Πίνακας 4:Πίνακας  $k_{La}$  για  $V=9L$  και  $F_{air}=2.5L/min$  χωρίς αλλαγή νερού.

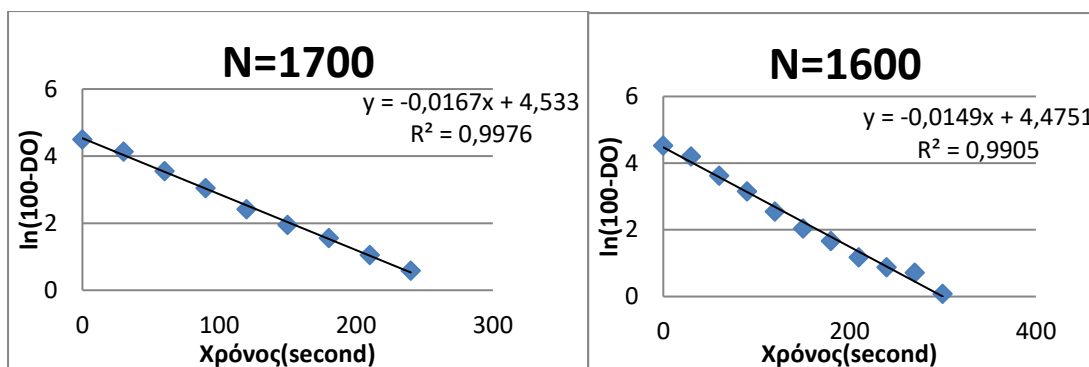
$V=9L$	rpm								
Ροή αέρα=2,5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0133	0,0122	0,014	0,0192	0,0179	0,0198	0,0228	0,0283	0,0293

#### 4.1.3 Πειράματα με ροή αέρα 3,5L/min και αλλαγή νερού

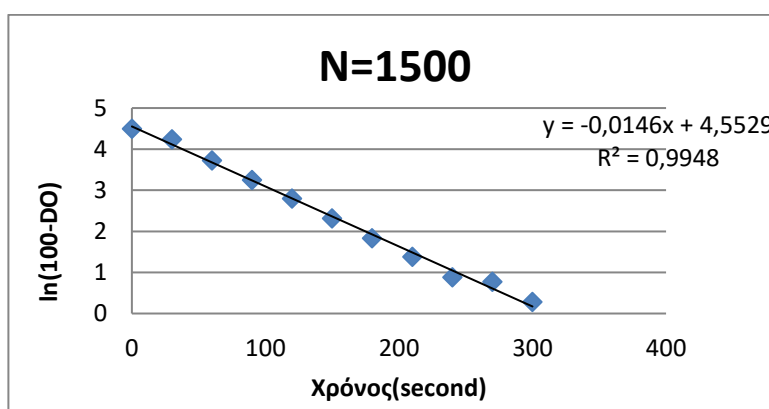


Διάγραμμα 12: Διαγράμματα  $k_{ia}$  για τους ρυθμούς περιστροφής 2300 και 2200 RPM.





Διάγραμμα 13: Διαγράμματα υπολογισμού του  $k_{La}$  για ρυθμούς περιστροφής 2100-1600RPM.

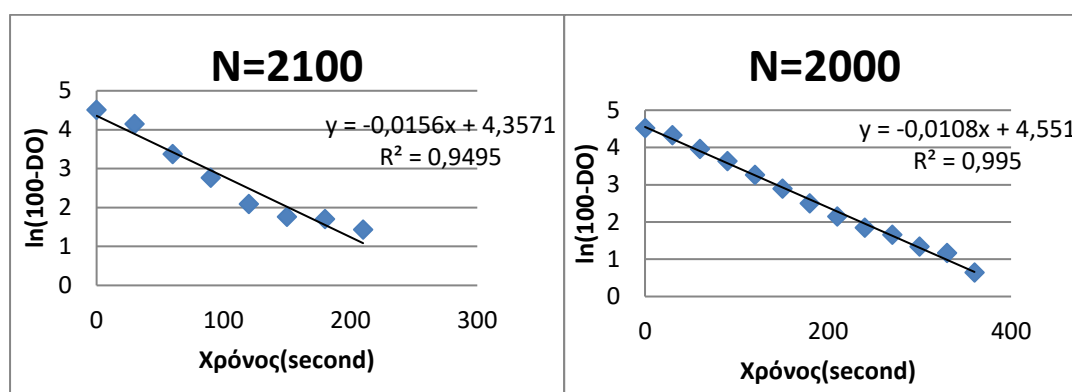
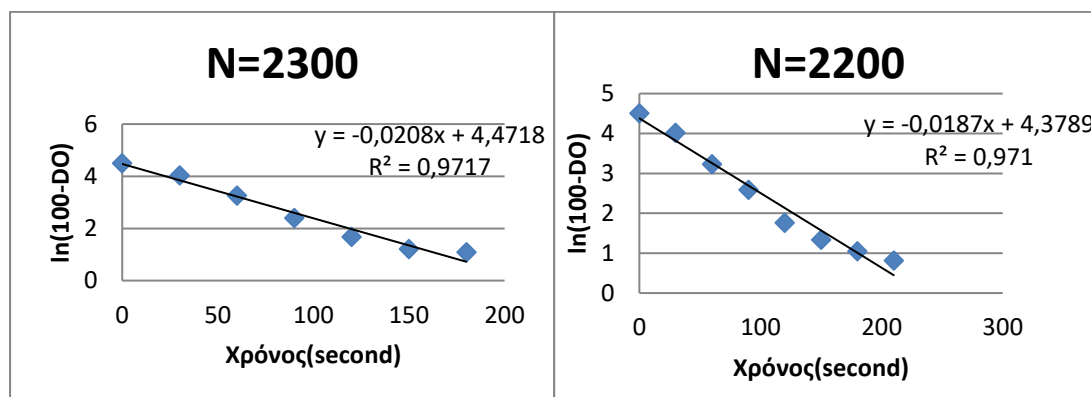


Διάγραμμα 14: Υπολογισμός  $k_{La}$  του ρυθμού περιστροφής 1500.

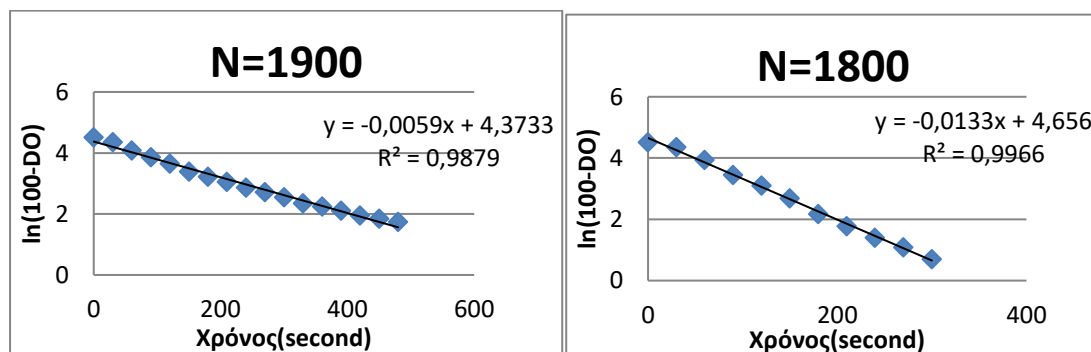
Πίνακας 5: Συντελεστές μεταφοράς μάζας για  $V=9L$  και  $F_{air}=3.5L/min$ .

$V=9L$	rpm								
Ροή αέρα=3,5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0146	0,0149	0,0167	0,0185	0,0187	0,0175	0,0196	0,0199	0,0206

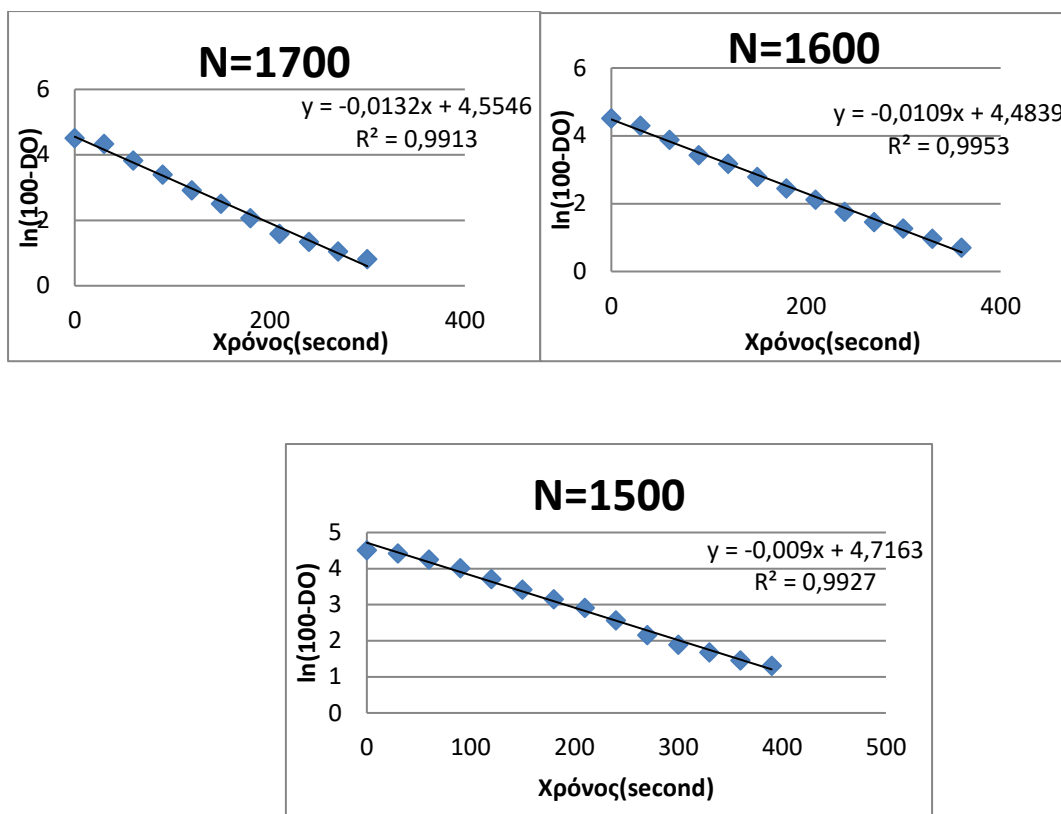
#### 4.1.4 Πειράματα με ροή αέρα 3,5L/min χωρίς αλλαγή νερού



Διάγραμμα 15: Διαγράμματα υπολογισμού  $k_L a$  των ρυθμών περιστροφής 2300-2000RPM.



Διάγραμμα 16: Διαγράμματα υπολογισμού  $k_L a$  των ρυθμών περιστροφής 1900-1800RPM

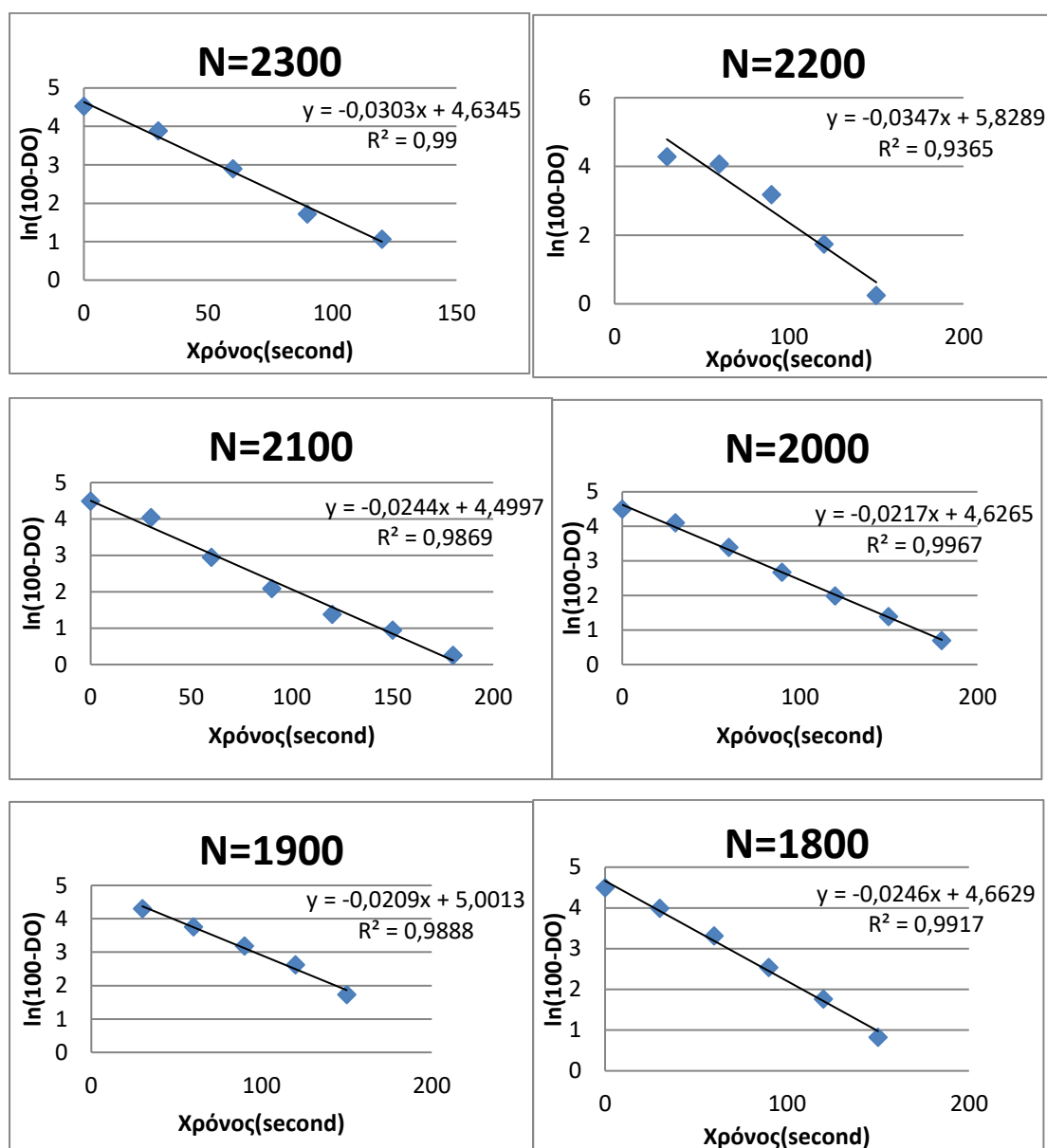


Διάγραμμα 17: Διαγράμματα υπολογισμού  $k_{La}$  από ρυθμό περιστροφής 1700-1500.

Πίνακας 6: Πειραματικά  $k_{La}$  για  $V=9L$  και  $F_{air}=3.5L/min$ .

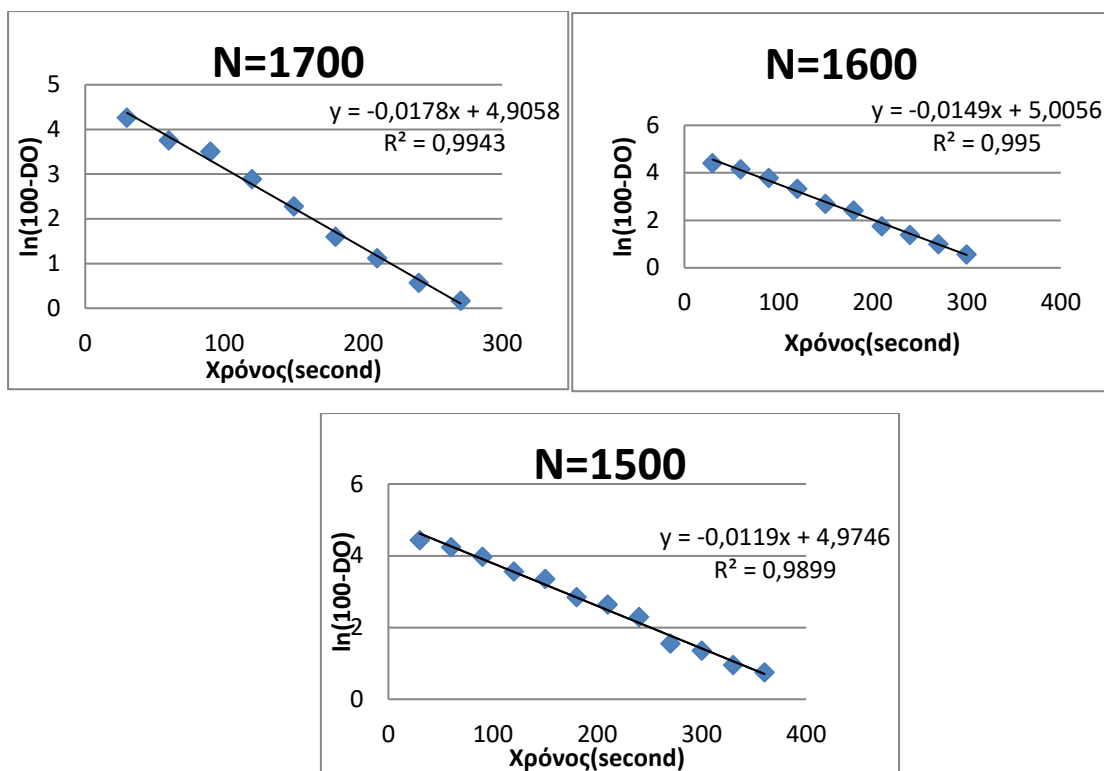
$V=9L$	rpm								
Ροή αέρα=3,5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,009	0,0109	0,0132	0,0133	0,0059	0,0108	0,0156	0,0187	0,0208

#### 4.1.5 Πειράματα με ροή αέρα 5,0L/min και αλλαγή νερού



Διάγραμμα 18: Διαγράμματα  $k_{La}$  για τα πειράματα με ρυθμούς περιστροφής 2300-1800RPM.



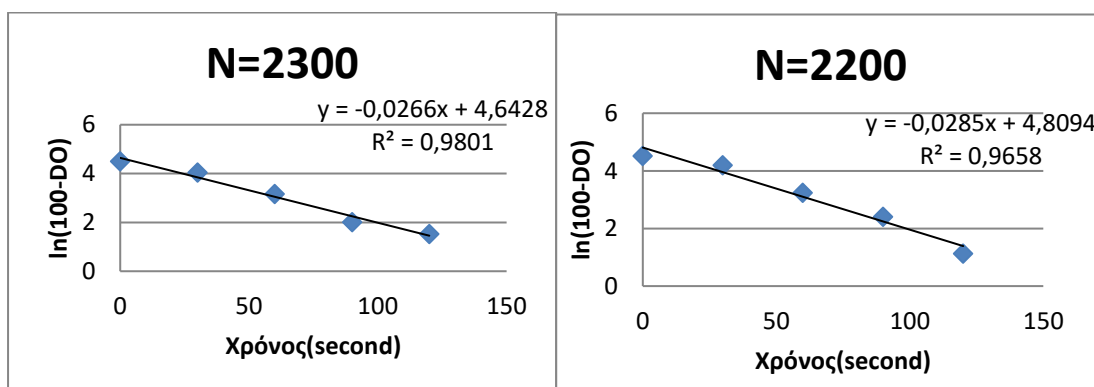


Διάγραμμα 19: Πειραματικά  $k_L a$  για τους ρυθμούς περιστροφής 1700-1500.

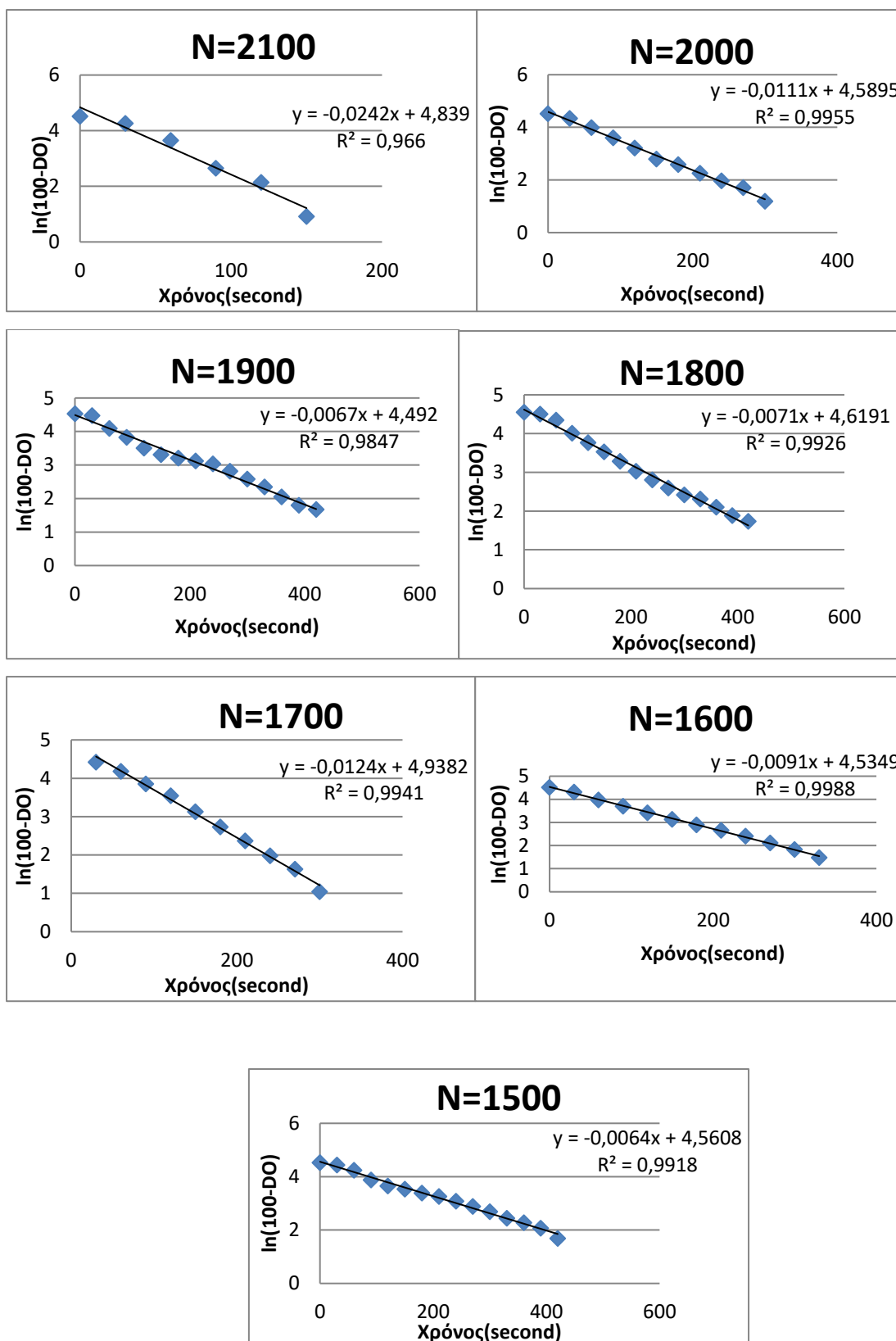
Πίνακας 7: Πειραματικά  $k_L a$  για  $V=9L$  και  $F_{air}=5L/min$ .

$V=9L$	rpm								
Ροή αέρα=5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_L a$	0,0119	0,0149	0,0178	0,0246	0,0209	0,0217	0,0244	0,0347	0,0303

#### 4.1.5 Πειράματα με ροή αέρα 5,0L/min χωρίς αλλαγή νερού



Διάγραμμα 20: Πειραματικά  $k_L a$  των ρυθμών περιστροφής 2300 και 2200.



**Διάγραμμα 21:** Διαγράμματα υπολογισμού πειραματικών  $k_{\text{La}}$  στους ρυθμούς περιστροφής 2100-1500RPM.

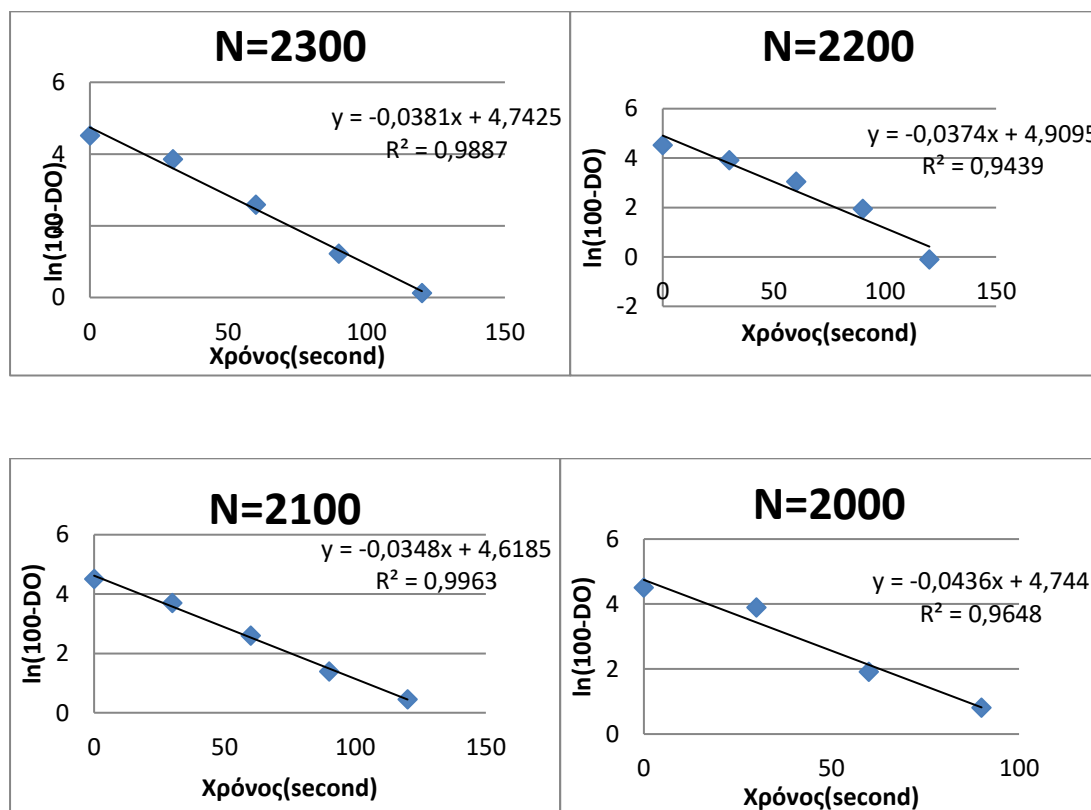
Πίνακας 8: Πειραματικά  $k_{La}$  για  $V=9L$  και  $F_{air}=5L/min$  χωρίς αλλαγή νερού.

$V=9L$	rpm								
Ροή αέρα=5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0064	0,0091	0,0124	0,0071	0,0067	0,0111	0,0242	0,0285	0,0266

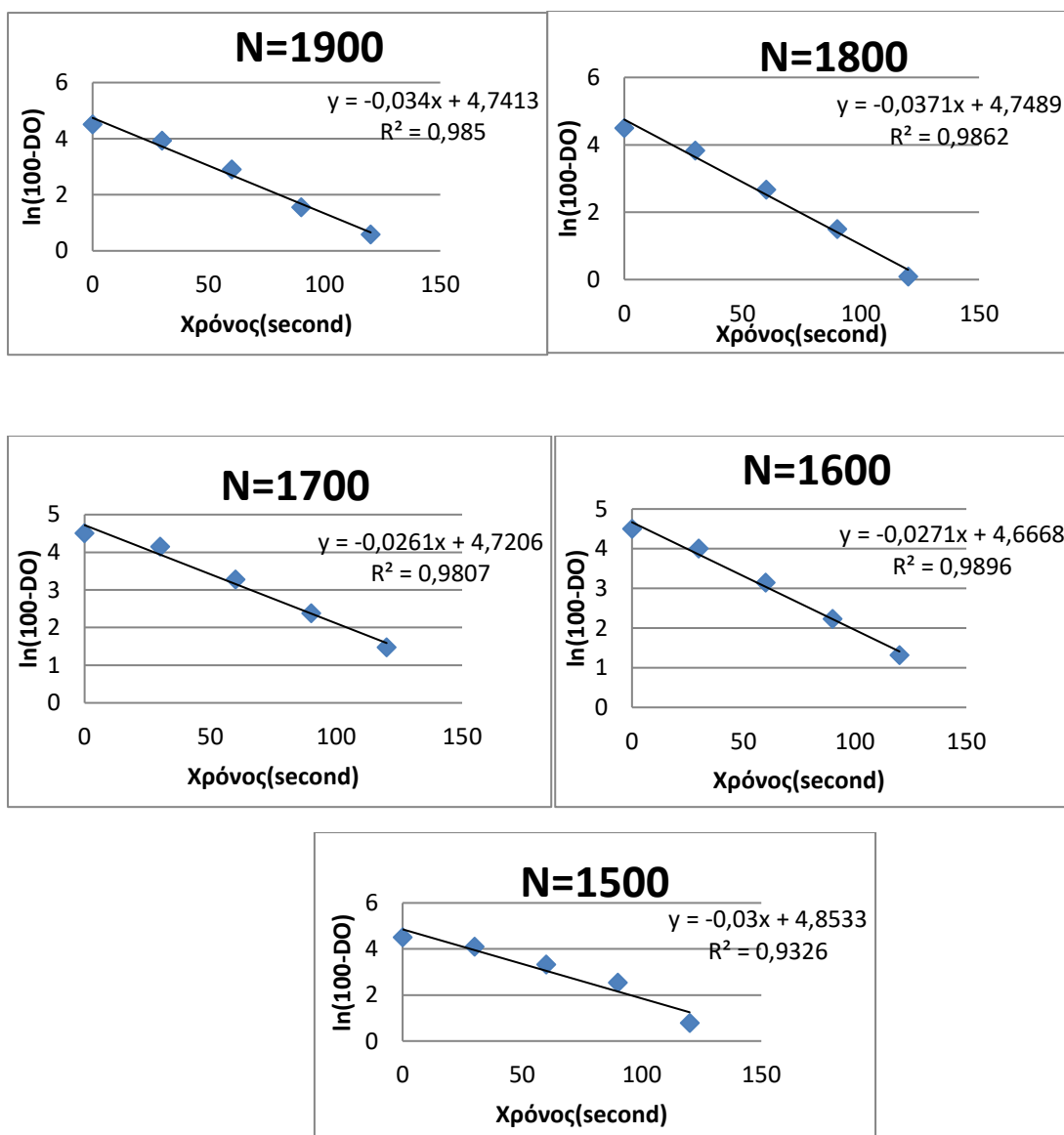
## 4.2 Πειράματα με όγκο 4,5 L

### 4.2.1 Πειράματα με ροή αέρα 2,5L/min και αλλαγή νερού

Για όγκο ίσο με  $V=4,5L$  και  $F_{air}=2,5L/min$ .



Διάγραμμα 22: Διαγράμματα για τα πειραματικά  $k_{La}$  από 2300-2000RPM.

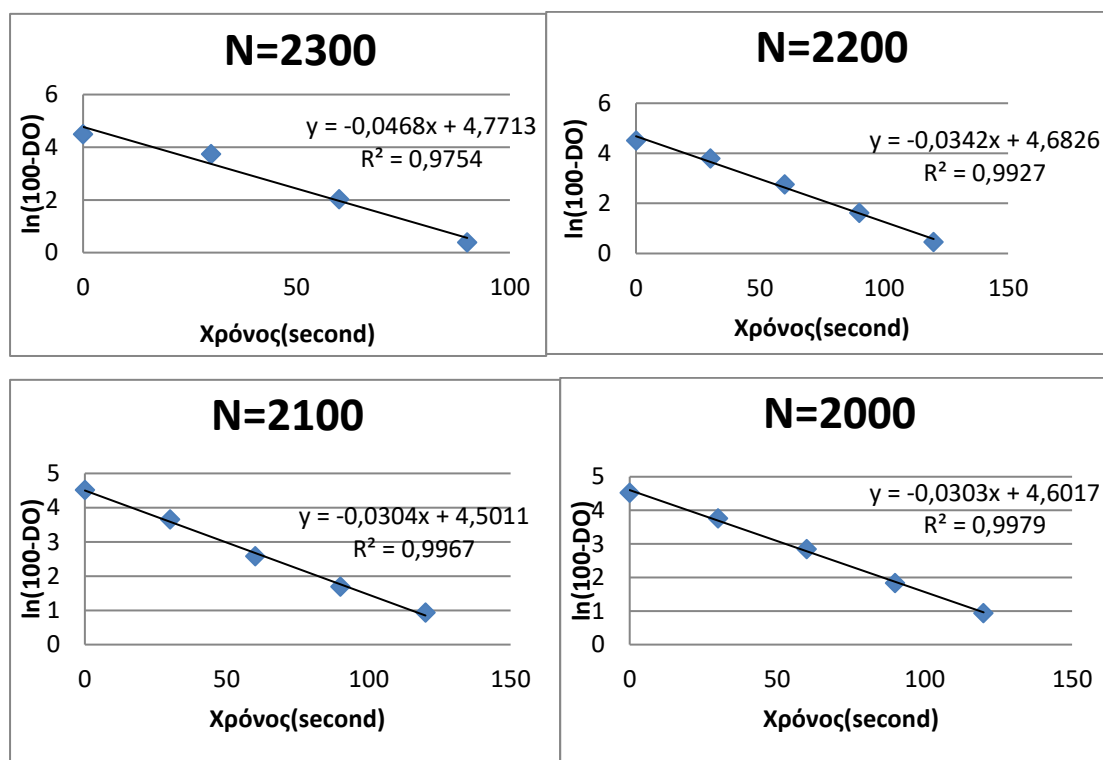


Διάγραμμα 23: Πειραματικά  $k_{La}$  ρυθμών περιστροφής 1900-1500.

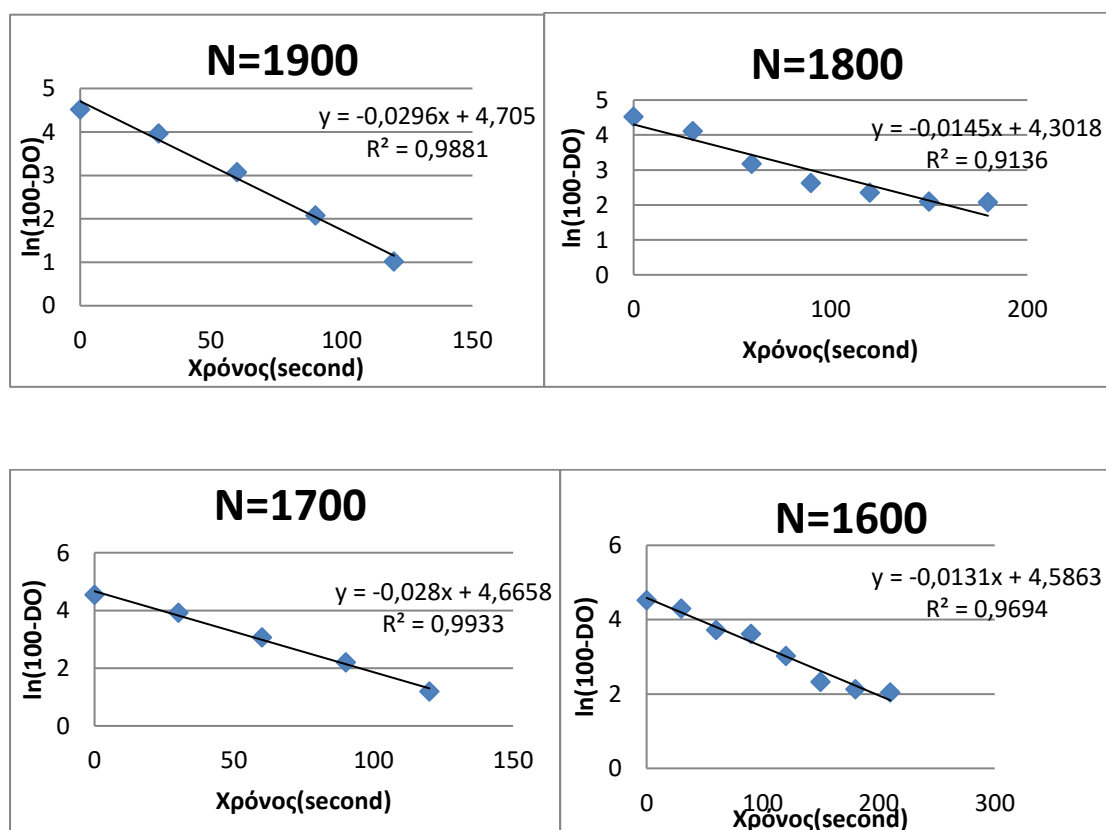
Πίνακας 9: Πειραματικά  $k_{La}$  για  $V=4.5L$  και  $F_{air}=2.5L/min$ .

$V=4,5L$	rpm								
Ροή αέρα=2,5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,03	0,0271	0,0261	0,0371	0,034	0,0436	0,0348	0,0374	0,0381

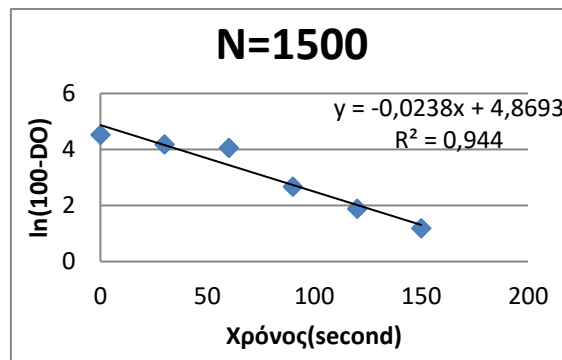
#### 4.2.1 Πειράματα με ροή αέρα 2,5L/min χωρίς αλλαγή νερού



Διάγραμμα 24: Διαγράμματα  $k_L a$  για τους ρυθμούς περιστροφής 2300-2000.



Διάγραμμα 25: Πειραματικά  $k_L a$  ρυθμών περιστροφής 1900-1600 RPM.

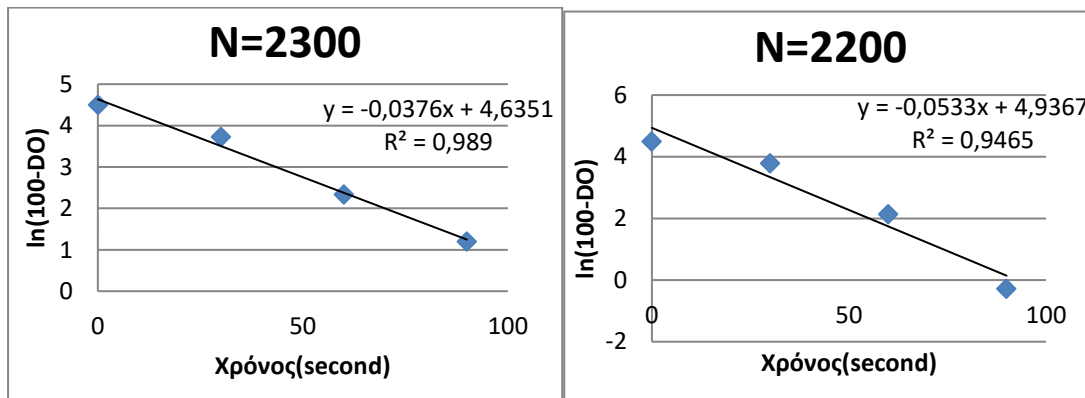


Διάγραμμα 26:Διάγραμμα υπολογισμού  $k_{La}$  στα 1500RPM.

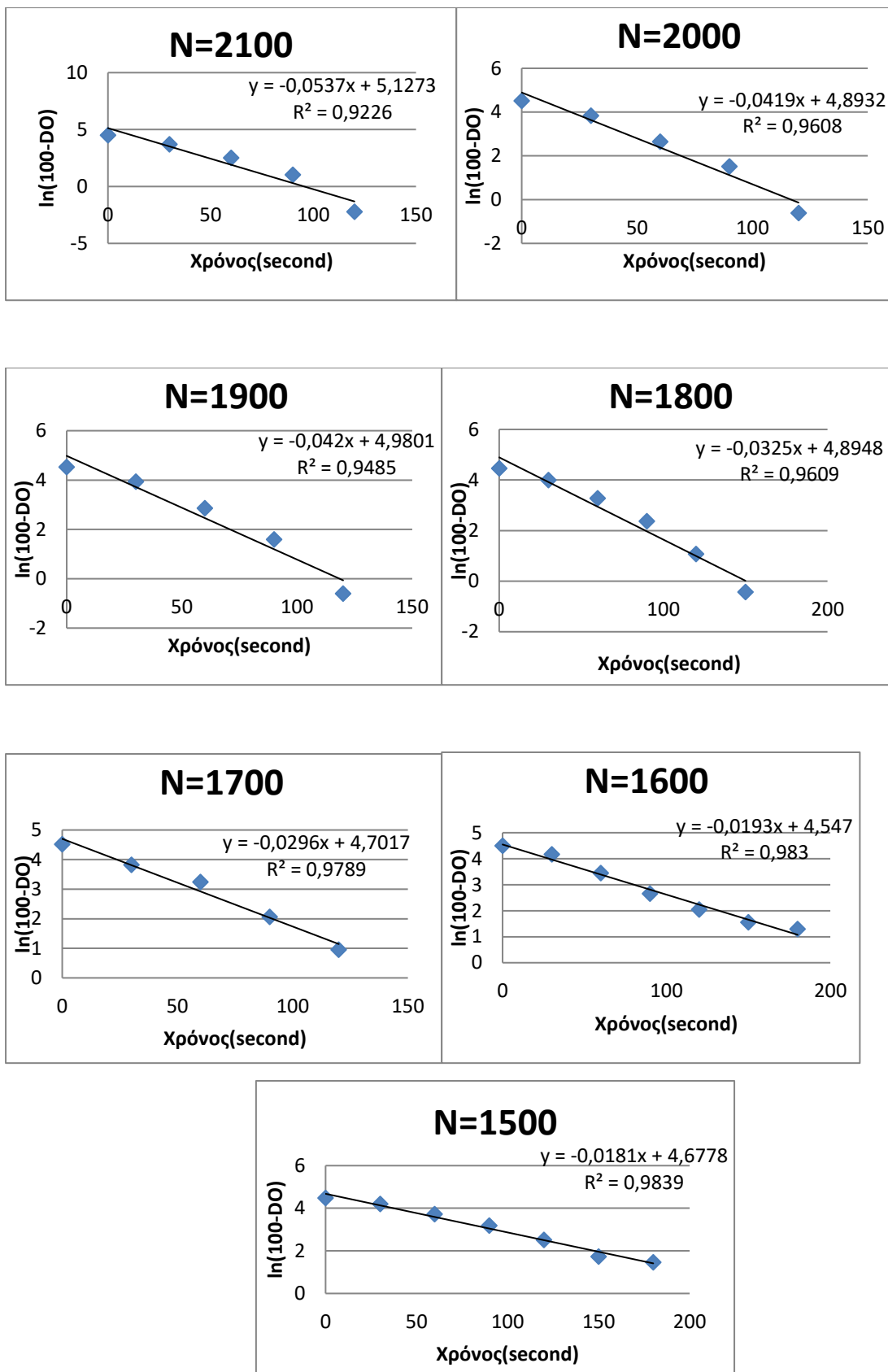
Πίνακας 10:Πειραματικά  $k_{La}$  για  $V=4.5L$  και  $F_{air}=2.5L/min$  χωρίς αλλαγή νερού.

$V=4,5L$	rpm								
Ροή αέρα=2,5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0238	0,0131	0,028	0,0145	0,0296	0,0303	0,0304	0,0342	0,0468

#### 4.2.3 Πειράματα με ροή αέρα 3,5L/min και αλλαγή νερού



Διάγραμμα 27:Πειραματικά  $k_{La}$  στα 2300 και 2200RPM.

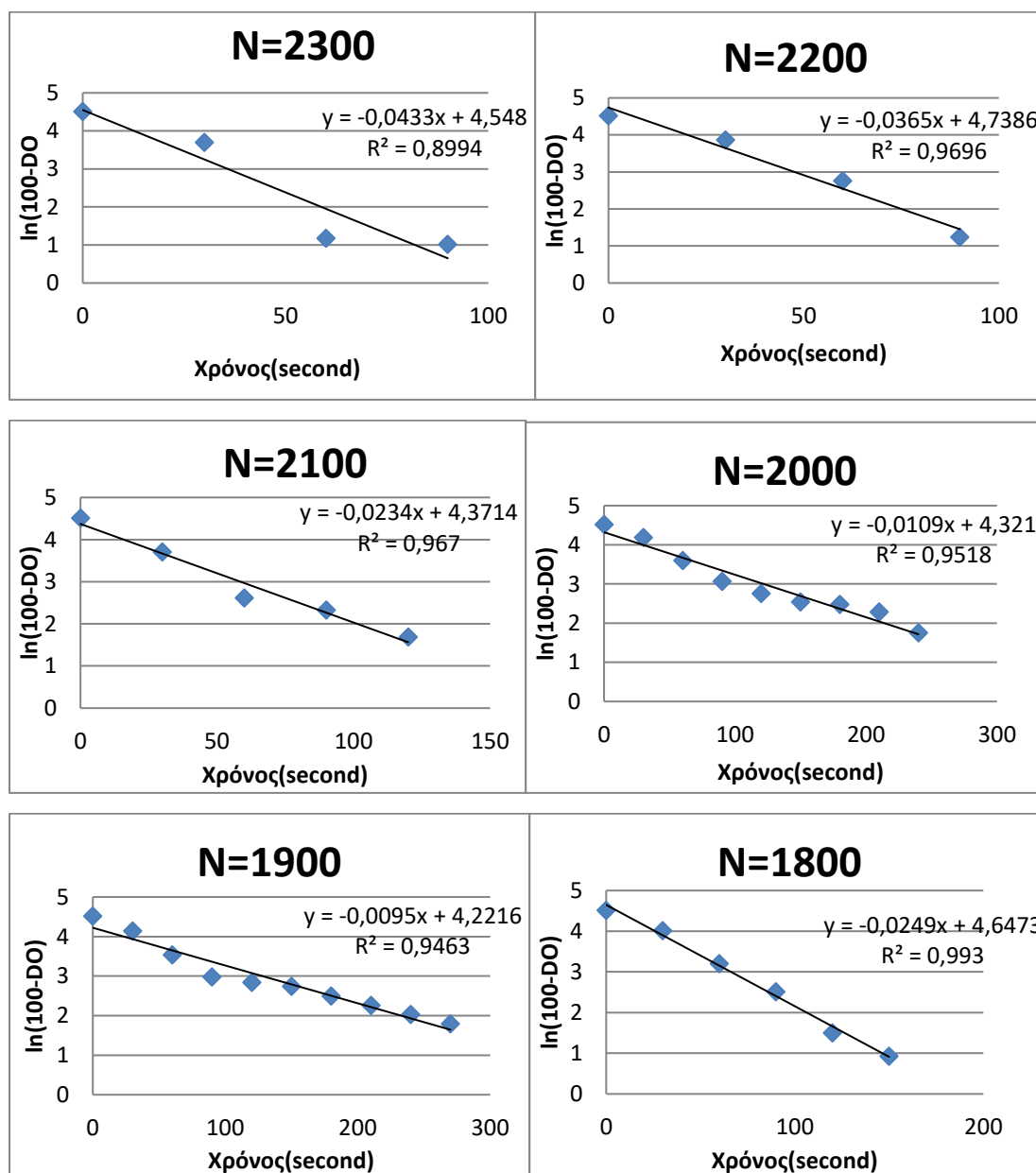


Διάγραμμα 28: Διαγράμματα υπολογισμού  $k_{La}$  για τους ρυθμούς περιστροφής 2100-1500RPM.

Πίνακας 11: Πειραματικά  $k_{La}$  για  $V=4.5L$  και  $F_{air}=3.5L/min$ .

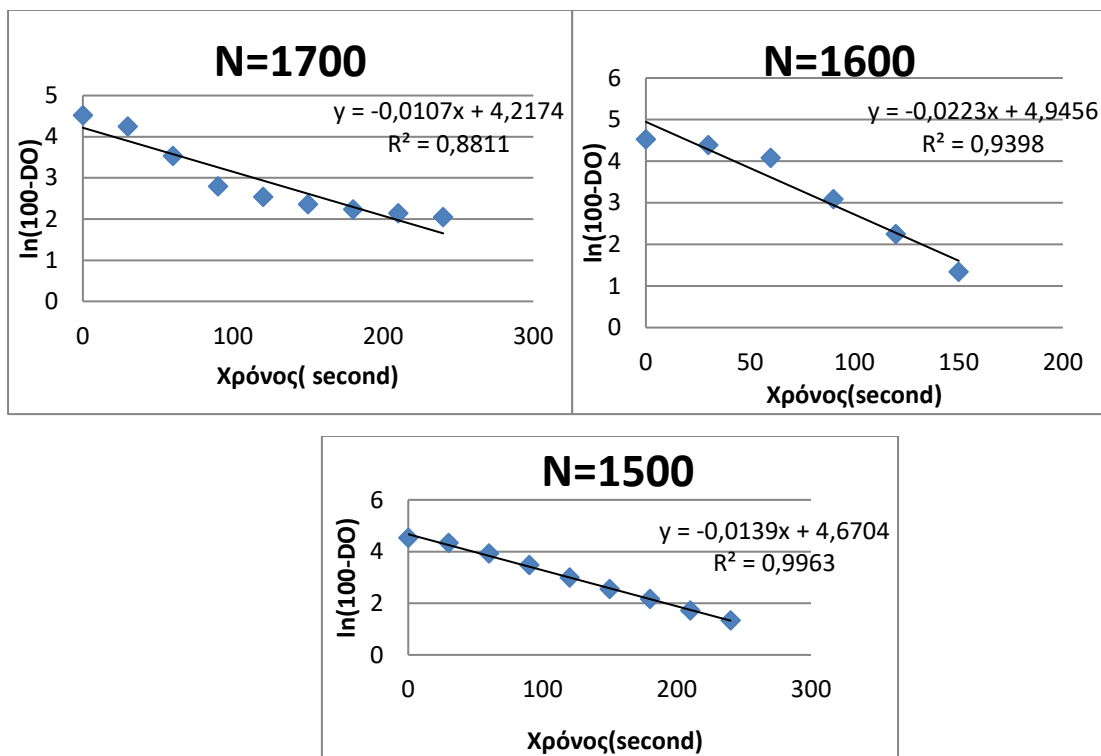
$V=4,5L$	rpm								
Ροή αέρα=3,5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0181	0,0193	0,0296	0,0325	0,042	0,0419	0,0537	0,0533	0,0376

#### 4.2.4 Πειράματα με ροή αέρα 3,5L/min χωρίς αλλαγή νερού



Διάγραμμα 29: Διαγράμματα πειραματικών  $k_{La}$  ρυθμών περιστροφής 2300-1800RPM.



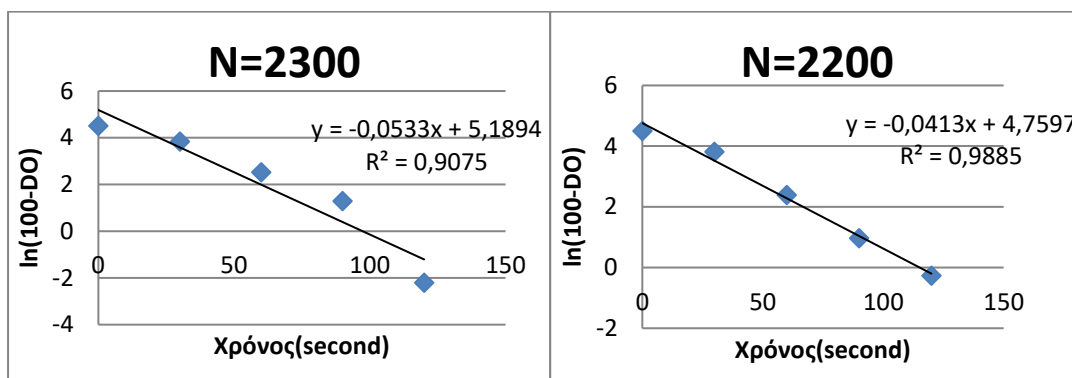


Διάγραμμα 30:Διαγράμματα για τον υπολογισμό  $k_{La}$  στους ρυθμούς περιστροφής 1800-1500.

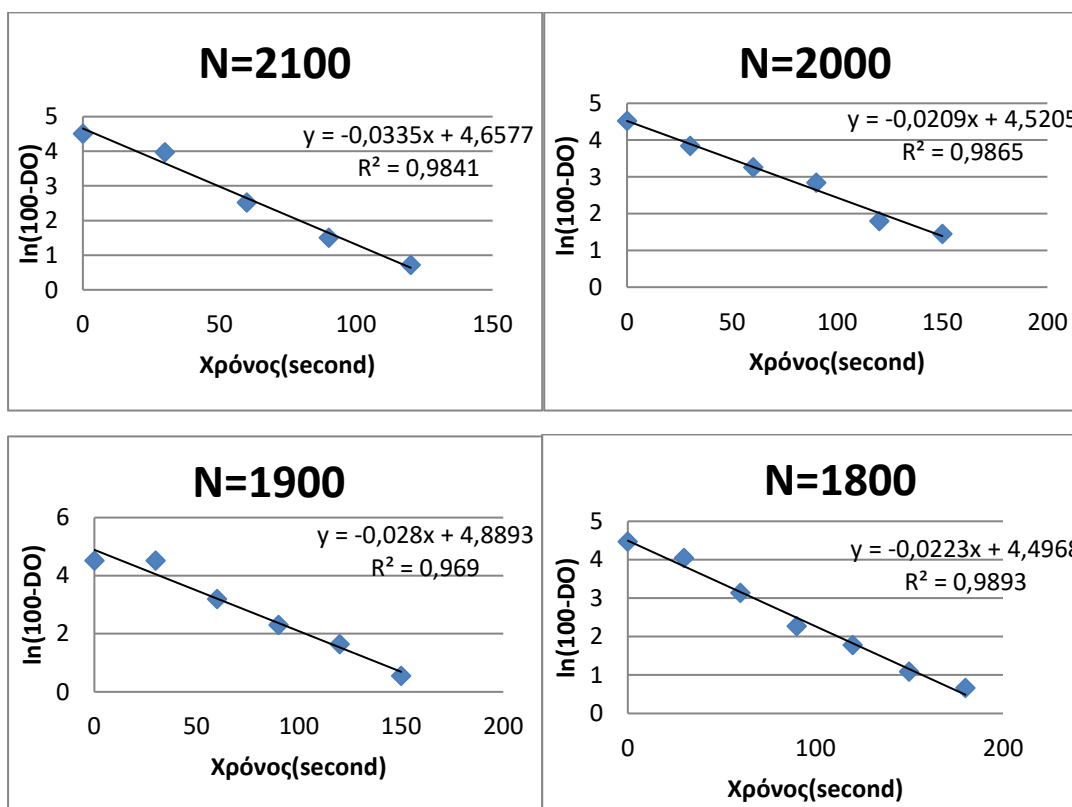
Πίνακας 12:Πειραματικά  $k_{La}$  για  $V=4.5L$  και  $F_{air}=3.5L/min$  χωρίς αλλαγή νερού.

$V=4,5L$	rpm								
Ροή αέρα=3,5 L/min	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0139	0,0223	0,0107	0,0249	0,0095	0,0109	0,0234	0,0365	0,0433

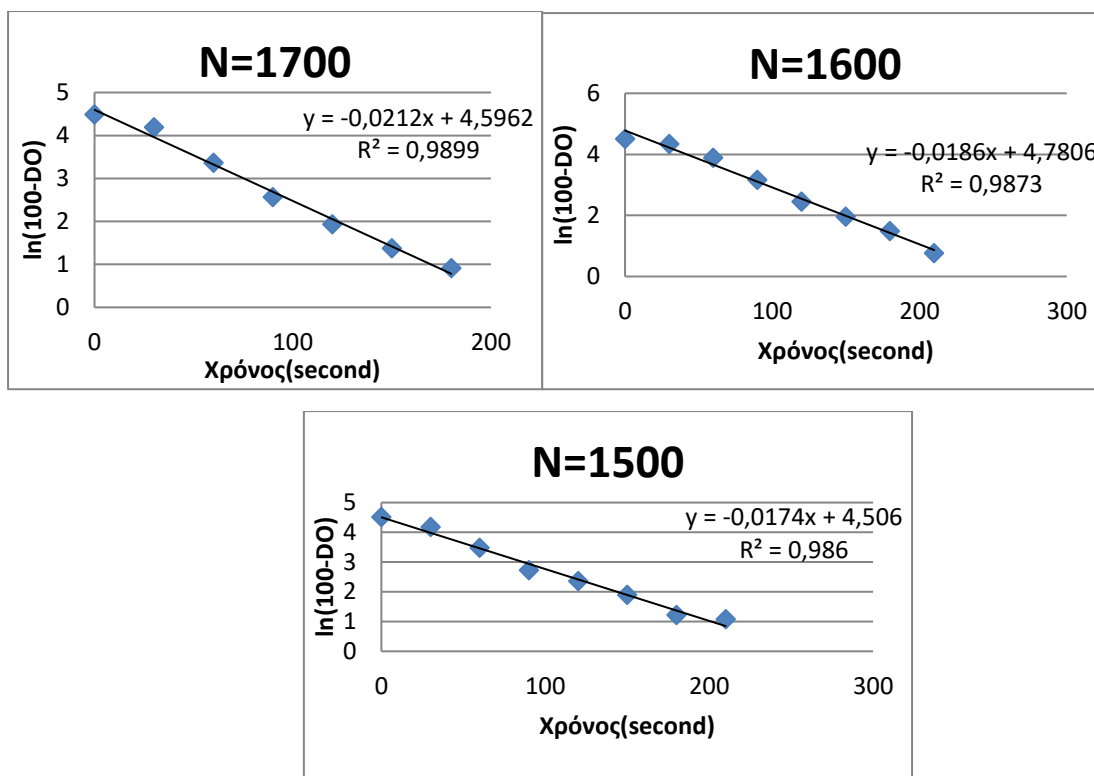
#### 4.2.5 Πειράματα με ροή αέρα 5,0 L/min και αλλαγή νερού



Διάγραμμα 31:Υπολογισμός  $k_{La}$  για τους ρυθμούς περιστροφής 2300 και 2200RPM.



Διάγραμμα 32:Διαγράμματα υπολογισμού  $k_{La}$  για τους ρυθμούς περιστροφής 2100 - 1800RPM.

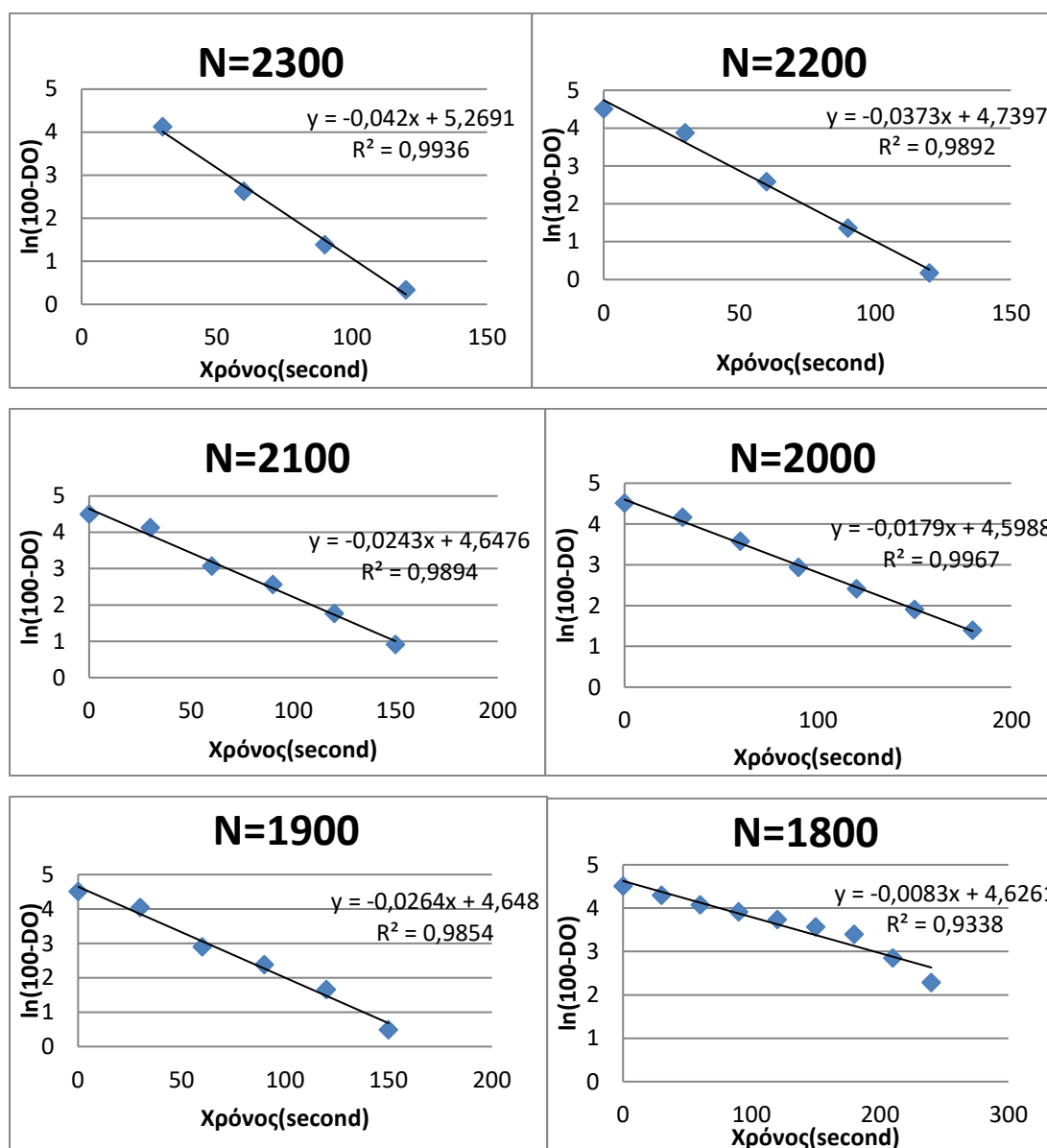


Διάγραμμα 33: Διαγράμματα υπολογισμού του  $k_{La}$  για ρυθμούς περιστροφής από 1700-1500 RPM.

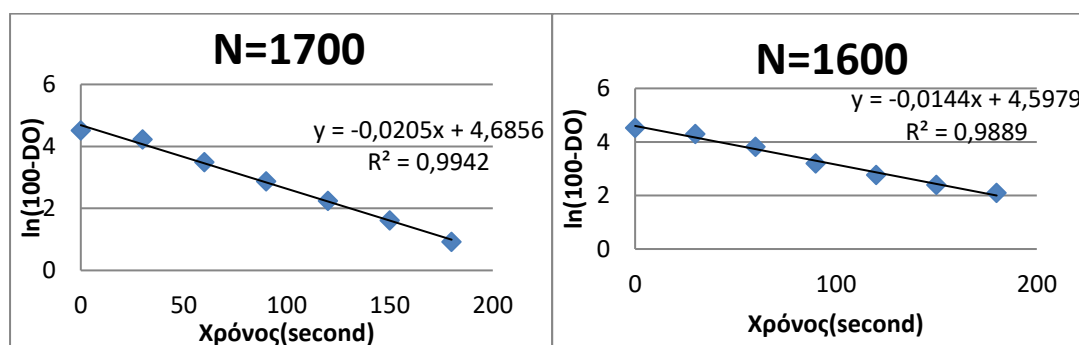
Πίνακας 13: Πειραματικά  $k_{La}$  για  $V=4.5L$  και  $F_{air}=5L/min$ .

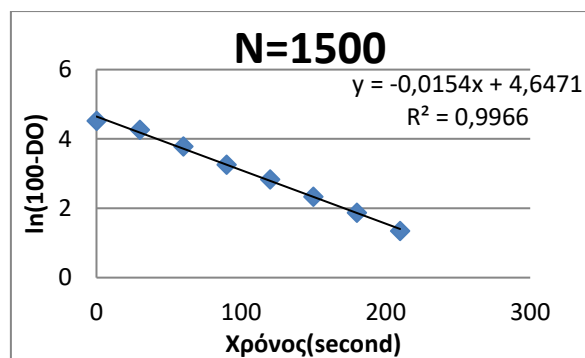
$V=4,5L$	rpm								
Ροή αέρα=5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0154	0,0144	0,0205	0,0083	0,0264	0,0179	0,0243	0,0373	0,042

#### 4.2.5 Πειράματα με ροή αέρα 5,0 L/min χωρίς αλλαγή νερού



Διάγραμμα 34: Διαγράμματα υπολογισμού του  $k_{La}$  των ρυθμών περιστροφής 2300-1800RPM.





Διάγραμμα 35:Υπολογισμός πειραματικών  $k_{La}$  για τους ρυθμούς περιστροφής 1700-1500RPM.

Πίνακας 14:Πειραματικά  $k_{La}$  για  $V=4.5L$  και  $F_{air}=5L/min$  χωρίς αλλαγή νερού.

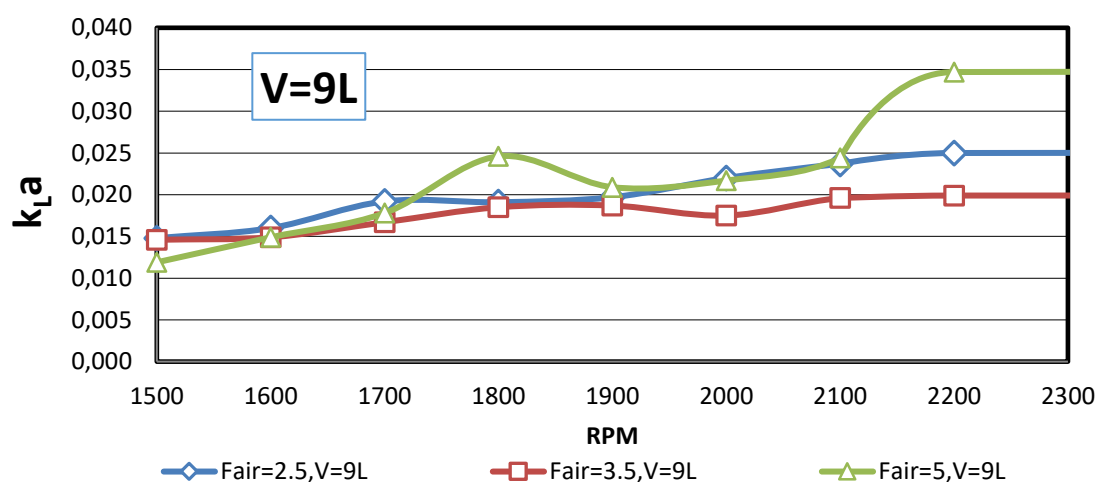
$V=4,5L$	rpm								
Ροή αέρα=5 (L/min)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$k_{La}$	0,0154	0,0144	0,0205	0,0083	0,0264	0,0179	0,0243	0,0373	0,042

### 4.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

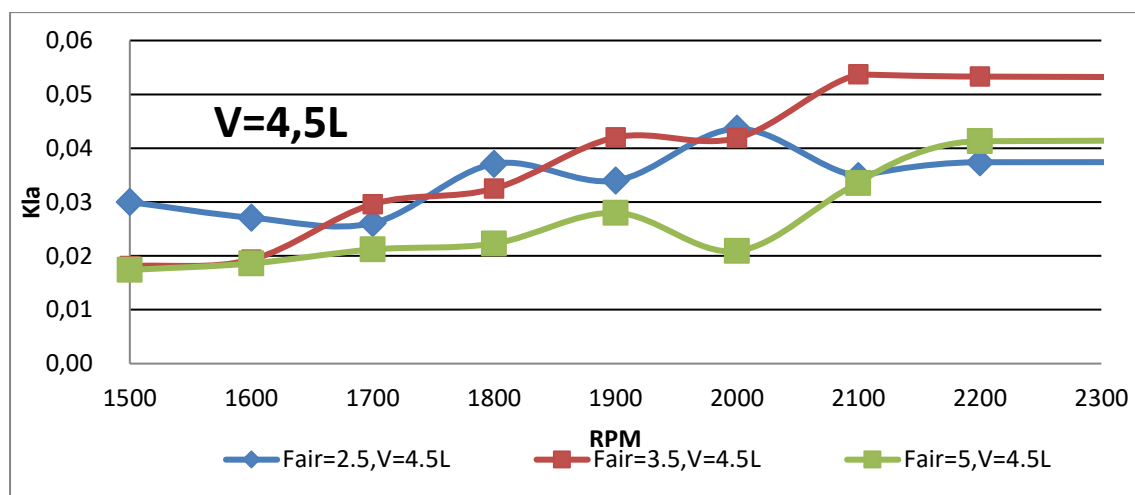
Οι πίνακες με τους αναλυτικούς υπολογισμούς για την κατασκευή κάθε διαγράμματος βρίσκονται στο παράρτημα.Οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τα  $k_{La}$  για όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις ακολουθούν παρακάτω.

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να μεταβληθούν ήταν ο ρυθμός περιστροφής (RPM) , η ροή παροχής του αέρα και εξεταζόμενος όγκος νερού.

Αρχικά παρουσιάζονται 2 συγκεντρωτικά διαγράμματα των  $k_{La}$  ως προς τον ρυθμό περιστροφής (RPM) για τις 3 διαφορετικές παροχές αέρα, για τους όγκους των 4,5L και των 9L.



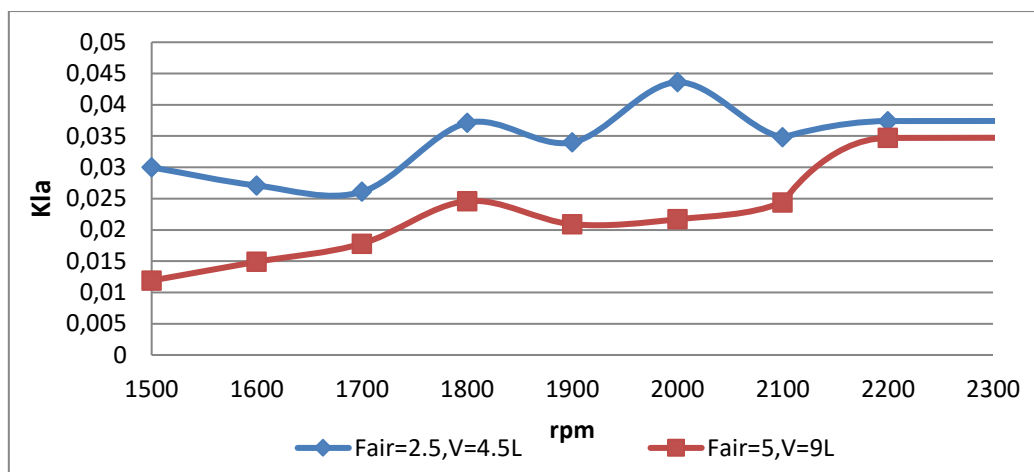
Διάγραμμα 36: Συγκεντρωτικό διάγραμμα πειραματικών  $k_{La}$  ως προς RPM με τις παροχές αέρα για όγκο  $V=9L$ .



Διάγραμμα 37: Διάγραμμα πειραματικών  $k_{La}$  ως προς RPM για το σύνολο των παροχών και όγκο  $V=4.5L$ .

Μία πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως στο διάγραμμα για τα 4.5L το  $k_{La}$  παίρνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με αυτές για όγκο ίσο με 9L.

Έπειτα παρουσιάζεται το διάγραμμα  $k_{La}$  ως προς RPM με στο οποίο σχεδιάστηκαν οι καμπύλες για την περίπτωση Fair=2.5L/min και  $V=4.5L$  και Fair=5L/min και  $V=9L$  για να εξεταστεί ο διπλασιασμός της ροής αέρα σε συνδυασμό με τον διπλασιασμό του όγκου.



**Διάγραμμα 38:** Διάγραμμα με καμπύλες για τις περιπτώσεις διπλασιασμού του όγκου και τη παροχής αέρα.

Αρχικά φαίνεται ότι με την μικρότερη παροχή στον μικρότερο όγκο ο συντελεστής μεταφοράς μάζας καταφέρνει να φτάσει σε υψηλότερες τιμές. Αφού ο λόγος 2.5/4.5 ισούται με 5/9 αναμένεται οι δύο καμπύλες να συμπίπτουν κάτι που για τα συγκεκριμένα πειραματικά αποτελέσματα δεν ισχύει. Αυτό ίσως οφείλεται στο πειραματικό σφάλμα των μετρήσεων. Ο βασικότερος παράγοντας της παραπάνω απόκλισης πιθανότατα είναι πως ο διπλασιασμός του όγκου του νερού δεν συνοδεύεται από διπλασιασμό στην γεωμετρία γι' αυτό και υπάρχει αυτή η απόκλιση των τιμών. Πιο αναλυτικά, πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ενυδρείο ενώ για να ήταν απόλυτα σωστός ο διπλασιασμός θα έπρεπε να πραγματοποιούνταν αντίστοιχα διπλασιασμός στην γεωμετρία του ενυδρείου για το σύνολο των συντεταγμένων (x,y,z).

**Πίνακας 15:** Πίνακας πειραματικών  $k_{La}$  για όγκο  $V=4.5L$  με και χωρίς αλλαγή νερού.

Ροή αέρα (L/min)	$k_{La}$								
rpm	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
<b>Με αλλαγή νερού</b>									
2,5	0,03	0,0271	0,0261	0,0371	0,034	0,0436	0,0348	0,0374	0,0381
3,5	0,0181	0,0193	0,0296	0,0325	0,042	0,0419	0,0537	0,0533	0,0376
5	0,0174	0,0186	0,0212	0,0223	0,028	0,0209	0,0335	0,0413	0,0533
<b>Χωρίς αλλαγή νερού</b>									
2,5	0,0238	0,0131	0,028	0,0145	0,0296	0,0303	0,0304	0,0342	0,0468
3,5	0,0139	0,0223	0,0107	0,0249	0,0095	0,0109	0,0234	0,0365	0,0433
5	0,0154	0,0144	0,0205	0,0083	0,0264	0,0179	0,0243	0,0373	0,042

Πίνακας 16: Πίνακας πειραματικών  $k_{La}$  για όγκο ίσο με  $V=9L$  με και χωρίς αλλαγή νερού.

Ροή αέρα (L/min)	$k_{La}$								
rpm	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
Αλλαγή νερού									
2,5	0,0148	0,016	0,0192	0,0191	0,0197	0,022	0,0237	0,025	0,0267
3,5	0,0146	0,0149	0,0167	0,0185	0,0187	0,0175	0,0196	0,0199	0,0206
5	0,0119	0,0149	0,0178	0,0246	0,0209	0,0217	0,0244	0,0347	0,0303
Χωρίς Αλλαγή									
2,5	0,0133	0,0122	0,014	0,0192	0,0179	0,0198	0,0228	0,0283	0,0293
3,5	0,009	0,0109	0,0132	0,0133	0,0059	0,0108	0,0156	0,0187	0,0208
5	0,0064	0,0091	0,0124	0,0071	0,0067	0,0111	0,0242	0,0285	0,0266

Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων σχετικά με το  $k_{La}$  που μπορούν να γίνουν είναι:

- Για τις ίδιες στροφές (RPM) και τον ίδιο όγκο η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με την ροή αέρα.
- Για την ίδια ροή και τον ίδιο όγκο η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με τον βαθμό περιστροφής.
- Για τον ίδιο ρυθμό περιστροφής και την ίδια ροή αέρα η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με τον όγκο.

Οι παραπάνω συσχετίσεις θα εξεταστούν και όταν το πείραμα εκτελείται χωρίς αλλαγή νερού αλλά με το αρχικό νερό γίνονται όλες οι δοκιμές από 2300-1500 με συγκεκριμένη επιλεγμένη ροή.

Αρχικά θα εξεταστούν οι παρατηρήσεις που μπορούν να προκύψουν για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με **αλλαγή νερού** ύστερα από κάθε δοκιμή.

- Για τις ίδιες στροφές (RPM) και τον ίδιο όγκο η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με την ροή αέρα.

Στην περίπτωση των 9L παρατηρείται αύξηση του συντελεστή μεταφοράς μάζας  $k_{La}$  όσο μειώνεται η ροή αέρα στο ενυδρείο για τις χαμηλές τιμές ρυθμού περιστροφής από 1500 - 1700 κάτι που όπως φαίνεται δεν συνεχίζεται με την αύξηση του ρυθμού περιστροφής δηλαδή από τα 1800, 1900, 2100 -2300.



Για όγκο 4,5L παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά του  $k_{La}$  δηλαδή στις μικρότερες τιμές του ρυθμού περιστροφής παρουσιάζεται μία σχετικά ομαλή αύξηση του  $k_{La}$  με την μείωση της ροής αέρα (έχοντας το μεγαλύτερο  $k_{La}$  για ροή=2,5 L/min) η οποία παύει να ισχύει για τις πολύ υψηλές και τις ακραίες τιμές ρυθμού περιστροφής.

- Για την ίδια ροή και τον ίδιο όγκο η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με τον βαθμό περιστροφής.

Εξετάζοντας τον όγκο των 9L παρατηρείται μία αύξηση του  $k_{La}$  όσο αυξάνει ο ρυθμός περιστροφής με μόνη απομάκρυνση από αυτή τη συμπεριφορά την ακραία τιμές για ροή αέρα 5 L/min.

Στον όγκο των 4,5L η παραπάνω παρατήρηση ισχύει όμως παρουσιάζει κάποιες πολύ μικρές διακυμάνσεις σε ενδιαμέσες τιμές του ρυθμού περιστροφής (π.χ στα 2000RPM και ροή 5) καθώς και η ακραία τιμή που “ξεφεύγει” είναι για την ροή των 3,5L/min.

- Για τον ίδιο ρυθμό περιστροφής και την ίδια ροή αέρα η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με τον όγκο.

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας καταφέρνει να πάρει αρκετά μεγαλύτερες τιμές όταν ο εξεταζόμενος όγκος είναι 4,5L, ειδικά στους μεγαλύτερους ρυθμούς περιστροφής, ενώ όταν διπλασιαστεί γίνεται δυσκολότερο να φθάσει το  $k_{La}$  σε αυτά τα επίπεδα. Όταν η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται είναι πολύ περισσότερη είναι λογικό να λειτουργεί σαν παράγοντας που επιβραδύνει το διαλυμένο οξυγόνο να φτάσει στο 100% συγκριτικά με τα πειράματα που έγιναν για τον μισό όγκο. Έτσι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας προκύπτει μικρότερος σε σχέση με αυτόν των πειραμάτων με όγκο ίσο με 4,5L.

Στη συνέχεια, θα εξεταστούν οι παραπάνω συσχετίσεις για την περίπτωση που όλες οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με **το ίδιο νερό** για συγκεκριμένη ροή συνεχόμενα από τον μέγιστο(2300RPM) επιλεγμένο ρυθμό περιστροφής στον ελάχιστο (1500RPM).

- Για τις ίδιες στροφές (RPM) και τον ίδιο όγκο η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με την ροή αέρα.

Για τον όγκο των 9L στον ίδιο βαθμό περιστροφής και μεταβάλλοντας μόνο την ροή παρουσιάζεται μία παρόμοια τάση όπως αυτή που εμφανίζεται όταν γίνεται αλλαγή του νερού αφού υπάρχει αύξηση του  $k_{La}$  για μείωση της παροχής αέρα, όχι όμως για το σύνολο των δοκιμών αλλά κυρίως στους μικρότερους ρυθμούς περιστροφής.

Όσον αφορά τον όγκο των 4,5L δεν μπορεί εύκολα να γίνει κάποια συσχέτιση καθώς οι τιμές δεν φαίνεται να ακολουθούν μία συγκεκριμένη συμπεριφορά μέσα από την αλλαγή της ροής. Συνεπώς δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα.

- Για την ίδια ροή και τον ίδιο όγκο η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με τον βαθμό περιστροφής.

Μελετώντας τον πίνακα για τον όγκο των 9L εμφανίζεται αύξηση του συντελεστή μεταφοράς μάζας με άνοδο του ρυθμού περιστροφής. Επίσης οι δοκιμές που βρίσκονται μεταξύ των 1800-2000 RPM παρουσιάζουν μία διαφοροποίηση από το σύνολο καθώς αυξάνοντας την περιστροφή δεν αυξάνονται πάντα.

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και όταν ο όγκος υποδιπλασιάζεται και χρησιμοποιείται το ίδιο νερό για το σύνολο των δοκιμών με αύξηση του ρυθμού περιστροφής να οδηγεί σε αύξηση του  $k_{La}$ , έχοντας όμως αποκλίσεις στο πεδίο από 1800 ως 2000RPM.

- Για τον ίδιο ρυθμό περιστροφής και την ίδια ροή αέρα η μεταβολή του  $k_{La}$  σε σχέση με τον όγκο.

Η μεταβολή του  $k_{La}$  συγκριτικά με τον όγκο στην περίπτωση που δεν γίνεται αλλαγή του νερού δεν φαίνεται να έχει διατηρεί ένα συγκεκριμένο μοτίβο καθώς σε άλλες δοκιμές το  $k_{La}$  προκύπτει μεγαλύτερο για όγκο 9L ενώ σε άλλες ισχύει το αντίθετο. Παρόλ' αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι όταν ο εξεταζόμενος όγκος ισούται με 4,5L εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές στον συντελεστή μεταφοράς μάζας σε σχέση με τα πειράματα που έγιναν για διπλάσιο όγκο νερού.

Όσον αφορά τον τρόπο που επηρεάζουν οι νανοφυσαλίδες το συντελεστή μεταφοράς μάζας  $k_{La}$  στις εκάστοτε εξεταζόμενες πειραματικές συνθήκες μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν **χωρίς αλλαγή νερού** για το σύνολο των ρυθμών περιστροφής για συγκεκριμένη ροή αέρα και όγκο παρατηρήθηκε πως η διαδικασία αύξησης του διαλυμένου οξυγόνου μέχρι το 100% κυλούσε πιο ομαλά σε σχέση με τις μεμονωμένες δοκιμές. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται πως η παραμονή των νανοφυσαλίδων στο νερό διευκόλυνε την ομαλότερη άνοδο του διαλυμένου οξυγόνου και ανεξάρτητα από τον ρυθμό περιστροφής που εξεταζόταν ο χρόνος των μετρήσεων ήταν σχεδόν ο ίδιος (προφανώς ο ρυθμός αύξησης του DO άλλαζε γι αυτό και προέκυπτε διαφορετικό  $k_{La}$ ). Η παραπάνω παρατήρηση φαίνεται πως επαληθεύεται και μέσω της διαδικασίας παροχής αέριου αζώτου για την μείωση του διαλυμένου οξυγόνου κάτω από 10% δηλαδή μετά την ολοκλήρωση κάθε δοκιμής, αφού απαιτούνταν σχεδόν ο ίδιος χρόνος για την πτώση του οξυγόνου. Σε αντίθεση με το παραπάνω στην περίπτωση των μεμονωμένων δοκιμών, όταν χρησιμοποιούνταν φρέσκο νερό απαιτούνταν αρκετές φορές μεγάλο χρονικό διάστημα για την μείωση του διαλυμένου οξυγόνου.

### Συσχετίσεις $K_L a$

Έπειτα παρουσιάζεται η προσπάθεια συσχέτισης των πειραματικών μετρήσεων με τον λόγο που ακολουθεί και περιέχει την παροχή αέρα, τον όγκο και τον ρυθμό περιστροφής για τον συντελεστή μεταφοράς μάζας σε τροφοδοτούμενους με αέρα βιοαντιδραστήρες. Επειδή ο συγκεκριμένος λόγος αναφέρεται στις πειραματικές παραμέτρους που εξετάστηκαν θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον αν υπήρχε έστω κάποια μικρή σύνδεση. Στον λόγο που ακολουθεί λοιπόν τοποθετήθηκαν οι πειραματικές τιμές και ως άγνωστοι  $a_1, a_2, a_3$  θεωρήθηκαν οι 3 εκθέτες.

$$\frac{K_L a}{K_L a_0} = \left(\frac{F_{air}}{F_{air0}}\right)^{1.76} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{0.4} \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.4}$$
$$\frac{K_L a}{K_L a_0} = \left(\frac{F_{air}}{F_{air0}}\right)^{a_1} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{a_2} \left(\frac{V_0}{V}\right)^{a_3}$$

Το οποίο παίρνει τη μορφή

$$y = x_1^{a_1} * x_2^{a_2} * x_3^{a_3}$$
$$\ln y = a_1 \ln x_1 + a_2 \ln x_2 + a_3 \ln x_3$$
$$Y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

Μετά από αυτή την επεξεργασία η εξίσωση έχει τη μορφή που φαίνεται παραπάνω και έπειτα με τη βοήθεια του προγράμματος excel υπολογίστηκαν οι άγνωστοι  $a_1, a_2, a_3$ .

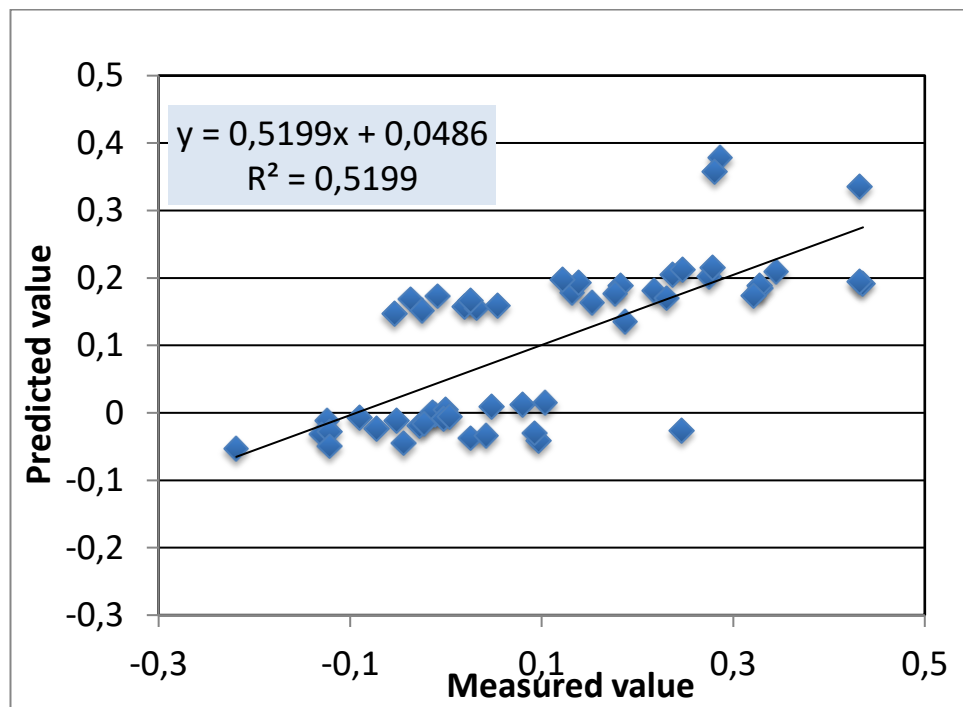
Οι εκθέτες που υπολογίστηκαν είναι αυτοί που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Με αλλαγή νερού	0,1595	-0,14015	0,00483
Χωρίς αλλαγή νερού	0.3198	-0.4612	-0.0652

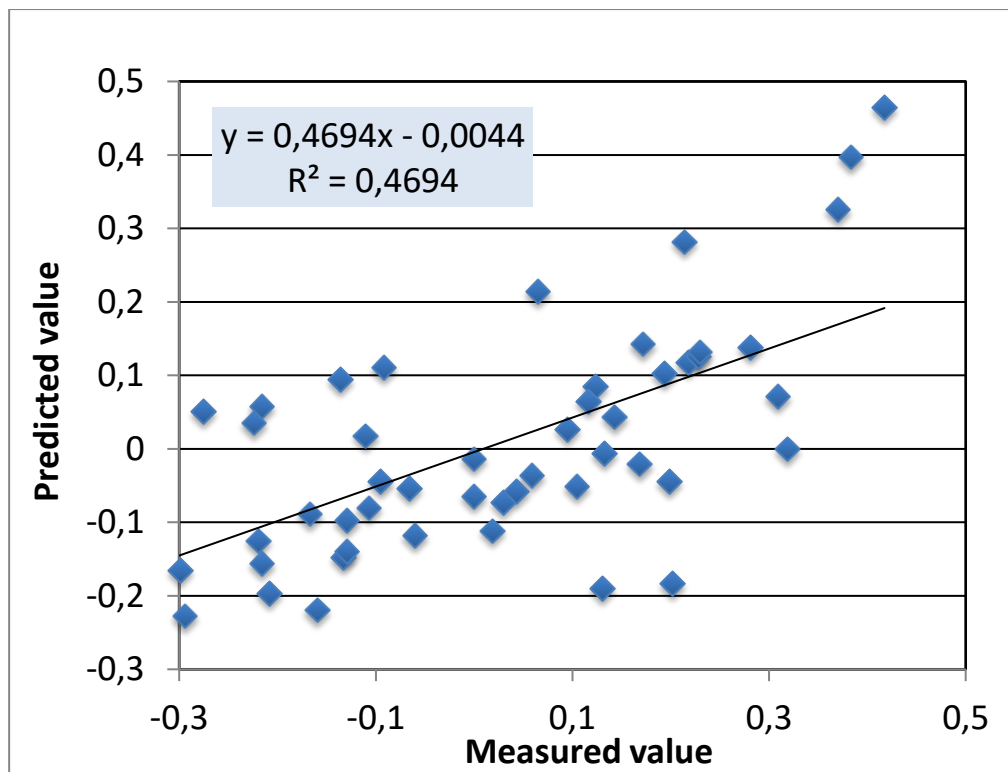
**Πίνακας 17: Πίνακας με τους εκθέτες που υπολογίστηκαν για τα πειραματικά δεδομένα.**

Είναι φανερό ότι δεν υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ των εκθετών που υπολογίστηκαν και βασίζονται στα πειραματικά δεδομένα και στους εκθέτες που ισχύουν για αεριζόμενο βιοαντιδραστήρα. Το γεγονός ότι οι εκθέτες αποκλίνουν αρκετά από τους υπάρχοντες για αντιδραστήρα πιθανότατα οφείλεται αρχικά στο ότι ο ρυθμός περιστροφής και η ροή αέρα δεν αναφέρονται για τον συνολικό όγκο του νερού αλλά για τον ρυθμό παραγωγής των νανοφυσαλίδων. Αυτό σημαίνει ότι δεν γίνεται ανάμειξη στον συνολικό όγκο του νερού αλλά δημιουργείται μία ανάδευση λόγω της λειτουργίας της συσκευής. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι το πείραμα πραγματοποιείται σε ενυδρείο και όχι σε αντιδραστήρα το οποίο

σημαίνει ότι δεν επικρατεί η ίδια κατάσταση και είναι πολύ λογικό να μην αναμένεται να υπάρχει κάποια καλή συσχέτιση. Οι ανωτέρω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται και μέσω των διαγραμμάτων που κατασκευάστηκαν αρχικά για τα πειράματα με αλλαγή νερού και ύστερα για εκείνα χωρίς αλλαγή, στα οποία δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια ιδιαίτερη συσχέτιση κάτι που δηλώνεται και μέσα από το  $R^2$  που μεταξύ των 2 περιπτώσεων το μέγιστο που φτάνει είναι το 0,52.



**Διάγραμμα 39:**Διάγραμμα για την αναγνώριση της ποιότητας συσχέτισης (για τα πειράματα με αλλαγή νερού)



Διάγραμμα 40: Διάγραμμα για την αναγνώριση της ποιότητας συσχέτισης (για τα πειράματα χωρίς αλλαγή νερού)

## Κεφάλαιο 6:Συμπεράσματα

---

- Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας  $k_{La}$ , στα πειράματα με αλλαγή νερού, αυξάνεται με μείωση της ροής αέρα συμπεραίνοντας ότι η μικρότερη επιλεγμένη ροή των 2,5L/min έχει τα καλύτερα αποτελέσματα για το σύνολο των πειραμάτων.
- Ο υποδιπλασιασμός του όγκου νερού που χρησιμοποιήθηκε (4,5L) αποδεικνύει ότι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας αυξάνεται στο μικρότερο όγκο νερού με αποτέλεσμα να έχουμε αρκετά μεγαλύτερες τιμές για το  $k_{La}$  στα 4,5L.
- Η αύξηση του ρυθμού περιστροφής προκαλεί αύξηση στον συντελεστή μεταφοράς μάζας με τις μεγαλύτερες τιμές  $k_{La}$  να συναντώνται στον μέγιστο επιλεγμένο ρυθμό περιστροφής (2300RPM).
- Οι 3 παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν μόνο στην περίπτωση που κάθε πείραμα πραγματοποιούνταν με αλλαγή νερού καθώς για τα πειράματα χωρίς αλλαγή νερού οι συγκεκριμένες παρατηρήσεις δεν ανταποκρίνονται επαρκώς.
- Τα πειράματα που έγιναν με αλλαγή νερού παρουσιάζουν μία μικρή αστάθεια στον ρυθμό αύξησης του οξυγόνου (D.O.) σε σχέση με εκείνα στα οποία το νερό παρέμενε για το σύνολο των πειραματικών δοκιμών στα οποία η διαδικασία δεν παρουσίαζε διακυμάνσεις.
- Η οξυγόνωση πραγματοποιείται πολύ γρηγορότερα σε σχέση με ένα τυπικό αντιδραστήρα με παροχή αέρα.
- Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων χωρίς αλλαγή νερού, η παραμονή των νανοφυσαλίδων, φαίνεται πως δεν επιτρέπει την άνοδο του συντελεστή μεταφοράς μάζας  $k_{La}$  στα επίπεδα που φτάνει όταν το πείραμα διεξάγεται με φρέσκο νερό. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα λόγω της δημιουργίας ισχυρών δεσμών υδρογόνου στην διεπαφή αερίου-νερού με αποτέλεσμα οι νανοφυσαλίδες να παίρνουν τη μορφή «κελύφους» που συγκρατεί ισχυρά τον αέρα που εμπεριέχουν για αρκετό διάστημα.

## Κεφάλαιο 7:Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

---

Μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε για πρώτη φορά η μεταβολή του ρυθμού οξυγόνωσης ( $k_{La}$ ) με σύστημα παραγωγής νανοφουσαλίδων οξυγόνου. Τα αποτελέσματα κρίνονται ιδιαίτερα ενθαρρυντικά γι αυτό προτείνεται η περαιτέρω μελέτη του εν λόγω εγχειρήματος.

Πιο συγκεκριμένα:

- Μελέτη της χρήσης νανοφουσαλίδων αέρα και όζοντος στην απολύμανση πόσιμου νερού. Όπως ήδη έχει τονισθεί, οι ελεύθερες ρίζες που παράγονται από τις νανοφουσαλίδες έχουν σημαντική απολυμαντική δράση. Επομένως, αξίζει να μελετηθεί η επίδραση τους σε ιούς και βακτήρια που χρησιμοποιούνται στον ποιοτικό έλεγχο του νερού και σε αυτά που είναι ανθεκτικά στις “παραδοσιακές” μεθόδους απολύμανσης (π.χ. χλωρίωση)
- Η τεχνολογία των νανοφουσαλίδων μπορεί να εφαρμοστεί στην απομάκρυνση οργανικών ενώσεων από τα λύματα, καθώς προσδοκάται να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος οξείδωσης σε σύγκριση τις συμβατικές μεθόδους.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον επίσης έχει η εφαρμογή των νανοφουσαλίδων σε ένα σύστημα επίπλευσης χαμηλού κόστους. Η μελέτη αυτής της εφαρμογής θα μπορεί να πραγματοποιηθεί πέραν του εργαστηρίου και στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων της πόλης των Χανίων.

## Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

---

- Anup Gurung,Olli Dahl and Kaj Jansson (2016). The fundamental phenomena of nanobubbles and their behavior in wastewater treatment technologies. *Geosystem Engineering*, 133-142.
- Ashutosh Agarwal, Wun Jern Ng, Yu Liu (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology. *Chemosphere*, 1175-1180.
- Fernanda Yumi Ushikuboa,Takuro Furukawa, Ryou Nakagawaa, Masatoshi Enaria,Yoshio Makinoa, Yoshinori Kawagoea, Takeo Shiinab, Seiichi Oshitaa (2010). Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 31-37.
- Kosuke Ebina, K. S. (2013). Oxygen and Air Nanobubble Water Solution Promote the Growth of Plants, Fishes, and Mice. *PLoS One*, 1-6.
- MARUI Tomohiro (2010). *In The 14th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, International Social Science Council*, 43-48.
- Shu Liu, Yoshinori Kawagoe, Yoshio Makino, Seiichi Oshita (2013). Effects of nanobubbles on the physicochemical properties of water:The basis for peculiar properties of water containing nanobubbles. *Chemical Engineering Science*, 250-256.
- Tsuge, H. (2014). *Micro-and Nanobubbles FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*.
- N.Καλογεράκης.(2013). *Τεχνική Χημικών & Βιοχημικών Διεργασιών,Εργαστηριακές Ασκήσεις*.
- Divya Narayan, Development and Applications of Nanobubbles, (2014)
- [www.biotecharticles.com/Nanotechnology-Article/Development-and-Applications-of-Nanobubbles-3129.html](http://www.biotecharticles.com/Nanotechnology-Article/Development-and-Applications-of-Nanobubbles-3129.html)
-



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Για όγκο  $V=9L$  και  $F_{air}=2,5L/min$  οι πίνακες υπολογισμού του  $K_{La}$ .

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm ροή αέρα=2,5		T=17,2	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,82	8,640674	4,5148
30	3,78	39,8314	4,097151
60	6,99	73,65648	3,271222
90	8,4	88,51423	2,441109
120	8,98	94,62592	1,681587
150	9,19	96,83878	1,150959
$k_{La} = 0,0237$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm ροή αέρα=2,5		T=18,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,9	9,719222	4,502925
30	4,61	49,78402	3,916333
60	7,12	76,88985	3,140272
90	8,54	92,22462	2,050962
120	8,8	95,0324	1,602937
$k_{La} = 0,0256$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm ροή αέρα=2,5		T=17,7	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,92	9,745763	4,502631
30	4,31	45,65678	3,99532
60	7,4	78,38983	3,073164
90	8,46	89,61864	2,340011
120	8,98	95,12712	1,583685
$K_{La}=0,025$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm ροή αέρα=2,5		T=17,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,77	8,139535	4,520271
30	3,19	33,72093	4,193874
60	6,13	64,79915	3,56107
90	7,61	80,44397	2,973283
120	8,77	92,70613	1,987034
150	9,1	96,1945	1,336447
$k_{La} = 0,022$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm    ροή αέρα=2,5		T=17,9	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,78	8,280255	4,518738
30	3,24	34,3949	4,183653
60	5,6	59,44798	3,702586
90	7,14	75,79618	3,186511
120	8,35	88,64119	2,429994
150	8,86	94,0552	1,782517
180	9,12	96,81529	1,158362
k <sub>La</sub> =0,0192			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm    ροή αέρα=2,5		T=17,8	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	8,483563	4,516519
30	3,46	36,69141	4,148021
60	6,26	66,38388	3,515006
90	7,49	79,42736	3,023962
120	8,52	90,34995	2,266963
150	8,96	95,01591	1,606252
k <sub>La</sub> =0,0197			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm    ροή αέρα=2,5		T=17,8	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,88	9,331919	4,507205
30	3,33	35,31283	4,169563
60	6,35	67,33828	3,486204
90	7,74	82,07847	2,886003
120	8,44	89,50159	2,351224
150	8,91	94,48568	1,707348
k <sub>La</sub> =0,0191			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm    ροή αέρα=2,5		T=16,7	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,86	8,811475	4,512929
30	3,24	33,19672	4,201752
60	6,08	62,29508	3,629791
90	7,54	77,2541	3,124385
120	8,37	85,7582	2,656182
150	8,86	90,77869	2,221517
180	9,24	94,67213	1,672951
k <sub>La</sub> =0,016			

Για όγκο V=9L και ροή αέρα Fair=2,5L/min χωρίς να γίνει αλλαγή του νερού για το σύνολο των δοκιμών.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm		ροή αέρα=2,5	T=16,9
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,9	9,221311	4,508425
30	3,02	30,94262	4,234938
60	5,8	59,42623	3,703122
90	6,98	71,51639	3,349329
120	8,03	82,27459	2,874999
150	8,67	88,83197	2,413055
180	9,16	93,85246	1,816052
210	9,31	95,38934	1,52837
k <sub>La</sub> =0,0148			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm		ροή αέρα=2,5	T=19,3
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,83	9,090909	4,50986
30	4,44	48,63089	3,939037
60	6,96	76,2322	3,168332
90	8,16	89,37568	2,363145

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm		ροή αέρα=2,5	T=19,2
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,64	6,994536	4,532658
30	4,63	50,60109	3,899928
60	7,22	78,9071	3,048936
90	8,29	90,60109	2,240593
120	8,87	96,93989	1,118451
k <sub>La</sub> =0,0283			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm		ροή αέρα=2,5	T=19,0
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,87	9,487459	4,505488
30	5,15	56,1614	3,780515
60	7,68	83,75136	2,788009
90	8,6	93,78408	1,827114
120	8,9	97,05562	1,0799
k <sub>La</sub> =0,0293			

120	8,6	94,19496	1,758726
150	8,83	96,71413	1,189632
$k_{La} = 0,0228$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm		ροή αέρα=2,5	T=19,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,69	7,574094	4,526407
30	2,74	30,07684	4,247397
60	5,23	57,40944	3,751633
90	6,1	66,95939	3,497738
120	8,12	89,13282	2,385747
150	8,48	93,08452	1,933762
180	8,82	96,81668	1,157923
$k_{La} = 0,0192$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm		ροή αέρα=2,5	T=19,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,66	7,244786	4,529964
30	3,09	33,91877	4,190885
60	5,53	60,70252	3,67116
90	7,21	79,1438	3,037651
120	8,24	90,45005	2,256535
150	8,63	94,73106	1,661828
$k_{La} = 0,0198$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm		ροή αέρα=2,5	T=19,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,67	7,354555	4,52878
30	3,52	38,63886	4,116777
60	6,22	68,27662	3,457054
90	7,42	81,44896	2,920526
120	8,11	89,02305	2,395797
150	8,55	93,85291	1,815979
180	8,74	95,93853	1,401545
$k_{La} = 0,0179$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm ροή αέρα=2,5		T=19,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,66	7,252747	4,529878
30	2,64	29,01099	4,262525
60	4,76	52,30769	3,86477
90	6,16	67,69231	3,475305
120	6,73	73,95604	3,259786
150	7,62	83,73626	2,788938
180	8,34	91,64835	2,122459
210	8,69	95,49451	1,505298
k <sub>La</sub> =0,014			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm ροή αέρα=2,5		T=19,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,64	7,032967	4,532245
30	2,54	27,91209	4,277886
60	5,02	55,16484	3,802993
90	6,29	69,12088	3,43008
120	7,03	77,25275	3,124444
150	7,65	84,06593	2,768459
180	8,1	89,01099	2,396896
210	8,35	91,75824	2,109214
240	8,67	95,27473	1,552926
k <sub>La</sub> =0,0122			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm ροή αέρα=2,5		T=19,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,66	7,244786	4,529964
30	2,56	28,10099	4,275263
60	4,46	48,95719	3,932665
90	5,7	62,56861	3,62251
120	7,14	78,37541	3,073831

150	7,88	86,49835	2,602812
180	8,3	91,10867	2,185076
210	8,55	93,85291	1,815979
240	8,7	95,49945	1,504199
$k_{La} = 0,0133$			

Για όγκο V=9L και Fair=3,5L/min.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ				ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm		ροή αέρα=3.5		T=24,7			
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)	t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,75	9,036145	4,510462	0	0,56	6,746988	4,535316
30	3,6	43,37349	4,036477	30	2,12	25,54217	4,310233
60	6,33	76,26506	3,166948	60	5,1	61,44578	3,652065
90	7,34	88,43373	2,448093	90	7,21	86,86747	2,575092
120	7,9	95,18072	1,572624	120	7,77	93,61446	1,854036
150	8,05	96,98795	1,10262	150	7,99	96,26506	1,317732
180	8,1	97,59036	0,879477	180	8,07	97,22892	1,019239
210	8,18	98,55422	0,368651	210	8,11	97,71084	0,828183
240	8,21	98,91566	0,080969	240	8,16	98,31325	0,522802
270	8,21	98,91566	0,080969	270	8,18	98,55422	0,368651
300	8,23	99,15663	-0,17035	300	8,17	98,43373	0,448694
$k_{La} = 0,0206$				$k_{La} = 0,0199$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm ροή αέρα=3.5		T=24,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,71	8,554217	4,515746
30	4,83	58,19277	3,733069
60	6,72	80,96386	2,94634
90	7,65	92,16867	2,058132
120	7,98	96,14458	1,34948
150	8,04	96,86747	1,141841
180	8,14	98,07229	0,656333
210	8,16	98,31325	0,522802
240	8,2	98,79518	0,18633
270	8,26	99,51807	-0,72996
300	8,31	100,1205	#NUM!
k <sub>La</sub> =0,0196			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm ροή αέρα=3.5		T=24,4	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,96	11,42857	4,483809
30	4,57	54,40476	3,819803
60	6,81	81,07143	2,940672
90	7,57	90,11905	2,290609
120	8	95,2381	1,560648
150	8,16	97,14286	1,049822
180	8,18	97,38095	0,962811
210	8,25	98,21429	0,579818
240	8,32	99,04762	-0,04879
270	8,34	99,28571	-0,33647
300	8,32	99,04762	-0,04879
k <sub>La</sub> =0,0175			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm ροή αέρα=3.5		T=24,8	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	9,638554	4,503818
30	3,63	43,73494	4,030074
60	6,1	73,49398	3,277372

90	7,1	85,54217	2,671236
120	7,65	92,16867	2,058132
150	7,92	95,42169	1,521331
180	8,06	97,10843	1,061798
210	8,13	97,95181	0,716958
240	8,22	99,03614	-0,03681
270	8,22	99,03614	-0,03681
300	8,24	99,27711	-0,3245
$k_{La} = 0,0187$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,2
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,83	9,880952	4,501132
30	3,15	37,5	4,135167
60	5,48	65,2381	3,548522
90	6,63	78,92857	3,047918
120	7,46	88,80952	2,415063
150	7,81	92,97619	1,949306
180	8	95,2381	1,560648
210	8,16	97,14286	1,049822
240	8,25	98,21429	0,579818
270	8,21	97,7381	0,816207
300	8,29	98,69048	0,269664
$k_{La} = 0,0167$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,8
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,85	10,24096	4,497129
30	2,53	30,48193	4,241587
60	4,85	58,43373	3,727289
90	6,15	74,09639	3,254383



ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,6
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,6	7,228916	4,530135
30	2,54	30,60241	4,239852
60	5,37	64,6988	3,563917
90	6,42	77,3494	3,120186
120	7,39	89,03614	2,394604
150	7,87	94,81928	1,644945
180	8,03	96,74699	1,179581
210	8,14	98,07229	0,656333
240	8,17	98,43373	0,448694
k <sub>L</sub> a =0,0185			

120	6,94	83,61446	2,796399
150	7,46	89,87952	2,314561
180	7,78	93,73494	1,834988
210	7,97	96,0241	1,380252
240	8,1	97,59036	0,879477
270	8,12	97,83133	0,774116
300	8,19	98,6747	0,28164
k <sub>L</sub> a =0,0146			
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,9
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,64	7,710843	4,524927
30	2,77	33,37349	4,199102
60	5,19	62,53012	3,623537
90	6,35	76,50602	3,156744
120	7,24	87,22892	2,547184
150	7,66	92,28916	2,042628
180	7,86	94,6988	1,667934
210	8,03	96,74699	1,179581
240	8,1	97,59036	0,879477
270	8,13	97,95181	0,716958
300	8,21	98,91566	0,080969
k <sub>L</sub> a =0,0149			

Για όγκο V=9L και Fair=3,5L/min με το ίδιο νερό.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm	ροή αέρα=3.5	T=24,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	9,52381	4,505087
30	3,65	43,45238	4,035083
60	6,2	73,80952	3,265396
90	7,47	88,92857	2,404368
120	7,95	94,64286	1,678431
150	8,12	96,66667	1,203973
180	8,15	97,02381	1,090644
210	8,24	98,09524	0,644357
240	8,2	97,61905	0,867501
k <sub>La</sub> =0,0208			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm	ροή αέρα=3.5	T=24,4	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,74	8,809524	4,51295
30	1,83	21,78571	4,359452
60	4,09	48,69048	3,937876
90	5,74	68,33333	3,455265
120	6,53	77,7381	3,102877
150	7,16	85,2381	2,69205
180	7,66	91,19048	2,175833
210	7,9	94,04762	1,783791
240	8,06	95,95238	1,398129
270	8,15	97,02381	1,090644
300	8,23	97,97619	0,704982
330	8,26	98,33333	0,510826
k <sub>La</sub> =0,0133			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,76	9,047619	4,510336
30	2,02	24,04762	4,330107
60	4,55	54,16667	3,825012
90	5,89	70,11905	3,397221
120	6,85	81,54762	2,915193
150	7,37	87,7381	2,506497
180	7,74	92,14286	2,061423
210	7,99	95,11905	1,58534
240	8,08	96,19048	1,337504
270	8,16	97,14286	1,049822
300	8,21	97,7381	0,816207
330	8,22	97,85714	0,76214
k <sub>La</sub> =0,0132			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,3
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,77	9,166667	4,509026
30	3,75	44,64286	4,013806
60	6,28	74,7619	3,228355
90	7,28	86,66667	2,590267
120	7,91	94,16667	1,763589
150	8,08	96,19048	1,337504
180	8,16	97,14286	1,049822
210	8,21	97,7381	0,816207
240	8,27	98,45238	0,436718
K <sub>La</sub> =0,0187			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,73	8,690476	4,514255
30	2,2	26,19048	4,301488
60	4,33	51,54762	3,880581
90	5,8	69,04762	3,43245
120	6,38	75,95238	3,180036
150	7,03	83,69048	2,791749
180	7,43	88,45238	2,446479
210	7,7	91,66667	2,120264
240	7,91	94,16667	1,763589
270	8,04	95,71429	1,455287
300	8,1	96,42857	1,272966
330	8,18	97,38095	0,962811
360	8,23	97,97619	0,704982
k <sub>La</sub> =0,109			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,75	8,928571	4,511644
30	1,88	22,38095	4,351813
60	3,45	41,07143	4,076326
90	4,41	52,5	3,86073
120	5,17	61,54762	3,649421
150	5,92	70,47619	3,385197
180	6,31	75,11905	3,214103
210	6,62	78,80952	3,053552
240	6,93	82,5	2,862201
270	7,13	84,88095	2,715955
300	7,33	87,2619	2,544597
330	7,52	89,52381	2,349105
360	7,61	90,59524	2,241216
390	7,71	91,78571	2,105875
420	7,81	92,97619	1,949306
450	7,87	93,69048	1,84206
480	7,92	94,28571	1,742969
510	7,96	94,7619	1,655958
k <sub>La</sub> =0,0059			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm		ροή αέρα=3.5	T=24,3
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,81	9,642857	4,50377
30	3,09	36,78571	4,14653
60	5,95	70,83333	3,373027
90	7,07	84,16667	2,762117
120	7,72	91,90476	2,091276
150	7,91	94,16667	1,763589
180	7,94	94,52381	1,70041
210	8,05	95,83333	1,427116
240	8,12	96,66667	1,203973
270	8,17	97,2619	1,007263
300	8,21	97,7381	0,816207
Kla=0,0156			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm		ροή αέρα=5	T=22,6
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,87	10,15169	4,498123
30	2,34	27,30455	4,286279
60	3,53	41,1902	4,074309
90	6,5	75,84597	3,184451
120	8,08	94,28238	1,743553
150	8,46	98,71645	0,249628

180	8,52	99,41657	-0,53883
$k_{La} = 0,0347$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm		ροή αέρα=3.5	
		T=24,4	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,71	8,452381	4,516859
30	2,04	24,28571	4,326967
60	4,01	47,7381	3,956268
90	5,23	62,2619	3,63067
120	6,21	73,92857	3,26084
150	6,89	82,02381	2,889048
180	7,38	87,85714	2,496741
210	7,68	91,42857	2,148434
240	7,87	93,69048	1,84206
270	7,96	94,7619	1,655958
300	8,08	96,19048	1,337504
330	8,13	96,78571	1,167605
360	8,24	98,09524	0,644357
$k_{La} = 0,0108$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm		ροή αέρα=3.5	
		T=24,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,74	8,809524	4,51295
30	1,4	16,66667	4,422849
60	2,5	29,7619	4,251891
90	3,76	44,7619	4,011653
120	4,96	59,04762	3,71241
150	5,84	69,52381	3,416946
180	6,44	76,66667	3,149883
210	6,85	81,54762	2,915193
240	7,3	86,90476	2,572249
270	7,67	91,30952	2,162228
300	7,84	93,33333	1,89712
330	7,95	94,64286	1,678431
360	8,04	95,71429	1,455287
390	8,09	96,30952	1,305755
420	8,19	97,5	0,916291
$k_{La} = 0,009$			

Για  $V=9L$  και  $F_{air}=5L/min$ .

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm    ροή αέρα=5		T=16,9	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,76	7,85124	4,523404
30	4,97	51,34298	3,884796
60	7,93	81,92149	2,894724
90	9,14	94,42149	1,718922
120	9,4	97,10744	1,062143
$k_La = 0,0303$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm		ροή αέρα=5	T=22,9
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,9	10,53864	4,493807
30	3,41	39,92974	4,095515
60	6,01	70,37471	3,388628
90	7,31	85,59719	2,667423
120	7,92	92,74005	1,982373
150	8,2	96,01874	1,3816
180	8,37	98,00937	0,688452
210	8,52	99,76581	-1,45161
k <sub>L</sub> a =0,0217			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm		ροή αέρα=5	T=22,7
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,95	11,12412	4,487241
30	3,67	42,97424	4,043503
60	6,91	80,91335	2,948989
90	7,85	91,92037	2,089345
120	8,2	96,01874	1,3816
150	8,32	97,42389	0,946281
180	8,43	98,71194	0,253134
210	8,46	99,06323	-0,06532
k <sub>L</sub> a =0,0244			



ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm		ροή αέρα=5	T=17,5
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	1	10,37344	4,495652
30	4,44	46,05809	3,987908
60	7	72,61411	3,310028
90	8,42	87,3444	2,5381
120	9,08	94,19087	1,759431
150	9,42	97,71784	0,825121
k <sub>La</sub> =0,0246			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm		ροή αέρα=5	T=23,2
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,67	7,882353	4,523067
30	2,24	26,35294	4,299284
60	4,85	57,05882	3,759831
90	6,45	75,88235	3,182944
120	7,33	86,23529	2,622108
150	8,02	94,35294	1,731135
180	8,38	98,58824	0,34484
k <sub>La</sub> =0,0209			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm		ροή αέρα=5	T=23,3
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,94	11,07185	4,487829
30	2,48	29,21084	4,259706
60	4,86	57,24382	3,755514
90	5,66	66,66667	3,506558
120	6,96	81,9788	2,891549
150	7,66	90,22379	2,279952
180	8,07	95,053	1,598781
210	8,23	96,93757	1,119208
240	8,34	98,23322	0,569161

270	8,39	98,82214	0,163696
$k_{La} = 0,0178$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm ροή αέρα=5		T=23,4	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,91	10,71849	4,491794
30	1,36	16,01885	4,430592
60	2,63	30,97762	4,234431
90	3,98	46,87868	3,972578
120	5,5	64,7821	3,561555
150	6,06	71,37809	3,354172
180	7,03	82,8033	2,844718
210	7,3	85,98351	2,640234
240	7,65	90,10601	2,291928
270	8,09	95,28857	1,54999
300	8,16	96,11307	1,357619
330	8,27	97,40872	0,952153
360	8,31	97,87986	0,751483
$k_{La} = 0,0119$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm		ροή αέρα=5	T=23,5
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	9,4451	4,505956
30	1,49	17,5915	4,411689
60	3,06	36,12751	4,156889
90	4,72	55,72609	3,790396
120	6,12	72,25502	3,323055
150	7,22	85,24203	2,691783
180	7,52	88,78394	2,417346
210	7,98	94,21488	1,75529
240	8,13	95,98583	1,38983
270	8,24	97,28453	0,998964
300	8,32	98,22904	0,57152
k <sub>La</sub> =0,0149			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm		ροή αέρα=5	T=21,9
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,75	8,610792	4,515127
30	2,93	33,63949	4,195102
60	6,48	74,39724	3,2427
90	7,74	88,86338	2,410239
120	8,44	96,90011	1,131365
150	8,65	99,31114	-0,37271
k <sub>La</sub> =0,0285			

Για V=9L και Fair=5L/min χωρίς αλλαγή νερού.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm ροή αέρα=5		T=22,2	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,83	9,584296	4,504418
30	3,76	43,41801	4,035691
60	6,62	76,44342	3,159405
90	8,01	92,49423	2,015673
120	8,26	95,38106	1,530165
150	8,65	99,88453	-2,15871
k <sub>La</sub> =0,0266			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm ροή αέρα=5		T=21,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,71	8,095781	4,520747
30	2,51	28,6203	4,268014
60	5,39	61,45952	3,651709
90	7,52	85,74686	2,656977
120	8,02	91,44812	2,146151
150	8,55	97,49145	0,919706
180	8,63	98,40365	0,467721

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm ροή αέρα=5		T=21,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,66	7,5	4,527209
30	2,04	23,18182	4,341441
60	4,03	45,79545	3,992765
90	5,57	63,29545	3,602901
120	6,61	75,11364	3,21432
150	7,35	83,52273	2,801982
180	7,63	86,70455	2,587422
210	7,96	90,45455	2,256065
240	8,17	92,84091	1,968383
270	8,31	94,43182	1,717069
300	8,51	96,70455	1,192544
k <sub>La</sub> =0,0111			

$k_{La} = 0,0242$

# ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

N=1900rpm ροή αέρα=5 T=21,1

t(min) D.O.(mg/l) D.O.(%) Y=LN(100-DO)

0 0,69 7,823129 4,523709

30 1,08 12,2449 4,47455

60 3,54 40,13605 4,092074

90 4,78 54,19501 3,824393

120 5,9 66,89342 3,499732

150 6,41 72,67574 3,307775

180 6,64 75,28345 3,207473

210 6,82 77,32426 3,121295

240 6,99 79,2517 3,032464

270 7,35 83,33333 2,813411

300 7,66 86,84807 2,576568

330 7,9 89,56916 2,344767

360 8,14 92,29025 2,042486

390 8,29 93,99093 1,79327

420 8,35 94,6712 1,673126

$k_{La} = 0,0067$

# ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

N=1700rpm ροή αέρα=5 T=21,2

t(min) D.O.(mg/l) D.O.(%) Y=LN(100-DO)

0 0,61 6,92395 4,533417

30 1,48 16,79909 4,421258

60 3,06 34,73326 4,178483

90 4,66 52,89444 3,852391

120 5,76 65,38025 3,544424

150 6,8 77,18502 3,127417

180 7,46 84,6765 2,729387

210 7,87 89,33031 2,367407

240 8,17 92,73553 1,982996

270 8,36 94,89217 1,630775

300 8,56 97,16232 1,042988

$k_{La} = 0,0124$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm	ροή αέρα=5		T=21,2
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,5	5,668934	4,546811
30	0,85	9,637188	4,503833
60	2	22,67574	4,348008
90	3,97	45,01134	4,007127
120	5,02	56,9161	3,763149
150	5,82	65,98639	3,526761
180	6,46	73,24263	3,28681
210	7	79,36508	3,026985
240	7,36	83,44671	2,806585
270	7,64	86,62132	2,593663
300	7,83	88,77551	2,418098
330	7,93	89,9093	2,311614
360	8,1	91,83673	2,099644
390	8,24	93,42404	1,883421
420	8,32	94,33107	1,735001
k <sub>La</sub> =0,0071			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm	ροή αέρα=5		T=21,1
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,69	7,823129	4,523709
30	2,24	25,39683	4,312183
60	4,12	46,71202	3,975711
90	5,23	59,29705	3,706301
120	6,12	69,38776	3,4214
150	6,8	77,09751	3,131246
180	7,22	81,85941	2,898152
210	7,56	85,71429	2,65926
240	7,84	88,88889	2,407946
270	8,09	91,72336	2,113438
300	8,27	93,76417	1,830311
330	8,43	95,57823	1,48654
k <sub>La</sub> =0,0091			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm    ροή αέρα=5		T=21,1	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,63	7,134768	4,531149
30	1,33	15,06229	4,441918
60	2,69	30,46433	4,24184
90	4,56	51,64213	3,878629
120	5,41	61,2684	3,656656
150	5,78	65,45866	3,542157
180	6,2	70,21518	3,393999
210	6,53	73,95243	3,259924
240	6,89	78,02945	3,089703
270	7,24	81,9932	2,890749
300	7,53	85,27746	2,689379
330	7,81	88,44847	2,446818
360	7,97	90,26048	2,276192
390	8,13	92,07248	2,07034
420	8,35	94,56399	1,693046
450	8,44	95,58324	1,485407
$k_{La} = 0,0064$			

Για όγκο V=4,5L και Fair=2,5L/min.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm	ροή αέρα=2,5	T=20,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	9,029345	4,510537
30	4,67	52,7088	3,856324
60	7,68	86,68172	2,589138
90	8,56	96,614	1,219651
120	8,76	98,87133	0,121038
k <sub>La</sub> =0,0381			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm	ροή αέρα=2,5	T=20,1	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,79	8,856502	4,512435
30	5,3	59,41704	3,703348
60	7,72	86,54709	2,599196
90	8,56	95,96413	1,395223
120	8,78	98,43049	0,450761
k <sub>La</sub> =0,0348			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm	ροή αέρα=2,5	T=20,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,69	7,76153	4,524377
30	4,46	50,16873	3,908643
60	7,01	78,85264	3,051515
90	8,27	93,02587	1,942207
120	8,81	99,10011	-0,10549
k <sub>La</sub> =0,0374			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm	ροή αέρα=2,5	T=20,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	9,019166	4,510649
30	4,51	50,84555	3,894967
60	8,27	93,23563	1,91167
90	8,67	97,74521	0,813057
k <sub>La</sub> =0,0436			



ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm ροή αέρα=2,5		T=20,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	9,029345	4,510537
30	4,35	49,09707	3,929921
60	7,24	81,71558	2,90605
90	8,44	95,25959	1,556123
120	8,7	98,19413	0,591042
k <sub>L</sub> a =0,034			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm ροή αέρα=2,5		T=17,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,95	9,854772	4,501422
30	3,54	36,72199	4,147538
60	7,09	73,54772	3,275342
90	8,6	89,21162	2,37847
120	9,22	95,64315	1,471749
k <sub>L</sub> a =0,0261			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm ροή αέρα=2,5		T=19,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,91	9,97807	4,500053
30	4,91	53,83772	3,832163
60	7,8	85,52632	2,672332
90	8,71	95,50439	1,503102
120	9,02	98,90351	0,092115
k <sub>L</sub> a =0,0371			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm T=17.3		T=17,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,96	9,927611	4,500614
30	4,38	45,29473	4,00196
60	7,43	76,83557	3,142618
90	8,77	90,69286	2,230781
120	9,31	96,27715	1,314491
k <sub>L</sub> a =0,0271			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm		ροή αέρα=2,5	T=19,6
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,88	9,649123	4,503701
30	3,59	39,36404	4,104888
60	6,57	72,03947	3,330794
90	7,97	87,39035	2,534462
120	8,92	97,80702	0,785262
k <sub>La</sub> =0,03			

Για V=4,5L και Fair=2,5L/min χωρίς αλλαγή νερού.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm		ροή αέρα=2,5	T=17,9
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	8,492569	4,51642
30	5,77	61,25265	3,657062
60	8,18	86,83652	2,577446
90	8,91	94,58599	1,688991
120	9,18	97,45223	0,935219
k <sub>La</sub> =0,0304			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm		ροή αέρα=2,5	T=17,8
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,84	8,898305	4,511976
30	5,26	55,72034	3,790525
60	7,95	84,2161	2,75899
90	8,96	94,91525	1,626245
120	9,29	98,41102	0,463094
k <sub>La</sub> =0,0342			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ		
N=2000rpm	ροή αέρα=2,5	T=17,9

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm ροή αέρα=2,5		T=17,9	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,79	8,395324	4,517482
30	4,48	47,60893	3,958736
60	7,38	78,42721	3,071433
90	8,66	92,02976	2,075715
120	9,15	97,23698	1,016324
k <sub>La</sub> =0,0296			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm ροή αέρα=2,5		T=17,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,96	10,11591	4,498521
30	5,48	57,74499	3,743723
60	8,77	92,41307	2,026428
90	9,35	98,52476	0,388819
k <sub>La</sub> =0,0468			

t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,74	7,863974	4,523266
30	5,35	56,85441	3,76458
60	7,79	82,78427	2,845823
90	8,82	93,73007	1,835764
120	9,17	97,44952	0,936281
k <sub>La</sub> =0,0303			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm ροή αέρα=2,5		T=18,0	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,74	7,87234	4,523175
30	3,66	38,93617	4,11192
60	7,14	75,95745	3,179825
90	8,1	86,17021	2,626825
120	8,41	89,46809	2,35441
150	8,63	91,80851	2,103096
180	8,65	92,02128	2,076778
210	8,82	93,82979	1,819733
240	8,98	95,53191	1,49696
k <sub>La</sub> =0,0145			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm ροή αέρα=2,5		T=18,0	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,75	7,978723	4,52202
30	2,48	26,38298	4,298876
60	5,51	58,61702	3,72287
90	5,89	62,65957	3,620077
120	7,47	79,46809	3,02198
150	8,44	89,78723	2,323639
180	8,61	91,59574	2,128738
210	8,68	92,34043	2,035956
240	8,78	93,40426	1,886425
$k_{La} = 0,0131$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm ροή αέρα=2,5		T=18,0	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,61	6,489362	4,538075
30	4,65	49,46809	3,922605
60	7,39	78,61702	3,062595
90	8,55	90,95745	2,201942
120	9,09	96,70213	1,193278
$k_{La} = 0,028$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm ροή αέρα=2,5		T=18,0	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,69	7,340426	4,528932
30	3,25	34,57447	4,180913
60	3,96	42,12766	4,05824
90	8,03	85,42553	2,679271
120	8,78	93,40426	1,886425
150	9,09	96,70213	1,193278
$k_{La} = 0,0238$			

Για V=4,5L και Fair=3,5L/min.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm	ροή αέρα=3,5	T=17,1	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,96	9,948187	4,500385
30	5,64	58,4456	3,727004
60	8,65	89,63731	2,338212
90	9,33	96,68394	1,198778
k <sub>La</sub> =0,0376			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm	ροή αέρα=3,5	T=19,2	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,89	9,673913	4,503426
30	5,13	55,76087	3,78961
60	8,42	91,52174	2,137505
90	9,13	99,23913	-0,27329
k <sub>La</sub> =0,0533			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm	ροή αέρα=3,5	T=19,1	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,85	9,189189	4,508778
30	4,96	53,62162	3,836833
60	7,94	85,83784	2,650574
90	8,83	95,45946	1,513046
120	9,2	99,45946	-0,61519
k <sub>La</sub> =0,0419			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm	ροή αέρα=3,5	T=19,0	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	1,27	13,7149	4,457657
30	4,22	45,57235	3,996872
60	6,81	73,54212	3,275554
90	8,27	89,30886	2,369416
120	8,99	97,08423	1,070133
150	9,2	99,35205	-0,43394
k <sub>La</sub> =0,0325			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm ροή αέρα=3,5		T=19,2	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,95	10,30369	4,49643
30	5,47	59,32755	3,705551
60	8,08	87,63557	2,514823
90	8,96	97,18004	1,036722
120	9,21	99,89154	-2,22138
k <sub>La</sub> =0,0537			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm ροή αέρα=3,5		T=19,1	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,73	7,908992	4,522777
30	4,99	54,06284	3,827274
60	6,87	74,4312	3,241373
90	8,5	92,09101	2,068
120	8,99	97,39978	0,955595
k <sub>La</sub> =0,0296			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm ροή αέρα=3,5		T=19,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,73	7,934783	4,522497
30	4,5	48,91304	3,933529
60	7,6	82,6087	2,85597
90	8,75	95,1087	1,587459
120	9,15	99,45652	-0,60977
k <sub>La</sub> =0,042			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm ροή αέρα=3,5		T=19,0	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,96	10,36717	4,495722
30	3,28	35,42117	4,167887
60	6,35	68,57451	3,447619
90	7,94	85,74514	2,657098
120	8,54	92,22462	2,050962
150	8,82	95,24838	1,558486
180	8,92	96,32829	1,300656
k <sub>La</sub> =0,0193			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm		ροή αέρα=3,5	T=19,2
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	1,02	11,05092	4,488064
30	3,03	32,82774	4,20726
60	5,4	58,50488	3,725576
90	6,99	75,73131	3,189187
120	8,09	87,64897	2,513739
150	8,71	94,3662	1,728785
180	8,83	95,66631	1,46642
k <sub>La</sub> =0,0181			

Για όγκο V=4,5L και Fair=3,5L/min χωρίς αλλαγή νερού.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ				ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm		ροή αέρα=3,5	T=21,5	N=2200rpm		ροή αέρα=3,5	T=21,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)	t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,81	9,353349	4,506969	0	0,71	8,179724	4,519833
30	5,16	59,5843	3,699218	30	4,53	52,18894	3,867257
60	8,38	96,76674	1,17349	60	7,31	84,21659	2,758959
90	8,42	97,22864	1,019339	90	8,38	96,54378	1,240176
k <sub>La</sub> =0,0433				k <sub>La</sub> =0,0365			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm    ροή αέρα=3,5		T=21,3	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,81	9,321059	4,507325
30	5,15	59,26352	3,707124
60	7,51	86,42117	2,608512
90	7,8	89,75834	2,326463
120	8,22	94,59148	1,687975
150	8,64	99,42463	-0,55274
k <sub>La</sub> =0,0234			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm    ροή αέρα=3,5		T=21,5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,75	8,650519	4,514693
30	3,2	36,90888	4,14458
60	5,68	65,51326	3,540575
90	6,97	80,39216	2,97593
120	7,19	82,92964	2,837343
150	7,33	84,54441	2,737971
180	7,62	87,88927	2,494092
210	7,84	90,42676	2,258972

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm    ροή αέρα=3,5		T=21,4	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,72	8,304498	4,518473
30	2,98	34,3714	4,184012
60	5,51	63,55248	3,595873
90	6,81	78,54671	3,065878
120	7,31	84,31373	2,752786
150	7,57	87,31257	2,540612
180	7,64	88,11995	2,47486
210	7,82	90,19608	2,282782
240	8,17	94,23299	1,752154
270	8,2	94,57901	1,690279
k <sub>La</sub> =0,0109			



240	8,01	92,38754	2,029786
270	8,15	94,00231	1,791375
$k_{La} = 0,0095$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm		ροή αέρα=3,5	T=21,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,72	8,294931	4,518578
30	2,62	30,18433	4,245858
60	5,71	65,78341	3,532711
90	7,26	83,64055	2,794806
120	7,58	87,32719	2,539459
150	7,76	89,40092	2,360767
180	7,87	90,6682	2,233428
210	7,94	91,47465	2,143044
240	8,01	92,28111	2,043671
270	8,03	92,51152	2,013366
300	8,4	96,77419	1,171183
$k_{La} = 0,0107$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm		ροή αέρα=3,5	T=21,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,75	8,650519	4,514693
30	3,86	44,52134	4,015998
60	6,54	75,43253	3,201423
90	7,6	87,65859	2,51296
120	8,28	95,50173	1,503693
150	8,45	97,46251	0,931174
180	8,62	99,4233	-0,55043
$k_{La} = 0,0249$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm		ροή αέρα=3,5	T=21,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,65	7,488479	4,527333

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm    ροή αέρα=3,5		T=21,4	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,63	7,258065	4,529821
30	2,12	24,42396	4,325139
60	4,28	49,30876	3,925753
90	5,89	67,85714	3,47019
120	6,96	80,18433	2,986473
150	7,58	87,32719	2,539459
180	7,93	91,35945	2,156467
210	8,2	94,47005	1,710179
240	8,35	96,19816	1,335486
k <sub>L</sub> a =0,0139			

30	1,71	19,70046	4,385764
60	3,56	41,01382	4,077303
90	6,78	78,1106	3,086003
120	7,86	90,553	2,245698
150	8,35	96,19816	1,335486
k <sub>L</sub> a =0,0223			

Για V=4,5L και Fair=5L/min.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm ροή αέρα=5		T=19,8	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,78	8,571429	4,515558
30	4,9	53,84615	3,83198
60	7,96	87,47253	2,527924
90	8,77	96,37363	1,288233
120	9,09	99,89011	-2,20827
k <sub>La</sub> =0,0533			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm ροή αέρα=5		T=16.5	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,84	8,641975	4,5147861
30	4,56	46,91358	3,9719211
60	8,51	87,55144	2,5216049
90	9,28	95,47325	1,510004
120	9,52	97,94239	0,7215467
k <sub>La</sub> =0,0335			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm ροή αέρα=5		T=19,4	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,91	9,912854	4,500777
30	5	54,46623	3,818454
60	8,18	89,10675	2,388143
90	8,94	97,38562	0,961027
120	9,11	99,23747	-0,27112
k <sub>La</sub> =0,0413			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm ροή αέρα=5		T=17,4	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,76	7,916667	4,522694
30	5,1	53,125	3,8474845
60	7,09	73,85417	3,2636898
90	7,95	82,8125	2,8441824
120	9,02	93,95833	1,7986799
150	9,19	95,72917	1,451809
k <sub>La</sub> =0,0209			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm	ροή αέρα=5	T=19,0	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,73	7,891892	4,522963
30	0,75	8,108108	4,5206128
60	6,99	75,56757	3,1959114
90	8,32	89,94595	2,3079759
120	8,77	94,81081	1,6465775
150	9,09	98,27027	0,5479652
k <sub>La</sub> =0,028			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm	ροή αέρα=5	T=21,0	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,83	9,399773	4,5064567
30	2,01	22,76331	4,3468746
60	4,51	51,07588	3,8902706
90	6,73	76,21744	3,1689525
120	7,8	88,33522	2,456574
150	8,2	92,86523	1,9649797
180	8,44	95,58324	1,4854066
210	8,64	97,84824	0,766284
k <sub>La</sub> =0,0186			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm	ροή αέρα=5	T=21.2	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	1,12	12,74175	4,4688721
30	3,77	42,88965	4,0449854
60	6,76	76,90557	3,1395913
90	7,94	90,32992	2,2690365
120	8,27	94,08419	1,777629
150	8,53	97,04209	1,0844818
180	8,62	98,06598	0,6595986
k <sub>La</sub> =0,0223			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm		ροή αέρα=5	T=20,9
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,98	11,07345	4,4878108
30	3	33,89831	4,1911944
60	6,29	71,07345	3,36476
90	7,7	87,00565	2,5645147
120	8,24	93,10734	1,9304564
150	8,5	96,0452	1,3749306
180	8,63	97,51412	0,910625
k <sub>La</sub> =0,0212			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm		ροή αέρα=5	T=20,9
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	9,039548	4,5104248
30	3,12	35,25424	4,1704683
60	5,99	67,68362	3,4755744
90	7,51	84,85876	2,7174223
120	7,92	89,49153	2,352182
150	8,26	93,33333	1,89712
180	8,55	96,61017	1,2207799
210	8,59	97,06215	1,0776791
k <sub>La</sub> =0,0174			

Για V=4,5L και Fair=5L/min χωρίς αλλαγή νερού.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2300rpm		ροή αέρα=5	T=19,1
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	1,08	11,68831	4,480872
30	3,52	38,09524	4,125597
60	7,96	86,14719	2,628488
90	8,87	95,99567	1,387376
120	9,11	98,59307	0,341407
k <sub>La</sub> =0,042			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2200rpm		ροή αέρα=5	T=19,1
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,85	9,199134	4,508669
30	4,77	51,62338	3,879017
60	8,01	86,68831	2,588642
90	8,88	96,1039	1,359977
120	9,13	98,80952	0,174353
k <sub>La</sub> =0,0373			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2100rpm		ροή αέρα=5	T=19,2
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,89	9,663409	4,503543
30	3,5	38,00217	4,127099
60	7,23	78,50163	3,067977
90	8,01	86,97068	2,567202
120	8,67	94,13681	1,768694
150	8,98	97,50271	0,915204

$$k_{La} = 0,0243$$

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1900rpm		ροή αέρα=5	T=19,5
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,86	9,388646	4,50658
30	3,91	42,68559	4,048552
60	7,49	81,76856	2,903148
90	8,17	89,19214	2,380274
120	8,68	94,75983	1,656355
150	9,01	98,36245	0,493204
$k_{La} = 0,0264$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm		ροή αέρα=5	T=19,4
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,82	8,932462	4,511601
30	3,24	35,29412	4,169852
60	5,89	64,16122	3,579031
90	7,45	81,15468	2,936264
120	8,16	88,88889	2,407946
150	8,56	93,24619	1,910107
180	8,81	95,9695	1,393891
$k_{La} = 0,0179$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1800rpm		ροή αέρα=5	T=19,6
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,8	8,733624	4,513782
30	2,4	26,20087	4,301347
60	3,76	41,04803	4,076723
90	4,55	49,67249	3,918552
120	5,31	57,96943	3,738397

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1700rpm		ροή αέρα=5	T=19,7
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,82	8,961749	4,51128
30	2,88	31,47541	4,227193
60	6,16	67,3224	3,48669
90	7,54	82,40437	2,86765
120	8,29	90,60109	2,240593
150	8,69	94,97268	1,614888
180	8,92	97,48634	0,92174
$k_{La} = 0,0205$			

150	5,9	64,41048	3,572051
180	6,42	70,08734	3,398282
210	7,57	82,64192	2,854058
240	8,26	90,17467	2,284963
270	8,64	94,32314	1,736398
$k_{La} = 0,0083$			

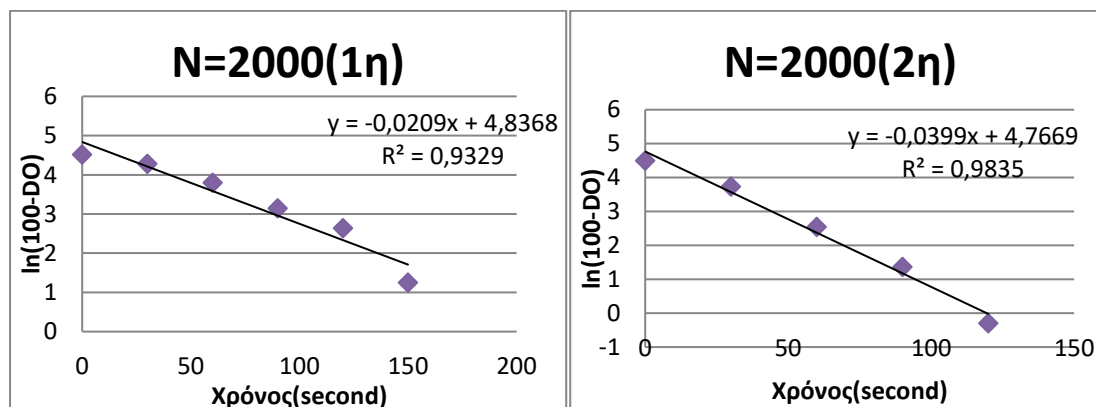
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1500rpm		ροή αέρα=5	T=19,7
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,76	8,351648	4,517959
30	2,63	28,9011	4,264072
60	5,12	56,26374	3,778178
90	6,73	73,95604	3,259786
120	7,56	83,07692	2,828678
150	8,16	89,67033	2,33502
180	8,51	93,51648	1,869263
210	8,75	96,15385	1,347074
$k_{La} = 0,0154$			

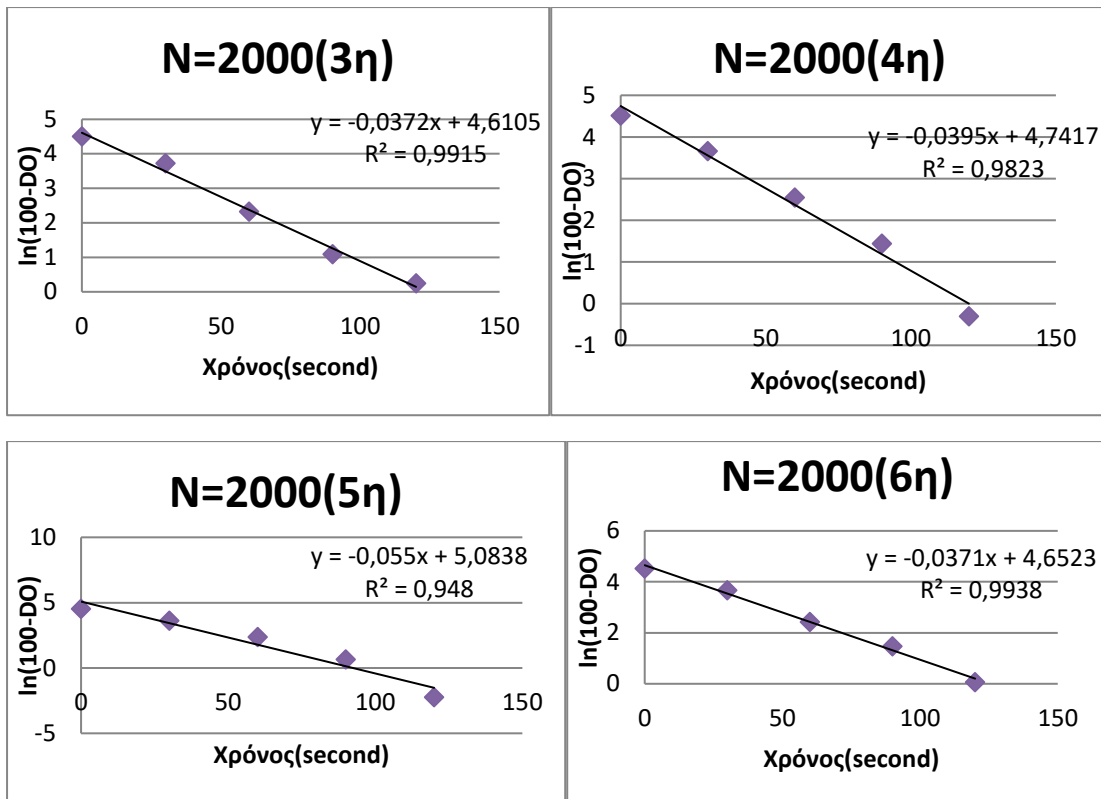


ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=1600rpm    ροή αέρα=5		T=19,7	
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,73	8,004386	4,521741
30	2,44	26,75439	4,293818
60	4,98	54,60526	3,815396
90	6,88	75,4386	3,201176
120	7,67	84,10088	2,766264
150	8,12	89,03509	2,3947
180	8,38	91,88596	2,093595
210	8,62	94,51754	1,701553
$k_La = 0,0144$			

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.2

Γραφήματα και πίνακες υπολογισμού του τυπικού σφάλματος  $\sigma_{\chi}$ .





ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
ροή			
N=2000rpm	αέρα=3,5	V=4.5L	T=18,1
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,79	8,359788	4,51787
30	2,62	27,72487	4,28048
60	5,24	55,44974	3,796618
90	7,25	76,71958	3,147613
120	8,12	85,92593	2,644334
150	9,12	96,50794	1,250493
$k_{La} = 0,0209$			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm	ροή αέρα=3,5	V=4.5L	T=18,3
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,88	9,341826	4,507096
30	5,51	58,49257	3,725872
60	8,46	89,80892	2,321513
90	9,14	97,0276	1,089369
120	9,3	98,72611	0,242072
k <sub>L</sub> a =0,0372			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm	ροή αέρα=3,5	T=18,3	V=4.5L
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,91	9,660297	4,503577
30	5,45	57,85563	3,741101
60	8,22	87,26115	2,544657
90	9,05	96,07219	1,368083
120	9,35	99,2569	-0,29692
k <sub>L</sub> a =0,0399			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm	ροή αέρα=3,5	V=4.5L	T=18,2
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,79	8,377519	4,517677
30	5,89	62,46023	3,625401
60	8,42	89,2895	2,371224
90	9,25	98,0912	0,646476
120	9,42	99,89396	-2,2439
k <sub>L</sub> a =0,055			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm	ροή αέρα=3,5	V=4.5L	T=18,0
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100-DO)
0	0,86	9,07173	4,510071
30	5,78	60,97046	3,664319
60	8,27	87,23629	2,546606
90	9,08	95,78059	1,439695
120	9,41	99,2616	-0,30327
k <sub>L</sub> a =0,0395			

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ			
N=2000rpm	ροή αέρα=3,5	V=4.5L	T=18,2
t(min)	D.O.(mg/l)	D.O.(%)	Y=LN(100- DO)
0	0,75	7,95334	4,522296
30	5,74	60,86957	3,666901
60	8,37	88,75928	2,419543
90	9,02	95,65217	1,469676
120	9,33	98,93955	0,058689
$k_{La} = 0,0371$			