

---

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΛΥΜΑΤΩΝ

---

Κωνσταντίνος Β. Χρυσικόπουλος  
Καθηγητής  
Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ

**Τίτλος πρωτοτύπου: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΛΥΜΑΤΩΝ**

**Κωνσταντίνος Β. Χρυσικόπουλος**

Αποκλειστικότητα :

**ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ**

Κεντρικό: Φιλίππου 91, Τ.Κ. 54635, Τηλ. 2310 247887, 2310 213912, Fax 2310 210729

---

**Internet:**

e-mail: [info@tziola.gr](mailto:info@tziola.gr)

<http://www.tziola.gr>

---

**Κατάστημα Αθηνών:**

Πεσμαζόγλου 5 (Πανεπιστημίου 39)

ΣΤΟΑ ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ - Αρσάκειο Μέγαρο

Κατάστημα 18,105 64,

Τηλ./Fax 210 3211097

**Copyright © 2013 ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ**

**Copyright © 2013 TZIOLAS PUBLICATIONS**

**ISBN 978-960-418-396-8**

**Απαγορεύεται** η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος του βιβλίου με οποιοδήποτε μέσο (**φωτοτυπία**, εκτύπωση, μικροφίλμ, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών ή άλλη μηχανική ή ηλεκτρονική μέθοδο) χωρίς την έγγραφη άδεια του εκδότη.

*No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.*

*Το βιβλίο αφιερώνεται στη  
μνήμη του καθηγητή μου Paul V. Roberts,  
ο οποίος ήταν υπέροχος "δάσκαλος" και μέντωρ*



# Πρόλογος

Το βιβλίο είναι σχεδιασμένο να εφοδιάσει σε προπτυχιακό ή μεταπτυχιακό επίπεδο, σπουδαστές διαφόρων ειδικοτήτων (Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολιτικών Μηχανικών, Χημικών Μηχανικών, Υδρογεωλόγων) με το απαραίτητο υπόβαθρο για ουσιαστική κατανόηση των γενικών αρχών, σχετικά με τον καθαρισμό του νερού και των λυμάτων. Ευρύτερα, το βιβλίο υποστηρίζει τα μαθήματα, τα οποία στοχεύουν στην διερεύνηση και εμπάθυνση του γνωστικού αντικειμένου της Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος της ύλης του βιβλίου είναι βασισμένο στις πανεπιστημιακές σημειώσεις για το μάθημα του Καθαρισμού Νερού του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Τα περισσότερα θέματα που εξετάζει αυτό το βιβλίο παρουσιάζονται σε βάθος, σκόπιμα, ώστε οι φοιτητές να μπορούν να κατανοήσουν πλήρως όλες τις απαραίτητες επιστημονικές αρχές, οι οποίες είναι ικανές να δώσουν το ερέθισμα για περισσότερη και αποτελεσματικότερη έρευνα και επιστημονική αναζήτηση. Τα κεφάλαια του βιβλίου είναι αυτοτελή ώστε ο αναγνώστης να μην χρειάζεται να ανατρέχει σε άλλα βιβλία για συμπληρωματικές διευκρινίσεις. Κάθε κεφάλαιο αρχίζει με θεμελιώδεις αρχές και στη συνέχεια ακολουθούν επιλεγμένα παραδείγματα. Παρόλο που στο βιβλίο αυτό έγινε προσπάθεια να δοθεί έμφαση στη θεωρητική ανάλυση, ο διδάσκων έχει τη δυνατότητα να επιμείνει περισσότερο σε εφαρμογές εστιάζοντας στα λυμένα παραδείγματα.

Το βιβλίο περιέχει πολλά λυμένα παραδείγματα, τα οποία στοχεύουν στο να δείξουν στους φοιτητές το πως εφαρμόζονται οι θεμελιώδεις αρχές στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα προβλήματα στοχεύουν στο να αναπτυχθεί εννοιολογική γνώση και όχι στο να παρουσιάσει απλή εφαρμογή εξισώσεων ή μαθηματικών μοντέλων. Αρκετά από τα παραδείγματα χρησιμοποιούν πραγματικά δεδομένα.

Κατά τη διάρκεια της συγγραφής του βιβλίου πολλοί φοιτητές και συνάδελφοι στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών διόρθωσαν λάθη ή υπέδειξαν τροποποιήσεις και παραλείψεις. Τους ευχαριστώ θερμά όλους και ιδιαίτερα τον Στέλιο Τσώνη.



# Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1: Γενικές Αρχές.....</b>	<b>11</b>
1.1 Ρύπανση υδατικών πόρων .....	11
1.2 Υδρολογικός κύκλος .....	14
1.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού .....	16
1.3.1 Πυκνότητα (density) .....	25
1.3.2 Επιφανειακή τάση (surface tension) .....	26
1.4 Νερά που χρειάζονται επεξεργασία .....	32
1.5 Η ανερχόμενη αγορά του εμφιαλωμένου νερού .....	34
1.6 Ο γαλάζιος χρυσός .....	37
<b>Κεφάλαιο 2: Βασικές έννοιες υδατικής χημείας .....</b>	<b>39</b>
2.1 Μονάδες συγκέντρωσης .....	39
2.2 Χημική ισορροπία .....	43
2.3 Ταχύτητα αντίδρασης – Μονόδρομες αντιδράσεις .....	48
2.4 Εξάρτηση της ταχύτητας αντίδρασης από τη θερμοκρασία .....	52
2.5 Χημική κινητική .....	55
2.5.1 Μονόδρομες αντιδράσεις .....	55
2.5.2 Αντιδράσεις σε σειρά (διαδοχικές αντιδράσεις) .....	69
2.5.3 Αμφίδρομες αντιδράσεις .....	73
2.6 Σταθερά γινομένου διαλυτότητας .....	77
2.7 Ιοντισμός οξέων και βάσεων (διάσταση) .....	81
2.8 Ιοντισμός του νερού - pH.....	86
2.9 Σχέση μεταξύ οξέος και συζυγούς βάσης .....	91
2.10 Ρυθμιστικά διαλύματα .....	92
2.11 Ιονικός συντελεστής ενεργότητας .....	96
2.12 Ηλεκτρική ουδετερότητα (electroneutrality) & συνθήκη πρωτονίων (proton condition).....	103
2.13 Ανθρακικό σύστημα .....	106
2.14 Λογαριθμικά διαγράμματα pC – pH .....	113
2.14.1 Ισορροπία ενός μονοπρωτικού οξέος (οξικό οξύ, HAc) .....	113
2.14.2 Ισορροπία ενός διπρωτικού οξέος (ανθρακικό οξύ) .....	119
2.14.3 Ανοικτό σύστημα σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα .....	125
2.14.4 Εφαρμογές των διαγραμμάτων pC – pH .....	134
2.15 Ένταση ρυθμιστικού διαλύματος (buffer intensity) .....	138
2.15.1 Αναλυτική εξαγωγή έντασης ρυθμιστικού διαλύματος .....	139
2.15.2 Τιτλοδότηση οξέων και βάσεων .....	143
2.16 Χημική θερμοδυναμική .....	146
2.16.1 Πρώτο Θερμοδυναμικό αξίωμα .....	146
2.16.2 Δεύτερο Θερμοδυναμικό αξίωμα .....	151
2.16.3 Τρίτο Θερμοδυναμικό αξίωμα .....	153
2.16.4 Ελεύθερη ενέργεια, θερμοκρασία και ισορροπία .....	155

<b>Κεφάλαιο 3: Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Νερού .....</b>	<b>157</b>
3.1 Τυπικά συστατικά φυσικών υδατικών πόρων .....	157
3.2 Εφαρμογή ηλεκτρικής ουδετερότητας .....	159
3.3 Θολρότητα (turbidity) .....	164
3.4 Ειδική αγωγιμότητα (specific conductance) .....	167
3.5 Σκληρότητα (hardness) .....	169
3.5.1 Μέτρηση σκληρότητας .....	173
3.5.2 Αφαίρεση σκληρότητας .....	180
3.6 Αλκαλικότητα (alkalinity) .....	193
3.7 Στερεά .....	200
3.8 Υδροχημικά διαγράμματα .....	204
<b>Κεφάλαιο 4: Προδιαγραφές Ποιότητας Νερού .....</b>	<b>209</b>
4.1 Ποιότητα του πόσιμου νερού .....	209
4.1.1 Ελληνικές προδιαγραφές .....	209
4.1.2 Προδιαγραφές των ΗΠΑ, Καναδά και της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας .....	215
4.2 Ποιότητα νερού για γεωργική χρήση .....	219
4.3 Ποιότητα εμφιαλωμένων νερών .....	221
<b>Κεφάλαιο 5: Διεργασίες Επεξεργασίας Νερού και Λυμάτων .....</b>	<b>227</b>
5.1 Βασικές διεργασίες .....	227
5.2 Επιλογή διεργασιών .....	230
5.3 Κατηγορίες αντιδραστήρων .....	231
5.3.1 Ιδανικοί αντιδραστήρες .....	231
5.3.2 Μη-ιδανικοί αντιδραστήρες .....	233
5.4 Σχεδιαστικές εξισώσεις αντιδραστήρων .....	233
5.4.1 CMBR αντιδραστήρας .....	234
5.4.2 PFR αντιδραστήρας σε μόνιμη κατάσταση .....	235
5.4.3 CMFR ή CSTR αντιδραστήρας σε μόνιμη κατάσταση .....	238
5.4.4 CMFR αντιδραστήρας σε μη-μόνιμη κατάσταση .....	239
5.5 Σύγκριση αντιδραστήρων CMFR και PFR .....	246
5.6 Συστοιχία αντιδραστήρων CMFR σε σειρά .....	248
5.6.1 Συνθήκες μόνιμης κατάστασης .....	249
5.6.2 Συνθήκες μη-μόνιμης κατάστασης .....	255
5.7 Αντιδραστήρες με ανακυκλοφορία .....	261
5.7.1 Ανάλυση αντιδραστήρα PFR με ανακυκλοφορία .....	261
5.7.2 Ανάλυση αντιδραστήρα CMFR με ανακυκλοφορία .....	265
5.8 Κατανομή χρόνων παραμονής (RTD, residence time distribution) .....	265
5.8.1 Υπολογισμός της κατανομής ηλικιών εξόδου με τη βοήθεια ιχνηθέτη .....	266
5.8.2 Αποκλίσεις από την ιδανική λειτουργία αντιδραστήρων .....	270
5.9 Διάχυση (diffusion) .....	272
5.9.1 Εξισώσεις συντελεστή μοριακής διάχυσης σε υγρά .....	275
5.9.2 Μονοδιάστατη διάχυση με σταθερή συγκέντρωση .....	281
5.9.3 Συνάρτηση σφάλματος (error function) .....	285
5.9.4 Παλμική διαταραχή σε σωλήνα με νερό .....	288
5.9.5 Διάχυση από σημειακή πηγή σε τρισδιάστατο χώρο .....	294
5.10 Αντιδραστήρας με διασκορπισμένη εμβολική ροή .....	299
5.11 Χρόνος αδειάσματος δεξαμενής .....	306
5.11.1 Δεξαμενή με σταθερή επιφάνεια διατομής .....	307
5.11.2 Δεξαμενή με σχήμα αντεστραμμένου κώνου .....	311
5.11.3 Σφαιρική δεξαμενή .....	313
5.11.4 Ελλειψοειδής δεξαμενή .....	315
5.11.5 Οριζόντια κυλινδρική δεξαμενή .....	317

<b>Κεφάλαιο 6: Κροκίδωση (coagulation)</b> .....	<b>321</b>
6.1 Δυνάμεις μεταξύ κολλοειδών .....	321
6.1.1 Θεωρία DLVO .....	323
6.1.2 Εκτεταμένη θεωρία DLVO (Θεωρία XDLVO) .....	332
6.2 Θρόμβωση ή συσσωμάτωση (Flocculation) .....	335
6.3 Κροκιδωτικά .....	337
6.3.1 Ανόργανα κροκιδωτικά .....	337
6.3.2 Οργανικά κροκιδωτικά .....	343
6.4 Μεταφορά κολλοειδών σωματιδίων .....	346
6.4.1 Περικίνητική συσσωμάτωση (perikinetic flocculation) .....	346
6.4.2 Ορθοκίνητική συσσωμάτωση (orthokinetic flocculation) .....	347
6.5 Διασκορπισμός ισχύος στην ανάδευση .....	349
6.5.1 Ισοζύγιο δυνάμεων .....	350
6.5.2 Ισοζύγιο ισχύος .....	351
6.6 Υπολογισμός του G .....	352
6.6.1 Μηχανική ανάδευση .....	352
6.6.2 Υδραυλική μίξη .....	354
6.6.3 Μείξη με διάχυση αέρα .....	355
<b>Κεφάλαιο 7: Καθίζηση (sedimentation)</b> .....	<b>367</b>
7.1 Τύποι καθίζησης .....	367
7.2 Καθίζηση διακεκριμένων στερεών .....	368
7.2.1 Καθίζηση σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης .....	369
7.2.2 Καθίζηση σε συνθήκες μη-μόνιμης κατάστασης .....	373
7.3 Δεξαμενή καθίζησης διακεκριμένων σωματιδίων .....	375
7.3.1 Καθίζηση σε κυλινδρική δεξαμενή .....	377
7.3.2 Ταχύρρυθμη καθίζηση .....	380
7.4 Εκτίμηση ποσοστού αφαίρεσης στερεών .....	384
7.5 Καθίζηση τύπου II - Συσσωμάτωση σωματιδίων .....	387
7.5.1 Διαφορική καθίζηση .....	388
7.5.2 Μελέτη καθίζησης σωματιδίων που συσσωματώνονται .....	389
7.6 Καθίζηση τύπου III - Καθίζηση κατά ζώνες .....	395
7.7 Καθίζηση τύπου IV - Συμπύκνωση .....	398
7.8 Καθίζηση μη-σφαιρικών σωματιδίων .....	399
<b>Κεφάλαιο 8: Διήθηση (filtration)</b> .....	<b>403</b>
8.1 Διεργασία διήθησης .....	403
8.2 Ταξινόμηση φίλτρων .....	403
8.3 Μηχανισμοί μεταφοράς και συγκράτησης στερεών .....	408
8.3.1 Μαθηματικό προσομοίωμα απομάκρυνσης στερεών .....	410
8.3.2 Θεωρία σύλληψης αιωρούμενων στερεών .....	413
8.3.3 Συντελεστής απόδοσης συγκρούσεων .....	419
8.4 Υδραυλικές απώλειες σε κλίνες διήθησης .....	421
8.5 Λειτουργία φίλτρων διήθησης .....	425
8.6 Κατανομή υδραυλικής πίεσης σε κλίνες διήθησης .....	426
<b>Κεφάλαιο 9: Απολύμανση Νερού και Λυμάτων</b> .....	<b>429</b>
9.1 Απολυμαντικά .....	429
9.2 Χλωρίωση .....	430
9.2.1 Υποχλωριώδη άλατα .....	435
9.2.2 Αντιδράσεις του χλωρίου με την αμμωνία .....	435
9.2.3 Χλωρίωση μετατροπής (breakpoint chlorination) .....	436
9.2.4 Οξειδωση των χλωροαμινών .....	442

9.2.5 Αποχλωρίωση (dechlorination) .....	443
9.2.6 Πραγματικό και διαθέσιμο χλώριο .....	445
9.2.7 Κινητική απολύμανσης με χλώριο .....	447
9.3 Διοξειδίο του χλωρίου .....	451
9.4 Οζόνωση .....	453
9.4.1 Διάλυση όζοντος στο νερό .....	459
9.4.2 Κινητική απολύμανσης με όζον .....	461
9.5 Υπεριώδη ακτινοβολία (UV) .....	462
9.5.1 Προσδιορισμός της δόσης ακτινοβολίας UV .....	465
9.5.2 Κινητική απολύμανσης με ακτινοβολία UV .....	466
<b>Κεφάλαιο 10: Ρόφηση (sorption) .....</b>	<b>469</b>
10.1 Κατηγορίες ρόφησης .....	469
10.2 Ισοθερμικές συσχετίσεις μεταξύ $C_{eq}$ και $C_{eq}^*$ .....	472
10.2.1 Γραμμική ισοθερμική προσρόφηση .....	472
10.2.2 Ισοθερμική προσρόφηση τύπου Freundlich .....	472
10.2.3 Ισοθερμική προσρόφηση τύπου Langmuir .....	474
10.3 Κινητική προσρόφηση .....	483
10.4 Συσχέτιση του $K_d$ με τον οργανικό άνθρακα .....	484
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....</b>	<b>489</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>499</b>
Παράρτημα I: Τα στοιχεία .....	499
Παράρτημα II: Ονοματολογία και σθένος ιόντων .....	502
Παράρτημα III: Μονάδες και σταθερές .....	503
Παράρτημα III.1 Ορισμός μετρικών μονάδων .....	503
Παράρτημα III.2 Προθέματα μονάδων .....	503
Παράρτημα III.3 Χρήσιμες σταθερές .....	503
Παράρτημα III.4 Συσχέτιση μεταξύ θερμοκρασιών .....	504
Παράρτημα IV: Χρήσιμες μαθηματικές σχέσεις .....	504
Παράρτημα IV.1 Άλγεβρα .....	504
Παράρτημα IV.2 Λογάριθμοι .....	505
Παράρτημα IV.3 Τριγωνομετρία .....	507
Παράρτημα IV.4 Τριγωνομετρικές ταυτότητες .....	508
Παράρτημα IV.5 Γεωμετρία .....	510
Παράρτημα IV.6 Κανόνες παραγοντοποίησης και ολοκλήρωσης .....	510
Παράρτημα IV.7 Ολοκληρώματα στοιχειωδών συναρτήσεων .....	511
Παράρτημα IV.8 Δυναμοσειρές .....	512
Παράρτημα V: Κανονική κατανομή (normal distribution) .....	513
Παράρτημα VI: Διάφορες συνήθεις διαφορικές εξισώσεις και οι λύσεις τους .....	522
Παράρτημα VII: Περιορισμένη λίστα μετασχηματισμών Laplace .....	523
<b>ΑΓΓΛΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ.....</b>	<b>525</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>537</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ.....</b>	<b>551</b>