

Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Τομέας Υδατικών Πόρων

Τ **Ξ**
Χ **Ν**
Ι **Κ** **Η**
Υ
Δ **Ρ** **Ο**
Λ **Θ**
Γ **Ι**
Α

Έκδοση 3
Αθήνα 1999

ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Δ. Κουτσογιάννης και Θ. Ξανθόπουλος
Τομέας Υδατικών Πόρων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Έκδοση 3
Αθήνα 1999

ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Έκδοση 3

Copyright © Δ. Κουτσογιάννης και Θ. Ξανθόπουλος, 1996, 1997, 1998, 1999.

Δεν επιτρέπεται η αναπαραγωγή του βιβλίου, τμηματική ή ολική, σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς την έγγραφη άδεια των συγγραφέων.

Μακέτα εξωφύλλου: Α. Πατρικίου

Εκτύπωση Offset και βιβλιοδεσία : Τυπογραφείο Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Τεχνική επιμέλεια εκτύπωσης και βιβλιοδεσίας: Γ. Καραγκιοζόπουλος, Ν. Γκάνης, Α. Μιχαλόπουλος

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αποφασίσαμε το γράψιμο ενός καινούργιου βιβλίου τεχνικής υδρολογίας για δύο, συσχετισμένους, κύριους λόγους: Η υποχρέωση διδακτικής αναβάθμισης του Νέου Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, με τεχνολογική ανανέωση και επιστημονικό εμπλουτισμό της ύλης, συνδυάζεται με τη συνεχή ενίσχυση του ρόλου της τεχνικής υδρολογίας στον πυρήνα των επιστημών του μηχανικού. Από επικουρική επιστήμη που ήταν η υδρολογία μέχρι πρόσφατα, χρήσιμη μόνο στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού υδραυλικών έργων, αποκτά σήμερα ουσιώδη ρόλο, επιβάλλοντας και το χαρακτηριστικό της τρόπο σκέψης και επιστημονικής προσέγγισης, στις μελέτες, τα έργα και τις δράσεις που αποσκοπούν στην αξιοποίηση και διαχείριση των υδατικών πόρων, στην προστασία του περιβάλλοντος και στην ορθολογική αντιμετώπιση των φυσικών κινδύνων. Στα πλαίσια αυτού του καινούργιου βιβλίου σκιαγραφήσαμε τις νέες επιστημονικές προσεγγίσεις και τεχνολογικές εφαρμογές.

Σύμφωνα με τον Paul R. Halmos*, μόνο το γράψιμο ενός βιβλίου (μαθηματικών και, γιατί όχι, υδρολογίας) χρειάζεται τουλάχιστον δύο «εργάσιμα» (περισσότερο από ημερολογιακά) χρόνια αποκλειστικής απασχόλησης. Δυστυχώς, αυτή η αδυσώπητη αλήθεια δεν συμβιβάζεται με τα στενά χρονικά περιθώρια των ακαδημαϊκών δασκάλων του ΕΜΠ, με τις παράλληλες εκπαιδευτικές, διοικητικές, ερευνητικές και τεχνολογικές δραστηριότητες. Το αποτέλεσμα είναι ότι το βιβλίο δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί όπως θα θέλαμε και ζητούμε γι' αυτό την κατανόηση των φοιτητών μας.

Πολλές φορές η μετάφραση ενός καταξιωμένου βιβλίου της διεθνούς βιβλιογραφίας αποτελεί μια εύκολη και εκπαιδευτικά πρόσφορη λύση. Δεν είναι όμως η καλύτερη στην περίπτωση της υδρολογίας, όπου οι τοπικές κλιματολογικές και υδρολογικές συνθήκες αφενός και η ντόπια πληροφοριακή υποδομή αφετέρου, επηρεάζουν φαινόμενα, μεγέθη και μεθόδους επίλυσης. Επί πλέον, στην Ελλάδα, εκτός από τις φυσικές ιδιαιτερότητες, υπάρχει και μια αξιόλογη εμπειρία εφαρμογών, στις

* P. R. Halmos, How to write mathematics, *L'Enseignement Mathématique*, 16, 123-152, 1970.

οποίες οι συγγραφείς είχαν την τύχη να συμμετέχουν ενεργά. Έτσι, προτιμήσαμε, αντί της μετάφρασης, το γράψιμο ενός ελληνικού βιβλίου, χρησιμοποιώντας παράλληλα και τη διεθνή εμπειρία. Σε όλα τα παραδείγματα που παρουσιάζονται στο βιβλίο αυτό χρησιμοποιήσαμε δεδομένα απ' την Ελλάδα. Δεν είναι τα καλύτερα δυνατά αλλά, ωστόσο, προτιμήσαμε αυτή την πιο ρεαλιστική παρουσίαση της ελληνικής υδρολογικής πραγματικότητας, χωρίς επεμβάσεις και εξωραϊσμούς στα πραγματικά δεδομένα, ή χρήση τεχνητών δεδομένων.

Εκφράζουμε τις ευχαριστίες μας στους εκλεκτούς συνεργάτες που βοήθησαν στη συγγραφή και παρουσίαση αυτού του κειμένου, και συγκεκριμένα: στο Ν. Μαμάση για τη βοήθειά του στην προετοιμασία των υδρολογικών δεδομένων, που χρησιμοποιούνται ως βάση για μερικά παραδείγματα του βιβλίου, καθώς και για τις παρατηρήσεις του· στον Α. Κουκουβίνο για τη βοήθειά του στην επεξεργασία γεωγραφικών δεδομένων· στον Ι. Ναλμπάντη για την παροχή επεξεργασμένων δεδομένων για ένα παράδειγμα του κεφαλαίου 5· και στους Δ. Ζαρρή και Α. Χριστοφίδη για τις παρατηρήσεις και υποδείξεις τους.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 1998

Οι συγγραφείς

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγικές έννοιες	1
1.1 Ορισμός, αντικείμενο και κλάδοι της υδρολογίας.....	1
1.2 Σύντομο ιστορικό.....	8
1.1.1 Προορθολογιστική Περίοδος (ως το 1400 μ.Χ.).....	9
1.1.2 Περίοδος μετρήσεων και πειραματισμών (1400-1850).....	14
1.1.3 Περίοδος επιστημονικής θεμελίωσης της υδρολογίας (1850-1960).....	16
1.1.4 Περίοδος ηλεκτρονικών υπολογιστών και διεπιστημονικής υδρολογίας (1960-σήμερα).....	19
1.3 Υδρολογικές μελέτες και υδραυλικά έργα	21
1.3.1 Σκιαγραφία και ιστορικό των υδραυλικών έργων	21
1.1.2 Κατάταξη των υδρολογικών μελετών.....	25
1.1.3 Έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης υδατικών πόρων	27
1.1.4 Έργα προστασίας από υδρολογικούς κινδύνους.....	28
1.4 Τεχνική υδρολογία και διαχείριση υδροσυστημάτων.....	32
1.5 Χαρακτηριστικές ιδιότητες του νερού.....	35
1.6 Η έννοια του υδρολογικού κύκλου και του υδατικού ισοζυγίου.....	41
1.6.1 Οι φυσικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου.....	41
1.1.2 Ποσοτική έκφραση των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου.....	42

Εφαρμογή 1.6.2.....	45
1.1.3 Το ετήσιο υδατικό ισοζύγιο της Γης.....	47
1.1.4 Το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης	50
1.7 Οι χωρικές και χρονικές κλίμακες της υδρολογίας	53
1.7.1 Χωρική κλίμακα.....	54
1.1.2 Χρονική κλίμακα	58
1.8 Η φύση των υδρολογικών μεταβλητών και οι μέθοδοι της υδρολογίας	60
1.9 Σκιαγραφία της υδρολογικής πληροφορίας.....	64
1.9.1 Σημασία και κατάταξη της υδρολογικής πληροφορίας	64
1.9.2 Συμβατικά και αυτόματα όργανα σημειακών μετρήσεων.....	67
1.9.3 Δίκτυα υδρομετεωρολογικών μετρήσεων.....	68
1.9.4 Συλλογή, πρώτη επεξεργασία και διαχείριση της πληροφορίας.....	70
1.9.5 Επεξεργασία και αξιοποίηση της πληροφορίας	71
Κεφάλαιο 2 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	75
2.1 Φυσικό πλαίσιο.....	76
2.1.1 Ατμοσφαιρική υγρασία	77
Επεξήγηση της μεταβολής της υγρασίας με τη θερμοκρασία	80
2.1.2 Γένεση των κατακρημνισμάτων.....	81
Τεχνητή βροχή (σπορά νεφών).....	82
2.2 Μετεωρολογικό πλαίσιο	84
2.2.1 Μεταγωγικές κατακρημνίσεις.....	84
2.1.2 Εξωτροπικοί κυκλώνες	85
2.1.3 Ορογραφικές κατακρημνίσεις.....	87
2.1.4 Άλλοι τύποι κατακρημνίσεων.....	89
2.3 Μετρικές ιδιότητες.....	90
2.3.1 Σημειακά ύψη και εντάσεις.....	90
2.1.2 Άλλες μετρικές ιδιότητες	93
2.1.3 Ειδικές μετρικές ιδιότητες χιονιού.....	93
2.4 Βροχομετρία - Χιονομετρία.....	95
2.4.1 Όργανα σημειακής μέτρησης.....	95
Συνήθης βροχομετρία	95

Χιονομετρία	97
2.4.2 Εγκατάσταση βροχομέτρων και βροχογράφων	99
2.4.3 Εγκατάσταση δικτύων σημειακών μετρήσεων	101
Κατηγορίες μετεωρολογικών σταθμών και μετεωρολογικά όργανα	102
2.1.4 Επιφανειακές μετρήσεις: Μετεωρολογικό ραντάρ	103
2.1.5 Δορυφορικές μετρήσεις	105
2.5 Τυπική επεξεργασία της σημειακής βροχομετρικής πληροφορίας	107
2.5.1 Έλεγχος και αποκατάσταση συνέπειας	107
Εφαρμογή 2.5.1.....	112
2.1.2 Συμπλήρωση ελλείψεων και επέκταση δειγμάτων	119
Εμπειρικές μέθοδοι	120
Στατιστικές μέθοδοι	121
Εφαρμογή 2.5.2.....	124
2.6 Επιφανειακή ολοκλήρωση σημειακών βροχοπτώσεων	129
2.6.1 Παράγοντες γεωγραφικής μεταβλητότητας	130
2.6.2 Μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης	131
Εφαρμογή 2.6.2.....	134
2.1.3 Μέθοδοι προσαρμογής επιφάνειας	136
Εφαρμογή 2.6.3.....	139
2.1.4 Επίδραση του υψομέτρου	141
Εφαρμογή 2.6.4.....	143
2.7 Ανάλυση ισχυρών βροχοπτώσεων - όμβριες καμπύλες	145
2.1.1 Τυπικές αναλυτικές εκφράσεις όμβριων καμπυλών	148
Εφαρμογή 2.7.1.....	150
2.1.2 Επιφανειακή αναγωγή όμβριων καμπυλών	152
Εφαρμογή 2.7.2.....	156
2.8 Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση.....	157
Εφαρμογή 2.8.....	162
Κεφάλαιο 3 Εξάτμιση και διαπνοή.....	165
3.1 Εισαγωγικές έννοιες - ορισμοί.....	166
3.2 Φυσικό πλαίσιο.....	168
3.2.1 Ιδιότητες του ατμοσφαιρικού αέρα, του νερού και των υδρατμών	168

3.2.2	Η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα.....	170
	Διερεύνηση των συντελεστών των τύπων εκτίμησης της ακτινοβολίας	176
	Εφαρμογή 3.2.2.....	179
3.2.3	Ενεργειακό ισοζύγιο σε μοναδιαία επιφάνεια	181
3.2.4	Μεταφορά μάζας.....	183
3.2.5	Η ροή αισθητής θερμότητας και ο λόγος Bowen.....	187
3.3	Μετεωρολογικό πλαίσιο	188
3.3.1	Η εξάτμιση ως μετεωρολογική μεταβλητή	188
3.3.2	Ηλιακή και γήινη ακτινοβολία.....	191
3.3.3	Ηλιοφάνεια και νέφωση.....	192
3.3.4	Θερμοκρασία	192
	Εφαρμογή 3.3.4.....	194
3.3.5	Σχετική υγρασία	197
3.3.6	Ταχύτητα ανέμου	198
3.3.7	Ατμοσφαιρική πίεση	200
3.4	Εκτίμηση της εξάτμισης και εξατμοδιαπνοής με μεθόδους συνδυασμού	200
3.4.1	Εξάτμιση από υδάτινη επιφάνεια - Η μέθοδος Penman....	201
3.4.2	Εξατμοδιαπνοή - Η μέθοδος Penman - Monteith	203
3.4.3	Εξατμοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς - Η μέθοδος Doorenbos - Pruitt.....	205
3.4.4	Εξατμοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς - Εφαρμογή της μεθόδου Penman - Monteith	207
3.4.5	Τυπική υπολογιστική διαδικασία.....	209
	Εφαρμογή 3.4.5.....	210
3.4.6	Απλοποιήσεις των μεθόδων συνδυασμού	220
	Εφαρμογή 3.4.6.....	221
3.4.7	Συμπληρώσεις και επεκτάσεις δειγμάτων εξάτμισης	222
3.5	Εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής με εμπειρικές μεθόδους	225
3.5.1	Η μέθοδος Blaney-Criddle	225
3.5.2	Η μέθοδος Thornthwaite	226
	Εφαρμογή 3.5.2.....	227
3.5.3	Η μέθοδος Hargreaves	229
3.6	Εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών.....	230

3.7	Υδατικό ισοζύγιο	233
3.7.1	Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου απλής υδρολογικής λεκάνης	234
3.7.2	Το απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite	236
	Εφαρμογή 3.7.2.....	238
3.7.3	Άλλες εμπειρικές κλιματολογικές μέθοδοι	243
	Εφαρμογή 3.7.3.....	245
3.7.4	Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου λιμνών.....	246
	Εφαρμογή 3.7.4.....	248
Κεφάλαιο 4 Κατακράτηση και διήθηση		251
4.1	Κατακράτηση.....	251
4.1.1	Παρεμπόδιση.....	252
4.1.2	Επιφανειακή παγίδευση	253
4.1.3	Κατακράτηση χιονοπτώσεων.....	253
4.2	Διήθηση	254
4.2.1	Φυσικό υπόβαθρο και φαινομενολογία.....	254
4.2.2	Ποσοτική εκτίμηση της διήθησης.....	257
4.2.3	Μετρήσεις με διηθησόμετρα.....	258
4.2.4	Υπολογισμός με ημιεμπειρικές σχέσεις.....	259
4.2.5	Υπολογισμός με προσεγγιστικές θεωρητικές σχέσεις	260
	Γενικό θεωρητικό πλαίσιο	260
	Η μέθοδος Philip.....	261
	Η μέθοδος Green-Ampt	262
4.2.6	Επίδραση του χρόνου κατάκλυσης	263
4.3	Συνολική εκτίμηση ελλειμμάτων.....	264
4.3.1	Η μέθοδος του δείκτη φ	265
	Εφαρμογή 4.3.1.....	267
4.3.2	Η μέθοδος του Soil Conservation Service (SCS).....	274
	Εφαρμογή 4.3.2.....	279
Κεφάλαιο 5 Επιφανειακή απορροή		281
5.1	Μηχανισμοί και προέλευση της επιφανειακής απορροής	282
5.1.1	Κατακρημνίσματα στο υδατόρευμα.....	283
5.1.2	Επίγεια ροή	283
	Επίγεια ροή Horton.....	284

Επίγεια ροή λόγω κορεσμού	285
5.1.3 Υποδερμική ροή.....	287
5.1.4 Υπόγεια ροή.....	288
5.2 Το υδρογράφημα πλημμυρικού επεισοδίου και οι συνιστώσες του.....	289
5.2.1 Απλοποιητική σχηματοποίηση των συνιστωσών της επιφανειακής απορροής	289
5.2.2 Διαχωρισμός βασικής ροής και χαρακτηριστικά μεγέθη υδρογραφήματος.....	290
Εφαρμογή 5.2.....	295
5.3 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής.....	301
5.3.1 Μορφολογικά χαρακτηριστικά	302
Υδροκρίτης και χάραξή του.....	302
Γεωμετρία	304
Ανάγλυφο.....	305
Υδρογραφικό δίκτυο	306
Εφαρμογή 5.3.1.....	309
5.3.2 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά	314
5.3.3 Φυτοκάλυψη	314
5.4 Υδρομετρία.....	315
5.4.1 Αντικειμενική σημασία της υδρομετρίας.....	315
5.4.2 Τυπική σύνθεση και λειτουργία υδρομετρικού σταθμού.....	316
5.4.3 Σταθμημετρία.....	318
5.4.4 Μέθοδοι μέτρησης παροχής.....	319
Μέτρηση με παρεμβολή μετρητών παροχής	319
Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων	320
Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων	323
Εκτίμηση με πλωτήρες	325
Εκτίμηση με υδραυλικές σχέσεις ροής	325
Άλλες μέθοδοι μέτρησης της παροχής.....	327
5.5 Τυπική επεξεργασία υδρομετρικών δεδομένων	328
5.5.1 Σταθμημετρικά δεδομένα.....	328
5.5.2 Καμπύλες στάθμης - παροχής.....	330
Επέκταση της καμπύλης στάθμης - παροχής.....	333
Μεταβολές της σχέσης στάθμης - παροχής.....	334

Η καμπύλη στάθμης παροχής σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.....	335
Εφαρμογή 5.5.2.....	336
5.5.3 Εκτίμηση χρονοσειρών παροχής από χρονοσειρές στάθμης.....	339
Εφαρμογή 5.5.3.....	341
Κεφάλαιο 6 Εισαγωγή στην υπόγεια υδρολογία	345
6.1 Γενικές έννοιες.....	345
6.2 Πορώδη μέσα και υδροφορείς	347
6.2.1 Η έννοια του πορώδους μέσου.....	347
6.2.2 Αποθήκευση και κίνηση του νερού σε πορώδη μέσα.....	348
6.2.3 Υδροφορείς και κατάταξή τους.....	353
6.3 Βασικές αρχές της υπόγειας ροής.....	354
6.3.1 Ο νόμος του Darcy.....	354
6.3.2 Υδραυλικές ιδιότητες πορωδών μέσων.....	359
6.4 Μαθηματικά μοντέλα υπόγειων ροών	365
6.4.1 Παραγωγή της μονοδιάστατης εξίσωσης ροής σε πορώδες μέσο.....	365
6.4.2 Η γενική εξίσωση ροής σε τριδιάστατο χώρο.....	367
6.4.3 Μεθοδολογία επίλυσης των εξισώσεων υπόγειας ροής....	370
6.4.4 Υδραυλική των υδρογεωτρήσεων.....	372
Εφαρμογή 6.4.4.....	377
6.4.5 Εκτίμηση των παραμέτρων υδροφορέα	379
Εφαρμογή 6.4.5.....	381
6.5 Η συμμετοχή των υπόγειων νερών στο υδατικό ισοζύγιο	382
6.5.1 Όγκοι αναφοράς και συνιστώσες ισοζυγίου	382
6.5.2 Εξισώσεις ισοζυγίου - Χαρακτηριστικά μεγέθη υπόγειας απορροής.....	387
Εφαρμογή 6.5.2.....	391
6.6 Η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών.....	395
6.6.1 Υδρολογικές όψεις της εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών.....	395
6.6.2 Συνδυασμένη εκμετάλλευση υπόγειων και επιφανειακών νερών	399

6.6.3 Άλλες επιπτώσεις της εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού	401
6.6.4 Ασφαλής απόδοση	401
Αναφορές	405