
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Σημειώσεις στο Μεταπτυχιακό μάθημα

Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη



ΑΘΗΝΑ, 2004

Μ. Α. Μιμίκου, καθηγήτρια ΕΜΠ

Φ. Σ. Φωτόπουλος, Π.Μ. ΕΜΠ, MSc MIT

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	2
Ευρετήριο Σχημάτων	5
Ευρετήριο Πινάκων	7
1. Υδατικό Περιβάλλον – Στοιχεία Υδρολογικής Ανάλυσης	8
1.1 Γενική εισαγωγή	8
1.2 Υδρολογικός κύκλος.....	9
1.3 Υδρολογικές μεταβλητές	10
1.4 Μέτρηση και εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών	12
1.4.1 Μέτρηση κατακρημνισμάτων	12
1.4.2 Επεξεργασία σημειακών κατακρημνισμάτων. Συμπλήρωση κενών.....	13
<i>Παράδειγμα 1-1: Εκτίμηση μέσης σημειακής βροχόπτωσης - συμπλήρωση κενών....</i>	<i>14</i>
1.4.3 Εκτίμηση επιφανειακών κατακρημνισμάτων	17
<i>Παράδειγμα 1-2: Εκτίμηση μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης</i>	<i>20</i>
1.4.4 Μέτρηση εξάτμισης.....	24
1.4.5 Μέτρηση εξατμισοδιαπνοής	24
1.4.6 Εκτίμηση δυναμικής εξατμισοδιαπνοής.....	26
<i>Παράδειγμα 1-3: Εκτίμηση δυναμικής εξατμισοδιαπνοής.....</i>	<i>28</i>
1.4.7 Μέτρηση απορροής.....	29
1.4.8 Εκτίμηση απορροής.....	34
<i>Παράδειγμα 1-4: Εκτίμηση παροχής ποταμού.....</i>	<i>36</i>
1.5 Υδρολογικά ισοζύγια σε λεκάνες απορροής.....	38
1.6 Υδατικά ισοζύγια σε συστήματα αξιοποίησης υδατικών πόρων	39
<i>Παράδειγμα 1-5: Εκτίμηση υδρολογικού ισοζυγίου σε λεκάνη απορροής.....</i>	<i>41</i>
<i>Παράδειγμα 1-6: Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου σε ταμιευτήρα</i>	<i>43</i>
1.7 Ασκήσεις προς επίλυση	44
<i>Άσκηση 1-1: Εκτίμηση υδρολογικού ισοζυγίου.....</i>	<i>44</i>
2. Ακραία Γεγονότα.....	45
2.1 Γενικά	45
2.2 Βασικές στατιστικές έννοιες.....	45
<i>Παράδειγμα 2-1: Στατιστική ανάλυση δείγματος.....</i>	<i>47</i>
2.3 Βασικές στατιστικές ιδιότητες	49
2.4 Στατιστικές κατανομές	52
2.4.1 Ομοιόμορφη κατανομή.....	52

2.4.2	Κανονική κατανομή (Gauss).....	53
	<i>Παράδειγμα 2-2: Κανονική κατανομή.....</i>	<i>53</i>
2.4.3	Κατανομή Gumbel (μεγίστων και ελαχίστων)	54
2.4.4	Λογαριθμοκανονική (Log-Normal) κατανομή μεγίστων	56
2.4.5	Κατανομή Log-Pearson III μεγίστων	57
2.5	Όρια εμπιστοσύνης.....	59
	<i>Παράδειγμα 2-3: Στατιστική ανάλυση συνήθων υδρολογικών τιμών</i>	<i>59</i>
	<i>Παράδειγμα 2-4: Στατιστική ανάλυση πλημμυρών</i>	<i>61</i>
	<i>Παράδειγμα 2-5: Στατιστική ανάλυση ξηρασιών</i>	<i>68</i>
2.6	Ασκήσεις προς επίλυση	69
	<i>Άσκηση 2-1: Στατιστική ανάλυση.....</i>	<i>69</i>
	<i>Άσκηση 2-2: Στατιστική ανάλυση πλημμυρών</i>	<i>69</i>
	<i>Άσκηση 2-3: Στατιστική ανάλυση ξηρασιών</i>	<i>70</i>
2.7	Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα	70
2.7.1	Ανθρωπογενείς παράγοντες επιδείνωσης της πλημμυρικής επικινδυνότητας.....	71
2.8	Αντιπλημμυρική προστασία.....	73
2.8.1	Κατασκευαστικά μέτρα	73
2.8.2	Μη κατασκευαστικά μέτρα.....	75
2.9	Η ξηρασία στην Ελλάδα	79
3.	Αξιοποίηση και Διαχείριση Υδατικών Πόρων	82
3.1	Γενικά	82
3.2	Υδατικοί Πόροι	82
3.3	Χρήσεις νερού.....	86
3.3.1	Αστική χρήση	86
3.3.2	Άρδευση.....	87
3.3.3	Βιομηχανική χρήση	88
3.3.4	Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας	89
3.3.5	Συνολική κατανομή ζήτησης νερού στην Ελλάδα.....	89
3.4	Τα έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων	90
3.5	Έννοιες διαχείρισης υδατικών πόρων	90
3.5.1	Ο ρόλος των χρηστών στην διαδικασία λήψης αποφάσεων	91
3.5.2	Κριτήρια διαχείρισης σε αστικές, αγροτικές, δασώδεις, νησιωτικές / παράκτιες περιοχές.	92
3.5.3	Ανθρωπογενείς πιέσεις πάνω στον κύκλο του νερού και εκτίμηση των επιπτώσεων τους....	94
3.6	Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων	95
3.6.1	Εμπόδια στην υλοποίηση διαχειριστικών σχεδίων	97
3.6.2	Ο επιχειρησιακός τομέας της διαχείρισης των υδατικών πόρων.....	98
3.6.3	Ποσοτικές και ποιοτικές διαστάσεις.....	99
3.7	Ο τομέας του νερού στην Ελλάδα	100

4. Εκτίμηση και Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε Μεταβαλλόμενο Περιβάλλον και Κλίμα	103
4.1 Γενικά	103
4.2 Προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση κλιματικών αλλαγών.....	105
4.3 Κλιματική αλλαγή. Επιπτώσεις σε υδατικούς πόρους και έργα αξιοποίησής τους.	106
4.4 Ευαισθησία των κύριων κλιματικών και υδρολογικών μεταβλητών.....	107
4.4.1 Βροχόπτωση και εξατμισοδιαπνοή	107
4.4.2 Απορροή και εδαφική υγρασία	109
4.4.3 Υπόγεια νερά	110
4.4.4 Στάθμη της θάλασσας	111
4.4.5 Ποιότητα νερού	111
4.5 Υδρολογικές επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε κλίμακα λεκάνης.....	112
4.6 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων	115
4.7 Αλλαγή χρήσεων γης. Επιπτώσεις σε υδατικούς πόρους και έργα αξιοποίησής τους	116
5. Η Αναπτυξιακή Διάσταση του Κύκλου του Νερού σε Τοπικό και Εθνικό Επίπεδο. Νομικό και Θεσμικό Πλαίσιο	120
5.1 Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά 2000/60/ΕΕ	120
5.2 Δυσκολίες και προβλήματα εφαρμογής της Οδηγίας.....	122
5.3 Οργάνωση της Οδηγίας σε ευρωπαϊκό επίπεδο	123
5.4 Χρονοδιάγραμμα εργασιών	124
5.5 Σημερινή κατάσταση και προοπτικές.....	127
Ελληνική Βιβλιογραφία	129
Διεθνής Βιβλιογραφία	129
Σχετικοί Δικτυακοί Χώροι	130

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Υδρολογικός κύκλος και παγκόσμιο υδρολογικό ισοζύγιο (Maidment, 1993)	10
Σχήμα 1-2: Πολύγωνα Thiessen στη λεκάνη απορροής του Ιλαρίωνα (Φωτόπουλος, 1999) 19	19
Σχήμα 1-3: Ισοϋέτιες καμπύλες στη λεκάνη του Πηνειού (ΕΤΥΜΠ, 2000)	20
Σχήμα 1-4: Θέσεις των σταθμών στη λεκάνη απορροής.	21
Σχήμα 1-5: Χάραξη πολυγώνων Thiessen.	22
Σχήμα 1-6: Χάραξη ισοϋέτιων καμπυλών.	23
Σχήμα 1-7: Τυπική εγκατάσταση σταθμηγράφου.	30
Σχήμα 1-8: Κατανομή ταχύτητας σε διατομή ποταμού.	31
Σχήμα 1-9: Κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας στο μέγιστο βάθος εγκάρσιας διατομής.	31
Σχήμα 1-10: Η διατομή ενός υδατορέματος.	32
Σχήμα 1-11: Τυπική διάταξη μυλίσκου.	32
Σχήμα 1-12: Καμπύλες στάθμης – παροχής (ΕΤΥΜΠ, 2000).	35
Σχήμα 1-13: Χαρακτηριστικοί όγκοι λειτουργίας ταμιευτήρα.	40
Σχήμα 2-1: Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας.	48
Σχήμα 2-2: Αθροιστική κατανομή πιθανότητας.	48
Σχήμα 2-3: Η ομοιόμορφη κατανομή.	52
Σχήμα 2-4: Διαστήματα εμπιστοσύνης κατανομής Gumbel μεγίστων.	59
Σχήμα 2-5: Χάραξη κατανομής Gumbel.	66
Σχήμα 2-6: Χάραξη κατανομών Log-Normal και Log-Pearson III.	67
Σχήμα 2-7: Διαδοχικά πεδία ανακλαστικότητας από το Radar.	77
Σχήμα 2-8: Πεδίο βροχής radar (α) μη ρυθμισμένο (β) ρυθμισμένο με επίγεια βροχόμετρα.	78
Σχήμα 2-9: Σύγκριση του παρατηρημένου πεδίου βροχόπτωσης του ραντάρ (αριστερά) και αυτού που προήλθε από πρόγνωση για χρονικό βήμα 110 λεπτών.	78
Σχήμα 2-10: 6-ωρη πρόγνωση πλημμύρας με χρήση δεδομένων ραντάρ-βροχόμετρου.	79
Σχήμα 2-11: Έκταση και βαθμός επικινδυνότητας της ξηρασίας του 2003 στην Ευρώπη. ...	80
Σχήμα 2-12: Καταστροφή καλλιεργειών στη Θεσσαλία (2001).	80
Σχήμα 2-13: Απώλεια βασικής ροής σε παραπόταμο του ποταμού Σπερχειού.	81
Σχήμα 2-14: Επιπτώσεις ξηρασίας στα οικοσυστήματα.	81
Σχήμα 3-1: Μέση υπερετήσια κατακρήμνιση (mm) για την περίοδο 1960 – 1990 στις Μεσογειακές χώρες της Ε.Ε.	83
Σχήμα 3-2: Κατανομή της συνολικής κατακρήμνισης στην Ελλάδα.	83
Σχήμα 3-3: Δείκτης ξηρότητας της UNESCO στις Μεσογειακές χώρες της Ε.Ε.	84
Σχήμα 3-4: Δείκτης ξηρότητας στην Ελλάδα.	85
Σχήμα 3-5: Κατανομή της απορροής στην Ελλάδα.	86
Σχήμα 3-6: Αστική ζήτηση νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΤΥΜΠ, 2000).	87

Σχήμα 3-7: Αγροτική ζήτηση νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΤΥΜΠ, 2000)	88
Σχήμα 3-8: Βιομηχανική ζήτηση νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΤΥΜΠ, 2000).....	88
Σχήμα 3-9: Ενεργειακή ζήτηση νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΤΥΜΠ, 2000).	89
Σχήμα 3-10: Κατανομή ζήτησης νερού για τις διαφορετικές χρήσεις (ΕΤΥΜΠ, 2000).....	89
Σχήμα 4-1: Μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας από την περίοδο 1970-1990 μέχρι τη περίοδο 2040-2060 (Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis).....	104
Σχήμα 4-2: Ο υδρολογικός κύκλος στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.	104
Σχήμα 4-3: Αλλαγή στη Βροχόπτωση (%) σύμφωνα με το σενάριο HadCM2 για 3 διαφορετικά έτη στόχους (2020, 2050 και 2080). Παρατηρείται μείωση για σχεδόν όλους τους μήνες και έτη στόχους πλην των χειμερινών. (Φωτόπουλος, 2000).....	108
Σχήμα 4-4: Αύξηση (%) της Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με το σενάριο HadCM2 για 3 διαφορετικά έτη στόχους (2020, 2050 και 2080). Παρατηρείται αύξηση για όλους τους μήνες και έτη στόχους. (Φωτόπουλος, 2000).....	108
Σχήμα 4-5: Αύξηση της Θερμοκρασίας σε 0C σύμφωνα με το σενάριο HadCM2 για 3 διαφορετικά έτη στόχους: 2020, 2050 και 2080. (Φωτόπουλος, 2000)	109
Σχήμα 4-6: Αλλαγή στην απορροή (%) σύμφωνα με το σενάριο HadCM2 για 3 έτη στόχους (2020, 2050 και 2080). Παρατηρείται μείωση για όλους τους μήνες πλην των χειμερινών. (Φωτόπουλος, 2000)	109
Σχήμα 4-7: Ποσοστιαία (%) αύξηση των πλημμυρικών αιχμών για τα σενάρια PIK και HadCM2050 για περιόδους επαναφοράς 10, 20, 100 και 1000 ετών.....	110
Σχήμα 4-8: Ποσοστιαία αύξηση BOD για τα κλιματικά σενάρια UKHI και HadCM2 για το έτος 2050.	111
Σχήμα 4-9: Ποσοστιαία μείωση DO για τα κλιματικά σενάρια UKHI και HadCM2 για το έτος 2050.	112
Σχήμα 4-10: Η μεταβολή της ετήσιας πρωτεύουσας ενέργειας E (GWh) σε συνάρτηση με τη διακινδύνευση (%) για το έτος 2080. (Φωτόπουλος, 2000)	115
Σχήμα 4-11: Οι χρήσεις γης αναλυτικά και γενικευμένα.....	117
Σχήμα 4-12: Σενάριο αλλαγής χρήσης γης στη Θεσσαλία (μείωση δασικής έκτασης, αύξηση αγροτικής).....	118
Σχήμα 4-13: Ποσοστιαία αλλαγή μέσης μηνιαίας απορροής για το σενάριο αλλαγής της χρήσεως γης	118
Σχήμα 4-14: Καταστροφή του δάσους στη λεκάνη ανάντη της πόλης των Τρικάλων λόγω πυρκαγιάς :% αύξηση παροχών 10ετίας, 20ετίας, 100ετίας και 1000ετίας.	119
Σχήμα 5-1: Υφιστάμενη διαίρεση της Ελλάδας σε 14 Υδατικά Διαμερίσματα.	122
Σχήμα 5-2: Οι ομάδες εργασίας για την εφαρμογή της Οδηγίας.	124
Σχήμα 5-3: Διαγραμματική απεικόνιση των απαιτούμενων σταδίων για την εφαρμογή της Οδηγίας.....	126

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1: Μερικοί συχνά χρησιμοποιούμενοι υδρολογικοί όροι και οι μονάδες τους.....	11
Πίνακας 1-2: Ετήσια μετρημένα ύψη βροχής στους σταθμούς 1 και 2 σε mm.	15
Πίνακας 1-3: Συμπληρωμένα ετήσια ύψη βροχής στους σταθμούς 1 και 2 σε mm.....	16
Πίνακας 1-4: Υψόμετρα και μηνιαία βροχόπτωση σταθμών.	21
Πίνακας 1-5: Διαδικασία της μεθόδου Thiessen.....	22
Πίνακας 1-6: Διαδικασία μεθόδου ισοϋέτιων καμπυλών.	23
Πίνακας 1-7: Μετρήσεις στάθμης – παροχής.....	36
Πίνακας 1-8: Διαδικασία υπολογισμού καμπύλης στάθμης – παροχής.	37
Πίνακας 1-9: Μονάδες χρήσιμες για τα υδατικά ισοζύγια.....	39
Πίνακας 2-1: Χρονοσειρά 20 ετησίων βροχοπτώσεων.....	47
Πίνακας 2-2: Χρονοσειρά 20 ετησίων βροχοπτώσεων (φθίνουσα κατά μέγεθος).	47
Πίνακας 2-3: Κατάταξη κατά κλάσεις.	48
Πίνακας 2-4: Πίνακας κανονικής κατανομής.....	54
Πίνακας 2-5α: Δείκτης συχνότητας $K(T)$ Pearson III.	57
Πίνακας 2-6: Οικονομικά κόστη κυριότερων ξηρασιών στην Ευρώπη.	81
Πίνακας 4-1: Εκτίμηση της Ευαισθησίας Διάφορων Τομέων της διαχείρισης υδατικών πόρων στις κλιματικές αλλαγές (Arnell ,1989).....	114
Πίνακας 4-2: Μεταβολές της καθαρής αποθηκευτικής ικανότητας % για διατήρηση της διακινδύνευσης στην παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας στα επίπεδα αναφοράς.	116

1. Υδατικό Περιβάλλον – Στοιχεία Υδρολογικής Ανάλυσης

1.1 Γενική εισαγωγή

Το νερό μαζί με τον αέρα και το έδαφος αποτελούν τις κύριες πηγές απ' όπου ο άνθρωπος μπορεί να αντλήσει πόρους και αγαθά για να βελτιώσει τη ζωή του. Οι υδατικοί πόροι λοιπόν είναι βασικό αγαθό για τη ζωή και το περιβάλλον στον πλανήτη μας, αλλά και ρυθμιστικός παράγοντας της οικονομικής, τεχνολογικής, κοινωνικής και πολιτισμικής ανάπτυξης των χωρών. Επίσης, είναι ένα διεθνές ζήτημα και πρόβλημα το οποίο απασχολεί την παγκόσμια κοινότητα και δημιουργεί διενέξεις - πολλοί πιστεύουν ότι μπορεί ν' αποτελέσει την αιτία ενός μελλοντικού πολέμου - ανάμεσα σε χώρες που μοιράζονται νερά από διασυνοριακά ποτάμια, λίμνες και υπόγειους υδροφορείς.

Αν και το νερό φαίνεται να υπάρχει σε αφθονία στη γη, αφού το 70% της επιφάνειας της καλύπτεται απ' αυτό, η τελικά διαθέσιμη και κατάλληλη για χρήση ποσότητα είναι πολύ μικρή. Και αυτό γιατί το 98% του νερού της γης βρίσκεται στις θάλασσες, στους ωκεανούς και στους πάγους ενώ από το υπόλοιπο το μεγαλύτερο μέρος είναι τεχνικά μη εκμεταλλεύσιμο (π.χ. βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο των 800 m) ή είναι υφάλμυρο και άρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο. Μόνο το 0.6% του νερού σε παγκόσμια κλίμακα θεωρείται κατάλληλο και διατίθεται για χρήση. Αυτή η ήδη περιορισμένη ποσότητα των διαθέσιμων υδατικών πόρων είναι ανομοιόμορφα κατανομημένη στο χώρο. Υπάρχουν χώρες οι οποίες έχουν αφθονία νερού και άλλες που έχουν μεγάλες ελλείψεις ή είναι έρημοι. Ακόμα και στο εσωτερικό των χωρών οι υδατικοί πόροι δε διατίθενται ομοιόμορφα, γεγονός που προκαλεί σοβαρές τοπικές διενέξεις μεταξύ των χρηστών.

Η διαθεσιμότητα στο χρόνο είναι επίσης άνιση αφού το νερό του χειμώνα (που συχνά είναι πλημμυρικό) χρειάζεται περισσότερο το καλοκαίρι για συγκεκριμένες χρήσεις (άρδευση, τουρισμός, κλπ). Η εξαιρετικά περιορισμένη διαθεσιμότητα του νερού, η άνιση χωροχρονική κατανομή του, αλλά και η συνεχώς επιδεινούμενη ποιότητα του, καθιστούν τους υδατικούς πόρους αγαθό σε ανεπάρκεια.

Για να αξιοποιηθούν σωστά οι υδατικοί πόροι και να αντιμετωπισθούν στο μέτρο του δυνατού αυτά τα αρνητικά για τον καταναλωτή χαρακτηριστικά τους, χρειάζεται να γίνουν έργα. Τα υδραυλικά έργα είναι αυτά που διασφαλίζουν την επάρκεια του νερού σε κάποια περιοχή ανάλογα με τη ζήτηση, που ρυθμίζουν κατάλληλα την ποσότητά του στο χρόνο (π.χ. ταμιευτήρες), που διανέμουν το νερό στο χώρο (π.χ. δίκτυα ύδρευσης), που προστατεύουν από την πλημμυρική δράση του (αντιπλημμυρικά έργα) και που διατηρούν την ποιότητά του

(π.χ. βιολογικοί καθαρισμοί). Μέσα απ' αυτά τα έργα εξυπηρετείται κυρίως η ζήτηση για τις διάφορες χρήσεις του νερού (αγροτική, αστική, βιομηχανική, ενεργειακή). Οι υδατικοί πόροι, τα υδραυλικά έργα και οι χρήσεις νερού είναι συνιστώσες αλληλένδετες και επηρεαζόμενες που συγκροτούν τον συνολικό τομέα του νερού μιας χώρας και πρέπει να αντιμετωπίζονται με κοινή οπτική γωνία τουλάχιστον όσον αφορά στον τομέα της πολιτικής, της διαχείρισης και των αποφάσεων.

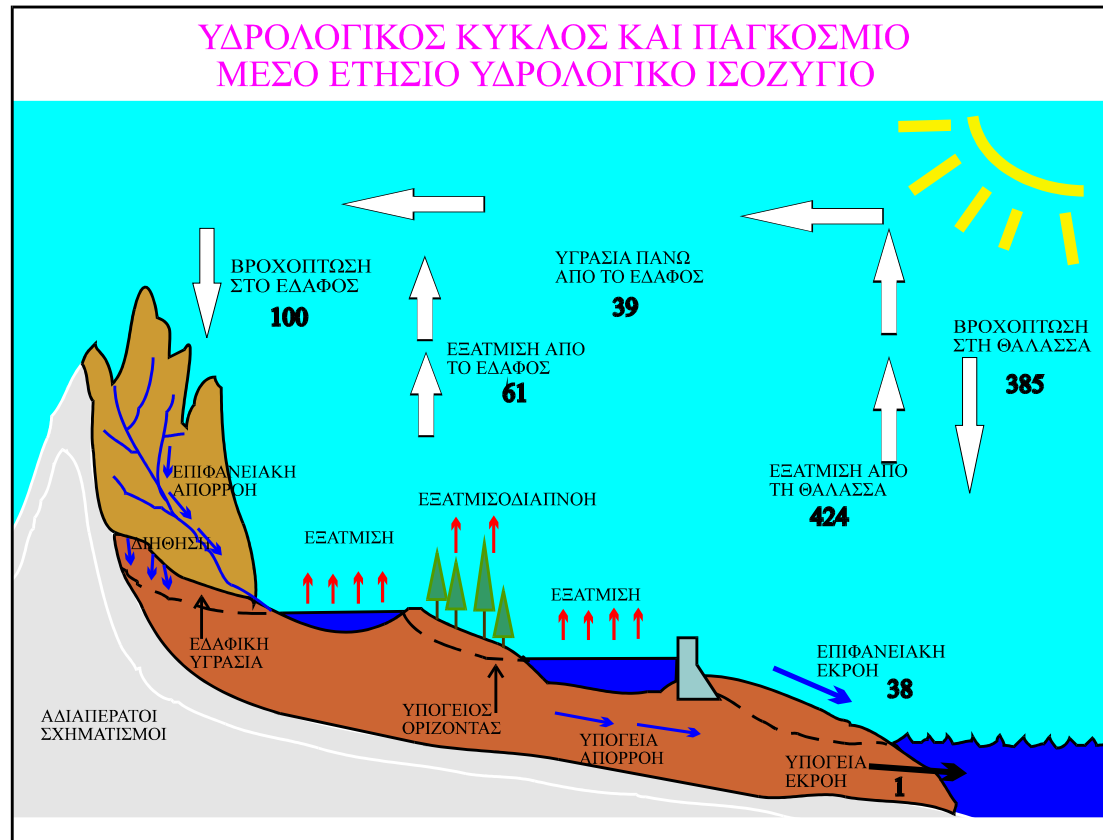
Η ορθή εκτίμηση και πρόβλεψη των υδατικών πόρων, ο κατάλληλος σχεδιασμός των υδραυλικών έργων και η ορθολογική διαχείριση του συνολικού τομέα του νερού σε επίπεδο χώρας αλλά και σε τοπικό επίπεδο υδρολογικής λεκάνης ή περιφέρειας είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη της κάθε χώρας. Στον τομέα της πολιτικής και της διαχείρισης σχετικά με το νερό ήδη συζητείται και μορφοποιείται σε Ευρωπαϊκό επίπεδο η Οδηγία - Πλαίσιο για τα Νερά που αφορά στην ανάπτυξη των συνθηκών και της γνώσης για την ορθολογική χρήση των υδατικών αποθεμάτων της κάθε χώρας. Τελικός στόχος της Οδηγίας είναι η διατήρηση της "καλής οικολογικής κατάστασης" των υδροφόρων μέσα από την μελέτη και εφαρμογή "σχεδίων διαχείρισης" για κάθε υδρολογική περιφέρεια. Η Οδηγία αντιμετωπίζει με ενιαίο τρόπο τον συνολικό τομέα του νερού και έχει υψηλές απαιτήσεις και προδιαγραφές για στοιχεία, αναλύσεις, μοντέλα κλπ που αφορούν ένα σύνολο πολλών επιμέρους συνιστωσών (π.χ. επιφανειακά, υπόγεια και θαλάσσια ύδατα, οικοσυστήματα κλπ). Είναι ένα είδος "καταστατικού χάρτη" για τα νερά με τον οποίο όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες και φυσικά η Ελλάδα είναι υποχρεωμένες να συμμορφωθούν στα επόμενα χρόνια.

1.2 Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος περιγράφει την αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς την ατμόσφαιρα και την ξηρά, που συνοδεύεται και από αλλαγές ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του νερού. Στο Σχήμα 1-1 δίνεται μια σχηματική περιγραφή του υδρολογικού κύκλου.

Η αρχή του υδρολογικού κύκλου μπορεί θεωρητικά να τοποθετηθεί στην ατμόσφαιρα στην οποία συγκεντρώνονται οι υδρατμοί που προκύπτουν από την εξάτμιση του νερού από τη θάλασσα και την ξηρά, καθώς και από τη διαπνοή από τα δένδρα και τη βλάστηση. Οι υδρατμοί αυτοί μεταφέρονται υπό την επίδραση των ανέμων και κάτω από κατάλληλες συνθήκες συμπυκνώνονται σε νέφη και στη συνέχεια υπό την μορφή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι) επανέρχονται στην επιφάνεια της γης. Από το νερό που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους ένα μέρος συγκρατείται από τη βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά, ένα άλλο μέρος διηθείται εντός του εδάφους και τέλος

ένα τρίτο μέρος απορρέει επιφανειακό προς τα ρεύματα και τους ποταμούς καταλήγοντας στις λίμνες ή τις θάλασσες.



Σχήμα 1-1: Υδρολογικός κύκλος και παγκόσμιο υδρολογικό ισοζύγιο (Maidment, 1993)

Από το νερό που διηθείται, ένα μέρος εξατμίζεται ή διαπνέεται μέσω των φυτών και το υπόλοιπο διηθείται σε βαθύτερα στρώματα επαναφορτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς βρίσκοντας αργότερα διέξοδο προς την επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα υψόμετρα και καταλήγοντας τελικό στη θάλασσα. Από τη θάλασσα, μέσω της εξατμησης το νερό επανέρχεται στην ατμόσφαιρα συμπληρώνοντας τον υδρολογικό κύκλο.

1.3 Υδρολογικές μεταβλητές

Οι βασικές υδρολογικές μεταβλητές είναι η απορροή (επιφανειακή και υπόγεια), η κατακρήμνιση, η εξατμηση, η παρεμπόδιση, η κατακράτηση και η διήθηση. Η επιφανειακή απορροή δίνει τους σημαντικότερους υδατικούς πόρους αλλά και δημιουργεί τους υδρολογικούς κινδύνους. Επίσης η υπόγεια απορροή συνδέεται με την αξιοποίηση των υδατικών πόρων και αποτελεί σημαντικό αντικείμενο της Τεχνικής Υδρολογίας. Τα

ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα συνδέονται με την επιφανειακή και υπόγεια απορροή με τη μορφή αιτίου - αποτελέσματος. Η εξάτμιση και η διαπνοή, που αποδίδονται με το συνθετικό όρο εξατμισοδιαπνοή, αποτελούν τις αναγκαστικές υδρολογικές απώλειες, δηλαδή το τμήμα των κατακρημνισμάτων που δεν απορρέει και επομένως δεν είναι διαθέσιμο για εκμετάλλευση. Συμπερασματικά, η απορροή (επιφανειακή και υπόγεια), α κατακρημνίσεις και η εξατμισοδιαπνοή αποτελούν τις πιο χαρακτηριστικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου και τα μεγέθη τους ποσοτικοποιούν την εικόνα των υδατικών πόρων μιας περιοχής.

Στον Πίνακα 1-1 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μονάδες μέτρησης (στο μετρικό σύστημα) που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη της Υδρολογίας, για κάθε μετρούμενο μέγεθος. Οι μονάδες αυτές καθορίζονται από την ακρίβεια των οργάνων μέτρησης αλλά και από τη φυσική σημασία του μετρούμενου μεγέθους. Η πιο συνηθισμένη μονάδα μέτρησης της απορροής είναι τα κυβικά μέτρα το δευτερόλεπτο (m^3/sec), ενώ συχνά χρησιμοποιείται και το ισοδύναμο ύψος νερού, ανηγμένο στην επιφάνεια της λεκάνης η οποία συνήθως μετρίεται σε τετραγωνικά χιλιόμετρα (km^2). Το ύψος βροχόπτωσης εκφράζεται συχνότερα σε χιλιοστά (mm) ή εκατοστά (cm) του μέτρου. Είναι δε περιττό να εκφράζεται το συγκεκριμένο μέγεθος με ακρίβεια δεκαδικών του χιλιοστού, μια και τα κοινά βροχόμετρα και βροχογράφοι που χρησιμοποιούνται δεν έχουν τόσο μεγάλη ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση, στη μέτρηση των μεγεθών και στην έκφραση των αποτελεσμάτων, υπεισέρχεται η κρίση του υδρολόγου μηχανικού.

Πίνακας 1-1: Μερικοί συχνά χρησιμοποιούμενοι υδρολογικοί όροι και οι μονάδες τους.

Μεταβλητή	Χαρακτηριστικά	Μονάδες μέτρησης
Κατακρήμνιση	Ύψος, Ένταση, Διάρκεια	Χιλιοστά (mm), Χιλιοστά ανά ώρα (mm/h), Ώρες (h)
Εξάτμιση	Ρυθμός, Ύψος	Χιλιοστά ανά μέρα, μήνα ή χρόνο (mm/day , mm/mo , mm/yr), Χιλιοστά (mm)
Εξάτμισο-διαπνοή	Ρυθμός, Ύψος	Χιλιοστά ανά μέρα, μήνα ή χρόνο (mm/day , mm/mo , mm/yr), Χιλιοστά (mm)
Διήθηση	Ρυθμός, Ύψος	Χιλιοστά ανά ώρα (mm/h), Χιλιοστά (mm)
Παραμπόδιση	ισοδύναμο ύψος	Χιλιοστά ανά διάρκεια καταιγίδας (mm/time)
Κατακράτηση	ισοδύναμο ύψος	Χιλιοστά ανά διάρκεια καταιγίδας (mm/time)
Απορροή	Παροχή, όγκος, ισοδύναμο ύψος	Κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m^3/sec), Κυβικά μέτρα (m^3), Ισοδύναμα χιλιοστά πάνω στη λεκάνη απορροής (mm)

1.4 Μέτρηση και εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών

1.4.1 Μέτρηση κατακρημνισμάτων

Το μετεωρολογικό στοιχείο που πρώτο μετρήθηκε από τον άνθρωπο είναι κατά πάσα πιθανότητα η βροχή. Η παλαιότερη και μακρύτερη περίοδος καταγραφής αναφέρεται στην Αίγυπτο στον ποταμό Νείλο περίπου στα 980. Στην Ελλάδα, τα μακρύτερα μήκος καταγραφής βροχής αφορά στα δεδομένα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών από το 1870 περίπου. Υπάρχουν αρκετά όργανα μέτρησης και εκτίμησης της βροχής, όπως τα τυπικά βροχόμετρα, βροχογράφοι, μετεωρολογικά ραντάρ και δορυφόροι. Σήμερα υπάρχει σε χρήση ένας μεγάλος αριθμός τύπων οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του μεγέθους των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Οι περισσότεροι χρησιμοποιούμενοι από τους τύπους αυτούς αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Τα **βροχόμετρα** είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής, εγκατεστημένα σε κατάλληλες θέσεις, που συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση, δίνοντας την αντίστοιχη σημειακή μέτρηση. Δίνουν την ολική σημειακή βροχόπτωση και το ισοδύναμο ύψος νερού μιας χιονόπτωσης ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα (συνήθως 8ωρο, 12ωρο ή 24ωρο), με την ανάγνωση της ένδειξης από έναν παρατηρητή.

Οι **βροχογράφοι** είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής, εγκατεστημένα σε κατάλληλες θέσεις, που συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση, καταγράφοντας με απλό ωρολογιακό μηχανισμό τη μεταβολή του ύψους βροχής στο χρόνο, περιγράφοντας έτσι τη χρονική κατανομή της σημειακής βροχόπτωσης.

Το ύψος χιονόπτωσης μετριέται συνήθως με **χιονοτράπεζες**. Αυτές είναι απλές οριζόντιες επιφάνειες όπου, αφού συσσωρευτεί το χιόνι, μετριέται το ύψος του με έναν κοινό πήχη. Μετά τη μέτρηση η τράπεζα καθαρίζεται από το χιόνι, ώστε να είναι έτοιμη για την επόμενη μέτρηση του ύψους χιονόπτωσης. Το ισοδύναμο ύψος νερού της χιονόπτωσης και η αντίστοιχη πυκνότητα μπορούν να μετρηθούν από τη χιονοτράπεζα, αν αυτή είναι εφοδιασμένη με ένα απλό σύστημα ζύγισης που μετρά το βάρος του χιονιού.

Το ύψος χιονοκάλυψης μετριέται εύκολα με την έμπηξη ενός κοινού πήχη, ή την ανάγνωση σε μόνιμα εγκατεστημένη σταδία, της οποίας η μηδενική στάθμη συμπίπτει με την επιφάνεια του εδάφους. Το ισοδύναμο ύψος νερού της χιονοκάλυψης μετριέται με τη λήψη δείγματος χιονιού, μέσω της έμπηξης κατάλληλου κυλίνδρου-δειγματολήπτη χιονιού, και στη συνέχεια με τη ζύγιση του χιονιού που συλλέγεται. Για τη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων ύψους χιονοκάλυψης και ισοδύναμου ύψους νερού, αποφεύγεται η μέτρηση σε ένα

σημείο και προτιμάται η λήψη του μέσου όρου των μετρήσεων σε περίπου 6 σημεία κατά μήκος μιας προκαθορισμένης (μόνιμης) διαδρομής χιονομέτρησης με τυπικό μήκος 150-250 m.

1.4.2 Επεξεργασία σημειακών κατακρημνισμάτων. Συμπλήρωση κενών

Πολύ συχνό φαινόμενο στις χρονοσειρές των μετρήσεων των κατακρημνισμάτων σε διάφορους σταθμούς είναι η ύπαρξη κενών στις μετρήσεις. Τα κενά αυτά οφείλονται συνήθως σε αμέλεια των παρατηρητών ή και σε βλάβες των οργάνων μέτρησης. Για τη συμπλήρωση των κενών αυτών, εφαρμόζονται αριθμητικές, γραφικές ή σύνθετες υπολογιστικές μέθοδοι. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δυο απλές αλλά συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για τη συμπλήρωση κενών στις μετρήσεις.

□ Μέθοδος Αριθμητικών Μέσων

Είναι η απλούστερη μέθοδος συμπλήρωσης βροχοπτώσεων. Σε μια περιοχή με N γνωστές μετρήσεις σε $i=1,2,...,N$ σταθμούς, η άγνωστη τιμή P_x θα ισούται με το μέσο όρο των γνωστών P_i . Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι απλή, δίνει σχετικά αποδεκτά αποτελέσματα σε περιπτώσεις που οι υψομετρικές διαφορές των σταθμών μεταξύ των είναι μικρές και η χωρική κατανομή των σταθμών είναι σχετικά ομοιόμορφη.

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (1-1)$$

Επειδή εκφράσεις όπως «μικρές διαφορές» και «σχετικά ομοιόμορφη κατανομή» μπορούν να εκτιμηθούν από τον καθένα διαφορετικά, ως γενικός κανόνας είναι να χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή, όταν οι ετήσιες βροχοπτώσεις αποκλίνουν λιγότερο από 10% από τον υπό συμπλήρωση σταθμό.

□ Μέθοδος Γραμμικής Παλινδρόμησης

Πολλές φορές είναι δυνατόν να συσχετισθούν οι μετρήσεις ενός σταθμού με τις μετρήσεις ενός άλλου με μια γραμμική σχέση της μορφής:

$$y = a + bx \quad (1-2)$$

όπου a, b παράμετροι που εκτιμώνται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης και y, x μετρήσεις στους σταθμούς Y και X . Οι συντελεστές a, b υπολογίζονται από τις ακόλουθες δυο απλές εξισώσεις:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-3)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (1-4)$$

όπου $\mathbf{X_i}$ και $\mathbf{y_i}$ οι σειρές των μετρήσεων στις θέσεις X και Y για χρονικό διάστημα $i=1,2,...,n$
 $\bar{x}$ και $\bar{y}$ οι μέσοι όροι των σειρών, ως εξής:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-5)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i \quad (1-6)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης r , μας δείχνει πόσο κατάλληλη είναι η μέθοδος της γραμμικής συσχέτισης για τη συμπλήρωση των μετρήσεων δεδομένων δυο σταθμών:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1-7)$$

Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι ο αριθμός αυτός, τόσο καταλληλότερη είναι η μέθοδος. Ως κανόνας που χρησιμοποιείται εν προκειμένω είναι η τιμή του συντελεστή συσχέτισης r να είναι μεταξύ του 0.70 και της μονάδας.

Παράδειγμα 1-1: Εκτίμηση μέσης σημειακής βροχόπτωσης - συμπλήρωση κενών

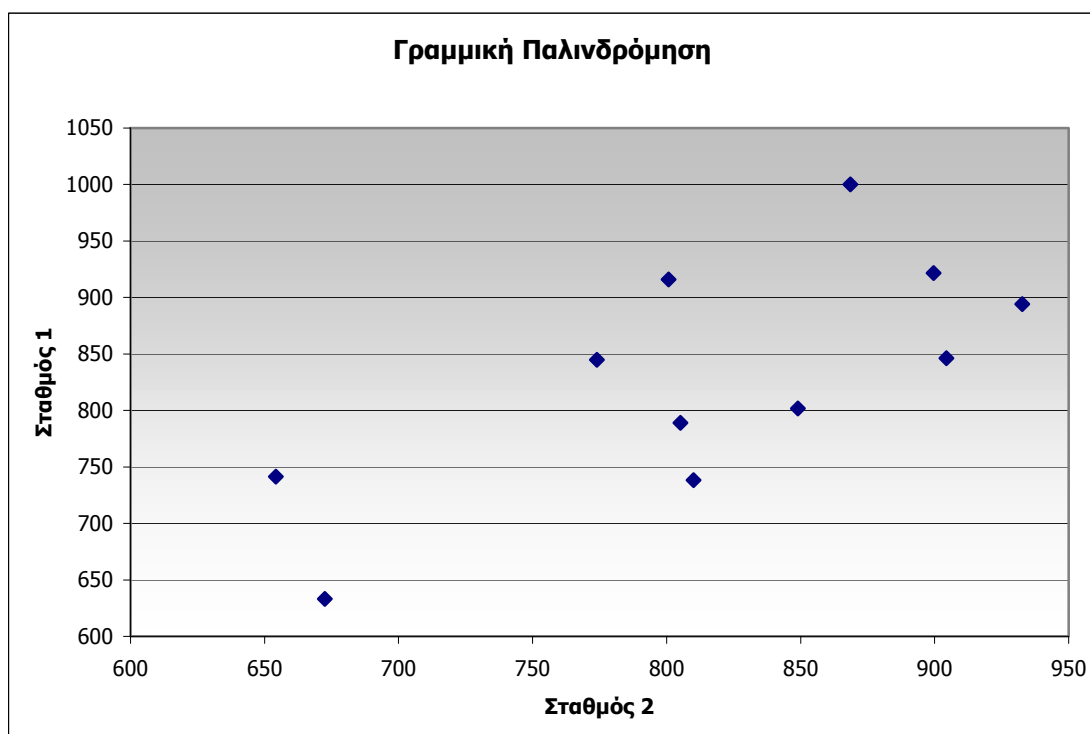
Δίδονται στον πίνακα 1-2 τα ετήσια ύψη βροχής δυο σταθμών 1 και 2 σε mm για τη χρονική περίοδο 1990-2003, με ελλείψεις σε μερικά έτη λόγω προβλημάτων στο σταθμό 2. Ζητείται η συμπλήρωση των κενών του σταθμού 2 με την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης. Να υπολογιστεί επίσης η μέση ετήσια βροχόπτωση για έναν

σταθμό 3, που βρίσκεται πλησίον των σταθμών 1 και 2, κατά τα έτη 1993-94 και 1996-97 με τη μέθοδο των αριθμητικών μέσων.

Πίνακας 1-2: Ετήσια μετρημένα ύψη βροχής στους σταθμούς 1 και 2 σε mm.

Υδρολογικό Έτος	Σταθμός 1	Σταθμός 2
1990-91	801.88	848.99
1991-92	741.32	654.18
1992-93	921.77	899.57
1993-94	970.42	-
1994-95	633.19	672.53
1995-96	738.28	810.01
1996-97	910.23	-
1997-98	1000.12	868.54
1998-99	894.12	932.64
1999-00	788.88	805.12
2000-01	844.86	773.96
2001-02	915.87	800.68
2002-03	846.32	904.37

ΛΥΣΗ



Η γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των υψών βροχής των δυο σταθμών (μη λαμβάνοντας υπόψη τα έτη για τα οποία δεν υπάρχουν στοιχεία για το Σταθμό 2), γίνεται μέσω λογιστικού φύλλου εργασίας, σχεδιάζοντας τα σημεία για τους δυο σταθμούς και εφαρμόζοντας τους τύπους 1-2 έως 1-6. Η εξίσωση της ευθείας που προκύπτει είναι:

$$y = 0.62x + 301.02$$

όπου **y** το ετήσιο ύψος βροχής για το Σταθμό 1

x το ετήσιο ύψος βροχής για το Σταθμό 2

Από τη σχέση (1-7), ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης προκύπτει ίσος με 0.711 (ή όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το τετράγωνό του είναι ίσο με 0.5061). Επειδή η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από 0.70, θεωρείται ότι η συσχέτιση με βάση τη γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των δεδομένων των δυο σταθμών είναι καλή.

Η συμπλήρωση των ελλিপών στοιχείων του Σταθμού 2, γίνεται με χρήση της ευθείας που προέκυψε, θέτοντας όπου y τις γνωστές τιμές για τα υδρολογικά έτη 1993-94 και 1996-97 και λύνοντας ως προς x:

Για y=970.42 προκύπτει x=1079.7 και για y=910.23 προκύπτει x=982.6. Στον πίνακα 1-3 φαίνονται τα συμπληρωμένα στοιχεία με έντονα γράμματα.

Πίνακας 1-3: Συμπληρωμένα ετήσια ύψη βροχής στους σταθμούς 1 και 2 σε mm.

Υδρολογικό Έτος	Σταθμός 1	Σταθμός 2
1990-91	801.88	848.99
1991-92	741.32	654.18
1992-93	921.77	899.57
1993-94	970.42	1079.7
1994-95	633.19	672.53
1995-96	738.28	810.01
1996-97	910.23	982.6
1997-98	1000.12	868.54
1998-99	894.12	932.64
1999-00	788.88	805.12
2000-01	844.86	773.96
2001-02	915.87	800.68
2002-03	846.32	904.37

Κατά το έτος 1993-94, η τιμή της βροχόπτωσης στο σταθμό 3 θα είναι ο μέσος όρος των τιμών της βροχόπτωσης που μετρήθηκε στους σταθμούς 1 και 2, δηλαδή 1025.06 mm.

1.4.3 Εκτίμηση επιφανειακών κατακρημνισμάτων

Οι μετρήσεις βροχόπτωσης που λαμβάνονται από τα βροχόμετρα και τους βροχογράφους είναι σημειακές και ως εκ τούτου αντιπροσωπεύουν το σημείο στο οποίο μετρήθηκε η βροχόπτωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, όπως για παράδειγμα στην εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου, ιδιαίτερη σημασία έχει η επιφανειακή βροχόπτωση, η βροχόπτωση δηλαδή που πέφτει σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής. Για το λόγο αυτό, σε μια λεκάνη απορροής εγκαθίσταται δίκτυο βροχογράφων, οι θέσεις των οποίων θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να περιγράφουν όσο το δυνατόν καλύτερα τη χωρική διαφοροποίηση της βροχής. Κατόπιν, οι σημειακές μετρήσεις των βροχογράφων ανάγονται σε επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης απορροής χρησιμοποιώντας μεθόδους επιφανειακής ολοκλήρωσης.

Υπάρχει πληθώρα μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης. Αυτές μπορούν να διαχωριστούν στις μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης και στις μεθόδους προσαρμογής επιφάνειας (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1997). Οι μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση απευθείας, από τις τιμές της σημειακής βροχόπτωσης. Οι πιο γνωστές μέθοδοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι η μέθοδος του μέσου όρου, η μέθοδος Thiessen, η μέθοδος δυο αξόνων του Bethlahmy και η μέθοδος βέλτιστης ολοκλήρωσης (kriging).

Αντίθετα οι μέθοδοι προσαρμογής επιφάνειας εκτιμούν πρώτα τη γεωγραφική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης στην υπό εξέταση περιοχή και με βάση αυτή, υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση. Εδώ ανήκουν η μέθοδος των ισοϋέτιων, η μέθοδος υπολογιστικής γραμμικής παρεμβολής η μέθοδος της αντίστροφης απόστασης, η μέθοδος πολυτετραγωνικής παρεμβολής η μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων με πολυώνυμα, η μέθοδος πολυωνύμων Lagrange, η μέθοδος προσαρμογής spline και η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής. Οι μέθοδοι προσαρμογής επιφάνειας χωρίζονται παραπέρα σε μεθόδους παρεμβολής και εξομάλυνσης. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά η μέθοδος του μέσου όρου, η μέθοδος Thiessen και η μέθοδος των ισοϋέτιων.

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί, η αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται πρωτίστως από την πυκνότητα της σημειακής πληροφορίας: η ολοκλήρωση είναι τόσο επιτυχέστερη, όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των βροχομετρικών

σταθμών. Δυστυχώς, τα δίκτυα δεν είναι συνήθως αρκετά πυκνά, ενώ σε ορισμένες ορεινές δυσπρόσιτες περιοχές οι σταθμοί σπανίζουν.

❑ Μέθοδος μέσου όρου

Πρόκειται για την απλούστερη μέθοδο, σύμφωνα με την οποία τα βάρη w_i των $i=1,2,...,k$ σταθμών λαμβάνονται ίσα, δηλαδή $w_i = 1/k$. Η μέθοδος λόγω της απλότητάς της μπορεί να χρησιμοποιείται για πρώτες χονδρικές εκτιμήσεις, αλλά όχι για οριστικές. Η ακρίβεια της είναι ανεκτή μόνο όταν η περιοχή είναι σχετικά επίπεδη, οι σταθμοί ομοιόμορφα κατανομημένοι σε αυτή και τα ύψη βροχής δεν διαφέρουν πολύ από σταθμό σε σταθμό. Η επιφανειακή βροχόπτωση (h_s) δίνεται από τις σημειακές βροχοπτώσεις h_i με τη σχέση:

$$h_s = \sum_{i=1}^k w_i h_i \quad (1-8)$$

❑ Μέθοδος Thiessen

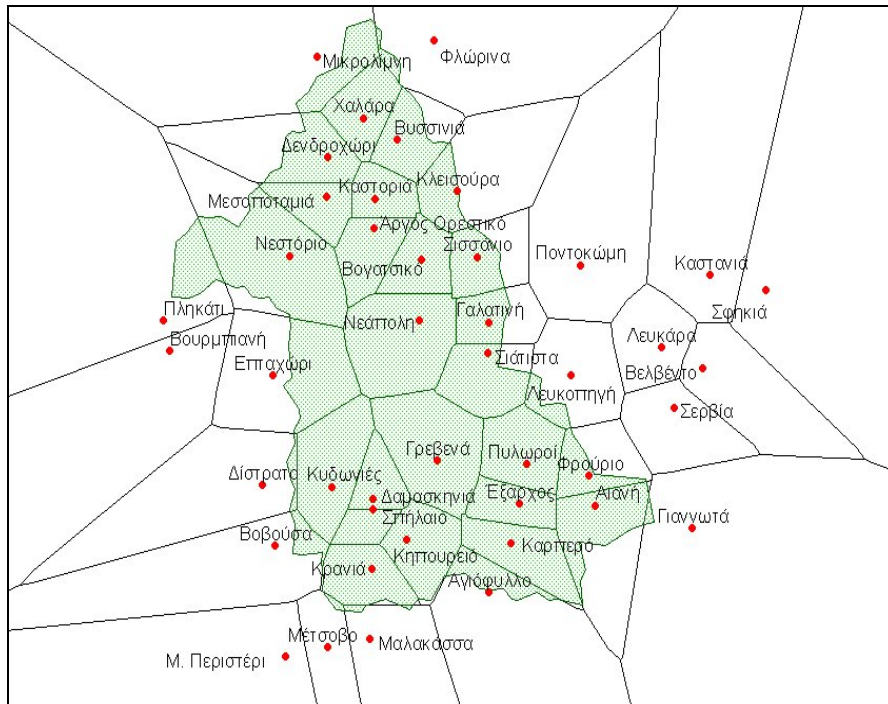
Σύμφωνα με αυτή την κλασσική μέθοδο, η συνολική επιφάνεια A χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής A_i , μία για κάθε σταθμό, έτσι ώστε:

$$\sum_{i=1}^k A_i = A \quad (1-9)$$

Ο συντελεστής βάρους θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού, δηλαδή:

$$w_i = A_i / A \quad (1-10)$$

Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού i να απέχει από τη θέση του σταθμού i λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Η αρχή αυτή οδηγεί άμεσα σε μια απλή γεωμετρική κατασκευή των ζωνών επιρροής βασισμένη στις μεσοκαθέτους των ευθυγράμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη. Προκύπτουν έτσι τα γνωστά πολύγωνα Thiessen (Σχήμα 1-2).



Σχήμα 1-2: Πολύγωνα Thiessen στη λεκάνη απορροής του Ιλαρίωνα (Φωτόπουλος, 1999)

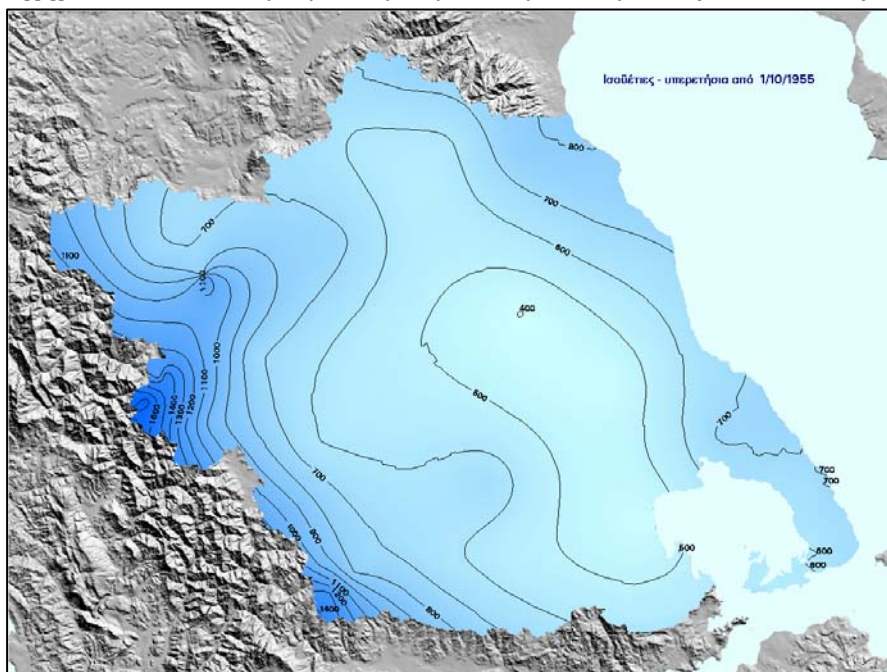
Η μέθοδος αυτή, αν και θεμελιώθηκε αρκετά παλιά, παραμένει και σήμερα ευρέως διαδεδομένη, λόγω της απλότητας στην εφαρμογή της και των αξιόπιστων εκτιμήσεών της. Οι εκτιμήσεις της μεθόδου είναι τόσο καλύτερες όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών και όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική κλίμακα μελέτης (π.χ. οι εκτιμήσεις σε υπηρετήσια κλίμακα είναι πιο ακριβείς από τις εκτιμήσεις στην κλίμακα ενός επεισοδίου βροχής).

Επειδή η κατακρήμνιση εξαρτάται μεταξύ των άλλων και από το υψόμετρο, εάν το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι διαφορετικό από το μέσο υψόμετρο των σταθμών (θέσεις εγκατεστημένων βροχόμετρων ή / και βροχογράφων), θα πρέπει να γίνεται διόρθωση για την αναίρεση της υποεκτίμησης ή υπερεκτίμησης της επιφανειακής βροχόπτωσης με βάση το μέσο υψόμετρο της υπό εξέταση λεκάνης απορροής (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2002).

❑ **Μέθοδος των Ισοϋετίων**

Η ισοϋέτια καμπύλη ορίζεται από τον γεωμετρικό τόπο των σημείων στα οποία το ύψος βροχής παίρνει μια δεδομένη τιμή. Ανάλογα με το εύρος διακύμανσης του ύψους βροχής χαράσσονται ισοϋέτιες καμπύλες με δεδομένη ισοδιάσταση Δh . Βεβαίως, η ακριβής χάραξη μιας ισοϋέτιας καμπύλης εξαρτάται από τα διαθέσιμα σημεία και από την εμπειρία του υδρολόγου. Παράδειγμα ισοϋετίων καμπύλων σε λεκάνη απορροής φαίνεται στο Σχήμα 1-3.

Σχήμα 1-3: Ισοϋέτιες καμπύλες στη λεκάνη του Πηνειού (ΕΤΥΜΠ, 2000)

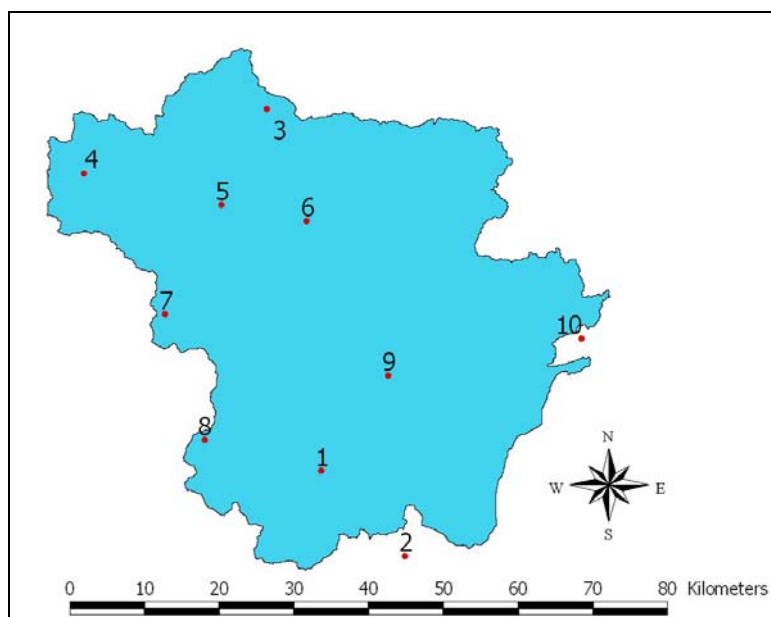


Αφού χαραχτούν οι ισοϋέτιες καμπύλες για να προκύψει η επιφανειακή μέση βροχόπτωση της περιοχής εμβαδομετρούνται οι επιφάνειες A_i μεταξύ των διαδοχικών καμπυλών που αντιστοιχούν σε ύψη βροχής h_i και h_{i-1} . Η επιφανειακή μέση βροχόπτωση της περιοχής θα είναι:

$$h_s = \sum_r \frac{h_i + h_{i-1}}{2} \frac{A_i}{A} \quad (1-11)$$

Παράδειγμα 1-2: Εκτίμηση μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης

Στον παρακάτω Πίνακα 1-4 δίνονται τα μηνιαία δεδομένα βροχής και τα αντίστοιχα υψόμετρα για δέκα βροχομετρικούς σταθμούς μιας υπολεκάνης του ποταμού Πηνειού στη Θεσσαλία (Σχήμα 1-4). Να υπολογιστεί η μέση επιφανειακή βροχόπτωση με τη μέθοδο του αριθμητικού μέσου, Thiessen και ισοϋέτιων. Επιπλέον να γίνει αναγωγή της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Thiessen, στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Δίνεται η έκταση της λεκάνης ίση με 2940 km^2 και το μέσο υψόμετρο της λεκάνης ίσο με 532 m .



Σχήμα 1-4: Θέσεις των σταθμών στη λεκάνη απορροής.

Πίνακας 1-4: Υψόμετρα και μηνιαία βροχόπτωση σταθμών.

α/α	Σταθμός	Υψόμετρο (m)	Βροχόπτωση (mm)
1	ΜΟΥΖΑΚΙ	226	74
2	ΤΑΥΡΩΠΟΣ	220	73
3	ΑΓΙΟΦΥΛΛΟ	581	92
4	ΜΑΛΑΚΑΣΙΟ	842	101
5	ΜΕΓΑΛΗ ΚΕΡΑΣΙΑ	500	83
6	ΜΕΤΕΩΡΑ	596	87
7	ΠΑΛΑΙΟΧΩΡΙ	1050	110
8	ΣΤΟΥΡΝΑΡΕΪΚΑ	860	103
9	ΤΡΙΚΑΛΑ	116	82
10	ΦΑΡΚΑΔΩΝΑ	87	70

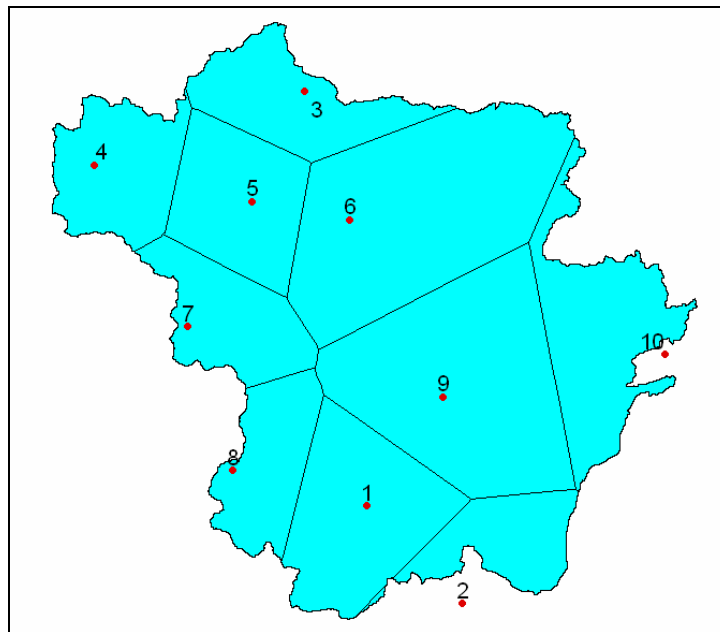
ΛΥΣΗ

Η **μέθοδος του αριθμητικού μέσου** δίνει επιφανειακό ύψος βροχής, ίσο με το μέσο όρο των σημειακών βροχοπτώσεων των 10 σταθμών:

$$T = (74+73+92+101+83+87+110+103+82+70) / 10 = \mathbf{88 \text{ mm}}$$

Η σχεδίαση των πολυγώνων Thiessen γίνεται με χάραξη των μεσοκαθέτων στα ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν τους σταθμούς ανά δύο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-5.

Να σημειωθεί ότι τα πολύγωνα Thiessen ορίζονται κατά μοναδικό τρόπο σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο βροχογράφων λεκάνης απορροής.



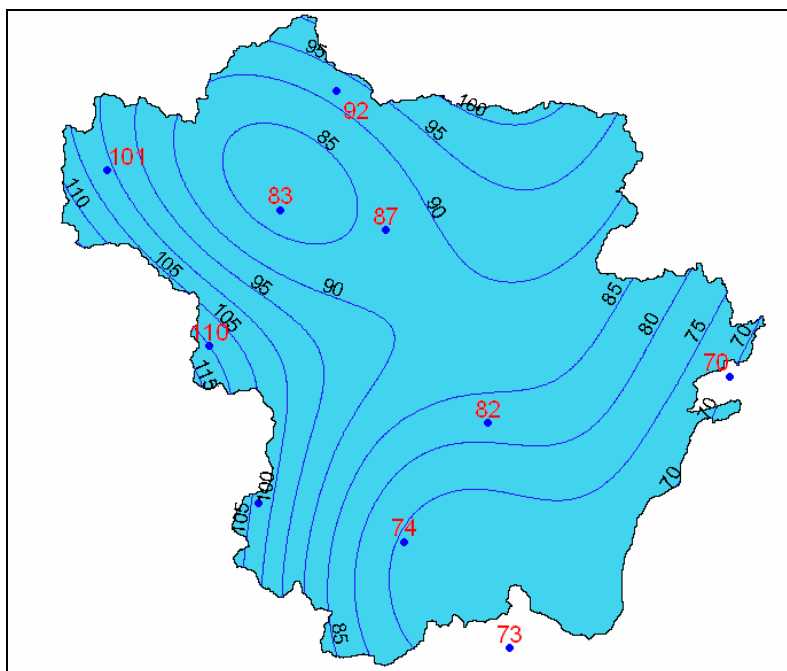
Σχήμα 1-5: Χάραξη πολυγώνων Thiessen.

Η διαδικασία υπολογισμού της επιφανειακής βροχόπτωσης με τη μέθοδο Thiessen συνοψίζεται στον Πίνακα 1-5 που ακολουθεί. Σε αυτόν, το ποσοστό p που αντιστοιχεί σε κάθε σταθμό, προκύπτει ως πηλίκο της έκτασης του πολυγώνου Thiessen προς τη συνολική έκταση της λεκάνης απορροής.

Πίνακας 1-5: Διαδικασία της μεθόδου Thiessen.

Σταθμός	Έκταση (km ²)	Ποσοστό p	Βροχόπτωση R (mm)	pxR
1	316	0.107	74	7.955
2	153	0.052	73	3.800
3	216	0.073	92	6.760
4	212	0.072	101	7.270
5	238	0.081	83	6.720
6	582	0.198	87	17.225
7	194	0.066	110	7.260
8	177	0.060	103	6.202
9	550	0.187	82	15.342
10	302	0.103	70	7.191
Σύνολο	2940	1		86

Η επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen, προκύπτει ίση με **86 mm**. Στο Σχήμα 1-6 έχουν χαραχθεί οι **ισοϋέτιες** με βήμα 5 mm. Σχηματίζονται συνολικά 10 εύρη τιμών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1-6. Η χάραξη των ισοϋέτιων, δεν γίνεται κατά μοναδικό τρόπο, όπως στη μέθοδο Thiessen, αλλά εξαρτάται από τη μέθοδο παρεμβολής των ισοϋέτιων καμπυλών που επιλέγεται. Ο πιο απλός τρόπος είναι η γραφική χάραξη των καμπυλών στην οποία υπεισέρχεται η κρίση του μελετητή, ενώ στα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος αντίστροφων αποστάσεων ή του πλησιέστερου γείτονα.



Σχήμα 1-6: Χάραξη ισοϋέτιων καμπυλών.

Πίνακας 1-6: Διαδικασία μεθόδου ισοϋέτιων καμπυλών.

Διάστημα τιμών (mm)	Έκταση (km ²)	Ποσοστό p	Βροχόπτωση R (mm)	pxR
65-70	8	0.003	67.5	0.180
70-75	444	0.151	72.5	10.960
75-80	295	0.100	77.5	7.783
80-85	405	0.138	82.5	11.370
85-90	729	0.248	87.5	21.688
90-95	506	0.172	92.5	15.911
95-100	327	0.111	97.5	10.833
100-105	149	0.051	102.1	5.179
105-110	55	0.019	107.5	2.010
110-115	22	0.007	112.5	0.841
Σύνολο	2940	1		87

Η επιφανειακή βροχόπτωση με τη μέθοδο των ισοϋέτιων καμπυλών, προκύπτει ίση με **87 mm**.

1.4.4 Μέτρηση εξάτμισης

Η άμεση μέτρηση της εξάτμισης από εκτεταμένες επιφάνειες κατά τρόπο ανάλογο για παράδειγμα προς τη μέτρηση της βροχής είναι πρακτικώς ανέφικτη ως συνέπεια του μεγάλου αριθμού των υπεισερχόμενων παραγόντων και της αλληλεξάρτησης αυτών. Γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι έμμεσης μέτρησης ή εκτίμησης της εξάτμισης από εκτεταμένες υδάτινες επιφάνειες, όπως είναι η μέτρηση με τη λεκάνη εξάτμισης και το ατμόμετρο.

Λεκάνη εξάτμισης: Το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο όργανο μέτρησης της εξάτμισης από υδάτινες επιφάνειες είναι το εξατμισίμετρο ανοιχτού δοχείου. Από τους διάφορους τύπους εξατμισιμέτρων το πιο κοινό είναι η Λεκάνη Εξάτμισης κατηγορίας Α της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ. Αυτή αποτελείται από κυλινδρικό δοχείο από γαλβανισμένη λαμαρίνα διαμέτρου 122 cm και ύψους 25.4 cm. Στηρίζεται σε ξύλινη βάση σε ύψος 15 cm από το έδαφος με τρόπο ώστε ο αέρας να κυκλοφορεί ελεύθερα κάτω από το δοχείο. Πληρώνεται με νερό μέχρι βάθους 20 cm και αναπληρώνεται όταν το βάθος του νερού κατέλθει στα 18 cm. Μετρήσεις της στάθμης του νερού εκτελούνται ημερησίως σε φρεάτιο ηρεμίας με μετρητική συσκευή. Το ύψος του εξατμιζομένου νερού προσδιορίζεται από τη διαφορά των αναγνώσεων, κατόπιν διορθώσεως λόγω προσθήκης ή αφαίρεσης νερού στη λεκάνη και λόγω βροχόπτωσης.

Ένα άλλο όργανο μέτρησης της εξάτμισης είναι το **ατμόμετρο**. Η λειτουργία του ατμόμετρου είναι ανάλογη με αυτήν του εξατμισίμετρου, με τη διαφορά ότι στο όργανο αυτό δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια νερού, αλλά μια πορώδης επιφάνεια που τροφοδοτείται από δοχείο. Και πάλι η ελάττωση της στάθμης του νερού στο δοχείο, συνδέεται με την εξάτμιση με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών. Τα ατμόμετρα είναι απλά, οικονομικά και εύχρηστα όργανα, αλλά ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει, να δίνεται στην καθαριότητα της πορώδους επιφάνειας από την οποία εξατμίζεται το νερό.

1.4.5 Μέτρηση εξατμισοδιαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να μετρηθεί άμεσα με (α) δεξαμενές (β) λυσίμετρα και (γ) χρήση αγροτεμαχίων.

Δεξαμενές: Είναι στεγανά δοχεία που τοποθετούνται στο έδαφος με το χείλος τους περίπου στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια του εδάφους. Το μέγεθος των δοχείων ποικίλει, φτάνοντας σε πλάτος τα 10 m και βάθος τα 3 m. Το μέγεθος αυτό πρέπει να είναι επαρκές για να προσομοιώσει τις φυσικές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών, για το είδος της βλάστησης που εξετάζεται. Η εξατμισοδιαπνοή προσδιορίζεται μετρώντας την ποσότητα του νερού που απαιτείται για τη διατήρηση σταθερών, βέλτιστων συνθηκών υγρασίας στο συγκεκριμένο δοχείο.

Λυσίμετρα: Μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη και δυνητικά ίσως η πιο ακριβής μέθοδος μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής είναι η μέτρηση της με τα ζυγιζόμενα λυσίμετρα, όπου κάθε συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου μετριέται ακριβώς και η εξατμισοδιαπνοή αντιπροσωπεύεται άμεσα ως απώλεια βάρους.

Το λυσίμετρο είναι ένα κυλινδρικό δοχείο (βάθους 1-2 m και διαμέτρου 1-6 m) στο οποίο απομονώνεται ένα τμήμα χώματος και βλάστησης και ελέγχεται το υδατικό τους ισοζύγιο. Η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος εδάφους - βλάστησης και η απομόνωσή του με την ελάχιστη ενόχληση και τη μη τροποποίηση του μικροκλίματος της περιβάλλουσας επιφάνειας, είναι οι ουσιαστικοί παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται σοβαρά στη χρήση των λυσιμέτρων.

Τα λυσίμετρα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, τα ζυγιζόμενα και τα μη ζυγιζόμενα. Από αυτά, τα ζυγιζόμενα έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα, παρά το υψηλό κόστος τους, επειδή μπορούν να παρέχουν ακριβείς μετρήσεις της εξατμισοδιαπνοής σε ημερήσιες ή και - μικρότερες χρονικές περιόδους. Με την πάροδο των χρόνων, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις κατασκευής, τοποθέτησης και συστημάτων ζύγισης αυτών των λυσιμέτρων. Μερικές από αυτές επιτρέπουν τη μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής με ακρίβεια της τάξης των 0.01 mm νερού και για χρονικό διάστημα μικρότερο της μιας ώρας. Ως εκ τούτου, ένα κατάλληλα σχεδιασμένο λυσίμετρο μπορεί να παρέχει ένα ακριβές μέτρο της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και να χρησιμοποιείται για τον ανεξάρτητο έλεγχο των μικρομετεωρολογικών μεθόδων και τη βαθμονόμηση των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής.

Τα μη ζυγιζόμενα λυσίμετρα κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται για την υδρολογική απομόνωση μιας μονάδας εδάφους - βλάστησης και μερικές φορές για τη μέτρηση της συνιστώσας της στράγγισης. Αυτός ο τύπος λυσιμέτρων είναι εύκολο να εγκατασταθεί, έχει χαμηλό κόστος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας π.χ. για περιόδους που μεσολαβούν μεταξύ δύο βροχοπτώσεων (εάν τα λυσίμετρα δέχονται μόνο φυσική βροχή) ή για εβδομαδιαίες (ή μεγαλύτερης διάρκειας περιόδους) εάν τα λυσίμετρα αρδεύονται.

Χρήση αγροτεμαχίων: Ειδικά σχεδιασμένα αγροτεμάχια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής κάτω από διάφορες συνθήκες. Τα αγροτεμάχια αυτά, σχεδιάζονται έτσι ώστε το νερό που απορρέει από την επιφάνειά τους να μπορεί να συλλεχθεί και να μετρηθεί. Το νερό που κατεισδύει σε βαθύτερα στρώματα, συλλέγεται με υπόγειες οτεγανωτικές στρώσεις. Για να καθοριστεί η εξατμισοδιαπνοή, μετράται ταυτόχρονα και η εισροή νερού από βροχόπτωση ή άρδευση. Οι απώλειες της απορροής ή της βαθιάς διήθησης, αφαιρούνται από το εισερχόμενο νερό, ενώ επίσης γίνεται διόρθωση για την εδαφική υγρασία.

1.4.6 Εκτίμηση δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι αδύνατον να εκτιμηθεί άμεσα. Αυτό συμβαίνει γιατί όλες οι μέθοδοι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής θεωρούν ότι τόσο η διαθεσιμότητα ενέργειας όσο και αυτή του νερού είναι ανεξάντλητη. Στην πραγματικότητα, οι δυο βασικές αυτές προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση της εξατμισοδιαπνοής μεταβάλλονται συνεχώς με το χρόνο και πολλές φορές εξαντλούνται.

Για το λόγο αυτό, υπολογίζεται η **δυνητική εξατμισοδιαπνοή**, που αντιστοιχεί σε εκείνη την εξατμισοδιαπνοή που θα πραγματοποιούταν, εφόσον υπήρχε άπειρη διαθεσιμότητα νερού και ενέργειας. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι κατά κανόνα μικρότερη (ή το πολύ ίση σε σπάνιες περιπτώσεις) από τη δυνητική.

Για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούνται συνήθως ημιεμπειρικές (Penman-Montieth, κα) και εμπειρικές μέθοδοι (Thornthwaite, Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Makkink κα) (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2002). Οι ημιεμπειρικές μέθοδοι δίδουν καλύτερες εκτιμήσεις, απαιτούνται όμως περισσότερα δεδομένα (όπως η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου). Στη συνέχεια θα περιγραφούν δυο απλές εμπειρικές μέθοδοι η μέθοδος Thornthwaite και η μέθοδος Blaney-Criddle.

□ Μέθοδος Thornthwaite

Ο Thornthwaite (1948) δημιούργησε μια εξίσωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού. Η εξίσωση εκτιμά τη μηνιαία εξατμισοδιαπνοή με βάση τη μέση μηνιαία θερμοκρασία και έχει τη μορφή:

$$E_p = 16 \left(\frac{10t_i}{J} \right)^a \frac{\mu N}{360} \quad (1-12)$$

όπου **E_p** η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα
t_i η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C
μ ο αριθμός ημερών του υπό εξέταση μήνα
N η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας
J ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας και
a μια εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από το δείκτη J ($a=0.016J+0.5$).

Ο δείκτης θερμοκρασίας J, δίνεται από τη σχέση:

$$J = \sum_{i=1}^{12} j_i \quad (1-13)$$

ενώ ο μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας j_i είναι συνάρτηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας σύμφωνα με την εξίσωση:

$$j_i = 0.09t_i^{3/2} \quad (1-14)$$

□ Μέθοδος Blaney - Criddle

Οι Blaney και Criddle (1962) ανέπτυξαν μια εμπειρική σχέση ανάμεσα στην εξατμισοδιαπνοή, τη μέση θερμοκρασία του αέρα και το μέσο ποσοστό ωρών ημέρας. Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται άμεσα από το άθροισμα των γινομένων των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών του αέρα και του ποσοστού ωρών ημέρας του μήνα, σε μια ενεργώς αναπτυσσόμενη καλλιέργεια με επαρκή εδαφική υγρασία, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_p = k \frac{1.8T + 32}{3.94} p \quad (1-15)$$

όπου **E_p** είναι η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm
k είναι ένας εμπειρικός συντελεστής που αναφέρεται στη συγκεκριμένη καλλιέργεια (συντελεστής καλλιέργειας)
T η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C
p το ποσοστό ωρών ημέρας του μήνα.

Οι τιμές του συντελεστή k δίνονται από πίνακες ανάλογα με τις εκάστοτε καλλιέργειες, όπως αυτές έχουν προσδιοριστεί από τους Blaney and Criddle. Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από τους Blaney and Criddle για τον υπολογισμό των εποχιακών αναγκών που αναφέρονται στη βλαστική περίοδο κάθε καλλιέργειας. Αξίζει να τονισθεί ότι οι συντελεστές καλλιέργειας μεταβάλλονται εποχιακά, λόγω της διαφορετικής ανάπτυξης του ριζικού συστήματος και του υπέργειου τμήματος της καλλιέργειας, ανάλογα με το στάδιο της ανάπτυξης στο οποίο βρίσκεται.

Παράδειγμα 1-3: Εκτίμηση δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

Η μέση μηνιαία θερμοκρασία κατά το μήνα Ιούλιο είναι 22.8 βαθμοί Κελσίου. Εάν για λαχανικά ο εποχιακός φυτικός συντελεστής κατά Blaney-Criddle έχει την τιμή 0.65, να υπολογισθεί η ανάγκη σε αρδευτικό νερό της καλλιέργειας των λαχανικών. Να θεωρηθεί γεωγραφικό πλάτος 36°.

ΛΥΣΗ

Από πίνακες, με βάση το μήνα (Ιούλιος) και το γεωγραφικό πλάτος (36°), μπορεί να υπολογισθεί η αστρονομική διάρκεια της ημέρας (βλ. Μιμίκου και Μπαλτάς, 2002, σελ. 76). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα προκύπτει $N=14.2$ ώρες.

Εάν δεν υπήρχε συννεφιά κατά το μήνα Ιούλιο για αυτό το γεωγραφικό πλάτος, τότε θα είχαμε 14.2 ώρες κατά μέσο όρο ηλιοφάνεια ημερησίως. Δηλαδή οι ώρες ηλιοφάνειας για τον Ιούλιο θα ήταν $31 \times 14.2 = 440.2$ ώρες. Το ποσοστό ωρών ημέρας ενός μήνα p θα δίδεται από τη σχέση:

$$p = 100 \frac{N\mu}{365 \cdot 12}$$

όπου **N** η αστρονομική διάρκεια της ημέρας σε ώρες
μ ο αριθμός ημερών του υπό εξέταση μήνα
p το ποσοστό ωρών ημέρας του υπό εξέταση μήνα

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα είναι:

$$p = 100 \frac{N\mu}{365 \cdot 12} = 100 \frac{14.2 \cdot 31}{365 \cdot 12} = 10.05$$

$$E_p = k \frac{1.8T + 32}{3.94} p = 0.65 \frac{1.8 \cdot 22.8 + 32}{3.94} 10.05 = 121.1 \text{ mm}$$

Επομένως η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για το μήνα Ιούλιο σύμφωνα με τη μέθοδο Blaney-Criddle, για καλλιέργεια λαχανικών, προκύπτει είναι με 121.1 mm.

1.4.7 Μέτρηση απορροής

Η επιφανειακή απορροή δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα ως φυσικό μέγεθος. Μπορεί όμως να υπολογιστεί έμμεσα μέσω της υδρομετρίας. Αντικείμενο της υδρομετρίας είναι η μέτρηση και εκτίμηση των παραμέτρων ροής δηλαδή της στάθμης του νερού, της ταχύτητας και της παροχής του ποταμού. Η υδρομετρία είναι μία ιδιαίτερα πολύπλοκη και πολυδάπανη διαδικασία και απαιτεί ειδικευμένο προσωπικό, τόσο για τις διαδικασίες υπαίθρου όσο και για τις εργασίες γραφείου.

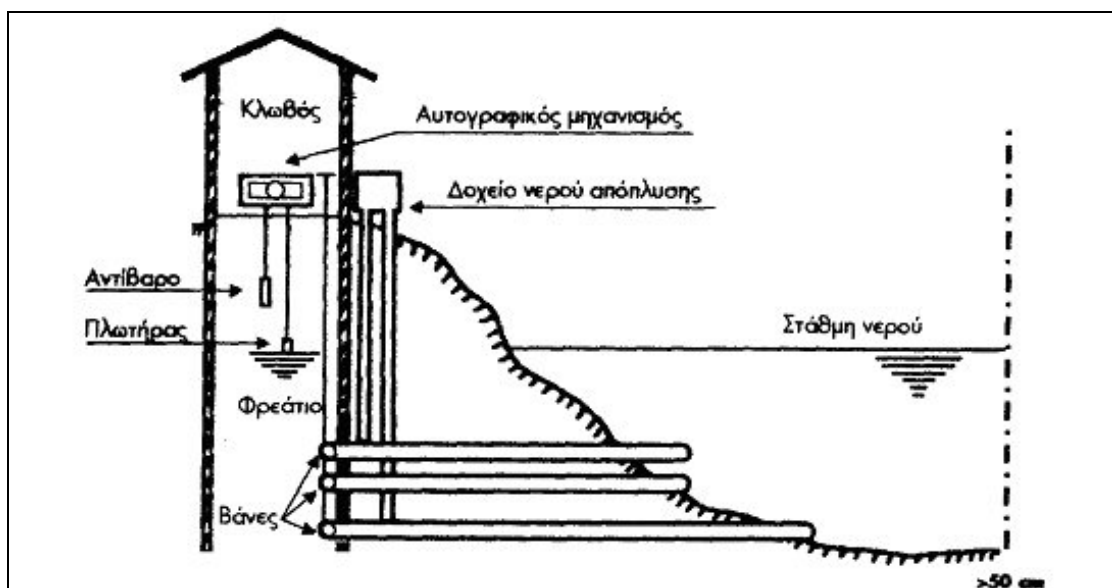
Οι διαδικασίες υπαίθρου αφορούν κυρίως στη μέτρηση της στάθμης του νερού και στην εκτέλεση υδρομετρήσεων με στόχο την εκτίμηση της παροχής του ποταμού. Τα στοιχεία αυτά, μετά από έλεγχο και σχετική προεπεξεργασία, συλλέγονται στα αρχεία των υπηρεσιών (π.χ. ΔΕΗ, ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠΓΕ) στις οποίες ανήκουν οι μετρητικές θέσεις και εκεί επεξεργάζονται τελικά για την εκτίμηση της μέγιστης ή μέσης παροχής του ποταμού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

❑ Μέτρηση Στάθμης

Τα πλέον γνωστά όργανα μέτρησης της στάθμης, όπως προηγούμενα αναφέρθηκε, είναι το σταθμήμετρο και ο σταθμηγράφος. Το σταθμήμετρο είναι μία απλή σταδία, όπου είναι αποτυπωμένη εκατοστομετρική κλίμακα, της οποίας το μηδέν έχει εξαρτηθεί υψομετρικό από ένα σταθερό υψόμετρο αναφοράς. Στην περίπτωση που η συνολική παροχή του ποταμού δε μπορεί να περιγραφεί από ένα μόνο σταθμήμετρο, τότε εγκαθίστανται περισσότερα στην ίδια διατομή (δεξιό, αριστερό, μέσον) ή ακόμα ανάντη και κατόντη.

Η μέτρηση της στάθμης γίνεται από παρατηρητή κάθε μέρα στις 8:00 το πρωί, ενώ σε περιπτώσεις πλημμύρων η μέτρηση της στάθμης συνήθως γίνεται συχνότερα και κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου. Πολλές φορές η χρήση του σταθμημέτρου συνεπάγεται τον κίνδυνο να παραληφθούν σημαντικές μεταβολές της στάθμης που μπορεί να συμβούν στο χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές παρατηρήσεις. Ακόμη, ορισμένες φορές είναι επιβεβλημένο να γίνουν παρατηρήσεις σε θέσεις της κοίτης που δεν είναι εύκολα προσπελάσιμες από τον παρατηρητή. Για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες αυτές, χρησιμοποιούνται αυτογραφικά όργανα που λέγονται σταθμηγράφοι. Μια τυπική διάταξη σταθμηγράφου αποτελείται (Παπαζαφειρίου, 1983):

- Από ένα κατακόρυφο φρεάτιο κυκλικής ή ορθογώνιας διατομής, μεταλλικό ή από οπλισμένο σκυρόδεμα, που ο πυθμένας του κατασκευάζεται τουλάχιστον 50 cm κάτω από τον πυθμένα της κοίτης και βρίσκεται κοντά στην όχθη του ρέματος.
- Από δύο ή τρεις σωλήνες μικρής διαμέτρου, οριζόντια τοποθετημένους, που ενώνουν το μέσο περίπου του ρεύματος με το φρεάτιο. Οι σωλήνες αυτοί κατασκευάζονται με μικρή διάμετρο για να μη μεταφέρουν στο φρεάτιο τις στιγμιαίες μεταβολές της στάθμης του νερού του ρέματος που οφείλονται σε κυματισμό. Επειδή οι σωλήνες μπορεί να αποφραχθούν από τα αιωρούμενα στο νερό του ρεύματος λεπτόκοκκα υλικά, κατασκευάζεται συνήθως ένα σύστημα καθαρισμού που αποτελείται από μια μικρή δεξαμενή νερού τοποθετημένη πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία συνδέεται με σωληνώσεις με τους οριζόντιους σωλήνες. Η δεξαμενή, κατά διαστήματα, γεμίζεται με νερό με τη βοήθεια χειροκίνητης αντλίας και αφήνεται μετά να αδειάσει απότομα. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως αρκετή για τον καθαρισμό.
- Πάνω ακριβώς από το φρεάτιο κατασκευάζεται ο σταθμηγραφικός μηχανισμός. Ο σταθμηγραφικός μηχανισμός αποτελείται από έναν πλωτήρα που επιπλέει στην επιφάνεια του νερού μέσα στο φρεάτιο και είναι συνδεδεμένος με καλώδιο που στο άλλο άκρο του φέρει αντίβαρο και με κατάλληλη διάταξη μεταφέρει τις μεταβολές της στάθμης στο σύστημα καταγραφής. Το σύστημα αυτό αποτελείται συνήθως από ένα περιστρεφόμενο, με ελατήριο ή συσσωρευτή, τύμπανο, στο οποίο προσαρμόζεται το καταγραφικό χαρτί και μια ακίδα που η θέση της στο χαρτί καθορίζεται από τη στάθμη του νερού στο φρεάτιο. Μια τυπική εγκατάσταση σταθμηγράφου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-7.

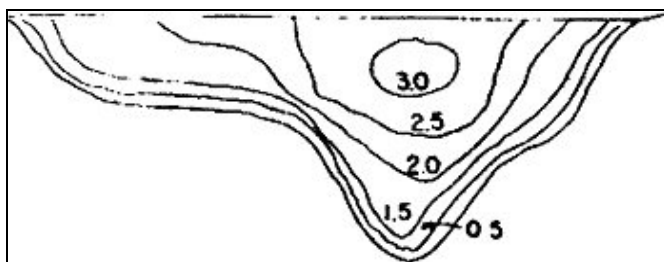


Σχήμα 1-7: Τυπική εγκατάσταση σταθμηγράφου.

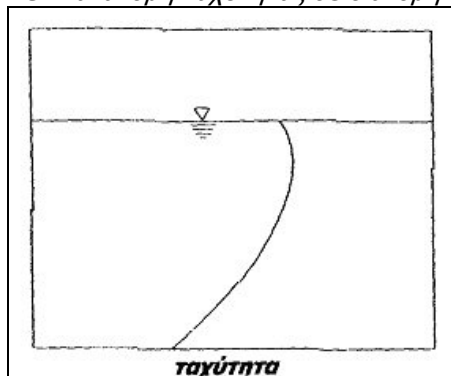
❑ Μέτρηση της παροχής με τη μέθοδο του πεδίου ταχυτήτων

Για τη μέτρηση της παροχής ενός υδατορέματος χρησιμοποιούνται αρκετές μέθοδοι, όπως η μέτρηση με παρεμβολή μετρητών παροχής, η μέτρηση πεδίου ταχυτήτων, η μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων, η εκτίμηση με πλωτήρες, η εκτίμηση με υδραυλικές σχέσεις ροής κλπ.

Η πλέον γνωστή μέθοδος που χρησιμοποιείται και στην Ελλάδα είναι η μέθοδος του πεδίου ταχυτήτων με τη χρήση μιλίσκου. Να σημειωθεί ότι η κατανομή της ταχύτητας σε ένα ποτάμι είναι μη ομοιόμορφη, με τη μεγαλύτερη τιμή της να εμφανίζεται στο μέγιστο βάθος και τη μηδενική στα όρια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-8. Η μεγαλύτερη ταχύτητα σημειώνεται λίγο κάτω από την επιφάνεια του νερού. Το προφίλ της κατακόρυφης ταχύτητας φαίνεται στο Σχήμα 1-9.

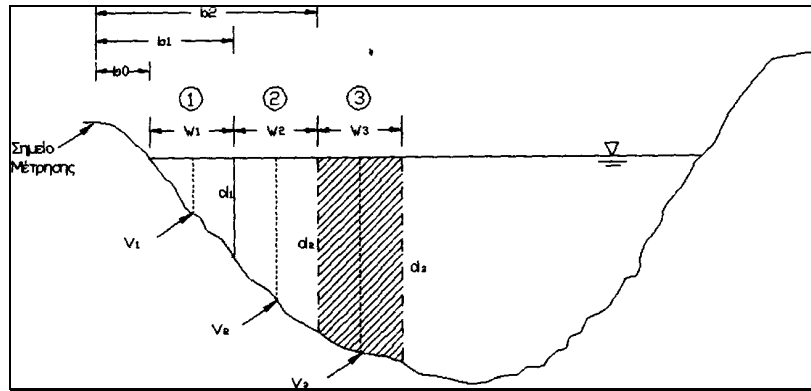


Σχήμα 1-8: Κατανομή ταχύτητας σε διατομή ποταμού.



Σχήμα 1-9: Κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας στο μέγιστο βάθος εγκάρσιας διατομής.

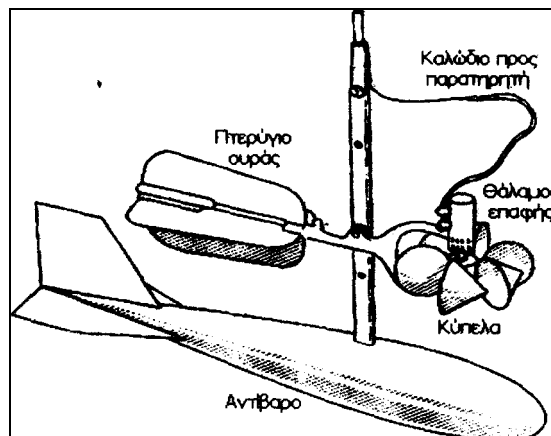
Για τον υπολογισμό της παροχής σε μια συγκεκριμένη θέση του ποταμού με τη μέθοδο του πεδίου ταχυτήτων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση της γεωμετρίας της υγρής διατομής. Αυτή προσδιορίζεται χωρίζοντας νοητά τη διατομή σε N-τμήματα, συνήθως ανά 1 ως 2 μέτρα, ανάλογα με το πλάτος του υδατορέματος και την επιθυμητή ακρίβεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-10. Ένας εμπειρικός κανόνας διαχωρισμού του ποταμού, είναι το πλήθος των τμημάτων να είναι τέτοιο, ώστε να μη διέρχεται παροχή μεγαλύτερη από το 10% της συνολικής σε καθένα από αυτά.



Σχήμα 1-10: Η διατομή ενός υδατορέματος.

Για να οριστεί πλήρως η γεωμετρία κάθε τμήματος i , μετράται το ύψος των δύο κατακόρυφων πλευρών του (d_{i-1} , και d_i), καθώς και η μεταξύ τους απόσταση, που προκύπτει ως η διαφορά των οριζόντιων αποστάσεων των κατακόρυφων ($b_i - b_{i-1}$), από ένα σταθερό σημείο της εκτίμησης των μετρήσεων στην όχθη. Με τη βοήθεια μολίσκου, εκτιμάται η μέση ταχύτητα v_i του υδατορέματος για το κάθε τμήμα i , κατακόρυφα, στο μέσο του διαστήματος ($b_i - b_{i-1}$). Ο μολίσκος είναι μία έλικα που εμβαπτίζεται στη διατομή του υδατορέματος στο συγκεκριμένο σημείο και περιστρέφεται υπό την επίδραση της ροής, με τυπική διάταξη που παρουσιάζεται στο σχήμα 1-11. Η προσπέλαση και μέτρηση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις συνθήκες ροής.

Σε αβαθή ρέματα με μικρή ταχύτητα ροής η όλη διαδικασία γίνεται με υδροβασία και η ανόρθωση του μολίσκου γίνεται με το χέρι, ενώ σε βαθιά πλωτά ρεύματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί βάρκα κατάλληλα εξοπλισμένη. Σε περιπτώσεις όπου αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες ροής επιβάλλεται η μόνιμη εγκατάσταση εναέριας καλωδίωσης η οποία προσφέρει τη δυνατότητα προσπέλασης σε οποιοδήποτε σημείο της διατομής. Αναγκαία προϋπόθεση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι ο σωστός προσανατολισμός οριζόντιος και παράλληλος με τη διεύθυνση ροής του άξονα περιστροφής του μολίσκου.



Σχήμα 1-11: Τυπική διάταξη μολίσκου.

Η ταχύτητα σε κάθε σημείο της κατακόρυφου προκύπτει ως γραμμική συνάρτηση της συχνότητας περιστροφής της έλικας στο σημείο αυτό. Ένα θέμα που προκύπτει σε αυτό το σημείο, είναι σε ποιο βάθος πρέπει να βυθιστεί ο μυλίσκος, έτσι ώστε η σημειακή ταχύτητα u_i που θα μετρηθεί, να είναι αντιπροσωπευτική για τη συγκεκριμένη κατακόρυφο και άρα για το αντίστοιχο τμήμα και διατομή, αφού είναι γνωστό ότι η τιμή της ταχύτητας αυξάνεται με την απόσταση από το οριακό στρώμα.

Σύμφωνα με το λογαριθμικό νόμο, προκύπτει ότι η μετρούμενη σημειακή ταχύτητα, είναι πιο αντιπροσωπευτική της μέσης, σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με το 60% του ύψους. Συνεπώς, αν λαμβάνεται μόνο μια μέτρηση σε κάθε κατακόρυφο, ο μυλίσκος βυθίζεται σε βάθος ίσο με το 60% του συνολικού. Στην πράξη, για μεγάλα βάθη υδατορέματος, είναι επιθυμητό να παίρνονται περισσότερες της μιας μετρήσεις σε κάθε κατακόρυφο, συνήθως δύο. Αυτές λαμβάνονται σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με το 20% και 80% του βάθους αντίστοιχα. Η δε μέση ταχύτητα σε κάθε κατακόρυφο (και άρα σε κάθε τμήμα), προσεγγίζεται ικανοποιητικά από το μέσο όρο αυτών των δύο τιμών και δίνεται από την εξίσωση:

$$v_i = \frac{u_{0.2} + u_{0.8}}{2} \quad (1-16)$$

Στην περίπτωση που το βάθος του ποταμού είναι αρκετά μεγάλο και στην ίδια κατακόρυφο γίνονται τρεις σημειακές μετρήσεις, αυτές επιτελούνται σε απόσταση από την επιφάνεια ίση με 20%, 60% και 80% και η μέση ταχύτητα δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{v} = \frac{u_{0.6}}{2} + \frac{u_{0.2} + u_{0.8}}{4} \quad (1-17)$$

Κατόπιν συμπληρώνεται δελτίο επί τόπου από τον παρατηρητή με τη στοιχεία της υδρομέτρησης και της συνολικής παροχής του ποταμού, την ημερομηνία και ώρα της μετρήσεως, όπως επίσης και την αντίστοιχη στάθμη του ποταμού που πιθανόν να κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Ο παρατηρητής θα πρέπει να φροντίσει έτσι ώστε η μέτρηση να κρατήσει το μικρότερο δυνατό διάστημα και να μην υπάρξει μεγάλη διακύμανση της στάθμης.

Η μέση παροχή q_i κάθε νοητού τμήματος προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας ως γινόμενο της μέσης ταχύτητας v_i του τμήματος και της αντίστοιχης διατομής A_i :

$$q_i = v_i A_i \quad (1-18)$$

ενώ η συνολική παροχή στη θέση της διατομής θα είναι το άθροισμα των επιμέρους μέσων παροχών:

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i \quad (1-19)$$

1.4.8 Εκτίμηση απορροής

Για την εκτίμηση της μέσης παροχής του ποταμού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, απαιτείται κατ' αρχήν η εκτέλεση υδρομετρήσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. εβδομάδας ή δεκαπενθημέρου). Όμως ποτέ η χρονική πυκνότητα των υδρομετρήσεων δεν είναι η απαιτούμενη, λόγω των ιδιαίτερων δυσκολιών και του σημαντικού κόστους τους. Τα στάδια που ακολουθούνται για την εκτίμηση της μέσης παροχής για συγκεκριμένο χρονικό βήμα (π.χ. ωριαίο, εβδομαδιαίο) είναι:

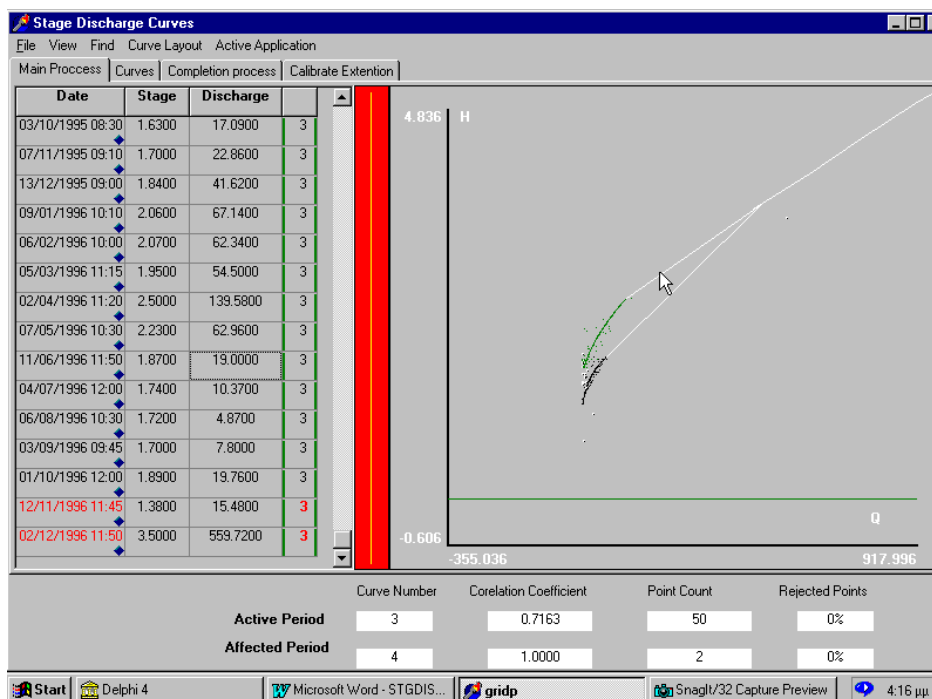
- Κατάρτιση των καμπυλών στάθμης-παροχής στη συγκεκριμένη διατομή του ποταμού.
- Εκτίμηση της μέσης στάθμης του ποταμού στο σημείο αυτό για το ίδιο χρονικό διάστημα (π.χ. ωριαίο, ημερήσιο).
- Επέκταση της καμπύλης στάθμης – παροχής
- Σύνδεση μεταξύ των καμπυλών στάθμης-παροχής και της επέκτασης.

Είναι φανερό ότι για να εκτιμηθεί σωστά η μέση στάθμη (ιδιαίτερα μάλιστα όταν το χρονικό βήμα είναι μικρότερο της ημέρας) ο σταθμός πρέπει να έχει απαραίτητα σταθμηγράφο.

Τα ζεύγη της παροχής και της στάθμης που αναγράφονται στο δελτίο της υδρομέτρησης σε κάθε σταθμό, σχεδιάζονται και σχηματίζουν την καμπύλη στάθμης-παροχής στη θέση. Η καμπύλη αυτή είναι συνήθως παραβολικής μορφής και πολλές φορές παρουσιάζει ανωμαλίες ανάλογα με τη μορφή και τη μεταβλητότητα της διατομής. Στα περισσότερα υδατορεύματα η σχέση στάθμης - παροχής υπόκειται σε αλλαγές με την πάροδο του χρόνου. Οι αλλαγές αυτές προκαλούνται από τη μεταβολή της διατομής και της κλίσης, λόγω διάβρωσης ή πρόσχωσης της κοίτης από τη μεταβολή των χαρακτηριστικών των φερτών της κοίτης. Οι αλλαγές αυτές περιπλέκουν αρκετά το πρόβλημα της καμπύλης, αφού δεν υπάρχει μία διαχρονική καμπύλη αλλά ένα σύνολο καμπυλών, όπου κάθε μία ισχύει για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα (μερικούς μήνες ή έτη) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-12.

Αναγκαίο πρώτο βήμα για την κατάρτιση των καμπυλών στάθμης - παροχής αποτελεί η ομογενοποίηση των μετρήσεων στάθμης που πραγματοποιούνται από διάφορο

σταθμήμετρα, τις περισσότερες φορές σχετιζόμενα μεταξύ τους. Ακόμη, αναγκαίο βήμα είναι η ομαδοποίηση των μετρήσεων σε υποσύνολα, με τρόπο ώστε η κάθε ομάδα σημείων να περιγράφεται από μία καμπύλη στάθμης παροχής. Αυτό αποτελεί μία ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία που προϋποθέτει σημαντική εμπειρία. Μετά την ομαδοποίηση δύναται να ακολουθήσει ο προσδιορισμός των καμπυλών (μία για κάθε υποσύνολο). Το θεωρητικό μοντέλο κάθε φορά περιγράφει μία συγκεκριμένη καμπύλη που η ισχύς της ορίζεται από την έναρξη και λήξη των χρονικών ορίων.



Σχήμα 1-12: Καμπύλες στάθμης – παροχής (ΕΤΥΜΠ, 2000).

Για κάθε ομάδα σημείων που δημιουργείται, μπορεί να χρησιμοποιείται και διαφορετικό μοντέλο υπολογισμού της κάθε καμπύλης. Η γενική μορφή της καμπύλης είναι:

$$Q = k(h - a)^b \quad (1-20)$$

όπου **Q** η παροχή

k, b σταθερές της θέσης

a η απόσταση μεταξύ του υψομέτρου του μηδενός του σταθμημέτρου και του υψομέτρου μηδενικής ροής της διατομής.

Με γνωστά τα k , b , a στη σχέση 1-21, είναι δυνατός ο υπολογισμός των παροχών Q_i εάν είναι αντίστοιχα γνωστές οι στάθμες h_i . Η σχέση μπορεί να λειτουργήσει και αντίστροφα, δηλαδή να υπολογιστεί σε ποια στάθμη h_i αντιστοιχεί μια γνωστή παροχή Q_i (Μιμίκου, 1994). Η πληροφορία αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη στη μελέτη ακραίων φαινομένων, στα οποία

αναζητείται είτε η παροχή εκείνη που αντιστοιχεί σε μια μέγιστη (γνωστή) στάθμη είτε η στάθμη εκείνη που αντιστοιχεί στη μέγιστη παροχетеυτικότητα ενός υδατορέματος.

Παράδειγμα 1-4: Εκτίμηση παροχής ποταμού

Σε υδρομετρικό σταθμό έχουν γίνει συστηματικές μετρήσεις στάθμης και παροχής ποταμού που φαίνονται στον Πίνακα 1-7, για διάρκεια που δεν υπήρχαν ουσιαστικές μεταβολές στη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά της διατομής. Με βάση τις μετρήσεις αυτές να καταρτιστεί η καμπύλη στάθμης παροχής του ποταμού για την υπόψη περίοδο.

Χρησιμοποιώντας την καμπύλη στάθμης παροχής για τον εν λόγω σταθμό να εκτιμηθεί η παροχή του ποταμού, όταν η στάθμη του φθάσει τα 11 μέτρα.

Πίνακας 1-7: Μετρήσεις στάθμης – παροχής.

A/A	Ημερομηνία	Στάθμη (m)	Παροχή (m³/s)
1	20/03/1974	7.80	804.24
2	29/04/1974	6.84	612.36
3	27/05/1974	6.12	504.24
4	23/06/1974	5.52	444.84
5	20/07/1974	4.68	343.74
6	25/08/1974	4.44	333.84
7	20/09/1974	4.80	362.76
8	15/10/1974	5.30	383.75
9	13/11/1974	6.40	546.76
10	29/11/1974	7.32	699.58
11	23/12/1974	7.75	781.08
12	12/01/1975	8.63	984.84
13	30/01/1975	9.00	1086.72
14	27/02/1975	9.29	1181.81
15	04/03/1975	9.66	1317.65
16	10/03/1975	10.16	1555.25
17	28/04/1975	6.24	528.24
18	17/05/1975	6.10	490.20
19	18/06/1975	4.50	350.00

ΛΥΣΗ

Πίνακας 1-8: Διαδικασία υπολογισμού καμπύλης στάθμης – παροχής.

A/A	Ημερομηνία	Στάθμη (m)	Παροχή (m ³ /s)	ln (H)	ln (Q)
1	20/03/1974	7.80	804.24	2.054	6.690
2	29/04/1974	6.84	612.36	1.923	6.417
3	27/05/1974	6.12	504.24	1.812	6.223
4	23/06/1974	5.52	444.84	1.708	6.098
5	20/07/1974	4.68	343.74	1.543	5.840
6	25/08/1974	4.44	333.84	1.491	5.811
7	20/09/1974	4.80	362.76	1.569	5.894
8	15/10/1974	5.30	383.75	1.668	5.950
9	13/11/1974	6.40	546.76	1.856	6.304
10	29/11/1974	7.32	699.58	1.991	6.550
11	23/12/1974	7.75	781.08	2.048	6.661
12	12/01/1975	8.63	984.84	2.155	6.892
13	30/01/1975	9.00	1086.72	2.197	6.991
14	27/02/1975	9.29	1181.81	2.229	7.075
15	04/03/1975	9.66	1317.65	2.268	7.184
16	10/03/1975	10.16	1555.25	2.318	7.349
17	28/04/1975	6.24	528.24	1.831	6.270
18	17/05/1975	6.10	490.20	1.808	6.195
19	18/06/1975	4.50	350.00	1.504	5.858

Η παροχή συνδέεται με τη στάθμη με μια γενικότερη σχέση της μορφής $Q = A(h-h_0)^n$, συνεπώς οι λογάριθμοι των Q και h , συνδέονται με γραμμική σχέση. Η σχέση αυτή θα υπολογιστεί με γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των λογαρίθμων της παροχής (y) και της στάθμης (x), που δίνει τελικά την εξίσωση: $y = 3.022 + 1.802 \cdot x$ ή αλλιώς:

$$Q = 20.53 \cdot h^{1.802}$$

Για $h=11m$, προκύπτει από την παραπάνω καμπύλη: $Q=1545.2 \text{ m}^3/s$.

1.5 Υδρολογικά ισοζύγια σε λεκάνες απορροής

Το ισοζύγιο δεν είναι αποκλειστικά υδρολογική έννοια. Αποτελεί μια ακόμα έκφραση του νόμου της συνέχειας, προσαρμοσμένη ούτως ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις που ενδιαφέρουν τον υδρολόγο: υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης, υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα, κλπ.

Η βασική έκφραση του ισοζυγίου είναι:

$$\boxed{\frac{\Delta S}{\Delta t} = I - O} \quad (1-21)$$

η οποία σημαίνει: η μεταβολή στην αποθηκευτικότητα (στον όγκο δηλαδή που είναι αποθηκευμένος) ισούται με τη διαφορά της εισροής μείον την εκροή. Η εξίσωση αυτή αν και μπορεί να είναι κατανοητή σε πρώτη φάση, έχει κάποιες ιδιαιτερότητες:

- Η μεταβολή ΔS μπορεί να είναι τόσο θετική όσο και αρνητική. Θετική είναι στην περίπτωση που $I > O$, δηλαδή εισρέει παραπάνω απ' ότι εκρέει από τον όγκο αναφοράς (λεκάνη, ταμιευτήρας, λίμνη, κλπ). Αρνητική είναι όταν συμβαίνει το αντίθετο. Θα ήταν δυνατό να γραφεί $O - I$ αντί για $I - O$, τότε όμως τα πρόσημα θα ήταν ανάποδα. Γενικότερα ο ασφαλέστερος τρόπος για να μπαίνει σωστά το πρόσημο του ΔS , είναι να αναλύεται η έκφραση με λόγια (όπως έγινε στον ορισμό της εξίσωσης 1-21).
- Το αριστερό μέλος είναι πεπερασμένη διαφορά της αποθηκευτικότητας, ήτοι διαφορά αποθηκευμένης ποσότητας ως προς το χρόνο, ενώ με την πρώτη ματιά δεν φαίνεται ούτε το I ούτε το O να είναι συναρτήσεις μεταβλητών ως προς το χρόνο. Αυτό είναι λάθος: η εξίσωση αυτή, εφαρμόζεται για ένα χρονικό βήμα Δt (ημερήσιο, στιγμιαίο, μηνιαίο, ετήσιο, κλπ). Επομένως τα I , O αναφέρονται στο εκάστοτε χρονικό διάστημα Δt .

Σε μια λεκάνη, η πλήρης εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου είναι:

$$\boxed{\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - E - T - Q - G - N} \quad (1-22)$$

- όπου **P** η κατακρήμνιση (βροχόπτωση και χιονόπτωση)
E η εξάτμιση
T η διαπνοή (συνήθως $E + T = EPT$ = εξατμισοδιαπνοή)
Q η άμεση επιφανειακή απορροή

G η υπόγεια απορροή

N λοιπές απώλειες (πχ διαφυγές)

Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι χρειάζεται προσοχή στις μονάδες. Είθισται να χρησιμοποιούνται χιλιοστά ή κυβικά μέτρα. Ο πίνακας 1-9 αναφέρεται σε συνήθεις μονάδες που χρησιμοποιούνται σε υδατικά ισοζύγια.

Πίνακας 1-9: Μονάδες χρήσιμες για τα υδατικά ισοζύγια.

Μονάδα	Αντιστοιχία
Στρέμμα (στρ)	1000 m ²
Εκτάριο (ha)	10000 m ²
Εκατομμύρια κυβικά (hm ³)	10 ⁶ m ³

Από χιλιοστά (h) είναι πολύ εύκολο να μετατραπούν οι μονάδες σε κυβικά μέτρα (V) και αντίστροφα, εάν γνωρίζουμε την επιφάνεια αναφοράς (A). Είναι:

$$A * h = V \quad (1-23)$$

Ορίζεται ως **συντελεστής απορροής c** ο αδιάστατος λόγος της ποσότητας που απορρέει σε μια λεκάνη ($h_{\text{απορ}}$) ως προς τη συνολική κατακρήμνιση (P), δηλαδή:

$$c = \frac{h_{\text{απορ}}}{P} \quad (1-24)$$

1.6 Υδατικά ισοζύγια σε συστήματα αξιοποίησης υδατικών πόρων

Στην περίπτωση υδατικού ισοζυγίου σε έναν ταμιευτήρα (που αποτελεί το πλέον σύνηθες σύστημα αξιοποίησης υδατικών πόρων), η εξίσωση (1-22) μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$V_{t+1} = V_t + Q_{\text{obs},t} + P_t - EPT_t - a_i W - N_t \quad (1-25)$$

- όπου **V_{t+1}** ο όγκος που είναι αποθηκευμένος στην αρχή του μήνα t
V_t ο όγκος που είναι αποθηκευμένος στο τέλος του μήνα t
Q_{obs,t} η μηνιαία εισροή στον ταμιευτήρα
P_t η μηνιαία κατακρήμνιση πάνω στην επιφάνεια του ταμιευτήρα

EPT_t η μηνιαία εξάτμιση από την επιφάνεια του ταμιευτήρα

W η ποσότητα ύδατος που εκρέει

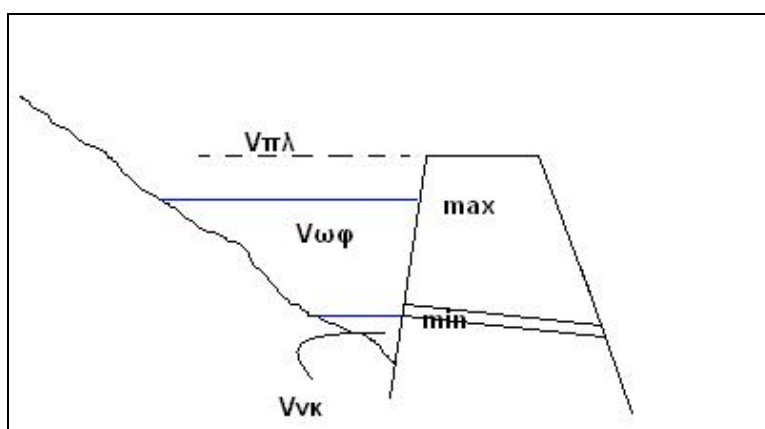
a_i ο μηνιαίος συντελεστής κατανομής του W με $\sum_{i=1}^{12} \alpha_i = 1$

N_t οι μη ελεγχόμενες μηνιαίες διαφυγές (απώλειες) από τον ταμιευτήρα

Στην περίπτωση των υδατικών ισοζυγίων υπάρχουν περιορισμοί αποθηκευτικότητας. Ο όγκος που είναι αποθηκευμένος κάθε χρονική στιγμή στον ταμιευτήρα, δεν μπορεί να υπερβαίνει τη μέγιστη δυνατή αποθηκευτική ικανότητα του ταμιευτήρα, αλλά ούτε και να είναι μικρότερος από την ελάχιστη αποθηκευτική ικανότητά του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-13, η στάθμη του αποθηκευμένου νερού στον ταμιευτήρα μπορεί να κινηθεί από μια ελάχιστη τιμή (min) σε μια μέγιστη (max).

Ο όγκος που περιλαμβάνεται μεταξύ των δυο σταθμών αυτών (V_{ωφ}) καλείται ωφέλιμος όγκος. Ο νεκρός όγκος (V_{νκ}) υπόκειται του ωφέλιμου όγκου και έχει υπολογιστεί έτσι ώστε οι φερτές ύλες που θα συσσωρευτούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ταμιευτήρα (~40 με 50 έτη) να μην εμφράξουν την υδροληψία (της οποίας η στάθμη ταυτίζεται με την κατώτερη στάθμη του ωφέλιμου όγκου).

Ο ωφέλιμος όγκος δεν φθάνει μέχρι τη στέψη του φράγματος, αλλά περιορίζεται μέχρι τη στάθμη max. Ο υπερκείμενος όγκος (V_{πλ}) καλείται πλημμυρικός όγκος και χρησιμοποιείται για ανάσχεση πλημμύρων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του έργου. Εάν δεν υπήρχε ο πλημμυρικός όγκος και ο ταμιευτήρας ήταν πλήρως γεμάτος, τότε μια πλημμύρα που θα εισερχόταν ξαφνικά στον ταμιευτήρα, θα προκαλούσε υπερπήδηση του φράγματος και ως αποτέλεσμα αυτού, θα προκαλούσε σημαντικές ζημιές ή και καταστροφή του έργου.



Σχήμα 1-13: Χαρακτηριστικοί όγκοι λειτουργίας ταμιευτήρα.

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, η εξίσωση (1-25) πρέπει να περιοριστεί ως προς το εύρος διακύμανσης της εκάστοτε αποθηκευμένης στάθμης. Τούτο επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του ακόλουθου περιορισμού:

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \quad (1-26)$$

όπου V_t ο όγκος που είναι αποθηκευμένος στο τέλος του μήνα t
 $V_{\min}$ ο ελάχιστος αποθηκευμένος όγκος στον ταμιευτήρα
 $V_{\max}$ ο μέγιστος αποθηκευμένος όγκος στον ταμιευτήρα

Κατά την εκπόνηση του υδατικού ισοζυγίου, εφαρμόζεται η σχέση (1-25). Ο όγκος του αποθηκευμένου νερού που προκύπτει, συγκρίνεται με τη μέγιστη και την ελάχιστη αποθηκευτική ικανότητα, σύμφωνα με τη σχέση (1-26).

- Εάν βρεθεί μεγαλύτερος από τη μέγιστη τιμή, θεωρούμε ότι υπάρχει υπερχείλιση και η επιπλέον ποσότητα νερού χάνεται. Επομένως στην επόμενη εφαρμογή της σχέσης (1-25), ο αρχικός όγκος θα είναι ίσος με το μέγιστο όγκο που μπορεί να αποθηκευτεί.
- Εάν ο όγκος βρεθεί μικρότερος από την ελάχιστη τιμή, θεωρούμε ότι υπάρχει ανεπάρκεια νερού και στην επόμενη εφαρμογή της σχέσης (1-25), ο αρχικός όγκος θα είναι ίσος με τον ελάχιστο, καθόσον η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα δεν μπορεί να κατέβει χαμηλότερα από την ελάχιστη ($\min$).

Παράδειγμα 1-5: Εκτίμηση υδρολογικού ισοζυγίου σε λεκάνη απορροής

Σε στεγανή λεκάνη απορροής επιφάνειας 10 km^2 , κατά τη διάρκεια ενός εαρινού μήνα, η βροχόπτωση που μετράνε τα εγκατεστημένα όργανα είναι 520 mm . Η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται περί τα 3.85 hm^3 . Κατά τη διάρκεια του μήνα, η βασική ροή στο ποτάμι που καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης, είναι περίπου $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$. Να υπολογιστεί η άνοδος ή η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα εάν είναι γνωστό ότι στην αρχή του μήνα αυτός βρίσκεται στο $+51.68 \text{ m}$. Ποιος ο συντελεστής απορροής το μήνα αυτό;

Λύση:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - E - T - Q - G - N$$

ΔS είναι η μεταβολή στην αποθήκευση, που ισούται με τη μεταβολή Δh της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα επί το εμβαδόν A της λεκάνης. Επειδή ο χρονικός ορίζοντας είναι ο

μήνας, μπορούμε να απλοποιήσουμε το Δt , φροντίζοντας ωστόσο να αναχθούν όλα τα μεγέθη σε μηνιαίο βήμα.

Επειδή η εξάτμιση και η διαπνοή δίδονται ως εξατμισοδιαπνοή, μπορούμε να γράψουμε $E+T=EPT$. Η λεκάνη απορροής είναι στεγανή, επομένως $N=0$. Δεν αναφέρεται κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα (οριζόντιος υδροφόρος ορίζοντας), επομένως $G=0$. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αρχική εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου δύναται να απλοποιηθεί ως:

$$\begin{aligned}\Delta S &= \Delta h * A = P * A - EPT - Q \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta h &= 0.520 - \frac{3.85 * 10^6}{10 * 10^6} - 0.65 * \frac{30 * 86400}{10^7} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta h &= -0.033m\end{aligned}$$

Επειδή $P < Q + EPT$, συνεπάγεται ότι $I < 0$, επομένως υπάρχει τροφοδότηση από υπόγεια νερά (υδροφόρος ορίζοντας) και η στάθμη πρέπει να μειώνεται. Θα είναι τότε:

$$h_2 = 51.68 - 0.033 = 51.65 \text{ m περίπου.}$$

Ο συντελεστής απορροής κατά τον ορισμό θα είναι:

$$C = \frac{0.65 * \frac{30 * 86400}{10^7}}{0.520} = 0.32$$

Πρέπει να παρατηρηθούν τα εξής:

- ❑ Ο μήνας θεωρήθηκε ότι έχει 30 ημέρες.
- ❑ Η διάρκεια της ημέρας σε δευτερόλεπτα είναι 86400.
- ❑ Το hm^3 σημαίνει εκατομμύρια κυβικά μέτρα.
- ❑ Δεν έχει νόημα να κρατάμε πάνω από δυο δεκαδικά στο συντελεστή απορροής.

Παράδειγμα 1-6: Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου σε ταμιευτήρα

Ένας ταμιευτήρας έχει στις αρχές Ιουλίου αποθηκευμένο όγκο 5000 m^3 . Κατά τη διάρκεια του μήνα, η βροχόπτωση μετρήθηκε ίση με 300 m^3 , η εξάτμιση ίση με 800 m^3 , ενώ η εισροή από το υδρογραφικό δίκτυο μετρήθηκε ίση με 200 m^3 .

A) Εάν η ελάχιστη αποθηκευτική ικανότητα του ταμιευτήρα είναι 3000 m^3 , πόσο νερό για άρδευση μπορεί να ληφθεί κατά τη διάρκεια του εν λόγω μήνα; Θεωρείστε ότι ο ταμιευτήρας είναι στεγανός.

B) Τον επόμενο μήνα (Αύγουστος), η εξάτμιση μειώθηκε κατά 20%, δεν εκδηλώθηκαν βροχοπτώσεις και η εισροή από το υδρογραφικό δίκτυο παρέμεινε σταθερή. Εάν η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε για άρδευση τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο ήταν $600 \text{ m}^3/\text{μήνα}$, ποιος θα είναι ο αποθηκευμένος όγκος νερού στις αρχές του Σεπτεμβρίου;

Λύση:

A) Σύμφωνα με την εξίσωση (1-26) θα είναι:

$$V_{t+1} = V_t + Q_{\text{obs},t} + P_t - EPT_t - a_i W - N_t$$

Επειδή ο ταμιευτήρας είναι στεγανός, $N_t=0$. Ο ετήσιος συντελεστής κατανομής a_i δεν έχει νόημα, καθώς το ισοζύγιο θα γίνει για έναν μόνο μήνα. Επομένως η ποσότητα $a_i W$ είναι ίση με W .

Η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορούμε να πάρουμε από τον ταμιευτήρα, θα προκύψει από την παραπάνω σχέση, εάν θέσουμε όπου V_{t+1} την ελάχιστη δυνατή στάθμη. Δηλαδή:

$$3000 = 5000 + 200 + 300 - 800 - W \text{ ή } W = 1700 \text{ m}^3.$$

B) Ισοζύγιο κατά το μήνα Ιούλιο:

$$V_{t+1} = V_t + Q_{\text{obs},t} + P_t - EPT_t - W \Rightarrow V_{t+1} = 5000 + 200 + 300 - 800 - 600 = 4100 \text{ m}^3$$

Παρατηρούμε ότι ο υπολογισμένος όγκος είναι μεγαλύτερος από 3000 m^3 , άρα ικανοποιείται ο περιορισμός. Ισοζύγιο κατά το μήνα Αύγουστο:

$$V_{t+1} = V_t + Q_{\text{obs},t} + P_t - \text{EPT}_t - W \Rightarrow V_{t+1} = 4100 + 200 + 0 - (1 - 0.2) \cdot 800 - 600 = 3060 \text{ m}^3$$

1.7 Ασκήσεις προς επίλυση

Άσκηση 1-1: Εκτίμηση υδρολογικού ισοζυγίου

Σε μια παραθαλάσσια λεκάνη απορροής, έκτασης 15 km^2 , κατά τη διάρκεια του μήνα Ιουλίου μετρήθηκαν τα ακόλουθα μεγέθη:

Μέγεθος	Τιμή
Βροχόπτωση	23 mm
Εξάτμιση	51 mm
Εισροές	$0.15 \text{ m}^3/\text{s}$
Διαφυγές – λοιπές απώλειες	0.1 hm^3
Αρχική στάθμη υπογείου υδροφόρου	1.52 m

Στη λεκάνη αυτή, υπάρχουν γεωτρήσεις από τις οποίες αντλείται νερό για άρδευση και ύδρευση. Εάν η στάθμη του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα πέσει κάτω από το 1.5 m, υπάρχει κίνδυνος υφαλμύρισης. Ποια η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να αντληθεί χωρίς να παρατηρηθεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης σε m^3 ;

2. Ακραία Γεγονότα

2.1 Γενικά

Η τυχαιότητα υπάρχει σε όλες τις μεταβλητές και διεργασίες του υδρολογικού κύκλου. Οι νόμοι των πιθανοτήτων κυβερνούν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό τα υδρολογικά φαινόμενα. Για το λόγο αυτό, η λήψη τεχνικών και οικονομικών αποφάσεων σχετικά με τον υδρολογικό σχεδιασμό των έργων και τη λειτουργία τους, γίνεται πάντα υπό καθεστώς αβεβαιότητας.

Βασικό στατιστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά στην υδρολογία, είναι η **περίοδος επαναφοράς**, η οποία αρχικά ορίζεται ως ο μέσος αριθμός χρονικών διαστημάτων (στην υδρολογία ετών), που μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών εμφανίσεων της τυχαίας μεταβλητής (π.χ. κατακρήμνιση) με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο μιας δεδομένης τιμής. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, λέγοντας περίοδο επαναφοράς 1000 έτη για παροχή 2000 m³/s, εννοείται ότι η τιμή 2000 m³/s ή μεγαλύτερή της θα εμφανίζεται κατά μέσο όρο κάθε 1000 έτη.

Ως ακραίο γεγονός, θεωρείται κάθε τιμή μεταβλητής του υδρολογικού κύκλου με «μεγάλη» περίοδο επαναφοράς. Με τον όρο μεγάλη, θεωρείται η τιμή εκείνη, που συγκριτικά με το έργο που διαστασιολογείται, είναι μια ή περισσότερες τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη συνηθισμένη λειτουργία του. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο ομβρίων σχεδιάζεται με περίοδο επαναφοράς 5-10 έτη, έτσι ώστε στις συνηθισμένες βροχοπτώσεις να επαρκεί. Κατά μέσο όρο όμως, κάθε 5 – 10 έτη δεν θα επαρκεί, αφού τότε θα συμβεί τουλάχιστον μια φορά μια βροχόπτωση που δεν θα μπορεί να παροχετευτεί από το δίκτυο.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει αναφορά στις ακραίες τιμές της απορροής. Εάν εξετάζονται οι μέγιστες τιμές μιας χρονοσειράς απορροής, ο όρος που θα χρησιμοποιείται είναι πλημμύρα, ενώ εάν εξετάζονται οι ελάχιστες τιμές, θα γίνεται χρήση του όρου ξηρασία.

2.2 Βασικές στατιστικές έννοιες

Καλείται **τυχαία μεταβλητή X** κάθε μεταβλητή που ορίζεται από μια συνάρτηση πιθανότητας ορισμένη επί του δειγματικού χώρου. Η χρονική ακολουθία τιμών μιας τυχαίας μεταβλητής ονομάζεται **χρονοσειρά**. Σε κάθε δυνατό αποτέλεσμα αντιστοιχίζεται μέσω της συγκεκριμένης συνάρτησης ένας αριθμός X. Η πιθανότητα του γεγονότος (υποσύνολο του δειγματικού χώρου) όλα τα στοιχεία του να έχουν τιμές μικρότερες από έναν αριθμό x

συμβολίζεται ως $P(X \leq x)$. Ορίζεται ως **συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων**, η συνάρτηση της πραγματικής μεταβλητής x , που δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_x(x) = P(X \leq x) \quad (2-1)$$

Η συνάρτηση αυτή ορίζεται για κάθε αριθμό x από $-\infty$ έως $+\infty$. Η συνάρτηση κατανομής είναι πάντοτε αύξουσα, συνεχής από δεξιά και ικανοποιεί τη σχέση:

$$0 = F_x(-\infty) \leq F_x(x) \leq F_x(+\infty) = 1 \quad (2-2)$$

Η συνάρτηση κατανομής καλείται και **αθροιστική συνάρτηση κατανομής** (cumulative distribution function – cdf) ή και **πιθανότητα μη υπέρβασης**. Αντίστοιχα ορίζεται ως η **πιθανότητα υπέρβασης** η ακόλουθη παράσταση:

$$F_{1x} = P(X > x) = 1 - F_x(x) \quad (2-3)$$

Η τυχαία μεταβλητή X λέγεται **συνεχής** αν η συνάρτηση κατανομής $F_x(x)$ είναι συνεχής συνάρτηση για κάθε x . Αντίθετα η X θα λέγεται **διακριτή** μεταβλητή αν η συνάρτηση κατανομής της δεν είναι συνεχής. Η παράγωγος της συνάρτησης κατανομής:

$$f_x(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2-4)$$

ονομάζεται **συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας** (probability density function – pdf). Εφεξής και για λόγους απλούστευσης και συντομίας, από τους συμβολισμούς των πιθανοτήτων υπέρβασης και μη υπέρβασης θα παραλείπεται ο δείκτης x , θα εννοείται όμως ότι και οι δυο πιθανότητες αναφέρονται στην τυχαία μεταβλητή x . Η περίοδος επαναφοράς T ορίζεται ως η αντίστροφη τιμή της πιθανότητας υπέρβασης:

$$F_1 = \frac{1}{T} \quad (2-5)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2-3) και (2-5), λαμβάνεται η σχέση μεταξύ περιόδου επαναφοράς και πιθανότητας μη υπέρβασης:

$$F = 1 - \frac{1}{T} \quad (2-6)$$

Παράδειγμα 2-1: Στατιστική ανάλυση δείγματος

Για να γίνουν τα παραπάνω πιο κατανοητά, ας υποθεθεί ότι έχουμε τη χρονοσειρά 20 ετησίων βροχοπτώσεων (Πίνακας 2-1).

Πίνακας 2-1: Χρονοσειρά 20 ετησίων βροχοπτώσεων.

Ημερομηνία	Βροχόπτωση (mm)	Ημερομηνία	Βροχόπτωση (mm)
1984	1025	1994	827
1985	681	1995	577
1986	1161	1996	538
1987	1319	1997	756
1988	1300	1998	807
1989	1433	1999	471
1990	454	2000	858
1991	1041	2001	899
1992	1274	2002	1134
1993	728	2003	909

Κατατάσσουμε τις τιμές του πίνακα 2-1 σε φθίνουσα σειρά. Τις τιμές αυτές, μπορούμε να τις κατατάξουμε σε k κλάσεις, με το ίδιο εύρος τιμών στην κάθε μια. Δηλαδή, εάν οι τιμές μεταβάλλονται από 300 έως 1500 και χρησιμοποιηθούν 5 κλάσεις, το εύρος κάθε κλάσης θα είναι $1200/5=240$ mm.

Πίνακας 2-2: Χρονοσειρά 20 ετησίων βροχοπτώσεων (φθίνουσα κατά μέγεθος).

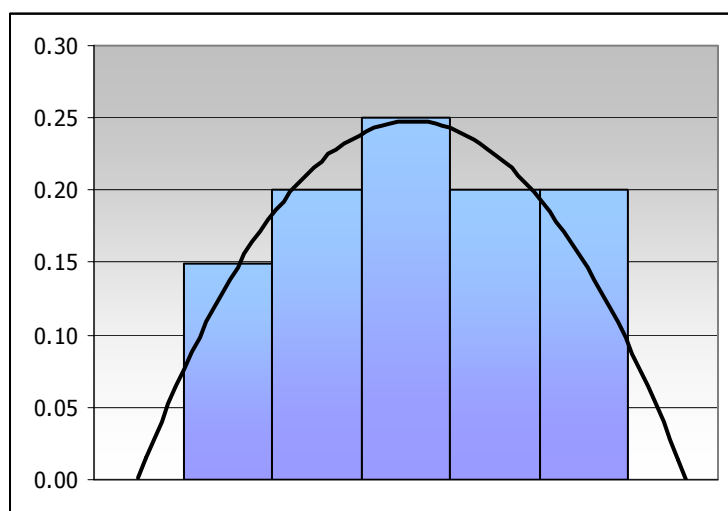
Ημερομηνία	Βροχόπτωση (mm)	Ημερομηνία	Βροχόπτωση (mm)
1989	1433	2000	858
1987	1319	1994	827
1988	1300	1998	807
1992	1274	1997	756
1986	1161	1993	728
2002	1134	1985	681
1991	1041	1995	577
1984	1025	1996	538
2003	909	1999	471
2001	899	1990	454

Στον ακόλουθο πίνακα 2-3, φαίνεται η κατάταξη του δείγματος σε 5 κλάσεις, ο αριθμός των τιμών σε κάθε κλάση (m) και η πιθανότητα που αντιστοιχεί σε κάθε κλάση $P(x)=m/n$, όπου n ο συνολικός αριθμός στοιχείων του δείγματος, που στο παράδειγμα αυτό είναι 20.

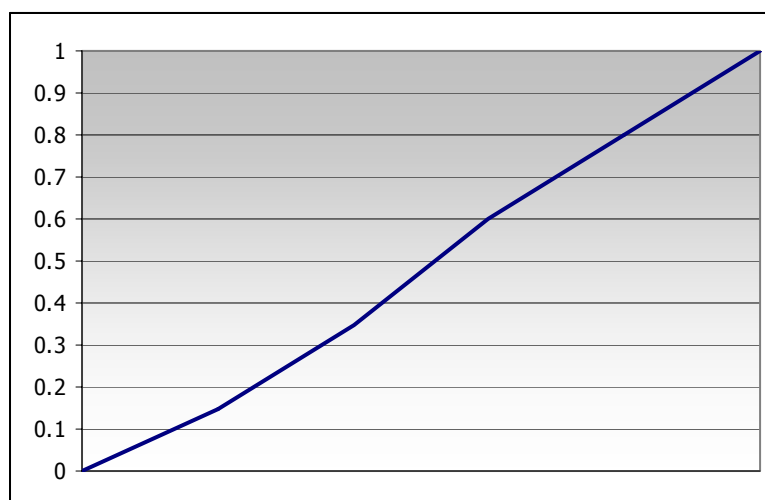
Πίνακας 2-3: Κατάταξη κατά κλάσεις.

Κλάση	Εύρος τιμών της μεταβλητής	Αριθμός τιμών στην κλάση (m)	Πιθανότητα $P(x)=m/n$
1	300-540	3	$3/20=0.15$
2	540-780	4	$4/20=0.20$
3	780-1020	5	$5/20=0.25$
4	1020-1260	4	$4/20=0.20$
5	1260-1500	4	$4/20=0.20$
		n=20	$\Sigma P(x)=1.0$

Η πιθανότητα στην τελευταία στήλη της κατάταξης κατά κλάσεις (Πίνακας 2-3), έχει σχεδιαστεί με ραβδογράφημα στο Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1: Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας.



Σχήμα 2-2: Αθροιστική κατανομή πιθανότητας.

Εάν είχαμε ένα πολύ μεγαλύτερο δείγμα, με τα ίδια όμως στατιστικά χαρακτηριστικά, και η όλη εργασία γινόταν με έναν πολύ μεγάλο αριθμό κλάσεων, τότε αντί της εμπειρικής κατανομής (ραβδόγραμμα), θα προέκυπτε μια καμπύλη που θα προσομοίαζε περισσότερο τη θεωρητική κατανομή πιθανότητας που αντιστοιχεί στο σύνολο των πιθανών τιμών της μεταβλητής στο συγκεκριμένο σημείο (πληθυσμός) όπως αυτή του Σχήματος 2-1.

Στο Σχήμα 2-2, έχει σχεδιαστεί η αθροιστική κατανομή πιθανότητας (cdf) του δείγματος. Είναι σαφές ότι οι τιμές της cdf κυμαίνονται από 0 έως 1.

2.3 Βασικές στατιστικές ιδιότητες

Οι κατανομές πιθανοτήτων των τυχαίων μεταβλητών έχουν χαρακτηριστικά που συνδέονται με τις στατιστικές ιδιότητες της σειράς των τιμών της μεταβλητής.

Τα παρακάτω αναφερόμενα περιγράφουν τις βασικότερες στατιστικές ιδιότητες (με εφαρμογή στην Υδρολογία) και γίνεται αναφορά (όπου αυτό είναι εφικτό) στην χρήση τους μέσα από το φύλλο εργασίας Microsoft Excel.

Όλες οι στατιστικές ιδιότητες απορρέουν από δυο ειδών ροπές, τις κεντρικές (σχέση 2-7) και τις ροπές ως προς την αρχή (σχέση 2-8):

$$m_R = \sum_{i=1}^n p_i (x_i - \bar{x})^R \quad (2-7)$$

$$J_R = \sum_{i=1}^n p_i x_i^R \quad (2-8)$$

όπου **p_i** η πιθανότητα για το εκάστοτε τιμή x_i της σειράς

R η τάξη της ροπής (πχ R=2 για ροπή δευτέρας τάξης)

n το πλήθος των στοιχείων

$\bar{x}$ ο μέσος όρος των x_i στοιχείων

Αν δεν έχουμε λόγο να θέσουμε διαφορετική πιθανότητα εμφάνισης σε κάθε στοιχείο, τότε η πιθανότητα p_i γίνεται ίση με $1/n$.

Ο **μέσος όρος** ορίζεται ως η πρώτη ροπή ως προς την αρχή. Επομένως, εάν στην εξίσωση (2-8) τεθεί R=1, θα είναι:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-9)$$

Στο Excel ο μέσος όρος δίδεται από την εντολή **Average** (Cell:Cell).

Ο **διάμεσος** ($\hat{x}_{0.5}$) είναι η τιμή της μεταβλητής που ισομοιράζει την κατανομή της πιθανότητας (50%) και πρακτικά βρίσκεται ως το μεσαίο στοιχείο περιττού αριθμού στοιχείων ή ως ο μέσος όρων των (δυο) μεσαίων στοιχείων για άρτιο αριθμό στοιχείων. Εάν για παράδειγμα έχουμε την αλληλουχία: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 τότε ο διάμεσος είναι το 5. Εάν στην αλληλουχία προστεθεί το 10, τότε ο διάμεσος θα είναι ο $(5+6)/2=5.5$. Στο Excel, η διάμεσος δίδεται από την εντολή **Median** (Cell:Cell).

Το **κάτω τεταρτημόριο** ($\hat{x}_{0.25}$) ορίζεται ως η διάμεσος ($\hat{x}_{0.5}$) των τιμών του συνόλου που πληρούν την προϋπόθεση: $x_i \leq \hat{x}_{0.5}$. Ομοίως το **άνω τεταρτημόριο** ($\hat{x}_{0.75}$) ορίζεται ως η διάμεσος ($\hat{x}_{0.5}$) των τιμών του συνόλου που πληρούν την προϋπόθεση: $x_i \geq \hat{x}_{0.5}$. Το κάτω τεταρτημόριο της αλληλουχίας 1 έως 9 βρίσκεται ως εξής: αρχικά εντοπίζουμε τη διάμεσο ($\hat{x}_{0.5}$) που είναι το 5. Μετά, η διάμεσος της νέας αλληλουχίας 1 έως 5 είναι το 3. Επομένως $\hat{x}_{0.25}=3$. Ομοίως το άνω τεταρτημόριο είναι το 7. Το Excel χρησιμοποιεί την εντολή **percentile** (Cell: cell; percentile) ελαφρώς παραλλαγμένη από την κλασσική της έννοια.

Το **διατεταρτομοριακό εύρος** $\hat{\delta}_x$ ορίζεται ως η διαφορά του άνω και κάτω τεταρτημορίου:

$$\hat{\delta}_x = \hat{x}_{0.75} - \hat{x}_{0.25} \quad (2-10)$$

Η **σκέδαση** ή **διασπορά** είναι η δεύτερη κεντρική ροπή. Η δε τετραγωνική της ρίζα, ονομάζεται τυπική απόκλιση. Η σκέδαση, είναι ένα μέτρο του πόσο απέχουν οι τιμές των διαφόρων στοιχείων από τη μέση τιμή. Επειδή δε είναι υψωμένη στο τετράγωνο, έπεται ότι όσο μεγαλύτερη η απόσταση των στοιχείων τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η τιμή της.

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2-11)$$

Στο Excel με την εντολή **STDEV** ή **STDEVP** μπορούμε να έχουμε μια μεροληπτική ή αμερόληπτη εκτίμηση της τυπικής απόκλισης. Αν δε την υψώσουμε στο τετράγωνο, λαμβάνουμε τη σκέδαση. Η μεροληψία διορθώνεται στη σκέδαση αν πολλαπλασιάσουμε την αμερόληπτη εκτίμηση (STDEVP) με $n/(n-1)$. Συνίσταται η χρήση της STDEV αλλά οι διαφορές (αριθμητικές) των δυο είναι πολύ μικρές.

Ο **συντελεστής ασυμμετρίας** είναι η τρίτη κεντρική ροπή:

$$\gamma = \frac{1}{nS_x^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (2-12)$$

Το Excel δίνει κατευθείαν την αμερόληπτη εκτίμηση με την εντολή SKEW. Η διόρθωση γίνεται με πολλαπλασιασμό της έκφρασης (2-6) επί $n^2/(n-1)(n-2)$. Εάν η τιμή του συντελεστή ασυμμετρίας είναι θετική, περιμένουμε δεξιά αιχμή στην κατανομή πιθανοτήτων της μεταβλητής. Αν είναι αρνητική περιμένουμε αριστερή αιχμή στην κατανομή. Δηλαδή, η αιχμή θα είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά ή προς τα δεξιά του άξονα συμμετρίας (η κατακόρυφος άξονας στην κανονική κατανομή).

Ο **συντελεστής κύρτωσης** είναι η τέταρτη κεντρική ροπή:

$$k = \frac{1}{nS_x^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 \quad (2-13)$$

Το Excel δίνει κατευθείαν την αμερόληπτη εκτίμηση με την εντολή KURT. Η διόρθωση γίνεται με πολλαπλασιασμό της έκφρασης (2-11) επί $n^3/(n-1)(n-2)(n-3)$. Η κύρτωση εκφράζει τη σχετική επιπεδότητα ή όχι μιας κατανομής. Εάν ο συντελεστής κύρτωσης είναι μικρότερος από 3, τότε περιμένουμε η κατανομή να είναι στη μορφή αυτή πιο επίπεδη απ' ό,τι είναι στην κανονική κατανομή. Αντίθετα, εάν ο συντελεστής κύρτωσης είναι μεγαλύτερος από 3, τότε η μορφή της κατανομής είναι πιο οξεία απ' ό,τι η κανονική κατανομή.

Ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς το μέσο όρο ονομάζεται **συντελεστής σκεδασιμότητας ή μεταβλητότητας**:

$$C_v = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (2-14)$$

2.4 Στατιστικές κατανομές

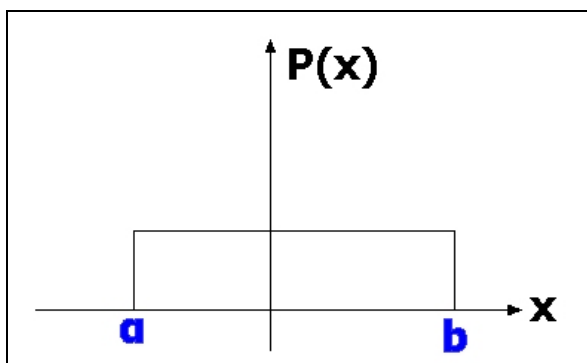
Στην Υδρολογία χρησιμοποιείται ένα πλήθος στατιστικών κατανομών για την περιγραφή συνήθων και ακραίων τιμών. Όσον αφορά τις συνήθεις τιμές (πχ μέσες μηνιαίες, ετήσιες, υπερετήσιες, κλπ) χρησιμοποιείται πολύ συχνά η κανονική κατανομή (ή κατανομή Gauss). Για τις ακραίες τιμές μερικές από τις κατανομές που χρησιμοποιούνται, είναι για τα μεν μέγιστα η κατανομή Gumbel μεγίστων, η Λογαριθμοκανονική (Log-Normal) και η Log-Pearson III, για τα δε ελάχιστα η κατανομή Gumbel ελαχίστων.

2.4.1 Ομοιόμορφη κατανομή

Η ομοιόμορφη κατανομή είναι η πλέον απλή κατανομή, η οποία παρουσιάζει μόνο εκπαιδευτικό ενδιαφέρον. Δεν χρησιμοποιείται ποτέ στην υδρολογία, αφού κανένα υδρολογικό μέγεθος ούτε κατά προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή. Η εξίσωσή της είναι η ακόλουθη:

$$P(x) = \begin{cases} 0, & x > b \\ 0, & x < a \\ \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \end{cases} \quad (2-15)$$

Η ομοιόμορφη κατανομή έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3: Η ομοιόμορφη κατανομή.

2.4.2 Κανονική κατανομή (Gauss)

Η κανονική κατανομή (ή κατανομή Gauss) είναι ευρέως διαδεδομένη, λόγω της απλότητάς της και των καλών εκτιμήσεων που δίδει ιδιαίτερα σε υδρολογικά μεγέθη ετησίου βήματος. Δίδεται από τη σχέση:

$$P = \bar{x} + S_x z \quad (2-16)$$

όπου $\bar{x}$ ο μέσος όρος του δείγματος
 S_x η τυπική απόκλιση του δείγματος και
 z (ή w) η ανηγμένη μεταβλητή Gauss

Για τον υπολογισμό της τιμής της ανηγμένης μεταβλητής Gauss, γίνεται χρήση του Πίνακα 2-4, ο οποίος δίδει τις τιμές της ανηγμένης μεταβλητής z συναρτήσει της πιθανότητας υπέρβασης ή μη υπέρβασης. Επειδή όμως τόσο η πιθανότητα υπέρβασης όσο και μη υπέρβασης συνδέεται μονοσήμαντα με την περίοδο επαναφοράς, όπως φαίνεται από τις Σχέσεις (2-5) και (2-6), η τιμή της μεταβλητής z εξαρτάται μόνο από την περίοδο επαναφοράς.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η διαδικασία υπολογισμού της ανηγμένης μεταβλητής έχει ως εξής:

- Με βάση την περίοδο επαναφοράς T υπολογίζεται είτε η πιθανότητα υπέρβασης είτε η πιθανότητα μη υπέρβασης, με βάση τις σχέσεις (2-5) και (2-6).
- Από τον Πίνακα 2-4, λαμβάνεται η τιμή του z . Για ενδιάμεσες τιμές των F και F_1 μπορεί να γίνει γραμμική παρεμβολή.

Παράδειγμα 2-2: Κανονική κατανομή

Εάν έχουμε περίοδο επαναφοράς $T=100$, τότε $F_1=1/100=0.01$. Τότε $F=1-F_1=0.99$ και άρα $z=w=2.3263$. Συνήθως οι τιμές του F_1 (άρα και του F) δεν βρίσκονται ακριβώς στον πίνακα. Στις περιπτώσεις αυτές, καλό είναι να γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δυο πιο κοντινών τιμών του Πίνακα 2-4.

Πίνακας 2-4: Πίνακας κανονικής κατανομής.

<i>z</i>	<i>F(z)</i>	<i>F₁(z)</i>	<i>z</i>	<i>F(z)</i>	<i>F₁(z)</i>	<i>z</i>	<i>F(z)</i>	<i>F₁(z)</i>
0	0.5	0.5	1.35	0.91149	0.08851	2.70	0.99653	0.00347
0.05	0.51994	0.48006	1.40	0.91924	0.08076	2.75	0.99702	0.00298
0.10	0.53983	0.46017	1.45	0.92647	0.07353	2.80	0.99744	0.00256
0.15	0.55962	0.44038	1.50	0.93319	0.06681	2.85	0.99781	0.00219
0.20	0.57926	0.42074	1.55	0.93943	0.06057	2.8782	0.998	0.002
0.25	0.59871	0.40129	1.60	0.94520	0.05480	2.90	0.99813	0.00187
0.2533	0.6	0.4	1.6449	0.95	0.05	2.95	0.99841	0.00159
0.30	0.61791	0.38209	1.65	0.95053	0.04947	3.00	0.99865	0.00135
0.35	0.63683	0.36317	1.70	0.95543	0.04457	3.05	0.99841	0.00159
0.40	0.65542	0.34458	1.75	0.95994	0.04006	3.0902	0.999	0.001
0.45	0.67364	0.32636	1.80	0.96407	0.03593	3.10	0.99886	0.00114
0.50	0.69146	0.30854	1.85	0.96784	0.03216	3.15	0.99900	0.00100
0.5244	0.7	0.3	1.90	0.97128	0.02872	3.20	0.99903	0.00097
0.55	0.70884	0.29116	1.95	0.97441	0.02559	3.25	0.99918	0.00082
0.60	0.72575	0.27425	2.00	0.97725	0.02275	3.2905	0.9995	0.0005
0.65	0.74215	0.25785	2.05	0.97982	0.02018	3.30	0.99942	0.00058
0.70	0.75804	0.24196	2.0537	0.98	0.02	3.35	0.99950	0.00050
0.75	0.77337	0.22663	2.10	0.98214	0.01786	3.40	0.99952	0.00048
0.80	0.78814	0.21186	2.15	0.98422	0.01578	3.45	0.99960	0.00040
0.8416	0.8	0.2	2.20	0.98610	0.01390	3.50	0.99966	0.00034
0.85	0.80234	0.19766	2.25	0.98778	0.01222	3.5402	0.9998	0.0002
0.90	0.81594	0.18406	2.30	0.98928	0.01072	3.55	0.99977	0.00023
0.95	0.82894	0.17106	2.3263	0.99	0.01	3.60	0.99980	0.00020
1.00	0.84134	0.15866	2.35	0.99061	0.00939	3.65	0.99981	0.00019
1.05	0.85314	0.14686	2.40	0.99180	0.00820	3.70	0.99984	0.00016
1.10	0.86433	0.13567	2.45	0.99286	0.00714	3.7195	0.9999	10 ⁻⁴
1.15	0.87493	0.12507	2.50	0.99379	0.00621	4.27	1 - 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
1.20	0.88493	0.11507	2.55	0.99461	0.00539	4.75	1 - 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
1.25	0.89435	0.10565	2.5758	0.995	0.005	5.20	1 - 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
1.2816	0.9	0.1	2.60	0.99534	0.00466	5.61	1 - 10 ⁻⁸	10 ⁻⁸
1.30	0.90320	0.09680	2.65	0.99598	0.00402	6.00	1 - 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹
- <i>z</i>	<i>F₁(-z)</i>	<i>F(-z)</i>	- <i>z</i>	<i>F₁(-z)</i>	<i>F(-z)</i>	- <i>z</i>	<i>F₁(-z)</i>	<i>F(-z)</i>

2.4.3 Κατανομή Gumbel (μεγίστων και ελαχίστων)

Η χρήση της κατανομής Gumbel μεγίστων θεωρείται κατάλληλη για ακραία γεγονότα (κυρίως πλημμύρες). Η γενική της μορφή είναι:

$$P = x_0 - \frac{1}{a} \ln[\ln(T) - \ln(T - 1)] \quad (2-17)$$

όπου **P** η πιθανότητα

x₀, a παράμετροι της κατανομής

T η περίοδος επαναφοράς

Επειδή η περίοδος επαναφοράς T συνδέεται με την πιθανότητα υπέρβασης F_1 με τη σχέση $F_1=1/T$, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί:

$$P = x_0 - \frac{1}{a} \ln[-\ln(1 - F_1)] \quad (2-18)$$

Υπενθυμίζεται ότι το άθροισμα των πιθανοτήτων υπέρβασης (F_1) και μη υπέρβασης (F) είναι ίσο με τη μονάδα. Για την εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής, μπορούν να ακολουθηθούν πολλοί τρόποι (Μιμίκου, 1994), εκ των οποίων θα αναφερθεί μόνο η μέθοδος των ροπών.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, οι παράμετροι θα δίδονται από τις ακόλουθες δυο εξισώσεις:

$$x_0 = \bar{x} - \frac{0.577}{a} \quad (2-19)$$

$$a = \frac{1}{0.78S_x} \quad (2-20)$$

όπου $\bar{x}$ ο μέσος όρος του δείγματος

S_x η τυπική απόκλιση του δείγματος

Η Gumbel ελαχίστων χρησιμοποιείται για ξηρασίες. Η γενική της μορφή είναι:

$$P = x_0 + \frac{1}{a} \ln[\ln(T) - \ln(T - 1)] \quad (2-21)$$

και οι παράμετροί της θα δίδονται από τις εξισώσεις (2-20) και (2-22):

$$x_0 = \bar{x} + \frac{0.577}{a} \quad (2-22)$$

2.4.4 Λογαριθμοκανονική (Log-Normal) κατανομή μεγίστων

Εάν οι λογάριθμοι των μεταβλητών ακολουθούν κανονική κατανομή, τότε η μεταβλητή ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή. Η λογαριθμοκανονική κατανομή (log-normal distribution) δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = e^{m_y + w\sigma_y} \quad (2-23)$$

όπου m_y η παράμετρος κλίμακας (>0) και
 σ_y η παράμετρος σχήματος (>0)
 z (ή w) η ανηγμένη μεταβλητή Gauss

Οι δυο παραπάνω παράμετροι θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$m_y = \frac{\sum_{i=1}^n \ln x}{n} \quad (2-24)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x - m_y)^2} \quad (2-25)$$

Όσον αφορά το z , αυτό λαμβάνεται από τους πίνακες της κανονικής κατανομής, με $F_1=1/T$ γνωστό. Ο μέσος όρος $\bar{x}$ και η τυπική απόκλιση S_x της λογαριθμοκανονικής κατανομής είναι:

$$\bar{x} = e^{m_y + \sigma_y^2/2} \quad (2-26)$$

$$S_x = \sqrt{e^{2m_y + \sigma_y^2} [e^{\sigma_y^2} - 1]} \quad (2-27)$$

Με την παραπάνω μορφή είναι εν γένει δύσχρηστη η επίλυση, καθώς καταλήγει σε μη γραμμικό σύστημα δυο εξισώσεων με δυο αγνώστους. Για το λόγο αυτό, εφαρμόζεται συνηθέστερα η μέθοδος του **συντελεστή συχνότητας**, η οποία και απλουστεύει σημαντικά τους υπολογισμούς:

$$K(T) = \frac{1}{C_v} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{C_v^2 + 1}} \right) \exp \left[z \sqrt{\ln(C_v^2 + 1)} \right] - 1 \right] \quad (2-28)$$

όπου C_v ο συντελεστής σκεδασιμότητας (βλέπε παράγραφο 2.3)

z η ανηγμένη μεταβλητή της κανονικής κατανομής ($F_1=1/T$)

Τελικά θα είναι:

$$P = \bar{x} + K(T)S_x \quad (2-29)$$

όπου $\bar{x}$ ο μέσος όρος του δείγματος

S_x η τυπική απόκλιση του δείγματος

$K(T)$ ο συντελεστής συχνότητας

2.4.5 Κατανομή Log-Pearson III μεγίστων

Εάν οι λογάριθμοι των τιμών της μεταβλητής έχουν συντελεστή ασυμμετρίας διαφορετικό του μηδενός, τότε η κατανομή Log-Pearson III θεωρείται καταλληλότερη της λογαριθμοκανονικής.

Πίνακας 2-5α: Δείκτης συχνότητας $K(T)$ Pearson III.

Φ	0.0010	0.0050	0.0100	0.0200	0.0250	0.0400	0.0500	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000
$g\backslash T$	1.0010	1.0050	1.0101	1.0204	1.0256	1.0417	1.0526	1.1111	1.2500	1.4286	1.6667
-3.5	-7.7202	-5.2529	-4.2247	-3.2264	-2.9130	-2.2686	-1.9715	-1.0955	-0.3217	0.0573	0.2778
-3.4	-7.6095	-5.1989	-4.1926	-3.2137	-2.9060	-2.2723	-1.9795	-1.1134	-0.3413	0.0421	0.2690
-3.3	-7.4974	-5.1436	-4.1592	-3.2000	-2.8979	-2.2751	-1.9867	-1.1308	-0.3610	0.0265	0.2596
-3.2	-7.3838	-5.0870	-4.1245	-3.1851	-2.8888	-2.2769	-1.9931	-1.1477	-0.3808	0.0105	0.2495
-3.1	-7.2688	-5.0290	-4.0886	-3.1691	-2.8786	-2.2778	-1.9987	-1.1642	-0.4006	-0.0060	0.2387
-3.0	-7.1523	-4.9696	-4.0514	-3.1519	-2.8673	-2.2778	-2.0033	-1.1801	-0.4204	-0.0228	0.2273
-2.9	-7.0344	-4.9088	-4.0129	-3.1336	-2.8549	-2.2768	-2.0071	-1.1954	-0.4401	-0.0400	0.2152
-2.8	-6.9150	-4.8467	-3.9730	-3.1140	-2.8413	-2.2747	-2.0099	-1.2101	-0.4598	-0.0575	0.2026
-2.7	-6.7942	-4.7831	-3.9318	-3.0932	-2.8266	-2.2716	-2.0118	-1.2242	-0.4793	-0.0752	0.1894
-2.6	-6.6719	-4.7181	-3.8893	-3.0712	-2.8106	-2.2674	-2.0126	-1.2377	-0.4987	-0.0932	0.1756
-2.5	-6.5481	-4.6518	-3.8454	-3.0479	-2.7934	-2.2622	-2.0125	-1.2504	-0.5179	-0.1114	0.1614
-2.4	-6.4228	-4.5839	-3.8001	-3.0233	-2.7751	-2.2558	-2.0113	-1.2624	-0.5368	-0.1298	0.1466
-2.3	-6.2963	-4.5147	-3.7535	-2.9974	-2.7554	-2.2483	-2.0090	-1.2736	-0.5555	-0.1483	0.1315
-2.2	-6.1632	-4.4440	-3.7054	-2.9703	-2.7345	-2.2397	-2.0057	-1.2841	-0.5738	-0.1668	0.1159
-2.1	-6.0386	-4.3719	-3.6560	-2.9418	-2.7123	-2.2299	-2.0013	-1.2938	-0.5918	-0.1854	0.1000
-2.0	-5.9078	-4.2983	-3.6052	-2.9120	-2.6889	-2.2189	-1.9957	-1.3026	-0.6094	-0.2040	0.0837
-1.9	-5.7755	-4.2234	-3.5529	-2.8809	-2.6641	-2.2067	-1.9891	-1.3105	-0.6266	-0.2225	0.0672
-1.8	-5.6419	-4.1470	-3.4993	-2.8485	-2.6381	-2.1933	-1.9812	-1.3176	-0.6433	-0.2409	0.0504
-1.7	-5.5070	-4.0693	-3.4444	-2.8147	-2.6108	-2.1787	-1.9723	-1.3238	-0.6596	-0.2592	0.0334
-1.6	-5.3709	-3.9902	-3.3880	-2.7796	-2.5821	-2.1629	-1.9621	-1.3290	-0.6753	-0.2774	0.0163
-1.5	-5.2335	-3.9097	-3.3303	-2.7432	-2.5522	-2.1459	-1.9508	-1.3333	-0.6905	-0.2953	-0.0009
-1.4	-5.0950	-3.8280	-3.2713	-2.7056	-2.5210	-2.1277	-1.9384	-1.3366	-0.7051	-0.3131	-0.0182
-1.3	-4.9555	-3.7450	-3.2110	-2.6666	-2.4885	-2.1082	-1.9247	-1.3390	-0.7191	-0.3305	-0.0356
-1.2	-4.8149	-3.6607	-3.1494	-2.6263	-2.4548	-2.0876	-1.9099	-1.3405	-0.7326	-0.3477	-0.0530
-1.1	-4.6734	-3.5753	-3.0866	-2.5848	-2.4198	-2.0657	-1.8939	-1.3409	-0.7454	-0.3646	-0.0703
-1.0	-4.5311	-3.4887	-3.0226	-2.5421	-2.3836	-2.0427	-1.8768	-1.3404	-0.7575	-0.3811	-0.0876
-0.9	-4.3881	-3.4011	-2.9573	-2.4981	-2.3462	-2.0185	-1.8586	-1.3389	-0.7690	-0.3973	-0.1049
-0.8	-4.2444	-3.3124	-2.8910	-2.4530	-2.3076	-1.9931	-1.8392	-1.3364	-0.7799	-0.4131	-0.1220
-0.7	-4.1002	-3.2228	-2.8236	-2.4067	-2.2679	-1.9666	-1.8186	-1.3329	-0.7900	-0.4285	-0.1390
-0.6	-3.9557	-3.1323	-2.7551	-2.3593	-2.2270	-1.9390	-1.7970	-1.3285	-0.7995	-0.4435	-0.1559
-0.5	-3.8109	-3.0410	-2.6857	-2.3108	-2.1850	-1.9102	-1.7743	-1.3231	-0.8083	-0.4581	-0.1726
-0.4	-3.6661	-2.9490	-2.6154	-2.2613	-2.1420	-1.8804	-1.7505	-1.3167	-0.8164	-0.4723	-0.1892
-0.3	-3.5214	-2.8564	-2.5442	-2.2108	-2.0979	-1.8495	-1.7256	-1.3094	-0.8238	-0.4860	-0.2055
-0.2	-3.3770	-2.7632	-2.4723	-2.1593	-2.0529	-1.8176	-1.6997	-1.3010	-0.8304	-0.4993	-0.2217
-0.1	-3.2332	-2.6696	-2.3996	-2.1070	-2.0069	-1.7846	-1.6728	-1.2918	-0.8364	-0.5121	-0.2376

Στην αριθμητική της εφαρμογή, η κατανομή Log Pearson III είναι αρκετά πολύπλοκη. Γι' αυτό και καταφεύγουμε στη χρήση των πινάκων 2-5α και 2-5β. [Μιμίκου 1994]

Πίνακας 2-5β: Δείκτης συχνότητας $K(T)$ Pearson III (συνέχεια από 2-5α).

0.5000	0.6000	0.7000	0.8000	0.9000	0.9500	0.9600	0.9750	0.9800	0.9900	0.9950	0.9990
2.0000	2.5000	3.3333	5.0000	10.000	20.000	25.000	40.000	50.000	100.00	200.00	1000.0
0.4125	0.4939	0.5399	0.5624	0.5703	0.5713	0.5714	0.5714	0.5714	0.5714	0.5714	0.5714
0.4106	0.4984	0.5500	0.5765	0.5867	0.5880	0.5881	0.5882	0.5882	0.5882	0.5882	0.5882
0.4079	0.5024	0.5599	0.5910	0.6038	0.6057	0.6059	0.6060	0.6060	0.6061	0.6061	0.6061
0.4045	0.5058	0.5695	0.6057	0.6217	0.6244	0.6247	0.6249	0.6249	0.6250	0.6250	0.6250
0.4004	0.5086	0.5789	0.6206	0.6406	0.6443	0.6446	0.6450	0.6451	0.6451	0.6452	0.6452
0.3955	0.5107	0.5878	0.6357	0.6602	0.6653	0.6658	0.6664	0.6665	0.6666	0.6667	0.6667
0.3899	0.5121	0.5963	0.6509	0.6807	0.6876	0.6834	0.6892	0.6893	0.6896	0.6896	0.6896
0.3835	0.5128	0.6043	0.6660	0.7021	0.7112	0.7123	0.7135	0.7138	0.7141	0.7142	0.7143
0.3764	0.5126	0.6118	0.6811	0.7242	0.7361	0.7376	0.7394	0.7399	0.7405	0.7407	0.7407
0.3685	0.5117	0.6185	0.6960	0.7471	0.7624	0.7646	0.7671	0.7678	0.7688	0.7691	0.7692
0.3599	0.5100	0.6246	0.7107	0.7706	0.7901	0.7931	0.7967	0.7976	0.7992	0.7997	0.8000
0.3506	0.5074	0.6300	0.7249	0.7947	0.8193	0.8231	0.8282	0.8296	0.8320	0.8328	0.8333
0.3406	0.5041	0.6346	0.7388	0.8193	0.8498	0.8549	0.8617	0.8637	0.8672	0.8686	0.8694
0.3300	0.4999	0.6383	0.7521	0.8442	0.8816	0.8881	0.8973	0.9001	0.9052	0.9074	0.9085
0.3187	0.4949	0.6412	0.7648	0.8694	0.9146	0.9229	0.9349	0.9388	0.9461	0.9494	0.9519
0.3068	0.4892	0.6433	0.7769	0.8946	0.9487	0.9592	0.9747	0.9798	0.9899	0.9950	0.9990
0.2944	0.4826	0.6445	0.7882	0.9199	0.9838	0.9967	1.0164	1.0231	1.0369	1.0443	1.0507
0.2815	0.4754	0.6449	0.7987	0.9450	1.0197	1.0354	1.0600	1.0686	1.0871	1.0975	1.1074
0.2681	0.4674	0.6444	0.8084	0.9698	1.0563	1.0751	1.1054	1.1163	1.1404	1.1548	1.1697
0.2542	0.4587	0.6430	0.8172	0.9942	1.0934	1.1157	1.1523	1.1658	1.1968	1.2162	1.2380
0.2400	0.4494	0.6408	0.8252	1.0181	1.1307	1.1568	1.2006	1.2172	1.2561	1.2817	1.3127
0.2253	0.4395	0.6378	0.8322	1.0414	1.1683	1.1984	1.2500	1.2700	1.3181	1.3511	1.3941
0.2104	0.4290	0.6340	0.8384	1.0641	1.2058	1.2403	1.3004	1.3241	1.3827	1.4244	1.4822
0.1952	0.4179	0.6294	0.8437	1.0861	1.2431	1.2822	1.3515	1.3793	1.4494	1.5011	1.5769
0.1797	0.4064	0.6241	0.8481	1.1073	1.2802	1.3241	1.4031	1.4353	1.5181	1.5811	1.6782
0.1640	0.3943	0.6181	0.8516	1.1276	1.3168	1.3658	1.4551	1.4919	1.5884	1.6639	1.7857
0.1481	0.3819	0.6115	0.8543	1.1471	1.3530	1.4072	1.5071	1.5489	1.6600	1.7492	1.8989
0.1320	0.3689	0.6041	0.8561	1.1657	1.3885	1.4481	1.5591	1.6060	1.7327	1.8366	2.0174
0.1158	0.3556	0.5961	0.8570	1.1835	1.4234	1.4885	1.6110	1.6632	1.8062	1.9258	2.1405
0.0994	0.3420	0.5876	0.8572	1.2003	1.4576	1.5283	1.6625	1.7203	1.8803	2.0164	2.2678
0.0830	0.3280	0.5784	0.8565	1.2162	1.4910	1.5674	1.7137	1.7772	1.9547	2.1082	2.3987
0.0665	0.3136	0.5687	0.8551	1.2311	1.5236	1.6057	1.7643	1.8336	2.0293	2.2009	2.5326
0.0499	0.2990	0.5584	0.8528	1.2452	1.5553	1.6433	1.8143	1.8896	2.1039	2.2942	2.6691
0.0332	0.2840	0.5476	0.8499	1.2582	1.5861	1.6800	1.8636	1.9450	2.1784	2.3879	2.8079

Με βάση την περίοδο επαναφοράς T , υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης F_1 (στον πίνακα αναφέρεται ως Φ). Για παράδειγμα, αν έχουμε $T=100$ χρόνια, θα είναι $\Phi=0.01$. Μετά, πηγαίνουμε στη στήλη g (συντελεστής ασυμμετρίας) και κάνουμε γραμμική παρεμβολή (συνήθως απαιτείται) για να βρούμε την τιμή του συντελεστή συχνότητας $K(T)$. Τελικά θα είναι:

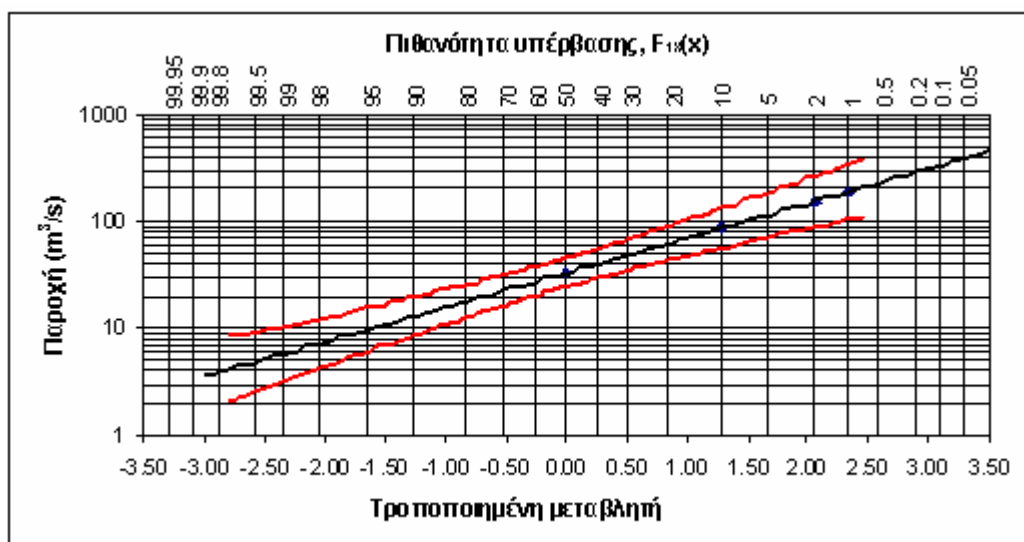
$$P = \bar{x} + K(T)S_x \quad (2-30)$$

Χρειάζεται προσοχή στο γεγονός ότι ο μέσος όρος $\bar{x}$ και η τυπική απόκλιση S_x αναφέρονται στους λογαρίθμους των τιμών του δείγματος.

2.5 Όρια εμπιστοσύνης

Η μεγάλη αξία της στατιστικής στην περιγραφή μεγεθών είναι η δυνατότητα που μας παρέχεται για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας με ένα βαθμό βεβαιότητας. Ενώ η ντετερμινιστική θεώρηση (deterministic) επιβάλλει η τιμή π.χ. της παροχής να είναι $100 \text{ m}^3/\text{s}$, με τη χρήση στατιστικής, μπορεί να ειπωθεί, ότι η τιμή δεν θα είναι 100, αλλά $100 \pm 30 \text{ m}^3/\text{s}$, στο 95% των περιπτώσεων. Ο αριθμός 30 αποτελεί το όριο εμπιστοσύνης της τιμής 100 και το 95% τον βαθμό εμπιστοσύνης.

Για παράδειγμα στο Σχήμα 2-4 φαίνονται τα όρια εμπιστοσύνης της κατανομής Gumbel μεγίστων. Η διαδικασία υπολογισμού των ορίων εμπιστοσύνης παρουσιάζεται διεξοδικά στη βιβλιογραφία (Μιμίκου, 1994). Ένα απλό παράδειγμα υπολογισμού ορίων εμπιστοσύνης σε κανονική κατανομή δίδεται στη συνέχεια.



Σχήμα 2-4: Διαστήματα εμπιστοσύνης κατανομής Gumbel μεγίστων.

Παράδειγμα 2-3: Στατιστική ανάλυση συνήθων υδρολογικών τιμών

Σε δείγμα 30 ετησίων βροχοπτώσεων προσαρμόζεται η κανονική κατανομή. Το δείγμα έχει συντελεστή μεταβλητότητας 0.4. Εάν η ελάχιστη βροχόπτωση 20ετίας είναι 30 mm, ζητείται η μέγιστη βροχόπτωση 50ετίας και τα όρια εμπιστοσύνης της εκτίμησης αυτής για βαθμό εμπιστοσύνης 90%.

ΛΥΣΗ

Η πιθανότητα υπέρβασης F_1 θα ισούται με το αντίστροφο της περιόδου επαναφοράς:

$$F_1 = \frac{1}{T} = \frac{1}{20} = 0.05$$

Για τη συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς, η ανηγμένη μεταβλητή του Gauss υπολογίζεται με τη βοήθεια του Πίνακα 2-4 ίση με $z=-1.64$. Από τη Σχέση 2-14 θα είναι:

$$C_v = \frac{S_x}{\bar{x}} \Rightarrow S_x = 0.4\bar{x}$$

και με βάση την εξίσωση της κανονικής κατανομής και την παραπάνω σχέση λαμβάνεται:

$$\hat{x} = \bar{x} + S_x z \Rightarrow \hat{x} = \bar{x} + 0.4\bar{x} \cdot z$$

Είναι $z=-1.64$, η εκτίμηση του x για την 20ετία είναι 30 mm οπότε προσδιορίζεται ο μέσος όρος και με βάση την τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας και η τυπική απόκλιση:

$$\bar{x} = 88mm \text{ και } S_x = 35mm$$

Για τον υπολογισμό της μέγιστης βροχόπτωσης 50ετίας, υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών, η νέα τιμή της ανηγμένης μεταβλητής Gauss και εφαρμόζεται η σχέση που δίνει την εκτίμηση της κανονικής κατανομής:

$$F_1 = \frac{1}{50} = 0.02 \Rightarrow z = 2.05 \Rightarrow \hat{x} = 88 + 2.05 \cdot 35 = 159.8mm$$

Οι εξισώσεις μέσω των οποίων υπολογίζονται τα όρια εμπιστοσύνης, είναι διαφορετικές για κάθε κατανομή. Για την κανονική κατανομή είναι:

$$X = \hat{X} \pm z_{(1+\gamma)/2} \frac{S_x}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{z^2}{2}}$$

όπου z η ανηγμένη μεταβλητή της κανονικής κατανομής για $F=1-1/T$.

$z_{(1+\gamma)/2}$ η τιμή της μεταβλητής Gauss για $F=(1+\gamma)/2$.

γ ο βαθμός εμπιστοσύνης (πχ 0.90 για 90% εμπιστοσύνη)

n το πλήθος του δείγματος

S_x η τυπική απόκλιση του δείγματος

$\hat{X}$ η εκτιμημένη τιμή της μεταβλητής X.

Στην προκειμένη περίπτωση είναι n=30, S_x=35, γ=90% άρα (1+γ)/2=0.95 και η εκτίμηση της βροχόπτωσης έχει προκύψει ίση με 159.8 mm. Επομένως η εξίσωση των ορίων εμπιστοσύνης θα δώσει:

$$X_{1,2} = 159.8 \pm 18.6 = \begin{cases} 178.3 \\ 141.2 \end{cases}$$

Παράδειγμα 2-4: Στατιστική ανάλυση πλημμυρών

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι ημερήσιες μέγιστες ετήσιες απορροές, καταταγμένες σε φθίνουσα τάξη. Ζητείται η προσαρμογή και η χάραξη των κατανομών Gumbel, Log-Normal και Log-Pearson III. Η περίοδος επαναφοράς της πλημμύρας που θα προκαλέσει καταστροφή των παρακείμενων καλλιεργειών είναι 100 έτη. Ποια θα είναι η τιμή της παροχής της πλημμύρας και τα όρια ασφαλείας της εκτίμησης αυτής στο επίπεδο 95% για τις κατανομές Gumbel και Log-Normal;

m	x(T) (m³/s)	m	x(T) (m³/s)
1	330	11	242
2	310	12	240
3	292	13	237
4	280	14	235
5	272	15	230
6	266	16	222
7	260	17	218
8	255	18	212
9	250	19	205
10	248	20	195

ΛΥΣΗ

Έτος (m)	x(T) (m ³ /s)	T=(N+1)/m	ln x(T)
1	330	21.00	5.799
2	310	10.50	5.737
3	292	7.00	5.677
4	280	5.25	5.635
5	272	4.20	5.606
6	266	3.50	5.583
7	260	3.00	5.561
8	255	2.63	5.541
9	250	2.33	5.521
10	248	2.10	5.513
11	242	1.91	5.489
12	240	1.75	5.481
13	237	1.62	5.468
14	235	1.50	5.460
15	230	1.40	5.438
16	222	1.31	5.403
17	218	1.24	5.384
18	212	1.17	5.357
19	205	1.11	5.323
20	195	1.05	5.273
Μέσος Όρος	249.95		5.512421
Τυπική Απόκλιση	34.636		0.136
Συντ. Ασυμμετρίας	0.656143		0.328462

ΚΑΤΑΝΟΜΗ GUMBEL

Η προσαρμογή του δείγματος στην κατανομή γίνεται άμεσα με τη βοήθεια της σχέσης:

$$\hat{x}(T) = \bar{x} - S_x [0.4500 - 0.7797 \ln[\ln(T) - \ln(T-1)]] \Rightarrow$$

$$\hat{x}(T) = 249.95 - 34.636 [0.4500 - 0.7797 \ln[\ln(T) - \ln(T-1)]]$$

Συνεπώς για T=100 έτη:

$$\hat{x}(100) = 249.95 - 34.636[0.4500 - 0.7797 \ln[\ln(100) - \ln(100 - 1)]] \Rightarrow$$

$$\hat{x}(100) = 359 \text{ m}^3 / \text{s}$$

ΚΑΤΑΝΟΜΗ LOG-NORMAL

Υπολογίζεται ο συντελεστής σκεδασιμότητας C_u που είναι ίσος με:

$$C_u = \frac{S_x}{\bar{x}} = \frac{34.636}{249.95} = 0.1386$$

ενώ για $T=100$ έτη υπολογίζεται η ανηγμένη μεταβλητή της κανονικής κατανομής:

$$z_{T=100} = 2.3263$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο του συντελεστή συχνότητας:

$$K(T) = C_u^{-1} \left(\left(\frac{1}{(C_u^2 + 1)^{1/2}} \right) \cdot \exp \left[z_T \left\{ \ln(C_u^2 + 1) \right\}^{1/2} \right] - 1 \right)$$

με αντικατάσταση των τιμών προκύπτει:

$$K(100) = 2.6357$$

$$\hat{x}(100) = \mu + K(100) \cdot \sigma = 249.95 + 2.6357 \cdot 34.636 \Rightarrow$$

και

$$\hat{x}(100) = 341.242 \text{ m}^3 / \text{s}$$

ΚΑΤΑΝΟΜΗ LOG-PEARSON III

Οι λογάριθμοι των τιμών ακολουθούν κατανομή Pearson III. Υπολογίζονται οι στατιστικοί παράμετροι της συνάρτησης $y=\ln(x)$, που είναι:

$\bar{y} =$	5.512
$S_y =$	0.136
$g =$	0.328

Ο συντελεστής ασυμμετρίας είναι σημαντικά διάφορος του 0 και συνεπώς μπορεί να εφαρμοστεί η λογαριθμική Pearson.

Από τους πίνακες της κατανομής Pearson III (Μιμίκου, 1994, σελ. 331), υπολογίζεται ο συντελεστής συχνότητας για $T=100$ και $g=0.328$, $K(100)=2.57$. (Για θετικές τιμές του g υπολογίζεται πρώτα ο συντελεστής $K(T)$ για την αντίστοιχη αρνητική τιμή του g και για πιθανότητα υπέρβασης 1-Φ. Κατόπιν λαμβάνεται η αντίθετη τιμή του συντελεστή που προέκυψε).

$$\hat{y}(100) = \bar{y} + K(100) \cdot S_y = 5.512 + 2.57 \cdot 0.136 = 5.862$$

$$\text{και } \hat{x}(100) = e^{\hat{y}(100)} = e^{5.862} = 351.4 \text{ m}^3 / \text{s}$$

ΟΡΙΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ

Τα όρια εμπιστοσύνης για ένα συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης 1-α, υπολογίζονται ως από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} x(T)_{\max} &= x(T) + z_{1-\alpha/2} S_T \\ x(T)_{\min} &= x(T) - z_{1-\alpha/2} S_T \end{aligned}$$

όπου $z_{1-\alpha/2}$ είναι η μεταβλητή της τυποποιημένης κανονικής κατανομής για αθροιστική πιθανότητα μεταξύ των ορίων 1-α και S_T η τυπική απόκλιση του x_T που είναι ίση με:

$$S_T = \delta \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}}$$

όπου $\hat{\sigma}$ η τυπική απόκλιση του δείγματος των N παρατηρήσεων

$$\delta = \sqrt{1 + \frac{K(T)^2}{2}} \quad (\text{για την κανονική κατανομή})$$

$$\delta = \sqrt{1 + 1.1396 K(T) + 1.1 K(T)^2} \quad (\text{για την κατανομή Gumbel})$$

Ο συντελεστής συχνότητας $K(T)$, στην περίπτωση της κανονικής κατανομής είναι ίσος με την ανηγμένη μεταβλητή $z_{1-\alpha/2}$. Για επίπεδο εμπιστοσύνης $1-\alpha = 95\%$, υπολογίζεται η ανηγμένη μεταβλητή:

$$z_{1-\alpha/2} = z_{0.975} = 1.960$$

Κατανομή Gumbel

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{1 + 1.1396 K(T) + 1.1 K(T)^2} = \sqrt{1 + 1.1396 \cdot 3.8357 + 1.1 \cdot 3.8357^2} \Rightarrow \\ \delta &= 4.6427 \end{aligned}$$

η τυπική απόκλιση του $x(T)$ είναι:

$$S_T = \delta \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}} = 4.6427 \frac{34.636}{\sqrt{20}} = 35.957$$

και τα όρια εμπιστοσύνης είναι:

$$X(T)_{\max} = 383 + 1.960 \cdot 35.397 = 452.38$$

$$X(T)_{\min} = 383 - 1.960 \cdot 35.397 = 313.62$$

Κατανομή Log-Normal

Τα όρια εμπιστοσύνης της Log-Normal υπολογίζονται με εφαρμογή του τύπου των ορίων εμπιστοσύνης της κανονικής κατανομής στη χρονοσειρά των λογαρίθμων.

$$\delta = \sqrt{1 + \frac{K(T)^2}{2}} = \sqrt{1 + \frac{1.960^2}{2}} = 1.709$$

η τυπική απόκλιση του $y(T)$ είναι:

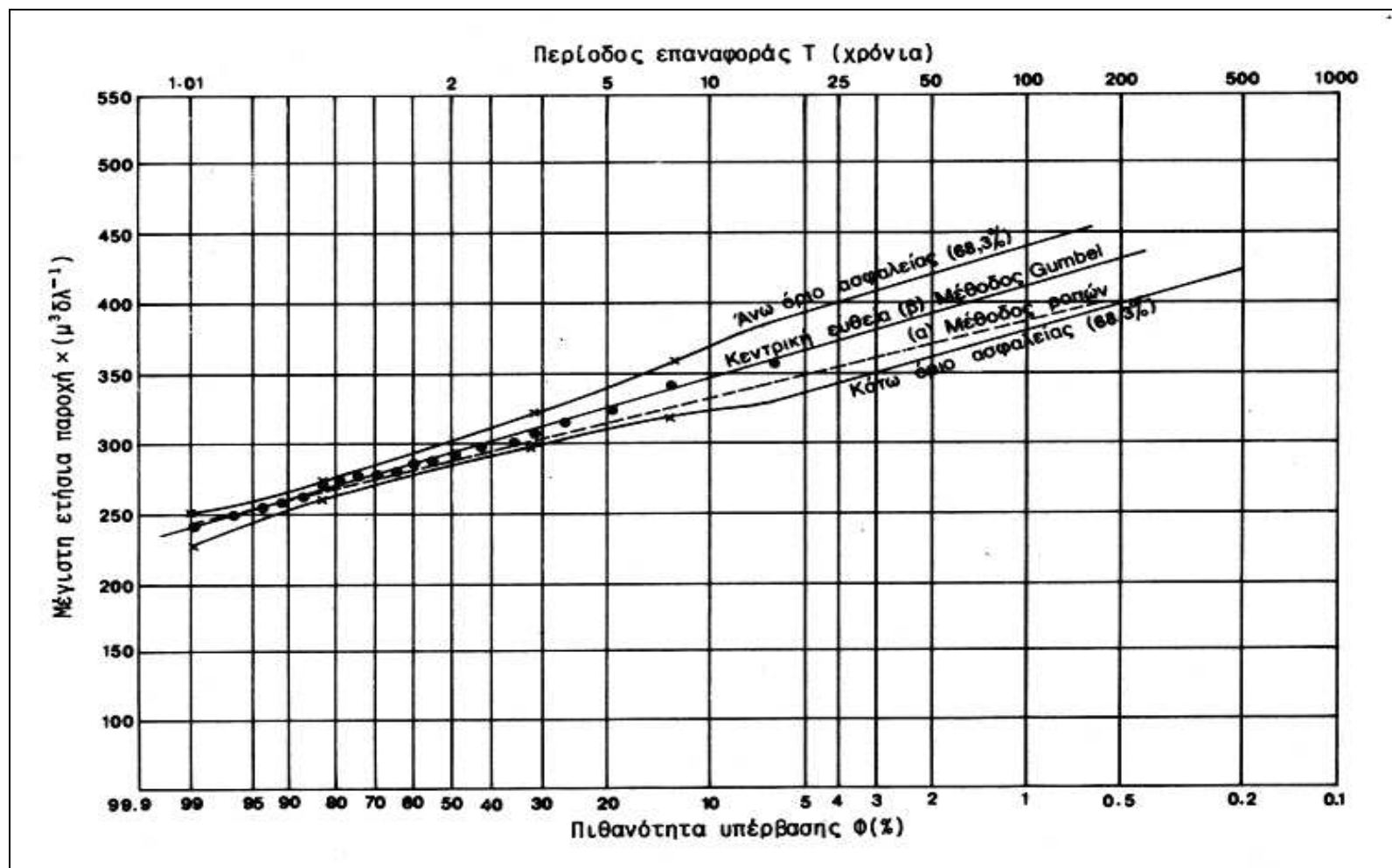
$$S_T = \delta \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{N}} = 1.709 \frac{0.136}{\sqrt{20}} = 0.05197$$

και τα όρια εμπιστοσύνης είναι:

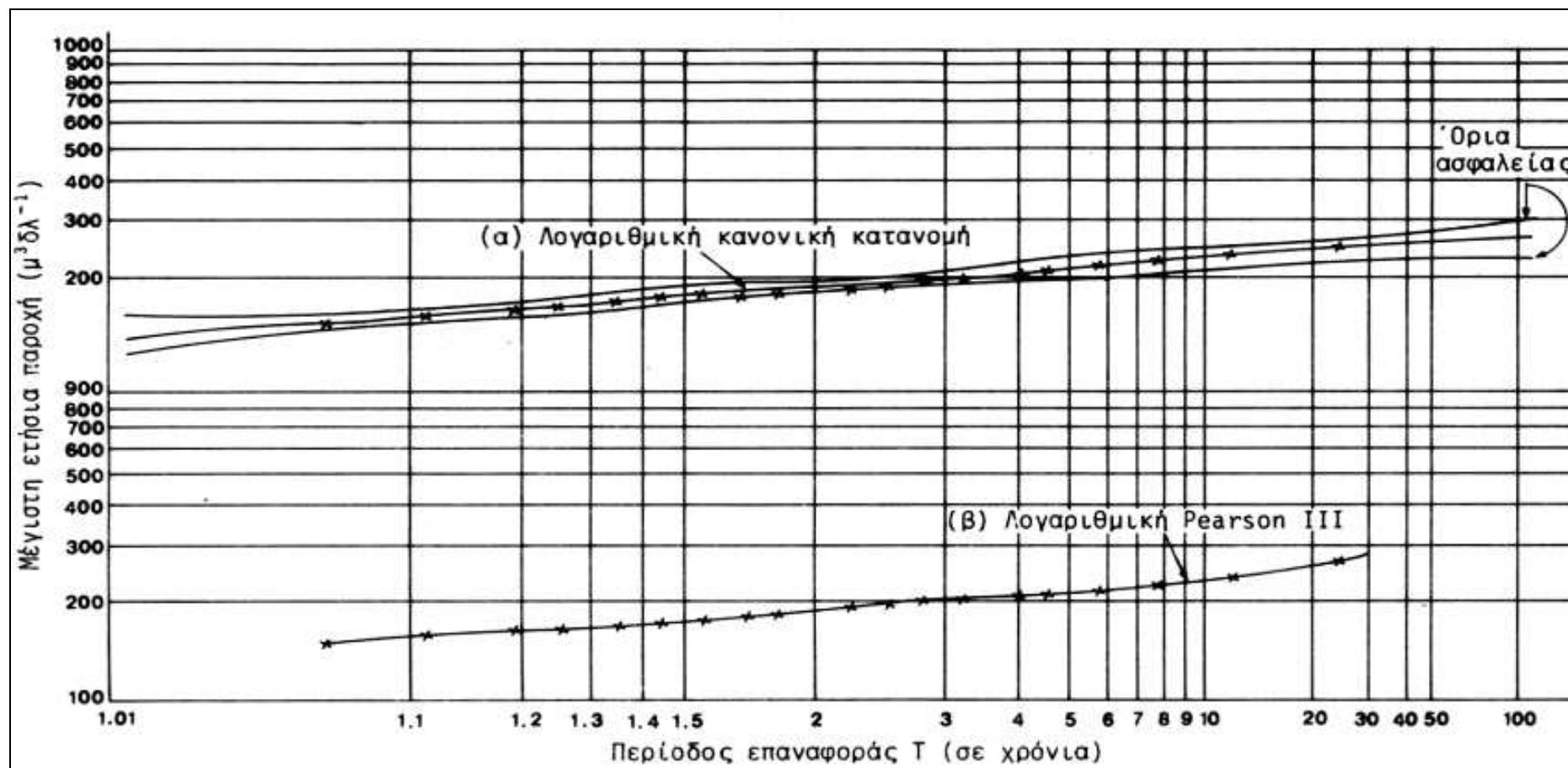
$$X(T)_{\max} = \exp(\ln(341) + 1.960 \cdot 0.05197) = 377.6 m^3 / s$$

$$X(T)_{\min} = \exp(\ln(341) - 1.960 \cdot 0.05197) = 308.0 m^3 / s$$

Στα ακόλουθα Σχήματα (2-5) και (2-6) έχουν χαραχθεί οι κατανομές Gumbel, Log-Normal και Log-Pearson III μαζί με τα όρια εμπιστοσύνης τους.



Σχήμα 2-5: Χάραξη κατανομής Gumbel.



Σχήμα 2-6: Χάραξη κατανομών Log-Normal και Log-Pearson III.

Παράδειγμα 2-5: Στατιστική ανάλυση ξηρασιών

Στα κατάντη ενός φράγματος, έχει απαιτηθεί να υπάρχει μόνιμα μια ελάχιστη βασική ροή για περιβαλλοντικούς λόγους (διατήρηση πανίδας και χλωρίδας). Η τιμή της ελάχιστης βασικής ροής κρίθηκε σκόπιμο να είναι τουλάχιστον ίση με την ελάχιστη τιμή 10 ετίας που προκύπτει από την προσαρμογή στο δείγμα ελαχίστων παροχών (σε m³/s) που παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα της κατανομής Gumbel ελαχίστων. Ποια είναι η ελάχιστη τιμή της παροχής που προκύπτει για T=10 έτη και κατά συνέπεια η τιμή της βασικής ροής που πρέπει πάντα να υφίσταται στα κατάντη του φράγματος;

A/A	Έτος	Παροχή	A/A	Έτος	Παροχή
1	1980	3.19	13	1992	2.71
2	1981	1.98	14	1993	0.44
3	1982	4.2	15	1994	2.32
4	1983	3.24	16	1995	4.03
5	1984	5.12	17	1996	1.51
6	1985	0.78	18	1997	1.4
7	1986	3.5	19	1998	5.15
8	1987	2.55	20	1999	8.87
9	1988	4.01	21	2000	2.47
10	1989	3.56	22	2001	3.33
11	1990	3.49	23	2002	0.98
12	1991	2.97	24	2003	3.54

ΛΥΣΗ

Ο μέσος όρος του δείγματος προκύπτει ίσος με 3.14 m³/s, ενώ η τυπική απόκλιση είναι 1.75 m³/s. Με τη βοήθεια αυτών των τιμών είναι εύκολο να προσδιορισθούν οι παράμετροι κλίμακας a και θέσης x_0 της κατανομής, με εφαρμογή των σχέσεων (2-20) και (2-22):

$$a = \frac{1}{0.78S_x} = \frac{1}{0.78 \cdot 1.75} = 0.733$$

$$x_0 = \bar{x} + \frac{0.577}{a} = 3.14 + \frac{0.577}{0.733} = 3.93$$

Επομένως η εξίσωση της κατανομής Gumbel ελαχίστων θα πάρει τη μορφή:

$$\hat{x} = x_0 + \frac{1}{a} \ln[\ln(T) - \ln(T - 1)] \Rightarrow$$
$$\hat{x} = 3.93 + \frac{1}{0.733} \ln[\ln(T) - \ln(T - 1)]$$

Με βάση την τελευταία σχέση, εάν θέσουμε $T=10$ λαμβάνεται:

$$Q_{T=10} = 0.86 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.6 Ασκήσεις προς επίλυση

Άσκηση 2-1: Στατιστική ανάλυση

Σε λίμνη ταμιευτήρα χωρίς υπόγειες διαφυγές, μετρήθηκε εξαμηνιαία ποσότητα κατά το μήνα Αύγουστο ίση με 31 mm. Η βροχόπτωση στη λίμνη του ταμιευτήρα κατά τον ίδιο μήνα ήταν ίση με τη μέγιστη βροχόπτωση 15ετίας στην περιοχή. Η βροχόπτωση της περιοχής ακολουθεί κανονική κατανομή με μέσο όρο 22 mm και τυπική απόκλιση 7 mm. Εάν το σύνολο των απολήψεων από τη λίμνη κατά το συγκεκριμένο μήνα ήταν ίσο με 10.5 mm και το σύνολο των εισροών 8.8 mm (εκτός της βροχόπτωσης), να βρεθεί η μεταβολή της στάθμης της λίμνης του ταμιευτήρα.

Άσκηση 2-2: Στατιστική ανάλυση πλημμυρών

Οι μέγιστες ετήσιες απορροές δείγματος 60 χρόνων έχουν μέση τιμή $1900 \text{ m}^3/\text{sec}$ και τυπική απόκλιση $320 \text{ m}^3/\text{sec}$. Από αντιπλημμυρικές μελέτες, έχει προκύψει ότι χρειάζεται προστασία έναντι πλημμύρας που θα έχει τιμή $3000 \text{ m}^3/\text{sec}$. Επειδή όμως δεν υπάρχουν τα απαραίτητα οικονομικά κονδύλια για κατασκευαστικά μέτρα αντιμετώπισης μιας τέτοιας πλημμύρας, η έναρξη του έργου θα καθυστερήσει για ένα χρόνο. Εάν οι απορροές ακολουθούν κατανομή Gumbel να υπολογιστεί η πιθανότητα να συμβεί πλημμυρική απορροή μεγαλύτερη ή ίση από $3000 \text{ m}^3/\text{sec}$ το επόμενο έτος. Ποιο είναι το μέγεθος της πλημμυρικής απορροής με περίοδο επαναφοράς 5 χρόνια;

Άσκηση 2-3: Στατιστική ανάλυση ξηρασιών

Για τα δεδομένα του παραδείγματος 2-5, να βρεθεί η ελάχιστη παροχή που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 20 ετών. Πώς θα άλλαζε το αποτέλεσμα, εάν αντί της Gumbel ελαχίστων χρησιμοποιούταν (λανθασμένα) η Gumbel μεγίστων και η περίοδος επαναφοράς παρέμενε σταθερή και ίση με 20 έτη;

2.7 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα

Τα κλιματικά στοιχεία της Ελλάδας που σχετίζονται με τις πλημμύρες αλλά και τις ξηρασίες παρουσιάζουν σημαντική γεωγραφική μεταβλητότητα. Η ανεπτυγμένη ακτογραμμή και το έντονο ανάγλυφο (ορογραφία) είναι στο μεγαλύτερο βαθμό υπεύθυνα για αυτή τη μεταβλητότητα.

Η οροσειρά της Πίνδου που διασχίζει τη χώρα από βορειοδυτικά προς νότια, παίζει σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες βροχόπτωσης και απορροής στην Ελλάδα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση υπερβαίνει τα 1800 mm στις ορεινές περιοχές της δυτικής Ελλάδας ενώ στα ανατολικά διαμερίσματα της χώρας η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί ακόμη και στα 400 mm. Η τελευταία διαπίστωση εξηγεί τις πιο συχνές περιόδους ξηρασίας στο ανατολικό μέρος της χώρας καθώς και σε πολλά νησιά του Αιγαίου, όπου τα προβλήματα ελλείψεως νερού είναι σχεδόν μόνιμα.

Αυτό όμως, δεν σημαίνει ότι εξαιρετικά γεγονότα πλημμύρων είναι ιδιαίτερα σπάνια στο σχετικά ξηρό ανατολικό μέρος της Ελλάδας. Το μέγιστο 24-ωρο ύψος βροχής για βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς 50 χρόνων (που θα μπορούσε να θεωρηθεί μία πολύ πρόχειρη εκτίμηση της σοβαρότητας μιας πλημμύρας) μπορεί να φτάσει τα 175 mm στη δυτική Ελλάδα, μειώνεται στα 100 mm ανατολικά της οροσειράς της Πίνδου και αυξάνεται ξανά στα 175 mm για τα νησιά του ανατολικού Αιγαίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του μέγιστου ύψους βροχής 24ωρης διάρκειας που λαμβάνει χώρα από τα δυτικά προς τα ανατολικά της Ελλάδας δεν είναι τόσο έντονη όσο η αντίστοιχη μείωση που παρατηρείται στη μέση ετήσια βροχόπτωση και ελαχιστοποιείται αν θεωρήσουμε μικρότερες διάρκειες βροχής, όπως ωριαίες. Αποτέλεσμα αυτού του κλιματικού καθεστώτος, σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία και την επιφανειακή βλάστηση, είναι ότι παρατηρούνται περισσότερες καταστροφικές πλημμύρες στην ανατολική Ελλάδα από ότι στην υγρή δυτική Ελλάδα.

Οι πλημμύρες στην Ελλάδα οφείλονται συνήθως στις έντονες βροχοπτώσεις. Οι περισσότερες έντονες βροχοπτώσεις παράγονται από το πέρασμα χαμηλών βαρομετρικών,

που συνήθως συνοδεύονται από ψυχρά μέτωπα (και πιο σπάνια από θερμά) και καταφθάνουν από τα δυτικά, νοτιοδυτικά ή βορειοδυτικά.

Η μείωση των δασικών εκτάσεων και η αστικοποίηση παίζουν επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στη γένεση πλημμύρων. Οι δύο αυτοί παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την αυξανόμενη σοβαρότητα και καταστροφική δύναμη των πλημμυρικών γεγονότων. Η αποδάσωση και η διάβρωση του εδάφους, που αυτή συνεπάγεται, είναι ένα σοβαρότατο πρόβλημα στην Ελλάδα. Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ στο ξεκίνημα του 19^{ου} αιώνα η δασική κάλυψη της χώρας αντιπροσώπευε περισσότερο από το 40% της συνολικής της έκτασης, σήμερα αντιπροσωπεύει μόλις το 18%. Κύριος λόγος της αποδάσωσης είναι οι πυρκαγιές. Ειδικά για το θέμα των πυρκαγιών και των συνεπειών τους αξίζει το κόπο να δοθούν περισσότερα στοιχεία, γιατί είναι ένα θέμα πολύ σοβαρό και εξελίσσεται σε καθοριστικό παράγοντα για την πλημμυρική τύχη πολλών αστικών κέντρων της χώρας και ιδιαίτερο της Αθήνας. Εκτός λοιπόν από τις άμεσες συνέπειες, όπως η έλλειψη πρασίνου και οξυγόνου, η καταστροφή καλλιεργειών κλπ, υπάρχουν και οι δευτερογενείς συνέπειες που είναι:

- Αύξηση θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (στο δάσος η θερμοκρασία είναι 8-10 °C μικρότερη από την εξωτερική) και επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου με άμεσες συνέπειες στους υδατικούς πόρους.
- Μείωση ανασταλτικής δράσης κατά της ρύπανσης με επιδείνωση της φωτοχημικής σύνθεσης της ατμόσφαιρας των πόλεων (μείωση απορρόφησης SO₂ κλπ).
- Αύξηση συντελεστή επιφανειακής απορροής κατά τη διάρκεια των πλημμύρων (η αιχμή αυξάνεται κατά 30-40%) με σημαντική αύξηση του πλημμυρικού όγκου.
- Διάβρωση εδάφους - επιχωματώσεις των οποίων αποτέλεσμα είναι το μπάζωμα των ρεμάτων (επιπλέον του ανθρωπογενούς μπαζώματος) και, συνεπώς, η περαιτέρω μείωση της ανασχετικής ικανότητας τους.
- Μείωση τροφοδοσίας υπογείων υδροφορέων μείωση παροχευτικότητας γεωτρήσεων.
- Αύξηση εξάτμισης και ξηρασίας (κατά τις περιόδους ανομβρίας).

2.7.1 Ανθρωπογενείς παράγοντες επιδείνωσης της πλημμυρικής επικινδυνότητας

Είναι γνωστό ότι το φυσικό αίτιο μιας πλημμύρας είναι μια ισχυρή καταιγίδα, ιδιαίτερα σε περιόδους υγρές, όπου το έδαφος έχει σχετικά μικρή διηθησιμότητα. Δυστυχώς όμως η συχνότητα των πλημμυρών που δημιουργούν καταστροφές, ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα, δεν συμβαδίζει πάντοτε με αυτή των καταιγίδων που τις προκαλούν. Είναι γνωστό ότι ακόμα και

σχετικά μικρές βροχοπτώσεις μπορούν να επιφέρουν την καταστροφή. Αυτό γίνεται γιατί υπάρχουν ανθρωπογενή και τεχνητά αίτια πλημμυρογένεσης.

Αναφερόμενοι κυρίως στις αστικές περιοχές, που ενδιαφέρουν και περισσότερο από πλευράς προστασίας των κατοίκων, οι κύριοι παράγοντες που επιδεινώνουν την επικινδυνότητα και καταστροφικότητα των πλημμυρών είναι:

- ❑ Η ολοένα αυξανόμενη αστικοποίηση και η μείωση του πράσινου (των δασών κλπ) από πυρκαγιές και άλλες αιτίες, με άμεσο αποτέλεσμα τη σημαντική συντόμευση του χρόνου συρροής των νερών και την μεγάλη αύξηση του συντελεστή απορροής (π.χ. από 25-35% που μπορεί να είναι σε μια εξωαστική περιοχή μπορεί να αυξηθεί σε 90-95% σε μια αστική) δηλαδή το 90-95% της βροχής μετατρέπεται σε απορροή! Αυτό σημαίνει ότι μια συγκεκριμένη βροχόπτωση αποδίδει πολύ μεγαλύτερη ποσότητα απορροής τώρα απ' ότι στο παρελθόν.
- ❑ Η εξαφάνιση πρακτικά του υδρογραφικού δικτύου μέσα στις πόλεις όπου τα ρέματα έχουν καλυφθεί από δρόμους, πλατείες και σπίτια.
- ❑ Η ανεπάρκεια των ρεμάτων που έχουν απομείνει να αναλάβουν την αυξημένη (όπως εξηγήθηκε πριν) απορροή και μάλιστα με μειωμένη συνήθως διατομή, αφού τα περισσότερα είναι μπαζωμένα ή έχουν δομηθεί παράνομα. Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι είναι ευχής έργο που υπερχειλίζουν οι δρόμοι, τα υπόγεια κλπ και τα νερά όλα δεν καταλήγουν στους φυσικούς τους αποδέκτες. Γιατί αν συνέβαινε αυτό τότε θα είχαμε μεγαλύτερες καταστροφές και θα θρηνούσαμε περισσότερα θύματα. Οι πλημμυρισμένοι δρόμοι κλπ που βλέπουμε κατά τη διάρκεια των πλημμυρών δρουν ανακουφιστικά στην περίπτωση αυτή.
- ❑ Η ανεπάρκεια των δικτύων ομβρίων που είναι παλαιά και μελετημένα για άλλες συνθήκες. Αναφερόμαστε στο πρωτεύον δίκτυο, γιατί το δευτερεύον και ιδιαίτερα το τριτεύον δίκτυο είναι ανύπαρκτα σε πολλές περιοχές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα με την παραμικρή βροχή να πλημμυρίζουν οι δρόμοι και να δίνουν οι πόλεις μια εικόνα πλήρους αποδιοργάνωσης.
- ❑ Η ανεπαρκής συντήρηση των υπαρκτών δικτύων και ο ελλιπής καθαρισμός των φρεάτων. (Τα σκουπίδια, τα μπάζα κλπ που αφήνονται στους δρόμους φράζουν τα φρεάτια με την πρώτη βροχή και επιδεινώνουν περαιτέρω την κατάσταση).

- ❑ Οι μελέτες των αντιπλημμυρικών έργων που θα πρέπει να εκσυγχρονισθούν με βάση τις εξελίξεις της επιστήμης και όχι να βασίζονται σε πεπαλαιωμένες εμπειρικές μεθόδους (rational method κλπ). Η επικινδυνότητα της πλημμύρας σχεδιασμού των έργων (π.χ. περίοδος επαναφοράς T της πλημμύρας) θα πρέπει να επιλέγεται με προσοχή για κάθε ένα έργο ανάλογα με τον χαρακτήρα του και την σημαντικότητά του από πλευράς παροχής προστασίας, αλλά και την ανάλυση κόστους-οφέλους από το έργο. Δεν πρέπει να δίνονται γενικές συνταγές, αλλά κάθε έργο να σχεδιάζεται με βάση τις ιδιαιτερότητές του.
- ❑ Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να τονισθεί εδώ είναι η έλλειψη μετρήσεων (συστηματικών παρατηρήσεων) απορροής σε πολλές πλημμυροπαθείς περιοχές, ιδιαίτερα στις αστικές, π.χ. δεν υπάρχουν συστηματικές μετρήσεις απορροής που να καλύπτουν έναν χρονικό ορίζοντα ικανοποιητικό για σωστές αντιπλημμυρικές μελέτες στον Κηφισό. Το αποτέλεσμα είναι ότι όσο καλά μοντέλα να χρησιμοποιήσει κανείς, αν δεν μπορεί να τα ρυθμίσει με βάση πραγματικές μετρήσεις, μόνον υποθέσεις μπορεί να κάνει και επομένως εκτιμήσεις πλημμυρών και έργων μειωμένης αξιοπιστίας.

2.8 Αντιπλημμυρική προστασία

2.8.1 Κατασκευαστικά μέτρα

Η αντιπλημμυρική προστασία πρέπει να γίνεται μέσω στα πλαίσια ενός γενικότερου στρατηγικού σχεδιασμού για μία ευρύτερη περιοχή και όχι αποσπασματικά και τοπικά κάθε φορά που υπάρχει πρόβλημα (γιατί είναι σαφές ότι κάθε έργο επηρεάζει τα γύρω του π.χ. ένα έργο στο ανάντη μιας λεκάνης μπορεί να λύνει το τοπικό πρόβλημα, όμως μπορεί να δημιουργεί σοβαρότερο πρόβλημα στα κατόντη).

Μέσα στα πλαίσια αυτού του σχεδιασμού, θα πρέπει να συνταχθεί μια συνολική μελέτη εκτίμησης των πλημμυρών και της συχνότητας εμφάνισης τους σε όλα τα κρίσιμα σημεία της περιοχής. Με βάση αυτή τη μελέτη θα πρέπει να χαραχθούν στο χάρτη οι ζώνες ίσης πλημμυρικής επικινδυνότητας (κινδύνου). Αυτό είναι άλλωστε και το ζητούμενο και από πολλές ασφαλιστικές εταιρείες για να εκτιμήσουν τους δικούς τους δείκτες κόστους ασφάλισης. Με βάση αυτά πλέον μπορεί κανείς να σχεδιάσει συνολικά για την ευρύτερη περιοχή τα απαιτούμενα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας τα οποία θα συνεργάζονται και δε θα αχρηστεύει το ένα το άλλο, ανάλογα με το βαθμό κινδύνου στην κάθε περιοχή, δίνοντας

σωστά τις προτεραιότητες τους και επιλέγοντας σωστά τις οηοδεκτές αστοχίες για κάθε έργο χωριστά.

Για την υλοποίηση της μελέτης αυτής, που αφορά στην εκτίμηση πλημμύρων και ζωνών πλημμυρικής επικινδυνότητας, απαιτούνται τα εξής βασικά στοιχεία:

- ❑ Καταγραφή όλων των ρεμάτων και των περιοχών πλημμυρικής κατάκλισης που υπάρχουν στην περιοχή με χρήση μεθόδων GIS.
- ❑ Καταγραφή του υπάρχοντος δικτύου ομβρίων υδάτων με χρήση μεθόδων GIS.
- ❑ Μελέτη ομβρίων καμπυλών για ισχυρές καταιγίδες (κατά προτίμηση μικρής διάρκειας) και για διάφορες περιόδους επαναφοράς.
- ❑ Υδρολογική μελέτη για όλα τα κύρια ρέματα της πόλης (εκτίμηση λεκανών απορροής, παροχών αιχμής και πλημμυρικού όγκου για διάφορες περιόδους επαναφοράς). Εκτίμηση ζωνών επικινδυνότητας (περιοχές ίσου πλημμυρικού κινδύνου)
- ❑ Υδραυλική μελέτη που αφορά στην εκτίμηση της επάρκειας διατομών και στάθμης σε κρίσιμες θέσεις. Εντοπισμός και αποτύπωση κρίσιμων περιοχών. Ομοίως εκτίμηση επάρκειας δικτύου ομβρίων και εντοπισμός κρίσιμων θέσεων
- ❑ Εκτίμηση της επάρκειας των υφιστάμενων δικτύων-ρεμάτων και ενδεχομένως ενδεικνυόμενες τροποποιήσεις ή σχεδίαση νέων όπου χρειάζεται. Προτάσεις που θα περιλαμβάνουν τόσο κατασκευαστικά όσο και μη κατασκευαστικά μέτρα για την αντιπλημμυρική θωράκιση της περιοχής.
- ❑ Πρόγραμμα ιεράρχησης έργων και μέτρων ανάσχεσης πλημμύρων.

Ο υδρολογικός σχεδιασμός ενός αντιπλημμυρικού έργου βασίζεται στην εκτίμηση της πλημμύρας σχεδιασμού του έργου και η διαστασιολόγηση του γίνεται με βάση αυτήν την πλημμύρα. Πλημμύρα σχεδιασμού είναι εκείνη που αν εμφανιστεί μία τουλάχιστον φορά πλημμύρα ίση ή μεγαλύτερη απ' αυτήν, το έργο θα αστοχήσει. Περίοδος επαναφοράς σχεδιασμού T είναι η μέση χρονική περίοδος επανάληψης μιας πλημμύρας ίσης ή μεγαλύτερης από την πλημμύρα σχεδιασμού. Αστοχία του έργου είναι η πιθανότητα να αστοχήσει και να καταστραφεί πλημμυρίζοντας τις περιοχές που προφυλάσσει, μέσα σε δεδομένο χρονικό διάστημα n ετών, που μπορεί π.χ. να είναι ο χρόνος για τον οποίο έχει σχεδιασθεί να παρέχει

προστασία. Η αστοχία συνδέεται με την περίοδο επαναφοράς T με τη σχέση: $r=1-(1-1/T)^n$. Για παράδειγμα, η χρήση περιόδου επαναφοράς σχεδιασμού 10-ετίας, σημαίνει ότι η πλημμύρα σχεδιασμού του έργου μπορεί να συμβεί και να υπερβληθεί κάθε χρονική στιγμή με πιθανότητα 10%. Η αστοχία του ίδιου έργου στην ωφέλιμη ζωή του, που μπορεί π.χ. να είναι 30 χρόνια, είναι περίπου 96%, που σημαίνει ότι σχεδόν σίγουρα θα αστοχήσει.

Ο αντιπλημμυρικός σχεδιασμός ξεκινά με την εκτίμηση της καταιγίδας σχεδιασμού από την οποία προκύπτει η πλημμύρα. Κριτήρια σχεδιασμού (επιλεγόμενα από τον μελετητή) είναι:

- ❑ Η διάρκεια της καταιγίδας, η οποία σχετίζεται με τον όγκο απορροής. Επιλέγεται μεγάλη διάρκεια, όταν το έργο που κατασκευάζεται είναι σχεδιαστικά ευαίσθητο στην παράμετρο του όγκου (π.χ. ταμιευτήρες) ή μικρή διάρκεια, όταν η ευαισθησία αφορά στην αιχμή της πλημμύρας (π.χ. δίκτυα ομβρίων). Η δυσμενέστερη δε αιχμή προκύπτει από δυσμενοποίηση της χρονικής κατανομής της καταιγίδας.
- ❑ Η περίοδος επαναφοράς της καταιγίδας. Για $T < 500$ χρόνια είναι γνωστό ότι η περίοδος της προκύπτουσας πλημμύρας είναι μικρότερη από αυτήν της καταιγίδας που την προκάλεσε (π.χ. σε καταιγίδα 80-ετίας αντιστοιχεί πλημμύρα 50-ετίας C4]

Με βάση τη διάρκεια και την περίοδο επαναφοράς από τις όμβριες καμπύλες (καμπύλες που συνδέουν τη διάρκεια, την περίοδο επαναφοράς και την ένταση της βροχής) της περιοχής υπολογίζεται η μέση ένταση της καταιγίδας σχεδιασμού. Με τη χρήση ενός λογικού ποσοστού απωλειών εδάφους (πολύ μικρό για μεγάλες περιόδους επαναφοράς) και μιας κατάλληλης χρονικής κατανομής της καταιγίδας, εκτιμάται η ενεργός βροχόπτωση και απ' αυτή με ένα μοντέλο βροχής - απορροής (π.χ. μοναδιαίο υδρογράφημα, αν η λεκάνη είναι γραμμική) υπολογίζεται η πλημμύρα σχεδιασμού.

2.8.2 Μη κατασκευαστικά μέτρα

Η αντιμετώπιση των πλημμύρων όμως δεν γίνεται μόνο με έργα, δηλαδή μόνο με κατασκευαστικά μέτρα. Υπάρχει και άλλη μία φάση αντιπλημμυρικής προστασίας, που βασίζεται κυρίως σε μέτρα πρόληψης. Βασική θέση στα μέτρα αυτά κατέχουν τα συστήματα πρόγνωσης ισχυρών καταιγίδων και πλημμύρων, έγκαιρης προειδοποίησης και σχεδιασμού ενός συστήματος έκτακτης ανάγκης σχετικά με τις πλημμύρες. Η αξιόπιστη πρόγνωση βέβαια

προϋποθέτει την εγκατάσταση αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών μέτρησης βροχής απορροής σε κατάλληλες θέσεις, όπως και τη χρήση οργάνων εκτός εδάφους π.χ. ραντάρ, δορυφόρων κλπ, ενέργειες όμως που και στην Ελλάδα μπορούν να γίνουν πλέον, αφού υπάρχουν πολυετείς έρευνες και μελέτες πάνω d αυτές τις εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα για την υλοποίηση της προσέγγισης αυτής, Που αφορά στην επιχειρησιακή πρόληψη και αντιμετώπιση πλημμυρικών καταστροφών είναι τα ακόλουθα:

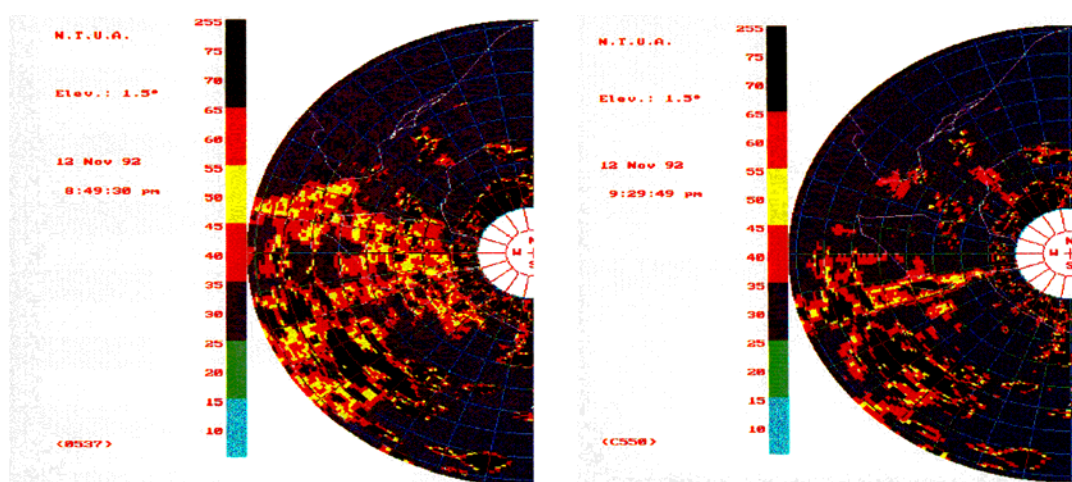
- ❑ Εγκατάσταση αυτοματοποιημένου τηλεμετρικού δικτύου παρακολούθησης των παραμέτρων βροχής - απορροής κατάλληλα σχεδιασμένου σε κρίσιμες θέσεις.
- ❑ Ανάπτυξη λογισμικού συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων.
- ❑ Ρύθμιση κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης του μετασχηματισμού της βροχής σε πλημμυρική απορροή
- ❑ Εξαγωγή συμπερασμάτων από την εφαρμογή του προαναφερθέντος μοντέλου και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μια τις κρίσιμες θέσεις.
- ❑ Ανάπτυξη συστήματος πρόγνωσης και παρακολούθησης ισχυρών καταιγίδων και πλημμύρων σε πραγματικό χρόνο, με χρήση κατάλληλου μετεωρολογικού ραντάρ ή (και) δορυφόρου και δικτύου επίγειων σταθμών.
- ❑ Ανάπτυξη συστήματος προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου και κατάρτιση σχεδίων έκτακτης ανάγκης (σε συμφωνία και με το υπάρχου κεντρικό σχέδιο).
- ❑ Επιχειρησιακή οργάνωση της Τοπικής Αυτοδιοίκησης ή άλλου φορέα της περιοχής για την πρόληψη και την αντιμετώπιση των πλημμυρικών καταστροφών.

Ειδικότερα για τη χρήση του μετεωρολογικού ραντάρ ως βασικού εργαλείου για την πρόγνωση - προειδοποίηση πλημμύρων υπάρχει σημαντική εμπειρία στο ΕΜΠ που αποκτήθηκε μέσα από ερευνητικά προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπως:

- ❑ 1991-1993, Weather Radar and Storm and Flood Hazards sponsored by the EU, EPOCH, ENVIRONMENT & CLIMATE, DG XII

- ❑ 1993-1995, Storm, Floods and Radar Hydrology, sponsored by the EU, ENVIRONMENT & CLIMATE, DG XII
- ❑ 1996-1999, Hydrological and Hydro-meteorological Systems for Europe (HYDROMET), sponsored by the EU, ENVIRONMENT & CLIMATE, DG XII

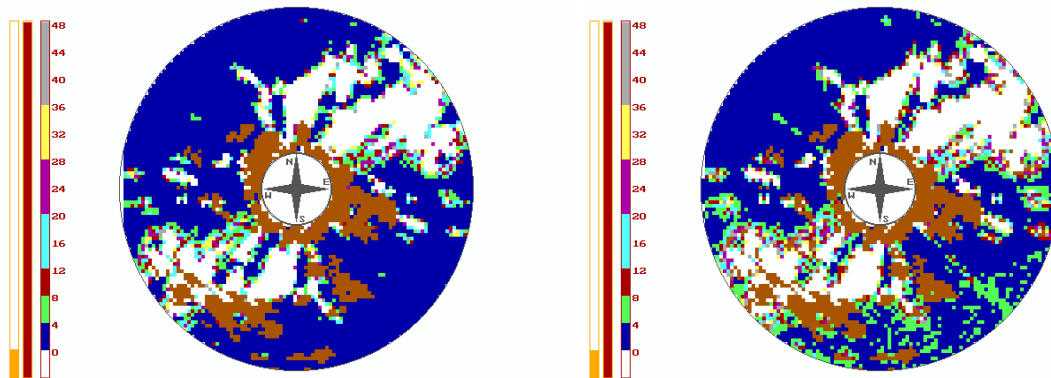
Στα προγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκε το μετεωρολογικό ραντάρ του στρατιωτικού αεροδρομίου της Λάρισας. Η περιοχή μελέτης ήταν ο Θεσσαλικός κάμπος και η λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού, μια περιοχή που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι ιδιαίτερα πλημμυροπαθής. Το ραντάρ μετρά τις ανακλαστικότητες (R) των υδροσταγονιδίων της ατμόσφαιρας σε διαδοχικές χρονικές στιγμές όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-7.



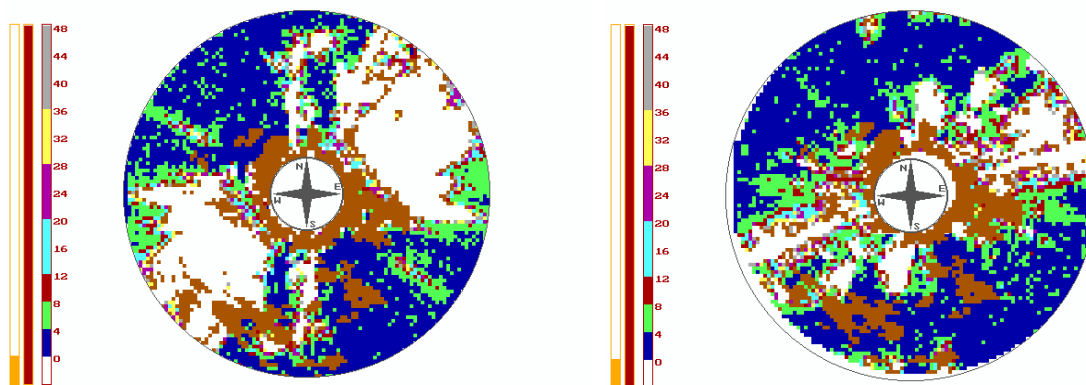
Σχήμα 2-7: Διαδοχικά πεδία ανακλαστικότητας από το Radar.

Αυτές τις μετατρέπει με βάση τη σχέση Z-R σε ένταση βροχής (Z). Ακολουθείται μια διαδικασία για εκτίμηση της ωριαίας βροχόπτωσης σε κάθε στοιχείο του κανάβου ($2 \times 2 \text{ km}^2$) που έχει χωριστεί όλη η περιοχή, με παράλληλη χρήση και στοιχείων επίγειων σταθμών μέτρησης βροχής (merging), σύμφωνα με το Σχήμα 2-8.

Έχοντας την εικόνα (image) των βροχοπτώσεων κάτω από την ομπρέλα του ραντάρ στη χρονική στιγμή t μπορεί κανείς να προβλέψει την εικόνα και τις εντάσεις στην επόμενη χρονική στιγμή $t + \Delta t$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-9, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα πρόγνωσης βροχής που έχουν αναπτυχθεί.

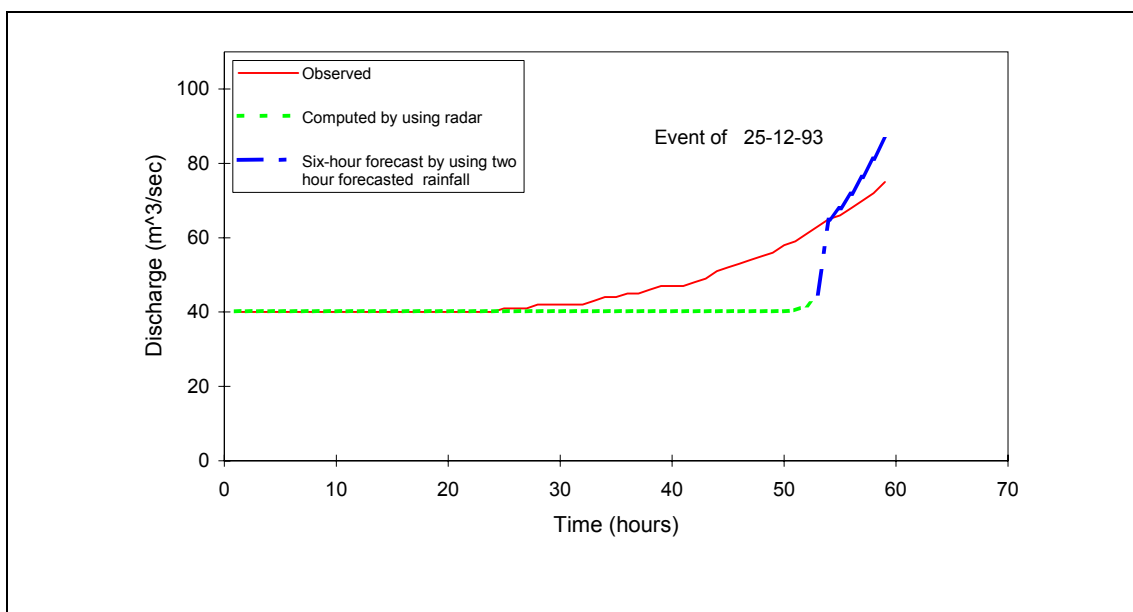


Σχήμα 2-8: Πεδίο βροχής radar (α) μη ρυθμισμένο (β) ρυθμισμένο με επίγεια βροχόμετρα.



Σχήμα 2-9: Σύγκριση του παρατηρημένου πεδίου βροχόπτωσης του ραντάρ (αριστερά) και αυτού που προήλθε από πρόγνωση για χρονικό βήμα 110 λεπτών.

Στη συνέχεια και με βάση τις βροχοπτώσεις και την πρόγνωση τους λίγες ώρες μπροστά, μπορεί κανείς χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο λεκάνης π.χ. HEC1, να εκτιμήσει τα πλημμυρογραφήματα σε ορισμένα κρίσιμα σημεία του ποταμού και να κάνει προγνώσεις 2, 4 και 6 ώρες μπροστά. Στο Σχήμα 2-10 μπορεί κανείς να δει μια απ' αυτές τις προγνώσεις πλημμύρων για το Θεσσαλικό κάμπο.



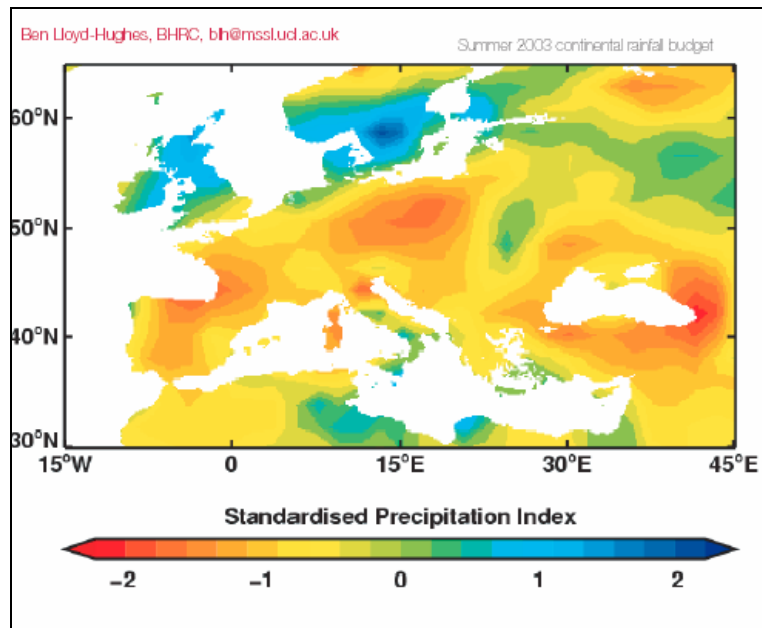
Σχήμα 2-10: 6-ωρη πρόγνωση πλημμύρας με χρήση δεδομένων ραντάρ-βροχόμετρου.

2.9 Η ξηρασία στην Ελλάδα

Η ξηρασία είναι ένα από τα ακραία καιρικά φαινόμενα με ιδιαίτερη επίπτωση στη διαβίωση και την οικονομία. Η ξηρασία εξελίσσεται σε μεγάλο χρονικό διάστημα (ιδιαίτερα δε εάν συγκριθεί με το χρονικό διάστημα εξέλιξης μιας πλημμύρας) και πολλές φορές χωρίς να παρατηρείται άμεσα. Η διάρκειά της μπορεί να φθάσει έως και μερικά χρόνια (σε μεγάλες χωρικές κλίμακες), με σοβαρές οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Έχει παρατηρηθεί ότι στην Ευρώπη, η ξηρασία είναι ένα επαναλαμβανόμενο φαινόμενο, τόσο σε περιοχές με υψηλή ετήσια βροχόπτωση όσο και σε περιοχές με λιγότερη ετήσια κατακρήμνιση, μπορεί δε να εμφανιστεί σε κάθε εποχή.

Οι επιπτώσεις της ξηρασίας ποικίλουν ως προς τη σοβαρότητά τους, τη διάρκειά τους και τη χωρική τους έκταση. Αντίθετα με τις πλημμύρες, η εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεών τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, καθόσον οι συνέπειες μιας ξηρασίας μπορούν να εμφανιστούν πολλά χρόνια μετά τον τερματισμό του φαινομένου. Στο Σχήμα 2-11 φαίνεται η έκταση και ο βαθμός επικινδυνότητας της ξηρασίας του 2003 στην Ευρώπη.

Παρόλο που είναι κοινά αποδεκτός ο κίνδυνος από τις ξηρασίες, δεν υπάρχει Ευρωπαϊκή Οδηγία μέχρι σήμερα για την αντιμετώπιση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης λόγω ξηρασιών (όπως αντίθετα υπάρχει οδηγία για την αντιμετώπιση των πλημμύρων).



Σχήμα 2-11: Έκταση και βαθμός επικινδυνότητας της ξηρασίας του 2003 στην Ευρώπη.

Οι ξηρασίες το 2001-2002 στην Ελλάδα, προκάλεσαν εκτεταμένες ζημιές στον αγροτικό τομέα, καταστρέφοντας σημαντικές εκτάσεις καλλιεργειών σε 29 νομούς. Μόνο στη Θεσσαλία (Σχήμα 2-12), περισσότερα από 40 τετραγωνικά χιλιόμετρα μπαμπακοκαλλιεργειών καταστράφηκαν, αφού το διαθέσιμο για άρδευση νερό δεν έφτανε για την κάλυψη των ελαχίστων αρδευτικών απαιτήσεων.

Μέσα στο έτος 2001, η καταστροφές στις καλλιέργειες στην Ελλάδα, εκτιμήθηκαν ίσες με €3,500,000. Το ποσό αυτό δεν περιλαμβάνει τα κόστη έλλειψης νερού σε άλλες χρήσεις (πχ. Ύδρευση, αναψυχή).



Σχήμα 2-12: Καταστροφή καλλιεργειών στη Θεσσαλία (2001).



Σχήμα 2-13: Απώλεια βασικής ροής σε παραπόταμο του ποταμού Σπερχειού.

Οι επιπτώσεις την ίδια χρονιά στα υδάτινα οικοσυστήματα ήταν εξαιρετικά οδυνηρές. Ολόκληρα οικοσυστήματα λιμνών και ποταμών απειλήθηκαν με εξαφάνιση, όταν οι ποταμοί σταμάτησαν να έχουν βασική ροή (Σχήμα 2-13) το καλοκαίρι και στις λίμνες παρατηρήθηκε μεγάλη πτώση στάθμης. Περιοχές στην Καρδίτσα και στη Θεσσαλία είχαν το μεγαλύτερο πρόβλημα (Σχήμα 2-14). Στον Πίνακα 2-6 παρουσιάζονται οι κυριότερες ξηρασίες των τελευταίων ετών στην Ευρώπη και το οικονομικό τους κόστος.



Σχήμα 2-14: Επιπτώσεις ξηρασίας στα οικοσυστήματα.

Πίνακας 2-6: Οικονομικά κόστη κυριότερων ξηρασιών στην Ευρώπη.

Περίοδος	Περιοχές / Χώρες που επηρεάστηκαν	Κόστος (Δισ. US \$)
1976	Δυτική Ευρώπη Κόστος κτιριακών καταστροφών λόγω καθιζήσεων του εδάφους (μόνο στο Λονδίνο)	~ 1.0
1981- 82	Ιβηρική Χερσόνησος (Πορτογαλία, Ισπανία, Νότια Γαλλία, Κορσική, Ιταλία)	> 6.2
1988- 91	Μεσόγειος (Πορτογαλία, Ισπανία, Νότια Γαλλία, Ιταλία, Αλβανία, Ελλάς)	> 2.6
1992- 94	Ανατολική Ευρώπη (Γερμανία, Δανία, Πολωνία, Λιθουανία, Ουγγαρία, Γιουγκοσλαβία, Ουκρανία, Μολδαβία)	> 1.4
2000-2004	Κεντρική Ευρώπη (Ρουμανία, Ουγγαρία, Πολωνία, Βουλγαρία, Ελλάς, Γιουγκοσλαβία, Τσεχία, Αυστρία, Ελβετία, Ιταλία, Γερμανία, Βέλγιο, Δανία, Ολλανδία, Νορβηγία, Αγγλία, Γαλλία, Ισπανία, Πορτογαλία)	> 15.0

3. Αξιοποίηση και Διαχείριση Υδατικών Πόρων

3.1 Γενικά

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στον τομέα της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η τελευταία γενιά υδρολόγων και μηχανικών γενικότερα, είχε σαν βασική δραστηριότητα το σχεδιασμό και την κατασκευή τεχνικών έργων. Η αλλαγή του τοπίου όμως απαιτεί από τους επιστήμονες να κοιτάξουν πέρα από τους αριθμούς και να αντιληφθούν τις επιπτώσεις που θα έχουν οι κατασκευές τους στο περιβάλλον και την κοινωνία γενικότερα.

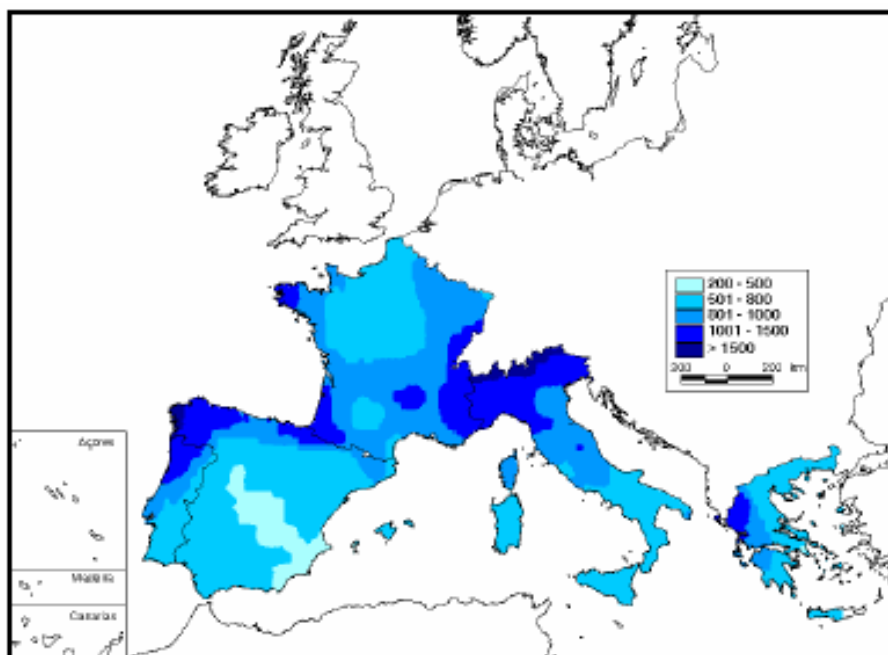
Έτσι, η διαχείριση των υδατικών πόρων απαιτεί γνώσεις, δεξιότητες και πρακτικές που ξεπερνούν τα γνωστικά όρια ενός εξειδικευμένου επιστήμονα. Οι άνθρωποι που ασχολούνται με την διαχείριση των υδατικών πόρων έχουν να αντιμετωπίσουν ζητήματα που έχουν χαρακτηριστικά πολυσύνθετα και συνήθως αλληλοσυγκρουόμενα ή και ασυμβίβαστα. Θα πρέπει έτσι να επιδείξουν αναλυτική ικανότητα στην ανάλυση ενός συστήματος και παράλληλα θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίζουν συνδυαστικά επιστημονικά, τεχνολογικά, θεσμικά οικονομικά και κοινωνικά ζητήματα.

Ο συνολικός τομέας του νερού μιας χώρας, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, περιλαμβάνει τους υδατικούς της πόρους, τα έργα αξιοποίησής τους και τις χρήσεις του νερού. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει σύντομη αναφορά στους υδατικούς πόρους και στις χρήσεις τους, αλλά και σε σχετικές διαχειριστικές έννοιες, εξειδικεύοντας περισσότερο στα στατιστικά στοιχεία αλλά και στα ιδιαίτερα προβλήματα που απαντώνται στον ελλαδικό χώρο.

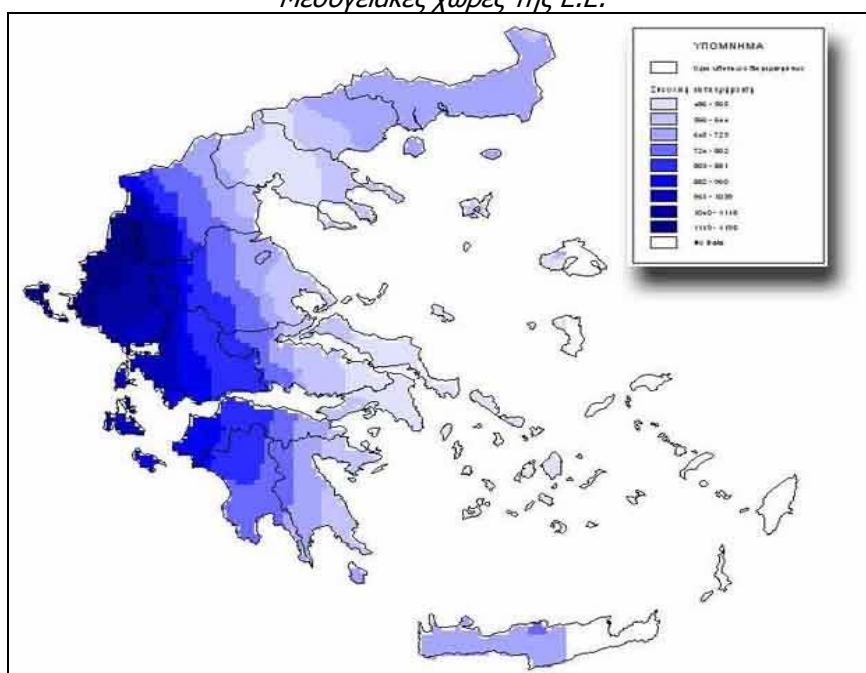
3.2 Υδατικοί Πόροι

Τα υδατικά αποθέματα (υδατικοί πόροι) μίας χώρας είναι το σύνολο του νερού που «παράγεται» μέσα στην χώρα μαζί με την εξωτερική συνεισφορά νερού από τις γειτονικές χώρες (π.χ. διασυνοριακοί ποταμοί). Η κατακρήμνιση και η εξατμισοδιαπνοή συνιστούν τις κύριες κλιματικές μεταβλητές που σε συνδυασμό με τα φυσικά χαρακτηριστικά των υπόγειων υδροφορέων καθορίζουν την ποσότητα των εσωτερικά παραγόμενων υδατικών πόρων μία χώρας. Η κατακρήμνιση αποτελεί την κύρια συνιστώσα εμπλουτισμού των επιφανειακών και υπογείων υδροφορέων. Η μέση κατακρήμνιση στις Μεσογειακές Ευρωπαϊκές χώρες είναι της τάξης των 840 mm/έτος ενώ στην Ελλάδα η μέση κατακρήμνιση πλησιάζει τα 850 mm/έτος. Στον χάρτη που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-1 φαίνεται η κατανομή της μέσης υπερετήσιας

κατακρήμνισης στις Μεσογειακές Ευρωπαϊκές χώρες (στοιχεία της Eurostat, Cedex, 2000), η οποία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις στο εσωτερικό της κάθε χώρας. Στο Σχήμα 3-2 φαίνεται αυτή η κατανομή για το εσωτερικό της Ελλάδας.



Σχήμα 3-1: Μέση υπερετήσια κατακρήμνιση (mm) για την περίοδο 1960 – 1990 στις Μεσογειακές χώρες της Ε.Ε.

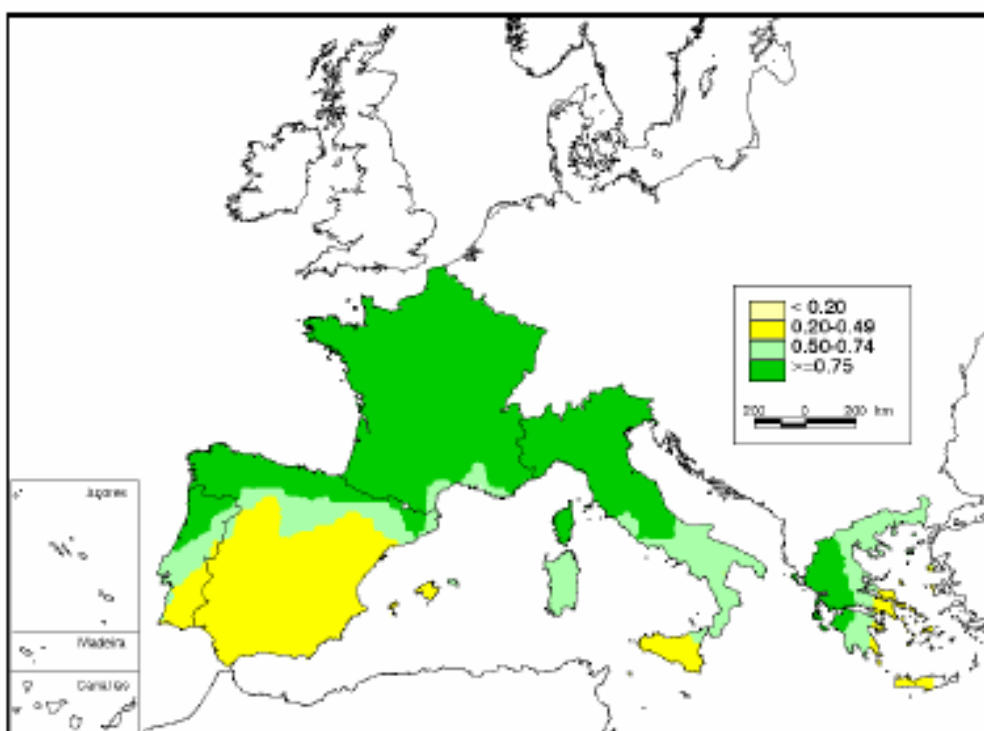


Σχήμα 3-2: Κατανομή της συνολικής κατακρήμνισης στην Ελλάδα.

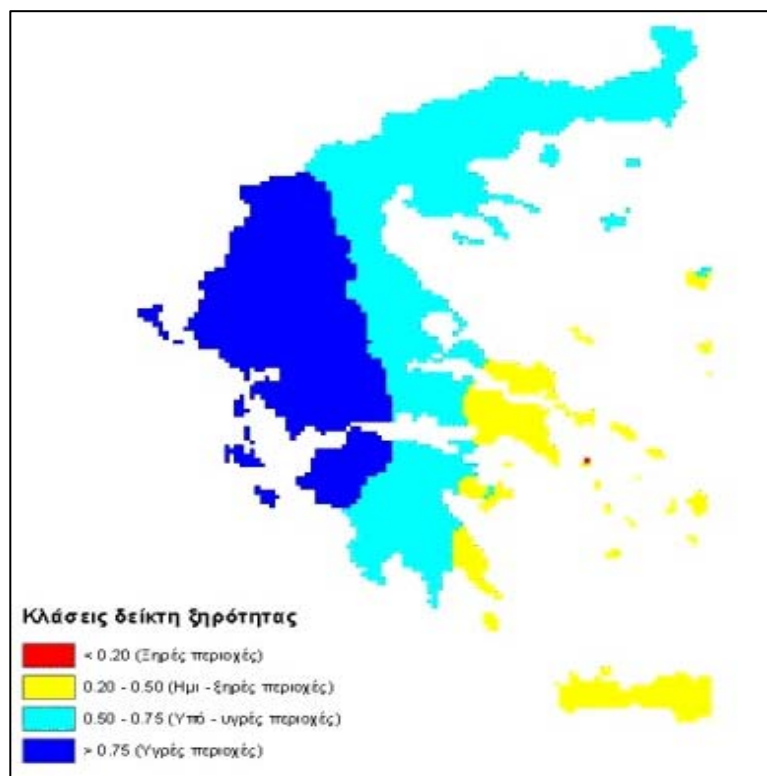
Από τα σχήματα αυτά γίνεται φανερό ότι στην Ελλάδα υπάρχει ένα ιδιόμορφο υδρολογικό καθεστώς: η Δυτική Ελλάδα δέχεται το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων, ενώ η Ανατολική Ελλάδα με τα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη έχουν σημαντικά μικρότερες βροχοπτώσεις π.χ. στην Αττική πέφτουν περίπου 410 χιλιοστά σε μέση υπερετήσια βάση. Από

την άλλη πλευρά, η εξατμισοδιαπνοή (όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα) είναι μια σημαντική υδρολογική απώλεια τόσο από τους επιφανειακούς φορείς όσο και από τις ανώτερες εδαφικές στρώσεις και είναι αρκετά υψηλή, ιδιαίτερα μάλιστα στις μειονεκτικές από πλευράς νερού ανατολικές περιοχές της χώρας.

Ένας δείκτης ευρέως χρησιμοποιούμενος για τον κλιματικό χαρακτηρισμό μίας περιοχής είναι ο δείκτης ξηρότητας της UNESCO που ορίζεται ως ο λόγος της μέσης υπερετήσιας βροχόπτωσης προς την αντίστοιχη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Δείκτες ξηρότητας μικρότεροι του 0.20 χαρακτηρίζουν ξηρές περιοχές, μεταξύ 0.20 και 0.49 σχεδόν ξηρές, μεταξύ 0.50 και 0.74 σχεδόν υγρές και μεγαλύτεροι του 0.75 υγρές περιοχές. Ο χάρτης του δείκτη ξηρότητας της UNESCO για τις Μεσογειακές χώρες (Cedex, 2000) δίνεται στο Σχήμα 3-3, ενώ στο Σχήμα 3-4 δίνεται η κατανομή του δείκτη ξηρότητας στην Ελλάδα. Από τον χάρτη του σχήματος μπορούμε να συμπεράνουμε την ιδιαιτερότητα της Ελλάδας από πλευράς έντονης χωρικής διαφοροποίησης της υδραυλικότητάς της, όπως και την δριμύτητα της ξηρασίας που πλήττει την Νοτιοανατολική Ελλάδα και τα νησιά του Αιγαίου.

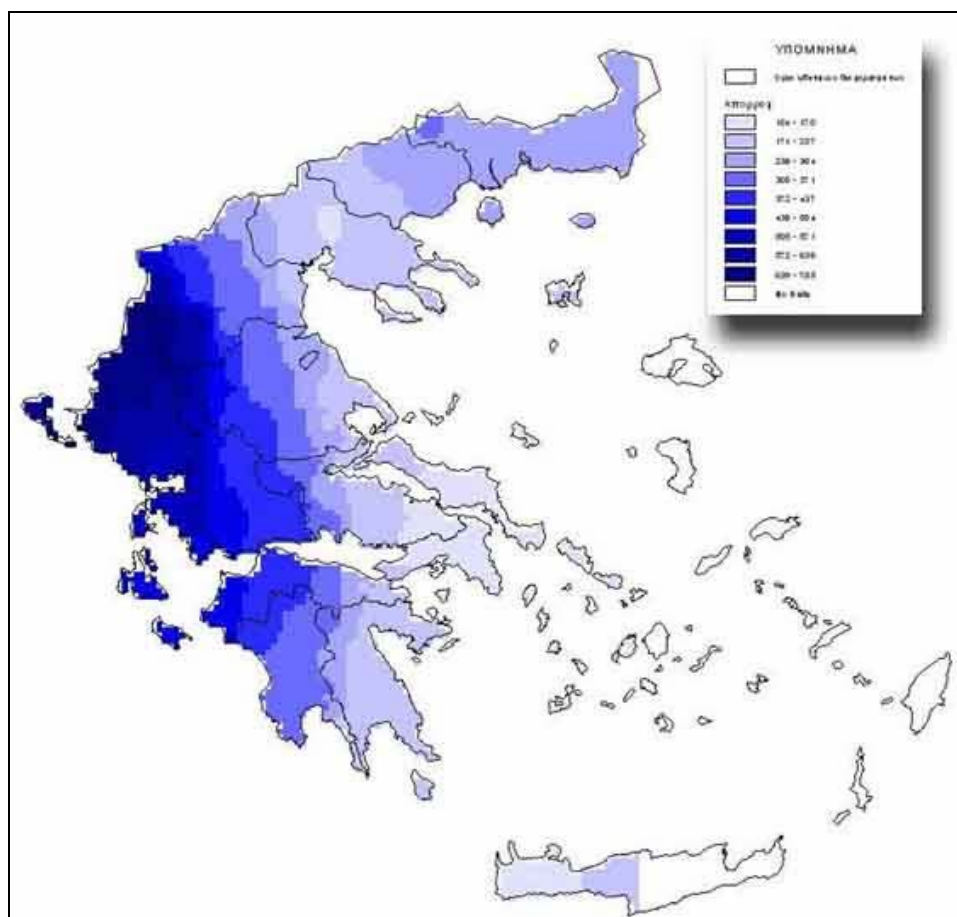


Σχήμα 3-3: Δείκτης ξηρότητας της UNESCO στις Μεσογειακές χώρες της Ε.Ε.



Σχήμα 3-4: Δείκτης ξηρότητας στην Ελλάδα.

Η ελλειμματικότητα από πλευράς νερών των περιοχών αυτών της χώρας φαίνεται και από την κατανομή της απορροής στην Ελλάδα στο Σχήμα 3-5, η οποία παρουσιάζει ανάλογη με την βροχόπτωση άνιση κατανομή. Όλα αυτά θεμελιώνουν την άποψη ότι ιδιαίτερα σ' αυτές τις περιοχές η έλλειψη νερού είναι μια μόνιμη κατάσταση, «ενδημική» θα λέγαμε, η οποία ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες εμφανίζεται με μικρότερη ή μεγαλύτερη ένταση και για την οποία κινητοποιούμεθα δυστυχώς μόνο όταν τα φαινόμενα γίνονται ακραία και φθάνουν να θίγουν σημαντικά τον καταναλωτή. Αλλά και αυτές οι κινητοποιήσεις βασίζονται συνήθως στη λήψη πυροσβεστικών ή κατασταλτικών μέτρων, ενώ είναι φανερό ότι τέτοιες καταστάσεις μπορούν να αντιμετωπισθούν με μακροπρόθεσμη πολιτική συνολικής ορθολογικής διαχείρισης τόσο των πόρων όσο και των χρήσεων του νερού.

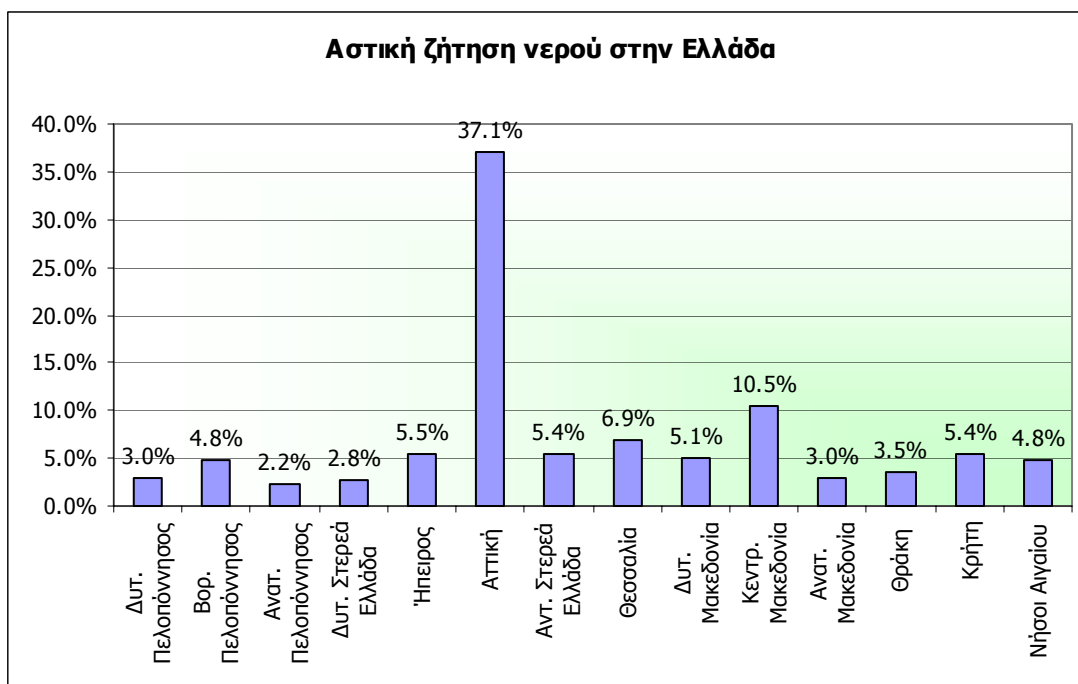


Σχήμα 3-5: Κατανομή της απορροής στην Ελλάδα.

3.3 Χρήσεις νερού

3.3.1 Αστική χρήση

Η σημαντικότερη μορφή αστικής ζήτησης είναι η ύδρευση. Κατά την διαχείριση των υδατικών πόρων ώστε να ικανοποιηθεί αυτή η ανάγκη, υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη: Πρώτον, η πολύ μικρή επιτρεπτή αστοχία στην παροχή και δεύτερον η εξασφάλιση καλής ποιότητας νερού. Κατά την διαχείριση της αστικής ζήτησης νερού λαμβάνονται υπόψη εκτός των αναγκών για ύδρευση των μόνιμων και εποχιακών κατοίκων, οι ανάγκες για την βιοτεχνία, μικροαρδευτικές ανάγκες, οι απώλειες των δικτύων καθώς και οι ειδικές χρήσεις όπως για σχολεία, δημόσια κτίρια, κοινοτικά καταστήματα, νοσοκομεία, πυροσβεστικούς κρουνοί κλπ. Στο Σχήμα 3-6 φαίνονται οι αστικές καταναλώσεις νερού (%) των υδατικών διαμερισμάτων της χώρας.

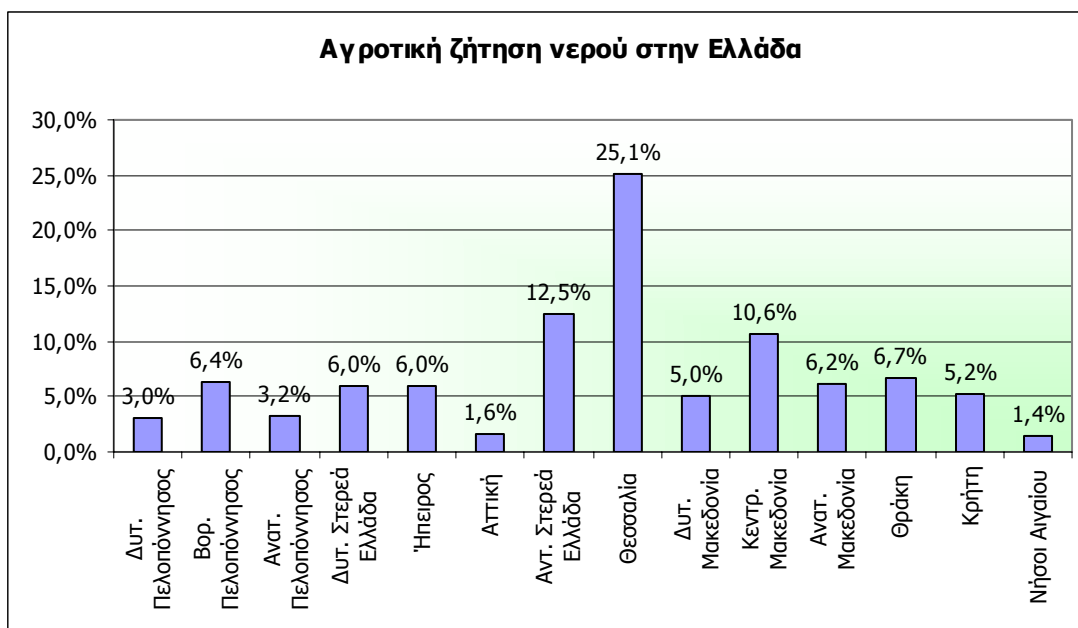


Σχήμα 3-6: Αστική ζήτηση νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΤΥΜΠ, 2000).

3.3.2 Άρδευση

Η άρδευση θεωρείται παγκοσμίως ο μεγαλύτερος χρήστης νερού, καθώς αγγίζει το 70 με 90% της συνολικής χρήσης (στην Ελλάδα είναι 86% περίπου). Παρότι αυτό επιφέρει εκτεταμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, δεν μπορεί να παραβλέψει κανένας τον ζωτικό ρόλο της άρδευσης στην παραγωγή τροφής. Εκτιμάται ότι το 50% της παραγόμενης τροφής προέρχεται από αρδευόμενες εκτάσεις.

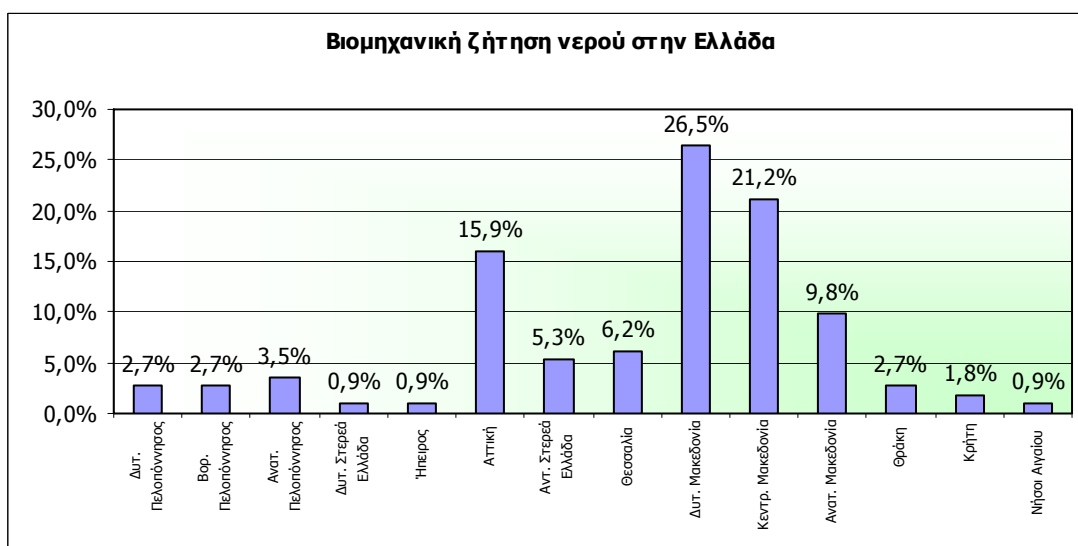
Για να διατηρηθεί σταθερή η αναλογία αρδευόμενων εκτάσεων και πληθυσμού θα έπρεπε μέχρι το 2025 οι αρδευόμενες εκτάσεις να αυξηθούν κατά 20-30%. Όμως, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που δεν επιτρέπουν την αύξηση της, κυρίως η ανταγωνιστική σχέση με τις άλλες μορφές ζήτησης. Έτσι, οι πρακτικές στην αρδευόμενη αγροκαλλιέργεια προσανατολίζονται στην αύξηση της παραγωγής ανά μονάδα καταναλώσιμου νερού, παρά στην αύξηση της αρδευόμενης έκτασης. Στο Σχήμα 3-7 φαίνεται η αγροτική ζήτηση νερού (%) ανά υδατικό διαμέρισμα της χώρας.



Σχήμα 3-7: Αγροτική ζήτηση νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΤΥΜΠ, 2000)

3.3.3 Βιομηχανική χρήση

Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα στα αναπτυγμένα κράτη και λόγω της σημαντικής τεχνολογικής ανάπτυξης, γίνονται σημαντικές προσπάθειες για την μείωση της κατανάλωσης νερού για βιομηχανική χρήση καθώς και την μείωση παραγωγής βιομηχανικών αποβλήτων. Οι προσπάθειες αυτές ενισχύονται καταρχήν από τους αυστηρούς κανονισμούς και περιορισμούς που επιβάλλονται από την νομοθεσία και τις οδηγίες που εκδίδονται αλλά και από την κλιμακωτή τιμολόγηση της κατανάλωσης και την ανάπτυξη περιβαλλοντικής και κοινωνικής συνείδησης. Στο Σχήμα 3-8 δίνονται οι ζητήσεις νερού για βιομηχανική χρήση στην Ελλάδα ανά Υδατικό Διαμέρισμα.



Σχήμα 3-8: Βιομηχανική ζήτηση νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΤΥΜΠ, 2000).

3.3.4 Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας

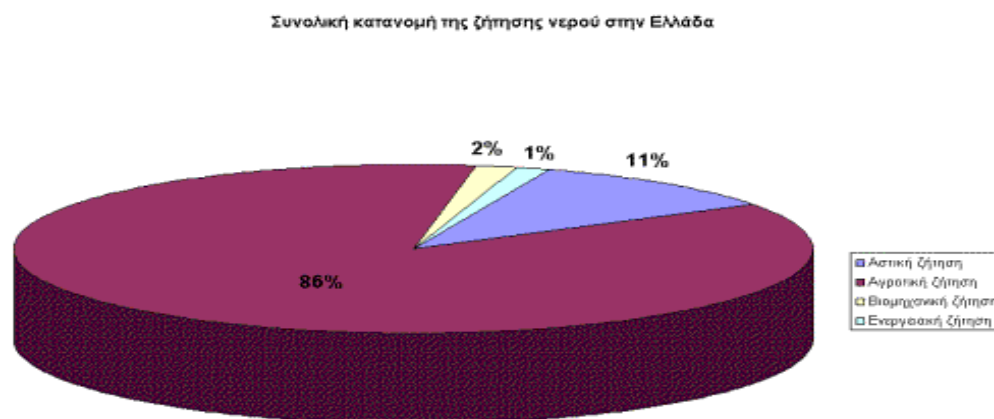
Το 1996, το 18.4% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας προέρχονταν από υδροηλεκτρική ενέργεια. Σήμερα, η υδροηλεκτρική ενέργεια, μαζί με την αιολική, θεωρείται η μόνη μορφή ενέργειας που είναι ανανεώσιμη και οικονομικά βιώσιμη. Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται η ενεργειακή ζήτηση νερού (%) ανά Υδατικό Διαμέρισμα.



Σχήμα 3-9: Ενεργειακή ζήτηση νερού ανά Υδατικό Διαμέρισμα (ΕΤΥΜΠ, 2000).

3.3.5 Συνολική κατανομή ζήτησης νερού στην Ελλάδα

Στο Σχήμα 3-10 δίνεται η ποσοστιαία συμμετοχή της κάθε μιας από τις τέσσερις κύριες χρήσεις νερού στο σύνολο της χώρας.



Σχήμα 3-10: Κατανομή ζήτησης νερού για τις διαφορετικές χρήσεις (ΕΤΥΜΠ, 2000).

3.4 Τα έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων

Η αξιοποίηση και εκμετάλλευση των υδατικών πόρων γίνεται με την κατασκευή διαφόρων τεχνικών υδραυλικών έργων, όπως φράγματα, δεξαμενές, υδρευτικά και αρδευτικά δίκτυα, κλπ. Τα έργα αυτά είτε ρυθμίζουν τη ροή του νερού στο χώρο και στο χρόνο, είτε προστατεύουν από τις καταστροφικές του επιδράσεις ή τις πλημμύρες, είτε καλυτερεύουν την ποιότητά του.

Ο σχεδιασμός αυτών των έργων (καθένα απ' τα οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι συνιστά ένα υδατικό σύστημα), δηλαδή η διαστασιολόγησή τους, η αντιπλημμυρική προστασία τους, η εκτίμηση επιχωμάτωσής τους κλπ, γίνεται καταρχήν με βάση τα χαρακτηριστικά της δίκαιας ροή του νερού και λέγεται υδρολογικός σχεδιασμός.

Ωστόσο, τόσο κατά τη φάση του σχεδιασμού, αλλά και κατά τον υδρολογικό σχεδιασμό αυτών των έργων, λαμβάνονται υπόψη οικονομικά, λειτουργικά, κοινωνικά, οικολογικά και άλλα στοιχεία, έτσι ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη και ορθολογική προσέγγιση στο σχεδιασμό τους.

Για παράδειγμα, προτείνεται η κατασκευή μικρού αρδευτικού φράγματος σε ποταμό με αξιόλογη πανίδα. Για τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας, πρέπει να διατηρηθεί μια ελάχιστη παροχή στα κατάντη του φράγματος. Εάν δεν ληφθεί αυτό υπόψη, θα υπεισέλθουν μεγάλες (και ανεπανόρθωτες) οικολογικές καταστροφές. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει από τη δίκαια του ποταμού να αφαιρεθεί η επιθυμητή βασική ροή και με την απομένουσα απορροή να διαστασιολογηθεί το φράγμα και να βρεθεί εάν συμφέρει ή όχι η κατασκευή του.

3.5 Έννοιες διαχείρισης υδατικών πόρων

Οι γενικές τάσεις που επικρατούν στα πλαίσια της ΔΥΠ είναι οι παρακάτω:

- ❑ βιώσιμη ανάπτυξη
- ❑ προστασία και διατήρηση οικοσυστημάτων
- ❑ μακροσκοπική ανάλυση των υδατικών συστημάτων
- ❑ ευελιξία σχεδιασμού εν όψει τόσο φυσικών όσο και κοινωνικοοικονομικών αλλαγών

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια έχει θέσει σαν αντικείμενα μελέτης τα παρακάτω, ανάμεσα σε άλλα:

- ❑ Εύρος της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην διαθεσιμότητα γλυκού νερού και την εξασφάλιση τροφής.
- ❑ Κίνδυνοι σχετιζόμενοι με τη δημόσια υγεία
- ❑ Απαιτήσεις σε νερό για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας των υδάτινων οικοσυστημάτων (ποταμίων, λιμναίων κλπ)
- ❑ Διαχείριση της ζήτησης του νερού ανά χρήση
- ❑ Αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας και διάθεσης υγρών αποβλήτων
- ❑ Ανάπτυξη καλλιεργειών λιγότερο υδροβόρων (Τσακίρης, 2001)

Το νερό αντιμετωπίζεται όλο και περισσότερο ως:

- ❑ ένας σπάνιος πόρος που πρέπει να προστατεύεται
- ❑ ένα αγαθό με οικονομική υπόσταση και όχι μόνο ως κοινωνικό αγαθό που πρέπει να παρέχεται δωρεάν

Η κύρια μορφή ταμίευσης νερού είναι μέσω τεχνητών επιφανειακών ταμιευτήρων (με την κατασκευή φραγμάτων). Όμως, για την εύρεση νέων πηγών νερού μπορούν να υιοθετηθούν και άλλες μέθοδοι, όπως ο τεχνητός εμπλουτισμός υδροφόρων στρωμάτων (λεκάνες διήθησης, γεωτρήσεις εμπλουτισμού), η επαναχρησιμοποίηση αστικών και άλλων υγρών αποβλήτων και η αφαλάτωση.

3.5.1 Ο ρόλος των χρηστών στην διαδικασία λήψης αποφάσεων

Η διαχείριση των υδατικών πόρων προϋποθέτει και την συμμετοχή όλων αυτών που έχουν συμφέροντα στη χρήση και στον τρόπο διάθεσης των υδατικών πόρων. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη χωρίς να δημιουργούνται ζητήματα που δύναται να θέσουν σε κίνδυνο την ισορροπία των περιβαλλοντικών συστημάτων.

Η συμμετοχή των χρηστών είναι απαραίτητη για δύο κυρίως λόγους:

- ❑ Εξασφαλίζεται η απαραίτητη κοινή συναίνεση για πολιτική μεταρρύθμιση
- ❑ Προάγεται μια μορφή διαχείρισης που είναι αποδοτική σε ότι αφορά τους υδατικούς πόρους και κοινωνικά υπεύθυνη, ώστε να ωφελούνται όλοι οι κοινωνικοί τομείς, και κυρίως αυτοί που βρίσκονται σε οριακό σημείο ανάπτυξης.

Η συμμετοχή των χρηστών δεν επιτυγχάνεται χωρίς προβλήματα, αφού πρέπει να ξεπεραστούν ανασταλτικοί παράγοντες, όπως:

- ❑ συγκρουόμενα συμφέροντα
- ❑ κεκτημένα δικαιώματα
- ❑ ζητήματα αποζημιώσεων
- ❑ έλλειψη διάθεσης για συνεργασία
- ❑ ανεπαρκής πολιτική βούληση ή κρατική βοήθεια.

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι θα πρέπει να υπάρχει ενίσχυση του ρόλου:

- ❑ Μη κυβερνητικών οργανισμών
- ❑ Τοπικών αρχών
- ❑ Εργατικών και εμπορικών ενώσεων
- ❑ Επιχειρήσεων και βιομηχανιών
- ❑ Αγροτών
- ❑ Της επιστημονικής και τεχνολογικής κοινότητας (UN Agenda 21, 2000)

3.5.2 Κριτήρια διαχείρισης σε αστικές, αγροτικές, δασώδεις, νησιωτικές / παράκτιες περιοχές.

Όπως προαναφέρθηκε, ένα σύστημα υδατικών πόρων αποτελείται από διαφορετικές συνιστώσες, οι οποίες απαιτούν ειδική προσοχή και αντιμετώπιση κατά την διαδικασία του σχεδιασμού, της κατασκευής, της λειτουργίας και της συντήρησης ενός συστήματος διαχείρισης.

Είναι προφανές ότι οι συνιστώσες που απαρτίζουν ένα σύστημα αλλά και η σημαντικότητά τους διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Έτσι, τα κριτήρια διαχείρισης μεταβάλλονται σε αστικές, αγροτικές δασώδεις και παράκτιες περιοχές, αλλά ο αντικειμενικός σκοπός παραμένει ίδιος: Η εξασφάλιση επαρκούς ποσότητας και ποιότητας νερού για τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε κάθε περιοχή, η διατήρηση του οικοσυστήματος και η προστασία από τις φυσικές καταστροφές που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους.

Αστικές περιοχές

- ❑ Ύδρευση και πυροπροστασία
- ❑ Αντιπλημμυρική προστασία με κατασκευαστικά και μη κατασκευαστικά μέτρα με έμφαση στα συστήματα πρόγνωσης – προειδοποίησης και στην λειτουργία των δικτύων ομβρίων
- ❑ Συστήματα άρδευσης μικρής έκτασης
- ❑ Μονάδες βιολογικού καθαρισμού με έμφαση στα αστικά λύματα

Ημιαστικές περιοχές

- ❑ Ύδρευση
- ❑ Αντιπλημμυρική προστασία με κατασκευαστικά και μη κατασκευαστικά μέτρα με έμφαση στα συστήματα πρόγνωσης – προειδοποίησης και στην λειτουργία των δικτύων ομβρίων
- ❑ Συστήματα άρδευσης καλλιεργειών
- ❑ Βιομηχανική χρήση νερού (εξασφάλιση επαρκούς ποσότητας και επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με ποιότητα νερού και ειδικότερα βιομηχανικά απόβλητα)
- ❑ Ταμειυτήρες πολλαπλού σκοπού
- ❑ Μονάδες επεξεργασίας μικρής κλίμακας

Δασικές περιοχές

- ❑ Έργα υδρονομίας
- ❑ Συγκράτηση φερτών

Αγροτικές περιοχές

- ❑ Ύδρευση οικισμών
- ❑ Άρδευση καλλιεργειών
- ❑ Κτηνοτροφικές μονάδες
- ❑ Διαχείριση υπόγειων υδροφορέων (με έμφαση στα προβλήματα υπεράντλησης και ρύπανσης που σχετίζονται με την χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων)
- ❑ Αντιπλημμυρική προστασία με κατασκευαστικά και μη κατασκευαστικά μέτρα

Παράκτιες / νησιωτικές περιοχές

- ❑ Ύδρευση με έμφαση στη πληθυσμιακή διακύμανση μέσα στο έτος (τουρισμός)
- ❑ Άρδευση καλλιεργειών
- ❑ Διαχείριση υπόγειων υδροφορέων (με έμφαση στα προβλήματα υπεράντλησης και της ρύπανσης που αυτή συνεπάγεται - υφαλμύρυνση)
- ❑ Διαχείριση λιμνοδεξαμενών
- ❑ Μη συμβατικές μέθοδοι: Μονάδες αφαλάτωσης, μεταφορά νερού, επαναχρησιμοποίηση
- ❑ Προστασία οικοσυστημάτων (έμφαση στις εκβολές ποταμών).

3.5.3 Ανθρωπογενείς πιέσεις πάνω στον κύκλο του νερού και εκτίμηση των επιπτώσεών τους.

Οι πιο σημαντικές ανθρωπογενείς πιέσεις πάνω στο κύκλο του νερού είναι οι ακόλουθες:

- ❑ **Αστικοποίηση:** Σημαντική αύξηση του αστικού πληθυσμού στα τελευταία 50 χρόνια με τάσεις συνεχιζόμενης αύξησης. Οι περιβαλλοντικές υπηρεσίες, οργανισμοί και οι σχετικές πολιτικές απέτυχαν σε παγκόσμιο επίπεδο να αντιμετωπίσουν τους γρήγορους ρυθμούς αστικοποίησης. Η εξασφάλιση επαρκούς ποσότητας νερού, τα ζητήματα υγιεινής και οι υπηρεσίες επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν μέγιστη πρόκληση σε ένα έντονα αστικοποιημένο περιβάλλον. Η έντονη αστικοποίηση εισήγαγε την ανάγκη για διαμόρφωση πολιτικών που θα ενισχύουν την ορθολογική χρήση του νερού, την μείωση των λυμάτων και θα βελτιώσουν την παροχή υπηρεσιών και τις τεχνολογίες ώστε να εξυπηρετηθεί ο αυξανόμενος αστικός πληθυσμός.
- ❑ **Υπερβολική ρύθμιση και άντληση:** Η αξιοποίηση των υδατικών πόρων εμπεριέχει ενέργειες όπως η ρύθμιση, αποθήκευση και απόληψη νερού από τα επιφανειακά ύδατα ή η άντληση υδάτων από τα υπόγεια. Οι ενέργειες αυτές, όταν γίνονται με έντονους ρυθμούς δύναται να οδηγήσουν σε μείωση της παροχής στα κατάντη του σημείου απόληψης στα επιφανειακά νερά, πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στα υπόγεια, ξήρανση υγροβιότοπων, καταστροφή οικοσυστημάτων και υφαλμύρωση.

- ❑ **Ρύπανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων και υποβάθμιση της ποιότητάς τους:** Η υποβάθμιση της ποιότητας των υδατικών πόρων δεν έχει μόνο άμεσα αρνητικά αποτελέσματα στις λειτουργίες των οικοσυστημάτων, αλλά αυξάνει και τον κίνδυνο σε ζητήματα υγείας και ελαττώνει τις δυνατότητες επιλογής για χρήση υδατικών πόρων ή αυξάνει το κόστος για την χρήση του νερού. Με τον τρόπο αυτό, η υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων συμβάλλει σημαντικά στην ανεπάρκεια πόρων και ενισχύει τις πιθανότητες λειψυδρίας.
- ❑ **Κακή χρήση γης:** Κακές πρακτικές καλλιέργειας, αποδάσωση, υπερβόσκηση δύνανται να εξαντλήσουν την φυτοκάλυψη και να επηρεάσουν τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα, να μεταβάλλουν την απορροή και τους ρυθμούς διήθησης, να αυξήσουν την συχνότητα και ένταση των πλημμυρών και να επηρεάσουν την επαναπλήρωση των υπόγειων υδροφορέων. Η κακή χρήση γης αυξάνει επίσης την διάβρωση του εδάφους, επηρεάζει την μεταφορά φερτών υλικών και την απόθεση. Η απόθεση φερτών μειώνει τον ωφέλιμο χρόνο λειτουργίας αποθηκευτικών κατασκευών, μειώνει την παροχτευτική ικανότητα των αρδευτικών καναλιών και των άλλων σχετικών κατασκευών και αυξάνει το κόστος επιχειρησιακής λειτουργίας και το κόστος συντήρησης. Συχνά, είναι περισσότερο συμφέρον οικονομικά να προαχθεί η σωστή χρήση γης και οι σωστές πρακτικές διαχείρισης σε μια λεκάνη απορροής παρά να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα που σχετίζονται με τις φτωχές πρακτικές διαχείρισης.
- ❑ **Μεταφορά – εκτροπή υδατικών συστημάτων:** Συχνά γίνεται μεταφορά νερού από μια περιοχή σε άλλη, είτε μέσα στην ίδια λεκάνη ή από γειτονικές, για να αντιμετωπισθεί η ανεπάρκεια σε μια δεδομένη περιοχή. Τα κοινωνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και πολιτικά ζητήματα που σχετίζονται με αυτή την πρακτική δεν είναι αμελητέα. Με δεδομένες όμως τις πιέσεις για επάρκεια νερού, είναι μια πρακτική που συνηθίζεται, κυρίως για να επιβιώσουν οι αστικές περιοχές και για να υποστηριχθεί η οικονομική ανάπτυξη.

3.6 Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων

Στόχος της διαχείρισης των Υδατικών Πόρων είναι η παροχή επαρκούς ποσότητας και καλής ποιότητας νερό στον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον. Η δομή της σύγχρονης κοινωνίας παρουσιάζει αυξημένες ανάγκες σε νερό που οφείλονται στα σύνθετα οικονομικά χαρακτηριστικά της και τις γενικότερες απαιτήσεις άνεσης. Οι καλλιέργειες και η τροφική

αλυσίδα απαιτούν νερό, τα ζώα έχουν ανάγκη από επαρκείς ποσότητες νερού και τα φυσικά υδατικά συστήματα χρειάζονται το νερό για να διατηρήσουν τις λειτουργίες τους.

Μεταφράζοντας στην ορολογία της διαχείρισης τις ανάγκες σε νερό από τον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον, θα πρέπει να αναφερθούμε στους «στόχους» της διαχείρισης των υδατικών πόρων: ύδρευση, διαχείριση λυμάτων και ποιότητας νερού, όμβρια ύδατα και ανάσχεση πλημμύρων, παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορές, αναψυχή, νερό για το περιβάλλον, τα ψάρια και την πανίδα. Ο κάθε ένας από αυτούς τους στόχους ορίζει ουσιαστικά τις διαφορετικές δραστηριότητες που απαρτίζουν τον τομέα της διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Το βασικό υπόβαθρο για την επίτευξη αποτελεσματικής διαχείρισης, αποτελεί το ανθρώπινο δυναμικό και η τεχνολογική υποδομή (Λέκκας, 1996· Τσακίρης, 2001). Οι αρμόδιοι φορείς πρέπει να στελεχώνονται με επαρκές και κατάλληλα ειδικευμένο προσωπικό.

Για την αποτελεσματική διαχείριση υδατικών πόρων, απαραίτητη είναι και η κατάλληλη υλικοτεχνική υποδομή, με υιοθέτηση σύγχρονων τεχνολογιών αλλά και αντιλήψεων. Βάσεις δεδομένων, που να είναι επαρκείς και ενημερωμένες με τα απαραίτητα δεδομένα, κατάλληλο λογισμικό για την διαχείριση της πρωτογενούς πληροφορίας, βαθμονομημένα ομοιώματα για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών και την ανάπτυξη σεναρίων, γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών για την προσομοίωση της χωρικής μεταβλητότητας των συνιστωσών είναι μόνο μερικά από τα απαραίτητα στοιχεία που συνθέτουν το βασικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο θα αναπτυχθούν οι δράσεις και οι ενέργειες με σκοπό την διαχείριση.

Για να θεωρηθεί ολοκληρωμένος ένας αναπτυξιακός σχεδιασμός, είτε σε επίπεδο χώρας είτε σε επίπεδο περιφερειακό, επιβάλλεται να είναι ενταγμένη σε αυτόν μια στρατηγική διαχείρισης υδατικών πόρων, κεντρικά και περιφερειακά. Απαιτεί δε την ενεργό συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων κρατικών φορέων και όλων των ενδιαφερομένων στην διαδικασία λήψης αποφάσεων (Palmer, 2002).

Μια αποτελεσματική διαχείριση, ανάμεσα σε άλλα, προάγει τα παρακάτω:

- ❑ Διατήρηση των υπαρχόντων φυσικών υδατικών συστημάτων
- ❑ Σχεδιασμένη επαναχρησιμοποίηση υδατικών πόρων
- ❑ Αναβάθμιση της ποιότητας των υδατικών πόρων
- ❑ Διαχείριση της ζήτησης του νερού, με σκοπό την εξοικονόμηση

Κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται μέσω της ΔΥΠ:

- ☐ οικονομικά οφέλη
- ☐ αποδοτικότητα συστημάτων
- ☐ αξιοπιστία λειτουργίας συστημάτων

Ένα σχέδιο διαχείρισης πρέπει να αξιολογείται με βάση παράγοντες:

- ☐ τεχνικούς, δηλαδή τα έργα ή τα μέτρα να είναι πραγματοποιήσιμα.
- ☐ οικονομικούς, πρέπει τα έργα ή μέτρα να είναι στα πλαίσια των ανά περίπτωση οικονομικών δυνατοτήτων.
- ☐ Περιβαλλοντικούς, πρέπει οι όποιες αρνητικές επιπτώσεις να αμβλύνονται.
- ☐ Κοινωνικοπολιτικούς, πρέπει το σχέδιο διαχείρισης να είναι αποδεκτό στο κοινό.

Είναι λοιπόν προφανές ότι η ΔΥΠ επεκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών περιοχών, και απαιτεί την συνεργασία φορέων και ατόμων με διαφορετικό επιστημονικό υπόβαθρο.

3.6.1 Εμπόδια στην υλοποίηση διαχειριστικών σχεδίων

- ☐ Αμφισημία στο σχεδιασμό
- ☐ Λανθασμένες παραδοχές στον σχεδιασμό
- ☐ Έλλειψη συντονισμού
- ☐ Αλλαγή στο προσωπικό
- ☐ Έλλειψη πόρων

Τα στρατηγικά σχέδια διαχείρισης υδατικών πόρων είναι πετυχημένα αν περιλαμβάνουν (Palmer, 2002):

- ☐ Σαφώς προσδιορισμένους αντικειμενικούς στόχους
- ☐ Κριτήρια αξιολόγησης
- ☐ Κατάρτιση πρόβλεψης μελλοντικών συνθηκών
- ☐ Κατάρτιση εναλλακτικών σεναρίων
- ☐ Εκτενή περιγραφή της επιλεγμένης στρατηγικής

3.6.2 Ο επιχειρησιακός τομέας της διαχείρισης των υδατικών πόρων

Η δομή του τομέα της διαχείρισης των υδατικών πόρων παρουσιάζει διαφορές στα διάφορα μοντέλα διαχείρισης, όμως έχει τέσσερα βασικά στοιχεία που συναντώνται παντού και αποτελούν και τον κεντρικό άξονα γύρω από τον οποίο αναπτύσσεται η έννοια της ολοκληρωμένης διαχείρισης.

Αυτά είναι οι υπηρεσίες εξυπηρέτησης, (κανονισμών) ρύθμισης και σχεδιασμού και οι υποστηρικτικοί οργανισμοί.

- ❑ **Οι υπηρεσίες εξυπηρέτησης** (*service providers*) είναι αυτές που έχουν την άμεση ευθύνη για την διαχείριση του νερού και τις σχετικές με αυτό υπηρεσίες.
- ❑ **Οι υπηρεσίες ρύθμισης** (*regulators*) έχουν την ευθύνη της ρύθμισης των τιμών, της ποιότητας, των θεμάτων που σχετίζονται με την δημόσια υγεία και τα επίπεδα εξυπηρέτησης.
- ❑ **Οι υπηρεσίες σχεδιασμού και συντονισμού** (*planners and coordinators*) έχουν την ευθύνη του σχεδιασμού και των συντονιστικών δράσεων που δεν σχετίζονται με τις υπηρεσίες ή την ρύθμιση.
- ❑ **Οι οργανισμοί υποστήριξης** (*support organizations*) προσφέρουν ποικίλες υπηρεσίες που αναφέρονται σε έρευνα, επιστημονική και τεχνική υποστήριξη, και πληροφορίες και δεδομένα.

Η έννοια της διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι πολύπλοκη, όχι μόνο λόγω των διαφορετικών υπηρεσιών που εμπλέκονται σε αυτή αλλά και επειδή ο ίδιος ο όρος «διαχείριση» σημαίνει διαφορετικά πράγματα για διαφορετικούς ανθρώπους. Επιπλέον η έννοια της «ολοκληρωμένης διαχείρισης» προσδίδει επιπλέον δυσκολίες. Για παράδειγμα, από *πολιτικής άποψης*, υπάρχουν οριζόντιες και κάθετες διαστάσεις του προβλήματος. Οριζόντιες σχέσεις δημιουργούνται ανάμεσα σε υπηρεσίες του ίδιου επιπέδου, ενώ κάθετες ανάμεσα στα διαφορετικά επίπεδα διαχείρισης, για παράδειγμα τοπικό και εθνικό επίπεδο. Έτσι, η πολιτική βούληση για ολοκληρωμένη διαχείριση επικεντρώνεται ακριβώς σε αυτόν τον οριζόντιο και κάθετο συντονισμό.

3.6.3 Ποσοτικές και ποιοτικές διαστάσεις

Τα ζητήματα που αφορούν την διαχείριση των υδατικών πόρων έχουν ποσοτικές και ποιοτικές διαστάσεις. Όσον αφορά τις **ποσοτικές διαστάσεις**, αυτές σχετίζονται κυρίως με την ζήτηση νερού. Το κυρίαρχο στοιχείο είναι αν η λεκάνη απορροής διαθέτει και θα διαθέτει στο μέλλον τις επαρκείς ποσότητες νερού ώστε να καλυφθούν πλήρως οι ανάγκες σε νερό. Είναι αλήθεια ότι συχνά η αδυναμία κάλυψης των αναγκών σε νερό οδηγεί στην διαδικασία ανάπτυξης διαχειριστικών σχεδίων των υδατικών πόρων.

Γενικότερα, και όσον αφορά την ποσοτική διάσταση της διαχείρισης, τίθενται στόχοι ώστε να αντιμετωπισθούν τα παρακάτω ζητήματα / ερωτήματα:

1. Τι αναλογία ασφαλούς ετήσιας παροχής είναι απαιτούμενη ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες σε νερό;
2. Πόση είναι η εκτιμημένη ποσότητα απαιτούμενου νερού που καταναλώνεται, χωρίς να γυρνάει στο σύστημα για επαναχρησιμοποίηση;
3. Πώς είναι πιθανό να αλλάξουν στο μέλλον οι λόγοι παροχής – ζήτησης εξαιτίας μιας ενδεχόμενης αύξησης του πληθυσμού, ρυθμού κατανάλωσης (που μπορεί να σχετίζεται με παράγοντες όπως αύξηση του κατά κεφαλήν εισοδήματος, αλλαγή πολιτικής κλπ), ή κλιματικής αλλαγής;

Η ποιοτική διάσταση του ζητήματος είναι περισσότερο πολύπλοκη, αφού ο ίδιος ο όρος ποιότητα νερού είναι υποκειμενικός και ερμηνεύεται διαφορετικά από τους διαφορετικούς χρήστες και τους διαφορετικούς φορείς που εμπλέκονται στη διαχείριση των υδατικών πόρων. Η μεγαλύτερη ασυμφωνία παρατηρείται στα αποδεκτά όρια κατά την ανίχνευση διαφόρων ουσιών, όπως για παράδειγμα μέταλλα ή βιομηχανικές οργανικές ενώσεις. Παράλληλα, υπάρχουν ασυμφωνίες ακόμα και στους ορισμούς, όπως για παράδειγμα τι σημαίνει τοξικότητα ή πώς ερμηνεύονται τα όρια, δηλαδή είναι τα μέγιστα επιτρεπτά ή αποτελούν όρια για τις βέλτιστες συνθήκες και αν ναι, για ποιον, για τον άνθρωπο (πόσιμο νερό) ή για την υδρόβια πανίδα;

Είναι σημαντικό όμως να γίνει κατανοητό ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα ποιοτικά πρότυπα (quality standards) τα οποία αποτελούν απαίτηση, η οποία διασφαλίζεται με νόμο ή διάταγμα, και στους ποιοτικούς στόχους, αντικείμενα, κριτήρια, οδηγίες τα οποία δεν έχουν κανένα νομοθετικό βάρος και θεσπίζονται μόνο για να αντανakλούν τις ιδανικές συνθήκες κατάστασης υδάτων.

Η πολυπλοκότητα της ποιοτικής διάστασης της διαχείρισης υπογραμμίζεται, αν λάβει κανείς υπόψη του τα παρακάτω:

- ❑ Στις αναπτυσσόμενες χώρες, 90% των αστικών λυμάτων και 70% των βιομηχανικών καταλήγει ανεπεξέργαστο στους διάφορους υδάτινους αποδέκτες.
- ❑ Υποβάθμιση των υδάτινων οικοσυστημάτων θεωρείται οποιαδήποτε διαταραχή της φυσικής τους ισορροπίας και της ικανότητας αναπαραγωγής τους.
- ❑ Υποβάθμιση της ποιότητας του νερού θεωρείται οποιαδήποτε επιβάρυνσή του με ύλη ή ενέργεια, η οποία επιφέρει αλλαγές που επηρεάζουν αρνητικά τις διαδικασίες αυτοκαθαρισμού του.

Σε πολλές περιοχές του πλανήτη επικρατεί η τάση να θεωρούνται υδατικοί πόροι τα αστικά υγρά απόβλητα. Η θεώρηση αυτή, όταν συνδυάζεται με τον αξιόπιστο σχεδιασμό και λειτουργία των αντιστοίχων έργων ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης, συμβάλλει (Αγγελάκης και Tsobanoglous, 1995):

- ❑ Στην ανάπτυξη νέων πηγών νερού
- ❑ Στην προστασία ποιοτικώς υποβαθμισμένων υδατικών σωμάτων
- ❑ Στη μείωση του κόστους του νερού και στην αυξημένη αξιοπιστία υδατοπρομήθειας

Η ποιότητα των υδάτων μελετάται και καθορίζεται σε σχέση με τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του νερού.

Είναι προφανές ότι οι απαιτήσεις για την ποιότητα του νερού διαφοροποιούνται, ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται.

3.7 Ο τομέας του νερού στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, χώρα μικρή σε έκταση, με έντονα ιδιόμορφη όμως γεωμορφολογική διάρθρωση λόγω του έντονου αναγλύφου της και το μεγάλο ανάπτυγμα ακτών, περιλαμβάνει μικρές λεκάνες απορροής που απαιτούν διαφορετική διαχειριστική πολιτική. Με το Ν. 1739/87 θεσμοθετήθηκε η διαίρεση της χώρας σε 14 υδατικά διαμερίσματα (Υπ. Αν., 1997), για λόγους οργανωτικούς και διοικητικούς, η πολυδιάσπαση όμως των αρμοδιοτήτων, των σχετικών με τους υδατικούς πόρους φορέων και η αδυναμία συντονισμού δράσης των φορέων αυτών λόγω των ανταγωνιστικών δραστηριοτήτων στη χρήση νερού, συντηρεί ένα καθεστώς έλλειψης συντονισμού στον τομέα της διαχείρισης (Υπ. Αν., Ν1739/1987, Υπ. Αν, Ν2503/1997, Υπ. Αν, Π.Δ. 60/1998, Νόμος 3199/2003).

Ειδικότερα, τα σημαντικότερα προβλήματα που μπορεί κανείς να επισημάνει σχετικά με την κατάσταση στην Ελλάδα είναι:

- ❑ Η δυσκολία και έλλειψη συστηματικής και αξιόπιστης καταγραφής και αξιολόγησης των φυσικών και τεχνητών υδατικών συστημάτων από ποσοτική και ποιοτική άποψη, καθώς και η έλλειψη επαρκών μετρήσεων υδρολογικών, μετεωρολογικών, υδρογεωλογικών και ποιοτικών παραμέτρων.
- ❑ Η έλλειψη ορθολογικά οργανωμένου εθνικού δικτύου συλλογής πληροφοριών των φυσικών δεδομένων και ενιαίας βάσης για την καταχώρηση τους, με αποτέλεσμα την ατελή γνώση των διαφόρων συνιστωσών τον υδρολογικού κύκλου, παρά το μεγάλο αριθμό φορέων που ασχολούνται με τις μετρήσεις και τον σημαντικό αριθμό των σχετικών σταθμών. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί η Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας, (ΕΤΥΜΠ), (Μιμίκου, 2000) η οποία αποτέλεσε μεν ένα σημαντικό βήμα προς αυτή τη κατεύθυνση, η καθυστέρηση όμως της επικαιροποίησής της με τα στοιχεία των τελευταίων ετών και η καθυστέρηση της επιχειρησιακής της λειτουργίας συντηρεί την κατάσταση της μη οργάνωσης στον τομέα των υδατικών πόρων.
- ❑ Η έλλειψη και δυσκολία οριοθέτησης, στο μέτρο του δυνατού, ανεξάρτητων υδρογεωλογικών λεκανών ανά υδατικό διαμέρισμα.
- ❑ Η αλληλεπίδραση των παράκτιων υδάτων εξαιτίας παραπλήσιων ρεμάτων ή ποταμών που απορρέουν στη θάλασσα
- ❑ Η δυσκολία και έλλειψη καταγραφής των υφιστάμενων χρήσεων και μέτρησης των ποσοτήτων νερού που χρησιμοποιείται για κάθε χρήση.
- ❑ Η δυσκολία συντονισμού μεταξύ των αρμόδιων φορέων σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο, όσον αφορά σε μελέτες και έρευνες υποδομής σχετικές με τους υδατικούς πόρους.
- ❑ Η ευκαιριακή και ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση μεμονωμένων υδατικών πόρων από παραπάνω τον ενός υδατικού διαμερίσματος, χωρίς εμπεριστατωμένη γνώση των δυνατοτήτων του που οδηγεί στην βαθμιαία ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση του.

- ❑ Η χαλαρή σύνδεση και εναρμόνιση των υφιστάμενων προγραμμάτων ανάπτυξης με τις ανάγκες διαχείρισης νερού, από άποψη ποσότητας και ποιότητας.
- ❑ Η δυσκολία πραγματοποίησης μακροχρόνιων προβλέψεων μεγεθών ή τάσεων υδρολογικών, πληθυσμιακών, οικονομικών, τομέων παραγωγής κλπ, στα πλαίσια του αναπτυξιακού προγραμματισμού, που να επιτρέπουν αντίστοιχες προβλέψεις σε έργα αξιοποίησης.
- ❑ Η δυσκολία ή και ανυπαρξία ολιστικής αντιμετώπισης των προβλημάτων σχεδιασμού και διαχείρισης των υδατικών πόρων.
- ❑ Η ανυπαρξία μηχανισμού μεταφοράς και ενοποίησης των κατά υδατικό διαμέρισμα στόχων και πολιτικών σε ευρύτερες μονάδες χώρου (upscaling) για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή συνδυασμένης οικονομικής ανάπτυξης.
- ❑ Η καθυστέρηση κάλυψης υποχρεώσεων που απορρέουν από την εφαρμογή κοινοτικών οδηγιών.
- ❑ Η ανάγκη εξασφάλισης ορθολογιστικής διαχείρισης των διασυνοριακών υδάτων και την από κοινού χρήση αυτών με βάση τις υδατικές ανάγκες των εμπλεκόμενων χωρών.
- ❑ Η έλλειψη ενιαίου Διαχειριστικού Φορέα στον τομέα νερού.

4. Εκτίμηση και Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε Μεταβαλλόμενο Περιβάλλον και Κλίμα

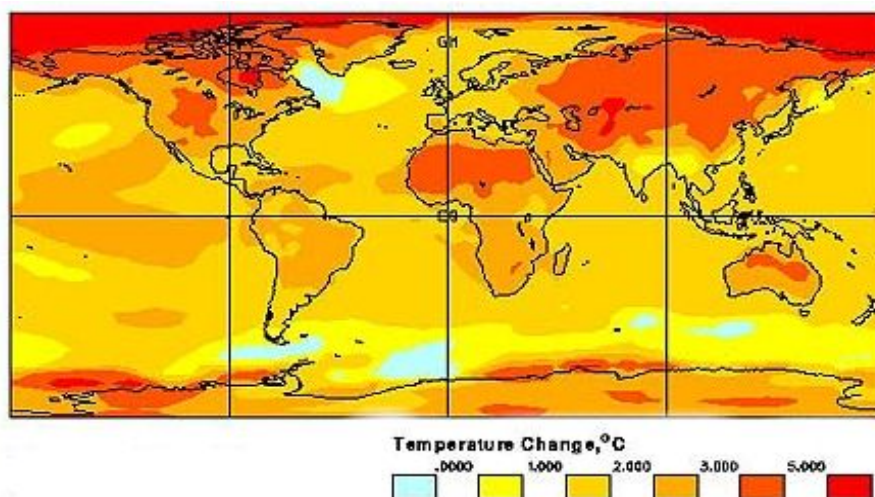
4.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση του ενδιαφέροντος και της ανησυχίας των ειδικών σε όλη τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, σχετικά με τις αλλαγές στον καιρό, το κλίμα και γενικότερα με στο περιβάλλον (όπως για παράδειγμα αλλαγές χρήσεων γης), καθώς επίσης και για τις επιπτώσεις των αλλαγών αυτών στους υδατικούς πόρους και τα έργα αξιοποίησής τους.

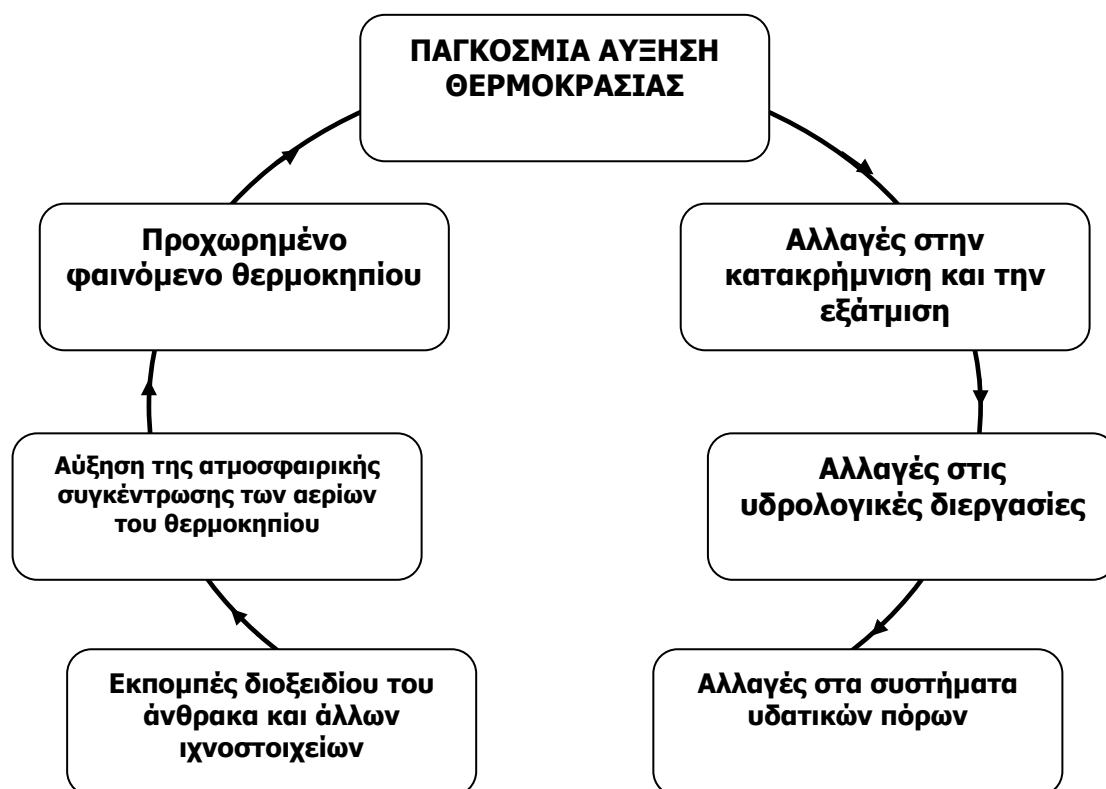
Η καθημερινά αυξανόμενη συγκέντρωση ορισμένων αερίων στην ατμόσφαιρα της γης, όπως για παράδειγμα το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μονοξείδιο του αζώτου (NO), το μεθάνιο (CH_4) και οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs), μπορεί εν γένει να προκαλέσει αλλαγή του κλίματος της γης. Τα αέρια αυτά δημιουργούν έναν μανδύα που εγκλωβίζει την εισερχόμενη ή δημιουργούμενη ακτινοβολία στη γη, προκαλώντας έτσι την αύξηση της θερμοκρασίας τόσο της ατμόσφαιρας όσο και της επιφάνειας της γης, καθώς και την μεταβολή πολλών κλιματικών μεταβλητών. Το φαινόμενο αυτό είναι ευρύτερα γνωστό ως φαινόμενο του θερμοκηπίου και θεωρείται ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστεί τα επόμενα χρόνια.

Έχει ήδη παρατηρηθεί ότι η μέση θερμοκρασία του πλανήτη έχει αυξηθεί κατά 0.5-0.7 °C (Mimikou et al., 1995) από την αρχή του αιώνα, ενώ πρόσφατες εκτιμήσεις από μοντέλα προσομοίωσης του παγκοσμίου κλίματος συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι ο διπλασιασμός της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων στην ατμόσφαιρα, μπορούν να αυξήσουν την ετήσια θερμοκρασία κατά 3 ± 1.5 °C κατά τη διάρκεια των επόμενων 50 με 100 χρόνων, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο Σχήμα 4-1. (US National Academy of Sciences, 1977, 1979, 1983; Clark, 1982). Προφανώς, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στις προβλέψεις αυτές κυρίως όσον αφορά τα ποσοστά αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά, είναι απόλυτα βέβαιη η κλιματική αλλαγή με άνοδο της θερμοκρασίας, αλλά τα διάφορα σενάρια μέσα από τα οποία θα ποσοτικοποιηθεί η μεταβολή αυτή, ποικίλουν στις διάφορες μαθηματικές και φυσικές προσεγγίσεις του θέματος.

Από την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, έχουν εκτιμηθεί και αναμένονται συνεχείς επιπτώσεις στον κύκλο του νερού, όπως σχηματικά φαίνεται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-1: Μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας από την περίοδο 1970-1990 μέχρι τη περίοδο 2040-2060 (Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis).



Σχήμα 4-2: Ο υδρολογικός κύκλος στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Εκτός όμως από τις πιέσεις που δέχεται το φυσικό περιβάλλον ως αποτέλεσμα της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου, μια επιπρόσθετη πίεση στο φυσικό περιβάλλον και τους υδατικούς πόρους αποτελούν οι αλλαγές των χρήσεων γης. Ως αλλαγή χρήσεων γης νοούνται τόσο οι αλλαγές που προκαλούνται από ανθρωπογενή παρέμβαση (καλλιέργειες, αστικοποίηση, κλπ) όσο και αυτές που προκαλούνται από φυσικά αίτια (πχ πυρκαγιές).

Οι αλλαγές χρήσεων γης δρουν καταλυτικά στον κύκλο του νερού, μεταβάλλοντας το ποσό του νερού που κατακρατείται, διηθείται και απορρέει επιφανειακά και υπόγεια. Για παράδειγμα, σε μια περιοχή υπήρχε δάσος το οποίο καταστράφηκε από πυρκαγιά. Τα όμβρια ύδατα ενώ πριν συγκρατούνταν από τα δέντρα και μέσω της διήθησης εμπλούτιζαν τα υπόγεια ύδατα, τώρα απορρέουν επιφανειακά. Η μεγαλύτερη ποσότητα ομβρίων που απορρέει επιφανειακά προκαλεί μεγάλη διάβρωση και ταυτόχρονα αποτρέπει τον εμπλουτισμό των υπογείων υδάτων με σημαντικές επιπτώσεις (πχ. κατάργηση πηγών και αντλήσεων).

4.2 Προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση κλιματικών αλλαγών

Οι κλιματικές αλλαγές λόγω του σταθερά αυξανόμενου προβλήματος του θερμοκηπίου, ποσοτικοποιούνται σήμερα με τη χρήση διαφόρων μαθηματικών μοντέλων που ποικίλουν από άποψη πολυπλοκότητας. Η ποικιλία αυτή που υπάρχει στα διάφορα μοντέλα, οφείλεται κυρίως στις εκάστοτε υποθέσεις, παραδοχές και απλοποιήσεις που γίνονται κάθε φορά στην προσπάθεια να μελετηθεί μια παράμετρος από το ευρύ φάσμα των κλιματικών αλλαγών. Εξάλλου η τεράστια πολυπλοκότητα του κλιματικού συστήματος καθιστά σχεδόν ανέφικτη την ακριβή προσομοίωσή του χωρίς την υιοθέτηση κάποιων απλοποιητικών παραδοχών.

Μια κατηγορία μοντέλων που επιτελούν τον παραπάνω στόχο, είναι και τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (GCMs) τα οποία κατατάσσονται σε μια ενδιάμεση κατηγορία από άποψη πολυπλοκότητας συγκρινόμενα με το σύνολο των υπαρχόντων μοντέλων. Τα GCMs είναι λεπτομερή, χρονικά εξαρτώμενα, τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης που περιέχουν λεπτομερείς αναπαραστάσεις των ατμοσφαιρικών κινήσεων και των ανταλλαγών θερμότητας καθώς επίσης και τις σημαντικές αλληλεπιδράσεις στεριάς - ωκεανού - πάγου.

Ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό των μοντέλων αυτών είναι οι πολλές βελτιώσεις που έχουν υποστεί κατά τη διάρκεια των (αρκετών) χρόνων εφαρμογής τους από πολλούς ερευνητές (Dickinson, 1982; Manabe, 1982; Hansen et al., 1983; Meehl, 1984; Mearns et al., 1990; κα). Τα GCMs χρησιμοποιούνται εκτενώς για την εκτίμηση των αλλαγών που προκαλεί το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) σε διάφορες κλιματικές και υδρολογικές μεταβλητές όπως η

θερμοκρασία, η κάλυψη των νεφών και των πάγων, η ροή της ακτινοβολίας, η διανομή των ατμών, η εξατμισοδιαπνοή, η βροχόπτωση, η απορροή και η εδαφική υγρασία (Μιμίκου, 1995).

Από άποψη ακρίβειας, θεωρούνται περισσότερο ακριβή σε σχέση με άλλα μοντέλα και είναι η πιο σημαντική μέθοδος άντλησης πληροφοριών σχετικά με την πιθανή κλιματική αλλαγή σε παγκόσμια κλίμακα εξαιτίας της χαμηλής τους ανάλυσης. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα να αντληθούν με τη χρήση τους αξιόπιστες πληροφορίες και σε τοπική κλίμακα. Εντούτοις οι μεγάλες τους απαιτήσεις σε υπολογιστική υποδομή η οποία θα αυξήσει την αξιοπιστία τους, δρα ως ο βασικότερος περιοριστικός παράγοντας της διάδοσής τους.

Τα GCMs έχουν βέβαια και άλλα μειονεκτήματα όπως για παράδειγμα η ανεπαρκής και περιορισμένη αναπαράσταση της νέφωσης, της επιφανειακής υδρολογίας, της εδαφικής υγρασίας και της ταραχώδους μεταφοράς θερμότητας και η υπεραπλούστευση της μοντελοποίησης των ωκεανών (North et al., 1981). Επιπλέον, λόγω της χονδρικής ανάλυσης των μοντέλων αυτών καθίστανται ακατάλληλα για υδρολογικές μελέτες τοπικού χαρακτήρα. Ανεξάρτητα όμως από τις αδυναμίες αυτές, οι προβλέψεις των μοντέλων σχετικά με τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία, αποτελούν πιθανά σενάρια κλιματικής αλλαγής και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα σε άλλα πιο λεπτομερή τοπικά μοντέλα (regional hydrologic models).

4.3 Κλιματική αλλαγή. Επιπτώσεις σε υδατικούς πόρους και έργα αξιοποίησής τους.

Μια από τις πιο σημαντικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής που θα γίνει αισθητή τόσο σε παγκόσμια όσο και σε τοπική κλίμακα, θα είναι η μεταβολή των κύριων κλιματικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία (άρα και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή), η κατακρήμνιση και η νεφοκάλυψη, οι επακόλουθες επιδράσεις αυτών στον υδρολογικό κύκλο και οι αλλαγές στην ποσότητα και την ποιότητα των υδατικών πόρων, στη στάθμη της θάλασσας, στα φυτά και στο φυσικό περιβάλλον. Οι κλιματικές αλλαγές αυτές συνεπάγονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στη μελλοντική διαχείριση των υδατικών πόρων, που θα συνοδεύονται από σοβαρά περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά προβλήματα.

Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης, θα επιφέρει σημαντικές εποχικές και γεωγραφικές διαφοροποιήσεις. Αναμένεται μεγαλύτερη θερμοκρασιακή αύξηση στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη απ' ότι στους τροπικούς και μικρότερη στους ωκεανούς σε σχέση με τη στεριά. Εξαιτίας της φυσικής συσχέτισης μεταξύ της

θερμοκρασίας και της πίεσης κορεσμού των υδρατμών, θερμότερο κλίμα προκαλεί υγρότερη ατμόσφαιρα και επομένως μια γενικευμένη αύξηση των κατακρημνίσεων που θα ποικίλει ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και την εποχή. Αυτό σημαίνει ότι ετησίως και ιδιαίτερα το χειμώνα, η απορροή μπορεί να αυξηθεί σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Από την άλλη, το θερμότερο κλίμα συνεπάγεται αυξημένη εξατμισοδιαπνοή, η οποία επιδρά άμεσα στην απορροή και στις συνθήκες εδαφικής υγρασίας ιδιαίτερα το καλοκαίρι, και επιδεινώνει σημαντικά την εδαφική ξηρασία και μειώνει την ποσότητα των υπογείων υδάτων.

Πρέπει να τονισθεί όμως, ότι οι προβλεπόμενες εντοπικές μεταβολές της θερμοκρασίας και ακόμα περισσότερο των κατακρημνίσεων και της εξατμισοδιαπνοής, δεν παρουσιάζουν ομαλή κατανομή και ποικίλουν από μοντέλο σε μοντέλο. Γίνεται έτσι κοινά αποδεκτό ότι οι αλλαγές σε τοπική κλίμακα δεν έχουν προσομοιωθεί ακόμα αξιόπιστα και γι' αυτό το λόγο τα σημερινά μοντέλα δε μπορούν να παράσχουν αξιόπιστες προβλέψεις τοπικών κλιματικών αλλαγών και επιπτώσεων.

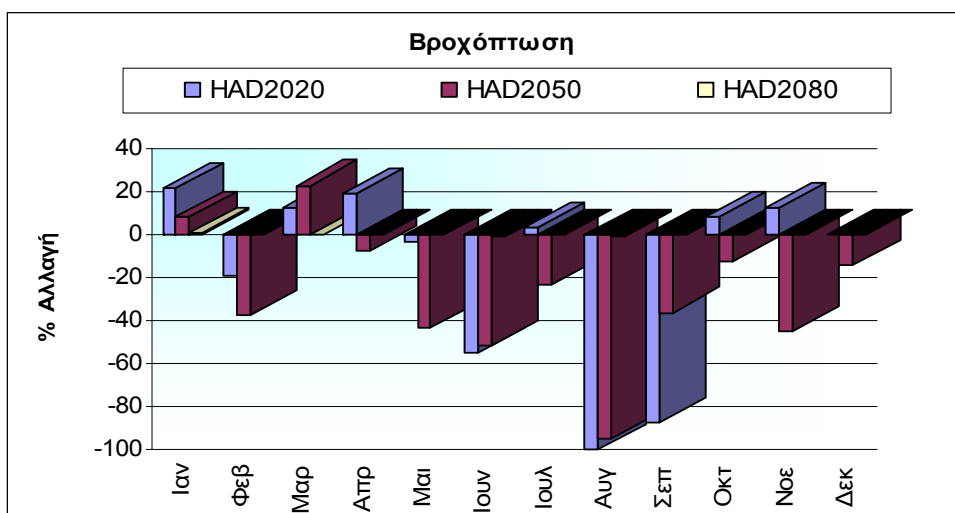
4.4 Ευαισθησία των κύριων κλιματικών και υδρολογικών μεταβλητών

Οι βασικές κλιματικές και υδρολογικές μεταβλητές που αναμένεται να μεταβληθούν λόγω του φαινομένου της αύξησης της θερμοκρασίας, είναι συνοπτικά οι παρακάτω (Μιμίκου, 1995):

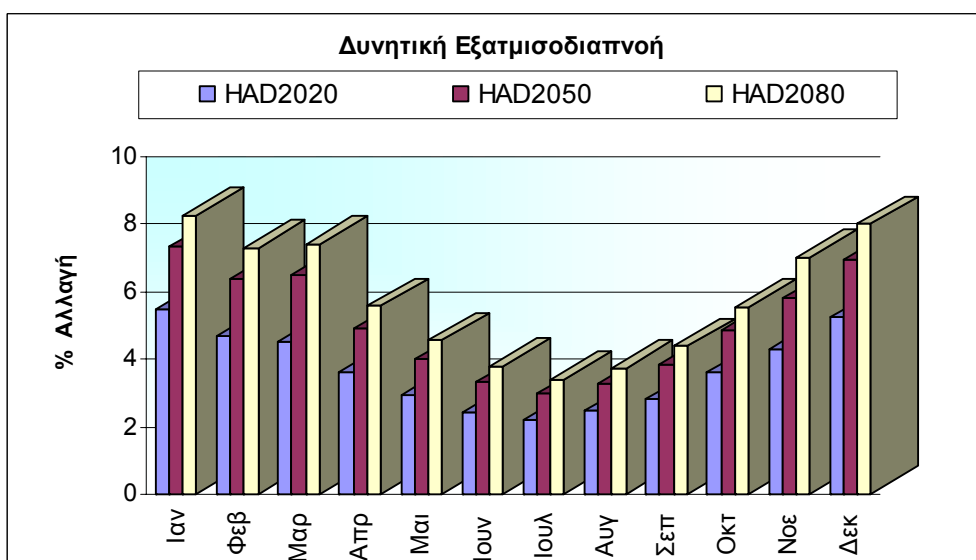
4.4.1 Βροχόπτωση και εξατμισοδιαπνοή

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη βροχόπτωση και στην εξατμισοδιαπνοή είναι εν γένει πιο πολύπλοκες απ' ότι στη θερμοκρασία του αέρα. Λόγω της σχέσης μεταξύ της θερμοκρασίας και της υγρασίας της ατμόσφαιρας, η παγκόσμια θερμοκρασιακή άνοδος θα έχει ως αποτέλεσμα τη γενική αύξηση της βροχόπτωσης όπως έχει ήδη αναφερθεί, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και την εποχή, καθώς επίσης και την αύξηση της εξατμισοδιαπνοής.

Παράλληλα, αναμένεται μια πτώση του ποσοστού της χιονόπτωσης ως προς τη συνολική κατακρήμνιση στη χειμερινή περίοδο. Λόγω όμως της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων της πρόγνωσης των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας σε τοπικό επίπεδο όσον αφορά τις παραπάνω κλιματικές μεταβλητές, ένα τέτοιο συμπέρασμα δε μπορεί να εξαχθεί με απόλυτη σιγουριά για όλες τις περιοχές. Για παράδειγμα στην Ελλάδα, έχει εκτιμηθεί μείωση της βροχόπτωσης σε όλους τους μήνες πλην τους χειμερινούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3, με παράλληλη αύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και θερμοκρασίας (βλ. Σχ. 4-4, 4-5).

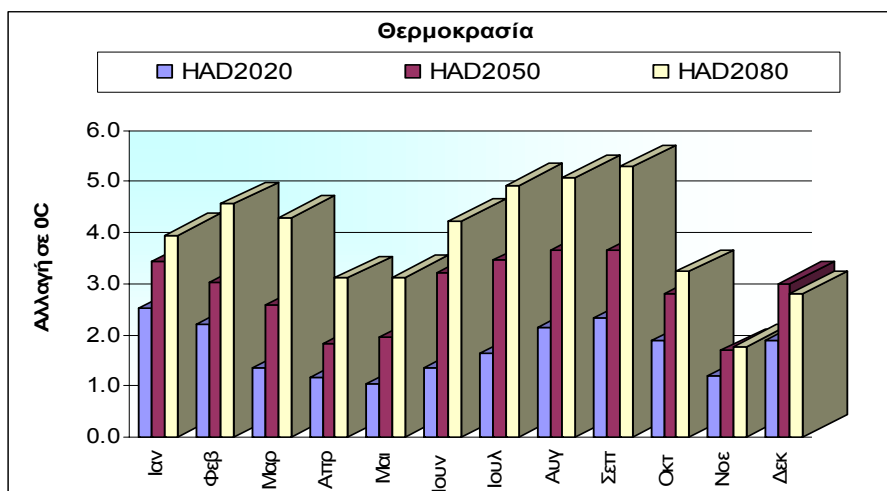


Σχήμα 4-3: Αλλαγή στη Βροχόπτωση (%) σύμφωνα με το σενάριο HadCM2 για 3 διαφορετικά έτη στόχους (2020, 2050 και 2080). Παρατηρείται μείωση για σχεδόν όλους τους μήνες και έτη στόχους πλην των χειμερινών. (Φωτόπουλος, 2000)



Σχήμα 4-4: Αύξηση (%) της Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με το σενάριο HadCM2 για 3 διαφορετικά έτη στόχους (2020, 2050 και 2080). Παρατηρείται αύξηση για όλους τους μήνες και έτη στόχους. (Φωτόπουλος, 2000)

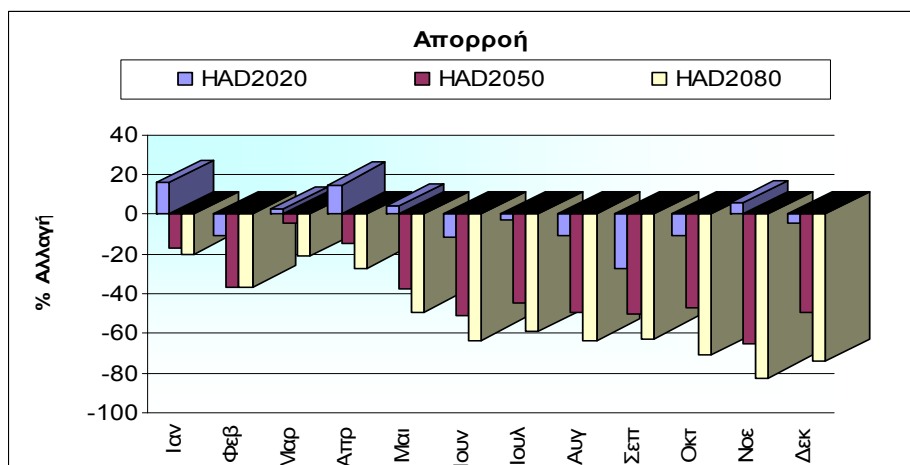
Τέλος μια άλλη σημαντική επίπτωση είναι η ενδεχόμενες επιρροές της αλλαγής αυτής του κλίματος στη ένταση και στη συχνότητα των καταιγίδων. Αποτελέσματα από μια έρευνα σε μια περιοχή των δυτικών Ηνωμένων Πολιτειών (Chagnon and Huff, 1992) έδειξαν ότι θερμότερες και υγρότερες κλιματικές συνθήκες, όπως αυτές που προβλέπονται από τα GCMs, πιθανότατα συνοδεύονται από αύξηση της τάξης του 10% των καταιγίδων με περίοδο επαναφοράς από 5 έως 10 έτη.



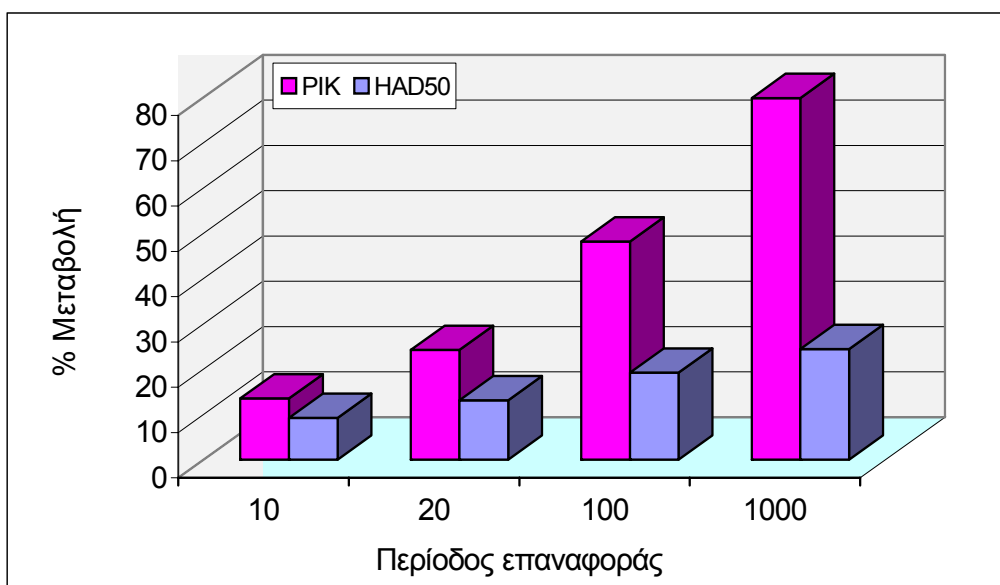
Σχήμα 4-5: Αύξηση της Θερμοκρασίας σε °C σύμφωνα με το σενάριο HadCM2 για 3 διαφορετικά έτη στόχους: 2020, 2050 και 2080. (Φωτόπουλος, 2000)

4.4.2 Απορροή και εδαφική υγρασία

Η αύξηση της χειμερινής βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τη μείωση της χιονόπτωσης, θα προκαλέσει αύξηση της χειμερινής απορροής κάνοντας έτσι διαθέσιμη περισσότερη εδαφική υγρασία το χειμώνα και την άνοιξη (αρχή άνοιξης) σε αντίθεση με το καλοκαίρι (Σχήμα 4-6). Η απορροή λόγω λιώσιματος χιονιού κατά τη διάρκεια της άνοιξης θα μειωθεί με παράλληλη μετατόπιση του φαινομένου αυτού από την άνοιξη προς το χειμώνα. Αυτό αναμένεται να έχει ως αποτέλεσμα την εντονότερη και πιο συχνή εμφάνιση των πλημμύρων κατά τη διάρκεια του χειμώνα και την αύξηση της υγρασίας το καλοκαίρι (Σχήμα 4-7).



Σχήμα 4-6: Αλλαγή στην απορροή (%) σύμφωνα με το σενάριο HadCM2 για 3 έτη στόχους (2020, 2050 και 2080). Παρατηρείται μείωση για όλους τους μήνες πλην των χειμερινών. (Φωτόπουλος, 2000)



Σχήμα 4-7: Ποσοστιαία (%) αύξηση των πλημμυρικών αιχμών για τα σενάρια PIK και HadCM2050 για περιόδους επαναφοράς 10, 20, 100 και 1000 ετών.

4.4.3 Υπόγεια νερά

Τα υπόγεια νερά διαδραματίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο και στο υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης, αφού λειτουργούν ως μια υπόγεια δεξαμενή που αποδίδει έναν αξιόλογο όγκο νερού κατά τη διάρκεια του χρόνου που δε βρέχει πολύ ή απορροφάει μεγάλες ποσότητες νερού από την απορροή κατά τη διάρκεια της περιόδου των έντονων βροχοπτώσεων.

Από τη στιγμή που η χειμερινή βροχόπτωση είναι η κύρια πηγή τροφοδοσίας των υπογείων υδάτων, είναι αναμενόμενο ότι στις περιοχές που η χειμερινή βροχόπτωση προβλέπεται να αυξηθεί, θα αντιστοιχεί και αύξηση του όγκου των υπογείων υδάτων, ενώ στις περιοχές που η χειμερινή βροχόπτωση προβλέπεται να μειωθεί λόγω ανόδου της θερμοκρασίας, θα ελαττωθεί η ποσότητα των υπογείων υδάτων. Αυτό εξάλλου σημαίνει μείωση της εαρινής απορροής λόγω μικρότερης επαναφόρτισης των επιφανειακών υδάτων από την υπόγεια δεξαμενή.

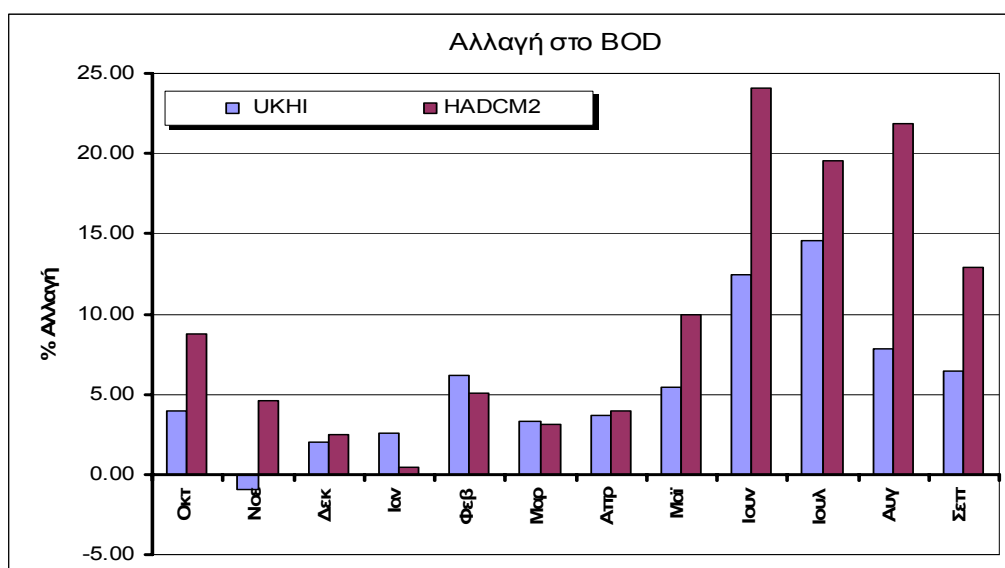
4.4.4 Στάθμη της θάλασσας

Η άνοδος της θερμοκρασίας σε παγκόσμια κλίμακα θα οδηγήσει σε άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας. Αυτό θα είναι το αποτέλεσμα της αύξησης του όγκου των υδάτων των ωκεανών που οφείλεται στους εξής λόγους (Oerlemans, 1989): στο λιώσιμο των πολικών πάγων και γενικά μεγάλων όγκων πάγου, στην αλλαγή της συσσώρευσης του χιονιού πάνω από τις παγωμένες πολικές επιφάνειες της Ανταρκτικής και της Γροιλανδίας, στη θερμική διαστολή των ωκεανών (WMO/ICSU 1990) και στην πιθανή αποσύνθεση της παγωμένης επιφάνειας της δυτικής Ανταρκτικής.

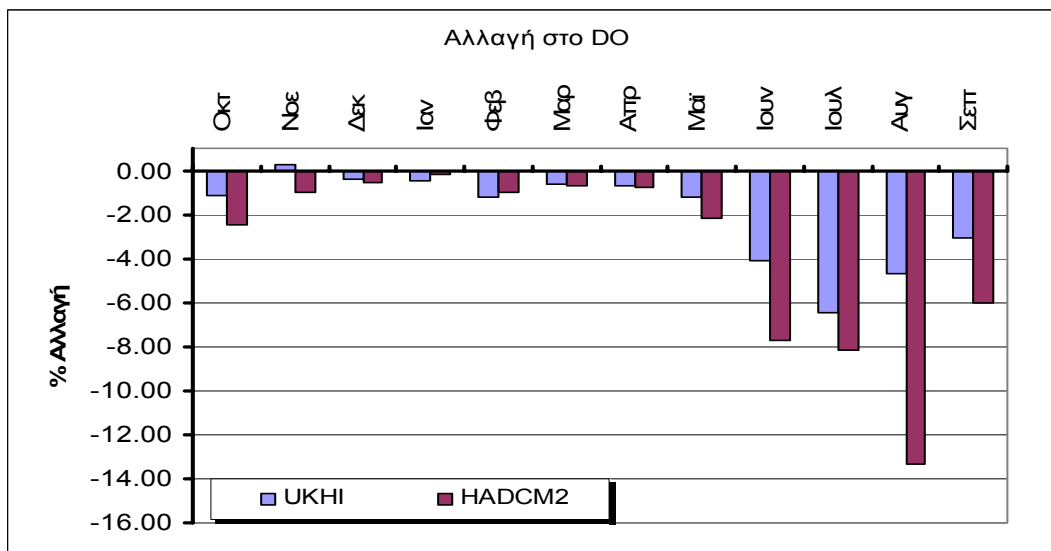
Μια τέτοια πιθανή άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας θα έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την εδαφική απώλεια παράκτιων περιοχών με κίνδυνο απώλειας ανθρώπινων ζώων και περιουσιών και την αλλαγή των εκβολών των ποταμών. Ταυτόχρονα, επιβαρύνονται τα υπόγεια ύδατα με θαλασσινό νερό λόγω της εισόδου του τελευταίου στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, επηρεάζοντας έτσι τόσο την ποιότητα όσο και την ποσότητά τους.

4.4.5 Ποιότητα νερού

Με την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνεται το διαλυμένο οξυγόνο στα υδάτινα σώματα (DO, Dissolved Oxygen, Σχήμα 4-9) και κατ' επέκταση αυξάνεται το βιοχημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (BOD) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-8, για διάφορα σενάρια που μελετήθηκαν σε ποτάμια της Ελλάδας.



Σχήμα 4-8: Ποσοστιαία αύξηση BOD για τα κλιματικά σενάρια UKHI και HadCM2 για το έτος 2050.



Σχήμα 4-9: Ποσοστιαία μείωση DO για τα κλιματικά σενάρια UKHI και HadCM2 για το έτος 2050.

4.5 Υδρολογικές επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε κλίμακα λεκάνης

Έχει ήδη αναφερθεί πως οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε τοπική κλίμακα (άρα και κλίμακα λεκάνης) σε υδρολογικές μεταβλητές όπως είναι η θερμοκρασία, η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή, δε μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Λόγω της ιδιαιτερότητας της κάθε λεκάνης, δεν είναι εφικτή η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων με τη χρήση των αποτελεσμάτων των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (GCMs), τα οποία δίνουν πληροφορίες για μια περιοχή η οποία μπορεί να καταλαμβάνει έκταση μερικών εκατοντάδων χιλιάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων, τη στιγμή που η έκταση μιας μέσης λεκάνης κυμαίνεται συνήθως σε μερικές εκατοντάδες έως χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα. Επιπλέον δεν είναι γνωστό αν οι παραδοχές που έχουν γίνει για την εφαρμογή των GCMs σχετικά με το διπλασιασμό ή τετραπλασιασμό της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα θα συμφωνούν με την ενδεχόμενη κλιματική αλλαγή που θα υποστεί η συγκεκριμένη περιοχή. (Webb and Wigley, 1985)

Έτσι οι υδρολογικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε κλίμακα λεκάνης, μπορούν να προβλεφθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια μόνο μέσω της χρήσης εντοπικών υδρολογικών μοντέλων. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από το γεγονός ότι υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία μοντέλων με μέτριες απαιτήσεις λειτουργίας (είσοδοι) πολύ πιο απλών από αυτών των GCMs και με δυνατότητα προσαρμογής σε διάφορες λεκάνες, μεταβάλλοντας μόνο ορισμένες από τις παραμέτρους τους. Μέσα από τη χρήση εντοπικών υδρολογικών μοντέλων, μπορούν να

εκτιμηθούν οι επιπτώσεις μιας ποικιλίας από σενάρια κλιματικής αλλαγής, κατασκευασμένα από μοντέλα GCM ή με άλλες μεθόδους. Τέλος, μπορούν να αναπτυχθούν μέθοδοι συνδυασμού τοπικών χαρακτηριστικών και αποτελεσμάτων των GCMs, οι οποίες μπορούν να εκμεταλλεύονται τη συνεχή βελτίωση των μοντέλων προσομοίωσης του παγκόσμιου κλίματος (Gleick, 1989).

Στον ακόλουθο Πίνακα 4-1, μπορεί να δει κανείς συνοπτικά την εκτίμηση της ευαισθησίας διαφόρων τομέων της διαχείρισης υδατικών πόρων στις κλιματικές αλλαγές, όπως έχουν προκύψει από διάφορες μελέτες σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης απορροής.

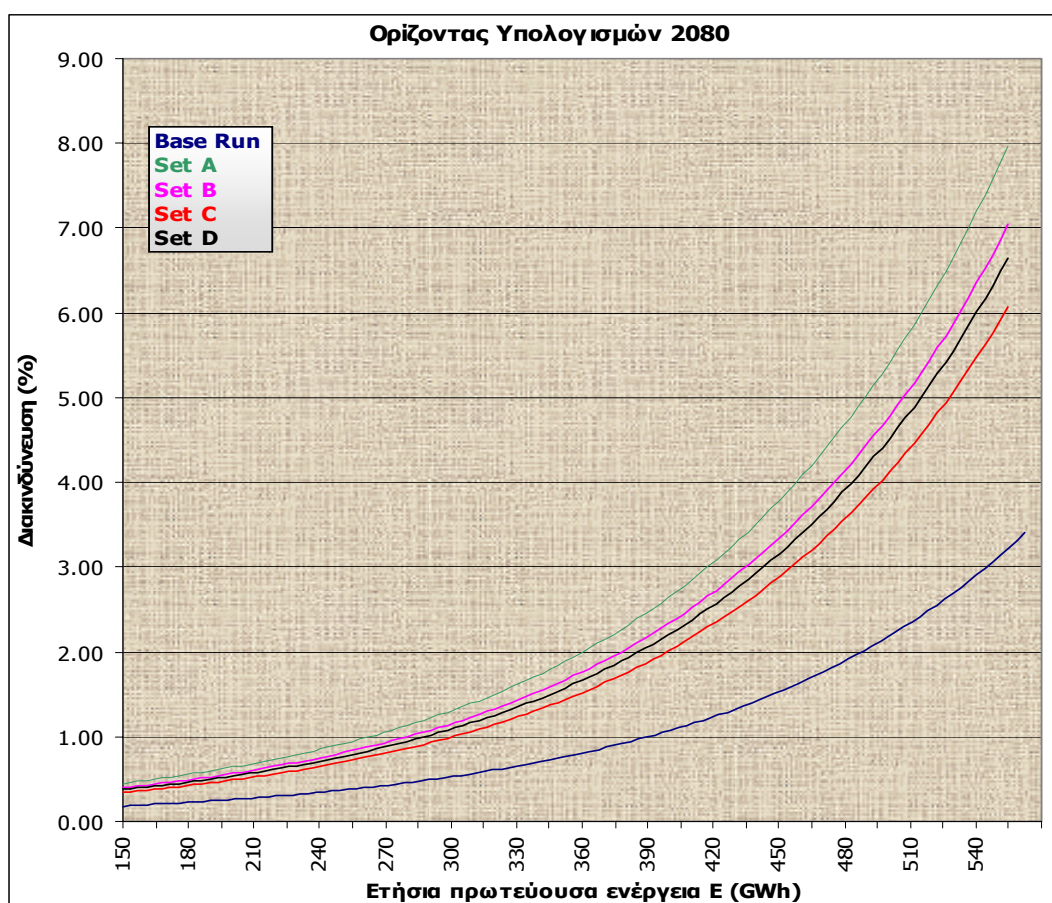
Πίνακας 4-1: Εκτίμηση της Ευαισθησίας Διάφορων Τομέων της διαχείρισης υδατικών πόρων στις κλιματικές αλλαγές (Arnell ,1989)

Δραστηριότητα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων	Μέγεθος Κλιματικής Αλλαγής				
	Υδρολογικές			Αυξημένη θερμοκρασία	Ψηλότερη στάθμη θάλασσας
	Συνολική απορροή	Εποχιακή κατανομή	Ακραία συμπεριφορά		
Αποθέματα Επιφανειακών νερών («μικρή αποθηκευτικότητα»)	*	**	**	**	
Αποθέματα Επιφανειακών νερών («μεγάλη αποθηκευτικότητα»)	**	*	**	*	
Αποθέματα Υπόγειων Νερών	**	**	**	*	*
Νερά για Αγροτική Χρήση	**	**	**	**	
Διαχείριση Πλημμυρών		*	**		*
Αποστράγγιση αστικών νερών βροχής			**		*
Ασφάλεια ταμιευτήρων		*	**		
Αποστράγγιση περιοχών χαμηλού υψομέτρου	**	**	**		**
Παραγωγή Ενέργειας	**	**	*		
Ποιότητα Νερών	*	**	**	**	
Διάχυση Ρυπαντών	*	**	**	*	
Ναυσιπλοΐα Ενδοχώρας	*	**			
Αλιεία		**	*	**	
Αναψυχή		*		*	
Διείσδυση θάλασσας στις εκβολές ποταμών	*	*			**
Διαχείριση Υδατικών οικοσυστημάτων		**	**	**	

- μικρή ευαισθησία * μέτρια ευαισθησία ** μεγάλη ευαισθησία

4.6 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής σε έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων

Η κλιματική αλλαγή, αναμένεται να επηρεάσει και τα έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων (Σχήμα 4-10). Έχουν γίνει πολλές μελέτες για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης αυτής σε ταμιευτήρες, οι οποίοι και αποτελούν την κυριότερη και πλέον πολυδάπανη κατηγορία έργων αξιοποίησης υδατικών πόρων. Σύμφωνα με τις μελέτες αυτές, εμφανίζονται στους ταμιευτήρες αυξημένα επίπεδα διακινδύνευσης στην παραγωγή της ετήσιας πρωτεύουσας ενέργειας (τόσο της ελάχιστης όσο και της μέσης εγγυημένης). Η αύξηση της διακινδύνευσης είναι ανάλογη με την αύξηση των ετών προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα.



Σχήμα 4-10: Η μεταβολή της ετήσιας πρωτεύουσας ενέργειας E (GWh) σε συνάρτηση με τη διακινδύνευση (%) για το έτος 2080. (Φωτόπουλος, 2000)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση της καθαρής αποθηκευτικής ικανότητας του ταμιευτήρα και της διακινδύνευσης, η οποία είναι ουσιαστικά ένας δείκτης που εκφράζει τη μεταβολή που θα πρέπει να υποστεί η καθαρή αποθηκευτική ικανότητα στον ταμιευτήρα, ώστε να διατηρηθούν τα επίπεδα διακινδύνευσης στις ίδιες τιμές μετά την εφαρμογή της κλιματικής αλλαγής.

Για τον ταμιευτήρα του Πολυφύτου στον Ιλαρίωνα, βρέθηκε ότι για την διατήρηση της διακινδύνευσης κατά την παραγωγή της ελάχιστης και μέσης ετήσιας εγγυημένης ενέργειας, για τα έτη 2050 και 2080, η αύξηση στην αποθηκευτικότητα του ταμιευτήρα πρέπει να είναι από 5 έως 30% (Πίνακας 4-2).

Πίνακας 4-2: Μεταβολές της καθαρής αποθηκευτικής ικανότητας % για διατήρηση της διακινδύνευσης στην παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας στα επίπεδα αναφοράς.

Μεταβλητή	2050	2080
Ελάχιστη E (199.4 GWh)	5%	9%
Μέση E (515 GWh)	11%	29%

4.7 Αλλαγή χρήσεων γης. Επιπτώσεις σε υδατικούς πόρους και έργα αξιοποίησής τους

Ο όρος «χρήση γης» περιλαμβάνει όχι μόνο τη φυσική φυτοκάλυψη, αλλά και τον τρόπο που ο άνθρωπος την χρησιμοποιεί. Ως «αλλαγή χρήσεων γης» νοείται η μεταβολή της φυτοκάλυψης ή του τρόπου που γίνεται η εκμετάλλευσή της (Turner B.L et al., 1993). Οι αλλαγές χρήσεων γης μπορούν να οφείλονται σε φυσικές αλλά και ανθρωπογενείς αιτίες. Οι φυσικές αλλαγές χρήσεων γης, συνήθως συμβαίνουν σταδιακά και οφείλονται στην αλλαγή των φυσικών ισορροπιών, που ευνοούν ή όχι την ανάπτυξη ενός τύπου φυτοκάλυψης. Οι ανθρωπογενείς αλλαγές είναι πιο ραγδαίες και μπορεί να είναι προγραμματισμένες, όπως για παράδειγμα η αστικοποίηση μιας λεκάνης απορροής, ή τυχαίες, όπως η αποδάσωση εξαιτίας πυρκαγιάς.

Οι αλλαγές των χρήσεων γης μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις σε αρκετούς τομείς της ανθρώπινης ζωής, όπως στον οικονομικό, κοινωνικό και ψυχολογικό τομέα. Ένας τρόπος με τον οποίο οι αλλαγές στη φυτοκάλυψη επιδρούν στο περιβάλλον και έμμεσα στον άνθρωπο, είναι με τη μεταβολή του υδρολογικού κύκλου. Είναι γνωστά, για παράδειγμα, τα φαινόμενα των πλημμύρων, που εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της αποδάσωσης λόγω πυρκαγιάς, αλλά και της έντονης αστικοποίησης. Η πρόβλεψη των αποτελεσμάτων τέτοιου είδους αλλαγών χρήσεων γης, έχει καθοριστική σημασία, στην κατεύθυνση της πρόληψης των αρνητικών συνεπειών και προστασίας.

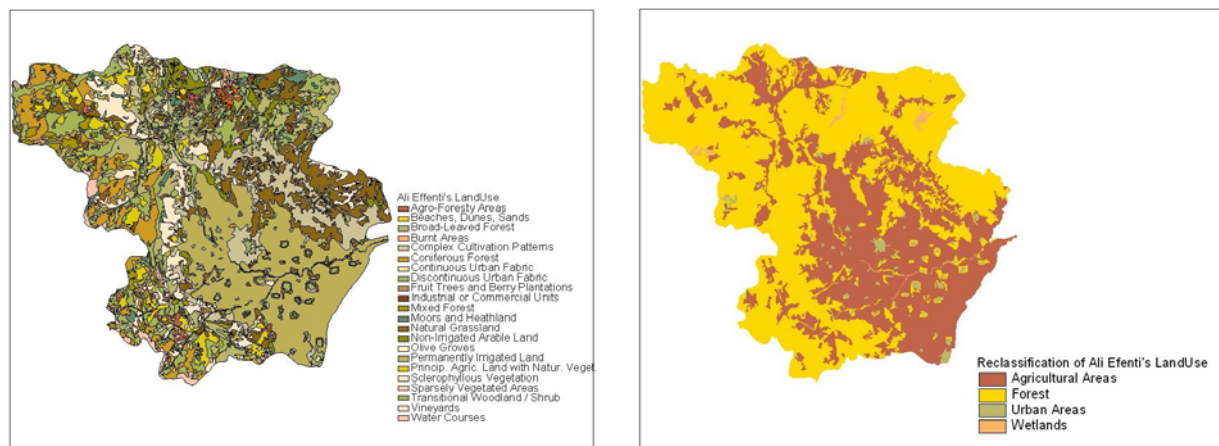
Η εκτίμηση των επιπτώσεων από μεγάλες ή μικρές αλλαγές στην εδαφική κάλυψη, μπορεί να γίνει με χρήση υδρολογικών μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη τη φυτοκάλυψη στα δεδομένα εισόδου. Μεγάλη σημασία έχει εδώ η χωρική και χρονική κλίμακα που θα επιλεγεί για την ανάλυση. Η διερεύνηση των επιπτώσεων γίνεται για τις κυριότερες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου που επηρεάζονται από αλλαγές χρήσεων γης και αυτές είναι κυρίως οι

επιμέρους συνιστώσες της απορροής (υπόγεια, επιφανειακή, ενδιάμεση και συνολική απορροή).

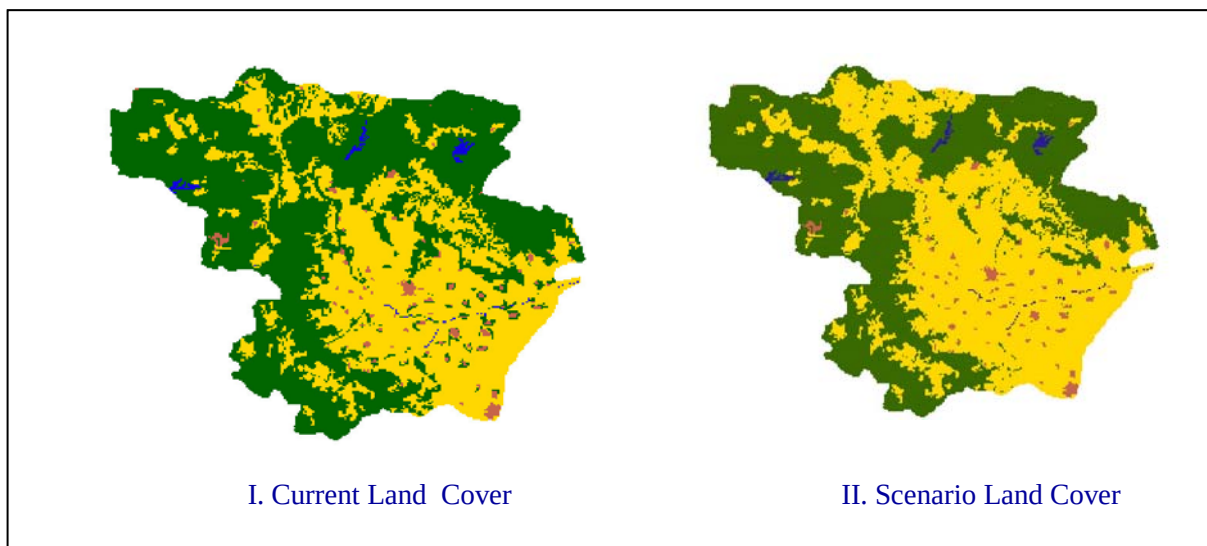
Γενικά, η αλλαγή στη χρήση της γης επεμβαίνει στις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, με άμεσες περιβαλλοντικές συνέπειες. Για παράδειγμα, όταν μια περιοχή αστικοποιείται, αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τις παρακάτω αλλαγές:

- ❑ αυξημένοι όγκοι αλλά και αιχμές απορροής
- ❑ ελάττωση βασικής απορροής
- ❑ ελάττωση εξατμισοδιαπνοής
- ❑ ελάττωση διήθησης και τροφοδοσίας υπογείου υδροφορέα
- ❑ ελάττωση κατακράτησης
- ❑ μείωση του χρόνου συγκέντρωσης του νερού στα υδατορέματα

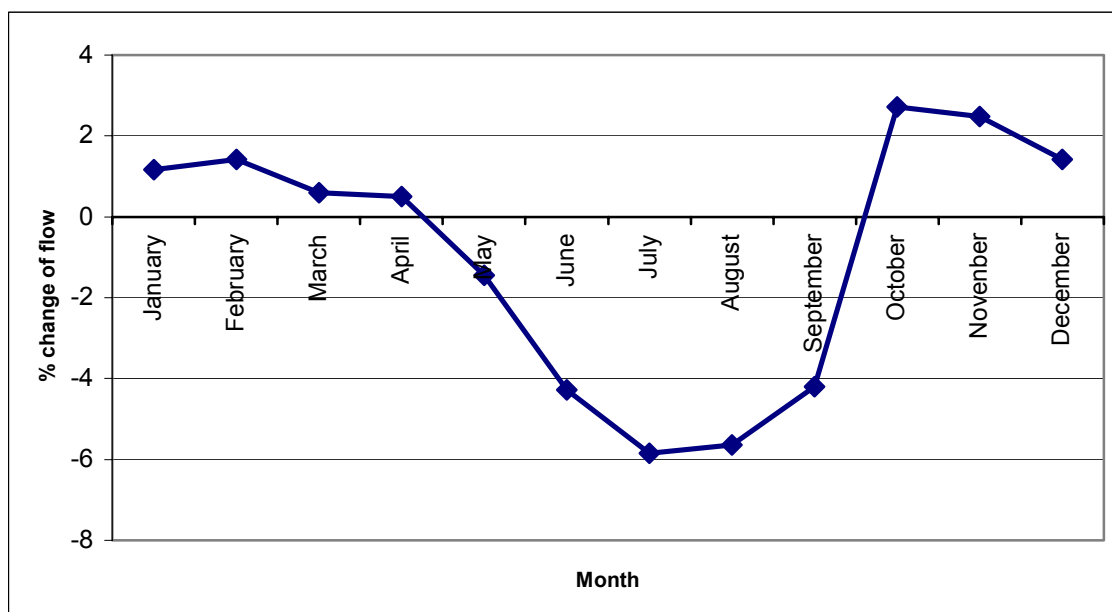
Στα Σχήματα 4-11, 4-12 και 4-13 φαίνεται σε απεικόνιση GIS ένας χάρτης χρήσεων γης (στη Θεσσαλία), σενάριο αλλαγής των χρήσεων αυτών (μείωση δασικής έκτασης – αύξηση αγροτικής) και οι επιπτώσεις αυτής της αλλαγής πάνω στις απορροές της περιοχής. Στο Σχήμα 4-14 δίνεται ένα άλλο σενάριο αλλαγής που αφορά στη καταστροφή δάσους λόγω πυρκαγιάς και οι αντίστοιχες αυξήσεις που προκύπτουν στις πλημμυρικές αιχμές της περιοχής αυτής.



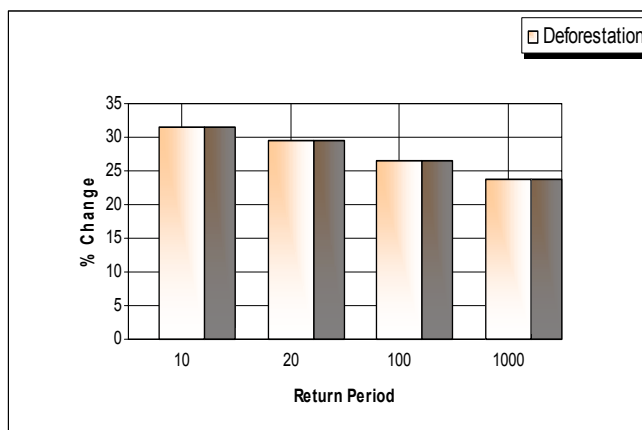
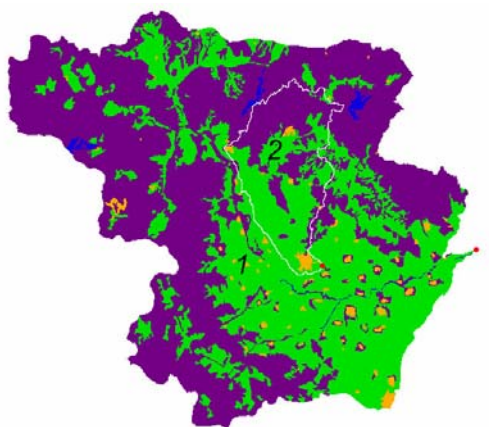
Σχήμα 4-11: Οι χρήσεις γης αναλυτικά και γενικευμένα.



Σχήμα 4-12: Σενάριο αλλαγής χρήσης γης στη Θεσσαλία (μείωση δασικής έκτασης, αύξηση αγροτικής).



Σχήμα 4-13: Ποσοστιαία αλλαγή μέσης μηνιαίας απορροής για το σενάριο αλλαγής της χρήσεως γης



Σχήμα 4-14: Καταστροφή του δάσους στη λεκάνη ανάντη της πόλης των Τρικάλων λόγω πυρκαγιάς :% αύξηση παροχών 10ετίας, 20ετίας, 100ετίας και 1000ετίας.

Ειδικότερη περίπτωση της αλλαγής χρήσης γης είναι η αλλαγή της φυτοκάλυψης. Για παράδειγμα, μία έκταση που είναι αγροτική παραμένει αγροτική, αλλά αλλάζει το είδος της καλλιέργειας. Η αλλαγή αυτή μπορεί να είναι άμεση, δηλαδή να είναι αποτέλεσμα οδηγίας που να επιτρέπει την καλλιέργεια συγκεκριμένου είδους ή έμμεση και σχετιζόμενη με την κλιματική αλλαγή. Στη δεύτερη περίπτωση αναφερόμαστε σε πιέσεις και επιπτώσεις από περιβαλλοντολογικές αλλαγές (κλιματική αλλαγή και χρήσεων γης).

5. Η Αναπτυξιακή Διάσταση του Κύκλου του Νερού σε Τοπικό και Εθνικό Επίπεδο. Νομικό και Θεσμικό Πλαίσιο

5.1 Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά 2000/60/ΕΕ

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία – Πλαίσιο για τα Νερά αποτελεί το εργαλείο για την μακροπρόθεσμη αειφόρο διαχείριση των υδάτων και των οικοσυστημάτων στην επικράτεια της Ευρώπης. Ο βασικός στόχος της Οδηγίας είναι η καλύτερη κατάσταση από πλευράς ποιότητας και ποσότητας των υδατικών πόρων. Η επιτυχία της εφαρμογής της Οδηγίας αναμένεται να εξαρτηθεί από δύο κρίσιμους παράγοντες: Την εναρμόνιση όλων των φυσικών διεργασιών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού μέσα στα χωρικά πλαίσια μιας υδρολογικής λεκάνης αφενός, και αφετέρου την έγκαιρη λήψη κατάλληλων διαχειριστικών μέτρων που θα εξασφαλίσουν την επιθυμητή «καλή κατάσταση» των επιφανειακών και υπογείων υδάτων μέσα στα επόμενα χρόνια (Οδηγία 2000/60/EC, 2000).

Κύριο χαρακτηριστικό της Οδηγίας, είναι η χρήση της Λεκάνης Απορροής Ποταμού ως βασικής μονάδας για όλες τις ενέργειες σχεδιασμού και διαχειριστικής δράσης που αναφέρονται στο νερό. Αναγνωρίζεται δηλαδή το γεγονός ότι το νερό έχει φυσικά και υδρολογικά όρια, όχι όμως πολιτικά και διοικητικά.

Τα κύρια σημεία στα οποία μπορεί να συνοψίσει κανείς την Οδηγία είναι τα ακόλουθα:

- ❑ Ο προσδιορισμός της περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού ή συνόλου λεκανών απορροής με την μορφή μιας υδρολογικής περιφέρειας (με συνυπολογισμό υπόγειων και παράκτιων νερών) και οι διοικητικές διευθετήσεις για την συγκρότηση αρμόδιας τοπικής αρχής της λεκάνης αφενός και συντονισμού δράσεων αφετέρου.
- ❑ Ο χαρακτηρισμός και η συνολική περιγραφή της κατάστασης της υδρολογικής περιφέρειας και η ανάλυση των πιέσεων και των επιπτώσεων αυτών στην κατάσταση των συστημάτων επιφανειακών και υπογείων υδάτων συμπεριλαμβανομένης και της οικονομικής ανάλυσης των χρήσεων νερού.

- ❑ Η εγκατάσταση και λειτουργία αντιπροσωπευτικών δικτύων παρακολούθησης της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης υδάτων.
- ❑ Η κατάρθρωση των Διαχειριστικών Σχεδίων (Προγράμματα Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού) που θα περιλαμβάνουν τα απαραίτητα διαχειριστικά μέτρα για την επίτευξη των στόχων της Οδηγίας

Χωρίς αμφιβολία, η εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας θα απαιτήσει αρχικά κάποιες νομοθετικές ρυθμίσεις στο ισχύον καθεστώς της χώρας. Το νομοθετικό πλαίσιο προς το παρόν διέπεται από τον Ν. 1739/87, (ΦΕΚ 201Α) για την διαχείριση των υδατικών πόρων και κάποιες επιμέρους διατάξεις.

Σύμφωνα με τον νόμο του 1987, το νερό αποτελεί φυσικό αγαθό για την ικανοποίηση κοινωνικών αναγκών. Ο νόμος επιχείρησε να δημιουργήσει ένα πλαίσιο για την επίλυση της σύγκρουσης των αρμοδιοτήτων που σχετίζονται με την διαχείριση υδατικών πόρων και τη χάραξη ενιαίας πολιτικής.

Σύμφωνα με το νόμο, με τον όρο «υδάτινοι πόροι» νοείται το σύνολο των επιφανειακών και υπογείων νερών της χώρας, χωρίς διάκριση στην ποιότητα, την προέλευση ή την πιθανή χρήση που μπορούν να οδηγηθούν. Επίσης, υδατικοί πόροι θεωρούνται τα νερά υποθαλάσσιων πηγών και τα θερμομεταλλικά νερά. Το θαλασσινό νερό δεν συμπεριλαμβάνεται στα παραπάνω. Αξίζει να σημειωθεί βέβαια η προσπάθεια που γίνεται στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια προς στην κατεύθυνση της ένταξης του θαλάσσιου νερού στο υδατικό δυναμικό. Μονάδες αφαλάτωσης έχουν λειτουργήσει στη Σύρο και τη Μύκονο, αλλά και σε άλλα νησιά της χώρας, σε πιλοτικό όμως επίπεδο ως τώρα.

Ο νόμος ορίζει τις αρμόδιες αρχές για την διαχείριση των υδατικών πόρων, ανάλογα με την χρήση του νερού. Για παράδειγμα, για την αγροτική χρήση η αρμόδια αρχή είναι το Υπουργείο Γεωργίας, για την βιομηχανική και ενεργειακή χρήση το Υπουργείο Ανάπτυξης, για την ύδρευση Αθήνας και Θεσσαλονίκης το ΥΠΕΧΩΔΕ, για την ύδρευση του υπολοίπου της χώρας το Υπουργείο Εσωτερικών, για τις χρήσεις αναψυχής ο Ε.Ο.Τ.

Το υπάρχον καθεστώς των 14 υδατικών διαμερισμάτων (βλ Σχήμα 5-1), αν και υδρολογικά ορθό, παρουσιάζει προβλήματα που σχετίζονται κυρίως με διαχειριστικά θέματα, αφού (επιφανειακές, υπόγειες) πηγές υδάτων που βρίσκονται σε ένα υδατικό διαμέρισμα παρέχουν νερό το οποίο οδηγείται για κατανάλωση σε άλλο υδατικό διαμέρισμα. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι το καθεστώς αυτό θα αλλάξει στο μέλλον, σύμφωνα και με τις απαιτήσεις της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά.



Σχήμα 5-1: Υφιστάμενη διαίρεση της Ελλάδας σε 14 Υδατικά Διαμερίσματα.

5.2 Δυσκολίες και προβλήματα εφαρμογής της Οδηγίας

Η εφαρμογή της Οδηγίας δεν αναμένεται εύκολη. Η δυσκολία της εφαρμογής της πηγάζει μεταξύ άλλων από τις αρχές που εμπεριέχονται στην Οδηγία και που διέπουν τους υδατικούς πόρους και τις σχέσεις τους τόσο με το περιβάλλον όσο και με τους σχετικούς τομείς δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα σε αυτό.

Στη διαχείριση των Υδατικών Πόρων εμπλέκονται φορείς και διοικητικές αρχές με διαφορετικούς ρόλους, αρμοδιότητες, ευθύνες και ενδιαφέροντα. Αυτή η ποικιλία αρμοδιοτήτων είναι συχνά ο κυριότερος παράγοντας κακής διαχείρισης και για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη μια περισσότερο ολιστική προσέγγιση στις πρακτικές διαχείρισης. Στην περίπτωση διασυνοριακών λεκανών, θα πρέπει να προσθέσει κανείς και την αναγκαιότητα

δημιουργίας συνεργασιών ανάμεσα σε χώρες, τη σύσταση συμπληρωματικών συμφωνιών καθώς και την επικαιροποίηση με γνώμονα Οδηγία αυτών που ήδη βρίσκονται σε ισχύ και επηρεάζουν τη διαχείριση.

Μια άλλη παράμετρος που είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη είναι η κλίμακα για την λήψη αποφάσεων και σύνταξη διαχειριστικών μέτρων. Κάποιες ενέργειες οφείλουν να γίνουν σε επίπεδο λεκάνης (για παράδειγμα συνεργασία φορέων αντιπλημμυρικής προστασίας, υδροδότησης και προστασίας τον περιβάλλοντος), κάποιες σε εθνικό επίπεδο (εναρμόνιση της Κοινοτικής Οδηγίας με την εθνική νομοθεσία) και ορισμένες σε Ευρωπαϊκό επίπεδο (για παράδειγμα εναρμόνιση της Κοινοτικής Οδηγίας Πλαίσιο για το Νερό και της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής, CAP). Σε κάθε περίπτωση η προσαρμογή των σχεδιαστικών και διαχειριστικών ενεργειών στην κατάλληλη κλίμακα είναι μια αρχή αναγκαία να εφαρμοστεί σε όλες τις συνιστώσες της Οδηγίας κατά τρόπο κατακόρυφο, τόσο από τη βάση προς την κορυφή (για παράδειγμα να συντονιστούν οι ενέργειες σε τοπικό επίπεδο κατά τρόπο αποτελεσματικό ώστε συνδυαστικά να επιτευχθεί ο στόχος της "καλής κατάστασης" των υδάτων σε επίπεδο λεκάνης) όσο και κατά τον αντίστροφο τρόπο.

Οι προθεσμίες και τα χρονικά όρια για την επίτευξη της καλής κατάστασης των υδάτων εισάγουν μια επιπλέον δυσκολία στην εφαρμογή της Οδηγίας.

Ειδικότερα και όσον αφορά τις δυσκολίες για την εφαρμογή της Οδηγίας στην Ελλάδα, στα παραπάνω θα πρέπει κανείς να συνυπολογίσει και την ανυπαρξία οργανωτικών και διαχειριστικών δομών στον τομέα των υδατικών πόρων με ουσιαστικό περιεχόμενο και την πολυαρχία στις αρμοδιότητες κατά κατηγορία χρήσης των υδατικών πόρων. Έγιναν κάποιες προσπάθειες προς αυτήν την κατεύθυνση με την θέσπιση του Ν 1739/87 χωρίς όμως ποτέ να γίνει πλήρης εφαρμογή του νόμου, ίσως επειδή δεν υπήρξε ποτέ ισχυρή πολιτική βούληση.

Παράλληλα δεν θα πρέπει να υποτιμήσει κανείς και τις ιδιαίτερες δυσκολίες που εισάγονται λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν σε ορισμένες περιοχές της Ελλάδας, για παράδειγμα νησιώτικες περιοχές, άνυδρες, κλπ.

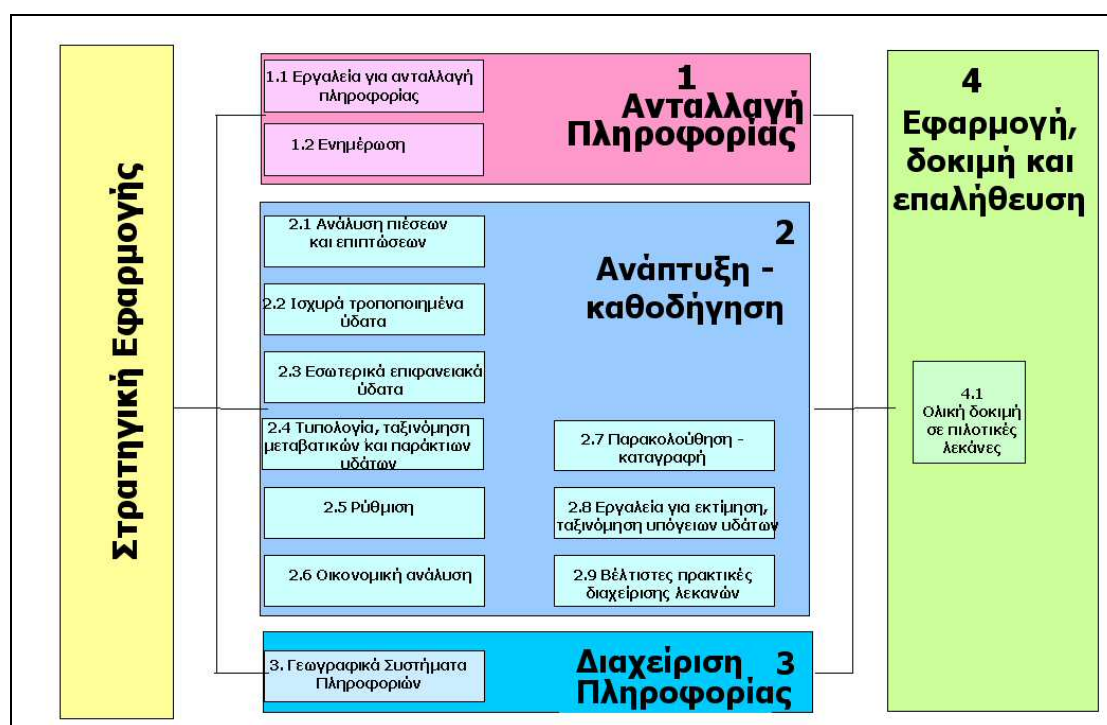
5.3 Οργάνωση της Οδηγίας σε ευρωπαϊκό επίπεδο

Οι ενέργειες για την υποστήριξη της εφαρμογής της Οδηγίας βρίσκονται σε εξέλιξη τόσο στα κράτη μέλη όσο και στις χώρες με καθεστώς ένταξης. Οι ενέργειες αυτές περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την δημιουργία εθνικών γραμμών καθοδήγησης, εργασίες δοκιμών στοιχείων της Οδηγίας σε πιλοτικές λεκάνες και συζητήσεις σχετικά με το διοικητικό

πλαίσιο που θα διέπει τη λειτουργία των Υδρολογικών Περιφερειών. Επίσης βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη χρηματοδοτούμενα από την ΕΕ ερευνητικά προγράμματα που σχετίζονται με την διαδικασία εφαρμογής της Οδηγίας και αναμένεται τα αποτελέσματά τους να βοηθήσουν τα Κράτη Μέλη στην εφαρμογή της.

Ανάμεσα σε άλλα, αξίζει να σημειωθεί η δημιουργία ομάδων εργασίας, των οποίων τα μέλη προέρχονται από όλα τα κράτη μέλη, ύστερα από την υπόδειξη των αρμόδιων για την διαχείριση των υδάτων φορέων σε κάθε κράτος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-2, υπάρχουν 13 ομάδες εργασίας που αναφέρονται σε 4 ευρύτερες θεματικές ενότητες, οι οποίες και αποτελούν τις απαραίτητες συνιστώσες της στρατηγικής εφαρμογής της Οδηγίας.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση υποστηρίζει αυτές τις ομάδες ως συντονιστής και με την δημιουργία ανάμεσα σε άλλα, ενός ηλεκτρονικού forum με την επωνυμία Circa (<http://forum.europa.eu.int/Public/irc/env/Home/main>).



Σχήμα 5-2: Οι ομάδες εργασίας για την εφαρμογή της Οδηγίας.

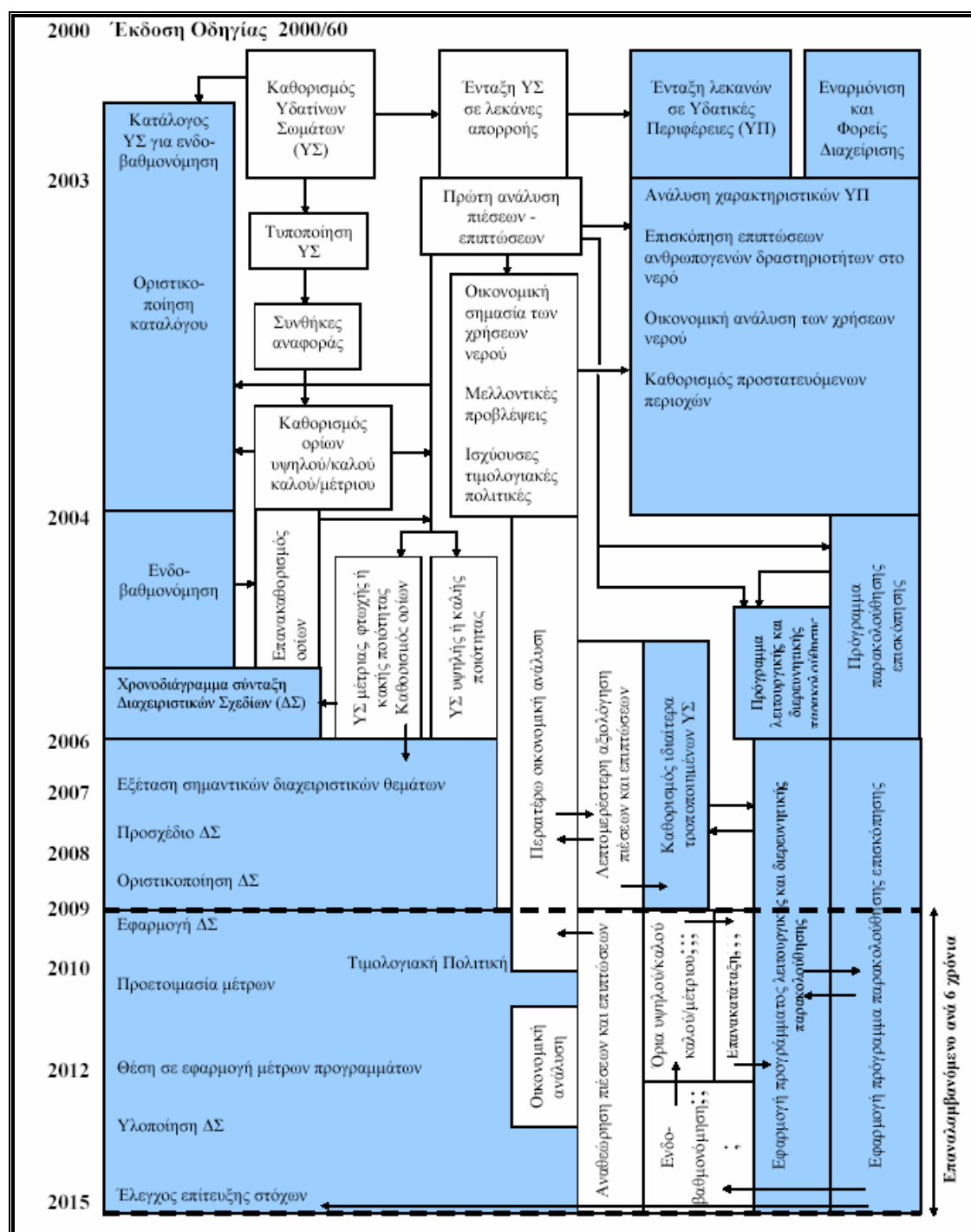
5.4 Χρονοδιάγραμμα εργασιών

Ο βασικός στόχος της Οδηγίας είναι η επίτευξη καλής ποιότητας υδάτων για όλα τα υδάτινα σώματα μέχρι το 2015. Το χρονοδιάγραμμα επίτευξης του τελικού αυτού στόχου, που θα πρέπει να υλοποιηθεί από τα Κράτη Μέλη (ΚΜ), επιμερίζεται με αναφορά σε ενδιάμεσα στάδια, ως εξής (Σχήμα 5-3, Ανδρεαδάκης 2002):

- ❑ Προσδιορισμός των επιμέρους λεκανών απορροής σε κάθε ΚΜ, ένταξή τους σε Υδατικές Περιφέρειες και καθορισμός των αρμοδίων Φορέων Διαχείρισης. Χρονικός ορίζοντας 2003 (Άρθρα 3 και 24).
- ❑ Προσδιορισμός σε κάθε Υδατική Περιφέρεια των πιέσεων, των επιπτώσεων και των οικονομικών παραμέτρων που σχετίζονται με τη χρήση των υδάτων, καθώς και η καταγραφή των προστατευόμενων περιοχών. Χρονικός ορίζοντας 2004 (Άρθρα 5 και 6, Παραρτήματα II και III).
- ❑ Θέση σε λειτουργία Προγραμμάτων Παρακολούθησης της κατάστασης των υδάτων. Χρονικός ορίζοντας 2006 (Άρθρο 8).
- ❑ Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των Προγραμμάτων Παρακολούθησης και τις αναλύσεις των χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής, τα ΚΜ καλούνται να εντοπίσουν τα μέτρα που απαιτούνται για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που θέτει η Οδηγία, με οικονομικά αποτελεσματικό τρόπο. Χρονικός ορίζοντας 2009 (Άρθρο 11, Παράρτημα III).
- ❑ Σύνταξη και δημοσιοποίηση Προγραμμάτων Διαχείρισης για κάθε Υδατική Περιφέρεια, στα οποία θα περιλαμβάνεται και ο τελικός προσδιορισμός των ιδιαιτέρως τροποποιημένων υδατίνων σωμάτων. Χρονικός ορίζοντας 2009 (Άρθρα 13 και 4.3).
- ❑ Εφαρμογή τιμολογιακής πολιτικής των υδάτων, η οποία θα υποβοηθά την βιωσιμότητα των υδατικών πόρων. Χρονικός ορίζοντας 2010 (Άρθρο 9).
- ❑ Θέση σε λειτουργία των Προγραμμάτων Διαχείρισης. Χρονικός ορίζοντας 2012 (Άρθρο 11).
- ❑ Πλήρης εφαρμογή των Προγραμμάτων Διαχείρισης και επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων. Χρονικός ορίζοντας 2015 (Άρθρο 4).

Αξίζει να σημειωθεί ότι κράτη μέλη είναι ενδεχόμενο να μην επιτύχουν την καλή ποιότητα όλων των υδατίνων σωμάτων μέχρι το 2015, για λόγους που μπορεί να σχετίζονται με την ανεπαρκή τεχνική υποδομή, το υψηλό κόστος ή τις τοπικές συνθήκες. Οι ενδεχόμενες δυσκολίες, που δεν επιτρέπουν την υλοποίηση του βασικού στόχου της Οδηγίας, θα πρέπει να τεκμηριώνονται στα Προγράμματα Διαχείρισης των Υδατικών Περιφερειών και στις περιπτώσεις αυτές η Οδηγία Πλαίσιο δίδει στα ΚΜ τη δυνατότητα για υλοποίηση των μέτρων

και συμμόρφωση σε μεταγενέστερους, εξαετούς διάρκειας, κύκλους σχεδιασμού και εφαρμογής των προγραμμάτων.



Σχήμα 5-3: Διαγραμματική απεικόνιση των απαιτούμενων σταδίων για την εφαρμογή της Οδηγίας.

5.5 Σημερινή κατάσταση και προοπτικές

Με την ψήφιση του νόμου 3199/2003, τέθηκαν οι βάσεις για την εναρμόνιση της Ελλάδας στην κοινοτική νομοθεσία. Το ΥΠΕΧΩΔΕ έχει ήδη προκηρύξει (Ιούλιος 2004) διαγωνισμό με τίτλο «Δράσεις για την εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΕ». Το αντικείμενο του έργου μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα:

1. Στις προκαταρκτικές ενέργειες για την εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΕ στη χώρα μας, προσδιορισμός εθνικών και διασυνοριακών λεκανών απορροής ποταμού της χώρας, προσδιορισμός των αρχών διαχείρισης τους και των αρμοδιοτήτων τους καθώς και ο συντονισμός της διαχείρισης / αξιοποίησης του εισερχόμενου υλικού από τα σχετικά με την Οδηγία, παράλληλα υλοποιούμενα έργα», οι οποίες είναι:
 - ❑ Η προετοιμασία των σχετικών με την Οδηγία 2000/60 συμπληρωματικών νομικών κειμένων για την εφαρμογή της στην Ελλάδα.
 - ❑ Η διαμόρφωση ενός γενικού σχεδίου ενεργειών για την εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΕ στη χώρα και η μετάφραση στα ελληνικά των Κειμένων Κατευθυντήριων Γραμμών που έχουν συνταχθεί για καθοριστικά και κύρια θέματα εφαρμογής της Οδηγίας.
 - ❑ Η δημιουργία και συντήρηση ιστοσελίδας στο διαδίκτυο για την Οδηγία 2000/60/ΕΕ.
 - ❑ Ο προσδιορισμός των λεκανών απορροής ποταμών της χώρας, καθώς και αυτών που συνορεύουν με άλλες χώρες και η ένταξή τους σε Υδατικές Περιφέρειες.
 - ❑ Η καταγραφή των αρχών διαχείρισης, ο προσδιορισμός των αρμοδιοτήτων τους και η επιμόρφωση των στελεχών τους.
 - ❑ Η δημιουργία μητρώου προστατευόμενων περιοχών.
 - ❑ Ο χαρακτηρισμός όλων των συστημάτων υπόγειων υδάτων της χώρας και η ερμηνεία και παρουσίαση της ποσοτικής και ποιοτικής (χημικής) κατάστασής τους.

- Τέλος, η συλλογή και αξιοποίηση του εισερχόμενου υλικού από παράλληλα υλοποιούμενα έργα ούτως ώστε να ανταποκριθεί η χώρα μας στις αρχικές απαιτήσεις της Οδηγίας σχετικά με την υποβολή εκθέσεων και να δημιουργηθούν τα πρότυπα για μελλοντικές εκθέσεις.
2. Στην ανάλυση των χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής της χώρας, ανάπτυξη δικτύων και μεθοδολογιών παρακολούθησης της ποιότητας και αξιολόγηση – ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης των επιφανειακών εσωτερικών, των μεταβατικών και των παράκτιων νερών της χώρας και
 3. Σε ένα πιλοτικό πρόγραμμα για την εφαρμογή της Οδηγίας – Πλαίσιο (2000/60/ΕΕ) για τα νερά, που ουσιαστικά θα αποτελεί την πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια εφαρμογής της Οδηγίας για τα νερά σε λεκάνη απορροής και η επιτυχής ολοκλήρωσή του θα συντελέσει στην ανάπτυξη πιο εξειδικευμένων και πρακτικών κατευθύνσεων και στην απόκτηση εμπειρίας για την αποτελεσματική εφαρμογή της Οδηγίας στις υπόλοιπες λεκάνες απορροής της χώρας.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Διαχείριση των υδατικών πόρων και άλλες διατάξεις. Νόμος υπ' αριθμόν 1739/87 (ΦΕΚ 201Α/20-11-87).
- Αγγελάκης Α. και Tsobanoglous G., 1995, «Υγρά Απόβλητα. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης».
- Ανδρεαδάκης Α. «Η αναγκαιότητα συντονισμένης δράσης για την υποβοήθηση εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά 2000/60», Ημερίδα για την Οδηγία 2000/60, ΕΜΠ, 2002.
- Κουτσογιάννης Δ και Ξανθόπουλος Θ, 1997 «Τεχνική Υδρολογία», ΕΜΠ.
- Λέκκας Θ., 1996, «Περιβαλλοντική μηχανική Ι: Διαχείριση Υδατικών Πόρων». Κόσμος ΠΕΜΕΡ ΕΠΕ
- Μιμίκου Μ., 1994, «Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», β έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Μιμίκου Μ., 2000, Τελική Έκθεση «Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ)» ΕΜΠ.
- Μιμίκου Μ. Και Μπαλτάς Ε, 2003 «Τεχνική Υδρολογία», γ έκδοση, ΕΜΠ.
- Παπαζαφειρίου Ζ., 1983 «Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων», ΑΠΘ.
- Τσακίρης Γ., 2001, Σημειώσεις από το μάθημα «Διαχείριση Υδατικών Πόρων».
- Φωτόπουλος Φ, 1999 «Επιπτώσεις κλιματικών αλλαγών στην υδρολογία και στους υδατικούς πόρους σε επίπεδο λεκάνης», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.
- Φωτόπουλος, Φ, Μιμίκου, Μ και Μπαλτάς, Ε (2000). Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στον υδρολογικό κύκλο και στον ταμιευτήρα του Πολυφύτου στον Αλιάκμονα. 5-7 Απριλίου 2000, Αθήνα, Πρακτικά ΕΥΕ.
- Φωτόπουλος Φ, 2000 «Εκτίμηση επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής στον υδρολογικό κύκλο λεκάνης και σε έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων με χρήση εξελιγμένων σεναρίων κλιματικής αλλαγής», Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ.

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Arnell, N.W., 1989, " The Potential Effects of Climatic Change on Water Resources Management in the UK", Paper II 11, Proc. Int. Seminar on Climatic Fluctuations And Water Management, Cairo, Egypt.
- Bellman, R.E. 1957, "Dynamic Programming", Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
- Cooper, L., and Steinberg, D., 1970, Introduction to Methods of Optimization, Sanders, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

- ❑ Dickinson, R. E. (1983) «Land surface processes and climate-surface albedo and energy balance. Advances in Geophysics, Vol. 25». Academic Press.
- ❑ Manabe S., and D.G. Hahn (1981) «Simulation of atmospheric variability». Mon. Weather Review
- ❑ Gottfried, B.S., and Weisman, J., 1973, "Introduction to Optimization Theory", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- ❑ Grigg N., 1996, "Water Resources Management: Principles, Regulations and Cases". McGraw-Hill
- ❑ Hansen et al. (1981) «Climatic impact of increasing atmospheric carbon dioxide». Science.
- ❑ Heathcote I., 1998, "Integrated Watershed Management: Principles and Practice". John Wiley & Sons, Inc.
- ❑ Maidment, D., 1993 "Handbook of Hydrology"
- ❑ Mearns L. et al. (1990) «Prospects for Climate Change. Climate Change and U.S. Water Resources» New York John Wiley and Sons.
- ❑ Meehl G. A. et al., (1984) «An example of fingerprint detection of greenhouse climate changes». Climate Dynamics.
- ❑ Mimikou, M., 1993, Climatic Change, Chapter 3 of the book: "Environmental Hydrology", Kluwer Academic Publishers (Editor Prof. Dr. V.P. Singh), (invited contribution), pp.69-106.
- ❑ Mimikou, M., Kouvopoulos, Y., Cavvadias, G. and Vayiannos, N., (1991). Regional Hydrological Effects of Climate Change. Journal of Hydrology, 123: 119 – 146.
- ❑ Oerlemans J. (1989) «A Projection of Future Sea Level». Climatic Change.
- ❑ Turner, B.L., Moss, R.H. and Skole, D.L. (eds.) 1993. Relating land use and global landcover change: a proposal for an IGBP-HDP Core Project. International Geosphere-Biosphere Report No. 24. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm.
- ❑ CEDEX, 2000. *Las aguas continentales en los países mediterráneos de la Unión Europea*. Madrid, October, 2000
- ❑ World Meteorological Organization (WMO 1993) «Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation», 5th edition, Geneva.
- ❑ Wigley, T. M. L. (1980) «Natural Variability of the Climate System and Detection of the Greenhouse Effect». Nature press.

Σχετικοί Δικτυακοί Χώροι

- ❑ <http://maximus.ce.washington.edu/~palmer/CEE576.htm>

Richard Palmer

College of Civil & Environmental Engineering, University of Washington.

CEE 576 Water Resources Management: Lecture Notes (2002)

- ❑ http://glossary.eea.eu.int/EEAGlossary/N/non-point_sources
European Environment Agency
EEA multilingual environmental glossary (2002)
- ❑ <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21text.htm>
United Nations Sustainable Development
Agenda 21 (2000)
- ❑ http://europa.eu.int/eur-lex/pri/el/oj/dat/2000/l_327/l_32720001222el00010072.pdf
Οδηγία 2000/60/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της
23^{ης} Οκτωβρίου 2000 για την θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της
πολιτικής των υδάτων. (2000)
- ❑ http://www.chi.civil.ntua.gr/SITE_CHI2/HTML/index.htm
Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας, (ΕΤΥΜΠ 2000)