

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ και ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΗΜ. ΕΡΓΩΝ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ - ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ (Δ6)
ΤΜΗΜΑ ΜΕΛΕΤΩΝ (Β)

ΜΕΛΕΤΗ

ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΠΟΛΕΩΣ ΡΟΔΟΥ -
ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟΥ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΝΕΡΟΥ
ΑΠΟ ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΓΑΔΟΥΡΑ
Αριθμός Μελέτης 9576700 (ΣΑΜ 076)

ΑΘΗΝΑ, 1998

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ

ΑΝΑΔΟΧΟΙ

“ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΧΑΙΡΑ”

“Γ. ΚΑΦΕΤΖΟΠΟΥΛΟΣ - Δ. ΜΠΕΝΑΚΗΣ - Ι. ΠΡΙΝΤΑΤΚΟ” & Σια Ε.Ε.

“ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ” ΛΑΖΑΡΟΣ Σ. ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ & Σια Ε.Ε.

“Π. ΚΕΡΧΟΥΛΑΣ & ΣΥΝ/ΤΕΣ” Ε.Ε.

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά –Αντικείμενο – Ιστορικό και διάρθρωση της μελέτης.....	1
1.1.1 Γενικά – Ιστορικό.....	1
1.1.2 Περιεχόμενα και ομάδα εκπόνησης της υδρολογικής έρευνας πλημμυρών.....	2
1.1.3 Διάρθρωση της μελέτης.....	3
1.2 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής.....	4
1.3 Χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και του υπερχειλιστή.....	6
1.4 Υδρομετεωρολογικοί σταθμοί.....	7
2. Εκτίμηση βροχόπτωσης σχεδιασμού	9
2.1 Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση - Μέθοδος Hershfield.....	9
2.2 Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση - Υδρομετεωρολογική μεθοδολογία.....	12
2.2.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου.....	12
2.2.2 Δεδομένα για την εφαρμογή της μεθόδου.....	14
2.2.3 Μέγιστα σημεία δρόσου.....	15
2.2.4 Εκτίμηση της ΠΜΚ.....	18
2.3 Πιθανοτική ανάλυση ακραίων βροχοπτώσεων.....	20
2.3.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου.....	20
2.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου.....	23
2.4 Επίδραση της διάρκειας βροχής στο μέγεθος της βροχόπτωσης.....	25
2.5 Συζήτηση και συμπεράσματα του κεφαλαίου 2.....	28
3. Εκτίμηση πλημμύρας σχεδιασμού	30
3.1 Μοναδιαίο υδρογράφημα.....	30
3.2 Καταγίδες σχεδιασμού.....	33
3.3 Απώλειες - Ωφέλιμη βροχή.....	34
3.4 Βασική ροή - Τήξη χιονιού.....	35
3.5 Περίοδοι επαναφοράς.....	35
3.6 Υπολογισμοί και αποτελέσματα.....	36
3.7 Συγκρίσεις.....	36
4. Διόδευση πλημμύρας υπερχειλιστή	39
4.1 Μέθοδος διόδευσης.....	39
4.2 Καμπύλη στάθμης-όγκου ταμιευτήρα.....	40
4.3 Καμπύλη στάθμης-παροχής υπερχειλιστή.....	40
4.4 Αποτελέσματα διοδεύσεων.....	41

5. Γενικές Παρατηρήσεις και Προτάσεις.....	43
5.1 Γενικές Παρατηρήσεις	43
5.2 Διερεύνηση με τη μέθοδο του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Design of Small Dams	44
5.3 Σχόλια και απόψεις των αναδόχων μελετητών	50
Αναφορές	52

Παράρτημα 1 - Υετογραφήματα και υδρογραφήματα σχεδιασμού σύμφωνα με τη μέθοδο Worst Profile 54

- Π1.1 Υετογραφήματα και υδρογραφήματα σχεδιασμού για T=10, 20, 50, 10.000, 20.000 και 60.000 έτη
- Π1.2 Ανάσχεση πλημμύρας με υπερχειλιστή για T= 10.000, 20.000 και 60.000 έτη

Παράρτημα 2 - Υετογραφήματα και υδρογραφήματα σχεδιασμού κατά Design of Small Dams..... 72

- Π2.1 Μοναδιαία Υδρογραφήματα κατά Design of Small Dams (Sierra Nevada) για $K_n=0.15, 0.14, 0.13, 0.12, 0.11, 0.10, 0.08, 0.064$
- Π2.2 Πλημμυρογραφήματα κατά Design of Small Dams για T=10, 20, 50, 100, 10.000 έτη
- Π2.3 Ανάσχεση πλημμύρας με υπερχειλιστή για 10.000 έτη για διάφορα σενάρια κατανομής της βροχής και διάφορες τιμές στάθμης και πλάτους στέψης υπερχειλιστή
- Π2.4 Ανάσχεση πλημμύρας με σήραγγα εκτροπής D=3,2 μ. για T=10, 20, 50, 100 έτη

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά – Αντικείμενο – Ιστορικό και διάρθρωση της μελέτης

1.1.1 Γενικά – Ιστορικό

Η υδρολογία πλημμυρών συντάχθηκε με βάση την από 22/8/96 αρχική και από 15/1/97 1η συμπληρωματική σύμβαση της «Μελέτης Υδρευσης της Ευρύτερης Περιοχής Πόλεως Ρόδου, Υδραγωγείου και Εγκαταστάσεων Καθαρισμού Νερού από το Φράγμα Γαδουρά» από τα γραφεία μελετών «ΥΔΡΟΕΞΥΓΙΑΝΤΙΚΗ» Λ. Λαζαρίδης και Σια Ε.Ε. και «ΓΡΑΦΕΙΟ ΜΑΧΑΙΡΑ» Α.Ε. με Συνεργάτη – Σύμβουλο τον Επ. Καθηγητή ΕΜΠ κ. Δ. Κουτσογιάννη.

Στη Σύμβαση (άρθρο 2. Παραγρ. 2.2.1.ζ) ορίζονται τα εξής για τον καθορισμό του μεγέθους των πλημμυρικών παροχών

«ζ. Καθορισμό μέγιστης πιθανής πλημμύρας και ειδικότερα:

- Την συλλογή και επεξεργασία των μέγιστων ετήσιων εντάσεων (υψών) βροχής του δείγματος 1950 – 1997
- Τον έλεγχο της παροχής πλημμύρας με βάση τις σχέσεις έντασης – διάρκειας (όμβριες καμπύλες) της μελέτης 1979 και τον προσδιορισμό της τάξης μεγέθους της ΡΜΡ με στατιστικές μεθόδους (π.χ. Hershfield) ώστε να διασφαλίζεται πλήρως η επάρκεια του υπερχειλιστή που προτάθηκε στην μελέτη του 1983 (φρ. Γαδουρά)»

Η υδρολογική έρευνα πλημμυρών έτους 1979 που συντάχθηκε από τα γραφεία Λ. Λαζαρίδης, Χ. Καπετανάκης, Θ. Μαντζιάρας και ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ Α.Ε. (1979) βασίστηκε σε στοιχεία που υπήρχαν σε διάφορους σταθμούς της περιοχής (Μαριτσά, Αρχίπολις, Σιάννα, Απολακκιά, Κατταβιά) ενώ μερικά στοιχεία που είχαν ληφθεί σε σταθμούς της λεκάνης (Απόλλωνας, Εμπωνας, Λάερμα) ήταν τελειώς ανεπαρκή αφού εκάλυπταν μόνο μία μικρή περίοδο 1976-79. Οι σταθμοί αυτοί είχαν εγκατασταθεί τότε από τους αναδόχους μελετητές οι οποίοι είχαν την ευθύνη για την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους για μια μικρή μόνο περίοδο, ενώ στη συνέχεια την ευθύνη λειτουργίας τους ανέλαβε το Ν.Τ. Δωδεκανήσου (Υ.Ε.Β.).

Στην υδρολογική έρευνα που έγινε τότε ελήφθησαν κυρίως υπόψη τα υφιστάμενα στοιχεία του Μ.Σ. Μαριτσών (Ε.Μ.Υ.) της περιόδου 1951-1976.

Υπήρξαν όμως τότε σημαντικές δυσχέρειες καταγραφής των στοιχείων από τα αρχεία της Ε.Μ.Υ. και κυρίως στη δεκαετία 1951-1960.

- Στη μελέτη αυτή (1979) έγινε προσπάθεια να εκτιμηθεί η μέγιστη πιθανή βροχόπτωση με δύο μεθόδους
 - Με τη στατιστική μέθοδο του D. Hershfield
 - Με υδρομετεωρολογική μεθοδολογία και με στοιχεία που ελήφθησαν από το σταθμό Μαριτσών (Ε.Μ.Υ.)
- Επίσης εκτιμήθηκαν τα υδρογραφήματα και οι μέγιστες παροχές τόσο για τη μέγιστη πιθανή βροχόπτωση όσο και για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς. Η σχέση έντασης – διάρκειας που διαμορφώθηκε τότε ήταν της μορφής $i = A t^{-0,60}$

όπου $A=8,64 (1+2,83 \log T)$ και με τη σύσταση να εφαρμόζεται για $T \leq 100$ έτη.

- Τα τελικά αποτελέσματα σε ότι αφορούσε τις μεγάλες βροχοπτώσεις στη μελέτη 1979 για τα Μαριτσά ήταν τα εξής:
 - Μέγιστη πιθανή βροχόπτωση στο σταθμό Μαριτσών κατά Hershfield 531 χλσ/24ωρο
 - Μέγιστη πιθανή βροχόπτωση με την υδρομετεωρολογική μέθοδο 545 χλσ/24ωρο
 - Η κατανομή της 24 ωρης βροχής είχε ληφθεί από γενικές οδηγίες του Design of Small Dams (1η έκδοση, 1961) και με βήμα 2,0 ωρών
 - Το μοναδιαίο υδρογράφημα διαμορφώθηκε συνθετικά με τη μέθοδο Snyder.
- Το τελικό μέγεθος μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης (PMP) ελήφθη για τη λεκάνη Γαδουρά μειωμένο, θεωρώντας ότι το ύψος βροχής στη λεκάνη H_A συνδέεται με το ύψος βροχής στο σταθμό Μαριτσών H_M με τη σχέση

$$H_A \cong 0,72 H_M$$

αφού έγιναν ορισμένες στρογγυλεύσεις προς τα άνω ελήφθη

$$H(\text{PMP}) = 410 \text{ χλσ.}$$

- Για τις μέγιστες βροχές των λουπών περιόδων επαναφοράς ελήφθη η σχέση

$$H = A t^{0,40}$$

δηλαδή $H_{100} = 205 \text{ χλσ}$

$$H_{20} = 144 \text{ χλσ}$$

$$H_{10} = 118 \text{ χλσ}$$

- Παρατηρούμε ότι η μείωση της P.M.P. από 545 σε 410 χλσ. έγινε γιατί με κάποια (όχι επαρκή πάντως) στοιχεία προέκυπτε γραμμική σχεδόν μείωση της P.M.P. από Βορρά (Μαριτσά) προς Νότο (Κατταβιά), σε συνάρτηση με την απόσταση από Ρόδο.
 - Τα μεγέθη των πλημμυρών των διαφόρων περιόδων επαναφοράς υπολογίστηκαν τότε με βάση το μοναδιαίο υδρογράφημα και με παραμέτρους και μεθοδολογίες που εφαρμόζονταν στην χρονική εκείνη περίοδο εκπόνησης της μελέτης.
 - Οι πλημμυρικές τότε (1979) παροχές εισροής στον ταμιευτήρα που υπολογίστηκαν και ελήφθησαν υπόψη για τον σχεδιασμό των έργων υπερχειλίσσης και σήραγγας εκτροπής ήταν:

□ Μέγιστη πιθανή	683 μ3/δλ	(633 + παροχή βάσης = 683)
□ T=100 έτη	262 μ3/δλ	(χωρίς παροχή βάσης)
□ T=20 έτη	162 μ3/δλ	(χωρίς παροχή βάσης)
□ T=10 έτη	125 μ3/δλ	(χωρίς παροχή βάσης)
- το πρόφραγμα και η σήραγγα εκτροπής υπολογίστηκαν για T=100 και Q=262 μ3/δλ.

1.1.2 Περιεχόμενα και ομάδα εκπόνησης της υδρολογικής έρευνας πλημμυρών

Μετά από παρέλευση περίπου 20 ετών από τη σύνταξη της υδρολογικής έρευνας (1979), τη βελτίωση των συνθηκών καταγραφής, αρχειοθέτησης και επεξεργασίας των στοιχείων,

υπήρξε απόλυτη ανάγκη για την εκ νέου σύνταξη μιας υδρολογικής έρευνας η οποία θα βασίζεται και σε σύγχρονες μεθοδολογίες έρευνας του σημαντικού αυτού θέματος.

Δυστυχώς όμως παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει και σε τοπικό επίπεδο (κ. Θ. Φαντίδης) για τη λήψη κατάλληλων και ικανής διάρκειας στοιχείων δεν κατέστη δυνατό να χρησιμοποιηθούν βάσιμα τα στοιχεία των σταθμών της λεκάνης Γαδουρά και κυρίως του σταθμού Λάερμα.

Στην παρούσα υδρολογική έρευνα δεν περιοριστήκαμε μόνο στην εκπλήρωση των αυστηρά συμβατικών μας υποχρεώσεων αλλά διενεργήσαμε μία πλήρη απαρχής έρευνα. Έτσι δώσαμε μία γενικότερη εικόνα στον Εργοδότη και μία έκταση αποτελεσμάτων αιχμών πλημμυρών τέτοια ώστε να μπορεί να επιλέξει το μέγεθος σχεδιασμού των έργων υπερχειλίσης και εκτροπής σε συνάρτηση με το κόστος και τον βαθμό ασφαλείας που επιδιώκεται τόσο κατά την περίοδο κατασκευής όσο και κατά την μόνιμη λειτουργία του έργου.

Είναι φανερό και απαρχής αναμενόταν ότι τα αποτελέσματα από πλευράς μεγέθους παροχών πλημμυρών θα ήταν δυσμενέστερα των αρχικών (1979) και κυρίως λόγω εφαρμογής δυσμενέστερων παραμέτρων, νέων μεθόδων έρευνας και της μη εφαρμογής μειώσεων στις βροχοπτώσεις από Βορρά προς Νότο.

Μετά από τα ανωτέρω και με σκοπό να δοθεί ευρεία επιστημονική έκταση στην έρευνα η μελέτη συντάχθηκε ως εξής:

(α) Η υδρολογική έρευνα πλημμυρών (από την παραγρ. 1.1.3 μέχρι και το Κεφ. 4 και τους σχετικούς πίνακες του παραρτήματος από τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. με τη συνεργασία των Λ. Λαζαρίδη – Γ. Μαχαίρα και Δρ. Α. Δανιήλ, ενώ στη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων συμμετείχαν και οι Ν. Μαμάσης, Σπ. Μίχας και Π. Λαζαρίδου.

(β) Τα γενικά στοιχεία και το ιστορικό (παραγρ. 1.1.1 και 1.1.2) της εισαγωγής καθώς και οι παρατηρήσεις και προτάσεις του κεφαλαίου 5 αποτελούν τις τελικές απόψεις των αναδόχων μελετητών Λ. Λαζαρίδη και Γ. Μαχαίρα, ενώ στη σύνταξη των υπολογισμών και των αντίστοιχων πινάκων συνεργάστηκε και η Δρ. Α. Δανιήλ.

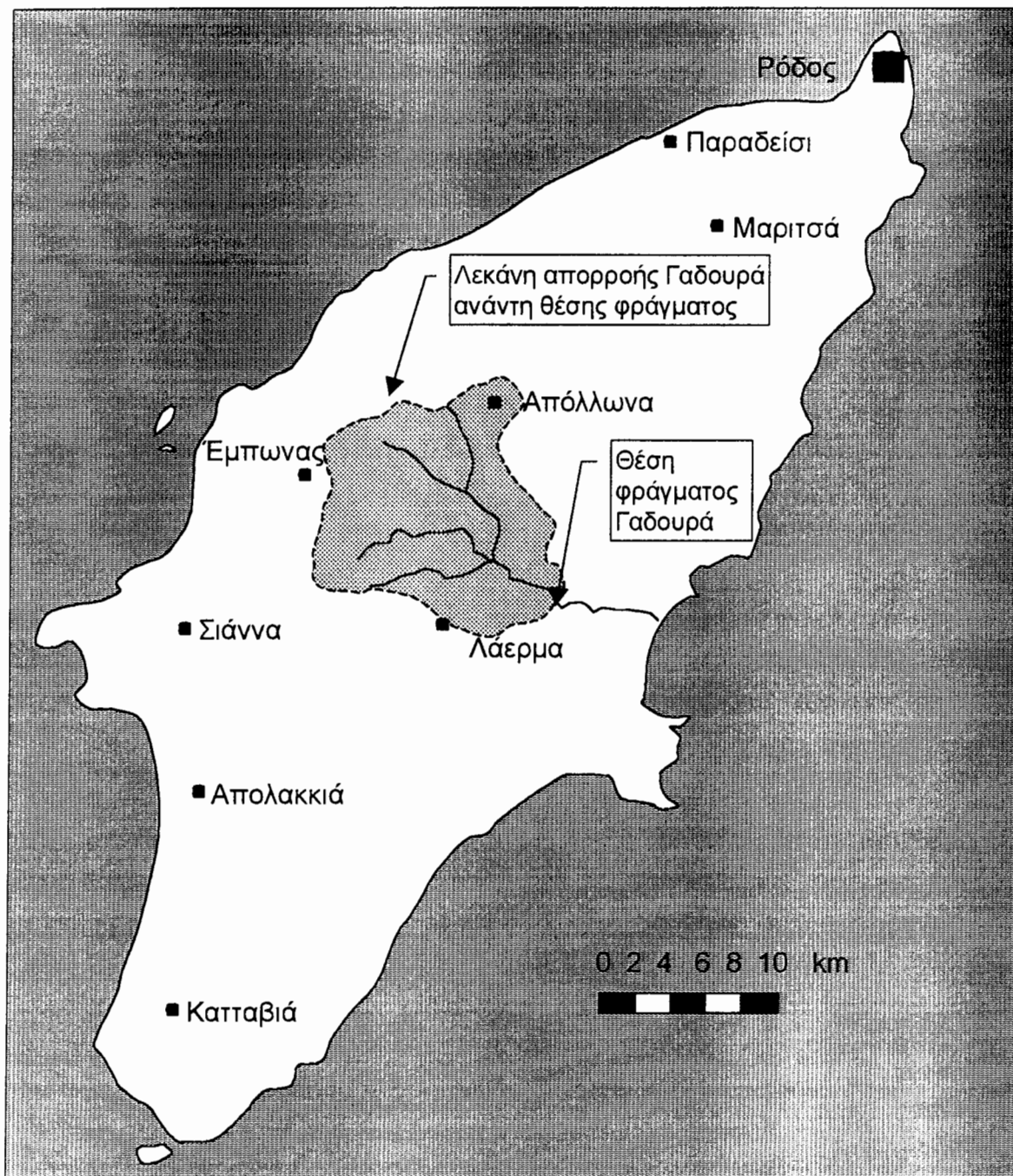
1.1.3 Διάρθρωση της μελέτης

Η μελέτη στηρίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα βροχοπτώσεων και μετεωρολογικών μεταβλητών της ευρύτερης περιοχής, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν συστηματικές μετρήσεις παροχής στο χείμαρρο Γαδουρά. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων βροχοπτώσεων με στόχο την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των βροχοπτώσεων σχεδιασμού. Στο κεφάλαιο 3 καταρτίζεται συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης και με βάση αυτό και τις καταιγίδες σχεδιασμού εκτιμώνται οι πλημμύρες σχεδιασμού στη θέση του φράγματος για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η διόδευση των πλημμυρών από τον υπερχειλιστή του φράγματος με στόχο την εκτίμηση της παροχής εκροής του υπερχειλιστή· αν και δεν έχουν καθοριστεί ακριβώς, σε αυτό το στάδιο της μελέτης, οι διαστάσεις και η υδραυλική λειτουργία του υπερχειλιστή, θεωρήσαμε χρήσιμο να

δώσουμε στην παρούσα μελέτη μια προσεγγιστική εικόνα της ανάσχεσης που προκαλείται κατά τη διόδευση της πλημμύρας μέσω του υπερχειλιστή. Ορισμένοι πίνακες υπολογισμών παρατίθενται στο Παράρτημα της μελέτης.

1.2 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

Στο Σχ. 1 φαίνεται η λεκάνη απορροής του Γαδουρά, ανάντη της θέσης φράγματος, και η ένταξή της στο νησί της Ρόδου. Η έκταση της λεκάνης μέχρι τη θέση φράγματος, είναι 147.7 km² (εμβαδομέτρηση της Προμελέτης, Λαζαρίδης κ.ά., 1979α).

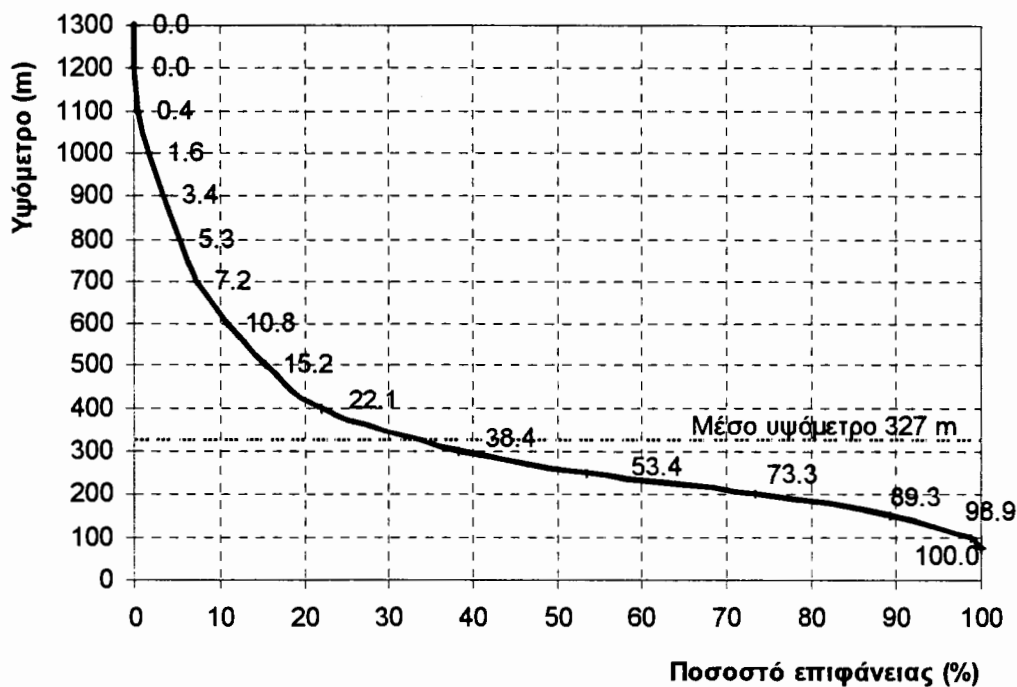


Σχ. 1 Συνοπτικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

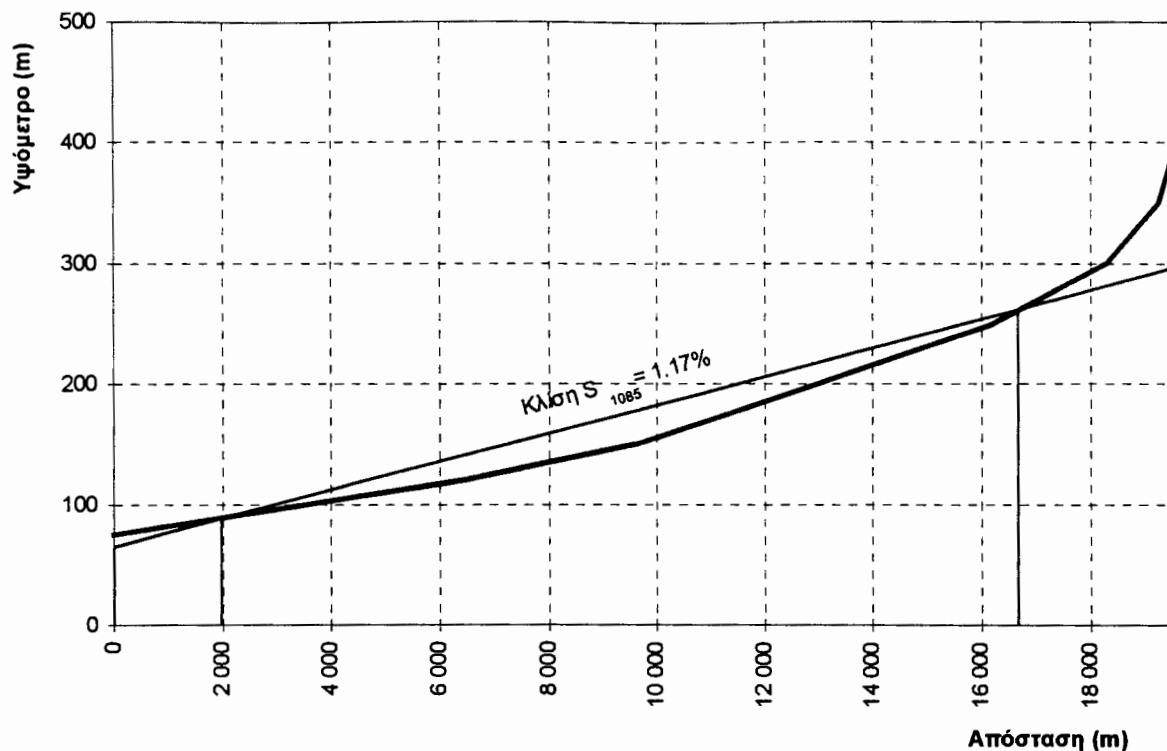
Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι 1300 m και το ελάχιστο υψόμετρο, στη θέση του φράγματος, είναι 75 m. Η υψογραφική καμπύλη της λεκάνης δίνεται στο Σχ. 2 (εμβαδομετρήσεις της Προμελέτης, Λαζαρίδης κ.ά., 1979α), όπου φαίνεται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της (62.5%) αναπτύσσεται σε ημιορεινά εδάφη (υψόμετρα 200-600 m), ενώ μικρότερα τμήματά της αναπτύσσονται σε λοφώδη ή πεδινά εδάφη (ποσοστό 26.7% – υψόμετρα μικρότερα των 200 m) και ορεινά εδάφη (ποσοστό 10.8% – υψόμετρα μεγαλύτερα των 600 m).

Το μήκος του κύριου κλάδου του χειμάρρου μέχρι τη θέση φράγματος είναι 19.6 km. Η υδρολογική μηκοτομή του κύριου κλάδου του χειμάρρου δίνεται στο Σχ. 3, απ' όπου φαίνεται ότι ο χειμάρρος χαρακτηρίζεται από σχετικά ήπιες κλίσεις. Άλλα χαρακτηριστικά στοιχεία της λεκάνης και διάφορων υπολεκανών της δίνονται στον Πίν. 10.

Από πλευράς χαρακτηριστικών εδάφους η λεκάνη καλύπτεται σε μεγάλο μέρος από επιφανειακές αργίλους με μικρό συντελεστή διαπερατότητας και κατά την κατάταξη του Αμερικανικού Soil Conservation Service (1972) μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στην κατηγορία C. Από πλευράς επικάλυψης, η λεκάνη χαρακτηρίζεται από θάμνους και χαμόκλαδα που απαντούν σε μεγάλο ποσοστό της επιφάνειάς της.



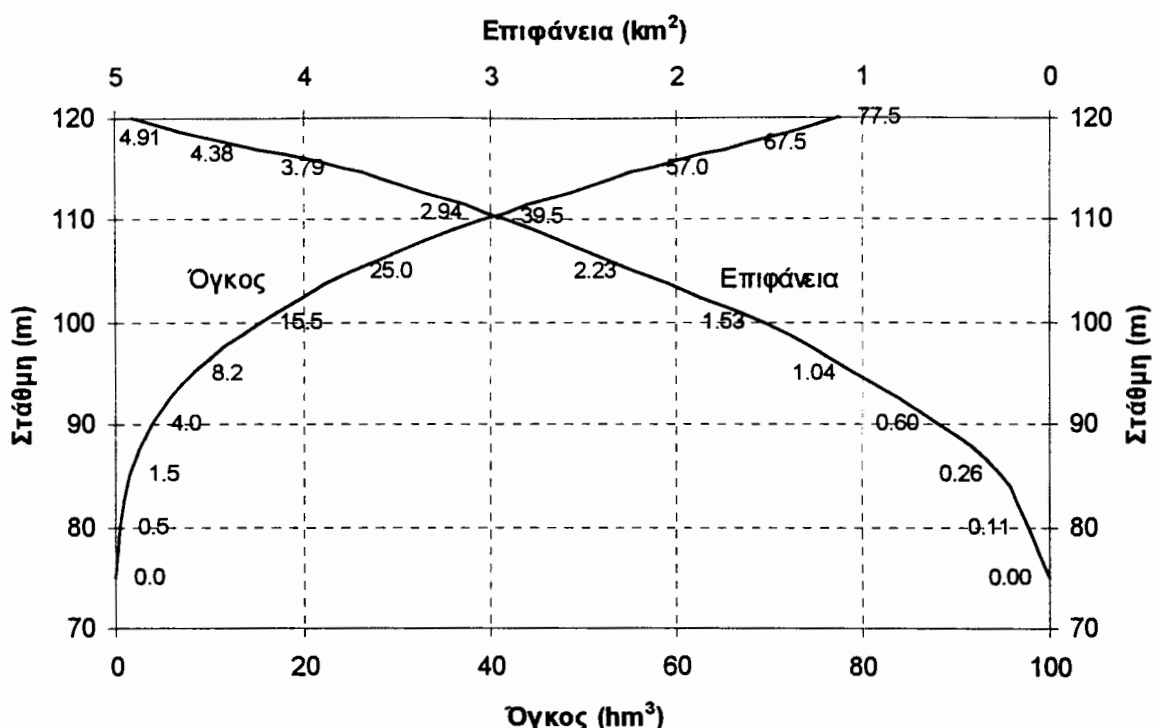
Σχ. 2 Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης απορροής ανάντη της θέσης φράγματος Γαδουρά.



Σχ. 3 Μηκотоμή του κύριου κλάδου του Γαδουρά ανάντη της θέσης φράγματος.

1.3 Χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και του υπερχειλιστή

Στο Σχ. 4 δίνονται οι καμπύλες στάθμης-όγκου (ολικού αποθέματος) και στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Γαδουρά. Η κατώτατη στάθμη λειτουργίας τοποθετείται στα +90 m, όπου αντιστοιχεί νεκρός όγκος ταμιευτήρα 4.0 hm³, ή εναλλακτικά στα +95 m, όπου αντιστοιχεί νεκρός όγκος ταμιευτήρα 8.2 hm³. Η ανώτατη (κανονική) στάθμη λειτουργίας, που ταυτίζεται με τη στάθμη της στέψης του υπερχειλιστή, τοποθετείται στα +116.5 m και αντιστοιχεί σε συνολική χωρητικότητα 63.2 hm³ (στα οποία συμπεριλαμβάνεται και ο νεκρός όγκος) και σε επιφάνεια ταμιευτήρα 4.14 km². Ο υπερχειλιστής, αν και στο παρόν στάδιο της μελέτης δεν έχει διαστασιολογηθεί επακριβώς, θεωρείται για τις ανάγκες της έκθεσης αυτής ότι έχει στέψη τύπου ogee με μήκος 65 m.



Σχ. 4 Καμπύλες στάθμης-όγκου και στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Γαδουρά.

1.4 Υδρομετεωρολογικοί σταθμοί

Όπως προαναφέρθηκε, δεν υπάρχουν συστηματικές μετρήσεις παροχής του χειμάρρου και έτσι η μελέτη βασίζεται αποκλειστικά σε βροχομετρικά δεδομένα.

Οι βροχομετρικοί και μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιούνται στη μελέτη φαίνονται στον Πίν. 1 και οι θέσεις τους απεικονίζονται στο Σχ. 1. Αναλυτικότερα στοιχεία για τους σταθμούς δίνονται σε άλλο τεύχος της μελέτης (Λαζαρίδης κ.ά, 1998) καθώς και από τον Φαντίδη (1997).

Οι περίοδοι για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα εν γένει είναι μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται στον Πίν. 1. Στις θέσεις Απολακκιά και Σιάννα φαίνεται ότι είχαν προϋπάρξει βροχομετρικοί σταθμοί πριν την έναρξη λειτουργίας που δηλώνεται στον Πίν. 1, όπως προκύπτει από παλιότερα δεδομένα που δίνονται στην Προμελέτη (Λαζαρίδης κ.ά, 1979β). Ειδικότερα, στη θέση Σιάννα λειτούργησε σταθμός από ιδιώτη που η λειτουργία του ξεκινά το 1946 (Φαντίδης, 1997). Πάντως, στην παρούσα μελέτη δεν χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα αυτών των προγενέστερων περιόδων, για τις οποίες δεν είναι γνωστές οι συνθήκες λειτουργίας.

Πίν. 1 Βροχομετρικοί σταθμοί Ρόδου που χρησιμοποιούνται στη μελέτη.

Θέση	Γεωγρ. πλάτος	Γεωγρ. μήκος	Υψόμετρο (m)	Περίοδος λειτουργίας	Υπεύθυνος φορέας
Μαριτσά	36°24'00''	28°07'00''	12	1947-1977	ΕΜΥ
Παραδείσι	36°24'20''	28°05'50''	12	1977-σήμερα	ΕΜΥ
Απόλλωνα	36°15'24.5''	27°57'52''	314	1977-80, 1985-σήμερα	ΥΠΓΕ
Έμπωνας	36°13'34''	27°51'24.5''	447	1977-80, 1985-σήμερα	ΥΠΓΕ
Λάερμα	36°09'16.5''	27°56'03.5''	318.5	1977-80, 1985-σήμερα	ΥΠΓΕ
Σιάννα	36°09'17.5''	27°46'48.5''	451	1985-σήμερα	ΥΠΓΕ
Απολακκιά	36°03'59''	27°47'16''	64	1977-σήμερα	ΥΠΓΕ
Κατταβιά	35°58'17.5''	27°48'11''	78	1967-σήμερα	ΥΠΓΕ

Ο σταθμός της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) στα Μαριτσά μεταφέρθηκε το 1977 στην κοντινή θέση Παραδείσι (αεροδρόμιο Ρόδου) στο ίδιο υψόμετρο. Έτσι, για τις ανάγκες αυτής της μελέτης οι δύο θέσεις θεωρούνται ότι αναφέρονται σε ενιαίο σταθμό (Ρόδος) τα δεδομένα του οποίου προκύπτουν από τη συνένωση των δεδομένων των δύο περιόδων που αντιστοιχούν στη λειτουργία του σταθμού στις θέσεις Μαριτσά (1951-77) και Παραδείσι (1977-σήμερα).

Τα βροχομετρικά και λοιπά μετεωρολογικά δεδομένα των σταθμών του Υπουργείου Γεωργίας (ΥΠΓΕ) που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη αυτή και παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια έχουν ληφθεί από συστηματική έκδοση του Φαντίδη (1977). Τα βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού της ΕΜΥ και ορισμένα άλλα μετεωρολογικά δεδομένα που εμφανίζονται στον Πίν. 5 έχουν χορηγηθεί απευθείας από την ΕΜΥ. Άλλα μετεωρολογικά δεδομένα του ίδιου σταθμού έχουν ληφθεί από τα Μηνιαία Κλιματολογικά Δελτία της ΕΜΥ.

Παρόλο που οι περισσότεροι από τους σταθμούς του Πίν. 1 είναι εξοπλισμένοι με βροχογράφο, δεν έγινε δυνατό να ανευρεθούν και να αναλυθούν βροχογραφήματα ιστορικών βροχοπτώσεων, γεγονός που αποδίδεται στην πλημμελή λειτουργία των βροχογράφων. Μόνο ορισμένα βροχογραφήματα ισχυρών βροχοπτώσεων του σταθμού Λάερμα εντοπίστηκαν, τα οποία και μας χορηγήθηκαν από το ΥΠΓΕ.

2. Εκτίμηση βροχόπτωσης σχεδιασμού

Λόγω της μεγάλης κλίμακας και σημασίας των έργων που μελετώνται, οι αναλύσεις που επιχειρούνται γίνονται με δύο προσεγγίσεις: με την προσέγγιση της πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης (ΠΜΚ) και με πιθανοτική προσέγγιση. Για την εκτίμηση της ΠΜΚ ακολουθούνται δύο εναλλακτικές μεθοδολογίες: η στατιστική (ενότητα 2.1) και η υδρομετεωρολογική (ενότητα 2.2). Στην πιθανοτική προσέγγιση υιοθετείται η γενική κατανομή ακραίων τιμών (ΓΑΤ) και επιχειρείται η σύνδεση των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων (ενότητα 2.3).

2.1 Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση - Μέθοδος Hershfield

Μεταξύ των διάφορων μεθόδων εκτίμησης της ΠΜΚ που περιέχονται στο σχετικό εγχειρίδιο του World Meteorological Organization (1986), η πλέον δεδομένη στην Ελλάδα είναι η μέθοδος Hershfield (1961, 1965· βλ. και World Meteorological Organization, 1986). Η μέθοδος αυτή είναι η απλούστερη στην εφαρμογή, τόσο λόγω των απλών υπολογισμών που περιλαμβάνει, όσο και λόγω των λίγων δεδομένων εισόδου που απαιτεί· συγκεκριμένα, για να εφαρμοστεί η μέθοδος χρειάζεται μόνο ένα ιστορικό δείγμα ετήσιων μέγιστων υψών βροχής.

Σύμφωνα με τη μέθοδο Hershfield το ύψος βροχής της πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης h_m προκύπτει από την εξίσωση

$$h_m = \bar{h} + k_m s_h \quad (1)$$

όπου \bar{h} και s_h είναι η δειγματική μέση τιμή και η δειγματική τυπική απόκλιση, αντίστοιχα, του ετήσιου μέγιστου ύψους βροχής για διάρκεια d , και k_m είναι ένας συντελεστής συχνότητας που δίνεται από εμπειρικό νομογράφημα του Hershfield ως συνάρτηση των d και \bar{h} . Αυτό το νομογράφημα μπορεί να προσεγγιστεί από την απλή αναλυτική σχέση (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997, σ.160)

$$k_m = 20 - 8.6 \ln \left(\frac{\bar{h}}{130} + 1 \right) \left(\frac{24}{d} \right)^{0.4} \quad (d \text{ σε } h, \bar{h} \text{ σε } \text{mm}) \quad (2)$$

Πλην του νομογραφήματος που δίνει το συντελεστή k_m , η μέθοδος περιλαμβάνει και άλλα νομογραφήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση της δειγματικής μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης.

Τα δεδομένα που επιτρέπουν την εφαρμογή της μεθόδου στο νησί της Ρόδου φαίνονται στον Πίν. 2 (δείγματα ετήσιων μέγιστων ημερήσιων υψών βροχής των σταθμών του νησιού). Για το σταθμό της Ρόδου διατίθεται ένα ικανοποιητικού μεγέθους δείγμα (45 χρόνια), ενώ το αμέσως μικρότερο σε μέγεθος δείγμα είναι αυτό του σταθμού Κατταβιάς (25 χρόνια). Τα υπόλοιπα δείγματα έχουν πολύ μικρά μεγέθη (11-18 χρόνια). Γενικά παρατηρούμε ότι έχουν καταγραφεί αρκετά μεγάλα ρεκόρ ημερήσιου ύψους βροχής που πλησιάζουν τα 200 mm (και σε ένα σταθμό τα ξεπερνούν).

Πίν. 2 Δείγματα ετήσιων μέγιστων ημερήσιων υψών βροχής (σε mm) των σταθμών της Ρόδου.

Υδρολ. έτος	Ρόδος	Καταβιά	Απόλλωνα	Λάερμα	Απολακκιά	Σιάννα	Έμπωνας
1951 - 52	123.0						
1952 - 53	73.0						
1953 - 54	126.2						
1954 - 55	126.2						
1955 - 56	62.0						
1956 - 57	66.2						
1957 - 58	89.2						
1958 - 59	124.6						
1959 - 60	61.0						
1960 - 61	126.7						
1961 - 62	70.2						
1962 - 63	53.1						
1963 - 64	50.3						
1964 - 65	65.4						
1965 - 66	53.4						
1966 - 67	67.1						
1967 - 68	72.6						
1968 - 69	146.4						
1969 - 70	49.5						
1970 - 71	59.6	31.0					
1971 - 72	37.8	75.0					
1972 - 73	124.4	194.0					
1973 - 74	39.1	37.5					
1974 - 75	60.4	151.0					
1975 - 76	48.0	75.0					
1976 - 77	51.7	57.0					
1977 - 78	90.8	42.0	125	23	27		154
1978 - 79	117.5	95.0	103		84		90
1979 - 80	92.4	49.0	55		47		
1980 - 81	47.3	41.0			34		
1981 - 82	76.9	118.5			97		
1982 - 83	54.1	23.0			36		
1983 - 84	124.1	50.0			45		
1984 - 85	65.3	79.0	46	71	98	60	93
1985 - 86	85.6	79.0	25	33	54	41	90
1986 - 87	50.1	45.0	16	46	46	32	60
1987 - 88	75.2	75.0	39	107	70	42	100
1988 - 89	178.8	71.0	54	125	111	68	92
1989 - 90	158.0	36.0	186	232	82	55	80
1990 - 91	62.7	61.0	96	106	90	85	179
1991 - 92	55.5	39.5	48	73	72	41	65
1992 - 93	35.0	43.5	30	28	29	26	47
1993 - 94	174.7	78.5	120	126	82	43	158
1994 - 95	104.4	73.0	71	200	69	60	180
1995 - 96	92.4		105	107			135
1996 - 97				90			
Μέγεθος δείγματος	45	25	15	14	18	11	14
Μέση τιμή	83.7	68.8	74.6	97.6	65.2	50.3	108.8
Μέγιστη τιμή	178.8	194.0	186.0	232.0	111.0	85.0	180.0
Τυπική απόκλιση	37.1	38.0	45.2	59.1	25.4	16.4	42.6

Πίν. 3 Εφαρμογή της μεθόδου του Hershfield (1961, 1965) για την εκτίμηση της ΠΜΚ στις θέσεις των βροχομετρικών σταθμών της Ρόδου. Ύψη βροχής σε mm.

Σταθμός	Ρόδος	Κατταβιά	Απόλλωνα	Λάερμα	Απολακκιά	Σιάννα	Έμπωνας
Υψόμετρο	12	78	314	318.5	64	451	447
Μέγεθος δείγματος, n	45	25	15	14	18	11	14
<i>Στατιστικά χαρακτηριστικά δείγματος με βάση το σύνολο των δεδομένων</i>							
Μέση τιμή, m_n	83.7	68.8	74.6	97.6	65.2	50.3	108.8
Τυπική απόκλιση, s_n	37.1	38.0	45.2	59.1	25.4	16.4	42.6
<i>Στατιστικά χαρακτηριστικά δείγματος χωρίς τη μεγαλύτερη τιμή</i>							
Μέση τιμή, m_{n-m}	81.6	63.6	66.6	87.3	62.5	46.8	103.3
Τυπική απόκλιση, s_{n-m}	34.6	28.7	35.3	47.7	23.5	12.7	39.2
<i>Λόγοι στατιστικών χαρακτηριστικών</i>							
m_{n-m} / m_n	0.974	0.924	0.893	0.894	0.959	0.931	0.950
s_{n-m} / s_n	0.933	0.755	0.779	0.806	0.925	0.778	0.919
<i>Συντελεστές αναγωγής για τη μεγαλύτερη παρατηρημένη βροχόπτωση</i>							
Για τη μέση τιμή	0.99	0.96	0.94	0.94	1.01	1	1
Για την τυπική απόκλιση	1.03	0.87	0.92	0.95	1.04	0.94	1.08
<i>Συντελεστές αναγωγής για το μέγεθος δείγματος</i>							
Για τη μέση τιμή	1	1.01	1.03	1.03	1.02	1.04	1.03
Για την τυπική απόκλιση	1.01	1.06	1.12	1.13	1.1	1.25	1.13
<i>Ανηγγμένα στατιστικά χαρακτηριστικά</i>							
Μέση τιμή, m	82.9	66.7	72.2	94.5	67.1	52.3	112.0
Τυπική απόκλιση, s	38.6	35.0	46.6	63.5	29.1	19.2	52.0
<i>Τελική εκτίμηση της ΠΜΚ</i>							
Παράμετρος k_m	15.76	16.44	16.20	15.30	16.42	17.09	14.65
ΠΜΚ	691.1	642.9	827.4	1065.9	544.6	381	873.8

Οι υπολογισμοί της μεθόδου Hershfield δίνονται στον Πίν. 3. Οι τιμές της ΠΜΚ που προκύπτουν για τους σταθμούς Ρόδου και Κατταβιάς (691 και 643 mm, αντίστοιχα) είναι παρόμοιες, παρόλο που οι δύο σταθμοί βρίσκονται σε αντιδιαμετρικά αντίθετες θέσεις του νησιού. Οι τιμές αυτές κρίνονται ως πολύ υψηλές για τις ελληνικές συνθήκες· το μεγάλο μέγεθός τους προκύπτει από τις ασυνήθιστα (για τα ελληνικά δεδομένα) υψηλές τιμές της τυπικής απόκλισης (Πίν. 2, Πίν. 3). Για τους υπόλοιπους σταθμούς (Απόλλωνα, Λάερμα, Απολακκιά, Σιάννα, Έμπωνας) προκύπτουν τιμές της ΠΜΚ που εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση, από 381 μέχρι 1066 mm. Όμως, το μικρό μέγεθος των δειγμάτων, σε συνδυασμό με τις μεγάλες τυπικές αποκλίσεις που παρατηρούνται στην περιοχή (οι οποίες συνεπάγονται και μεγάλη αβεβαιότητα στην εκτίμηση της ΠΜΚ) δεν μας επιτρέπει να θεωρήσουμε τις τιμές αυτές ως αξιόπιστες.

Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι οι τιμές της ΠΜΚ που υπολογίστηκαν προήλθαν από επεξεργασία ημερήσιων μετρήσεων βροχομέτρου. Οι τιμές αυτές θα πρέπει να αναχθούν σε μέγιστες τιμές 24ώρου· από τη βιβλιογραφία (π.χ. World Meteorological Organization, 1986) είναι γνωστό ότι ο συντελεστής αναγωγής έχει τιμή 1.13. Εξάλλου, οι τιμές αυτές αναφέρονται σε σημειακή βροχόπτωση και θα πρέπει να αναχθούν σε επιφανειακή βροχόπτωση. Για την αναγωγή χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση που δίνεται από τους Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο (1997, σ. 153)

$$\varphi = 1 - \frac{0.048 A^{0.36 - 0.01 \ln A}}{d^{0.35}} \geq 0.25 \quad (3)$$

όπου φ ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής (αδιάστατος αριθμός), A η έκταση σε km^2 και d η διάρκεια βροχής σε h. Η σχέση αυτή βασίστηκε σε πινακοποιημένα αποτελέσματα του National Environmental Research Council (1975), και αναφέρεται σε εύρος μεταβολής της διάρκειας 1 min έως 25 ημέρες και της έκτασης από 1 έως 30 000 km^2 . Στην προκειμένη περίπτωση, για $A = 147.7 \text{ km}^2$ και $d = 24 \text{ h}$ προκύπτει $\varphi = 0.93$. Το γινόμενο των δύο συντελεστών αναγωγής είναι ίσο με 1.05.

2.2 Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση - Υδρομετεωρολογική μεθοδολογία

2.2.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου

Ως δεύτερη προσέγγιση στην εκτίμηση της ΠΜΚ χρησιμοποιήθηκε η υδρομετεωρολογική μεθοδολογία που βασίζεται στη αναγωγή καταγραμμένων βροχοπτώσεων με μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ατμοσφαιρικής υγρασίας (World Meteorological Organization, 1986). Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια σειρά ιστορικών ισχυρών βροχοπτώσεων, τις οποίες ανάγει σε συνθήκες μεγιστοποιημένης ατμοσφαιρικής υγρασίας με βάση τη σχέση

$$h_m = h \frac{W_m}{W} \quad (4)$$

όπου h το καταγραμμένο ύψος βροχής, h_m το μεγιστοποιημένο ύψος βροχής, W το ύψος κατακρημνίσμου νερού στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης και W_m το μεγιστοποιημένο ύψος κατακρημνίσμου νερού στην ατμόσφαιρα. Το ύψος του κατακρημνίσμου νερού ορίζεται ως η συνολική ποσότητα υδρατμών που περιέχεται σε μια κατακόρυφη στήλη αέρα ύψους που εκτείνεται από τη στάθμη εδάφους z_0 μέχρι το υψόμετρο της τροπόπαυσης z_1 , εκφρασμένη σε ισοδύναμο ύψος νερού, και δίνεται από την εξίσωση

$$W = \frac{1}{\rho_w} \int_{z_0}^{z_1} \rho_v dz = \frac{1}{\rho_w g} \int_{p_1}^{p_0} q dp \quad (5)$$

όπου με z και p συμβολίζονται το υψόμετρο και η ατμοσφαιρική πίεση, αντίστοιχα, p_0 και p_1 είναι η ατμοσφαιρική πίεση στις στάθμες z_0 (επιφάνεια εδάφους) και z_1 , αντίστοιχα, ρ_v και ρ_w είναι η πυκνότητα των υδρατμών και του νερού σε υγρή μορφή, αντίστοιχα, και g η επιτάχυνση βαρύτητας. Για την εκτίμησή του χρειάζονται δεδομένα θερμοκρασίας, πίεσης και σχετικής υγρασίας καθ' ύψος της ατμόσφαιρας, τα οποία αποκτώνται με ραδιοβολίσεις. Βεβαίως, το δίκτυο των θέσεων ραδιοβολίσεων είναι εξαιρετικά αραιό (π.χ. στην Ελλάδα γίνονται ραδιοβολίσεις μόνο σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη) και έτσι η εκτίμηση του κατακρημνίσμου νερού βασίζεται μόνο σε μετεωρολογικές παρατηρήσεις εδάφους. Έτσι γίνεται η παραδοχή της κορεσμένης ψευδο-αδιαβατικής ατμόσφαιρας, οπότε είναι δυνατό να

εκτιμηθεί θεωρητικά το ύψος του κατακρημνίσμου νερού συναρτήσει του υψόμετρου αναφοράς και του σημείου δρόσου στην περιοχή που ενδιαφέρει. Για τη διευκόλυνση της εκτίμησης ο World Meteorological Organization (1986) έχει συντάξει πίνακες τιμών, με βάση τις τιμές των οποίων προσαρμόστηκε η σχέση (Κουτσογιάννης, 1998)

$$W = \exp(2.29 + 0.086 T_d - 0.0005 z_0 + 0.0000075 T_d z_0) - 1.82 \quad (6)$$

όπου T_d το σημείο δρόσου στην επιφάνεια σε °C και z_0 το υψόμετρο του εδάφους σε m (το W υπολογίζεται σε mm).

Το σημείο δρόσου T_d υπολογίζεται από τις μετρήσεις θερμοκρασίας T και σχετικής υγρασίας U με βάση τις σχέσεις

$$e_* = 6.11 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right) \quad (7)$$

όπου e_* η πίεση κορεσμού υδρατμών σε hPa και T η θερμοκρασία σε °C,

$$e = 6.11 \exp\left(\frac{17.27 T_d}{T_d + 237.3}\right) \quad (8)$$

όπου e η πραγματική πίεση υδρατμών σε hPa και T_d η το σημείο δρόσου σε °C, και

$$U := 100 \times \frac{e}{e_*} \quad (9)$$

όπου U η σχετική υγρασία σε ποσοστό %. Η επίλυση ως προς T_d δίνει

$$T_d = \frac{237.3 t}{17.27 - t} \quad (10)$$

όπου

$$t := \frac{17.27 T}{T + 237.3} + \ln\left(\frac{U}{100}\right) \quad (11)$$

Το μεγιστοποιημένο ύψος κατακρημνίσμου νερού στην ατμόσφαιρα W_m εκτιμάται από την (6) (ή από πίνακες ή, ακόμη, από άλλη παρόμοια σχέση που τυχόν έχει προκύψει από τοπικά δεδομένα), με βάση το μέγιστο σημείο δρόσου που έχει παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια πολλών ετών στην περιοχή την υπόψη περίοδο (μήνα ή δεκαπενθήμερο) του έτους (δεδομένου ότι υπάρχει έντονη εποχιακή διακύμανση του σημείου δρόσου). Σύμφωνα με τον World Meteorological Organization (1986, σ. 11) το μέγιστο σημείο δρόσου θα πρέπει να εκτιμηθεί από ιστορικό δείγμα 50 ή περισσότερων ετών· αν το διαθέσιμο δείγμα είναι μικρότερο μεγέθους τότε συστήνεται η επέκταση με στατιστικές μεθόδους για περίοδο επαναφοράς της τάξης των 100 ετών. Εξάλλου, η τιμή που χρησιμοποιείται δεν είναι το στιγμιαίο μέγιστο αλλά η μέγιστη τιμή που το σημείο δρόσου υπερβαίνει επί ένα διάστημα 12 h.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις ισχυρές καταιγίδες το ύψος βροχής που πραγματοποιείται είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το ύψος του κατακρημνίσιμου νερού. Αυτό συμβαίνει επειδή η κύρια πηγή που συντηρεί μια ισχυρή βροχόπτωση δεν είναι η διαθέσιμη υγρασία σε μια δεδομένη κατακόρυφη στήλη της ατμόσφαιρας (η οποία ουσιαστικά ισοδυναμεί με το ύψος του κατακρημνίσιμου νερού και, άλλωστε δεν είναι φυσικώς δυνατό να υγροποιηθεί εξ ολοκλήρου και να πέσει ως κατακρήμνιση) αλλά η συνεχής τροφοδοσία της περιοχής με νέους υδρατμούς που μεταφέρονται από το πεδίο των ανέμων. Έτσι, ο λόγος

$$E = \frac{h}{W} \quad (12)$$

που ονομάζεται αποτελεσματικότητα της καταιγίδας (storm efficiency), είναι κατά κανόνα μεγαλύτερος της μονάδας στις ισχυρές βροχοπτώσεις.

2.2.2 Δεδομένα για την εφαρμογή της μεθόδου

Στην ευρύτερη περιοχή της Ρόδου, ο μόνος σταθμός που διαθέτει δεδομένα σχετικώς ικανοποιητικά για την εφαρμογή της μεθόδου είναι αυτός της ΕΜΥ (Μαριτσά - Παραδείσι). Τα δεδομένα που έγινε δυνατό να αποκτηθούν από το σταθμό αυτό είναι τα εξής:

1. Για την πρώτη φάση της μεθόδου που αποσκοπεί στην εκτίμηση των μέγιστων σημείων δρόσου:
 - Δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας για το διάστημα 1968-1988 (21 χρόνια).
 - Δεδομένα μετρήσεων σχετικής υγρασίας στις 08:00, 14:00 και 20:00 κάθε μέρας για το ίδιο διάστημα 1968-1988.
2. Για τη δεύτερη φάση της μεθόδου που αποσκοπεί στην εκτίμηση της ΠΜΚ:
 - Δεδομένα ύψους και διάρκειας βροχής για επιλεγμένες ισχυρές βροχοπτώσεις για το διάστημα 1952-1996 (45 χρόνια).
 - Μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες για τις ημέρες των επιλεγμένων ισχυρών βροχοπτώσεων.
 - Μέσες ημερήσιες σχετικές υγρασίες για τις ημέρες των επιλεγμένων ισχυρών βροχοπτώσεων.

Ειδικότερα, τα δεδομένα για την πρώτη φάση έχουν ληφθεί από τα Μηνιαία Κλιματολογικά Δελτία της ΕΜΥ. Τα δεδομένα για τη δεύτερη φάση (βλ. Πίν. 5) έχουν ληφθεί από την Προμελέτη (Λαζαρίδης κ.ά., 1979β) για την περίοδο 1952-1976,* ενώ τα υπόλοιπα (1977-1996) μας χορηγήθηκαν από την ΕΜΥ μετά από επεξεργασία που έκανε η ίδια.

* Ειδικά για τη βροχόπτωση στις 22/1/1955 στην Προμελέτη (Υδρορέυνα κ.ά., 1979β) δίνεται τιμή του ύψους βροχής 230.5 mm. Νεότεροι πίνακες ετήσιων μέγιστων ημερήσιων βροχοπτώσεων της ΕΜΥ που μας χορηγήθηκαν δίνουν την τιμή 126.2 mm η οποία και καταχωρήθηκε στον Πίν. 5.

2.2.3 Μέγιστα σημεία δρόσου

Από τα δεδομένα που αναφέρονται παραπάνω για την πρώτη φάση της μεθόδου εκτιμήθηκε για κάθε μέρα η μέση ημερήσια θερμοκρασία ως ο μέσος όρος της μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας και η μέση ημερήσια σχετική υγρασία ως ο σταθμισμένος μέσος των μετρήσεων στις 08:00, 14:00 και 20:00 κάθε μέρας, χρησιμοποιώντας συντελεστές βάρους ανάλογους με τους χρόνους επιρροής (δηλαδή 9, 6 και 9 h, αντιστοίχως). Ακολουθώντας, με βάση τις σχέσεις του εδαφίου 2.2.1, εκτιμήθηκε για κάθε μέρα μια «μέση» τιμή του ημερήσιου σημείου δρόσου και για κάθε μήνα λήφθηκε η μέγιστη από τις τιμές του ημερήσιου σημείου δρόσου, η οποία και καταχωρείται στον Πίν. 4. Ας σημειωθεί ότι ο παραπάνω τρόπος υπολογισμού της «μέσης» ημερήσιας τιμής δίνει μόνο κατά χονδροειδή προσέγγιση το μέσο ημερήσιο σημείο δρόσου. Για ακριβέστερο υπολογισμό θα έπρεπε να είναι γνωστά τα σημεία δρόσου σε διάφορες χρονικές στιγμές της ημέρας, και από αυτά θα έπρεπε να γίνει η εξαγωγή του ημερήσιου (σταθμισμένου) μέσου όρου. Ακόμη, παρατηρούμε ότι η μεθοδολογία αυτή δεν συμβαδίζει ακριβώς με την υπόδειξη του World Meteorological Organization (1986, σ. 11) για μέγιστα 12ωρα σημεία δρόσου. Όμως τα διαθέσιμα δεδομένα δεν επιτρέπουν ακριβέστερη ανάλυση, δεδομένου ότι δεν είναι διαθέσιμες ταυτόχρονες μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας (και εξάλλου, δεν είναι γνωστοί οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν η ελάχιστη και η μέγιστη θερμοκρασία).

Στον Πίν. 4 δίνονται τα δείγματα μέγιστων ημερήσιων σημείων δρόσου, μαζί με τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους για τους μήνες Οκτώβριο-Μάιο· οι υπόλοιποι μήνες δεν ενδιαφέρουν γιατί στη διάρκειά τους δεν έχουν σημειωθεί αξιόλογες βροχοπτώσεις. Παρατηρούμε ότι, ενώ η μέση τιμή μεταβάλλεται σημαντικά από μήνα σε μήνα, η τυπική απόκλιση παρουσιάζει σχετική σταθερότητα και γι' αυτό υιοθετήθηκε σταθερή τιμή της όπως φαίνεται στον Πίν. 4. Εξάλλου, στον ίδιο πίνακα δίνονται οι παράμετροι των κατανομών μεγίστων Gumbel που προσαρμόστηκαν στα δείγματα μέγιστων σημείων δρόσου, καθώς και οι προβλέψεις αυτής της κατανομής για περιόδους επαναφοράς 2, 50, 100 και 250 χρόνια. Η συνάρτηση κατανομής μεγίστων Gumbel περιγράφεται από την εξίσωση

$$F(x) = \exp(-e^{-x/\lambda + \psi}) \quad (13)$$

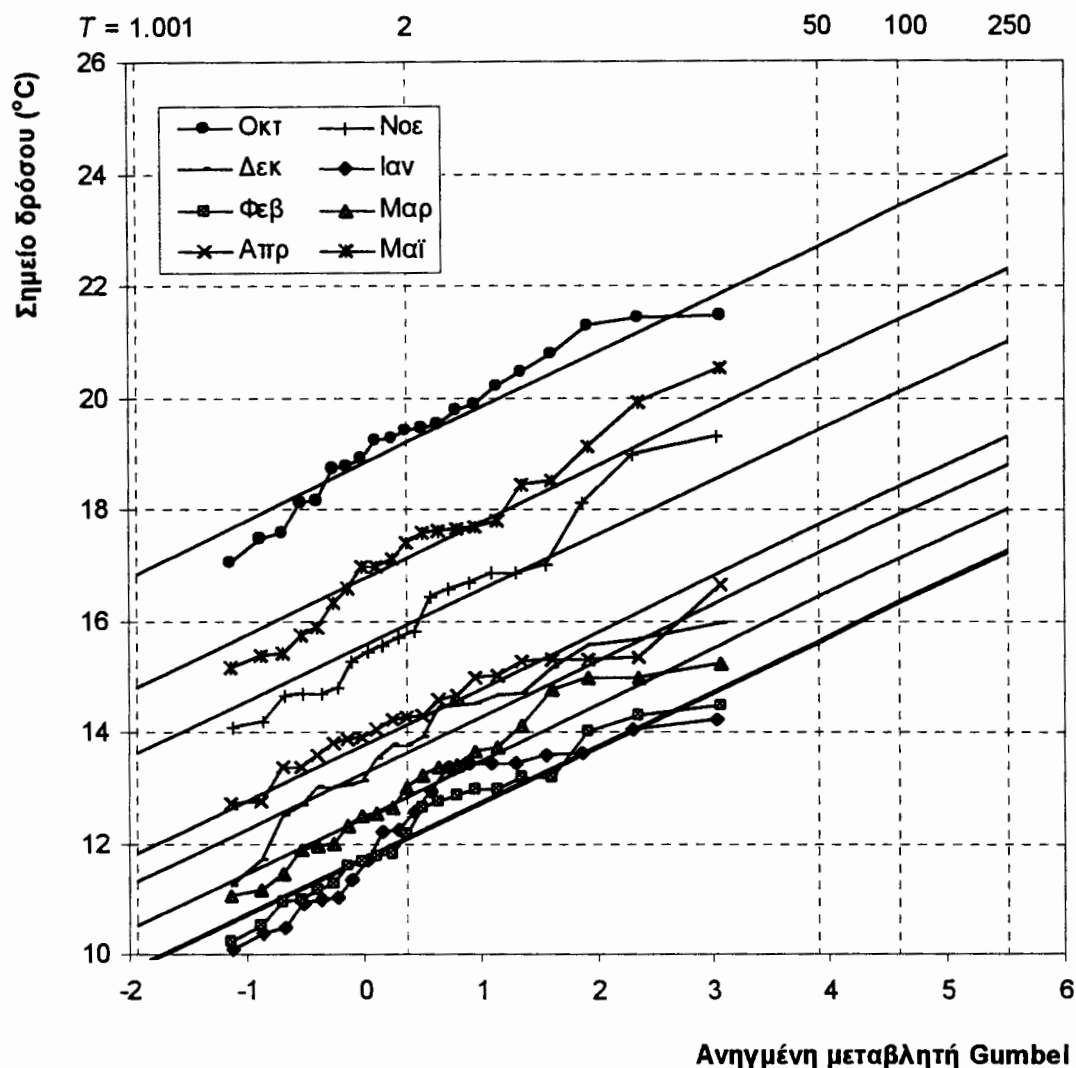
όπου x η τιμή της υπόψη τυχαίας μεταβλητής (εν προκειμένω του σημείου δρόσου), $F(x)$ η συνάρτηση κατανομής (ή πιθανότητα μη υπέρβασης), και λ και ψ παράμετροι κλίμακας και θέσης, αντίστοιχα, που εν προκειμένω εκτιμήθηκαν με τη μέθοδο των ροπών. Ενδεικτικό της καταλληλότητας της κατανομής Gumbel είναι το Σχ. 5, στο οποίο έχουν απεικονιστεί οι εμπειρικές συναρτήσεις κατανομής των μεγίστων σημείων δρόσου σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συναρτήσεις κατανομής Gumbel.

Πίν. 4 Μέγιστα ημερήσια σημεία δρόσου ($^{\circ}\text{C}$) για κάθε μήνα στο μετεωρολογικό σταθμό της Ρόδου.

Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ
1968	19.3	16.6	14.4	10.5	14.5	12.5	15.0	17.8
1969	17.5	16.4	14.5	12.2	12.6	13.7	12.7	15.9
1970	18.8	14.8	13.0	14.2	14.0	13.6	14.3	16.3
1971	17.0	15.7	12.7	12.9	10.2	13.4	15.0	15.4
1972	18.9	14.7	13.0	11.0	11.3	11.2	15.3	16.6
1973	19.4	14.1	12.5	11.0	11.2	11.9	13.3	17.6
1974	19.4	17.0	11.2	8.6	11.0	13.2	12.7	15.1
1975	18.1	15.8	13.9	10.4	11.8	13.0	13.6	17.6
1976	19.8	16.8	14.5	10.1	10.9	11.1	13.4	15.7
1977	17.6		13.5	12.2	13.0	11.4	14.0	15.4
1978	19.2	14.2	13.1	12.6	11.7	15.0	14.2	17.6
1979	20.2	18.1	14.7	13.6	14.3	15.2	15.3	19.9
1980	21.4	19.0	15.6	11.7	11.6	14.7	13.8	17.4
1981	21.5	15.3	15.9	11.4	12.8	15.0	16.6	20.5
1982	20.8	15.4	13.7	13.4	10.5	11.9	14.6	17.1
1983	18.2	16.8	14.7	10.9	12.8	12.0	15.3	19.1
1984	20.5	16.7	11.7	13.4	13.2	14.1	13.9	16.9
1985	19.5	19.3	15.2	14.0	12.9	12.6	14.7	18.4
1986	19.9	15.6	13.0	13.4	12.2	13.4	15.3	17.0
1987	21.3	14.7	15.7	13.3	13.2	12.5	13.9	17.7
1988	18.7	14.7	13.7	13.6	11.6	12.3	14.3	18.5
Στατιστικά χαρακτηριστικά δείγματος								
Ελάχιστη τιμή	17.03	14.07	11.22	10.06	10.23	11.06	12.69	15.14
Μέγιστη τιμή	21.47	19.30	15.94	14.22	14.45	15.24	16.62	20.53
Μέση τιμή	19.37	16.07	13.82	12.29	12.25	13.03	14.34	17.31
Τυπ. απόκλιση	1.25	1.45	1.24	1.30	1.19	1.24	0.94	1.42
Τυπ. απόκλιση (ενιαία)	1.29							
Παράμετροι κατανομής Gumbel								
λ	1.004	1.004	1.004	1.004	1.004	1.004	1.004	1.004
ψ	18.71	15.42	13.18	11.66	11.62	12.40	13.70	16.66
Εκτιμήσεις από κατανομή Gumbel για $T =$								
2	19.2	15.9	13.6	12.1	12.0	12.8	14.1	17.1
50	22.7	19.4	17.2	15.6	15.6	16.4	17.7	20.7
100	23.4	20.1	17.9	16.3	16.3	17.1	18.4	21.4
250	24.3	21.0	18.8	17.3	17.2	18.0	19.3	22.3

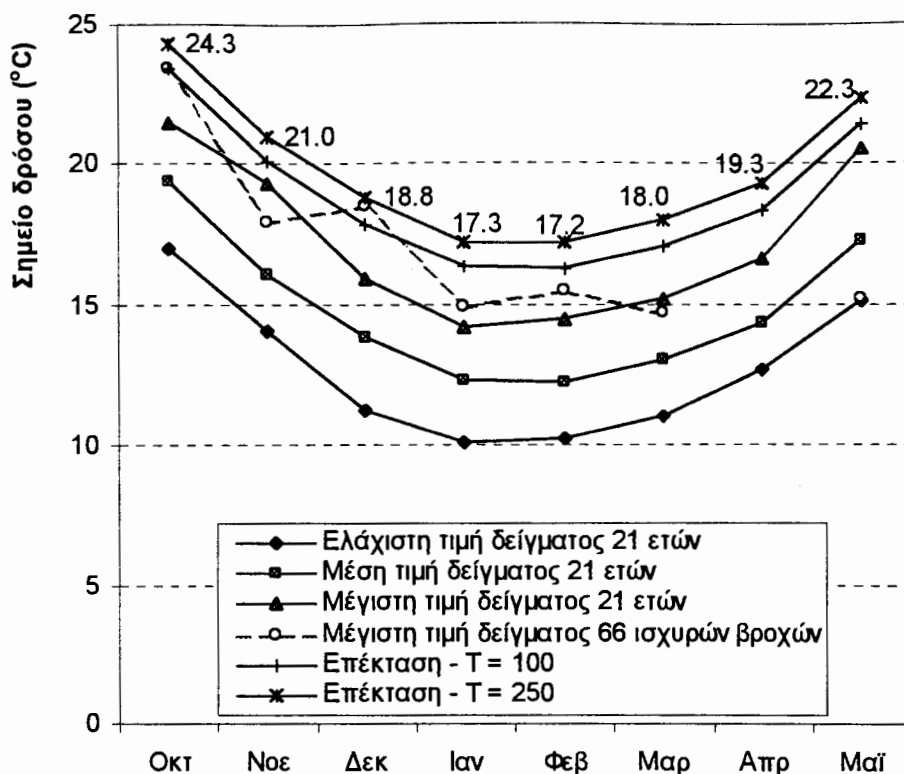
Στο Σχ. 6 έχουν απεικονιστεί χαρακτηριστικές τιμές που έχουν προκύψει από την ανάλυση των δειγμάτων του Πίν. 4. Συγκεκριμένα για κάθε μήνα έχει απεικονιστεί η ελάχιστη, μέση και μέγιστη τιμή του αντίστοιχου δείγματος (μεγέθους 21 ετών) των μέγιστων ημερήσιων σημείων δρόσου, σε σύγκριση και με τις αντίστοιχες επεκτάσεις για περιόδους επαναφοράς 50, 100 και 250 ετών, όπως προκύπτουν από την κατανομή Gumbel. Παράλληλα, έχουν απεικονιστεί στο ίδιο σχήμα τα μέγιστα σημεία δρόσου που έχουν παρατηρηθεί στο δείγμα των 66 επιλεγμένων βροχοπτώσεων του Πίν. 5, το οποίο καλύπτει περίοδο 45 ετών. Γενικώς παρατηρούμε τα ακόλουθα: (α) η εποχιακή μεταβολή των σημείων δρόσου (ελάχιστων, μέσων, μέγιστων τιμών και επεκτάσεων) είναι εύλογη και ακολουθεί το γενικό σχήμα εποχιακής μεταβολής της θερμοκρασίας· (β) οι τιμές επέκτασης για περίοδο επαναφοράς 250 ετών είναι κατά 0.9°C μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές επέκτασης για περίοδο επαναφοράς

100 ετών (γ) οι μέγιστες τιμές του (μη πλήρους) δείγματος των 45 ετών (66 ημερών βροχής) σε δύο περιπτώσεις υπερβαίνουν τις τιμές επέκτασης για περίοδο επαναφοράς 100 ετών που προκύπτουν από το (πλήρες) δείγμα των 21 ετών, ενώ για όλους τους μήνες διατηρούνται κάτω από τις αντίστοιχες προβλέψεις για περίοδο επαναφοράς 250 ετών, ή το πολύ τις φτάνουν.



Σχ. 5 Εμπειρικές και θεωρητικές (Gumbel) συναρτήσεις κατανομής των ετήσιων μέγιστων ημερήσιων σημείων δρόσου στο σταθμό της Ρόδου.

Για τους παραπάνω λόγους και με στόχο την ασφαλέστερη εκτίμηση της ΠΜΚ, αλλά και για αντιστάθμιση των αποκλίσεων από τις συστάσεις του World Meteorological Organization που υποχρεωτικώς έγιναν κατά το σχηματισμό των δειγμάτων μέγιστων σημείων δρόσου (βλ. εδάφιο 2.2.2) οδηγούμαστε στην αποδοχή των τιμών των επεκτάσεων 250ετίας ως μέγιστων σημείων δρόσου για τους περαιτέρω υπολογισμούς της μεθόδου (αντί της υιοθέτησης των τιμών 100ετίας που συζητήθηκε στο εδάφιο 2.2.1).



Σχ. 6 Χαρακτηριστικές τιμές του μέγιστου ημερήσιου σημείου δρόσου για κάθε μήνα.

2.2.4 Εκτίμηση της ΠΜΚ

Η δεύτερη φάση εφαρμογής της μεθόδου περιλαμβάνει τους υπολογισμούς που περιγράφηκαν στο εδάφιο 2.2.1 και παρουσιάζονται στον Πίν. 5. Από τους υπολογισμούς προκύπτει ότι η βροχόπτωση που καταγράφηκε στις 5/10/1989 με ύψος βροχής 158 mm και διάρκεια 9.17 h μετά τη μεγιστοποίησή της σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο οδηγεί σε ύψος βροχής 359.2 mm που είναι και το μεγαλύτερο από τα μεγιστοποιημένα ύψη βροχής. Για την αναγωγή του ύψους αυτού που αναφέρεται σε διάρκεια 9.17 h σε 24ωρο ύψος γίνεται η παραδοχή μεταβολής του ύψους h με τη διάρκεια d σύμφωνα με μια σχέση δύναμης της μορφής

$$h(d) \propto d^{\nu} \quad (14)$$

όπου ο εκθέτης ν μπορεί να θεωρηθεί ίσος με 0.35, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις που παρατίθενται στην ενότητα 2.4. Με αυτή την παραδοχή προκύπτει ότι το αντίστοιχο 24ωρο μεγιστοποιημένο ύψος βροχής είναι $359.2 \times (24/9.17)^{0.35} = 503.1$ mm. Από την τελευταία στήλη του Πίν. 5 παρατηρούμε ότι το ύψος των 503.1 mm είναι και το μεγαλύτερο απ' όλα τα μεγιστοποιημένα και ταυτόχρονα ανηγμένα σε 24ωρη διάρκεια ύψη βροχής. Το αμέσως μικρότερο ύψος φτάνει τα 442.2 mm και αντιστοιχεί στη βροχόπτωση της 07/05/1994.

Πίν. 5 Δεδομένα ισχυρών βροχοπτώσεων στο σταθμό της Ρόδου και υπολογισμοί μεγιστοποίησης του ύψους βροχής για την εκτίμηση της ΠΜΚ.

Ημερομηνία	Ύψος βροχής, h (mm)	Διάρκεια βροχής, d (h)	Σχετική υγρασία, U (%)	Θερμοκρασία, T (°C)	Σημείο δρόσου, T_d (°C)	Ύψος κατακρ. νερού, W (mm)	Αποτελεσματικότητα βροχής, $E = h/W$	Μέγιστο σημείο δρόσου, T_{dm} (°C)	Μεγ. ύψος κατακρην. νερού, W_{max} (mm)	Λόγος W_{max}/W	Μεγιστοποιημένο ύψος βροχής, $h_{m,d}$ (mm)	Ανηγμένο μεγ. ύψος βροχής, $h_{m,24}$ (mm)
23/12/1952	64.0	16.25	81	13.5	10.3	22.1	2.89	18.8	47.9	2.16	138.5	158.8
06/11/1953	88.9	9.75	83	19.7	16.7	39.8	2.23	21.0	58.3	1.46	130.1	178.4
08/03/1954	126.2	12.92	89	10.5	8.8	19.2	6.58	18.0	44.6	2.33	293.7	364.8
22/01/1955	126.2	16.75	97	15.4	14.9	33.8	3.73	17.3	41.7	1.23	155.6	176.5
30/11/1956	66.2	6.58	88	18.2	16.2	37.9	1.75	21.0	58.3	1.54	101.8	160.2
20/10/1957	26.8	8.25	94	21.2	20.2	54.3	0.49	24.3	78.0	1.44	38.5	56.0
06/12/1958	124.6	5.75	91	20.0	18.5	46.6	2.67	18.8	47.9	1.03	128.2	211.3
07/12/1959	61.0	6.17	95	16.2	15.4	35.3	1.73	18.8	47.9	1.36	82.8	133.2
04/01/1960	54.2	19.53	95	15.0	14.2	31.7	1.71	17.3	41.7	1.32	71.4	76.7
26/11/1960	72.0	8.38	95	18.6	17.8	43.8	1.65	21.0	58.3	1.33	95.9	138.6
24/12/1960	126.7	16.20	99	16.2	16.0	37.4	3.39	18.8	47.9	1.28	162.3	186.2
08/12/1961	70.2	16.75	87	13.7	11.6	24.9	2.82	18.8	47.9	1.92	135.1	153.2
27/10/1962	49.1	18.35	96	18.6	17.9	44.4	1.11	24.3	78.0	1.76	86.2	94.7
01/11/1962	53.1	9.17	87	20.2	18.0	44.5	1.19	21.0	58.3	1.31	69.6	97.4
02/01/1964	50.3	14.45	95	10.6	9.8	21.2	2.37	17.3	41.7	1.97	99.0	118.3
28/12/1964	50.7	4.50	98	16.6	16.3	38.2	1.33	18.8	47.9	1.25	63.5	114.2
18/01/1965	52.4	10.10	95	13.2	12.4	26.9	1.95	17.3	41.7	1.55	81.2	110.0
06/02/1965	65.4	14.50	94	9.0	8.1	18.0	3.64	17.2	41.6	2.31	151.2	180.4
21/03/1965	65.4	14.10	97	15.2	14.7	33.2	1.97	18.0	44.6	1.34	87.8	105.8
22/12/1965	49.0	12.40	95	15.2	14.4	32.3	1.52	18.8	47.9	1.49	72.8	91.7
24/01/1966	53.4	17.30	97	14.6	14.1	31.5	1.70	17.3	41.7	1.33	70.8	79.4
25/02/1966	53.1	5.30	97	16.0	15.5	35.7	1.49	17.2	41.6	1.16	61.8	104.9
04/10/1966	52.8	3.35	91	25.0	23.4	72.2	0.73	24.3	78.0	1.08	57.0	113.6
02/11/1967	48.9	17.20	99	18.0	17.8	44.0	1.11	21.0	58.3	1.33	64.8	72.8
02/01/1968	72.6	11.40	85	15.0	12.5	27.1	2.68	17.3	41.7	1.54	111.7	144.9
02/12/1968	146.4	16.33	100	15.8	15.8	36.6	4.00	18.8	47.9	1.31	191.6	219.3
11/01/1969	50.4	11.75	93	14.6	13.5	29.7	1.70	17.3	41.7	1.41	70.9	91.0
20/12/1969	49.5	17.55	93	14.4	13.3	29.1	1.70	18.8	47.9	1.65	81.4	90.9
23/12/1970	59.6	9.67	91	17.4	15.9	37.0	1.61	18.8	47.9	1.30	77.2	106.1
06/02/1971	44.2	14.17	94	11.8	10.9	23.3	1.90	17.2	41.6	1.78	78.8	94.7
05/10/1972	124.4	8.17	94	23.2	22.2	64.7	1.92	24.3	78.0	1.21	150.0	218.7
26/01/1973	83.0	9.75	92	13.2	11.9	25.7	3.23	17.3	41.7	1.62	134.6	184.4
27/02/1973	49.5	7.45	95	13.8	13.0	28.4	1.74	17.2	41.6	1.46	72.4	109.0
05/11/1974	57.2	14.92	93	15.2	14.1	31.3	1.83	21.0	58.3	1.86	106.5	125.7
14/05/1975	60.4	22.08	94	16.2	15.2	34.8	1.74	22.3	65.4	1.88	113.6	116.9
23/10/1975	48.0	3.45	91	18.4	16.9	40.4	1.19	24.3	78.0	1.93	92.6	182.6
02/02/1976	47.0	16.42	88	13.4	11.5	24.6	1.91	17.2	41.6	1.69	79.3	90.6
10/01/1977	51.7	10.75	78	11.0	7.3	16.7	3.09	17.3	41.7	2.50	129.1	171.0
03/11/1977	90.8	8.25	81	12.0	8.8	19.3	4.70	21.0	58.3	3.02	274.1	398.2
07/12/1978	117.5	14.25	84	14.0	11.3	24.4	4.82	18.8	47.9	1.97	231.0	277.3
06/03/1979	67.2	15.17	90	12.8	11.2	24.1	2.79	18.0	44.6	1.85	124.6	146.3
21/10/1979	66.5	7.17	91	18.6	17.1	41.2	1.62	24.3	78.0	1.90	126.0	192.4
20/02/1980	92.4	15.92	89	10.7	9.0	19.5	4.73	17.2	41.6	2.13	196.7	227.1
02/01/1981	47.3	8.75	90	11.5	9.9	21.4	2.22	17.3	41.7	1.95	92.4	131.5
15/11/1981	76.9	9.08	86	15.1	12.8	27.8	2.77	21.0	58.3	2.10	161.1	226.4
23/03/1982	76.9	10.17	84	12.2	9.6	20.7	3.72	18.0	44.6	2.16	165.8	224.0
06/11/1982	51.0	3.75	82	17.5	14.4	32.2	1.58	21.0	58.3	1.81	92.2	176.6
03/03/1983	54.1	12.67	90	11.2	9.6	20.8	2.60	18.0	44.6	2.15	116.2	145.3
28/10/1983	124.1	15.25	92	15.0	13.7	30.3	4.10	24.3	78.0	2.58	319.6	374.5
31/12/1984	65.3	6.58	76	14.5	10.3	22.2	2.94	18.8	47.9	2.16	141.1	221.9
04/03/1985	60.4	11.00	87	10.6	8.5	18.7	3.22	18.0	44.6	2.38	143.8	188.9
05/01/1986	85.6	13.83	87	15.3	13.2	28.8	2.97	17.3	41.7	1.45	124.1	150.5
09/03/1987	37.0	12.00	94	4.7	3.8	11.9	3.11	18.0	44.6	3.75	138.8	176.9
26/02/1988	75.2	16.25	77	13.2	9.3	20.1	3.75	17.2	41.6	2.07	155.7	178.4
05/11/1988	178.8	17.33	92	15.9	14.6	32.8	5.44	21.0	58.3	1.77	317.2	355.5
05/10/1989	158.0	9.17	80	18.6	15.1	34.3	4.60	24.3	78.0	2.27	359.2	503.1
23/11/1989	105.5	12.15	80	18.1	14.6	32.8	3.21	21.0	58.3	1.78	187.3	237.7
02/01/1990	36.5	11.50	88	12.3	10.4	22.3	1.64	17.3	41.7	1.87	68.4	88.4
13/02/1991	62.7	13.08	89	13.6	11.8	25.5	2.46	17.2	41.6	1.63	102.3	126.5
17/03/1992	54.8	9.33	91	12.3	10.9	23.3	2.35	18.0	44.6	1.91	104.8	145.8
30/11/1993	174.7	13.50	87	15.5	13.3	29.3	5.96	21.0	58.3	1.99	347.5	425.0
07/05/1994	138.5	8.58	86	15.7	13.4	29.4	4.72	22.3	65.4	2.23	308.6	442.2
20/11/1994	104.4	12.42	90	15.3	13.7	30.2	3.46	21.0	58.3	1.93	201.6	253.9
19/12/1995	84.6	23.17	89	14.1	12.3	26.7	3.17	18.8	47.9	1.80	152.1	154.0
28/01/1996	92.4	17.17	89	13.1	11.3	24.3	3.80	17.3	41.7	1.71	158.3	178.0
10/10/1996	50.0	2.67	82	20.2	17.0	40.9	1.22	24.3	78.0	1.91	95.4	205.8
Μέγιστη τιμή					23.4	72.2	6.58	24.3	78.0	3.75	369.2	503.1

Συμπερασματικά το ύψος των 503.1 mm μπορεί να θεωρηθεί ως η εκτίμηση της ΠΜΚ με την υπόψη υδρομετεωρολογική μεθοδολογία. Κατά μία άλλη συναφή προσέγγιση, η οποία εφαρμόστηκε στην Προμελέτη (Λαζαρίδης κ.ά., 1979β) η εκτίμηση της ΠΜΚ μπορεί να θεωρηθεί ως το γινόμενο της μέγιστης παρατηρημένης τιμής της αποτελεσματικότητας της βροχής επί το μέγιστο πιθανό ύψος κατακρημνίσιμου νερού. Ως μέγιστη παρατηρημένη αποτελεσματικότητα μπορεί να θεωρηθεί η τιμή 6.58 που αντιστοιχεί στη βροχόπτωση της 08/03/1954 διάρκειας 12.92 ωρών και ύψους 126.2 mm. Με αναγωγή της τιμής 6.58 σε 24ωρη διάρκεια προκύπτει η τιμή 8.18 που είναι και η μέγιστη μεταξύ των ανηγμένων 24ωρων τιμών. Θεωρώντας ότι το μέγιστο πιθανό ύψος κατακρημνίσιμου νερού είναι 88.2 mm (τιμή που κατά τον Πίν. 5 αντιστοιχεί στο μήνα Οκτώβριο) προκύπτει το ύψος της ΠΜΚ 24ωρης διάρκειας ίσο με $8.18 \times 88.2 = 721.5$ mm. Η τιμή αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη (κατά 43%) από την παραπάνω τιμή των 503.1 mm που προέκυψε από την πιο καθιερωμένη μεθοδολογία μεγιστοποίησης της διαθέσιμης ατμοσφαιρικής υγρασίας.

2.3 Πιθανοτική ανάλυση ακραίων βροχοπτώσεων

2.3.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου

Για λόγους σύγκρισης, αλλά και για λόγους συμπληρωματικών εκτιμήσεων λιγότερο ακραίων υψών βροχής, εφαρμόζεται και η καθαρώς πιθανοτική προσέγγιση, η οποία ως γνωστόν δεν δέχεται ότι υπάρχει ανώτατο φυσικό όριο στο ύψος βροχής, αλλά ότι σε κάθε τιμή του ύψους βροχής αντιστοιχεί μια μη μηδενική πιθανότητα υπέρβασης. Η μέθοδος εφαρμόζεται στο δείγμα ετήσιων μέγιστων ημερήσιων βροχοπτώσεων της Ρόδου που φαίνεται στον Πίν. 2, βάσει του οποίου έγινε και η εκτίμηση της ΠΜΚ.

Μια συνάρτηση κατανομής που αποδεικνύεται κατάλληλη για το μέγιστο ύψος βροχής σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων είναι η κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών (ΓΑΤ· διεθνώς General Extreme Value – GEV distribution). Αυτή η κατανομή ενσωματώνει τις κατανομές ακραίων τιμών τύπου I, II, και III και έχει την έκφραση

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + \kappa\left(\frac{x}{\lambda} - \psi\right)\right]^{-1/\kappa}\right\} \quad x \geq \lambda (\psi - 1/\kappa) \quad (15)$$

όπου $F(x)$ η συνάρτηση κατανομής για τιμές της μεταβλητής x , και $\kappa > 0$, $\lambda > 0$ και ψ οι παράμετροι σχήματος, κλίμακας και θέσης, αντίστοιχα (Η περίπτωση $\kappa < 0$, αν και μαθηματικά είναι δυνατή, δεν είναι κατάλληλη για μέγιστα ύψη βροχής, γιατί συνεπάγεται άνω φραγμένη τιμή της έντασης, γεγονός που αντίκειται στη φυσική πραγματικότητα). Η μεταβλητή x εδώ αντιπροσωπεύει το ύψος βροχής h .

Η (15) επιλύεται άμεσα ως προς x , οπότε με την προϋπόθεση ότι $F(x) = 1 - 1/T$, όπου T η περίοδος επαναφοράς (προϋπόθεση που ισχύει για σειρές ετήσιων μέγιστων) προκύπτει

$$x_T = \lambda \left\{ \psi + \frac{\left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-\kappa} - 1}{\kappa} \right\} = \lambda' \left\{ \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-\kappa} - \psi' \right\} \quad (16)$$

όπου για απλοποίηση έχει τεθεί $\lambda' = \lambda / \kappa$ and $\psi' = 1 - \kappa \psi$ (Koutsoyiannis et. al., 1998).

Για $\kappa = 0$ η κατανομή ΓΑΤ μεταπίπτει στην κατανομή μεγίστων τύπου I (Gumbel), οπότε η (15) παίρνει την ειδική μορφή (13), ενώ αντίστοιχα, η (16) παίρνει τη μορφή (Κουτσογιάννης, 1997, Koutsoyiannis et. al., 1998)

$$x_T = \lambda \left\{ \psi - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (17)$$

Για $\kappa = 1 / \psi$ (ή ισοδύναμα $\psi' = 0$) η κατανομή ΓΑΤ μεταπίπτει στην κατανομή μεγίστων τύπου II.

Η κατανομή Gumbel έχει γίνει αποδεκτή ευρύτατα στην Ελλάδα και διεθνώς για την περιγραφή μεγίστων υψών ή εντάσεων βροχής, χρησιμοποιώντας συνήθως δείγματα μήκους λίγων δεκάδων ετών. Ωστόσο, η μελέτη ενός δείγματος αρκετά μεγαλύτερου μήκους, του δείγματος μεγίστων ημερήσιων βροχοπτώσεων του Αστεροσκοπείου Αθηνών, μήκους 136 ετών, έδειξε ότι η κατανομή Gumbel απορρίπτεται στατιστικώς, παρόλο που δεν θα απορρίπτονταν αν το μήκος του δείγματος ήταν μικρότερο. Αντίστοιχα είναι τα συμπεράσματα για την κατανομή μεγίστων τύπου II. Αντίθετα, η κατανομή ΓΑΤ με παράμετρο σχήματος $\kappa = 0.16$ έως 0.19 φάνηκε να είναι κατάλληλη για το υπόψη δείγμα (Koutsoyiannis and Baloutsos, 1998).

Εξάλλου, από πρόσφατη στατιστική διερεύνηση (Koutsoyiannis, 1998) των δεδομένων από 2645 σταθμούς όλου του κόσμου, με συνολικό πλήθος μετρήσεων 95 000 σταθμών-ετών, τα οποία είχαν μελετηθεί παλιότερα από τον Hershfield (1961, 1965) και αποτέλεσαν τη βάση για τη διατύπωση της φερώνυμης μεθόδου εκτίμησης της ΠΜΚ διαπιστώθηκε ότι (α) η κατανομή ΓΑΤ είναι γενικά κατάλληλη για ετήσιες σειρές μεγίστων βροχοπτώσεων, (β) η τιμή που υπολογίζεται με τη μέθοδο Hershfield (1961, 1965) ως ΠΜΚ, αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς περίπου 60 000 ετών, και (γ) η τιμή της παραμέτρου σχήματος της κατανομής ΓΑΤ δίνεται ως συνάρτηση της μέσης τιμής της ετήσιας μέγιστης 24ωρης βροχόπτωσης \bar{h} , από τη σχέση

$$\kappa = 0.183 - 0.00049 \bar{h} \quad (\bar{h} \text{ σε mm}) \quad (18)$$

Η σύγκριση της παραπάνω εναλλακτικής διατύπωσης της μεθόδου Hershfield με την κατανομή που προκύπτει από το δείγμα 136 ετών του Αστεροσκοπείου Αθηνών έδειξε πλήρη συμφωνία (Koutsoyiannis, 1998).

Τα παραπάνω συνηγορούν στην κατ' αρχήν αποδοχή της ΓΑΤ ως κατάλληλης κατανομής για μέγιστες βροχοπτώσεις. Σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλο μήκος δείγμα, η παράμε-

τρος σχήματος της κατανομής μπορεί να εκτιμάται άμεσα από το δείγμα. Σε αντίθετη περίπτωση είναι προτιμότερο να εκτιμάται από την (18).

Η εκτίμηση των παραμέτρων κ , λ και ψ της κατανομής ΓΑΤ μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους της στατιστικής, από τις οποίες εδώ παρουσιάζονται οι δύο συνηθέστερες που χρησιμοποιούνται παρακάτω.

Η πρώτη είναι η διαδεδομένη μέθοδος των ροπών, η οποία βασίζεται στις εξισώσεις

$$\frac{\Gamma(1-3\kappa) - 3\Gamma(1-2\kappa)\Gamma(1-\kappa) + 2\Gamma^3(1-\kappa)}{[\Gamma(1-2\kappa) - \Gamma^2(1-\kappa)]^{3/2}} = C_s \quad (19)$$

$$\lambda = \frac{\kappa\sigma}{\sqrt{\Gamma(1-2\kappa) - \Gamma^2(1-\kappa)}} \quad (20)$$

$$\psi = \frac{\mu}{\lambda} - \frac{\Gamma(1-\kappa) - 1}{\kappa} \quad (21)$$

όπου μ η μέση τιμή, σ η τυπική απόκλιση και C_s ο συντελεστής ασυμμετρίας της κατανομής, ενώ $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση γάμα. Η (19) λύνεται μόνο αριθμητικά και δίνει την παράμετρο κ . Στην περίπτωση που εξετάζουμε αντί της (19) μπορούμε να χρησιμοποιούμε τη (18) για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Η δεύτερη είναι η μέθοδος των L-ροπών, μια σχετικά νέα μέθοδος εκτίμησης παραμέτρων. Σε αντίθεση με την κλασική μέθοδο ροπών, η μέθοδος των L-ροπών αποφεύγει την ύψωση στο τετράγωνο ή στον κύβο των τιμών του δείγματος· για το λόγο αυτό οδηγεί σε πιο εύρωστες εκτιμήσεις, αφού δεν αποδίδει υπερβολική σημασία σε τυχόν εμφάνιση μιας ή περισσότερων εξαιρετικά ασυνήθων τιμών στο δείγμα. Η μέθοδος στηρίζεται στις ακόλουθες εξισώσεις

$$\kappa = 7.8c - 1.43c^2 \quad (22)^*$$

$$\lambda = \frac{\kappa\lambda_2}{\Gamma(1-\kappa)(2^\kappa - 1)} \quad (23)$$

$$\psi = \frac{\lambda_1}{\lambda} - \frac{\Gamma(1-\kappa) - 1}{\kappa} \quad (24)$$

όπου

$$c := \frac{\ln 2}{\ln 3} - \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} \quad (25)$$

* Οι συντελεστές που φαίνονται στην (22) είναι ακριβέστεροι από αυτούς της βιβλιογραφίας (π.χ. Stedinger et al., 1993, σ. 18.18) για θετικές τιμές του κ που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση. Για $\kappa < 0$ είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται οι συντελεστές της βιβλιογραφίας, δηλαδή $\kappa = 7.859c - 2.9554c^2$.

και λ_1 , λ_2 και λ_3 οι τρεις πρώτες L-ροπές της κατανομής. Αμερόληπτες εκτιμήσεις των L-ροπών δίνονται από τις εξισώσεις (βλ. Stedinger et al., 1993, σ. 18.6)

$$\hat{\lambda}_1 = b_0 \quad (26)$$

$$\hat{\lambda}_2 = 2 b_1 - b_0 \quad (27)$$

$$\hat{\lambda}_3 = 6 b_2 - 6 b_1 + b_0 \quad (28)$$

όπου b_0 , b_1 και b_2 οι εκτιμήσεις των πιθανοτικά σταθμισμένων ροπών (probability-weighted moments) που δίνονται από τις εξισώσεις

$$b_0 = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{(j)} \quad (29)$$

$$b_1 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n-1} (n-j) x_{(j)} \quad (30)$$

$$b_2 = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{j=1}^{n-2} (n-j)(n-j-1) x_{(j)} \quad (31)$$

όπου n το μέγεθος του δείγματος και $x_{(j)}$ ($j = 1, \dots, n$) η τιμή του δείγματος που έχει σειρά j στο δείγμα που έχει καταταχτεί σε φθίνουσα σειρά.

2.3.2 Εφαρμογή της μεθόδου

Χρησιμοποιείται το δείγμα των ετήσιων μέγιστων ημερήσιων υψών βροχής στη Ρόδο που φαίνεται στον Πίν. 2. Υιοθετείται η κατανομή ΓΑΤ και εφαρμόζονται δύο εναλλακτικές μέθοδοι εκτίμησης παραμέτρων: η μέθοδος των ροπών με την παραλλαγή της χρήσης της (18) αντί της (19), σε τρόπο ώστε τα αποτελέσματα να είναι συμβιβαστά με τις παραπάνω παρατηρήσεις που αφορούν στη μέθοδο Hershfield, και η μέθοδος των L-ροπών.

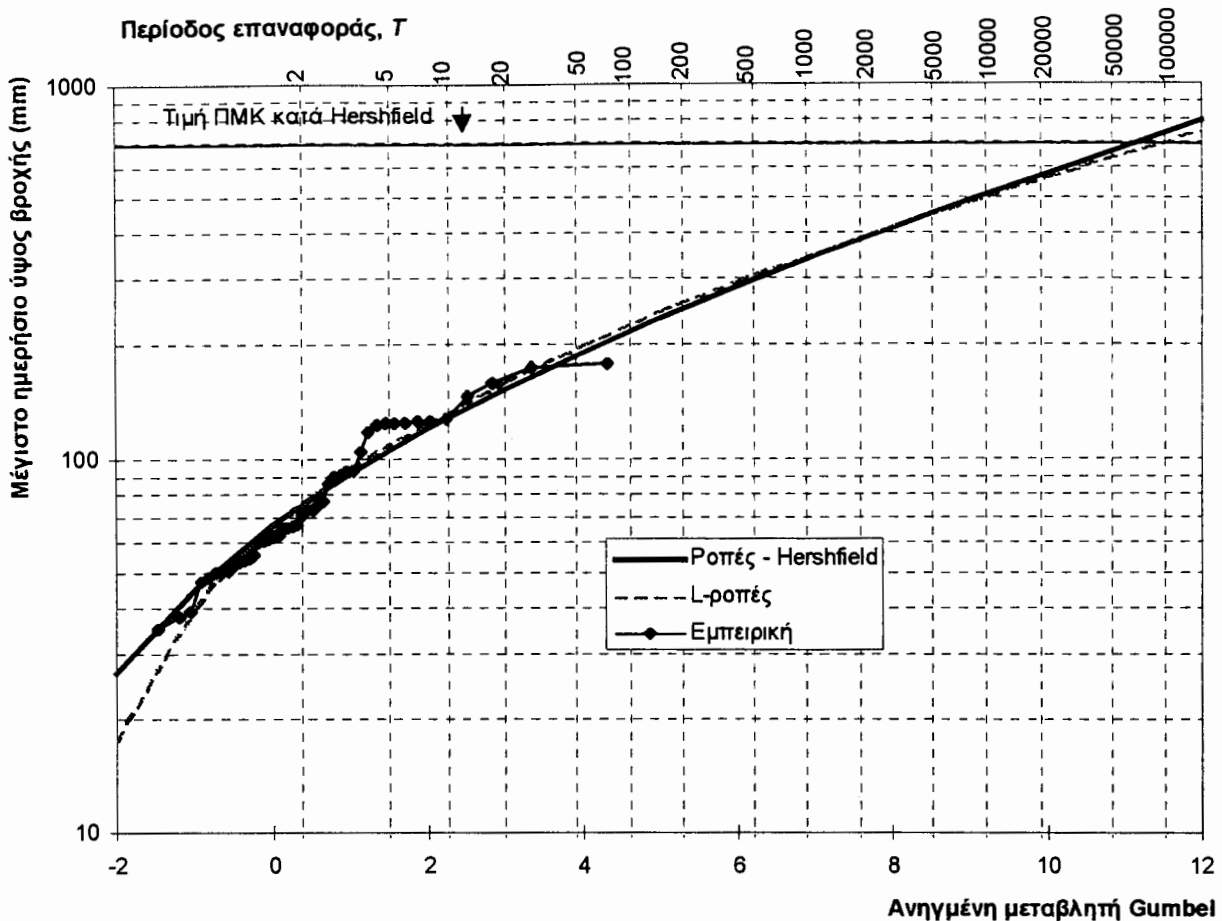
Οι τιμές των παραμέτρων φαίνονται στον Πίν. 6, μαζί με τις εκτιμήσεις του ετήσιου μέγιστου ημερήσιου ύψους βροχής για χαρακτηριστικές τιμές της περιόδου επαναφοράς, όπως προκύπτουν από την κατανομή ΓΑΤ. Όπως παρατηρούμε, τα δύο σύνολα παραμέτρων, εκτιμημένα με τις δύο μεθόδους που προαναφέρθηκαν, καθώς και τα δύο σύνολα εκτιμήσεων του μέγιστου ημερήσιου ύψους βροχής, δεν διαφέρουν σημαντικά. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το Σχ. 7. Επιπλέον, το ίδιο σχήμα είναι ενδεικτικό της καλής προσαρμογής της κατανομής ΓΑΤ στο υπόψη δείγμα.

Ακόμη παρατηρούμε ότι το ύψος της ΠΜΚ που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Hershfield (691.1 mm) βρίσκεται περίπου στο ίδιο επίπεδο με το μέγιστο ημερήσιο ύψος περιόδου επαναφοράς 60 000 ετών (677.2 mm για τη μέθοδο ροπών), όπως αναμέναμε σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.3.1. Η μικρή διαφορά ($\approx 2\%$) οφείλεται στις διορθώσεις και αναγωγές της τυποποιημένης μεθόδου Hershfield στα δειγματικά στατιστικά χαρακτηριστικά. Εξάλλου, το ύψος της ΠΜΚ που υπολογίστηκε με την υδρομετεωρολογική μέθοδο (503.1 mm) συμπίπτει με το μέγιστο ημερήσιο ύψος περιόδου επαναφοράς 10 000 ετών (503.7 mm για τη μέθοδο ροπών).

Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι και οι εκτιμήσεις του ύψους βροχής της πιθανοτικής μεθόδου υπόκεινται στις αναγωγές που έχουν συζητηθεί στην ενότητα 2.1. Ο τελικός συντελεστής αναγωγής για το 24ωρο σημειακό ύψος βροχής είναι 1.05.

Πίν. 6 Παράμετροι της κατανομής ΓΑΤ και εκτιμήσεις του ύψους βροχής για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Μέθοδος εκτίμησης παραμέτρων	L-ροπές	Ροπές - Hershfield
<i>Παράμετροι κατανομής</i>		
κ	0.114	0.142
λ	26.5	23.0
ψ	2.455	2.901
λ'	233.2	162.0
ψ'	0.721	0.588
<i>Εκτίμηση ύψους βροχής για T =</i>		
2	75.0	75.4
5	108.5	105.2
10	133.1	127.7
20	158.8	151.7
50	195.3	186.6
100	225.4	216.0
200	257.7	248.3
500	304.6	296.2
1000	343.4	336.7
2000	385.4	381.3
5000	446.2	447.6
10000	496.5	503.7
20000	551.1	565.7
50000	630.1	657.5
60000	646.8	677.2



Σχ. 7 Σύγκριση των συναρτήσεων κατανομής ΓΑΤ που προσαρμόστηκαν στο δείγμα ετήσιων μέγιστων ημερήσιων υψών βροχής της Ρόδου και της αντίστοιχης εμπειρικής συνάρτησης κατανομής.

2.4 Επίδραση της διάρκειας βροχής στο μέγεθος της βροχόπτωσης

Η σχέση που συνδέει το ύψος βροχής με τη διάρκεια βροχής στην περιοχή μελέτης είναι πολύ χρήσιμη τόσο για την κατάρτιση καταγίδων σχεδιασμού (βλ. ενότητα 3.2), όσο και διάφορες αναγωγές μεταξύ υψών διαφορετικής διάρκειας (βλ. ενότητα 2.2.4). Η μελέτη αυτής της σχέσης προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα βροχομετρικής πληροφορίας για διάρκειες βροχής μικρότερες της ημερήσιας. Όμως, όπως προαναφέρθηκε, παρόλο που οι περισσότεροι από τους βροχομετρικούς σταθμούς στο νησί της Ρόδου είναι εξοπλισμένοι με βροχογράφο, δεν έγινε δυνατό να ανευρεθούν και να αναλυθούν βροχογραφήματα ιστορικών βροχοπτώσεων, γεγονός που αποδίδεται στην πλημμελή λειτουργία των βροχογράφων.

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης εντοπίστηκαν μόνο ορισμένα βροχογραφήματα πολύ ισχυρών βροχοπτώσεων του σταθμού Λάερμα που καλύπτουν την περίοδο 1989-97. Από

αυτά έγινε δυνατό να εκτιμηθούν τα ετήσια μέγιστα ύψη βροχής διαφόρων διαρκειών για 7 υδρολογικά έτη, τα οποία φαίνονται στον Πίν. 7.*

Λόγω έλλειψης άλλων δεδομένων, κάνουμε την παραδοχή ότι η σχέση ύψους-διάρκειας που προσδιορίζεται από τα δεδομένα του σταθμού Λάερμα είναι αντιπροσωπευτική για το σύνολο του νησιού και επομένως παραμένει η ίδια τόσο στο σταθμό της Ρόδου, όσο και στη λεκάνη απορροής του Γαδουρά. Ακόμη, υποθέτουμε ότι η σχέση ύψους-διάρκειας είναι της μορφής

$$h = \omega d^{\nu} \quad (32)$$

όπου η παράμετρος ω εξαρτάται από την περίοδο επαναφοράς, ενώ ο εκθέτης ν είναι σταθερός. Είναι καταφανές ότι τα δεδομένα του Πίν. 7 είναι τελείως ανεπαρκή για την εκτίμηση της μεταβαλλόμενης ω , αλλά μπορούν να θεωρηθούν οριακά επαρκή για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της σταθεράς ν . Για τον προσδιορισμό της ν έχει προταθεί πρόσφατα (Κουτσογιάννης, 1997· Koutsoyiannis et al., 1998) μια στατιστική μέθοδος, η οποία αφενός αποφεύγει τη χρήση εμπειρικών τεχνικών που χρησιμοποιούνταν παλιότερα και αφετέρου κάνει δυνατό τον ξεχωριστό προσδιορισμό της ν χωρίς να προαπαιτείται ο προσδιορισμός της ω . Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια τεχνική βελτιστοποίησης προκειμένου να προσδιορίσει την άγνωστη παράμετρο, στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση είναι η στατιστική συνάρτηση Kruskal-Wallis, όπως ορίζεται για τα δείγματα της μεταβλητής h / d^{ν} για τις διάφορες τιμές της διάρκειας d . Η εφαρμογή της μεθόδου με βάση τα δείγματα που προκύπτουν από τον Πίν. 7 έδωσε την τιμή $\nu = 0.35^{\dagger}$ (βλ. και Σχ. 8), η οποία είναι αρκετά κοντά στην τιμή 0.40 που είχε υιοθετηθεί στην Προμελέτη[‡] (Λαζαρίδης κ.ά., 1979β).

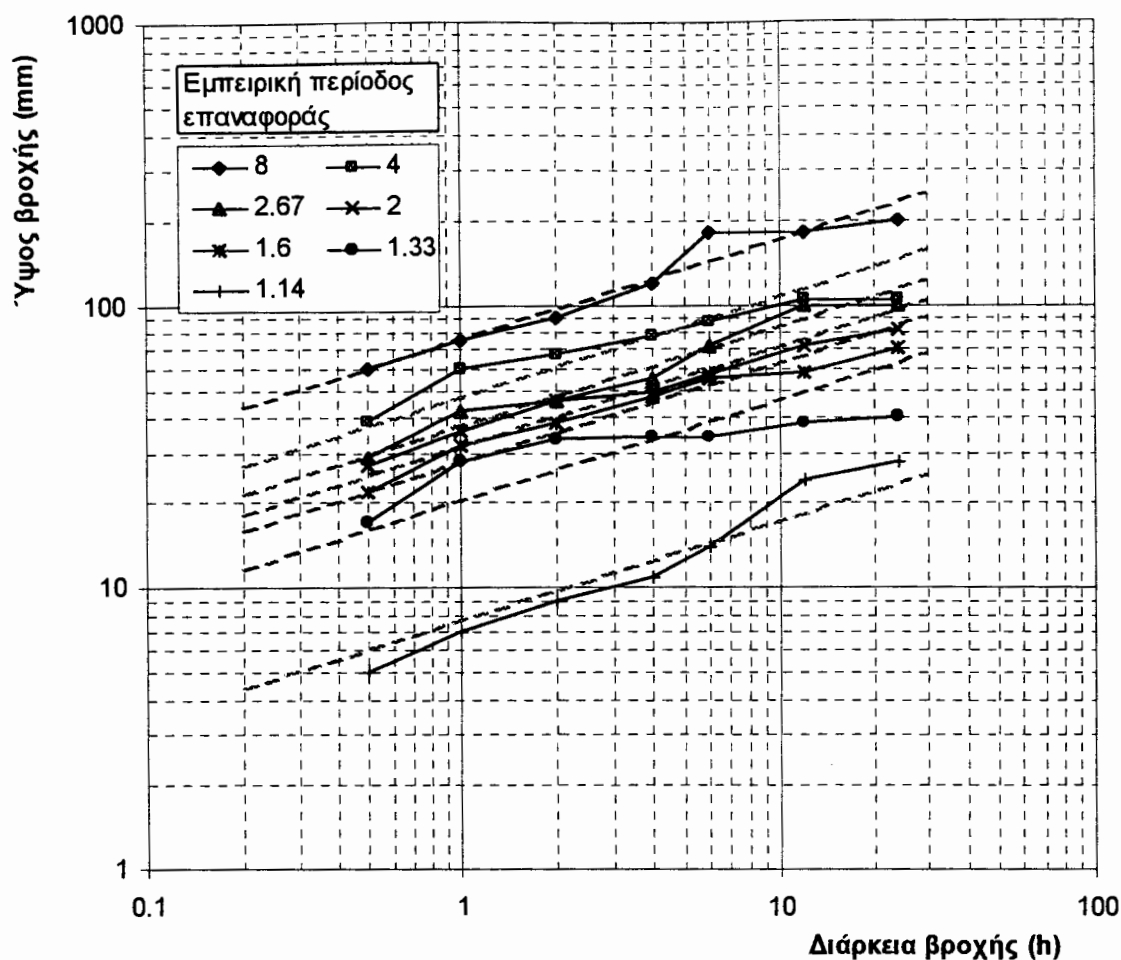
Πίν. 7 Ετήσια μέγιστα ύψη βροχής διάφορων διαρκειών στα Λάερμα, όπως προκύπτουν από την επεξεργασία βροχογραφημάτων.

Διάρκεια (h)	0.5	1	2	4	6	12	24
1989-90	27	42	46	49	55	72	82
1990-91	39	60	67	78	87	100	100
1991-92	29	36	46	55	57	58	70
1992-93	5	7	9	11	14	24	28
1993-94	22	32	38	47	72	104	105
1994-95	60	75	90	120	180	180	198
1996-97							
1997-98	17	28	33.5	34	34	38	40

* Τα ύψη αυτά δίνονται με επιφύλαξη για τις μεγάλες διάρκειες 12 και 24 h, δεδομένου ότι δεν ήταν διαθέσιμες οι ταινίες βροχογράφου της προηγούμενης και επόμενης μέρας.

[†] Για το λόγο που αναφέρεται στην προηγούμενη υποσημείωση, κατά την εκτίμηση της παραμέτρου δεν λήφθηκε υπόψη το δείγμα των 24 ωρών ενώ έγινε και στρογγύλευση του εξαγόμενου προς τα πάνω.

[‡] Σημειώνεται ότι η μικρότερη τιμή του ν που υιοθετείται στην παρούσα μελέτη είναι δυσμενέστερη ως προς την καταίγδα και πλημμύρα σχεδιασμού που συνεπάγεται.



Σχ. 8 Μεταβολή του μέγιστου ύψους βροχής συναρτήσει της διάρκειας βροχής και της εμπειρικής περιόδου επαναφοράς, όπως προκύπτει από τα δείγματα του Πίν. 7. Οι διακεκομμένες γραμμές έχουν χαρακτηί με κλίση 0.35.

Η παράμετρος $\nu = 0.35$ αναφέρεται προφανώς σε σημειακή βροχόπτωση, ενώ για την επιφανειακή βροχόπτωση στο σύνολο της λεκάνης η τιμή της θα είναι μεγαλύτερη. Πράγματι, για την εκτίμηση του ν σε επιφανειακή βάση θα πρέπει να συνυπολογιστεί και η μεταβολή του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής ϕ με τη διάρκεια d , όπως προκύπτει από την (3). Πιο συγκεκριμένα, ενδιαφέρει η μεταβολή του γινομένου $\phi d^{0.35}$ συναρτήσει της διάρκειας d . Οι σχετικοί υπολογισμοί φαίνονται στον Πίν. 8, ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στο Σχ. 9, απ' όπου προκύπτει ότι ο όρος $\phi d^{0.35}$ είναι περίπου ανάλογος του $d^{0.42}$. Κατά συνέπεια, η ζητούμενη τιμή της παραμέτρου ν σε επιφανειακή βάση είναι $\nu = 0.42$.

Συνδυάζοντας και όσα επιπλέον έχουν αναφερθεί σε προηγούμενα εδάφια για τις απαραίτητες αναγωγές των μέγιστων ημερήσιων υψών βροχής h_{σ} που έχουν προκύψει από επεξεργασία δεδομένων από βροχόμετρα, καταλήγουμε ότι ο προσδιορισμός του επιφανειακού μέγιστου ύψους βροχής $h_{\epsilon}(d)$ για διάρκεια d θα πρέπει να γίνεται από την εξίσωση

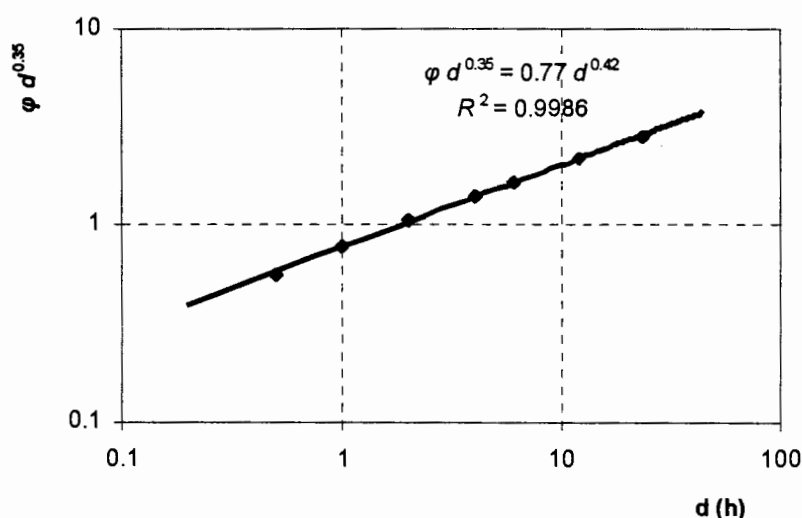
$$h_{\epsilon}(d) = \psi(d) h_{\sigma} \quad (33)$$

όπου ο τελικός συντελεστής αναγωγής $\psi(d)$ πρέπει να είναι ανάλογος $d^{0.42}$ και επιπλέον για $d = 24$ h πρέπει να παίρνει την τιμή 1.05, οπότε προκύπτει

$$\psi(d) = 0.276 d^{0.42} \quad (d \text{ σε h}) \quad (34)$$

Πίν. 8 Βοηθητικοί υπολογισμοί για την αναγωγή της σημειακής ημερήσιας βροχόπτωσης σε επιφανειακή οποιασδήποτε διάρκειας (βλ. περιγραφή των όρων στο κείμενο).

d (h)	φ	$d^{0.35}$	$\varphi d^{0.35}$	$\psi = 0.276 d^{0.42}$
0.5	0.712	0.785	0.559	0.206
1	0.774	1.000	0.774	0.276
2	0.823	1.275	1.049	0.369
4	0.861	1.625	1.399	0.494
6	0.879	1.872	1.646	0.586
12	0.905	2.386	2.160	0.784
24	0.926	3.041	2.816	1.049



Σχ. 9 Γραφική απεικόνιση της μεταβολής του όρου $\varphi d^{0.35}$ συναρτήσει της διάρκειας d .

2.5 Συζήτηση και συμπεράσματα του κεφαλαίου 2

Τα διαθέσιμα δεδομένα για την εκτίμηση των βροχοπτώσεων σχεδιασμού για τα έργα προστασίας του φράγματος Γαδουρά είναι αρκετά ικανοποιητικά σε ότι αφορά στα ημερήσια ύψη βροχής αλλά όχι ικανοποιητικά σε ότι αφορά ύψη βροχής μικρότερων διαρκειών. Ειδικότερα οι αναλύσεις βασίστηκαν σε 45 χρόνια ημερήσιων βροχοπτώσεων στη Ρόδο και 7 μόνο χρόνια βροχοπτώσεων μικρότερων διαρκειών στα Λάερμα, ενώ παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν και άλλα μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό της Ρόδου.

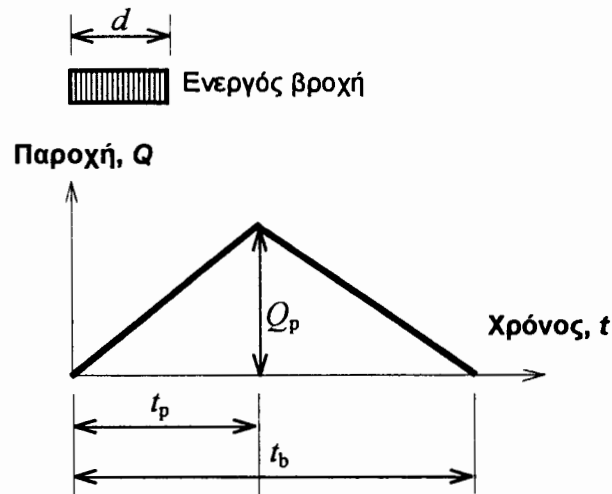
Όπως προκύπτει από τα διαθέσιμα δεδομένα τόσο του σταθμού της Ρόδου, όσο και των άλλων σταθμών, η περιοχή χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα ισχυρά επεισόδια βροχής, από τα ισχυρότερα που έχουν παρατηρηθεί στον Ελλαδικό χώρο. Συνακόλουθα, και τα ύψη βροχής σχεδιασμού, τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία που έγινε, είναι πολύ μεγάλα.

Η επεξεργασία που έγινε ακολούθησε δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις: την προσέγγιση της πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης και την πιθανοτική προσέγγιση, ενώ επιχειρήθηκε να συνδυαστούν οι δύο προσεγγίσεις και να αποδοθούν πιθανότητες υπέρβασης (ή ισοδύναμα, περίοδοι επαναφοράς) στα ύψη βροχής που εκτιμώνται με την προσέγγιση της μέγιστης πιθανής κατακρήμνισης. Ο συντάκτης αυτής της έκθεσης έχει θεωρητικές επιφυλάξεις για τη μέγιστη πιθανή κατακρήμνιση, τόσο ως προς την συνολική λογική της (δηλαδή την υπόθεση ότι υπάρχει ανώτατο φυσικό όριο στην κατακρήμνιση) όσο και ως τις μεθόδους εκτίμησής της (δεδομένου ότι διαφορετικές μέθοδοι οδηγούν σε διαφορετικές εκτιμήσεις). Έτσι, θεωρεί ως συνεπέστερη την πιθανοτική προσέγγιση.

Με αυτή τη λογική, για την μελέτη του υπερχειλιστή του φράγματος προτείνονται τρεις εναλλακτικές περίοδοι επαναφοράς ίσες με 10 000, 20 000 και 60 000 χρόνια. Αντίστοιχα, για τη μελέτη της σήραγγας εκτροπής του φράγματος προτείνονται τρεις πολύ μικρότερες εναλλακτικές περίοδοι επαναφοράς, ίσες με 10, 20 και 50 χρόνια. Τα τελικά ύψη βροχής που αντιστοιχούν σε αυτές τις περιόδους επαναφοράς και σε διάρκειες βροχής 1 h και 24 h, όπως έχουν εκτιμηθεί με βάση την πιθανοτική προσέγγιση, και μετά την εφαρμογή των συντελεστών αναγωγής, φαίνονται στον Πίν. 9. Στο επόμενο κεφάλαιο θα εκτιμηθούν οι πλημμυρικές παροχές που αντιστοιχούν σε αυτές τις περιόδους επαναφοράς της βροχόπτωσης. Η τελική επιλογή της περιόδου επαναφοράς μελέτης του υπερχειλιστή και της σήραγγας εκτροπής δεν αποτελεί αντικείμενο αυτής της υδρολογικής μελέτης αλλά είναι αντικείμενο άλλων μελετών στις οποίες θα πρέπει να εκτιμηθούν οι καταστροφές που είναι δυνατό να προκληθούν καθώς και οικονομικά μεγέθη των έργων και των ζημιών.

Πίν. 9 Τελικά μεγέθη υψών βροχής σε mm (μετά τις αναγωγές) για χαρακτηριστικές περιόδους επαναφοράς και διάρκειες.

T	d = 1 h	d = 24 h	Παρατηρήσεις
10	35.3	133.9	
20	41.9	159.1	
50	51.5	195.7	
10 000	139.1	528.3	Μεγέθη αντίστοιχα με την ΠΜΚ που εκτιμάται με την υδρομετεωρολογική μέθοδο
20 000	156.2	593.3	
60 000	187.0	710.4	Μεγέθη αντίστοιχα με την ΠΜΚ που εκτιμάται με την μέθοδο Hershfield



Σχ. 10 Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα σύμφωνα με το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας.

Το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder βασίζεται στις σχέσεις

$$t_p = C_t (L L_c)^{0.3} \quad (39)$$

$$Q_p = C_Q \frac{A}{t_p} \quad (40)$$

όπου L_c το μήκος υδατορεύματος από την έξοδο της λεκάνης μέχρι την προβολή του κέντρου βάρους της λεκάνης (km), και C_t και C_Q συντελεστές που βρέθηκε να έχουν μέσες τιμές 1.5 και 1.72 (στο μετρικό σύστημα μονάδων), αντίστοιχα, σε λεκάνες απορροής των Αππαλαχίων. Όμως ο ίδιος ο Snyder στην Ελλάδα (Αραχθος, Πουρνάρι) έχει υιοθετήσει πολύ δυσμενέστερες τιμές $C_t = 0.76$ και $C_Q = 2.0$, τιμές τις οποίες δεχτήκαμε και στην παρούσα μελέτη. Τα παραπάνω μεγέθη αναφέρονται σε μοναδιαίο υδρογράφημα με διάρκεια βροχής $t_p / 5.5$ και χρειάζονται κατάλληλη αναγωγή για διάρκεια βροχής 0.5 h.

Τα απαιτούμενα δεδομένα και οι σχετικοί υπολογισμοί για τη σύνθεση του μοναδιαίου υδρογραφήματος δίνονται στον Πίν. 10 (η παράμετρος URBAN θεωρήθηκε μηδενική). Το τελικό τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα που συνθέσαμε φαίνεται στο Σχ. 11

Παρατηρούμε ότι ο χρόνος ανόδου t_p που υπολογίζεται με τη μέθοδο του Ινστιτούτου Υδρολογίας επαληθεύεται από τη μέθοδο Snyder, με αρκετά μικρή απόκλιση (14%). Ως μια περαιτέρω επαλήθευση χρησιμοποιήσαμε τον τύπο του Giandotti, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στην Ελλάδα. Ο τύπος αυτός δίνει το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης και γράφεται

$$t_\sigma = \frac{4 \sqrt{A + 1.5 L}}{0.8 \sqrt{\Delta H}} \quad (41)$$

προκύπτει ότι η τιμή του χρόνου ανόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος σχεδόν ταυτίζεται με αυτή που έχει προκύψει από τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (βλ. Πίν. 10).

3.2 Καταιγίδες σχεδιασμού

Η βασικότερη παραδοχή στην κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού αφορά στη χρονική κατανομή του συνολικού ύψους βροχής. Στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφορες απλοποιημένες μέθοδοι, μια κατάταξη των οποίων δίνεται από τον Koutsoyiannis (1994), όπου εισάγεται και μια συνθετότερη στοχαστική μέθοδος. Από τις απλοποιημένες μεθόδους της πράξης θεωρείται ως πλεονεκτικότερη αυτή της δυσμενέστερης διάταξης του υετογραφήματος σχεδιασμού (ή worst profile ή alternating block method· US Department of the Interior, 1977, σ. 817· Sutcliffe, 1978, σσ. 31-35, Chow et al., 1988, σ. 466· Koutsoyiannis, 1994).

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται τα τμηματικά ύψη βροχής των επιμέρους διαρκειών με βάση την καμπύλη ύψους - διάρκειας βροχής (όμβρια καμπύλη) της υπό μελέτη λεκάνης, που αντιστοιχεί στην περίοδο επαναφοράς μελέτης. Τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται στη συνέχεια σε τρόπο ώστε να προκύπτει ο δυσμενέστερος δυνατός συνδυασμός, δηλαδή αυτός που προκαλεί τη δυσμενέστερη αιχμή της παραγόμενης πλημμύρας.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει σοβαρά πλεονεκτήματα έναντι άλλων συνήθων μεθόδων της πράξης (π.χ. αδιάστατων αθροιστικών καμπυλών). Πρώτο, βασίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα που έχουν μετρηθεί στην περιοχή μελέτης (όμβριες καμπύλες) και όχι σε διαγράμματα της βιβλιογραφίας. Δεύτερο, οδηγεί σε ένα μοναδικό υετογράφημα σχεδιασμού χωρίς να απαιτεί καμιά πρόσθετη παραδοχή. Τρίτο, έχει δείχτει μέσω σύγκρισης με πληρέστερα στοχαστικά μοντέλα (Koutsoyiannis, 1994) ότι τα αποτελέσματά της είναι σαφώς πιο εύλογα και συνεπή, σε σχέση με αυτά της μεθόδου των αδιάστατων αθροιστικών καμπυλών.

Η βασική παραδοχή της μεθόδου του δυσμενέστερου συνδυασμού είναι ότι σε κάθε επιμέρους διάρκεια το προκύπτον ύψος βροχής έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το τελικό (συνολικό) ύψος βροχής. (Βεβαίως, η παραδοχή αυτή δεν είναι ρεαλιστική, πράγμα που αποτελεί και το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου). Ο δυσμενέστερος συνδυασμός των τμηματικών υψών προκύπτει με την εξής μεθοδολογία: Τα τμηματικά ύψη βροχής διατάσσονται σε χρονική αντιστοιχία με τις τεταγμένες του μοναδιαίου υδρογραφήματος σε τρόπο ώστε το μέγιστο ύψος βροχής να είναι απέναντι από τη μέγιστη τεταγμένη του μοναδιαίου υδρογραφήματος, το αμέσως μικρότερο απέναντι από την αμέσως μικρότερη τεταγμένη κ.ο.κ. Η διάταξη αυτή στη συνέχεια αντιστρέφεται και έτσι προκύπτει το τελικό υετογράφημα. Η τεχνική αυτή υπακούει βέβαια σε κάποια λογική και αποδεικνύεται θεωρητικά ότι πράγματι δίνει τη μέγιστη παροχή αιχμής όταν συνδυαστεί με το μοναδιαίο υδρογράφημα.

Όταν υιοθετείται αυτή η μέθοδος κατάρτισης της καταιγίδας σχεδιασμού, η διάρκεια βροχής θεωρείται σημαντικό πολλαπλάσιο (αρκετά μεγαλύτερο του διπλάσιου) του χρόνου

κες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης, ενώ για τις άλλες συνθήκες δίνει τύπους αναγωγής των συνθηκών τύπου II.

Στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε η τιμή $CN = 75$ για περίοδο επαναφοράς 10 000 χρόνια ή μεγαλύτερη, η οποία οδηγεί σε ποσοστά απωλειών 13-17%. Τα ποσοστά αυτά δεν θεωρούνται υπερβολικά, ιδίως αν ληφθούν υπόψη οι σχετικά ήπιες κλίσεις της λεκάνης και το γεγονός ότι, σύμφωνα με τις αναλύσεις της υδρομετεωρολογικής μεθόδου (ενότητα 2.2), βροχοπτώσεις αυτού του μεγέθους είναι πιο πιθανό να συμβούν τους μήνες Μάιο ή Οκτώβριο. Για περίοδο επαναφοράς μικρότερη των 100 ετών υιοθετήθηκε κάπως μικρότερη τιμή της εν λόγω παραμέτρου, δηλαδή $CN = 70$.

3.4 Βασική ροή - Τήξη χιονιού

Η βασική ροή είναι πολύ μικρό ποσοστό της αιχμής της πλημμυρικής απορροής. Με βάση την εμπειρία μας από άλλες λεκάνες του ελληνικού χώρου, υιοθετήσαμε μια σταθερή τιμή της βασικής ροής ίση με $0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ για μεγάλες τιμές της περιόδου επαναφοράς, τιμή η οποία είναι δύο φορές μεγαλύτερη από τη μέση απορροή του Φεβρουαρίου που είναι ο μήνας με το μεγαλύτερο ύψος επιφανειακής απορροής (βλ. Λαζαρίδης κ.ά, 1998).

Είναι σκόπιμο να συμπεριλάβουμε στη βασική ροή και την απορροή από την τήξη του χιονιού, δεδομένου ότι και αυτή παρουσιάζει σχετικά ήπια μεταβολή στο χρόνο. Η λεκάνη Γαδουρά, λόγω υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλών υψομέτρων δεν αναμένεται να παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένη απορροή από τήξη χιονιού. Άλλωστε, η υδρομετεωρολογική ανάλυση (ενότητα 2.2) έδειξε ότι η πλημμυρική επικινδυνότητα είναι ιδιαίτερα αυξημένη τον Οκτώβριο, οπότε δεν υπάρχουν χιόνια στη λεκάνη. Πάντως, για λόγους μεγαλύτερης ασφάλειας, θα δεχτούμε την πιθανότητα απορροής τήξης χιονιού και θα εκτιμήσουμε ένα δυσμενή αλλά σχετικά εύλογο ρυθμό. Έτσι, δεχόμαστε μια ποσότητα απορροής από τήξη χιονιού 100 mm (αντιστοιχεί σε περίπου 1 m φρέσκου χιονιού) για το ορεινό τμήμα της λεκάνης (αυτό που βρίσκεται σε υψόμετρο $> 600 \text{ m}$, το οποίο αποτελεί ποσοστό 10.8% του συνολικού εμβαδού), ενώ θεωρούμε ότι η τήξη πραγματοποιείται σε διάστημα 12 h· αν ληφθεί υπόψη και ο χρόνος απάντησης της λεκάνης το διάστημα αυτό γίνεται περίπου 16 h. Έτσι, η συνεισφορά της τήξης του χιονιού στην απορροή θα είναι $(0.1 \text{ m} \times 10^6 \text{ m}^2/\text{km}^2 / 16 \times 3600 \text{ s}) \times 0.108 = 0.18 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$. Προσθέτοντας και τη βασική ροή φτάνουμε σε ένα μέγεθος $0.23 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ή $34 \text{ m}^3/\text{s}$ για το σύνολο της λεκάνης. Αυτή την τιμή τη χρησιμοποιούμε για τις υψηλές τιμές της περιόδου επαναφοράς που αντιστοιχούν στο σχεδιασμό του υπερχειλιστή, ενώ για τις χαμηλότερες τιμές που αντιστοιχούν στο σχεδιασμό της σήραγγας δεχόμαστε το 1/3 αυτής της τιμής, δηλαδή $11 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.5 Περίοδοι επαναφοράς

Όπως προαναφέρθηκε (ενότητα 2.5), για την μελέτη του υπερχειλιστή του φράγματος εξετάζονται τρεις εναλλακτικές περίοδοι επαναφοράς ίσες με 10 000, 20 000 και 60 000