

Υδρομετεωρολογία

Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση

Δημήτρης Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα 2000

1. Εισαγωγικές έννοιες

Ορισμοί

- ✓ **Εννοιολογικός ορισμός της πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης – ΠΜΚ** (probable maximum precipitation – PMP) : Θεωρητικά, το μέγιστο ύψος κατακρημνισμάτων για δεδομένη διάρκεια, το οποίο είναι φυσικώς δυνατό πάνω από μια περιοχή δεδομένης έκτασης, σε δεδομένη γεωγραφική θέση και εποχή του έτους (World Meteorological Organization, 1986).
- ✓ **Λειτουργικός ορισμός της ΠΜΚ:** Τα βήματα που ακολουθούνται από τους υδρομετεωρολόγους προκειμένου να φτάσουν σε απαντήσεις που δίνονται σε μηχανικούς και υδρολόγους για σκοπούς υδρολογικού σχεδιασμού. (...) Οι απαντήσεις έχουν εξεταστεί εξαντλητικά από μετεωρολόγους, μηχανικούς και υδρολόγους και κρίθηκαν ότι ικανοποιούν τις απαιτήσεις ενός κριτηρίου σχεδιασμού που πρακτικώς δεν ενέχει κίνδυνο υπέρβασης (World Meteorological Organization, 1986).
- ✓ **Σχόλιο στον ορισμό:** Οι τιμές της ΠΜΚ επηρεάζονται από
 - τη μεθοδολογία που ακολουθείται,
 - τη γνώση της φυσικής των ατμοσφαιρικών διεργασιών,
 - τις κλιματικές αλλαγές και τάσεις.

Συναφείς έννοιες

- ✓ **Μέγιστη δυνατή κατακρήμιση** – ΜΔΚ (maximum possible precipitation, MPP): Παλιότερος όρος που χρησιμοποιούνταν πριν τη δεκαετία του 1950 αντί του ΠΜΚ. Ο νεότερος όρος (*πιθανή μέγιστη αντί μέγιστη δυνατή*) είναι πιο ελαστικός και αποδίδει καλύτερα την αβεβαιότητα που υπάρχει γύρω από την ύπαρξη αλλά και τη δυνατότητα εκτίμησης ενός ανώτατου ορίου στο ύψος των κατακρημισμάτων.
- ✓ **Πιθανή μέγιστη καταιγίδα** (probable maximum storm - PMS): Ένα πραγματικό ή ιδεατό επεισόδιο βροχής με ποσοτικά χαρακτηριστικά ίσα με την ΠΜΚ για τη λεκάνη απορροής που ενδιαφέρει και για μία ή περισσότερες διάρκειες που ενδιαφέρουν στη συγκεκριμένη μελέτη.
- ✓ **Πιθανή μέγιστη πλημμύρα** -- ΠΜΠ (probable maximum flood, PMF). Η πλημμύρα που προκαλείται από την πιθανή μέγιστη κατακρήμιση, η οποία αποτελεί και το τελικό ζητούμενο στις μελέτες σχεδιασμού υδραυλικών έργων.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ΠΜΚ – Αντίστοιχα όρια

- ✓ Κατακρημνίσιμο νερό στον αέρα που κινείται πάνω από τη λεκάνη απορροής
 - Ποσοτικοποιείται σχετικά εύκολα
 - Εξαρτάται κυρίως από το σημείο δρόσου στην επιφάνεια
 - ✓ Ρυθμός με τον οποίο ο άνεμος μεταφέρει νέους υδρατμούς στη λεκάνη
 - Εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, όπως
 - πεδίο θερμοκρασιών (τιμές, κλίσεις)
 - πεδίο πιέσεων (τιμές, κλίσεις)
 - πηγές ατμοσφαιρικής υγρασίας (γεωγραφική θέση, ρυθμός εξάτμισης)
 - ✓ Ποσοστό των υδρατμών που μπορεί να μετατραπεί σε κατακρήμιση στην επιφάνεια της λεκάνης
 - Ποσοτικοποιείται πολύ δύσκολα
 - Εξαρτάται από μικρής κλίμακας φυσικές διεργασίες (π.χ. πυρηνοποίηση)
- Οι προσπάθειες να προσδιοριστούν όρια στους παραπάνω παράγοντες δεν έχουν επιτύχει (National Research Council, 1994).

Κατακρημνίσμο νερό

- ✓ Ορισμός – Θεωρητικός υπολογισμός:

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

- ✓ Υπολογισμός με βάση στοιχεία από ραδιοβόλιση:

$$W = \frac{1}{\rho_w g} \sum_{i=1}^n \frac{q_i + q_{i-1}}{2} (p_{i-1} - p_i)$$

- ✓ Υπολογισμός με βάση στοιχεία εδάφους (με την παραδοχή κορεσμένης ψευδο-αδιαβατικής ατμόσφαιρας): Από πίνακες του World Meteorological Organization (1986) ή την εξίσωση

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

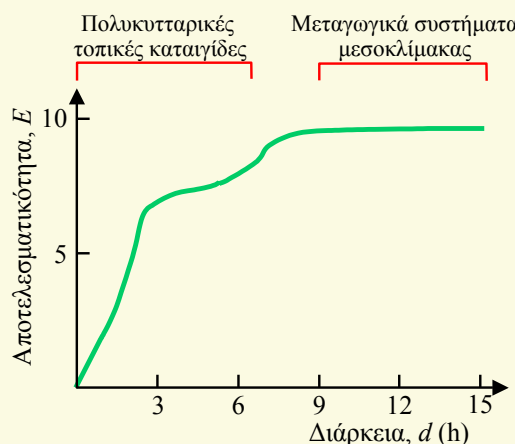
όπου T_d το σημείο δρόσου στη στάθμη του εδάφους σε °C και z_0 το υψόμετρο εδάφους σε m (το W δίνεται σε mm).

Αποτελεσματικότητα καταιγίδας

- ✓ Ορισμός: Ο λόγος του ύψους βροχής h προς το κατακρημνίσμο νερό W :

$$E := h / W$$

- ✓ Σε ισχυρές βροχοπτώσεις $h \gg W$ ή $E \gg 1$
- ✓ Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται εγγενώς και με αύξοντα τρόπο από τη διάρκεια βροχής, d .



Το διπλανό σχήμα δείχνει την εμπειρική περιβάλλουσα των τιμών της αποτελεσματικότητας ιστορικών ισχυρών επεισοδίων βροχής στη Μεγάλη Βρετανία, συναρτήσει της διάρκειας.

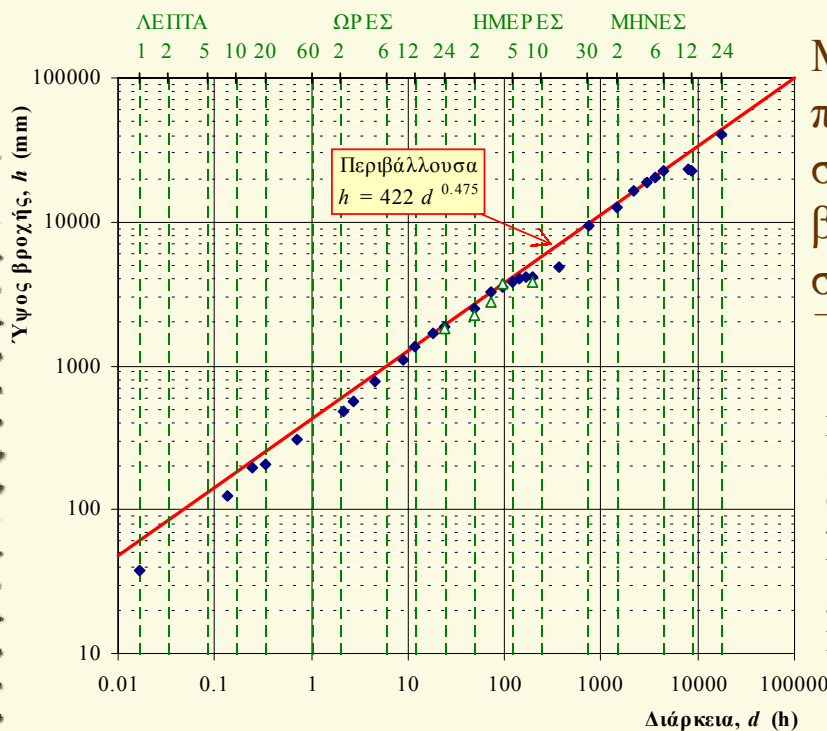
Πηγή: Austin et al., 1995.

Κατάταξη μεθόδων εκτίμησης της ΠΜΚ

- ✓ Χρήση δεδομένων μεγιστοποιημένου ύψους, διάρκειας και επιφάνειας από εξαιρετικές καταιγίδες
- ✓ Χρήση εμπειρικών σχέσεων μεταξύ μετεωρολογικών μεταβλητών σε συγκεκριμένες περιοχές
- ✓ Μεγιστοποίηση και μετατόπιση πραγματικών καταιγίδων
- ✓ Περιοχική ανάλυση – Χρήση χαρτών με ισοϋέτιες
- ✓ Χρήση μοντέλων καταιγίδας
- ✓ Στατιστική ανάλυση των ακραίων βροχοπτώσεων

2. Χρήση δεδομένων μεγιστοποιημένου ύψους, διάρκειας και επιφάνειας από εξαιρετικές καταιγίδες

- ✓ Από τα μέγιστα παρατηρημένα ύψη βροχής h σε όλη τη γη, για διάφορες διάρκειες d μπορεί να κατασκευαστεί μια «περιβάλλουσα» $h(d)$ (βλ. επόμενη σελίδα).
- ✓ Μια εκτίμηση της ΠΜΚ μπορεί να προκύψει άμεσα από αυτή την περιβάλλουσα. Όμως αυτή η εκτίμηση είναι κατά κανόνα πολύ συντηρητική, (δίνει, δηλαδή, πολύ μεγάλο ύψος βροχής) ιδίως για μεσαία γεωγραφικά πλάτη.
- ✓ Αντίστοιχες περιβάλλουσες μπορεί να κατασκευαστούν για δεδομένες περιοχές, σε επίπεδο χώρας (π.χ. βλ. «περιβάλλουσα» Αγγλίας στους Austin et al., 1995).
- ✓ Αν υπάρχουν αρκετά πυκνά βροχομετρικά δίκτυα μπορεί να γίνουν ανάλογες «περιβάλλουσες» όχι μόνο για σημειακά ύψη βροχής αλλά και για επιφανειακά δεδομένης έκτασης A (βλ. και Wiesner, 1970, σ. 219).
- ✓ **Σχόλιο:** Η αξιοπιστία μιας «περιβάλλουσας» αυξάνεται με την έκταση της περιοχής μελέτης και με το μέγεθος της περιόδου παρατηρήσεων.



Μέγιστες παρατηρημένες σημειακές βροχοπτώσεις σε όλη τη γη

Κατά κανόνα τα μέγιστα προέρχονται από βροχοπτώσεις σε τροπικές περιοχές. Υπάρχουν όμως εξαιρέσεις (π.χ. Ρουμανία, Βαυαρία)

3. Χρήση εμπειρικών σχέσεων μεταξύ μετεωρολογικών μεταβλητών σε συγκεκριμένες περιοχές

Παράδειγμα που αναφέρεται από τον Wiesner (1970, σ. 222):

- ✓ Παραδοχή: Η ένταση βροχής (i) εξαρτάται από
 - το κατακρημνίσσιμο νερό (W) ή ισοδύναμα το σημείο δρόσου (T_d),
 - την ταχύτητα του ανέμου (u) που αποτελεί δείκτη της εισερχόμενης ατμοσφαιρικής υγρασίας, και
 - το μηχανισμό καταγίγδας και ειδικότερα τον παράγοντα σύγκλισης.

- ✓ Μαθηματική έκφραση της μορφής

$$i = (a + b u^2) (c + T_d)$$

όπου έχει αγνοηθεί (λόγω δυσκολίας;) ο παράγοντας σύγκλισης.

- ✓ Εκτίμηση των παραμέτρων a , b , c από δεδομένα.
- ✓ Εκτίμηση των μέγιστων ορίων των u και T_d (v_{\max} , $T_{d,\max}$)
- ✓ Εκτίμηση της μέγιστης έντασης βροχής με

$$i_{\max} = (a + b u_{\max}^2) (c + T_{d,\max})$$

- ✓ **Σχόλια:** Αμφιβολίες δημιουργούνται για (1) την υπόσταση της μαθηματικής εξίσωσης, (2) την έννοια και τον τρόπο προσδιορισμού των μέγιστων u και T_d , και (3) την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση των δύο μεταβλητών.

4. Μεγιστοποίηση και μετατόπιση καταιγίδων

Γενικά στοιχεία της μεθόδου

- ✓ Αποτελεί τον κορμό των μεθόδων ΠΜΚ
- ✓ Στηρίζεται σε πραγματικές καταιγίδες που έχουν καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή (αντί π.χ. στη διατύπωση μαθηματικών σχέσεων που συνδέουν το ύψος ή την ένταση βροχής με άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές).
- ✓ Μετασχηματίζει τα καταγραμμένα ύψη βροχής μεγιστοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων που τα επηρεάζουν.
- ✓ Έτσι, από μια σειρά ιστορικών καταιγίδων υπολογίζει μια αντίστοιχη σειρά μεγιστοποιημένων υψών βροχής. Το μεγαλύτερο απ' αυτά θεωρείται ότι είναι ίσο με την ΠΜΚ.
- ✓ Σε περίπτωση που η περιοχή μελέτης δεν συμπίπτει με την περιοχή όπου έχουν παρατηρηθεί οι καταιγίδες, εφαρμόζεται μια διαδικασία «μετακίνησης» των καταιγίδων, δηλαδή μετασχηματισμού τους σε τρόπο ώστε να ανταποκρίνονται στα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.
- ✓ **Σχόλια:** Αμφιβολίες δημιουργούνται για (1) την έννοια και τον τρόπο προσδιορισμού των μέγιστων τιμών των παραμέτρων που επηρεάζουν τη βροχόπτωση, και (2) την επίδραση του διαθέσιμου ιστορικού δείγματος βροχών.

Μεγιστοποίηση καταιγίδας με αναγωγή ως προς την ατμοσφαιρική υγρασία

- ✓ Εφαρμόζεται η απλή σχέση

$$h_m = h W_m / W$$

όπου

h_m το μεγιστοποιημένο ύψος βροχής,

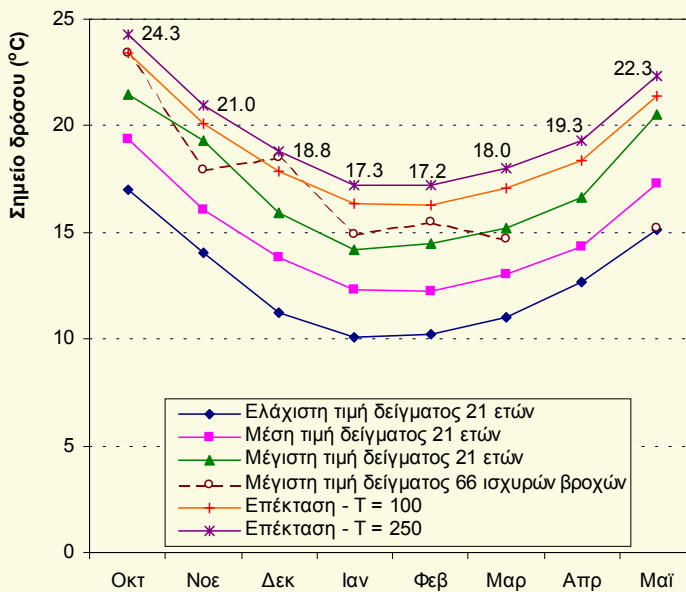
h το καταγραμμένο ύψος βροχής,

W το ύψος κατακρημνίσιμου νερού στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης, που εκτιμάται από το σημείο δρόσου T_d κατά την ημέρα της βροχόπτωσης, και

W_m το μεγιστοποιημένο ύψος κατακρημνίσιμου νερού στην ατμόσφαιρα, που προκύπτει από το μέγιστο σημείο δρόσου $T_{d,m}$ για το μήνα (ή δεκαπενθήμερο) που συνέβη η καταιγίδα.

- ✓ Ως T_d θεωρείται η τιμή του σημείου δρόσου που διαρκεί τουλάχιστον 12 h.
- ✓ Το $T_{d,m}$ εκτιμάται ως (1) η μέγιστη τιμή ιστορικού δείγματος 50 ετών ή (2) η τιμή που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς (π.χ. 100 χρόνια) για δείγμα μικρότερο των 50 ετών.

Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου στο φράγμα Γαδουρά Ρόδου



Πραγματική βροχόπτωση

Ημερομηνία 05/10/1989

Διάρκεια 9.17 h

Ύψος $h = 158.0$ mm

Θερμοκρασία $T = 18.6^\circ\text{C}$.

Σημείο δρόσου $T_d = 15.1^\circ\text{C}$

Αντίστοιχο $W = 34.3$ mm

Μεγιστοποίηση

Μέγιστο σημείο δρόσου

$$T_{d,m} = 24.3^\circ\text{C}$$

Αντίστοιχο $W_m = 78.0$ mm

Λόγος $W_m / W = 2.27$

$$h_m = 158 \times 2.27 = 359.2 \text{ mm}$$

Πηγή: Κουτσογιάννης (1998)

Υδρομετεωρολογία - Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση

13

Επίδραση της παρεμβολής εμποδίου



Σε περίπτωση παρεμβολής εμποδίου (οροσειράς ή λοφοσειράς) στη μεταφορά ατμοσφαιρικής υγρασίας (περίπτωση «καταφυγίου»), γίνεται η παραδοχή ότι το εμπόδιο αφαιρεί τελείως την εδαφική υγρασία στο στρώμα αέρα που φτάνει μέχρι το μέγιστο υψόμετρό του, z_1 . Έτσι, για τον προσδιορισμό του κατακρημνίσιμου νερού (τόσο του W όσο και του W_m) χρησιμοποιείται το υψόμετρο του εμποδίου z_1 αντί του υψόμετρου της περιοχής μελέτης z_0 .

Υδρομετεωρολογία - Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση

14

Μεγιστοποίηση καταιγίδας με αναγωγή ως προς την ταχύτητα ανέμου

- ✓ Εφαρμόζεται λιγότερο συχνά από τη μεγιστοποίηση της εδαφικής υγρασίας
- ✓ Χρησιμοποιείται η απλή σχέση

$$h_m = h u_m / u$$

όπου

h_m το μεγιστοποιημένο ύψος βροχής,

h το καταγραμμένο ύψος βροχής,

u η ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης σε δεδομένη διεύθυνση (παράλληλη με αυτή που μεταφέρει υγρασία), ύψος (ανάλογα με τις διαθέσιμες μετρήσεις) και διάρκεια (π.χ. 24 ώρες), και

u_m η μέγιστη ταχύτητα ανέμου για το μήνα (ή δεκαπενθήμερο) που συνέβη η καταιγίδα και για την ίδια διεύθυνση, ύψος και διάρκεια.

- ✓ Το u_m εκτιμάται ως (1) η μέγιστη τιμή ιστορικού δείγματος 50 ετών ή (2) η τιμή που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς (π.χ. 50 ή 100 χρόνια) για δείγμα μικρότερο των 50 ετών.

Μετατόπιση καταιγίδας

- ✓ Ουσιαστικά η διαδικασία που ακολουθείται για τη μετατόπιση καταιγίδας δεν διαφέρει από τη διαδικασία μεγιστοποίησης.
- ✓ Τα μεγέθη h , T_d και W είναι ταυτόσημα όπως στη διαδικασία μεγιστοποίησης (αφορούν παρατηρημένες τιμές στην περιοχή – σταθμό μέτρησης – που συνέβη η καταιγίδα).
- ✓ Το μέγιστο σημείο δρόσου $T_{d,m}$ και το αντίστοιχο μεγιστοποιημένο κατακρημνίσσιμο νερό $W_{d,m}$ αναφέρονται προφανώς στην περιοχή μελέτης (που διαφέρει από την περιοχή που παρατηρήθηκε η καταιγίδα).
- ✓ Σε περίπτωση εμποδίων, το μέγεθος W υπολογίζεται για το υψόμετρο εμποδίου της περιοχής που παρατηρήθηκε η καταιγίδα, ενώ το μέγεθος $W_{d,m}$ υπολογίζεται για το υψόμετρο εμποδίου της περιοχής μελέτης.

Επίδραση της ορογραφίας

- ✓ Σε περιοχές με ορεινό ανάγλυφο, η βροχόπτωση επηρεάζεται από την τοπογραφία. Ειδικότερα:
 - Στις προσήνεμες περιοχές αυξάνεται η βροχόπτωση λόγω της ανοδικής κίνησης του ανέμου που επιβάλλεται από την ορογραφία.
 - Στις υπήνεμες περιοχές μειώνεται η βροχόπτωση, σε συνέπεια της αποφόρτισης σε υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα.
 - Οι πρόποδες των οροσειρών που συναντά ο άνεμος κατά την κίνησή του από την ακτή αποτελούν «προνομιακές» περιοχές για την εκδήλωση καταιγίδων.
 - Σε θέσεις κοιλάδων, οι εκατέρωθεν πλαγιές προκαλούν σύγκλιση του πεδίου ανέμου, με αποτέλεσμα την ανύψωση και την αύξηση της βροχόπτωσης
- ✓ Η βροχόπτωση σε περιοχές με ορεινό ανάγλυφο μπορεί να θεωρηθεί ως αποτέλεσμα δύο συνιστωσών:
 - των ορογραφικών μηχανισμών ανύψωσης
 - των ατμοσφαιρικών μηχανισμών σύγκλισης.
- ✓ Η μέθοδος της μετατόπισης καταιγίδων δεν ενδείκνυται σε περιοχές με ορογραφικές επιδράσεις.

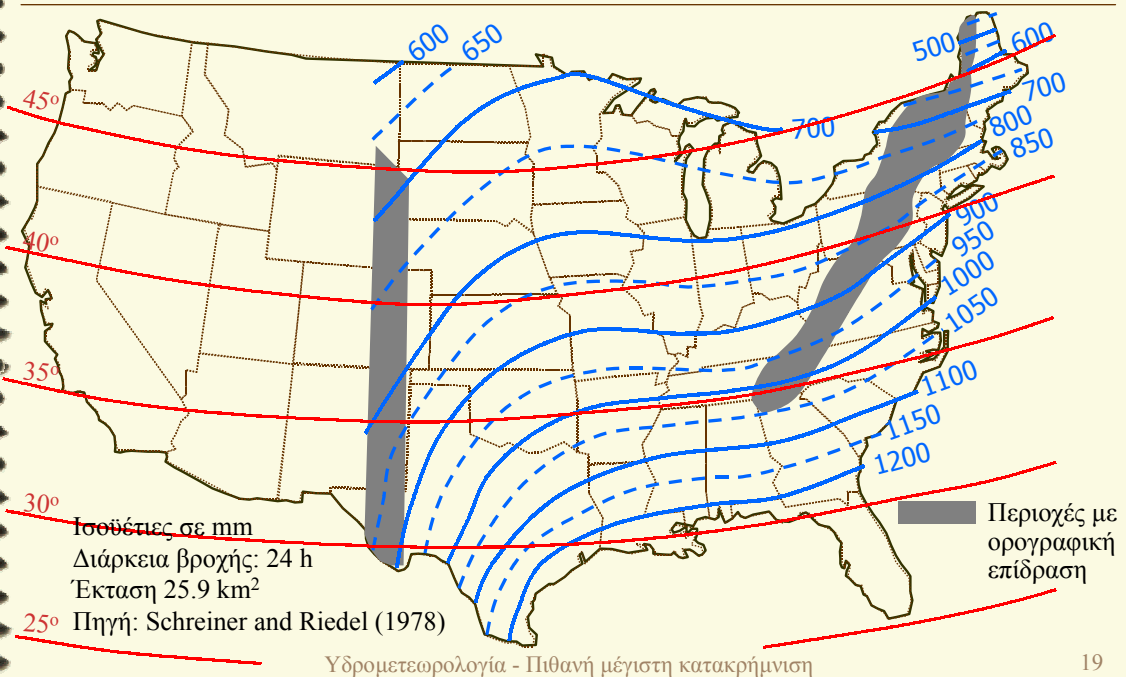
5. Περιοχική ανάλυση

Γενική μεθοδολογία συστηματικής κατασκευής χαρτών

- ✓ Καθορισμός περιοχών μετατόπισης καταιγίδων
- ✓ Κατασκευή κανάβου για τη μετατόπιση των καταιγίδων
- ✓ Μεγιστοποίηση καταιγίδων στα σημεία του κανάβου (για δεδομένη διάρκεια βροχής και για δεδομένη έκταση επιρροής)
- ✓ Έλεγχος συνέπειας των τιμών στα σημεία του κανάβου – εξομάλυνση τιμών
- ✓ Χάραξη προκαταρκτικών ισοϋετίων καμπυλών
- ✓ Χρήση οποιωνδήποτε συμπληρωματικών πληροφοριών για τη βελτίωση των ισοϋετίων – κατασκευή τελικών ισοϋετίων
- ✓ Επανάληψη της κατασκευής χαρτών με ισοϋέτιες για διαφορετικές διάρκειες βροχής ή/και για διαφορετικές εκτάσεις επιρροής – Εναλλακτικά: κατασκευή διαγραμμάτων μεταβολής της ΠΜΚ με τη διάρκεια βροχής και την έκταση

Παράδειγμα:

Χάρτης ισοϋετιών ΠΜΚ στις ανατολικές ΗΠΑ



6. Χρήση μοντέλων καταιγίδας

- ✓ Ένα μοντέλο καταιγίδας συνίσταται από:
 - Βασικές εξισώσεις της ρευστοδυναμικής και θερμοδυναμικής της ατμόσφαιρας (π.χ., εξίσωση συνέχειας, εξίσωση διατήρησης της μάζας των υδρατμών)
 - Περιγραφή (απλουστευμένη) των συνοριακών συνθηκών (τοπογραφία, εισροή, εκροή)
 - Απλουστευτικές παραδοχές ενός προτύπου ροής (π.χ. ακτινική σύγκλιση πεδίου ανέμου) κατάλληλου για την περιοχή μελέτης
 - Απλουστευτικές παραδοχές για την ποσοτική έκφραση της έντασης βροχής συναρτήσει φυσικών παραμέτρων (π.χ. σημείο δρόσου, ταχύτητα ανέμου).
- ✓ Το μοντέλο είναι σκόπιμο να βαθμονομείται με βάση πραγματικές καταιγίδες της περιοχής.
- ✓ Για την εκτίμηση της ΠΜΚ το μοντέλο τροφοδοτείται με ακραίες τιμές των φυσικών παραμέτρων.
- ✓ Για παραδείγματα μοντέλων βλ.: Wiesner, 1970, σ. 189-203, World Meteorological Organization, 1986, σσ. 55-95, Austin et al., 1995, Collier and Hardaker, 1996.

7. Στατιστική μέθοδος (Hershfield)

Μαθηματική έκφραση

Η στατιστική μέθοδος Hershfield (1961, 1965) στηρίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) της σειράς των ετήσιων μέγιστων υψών βροχής ενός βροχομετρικού σταθμού.

Δεν απαιτεί μετεωρολογικά δεδομένα για την εφαρμογή της.

Πρόεκυψε από την επεξεργασία 95 000 ετήσιων δεδομένων από 2645 σταθμούς απ' όλο τον κόσμο (οι περισσότεροι απ' τις ΗΠΑ).

Μαθηματικά περιγράφεται από την απλή εξίσωση

$$h_m = \bar{h}^* + k_m s_H^*$$

όπου h_m το ύψος βροχής που αντιστοιχεί στην ΠΜΚ, \bar{h}^* και s_H^* η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση, αντίστοιχα, της σειράς των ετήσιων μέγιστων υψών βροχής διάρκειας d , στις οποίες έχουν γίνει διάφορες διορθώσεις, όπως φαίνεται στην επόμενη σελίδα, και k_m συντελεστής συχνότητας, συνάρτηση των d και \bar{h} , η οποία δίνεται από νομογράφημα του Hershfield.

Το νομογράφημα προσεγγίζεται από την εξίσωση

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

Υδρομετεωρολογία - Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση

21

Διόρθωση στατιστικών χαρακτηριστικών

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά \bar{h}^* και s_H^* που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο Hershfield (1961, 1965) δεν είναι ακριβώς όπως υπολογίζονται από τις τυπικές εξισώσεις της στατιστικής, αλλά διορθωμένα. Συγκεκριμένα, γίνονται δύο ειδών διορθώσεις, όπου στην πρώτη λαμβάνεται υπόψη το μέγεθος του δείγματος και στη δεύτερη το μέγεθος της μεγαλύτερης τιμής του δείγματος. Στην αυθεντική μέθοδο οι διορθώσεις γίνονται βάσει εμπειρικών νομογραφημάτων, τα οποία εδώ έχουν μετατραπεί από το συγγραφέα σε αναλυτικές εξισώσεις.

Αν n είναι το μέγεθος του δείγματος, \bar{h} και s_H η μέση τιμή και τυπική απόκλιση του πλήρους δείγματος των ετήσιων μέγιστων υψών βροχής, εκτιμημένες με το συνήθη τρόπο, και \bar{h}' και s_H' η μέση τιμή και τυπική απόκλιση του δείγματος αφού αφαιρεθεί η μέγιστη τιμή του, τότε:

$$\bar{h}^* = \bar{h} \varphi_1(n) \psi_1(\bar{h}, \bar{h}', n), \quad s_H^* = s_H \varphi_2(n) \psi_2(s_H, s_H', n)$$

όπου

$$\varphi_1(n) := 1 / [1 - 0.96 \exp(-n^{0.47})], \quad \varphi_2(n) := 1 / [1 - 4.2 \exp(-n^{0.47})]$$

$$\psi_1(\bar{h}, \bar{h}', n) := 1.0 + 1.04 (\bar{h}' / \bar{h} - 1) + 0.42 / n^{0.75}$$

$$\psi_2(s_H, s_H', n) := 1.0 + (1.37 / n^{0.06}) (s_H' / s_H - 1) + 0.65 / n^{0.5}$$

Υδρομετεωρολογία - Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση

22

8. Επίδραση της διάρκειας βροχής – Χρονική κατανομή Μεταβολή του ύψους βροχής με τη διάρκεια

- ✓ Το ύψος βροχής h της ΠΜΚ είναι αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας βροχής d . Τυπικός στατιστικός νόμος μεταβολής:

$$h = \kappa d^\lambda$$

όπου κ και λ παράμετροι, με τυπική τιμή του $\lambda = 0.5$.

- ✓ Εφόσον υπάρχουν στην περιοχή μελέτης επαρκή δεδομένα ισχυρών βροχοπτώσεων για διάρκειες βροχής μικρότερες της ημερήσιας, η σχέση ύψους-διάρκειας προσδιορίζεται με επαναληπτική εφαρμογή της κατά περίπτωση μεθόδου εκτίμησης της ΠΜΚ (π.χ. μέθοδος μεγιστοποίησης ή στατιστική) για ένα σύνολο διαρκειών.
- ✓ Εφόσον στην περιοχή μελέτης έχουν κατασκευαστεί όμβριες καμπύλες, δηλαδή καμπύλες της μορφής $h = f(d, T)$, όπου T η περίοδος επαναφοράς, η σχέση ύψους-διάρκειας μπορεί να προκύψει από αυτές.

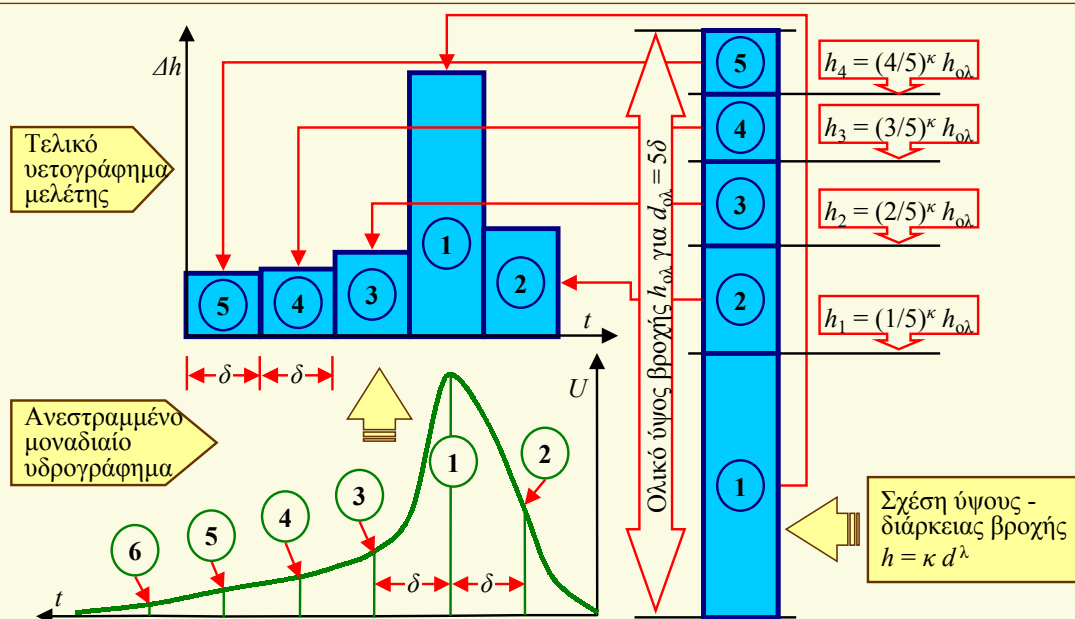
Χρονική κατανομή της βροχής στην καταιγίδα σχεδιασμού

- ✓ Αν η ΠΜΚ προκύπτει από μοντέλο καταιγίδας, τότε από το ίδιο μοντέλο προκύπτει και η κατανομή του ύψους βροχής στο χρόνο.
- ✓ Διαφορετικά, χρησιμοποιούνται διάφορες απλοποιημένες εμπειρικές μέθοδοι, που μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες (Koutsoyiannis, 1994):
 1. απλή γεωμετρική καμπύλη κατανομής, π.χ. ομοιόμορφη ή τριγωνική (βλ. π.χ. Chow et al., 1988, σ. 464)
 2. αδιάστατες κατανομές της μορφής $h / h_{ολικό} = f(d / d_{ολική})$, όπου η μορφή της συνάρτησης $f(\)$ προκύπτει εναλλακτικά:
 - από μελέτη, εμπειρική ή στατιστική, ιστορικών βροχοπτώσεων της περιοχής,
 - από τη βιβλιογραφία (π.χ. καμπύλες του Huff, 1967, βλ. και Chow et al., 1988, σ. 460).
 3. μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης του νετογραφήματος μελέτης
- ✓ Σημείωση 1: Μόνο η μέθοδος 3 είναι αντικειμενική και επιστημονικά θεμελιωμένη, ενώ συμβαδίζει και με την έννοια της ΠΜΚ.
- ✓ Σημείωση 2: Σε μια πιθανοτική προσέγγιση της καταιγίδας σχεδιασμού, είναι προτιμότερη η χρήση στοχαστικών μεθόδων για την κατάρτιση καταιγίδων σχεδιασμού (βλ. Koutsoyiannis, 1994).

Μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης του υετογραφήματος μελέτης

- ✓ Προσδιορίζονται τα τμηματικά ύψη βροχής των επιμέρους διαρκειών με βάση την καμπύλη ύψους - διάρκειας βροχής της υπό μελέτη λεκάνης
- ✓ Αυτά διατάσσονται στη συνέχεια σε τρόπο ώστε να προκύπτει ο δυσμενέστερος δυνατός συνδυασμός, δηλαδή αυτός που προκαλεί τη δυσμενέστερη αιχμή της παραγόμενης πλημμύρας.
 - Υποπερίπτωση α: μέθοδος εναλλασσόμενων μπλοκ (βλ. Chow et al., 1988, σ. 466).
 - Υποπερίπτωση β: διάταξη με βάση το μοναδιαίο υδρογράφημα (βλ. επόμενη σελίδα και US Bureau of Reclamation, 1977, σ. 817).

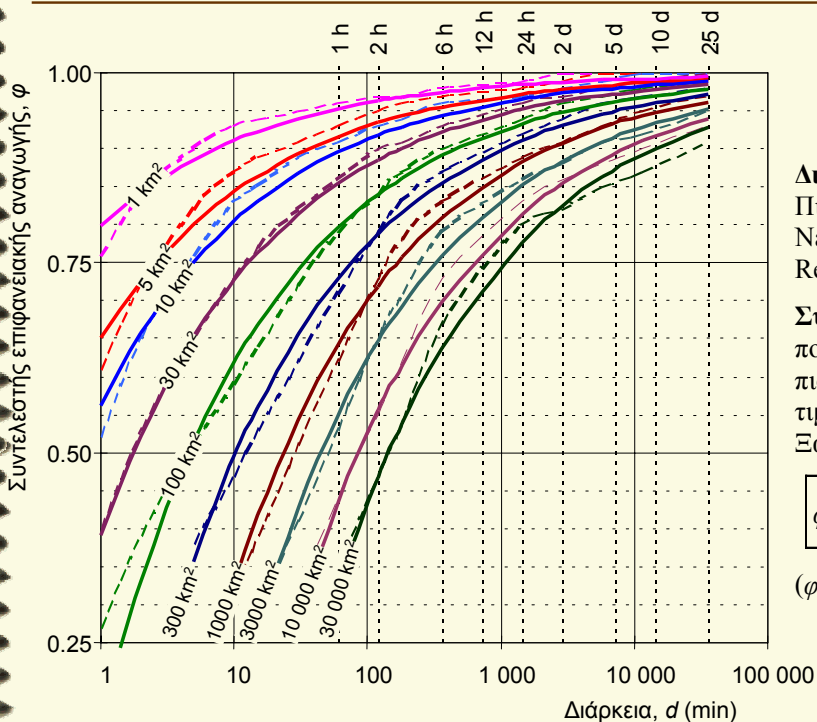
Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου της δυσμενέστερης διάταξης του υετογραφήματος μελέτης



9. Επίδραση της επιφάνειας – Γεωγραφική μεταβολή Μεταβολή του επιφανειακά μέσου ύψους με την έκταση

- ✓ **Συντελεστής επιφανειακής αναγωγής (areal reduction factor):**
 $\varphi = (\text{επιφανειακά μέσο ύψος βροχής}) / (\text{μέγιστο σημειακό ύψος βροχής})$
- ✓ Εμπειρικά διαπιστωμένες, ιδιότητες του φ :
 - Είναι πάντα μικρότερος από 1.
 - Είναι φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης A .
 - Είναι αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας d .
 - Εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την περίοδο επαναφοράς (μέγεθος καταιγίδας) και φαίνεται ότι η αύξηση της περιόδου επαναφοράς οδηγεί σε ασθενή μείωση του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής: δεν υπάρχουν ακόμη κατηγορηματικά συμπεράσματα για αυτή την εξάρτηση.
- ✓ Αν στην περιοχή μελέτης υπάρχουν επαρκή δεδομένα ιστορικών βροχοπτώσεων από σχετικά πυκνό βροχομετρικό δίκτυο, η συνάρτηση $\varphi(d, A)$ προσδιορίζεται μετά από επεξεργασία αυτών των δεδομένων.
- ✓ Διαφορετικά χρησιμοποιούνται πίνακες ή διαγράμματα της βιβλιογραφίας (βλ. δύο επόμενες σελίδες).

Η συνάρτηση $\varphi(d, A)$ σύμφωνα με Βρετανικά δεδομένα



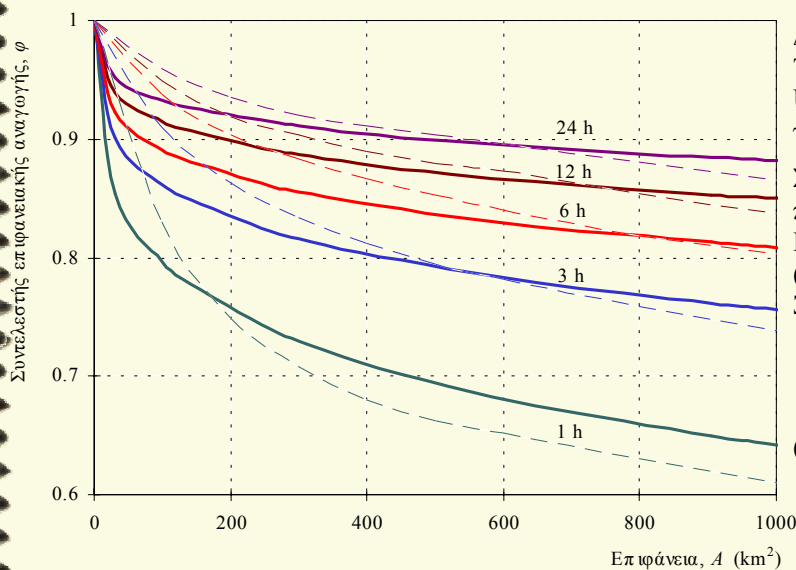
Διακεκομμένες γραμμές:
Πινακοποιημένες τιμές του National Environmental Research Council (1975).

Συνεχείς γραμμές: Εξίσωση που έχει προσαρμοστεί στις πιο πάνω πινακοποιημένες τιμές (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$\varphi = 1 - \frac{0.048 A^{0.36 - 0.01 \ln A}}{d^{0.35}}$$

($\varphi \geq 0.25$)

Η συνάρτηση $\phi(d, A)$ σύμφωνα με Αμερικανικά δεδομένα



Διακεκομμένες γραμμές: Τιμές από διάγραμμα του US Weather Bureau (1960) για τις Δυτικές ΗΠΑ.

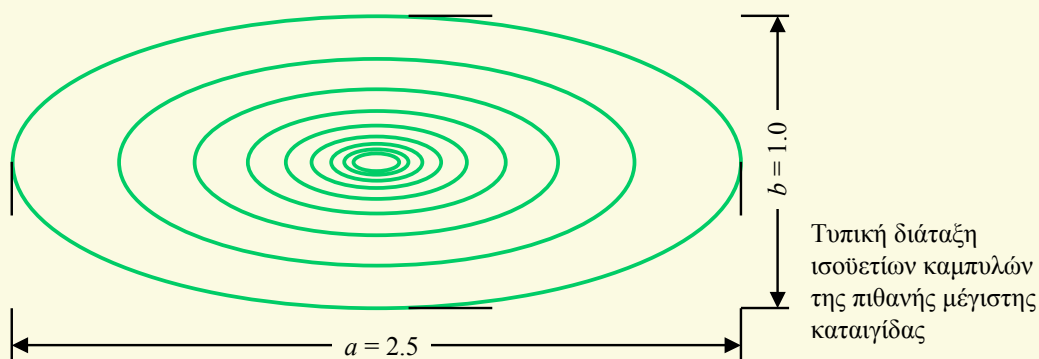
Συνεχείς γραμμές: Εξίσωση που έχει προσαρμοστεί στις Βρετανικές τιμές (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$\phi = 1 - \frac{0.048 A^{0.36 - 0.01 \ln A}}{d^{0.35}}$$

($\phi \geq 0.25$)

Τυπική γεωγραφική κατανομή της ΠΜΚ

- ✓ Από έρευνα 53 ισχυρών επεισοδίων βροχής στις ΗΠΑ, προέκυψε ότι το πιο αντιπροσωπευτικό σχήμα ισοϋετίων είναι το ελλειπτικό με λόγο δευτερεύοντα προς κύριο άξονα $a:b = 1:2.5$.
- ✓ Η ακριβής διάταξη των ομόκεντρων ελλειπτικού σχήματος ισοϋετίων προκύπτει με βάση και την εξίσωση μεταβολής του επιφανειακά μέσου ύψους βροχής με την έκταση. (Υπενθύμιση: εμβαδό έλλειψης = $\pi a b / 4$).



10. Κριτική στην έννοια της ΠΜΚ

Αντιφατικότητα

✓ Dingman (1994, σ. 141):

«Οι έννοιες της ΠΜΚ και της ΠΜΠ είναι αντιφατικές. Μπορούμε πραγματικά να καθορίσουμε ένα ανώτατο όριο της βροχής που μπορεί να πέσει σε δεδομένο χρόνο; (...) θα πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι οι τιμές που έχουν απεικονιστεί είναι μόνο εκείνες που έχουν παρατηρηθεί ιστορικά στο απειροελάχιστο κλάσμα της γήινης επιφάνειας που καλύπτεται από βροχόμετρα, και μεγαλύτερες ποσότητες πρέπει να έχουν πέσει σε θέσεις χωρίς βροχόμετρα σε διαφορετικούς χρόνους και τόπους. Και λογικά μπορούμε πάντα να φανταστούμε ότι μερικά παραπάνω μόρια νερού θα μπορούσαν να είχαν πέσει πάνω από οποιοδήποτε όριο.»

✓ **Σχόλιο:** Η περίοδος που καλύπτουν οι ακραίες καταγραμμένες μετρήσεις ελαφρώς υπερβαίνει τον ένα αιώνα, που αποτελεί απειροελάχιστο κλάσμα της ιστορίας της Γης.

Ασυνέπεια – Τεχνικά και ηθικά προβλήματα

✓ Benson (1973):

«Η έννοια του “πιθανού μέγιστου” ξεκίνησε σαν “μέγιστο δυνατό”, επειδή θεωρήθηκε ότι υπάρχουν μέγιστα όρια στα στοιχεία που συνεργούν για να παραγάγουν βροχή και ότι αυτά τα όρια θα μπορούσαν να οριστούν με τη μελέτη των φυσικών διεργασιών. Αυτό όμως αποδείχθηκε αδύνατο – βασικά επειδή η φύση δεν περιορίζεται από όρια, αλλά και επειδή η γνώση μας για τα ισχυρά επεισόδια βασίζεται στην εμπειρία, και η καταγραμμένη μετεωρολογική εμπειρία είναι πολύ μικρή. Στο σημείο αυτό η έννοια θα έπρεπε να είχε εγκαταλειφθεί και να είχε ομολογηθεί ότι είναι αποτυχημένη. Αντίθετα, διασώθηκε με την επινόηση της μετονομασίας “πιθανό μέγιστο” αντί “μέγιστο δυνατό”. Αυτό όμως έγινε θυσιάζοντας κάθε νόημα ή λογική συνέπεια που μπορεί να υπήρχε αρχικά. Ο συνήθης ορισμός της πιθανής μέγιστης πλημμύρας είναι “η πιο σοβαρή πλημμύρα που θεωρείται εύλογα πιθανό να συμβεί”. Όμως ένας τέτοιος ορισμός είναι ουσιαστικά χωρίς νόημα: δεν είναι μια επιστημονική ή τεχνική φράση και με κανένα τρόπο δεν παρέχει κάποια εκτίμηση της επικινδυνότητας. Η μοναδική αξία της τιμής που υπολογίζεται βρίσκεται στο γεγονός ότι είναι μια μεγάλη τιμή. Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις, η τιμή της πιθανής μέγιστης βροχόπτωσης ή πλημμύρας ξεπεράστηκε λίγο καιρό μετά ή πριν τη δημοσίευσή της, ενώ άλλες φορές, παρόμοιες τιμές έχουν θεωρηθεί από ειδικούς επιστήμονες ως παράλογα υψηλές. (...) Για τους λόγους αυτούς, η μέθοδος τίθεται σε **σοβαρή κριτική, τόσο από τεχνική, όσο και από ηθική άποψη** – τεχνική λόγω της υπεροχής των υποκειμενικών παραγόντων στη διαδικασία υπολογισμού, αλλά και εξαιτίας της έλλειψης συνεπούς νοήματος στο αποτέλεσμα: ηθική επειδή υπαινίσσεται ότι η τιμή σχεδιασμού είναι ουσιαστικά απαλλαγμένη από κίνδυνο.»

Εξήγηση της επικράτησης της μεθόδου

✓ Shaw (1994, σ. 235):

«Η ιδέα της ΠΜΚ, στην οποία καμία περίοδος επαναφοράς δεν μπορεί να αποδοθεί, είναι ελκυστική στο μηχανικό που είναι υπεύθυνος για το σχεδιασμό ενός φράγματος, το οποίο ποτέ δεν πρέπει να πέσει ή να υπερπηδηθεί από την πλημμυρική ροή.»

✓ Benson (1973):

«Η μέθοδος έχει γίνει αποδεκτή και χρησιμοποιηθεί για πολύ καιρό, όχι για την πραγματική της αξία, αλλά γιατί δίνει μια λύση, η οποία απομακρύνει την υπευθυνότητα στη λήψη σημαντικών αποφάσεων, όπως είναι ο βαθμός του κινδύνου ή της προστασίας.»

✓ **Σχόλιο:** Η απομάκρυνση της υπευθυνότητας είναι αυταπάτη, επειδή η υιοθέτηση της ΠΜΚ ασφαλώς δεν συνεπάγεται απομάκρυνση του κινδύνου στην πραγματικότητα.

11. Πιθανοτική θεώρηση των τιμών της ΠΜΚ

✓ Οι τιμές του ύψους βροχής που προκύπτουν με τη μέθοδο της ΠΜΚ μπορούν εναλλακτικά να παραχθούν και από μια πιθανοτική μέθοδο, για πολύ μικρή τιμή της πιθανότητας υπέρβασης F_1 ($= 1 - F$, όπου F η συνάρτηση κατανομής του ετήσιου μέγιστου ύψους βροχής) ή, ισοδύναμα, για πολύ μεγάλη τιμή της περιόδου επαναφοράς T ($= 1 / F_1$).

✓ Σύμφωνα το Αμερικανικό National Research Council (1994, σ. 14) η πιθανότητα υπέρβασης των τιμών ΠΜΚ που έχουν εκτιμηθεί στις ΗΠΑ κυμαίνεται από 10^{-5} έως 10^{-9} (περίοδος επαναφοράς από 100 000 μέχρι 1 000 000 000 χρόνια)

✓ Σύμφωνα με Βρετανικές εκτιμήσεις (Austin et al., 1995, σ. 74) οι τιμές της ΠΜΚ που εκτιμώνται με βάση ένα πρότυπο Βρετανικό μοντέλο καταγίδας αντιστοιχούν σε πιθανότητα υπέρβασης 5×10^{-6} (περίοδος επαναφοράς 200 000 χρόνια).

✓ Σύμφωνα με μελέτη του συγγραφέα (Koutsoyiannis, 1999) οι τιμές της ΠΜΚ που εκτιμώνται με τη στατιστική μέθοδο Hershfield αντιστοιχούν σε περίοδο επαναφοράς περίπου 60 000 χρόνια.

Βιβλιογραφία για παραπέρα μελέτη

- ✓ World Meteorological Organization (WMO), *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*, Operational Hydrology Report 1, 2nd edition, Publication 332, World Meteorological Organization, Geneva, 1986.
- ✓ Wiesner C. J., *Hydrometeorology*, Chapman and Hall, London, 1970..
- ✓ Koutsoyiannis, D., A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation, *Water Resources Research* 35(4), 1313-1322, 1999.
- ✓ Austin, B. N., I. D. Cluckie, C. G. Collier, and P. J. Hardaker, *Radar-Based Estimation of Probable Maximum Precipitation and Flood*, report, Meteorological Office, Bracknell, UK, 1995.
- ✓ Fry, A. S., and A. K. Showalter, Hydrometeorology, Section XIII in *Handbook of Meteorology*, edited by F. A. Berry, E. Bollay, and N. R. Beers, McGraw-Hill, New York, 1945.
- ✓ National Research Council, *Estimating Bounds on Extreme Precipitation Events*, National Academy Press, Washington, 1994.
- ✓ National Research Council, *Estimating Probabilities of Extreme Floods, Methods and Recommended Research*, National Academy Press, Washington, 1988.
- ✓ Dingman, S. L., *Physical Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- ✓ Collier, C. G., and P. J. Hardaker, Estimating probable maximum precipitation using a storm model approach, *J. of Hydrol.*, 183, 227-306, 1996.

Λοιπές βιβλιογραφικές αναφορές

- ✓ Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- ✓ Benson, M. A., Thoughts on the design of design floods, in *Floods and Droughts, Proc. 2nd Intern. Symp. in Hydrology*, pp. 27-33, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 1973.
- ✓ Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.
- ✓ Hershfield, D. M., Estimating the probable maximum precipitation, *Proc. ASCE, J. Hydraul. Div.*, 87(HY5), 99-106, 1961
- ✓ Hershfield, D. M., Method for estimating probable maximum precipitation, *J. American Waterworks Association*, 57, 965-972, 1965.
- ✓ Huff, F. H., Time distribution of rainfall in heavy storms, *Water Resour. Res.*, 3(4), 1007-1019, 1967.
- ✓ Koutsoyiannis, D., A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis, *Journal of Hydrology*, 156, 193-225, 1994..
- ✓ National Environmental Research Council (NERC), *Flood Studies Report*, Institute of Hydrology, Wallingford, 1975.
- ✓ Schreiner, L. C., and J. T. Reidel, Probable maximum precipitation estimates, United States east of 105th meridian, *Hydrometeorological Report 51*, U.S. National Weather Service, Washington, DC, 1978.
- ✓ Shaw, E. M., *Hydrology in Practice*, 3rd edition, Chapman & Hall, London, 1994.
- ✓ US Bureau of Reclamation, *Design of Arch Dams*, US Government Printing Office, Denver, CO, 1977.
- ✓ US Weather Bureau, Generalized estimates of probable maximum precipitation west of the 105th meridian, *Technical Paper no 38*, US Department of Commerce, Washington, 1960.