

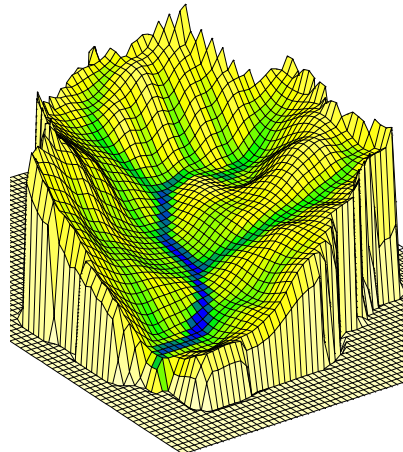


ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
DEMOCRITUS UNIVERSITY OF THRACE

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΡΟΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

(8ο εξάμηνο)



Φώτιος Μάρης
Αναπλ. Καθηγητής

Βιβλιογραφική αναφορά: Μηλιαρέσης Γ., 2004. Υδρολογία
(Εργαστηριακές Ασκήσεις), Παν/μιο Πατρών, 120 σελ.

<http://hydrogis.geology.upatras.gr/HYDROLOGY.HTM>

ΞΑΝΘΗ 2020

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος : Να δοθεί το πλαίσιο των μαθημάτων της Τεχνικής Υδρολογίας και Υδροπληροφορικής τα οποία διδάσκονται στο Εργαστήριο Υδρολογίας και Υδραυλικών Έργων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών.

Περιλαμβάνει: Ορισμούς των βασικών εννοιών, εισαγωγή στους τοπογραφικούς χάρτες και στην σχέση της γεωμορφολογίας με την υδρολογία, όπου δίνονται προαπαιτούμενες για το μάθημα- εργαστήριο γνώσεις. Η ανάλυση υδρογραφικών δικτύων(τελευταία σελίδα) είναι εκτός της εξεταζόμενης ύλης, αφού αυτά είναι γνωστά από άλλα μαθήματα(παράδειγμα το μάθημα «εξωγενείς διεργασίες») και αναπτύσσονται είτε για εισαγωγικούς λόγους είτε επειδή είναι προαπαιτούμενες γνώσεις.

Περιεχόμενα:

1. Ορισμοί
2. Δομή του εργαστηρίου
3. Εξετάσεις
4. Τοπογραφικοί χάρτες
5. Σχέση της Γεωμορφολογίας με την Υδρολογία
6. Κάλυψη γης
7. Ανάλυση Υδρογραφικών Δικτύων

1. Ορισμοί

Υδρολογία: Μελετά την εμφάνιση, την διανομή και κυκλοφορία του νερού στην γη(αέρας, επιφάνεια, υπέδαφος). Το πεδίο της Υδρολογίας περιλαμβάνει την ατμόσφαιρα μέχρι ύψους 15000m και την λιθόσφαιρα μέχρι βάθους 1000m. Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής εξαρτώνται από το κλίμα, την γεωγραφία και την γεωλογία.

- Κλιματολογικά στοιχεία : α) βροχοπτώσεις: χωρική κατανομή, η διάρκεια και η ένταση καθώς και το ποσοστό των χιονοπτώσεων, β) άνεμοι, θερμοκρασία και η υγρασία της ατμόσφαιρας.
- Γεωγραφία. Προσδιορίζεται από το ανάγλυφο και την κάλυψη γης.
- Γεωλογία. Λιθολογία και η τεκτονική της περιοχής μελέτης.

Το αντικείμενο της τεχνικής υδρολογίας: Ο προσδιορισμός των υδρολογικών δεδομένων (βροχόπτωση, απορροή, κ.ά.) μιας υδρολογικής λεκάνης για τις ανάγκες αξιολόγησης/ σχεδιασμού/ προμελέτης ενός τεχνικού (υδραυλικού) έργου. Ο προσδιορισμός της πιθανότητας εμφάνισης μιας ακραίας τιμής ενός υδρολογικού φαινομένου σε μια δεδομένη χρονική περίοδος. Η χρονική περίοδος είναι συνάρτηση με το εύρος λειτουργίας ενός συγκεκριμένου τεχνικού έργου. Παράδειγμα η πιθανότητα η απορροή ενός ποταμού σε μια συγκεκριμένη θέση ή το ύψος της βροχόπτωσης σε μία υδρογραφική λεκάνη να ξεπεράσει να προκαθορισμένη τιμή.

Υδρολογικός κύκλος: Περιλαμβάνει σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ μετεωρολογικών, βιολογικών, χημικών και γεωλογικών παραγόντων. Ο ήλιος είναι ο κινητήριος μοχλός που μετακινεί με την εξάτμιση το νερό από τους ωκεανούς (όπου βρίσκεται το 97% του συνόλου του) στην ατμόσφαιρα (υδρατμοί, σύννεφα). Στην συνέχεια το νερό μεταφέρεται στην ξηρά αλλά και στην θάλασσα μέσω των βροχοπτώσεων. Στην ξηρά το νερό ακολουθεί επιφανειακή πορεία, ένα μέρος τους διηθείται στο υπέδαφος ενώ ένα άλλο προσλαμβάνεται από τους έμβιους οργανισμούς και τα φυτά. Ο υδρολογικός κύκλος θεωρείται ένα κλειστό σύστημα επειδή το συνολικό ποσό του νερού παραμένει σταθερό παρ' όλο που η κατανομή του στο χώρο (πόλοι, ορεινοί όγκοι, υπόγεια υδάτινα αποθέματα) και στον χρόνο(συνάρτηση των κλιματολογικών αλλαγών, όπως για παράδειγμα οι περίοδοι παγετώνων, κ.ά.). Σε γενικές γραμμές έξι κύριες διεργασίες λαβαίνουν χώρα:α) βροχοπτώσεις (P), β) διήθηση (I), γ) εξάτμιση(T), δ) διαπνοή (T), ε) επιφανειακή ροή (R), στ) υπόγεια ροή(G).

2. Δομή του εργαστηρίου

Υπάρχουν 4 κύκλοι ασκήσεων: Α. Υδρολογικές λεκάνες, Β. Βροχοπτώσεις, Γ. Εξάτμιση- Διαπνοή, Δ. Απορροές.

Η εισαγωγή είναι εκτός της εξεταζόμενης ύλης και αποσκοπεί στο να περιγράψει το εργαστήριο και να δώσει κάποιες προαπαιτούμενες για το εργαστήριο γνώσεις.

Κύκλος Α΄ : Υδρολογικές Λεκάνες				
α/α	Τίτλος	Εκφώνηση	Δεδομένα	Λογισμικό
1	Γεωμορφομετρία	L01.pdf	D.E.M.	Terrain analysis system
2	Εντοπισμός υδρογραφικού δικτύου	L02.pdf	image	
3	Εντοπισμός λεκάνης	L03.pdf	outlets	
4	Μορφομετρική ανάλυση λεκάνης	L04.pdf	basins	
5	Υδρολογική ανάλυση λεκάνης	L05.pdf	maps	
6	Υδρογραφικά δίκτυα	L06.pdf	network	

Κύκλος Β΄ : Βροχοπτώσεις				
α/α	Τίτλος	Εκφώνηση	Δεδομένα	Λογισμικό
1	Βροχομετρικοί χάρτες	L07.PDF	L07.XLS	Excel
2	Στατιστική ανάλυση (βροχόμετρο)	L08.PDF	L08.XLS	Excel
3	Ένταση-Διάρκεια (βροχογράφος)	L09.PDF	L09.XLS	Excel ή RAINPLOT
4	Ομογενοποίηση-διόρθωση	L10.PDF	L10.XLS	Excel
5	Ψηφιακή κατάτμηση σε πολύγωνα Thiessen	L11.PDF	L11.ZIP	IDRISI
6	Προσδιορισμός της βροχοβαθμίδας	L12.PDF	L12.XLS L12.ZIP	Excel & TAS

Κύκλος Γ΄ : Εξάτμιση – Διαπνοή				
α/α	Τίτλος	Εκφώνηση	Δεδομένα	Λογισμικό
1	Προσδιορισμός της εξατμισοδιαπνοής	L13.PDF	L13.XLS	Excel
2	Παγκόσμιο υδατικό ισοζύγιο-Α	L14.PDF	GTOPO30, shoreline	IDRISI ή TAS

Κύκλος Δ΄ : Απορροή				
α/α	Τίτλος	Εκφώνηση	Δεδομένα	Λογισμικό
1	Απορροή-Α	L15.PDF	L15.XLS	Excel
2	Απορροή-Β	L16.PDF	L16.XLS	Excel
3	Πλημμυρική εισροή-Α	L17.PDF	DEM.ZIP L17.XLS	TAS , Excel

Συνολικά υπάρχουν 15 ασκήσεις (υποχρεωτικές και προαιρετικές) και υποχρεωτικά θέματα: ένα για κάθε κύκλο και ένα θέμα βιβλιογραφικό (<http://hydrogis.geology.upatras.gr/HYD/HYDROLOGY.HTM>).

- Οι **προαιρετικές ασκήσεις** καλύπτουν θέματα που ενώ περιλαμβάνονται στην θεωρία, δεν μπορούν να παρουσιαστούν (λόγω χρονικών περιορισμών). Είναι εκτός της εξεταζόμενης ύλης του εργαστηρίου (σε αντίθεση με τα αντίστοιχα κεφάλαια στην θεωρία) και είναι χρήσιμο να τις

εκτελέσετε μόνοι σας(δεν τις βαθμολογώ, μόνο απαντάω σε απορίες εάν κάποιος τις εκτελέσει).

- Τα **προαιρετικά θέματα**, εάν τα εκτελέσει κάποιος τα βαθμολογώ.
- Οι **επιλεγμένες ασκήσεις** είναι για όποιον θέλει να εξασκηθεί παραπάνω. Όποιος τις εκτελέσει και έχει απορίες μπορεί να με ρωτήσει. Εάν κάποιος εκτελέσει 2 από τις επιλεγμένες ασκήσεις (και τα 4 προαιρετικά θέματα) επιτυχώς τότε θα απαλλαγθεί από την γραπτή εξέταση.

3. Εξετάσεις

ΓΡΑΠΤΗ ΕΞΕΤΑΣΗ: Στις εξετάσεις του εργαστηρίου κάθε φοιτητής καλείται να συμπληρώσει ένα από τα έντυπα υποχρεωτικών ασκήσεων που διδάχθηκαν στο εργαστήριο. Η εκφώνηση παραμένει η ίδια, όμως αλλάζουν τα δεδομένα(παράδειγμα ενώ οι ασκήσεις του πρώτου κύκλου έγιναν σε ΨΥΜΕ του Ν. Αχαΐας , στις εξετάσεις εργαστηρίου μπορεί η εξέταση να γίνει σε ΨΥΜΕ της Ξάνθης). Προσοχή οι εκφωνήσεις των ασκήσεων αλλάζουν. Άρα τα έντυπα εκφώνησης της άσκησης που θα σας δώσω είναι τα ίδια με αυτά που εκτελέστηκαν στο εργαστήριο. Η επιλογή της άσκησης στην οποία θα εξετασθεί ο κάθε φοιτητής γίνεται τυχαία. Εάν λόγω απρόβλεπτων παραγόντων κάποιες ασκήσεις δεν διδαχθούν (παράδειγμα να γίνουν λιγότερα εργαστήρια) τότε οι εξετάσεις θα περιορισθούν μόνο στις ασκήσεις που διδάχθηκαν.

ΘΕΜΑ : Κάθε ένα από τα υποχρεωτικά θέματα βαθμολογείται από 0 έως 1. Κάθε προαιρετικό θέμα βαθμολογείται από 0 έως 1.

Αλγόριθμος υπολογισμού του συνολικού βαθμού του εργαστηρίου

Υποχρεωτικό ΘΕΜΑ [0 , 1]					Άθροισμα των βαθμών των υποχρεωτικών θεμάτων
A	B	Γ	Δ	Ε	
					X1=
Προαιρετικό ΘΕΜΑ [0 , 1]					Άθροισμα των βαθμών των προαιρετικών θεμάτων
A	B	Γ	Δ		
					X2=
X3=Βαθμός Γραπτής Εξέτασης [0 , 5] → Όπου Ν ο αριθμός των προαιρετικών θεμάτων (N ≤4) { όποιος εκτελέσει δύο από τις επιλεγμένες ασκήσεις και τα 4 προαιρετικά θέματα επιτυχώς απαλλάσσεται από την γραπτή εξέταση και X3= η επίδοση του στις 2επιλεγμένες ασκήσεις & στα 4 προαιρετικά θέματα}					X3-N=
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ= X1 + X2 + [X3-N]					

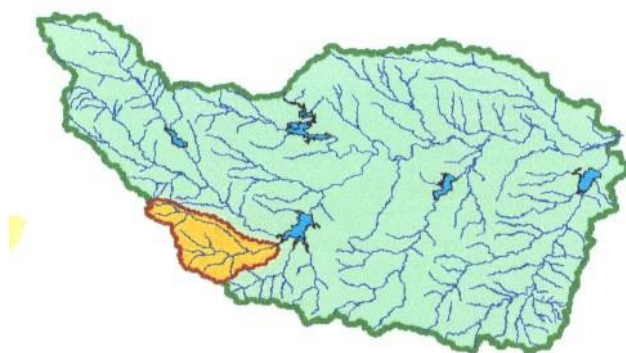
Και με το μάθημα τι γίνεται: Η θεωρία του μαθήματος καλύπτεται από τα βιβλία:

1. Τσακίρη Γ. , 1995. Υδάτινοι Πόροι: Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 675 σελ.
2. Σακκάς Ι. , 2004. Τεχνική Υδρολογία: Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις ΑΙΒΑΖΗ, Θεσ/νικη, 787 σελ.

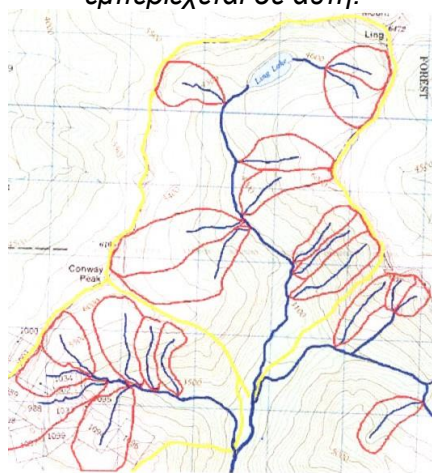
4. Τοπογραφικοί Χάρτες

Ο τοπογραφικός χάρτης απεικονίζει την επιφάνεια της γης με ισοϋψείς καμπύλες. Η υψομετρική διαφορά δύο διαδοχικών ισοϋψών καμπυλών καθορίζει την ισοδιάσταση του χάρτη (την λεπτομέρεια με την οποία γίνεται η δειγματοληψία της τρίτης διάστασης).

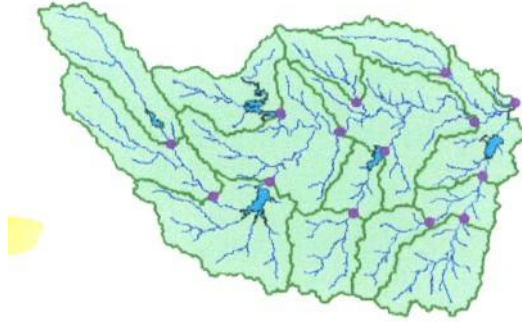
Παράδειγμα: στους τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000 η ισοδιάσταση είναι 20m. Αυτό δεν σημαίνει ότι σε περιοχές που παρατηρείται μικρή υψομετρική διαφορά και καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση σε σχέση με την έκταση της περιοχής που καλύπτει το φύλλο χάρτη, δεν παρατηρείται μικρότερη ισοδιάσταση. Για παράδειγμα σε χάρτες κλίμακας 1:5.000 ενώ η ισοδιάσταση είναι 4m, σε επίπεδες περιοχές οι χαρτογράφοι τοποθετούν ισοϋψείς ανά 2m.



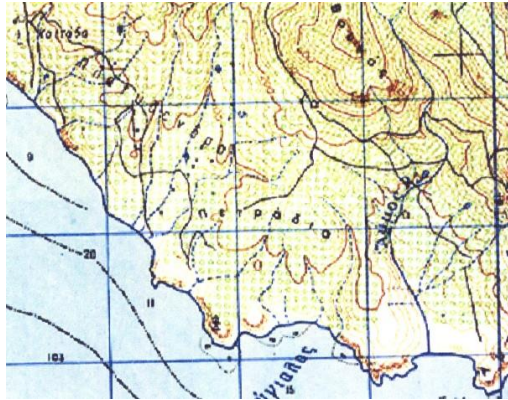
Σχήμα 1. Υδρογραφικό δίκτυο που εμπεριέχεται σε μια υδρογραφική λεκάνη μεγάλης τάξης και η οριοθέτηση μιας λεκάνης μικρότερης τάξης (με διαφορετικό χρώμα) που εμπεριέχεται σε αυτή.



Σχήμα 2. Οριοθέτηση υδρογραφικών λεκανών σε τοπογραφικό χάρτη



Σχήμα 3. Σημεία εκβολής (outlets) υδρογραφικών λεκανών



Σχήμα 4. Θεματική πληροφορία τοπογραφικού χάρτη

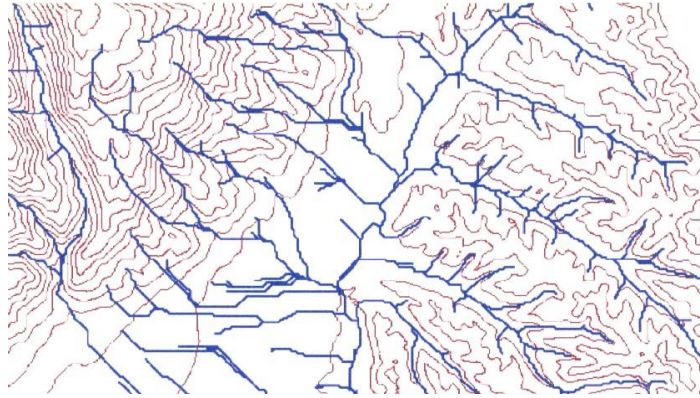
Ένα άλλο χαρακτηριστικό του χάρτη είναι η οριζοντιογραφική ακρίβεια. Αυτή προσδιορίζεται σαν συνάρτηση της κλίμακας και του γραφικού σφάλματος (που ισούται με 0,25mm) εκτός εάν δηλώνεται διαφορετικά στο υπόμνημα του χάρτη. Δηλαδή η οριζοντιογραφική ακρίβεια προκύπτει εάν το γραφικό σφάλμα εκφρασθεί σε m βάση της κλίμακας. Παράδειγμα σε χάρτη κλίμακας 1:50.000 (1mm=50m) η οριζοντιογραφική ακρίβεια αναμένεται να είναι ίση με 12,5 m {0.25*50m}.

Ο χάρτης εμπεριέχει θεματική πληροφορία.(Σχήματα 1,2,3,4,5,6). Δηλαδή: κάλυψη γης (φυτοκάλυψη, κα.), οικιστική πληροφορία(θέσεις οικισμών, ακόμη και διάσπαρτες οικίες), ονοματολογία, διοικητικές διαιρέσεις (όρια νομών, κ.α.), υδρογραφικό δίκτυο.

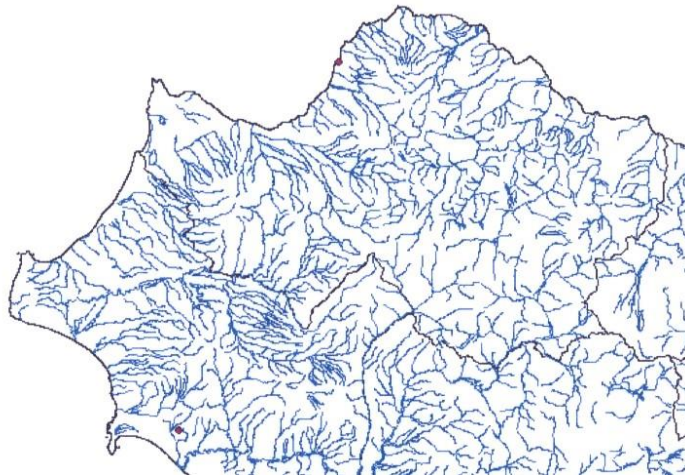
Επιπλέον υπάρχουν δεδομένα που μπορούν να εξαχθούν από τον τοπογραφικό χάρτη, όπως οι υδροκρίτες, οι υδρογραφικές λεκάνες, κ.α. Βασική λειτουργία στο μάθημα της υδρολογίας είναι να μπορεί ο φοιτητής να χαράξει τους υδροκρίτες και το υδρογραφικό δίκτυο (αυτά τα έχετε ήδη δει στις «εξωγενείς διεργασίες»).

Το υδρογραφικό δίκτυο στο μεγαλύτερο μέρος του έχει απεικονισθεί στον τοπογραφικό χάρτη (με συνεχή μπλε γραμμή εκεί που υπερτερεί η μόνιμη ροή και με διακεκομμένη γραμμή όταν η ροή είναι κυρίως περιστασιακή-παροδική). Παρ' όλα αυτά χρειάζεται να χαραχθεί το σύνολο του υδρογραφικού δικτύου. Στην ουσία πρόκειται για το δίκτυο των κοιλάδων (Σχήμα 5 α,β).

Το δίκτυο των υδροκριτών είναι συμπληρωματικό του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 2) ενώ τα δύο δίκτυα τέμνονται στα σημεία εκβολής των υδρογραφικών λεκανών (Σχήμα 3).

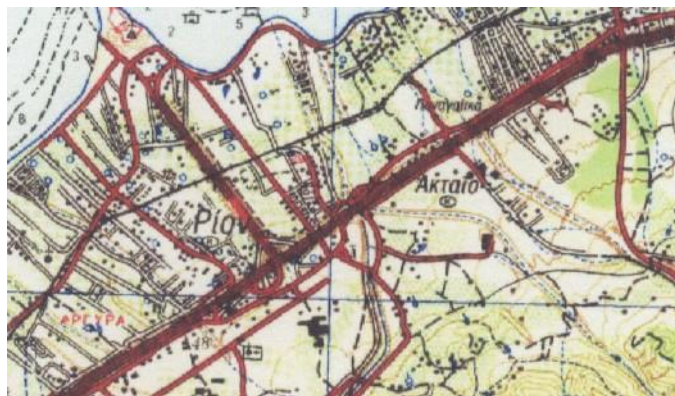


Σχήμα 5α. Εντοπισμός του υδρογραφικού δικτύου σε τοπογραφικό χάρτη



Σχήμα 5β. Υδρογραφικό δίκτυο (ψηφιοποίηση από χάρτες)

Σήμερα μια διακριτή ψηφιακή αναπαράσταση (ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους →ΨΥΜΕ) του τοπογραφικού χάρτη (Σχήμα 7) έχει δώσει πολύ μεγάλες δυνατότητες τόσο στην ταχύτητα επεξεργασίας, όσο στην ποσοτικοποίηση και παραμετρική αναπαράσταση των υδρογραφικών λεκανών αλλά και στην δυνατότητα σύνθεσης πληροφορίας από άλλες πηγές (παράδειγμα: σύνθεση υψομετρικής πληροφορίας με την πληροφορία κάλυψης γης από δορυφορικές εικόνες). Αυτά θα τα δούμε στον κύκλο Α (υδρολογικές λεκάνες) και στον κύκλο Γ (εξάμιση- διαπνοή).



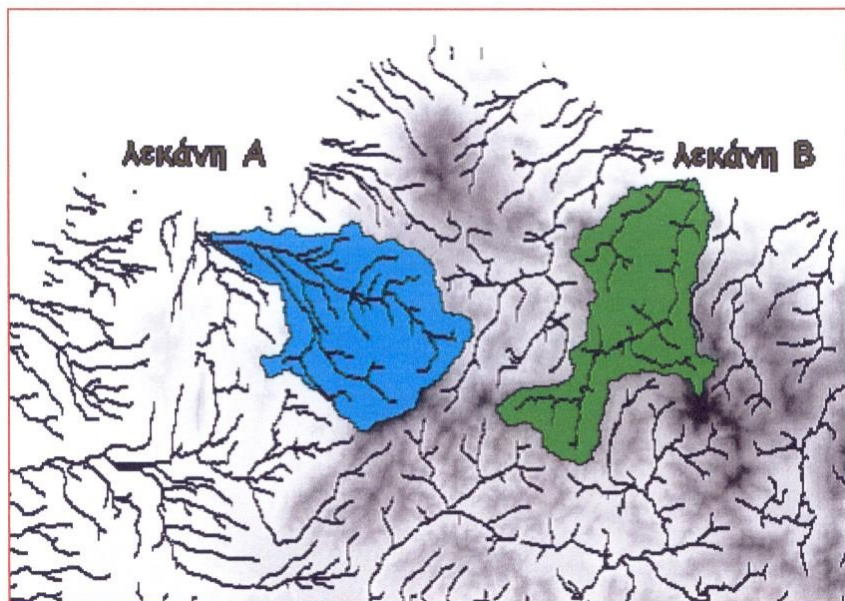
Σχήμα 6. Θεματική πληροφορία τοπογραφικού χάρτη



Σχήμα 7. Χάρτης σκιασμένου ανάγλυφου που προέκυψε από την ψηφιακή επεξεργασία ΨΥΜΕ

5. Σχέση της Γεωμορφολογίας με την Υδρολογία

Έστω ότι δύο υδρογραφικές λεκάνες στον νομό Αχαΐας έχουν εντοπισθεί από ένα ΨΥΜΕ όπως φαίνεται στο σχήμα 8. Το ερώτημα που τίθεται είναι πως η γεωμορφολογία των δύο λεκανών μπορεί να μας οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για την υδρολογία τους.



Σχήμα 8. Υδρογραφικές λεκάνες που έχουν εντοπισθεί από ΨΥΜΕ και έχουν υπερτεθεί στο ΨΥΜΕ μαζί με το υδρογραφικό δίκτυο.

Βασικά στοιχεία της γεωμορφολογίας της λεκάνης είναι η έκτασή της, το μέσο υψόμετρο, η μέση κλίση, το σχήμα της λεκάνης, η υψομετρική διαφορά μέσα στην λεκάνη. Αυτοί οι παράγοντες συσχετίζονται με την υδρολογία. Για παράδειγμα:

Έκταση → καθορίζει δυνητικά την ποσότητα του νερού που δέχεται η λεκάνη και άρα δίνει μια εκτίμηση της ποσότητας του νερού που απορρέει από το σημείο εκβολής της.

Μέσο υψόμετρο → συσχετίζεται με το ύψος της βροχής που δέχεται η λεκάνη(όσο αυξάνεται το υψόμετρο τόσο αυξάνεται το ύψος βροχής, όπως θα δούμε στο Β' κύκλο).

Μέση κλίση → δίνει μια εκτίμηση για την ταχύτητα απορροής άρα για την διαβρωτική ικανότητα του νερού και την ικανότητά του να μεταφέρει φερτές ύλες.

Υψομετρική διαφορά → συσχετίζεται με την μέση κλίση αλλά δίνει και μια εκτίμηση για την δυναμική ενέργεια του όγκου νερού που προσπίπτει στη λεκάνη, η οποία στην διάρκεια της απορροής μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Όλα αυτά θα τα δούμε με λεπτομέρειες στον Α' κύκλο και Β' κύκλο.

Σχήμα λεκάνης. Καθορίζει το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής και επομένως το μέγεθος της παροχής στο σημείο εκβολής της λεκάνης. Δηλαδή όσο πιο επιμήκης είναι η λεκάνη τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος συγκέντρωσης και τόσο μικρότερη η παροχή.

Επιπλέον η κάλυψη γης (γυμνό έδαφος, δάσος, λιβαδικές εκτάσεις)αλλά και οι χρήσεις γης (είδος καλλιεργειών) συσχετίζονται με την υδρολογία(παράδειγμα η εξάτμιση και η διαπνοή όπως θα δούμε στο Γ' κύκλο).

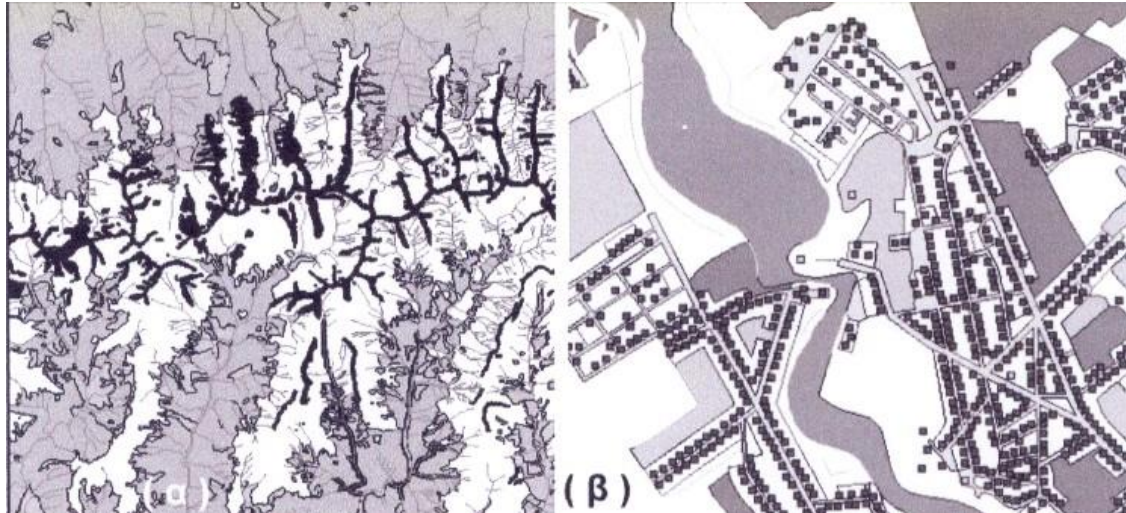
Ακόμη γεωλογικοί παράγοντες (παράδειγμα η λιθολογία) καθορίζουν την υπόγεια απορροή και την διήθηση-διείσδυση που είναι οι βασικότεροι (αυτά θα τα δείτε στην υδρογεωλογία).

Το υψομετρικό ολοκλήρωμα (HI) είναι ο δείκτης που συνδέεται με την ταξινόμηση μίας υδρογραφικής λεκάνης σε ένα από τα τρία στάδια(γήρατος, ωριμότητας, νεότητας) γεωμορφολογικής εξέλιξης του Davis. Θα αναρωτηθεί κάποιος γιατί ενδιαφέρει αυτή η ταξινόμηση και ποια η σχέση της με την υδρολογία;

Μας ενδιαφέρει γιατί καθορίζει το ποσοστό της υδροστρωματοροής σε σχέση με την κατευθυνόμενη απορροή κατά μήκος κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Στο στάδιο της νεότητας υπερτερεί η κατευθυνόμενη απορροή ενώ στο στάδιο γήρατος η υδροστρωματοροή. Το είδος της απορροής καθορίζει τον βαθμό διείσδυσης, την υπόγεια απορροή και συνδέεται με το είδος και την ένταση της διάβρωσης και την μεταφορά φερτών υλικών.

6. Κάλυψη γης

Η κάλυψη γης αναφέρεται στις φυσικές και τεχνητές οντότητες που αναγνωρίζονται-ερμηνεύονται από μια τηλεπισκοπική εικόνα/αεροφωτογραφία να καλύπτουν μια εδαφική ομάδα. Φυσικές οντότητες είναι για παράδειγμα η βλάστηση, το νερό, κ.α., ενώ στις τεχνητές οντότητες περιλαμβάνονται οι καλλιέργειες, τα κτίσματα, οι δρόμοι, κ.α.



Σχήμα 9. Καλύψεις γης: α) δασική περιοχή, β) αστική περιοχή

Από πρακτικής πλευράς η ερμηνεία των καλύψεων γης περιλαμβάνει κυρίως την οριοθέτηση επιφανειών μονάδων-πολύγωνα (Σχήμα9) από δορυφορικές φωτογραφίες(γεωργική γη, βιομηχανικές περιοχές, κ.α.). Όμως γραμμικά στοιχεία (πχ γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, οδικό δίκτυο, συστάδες δέντρων κατά μήκος ορίων ιδιοκτησιών ή στην μεσαία λωρίδα δρόμων ή εκατέρωθεν δρόμων, κ.α.) αλλά και σημειακά στοιχεία συμπεριλαμβάνονται. Παράδειγμα, οικίες (ανάλογα βέβαια με την κλίμακα του παραγόμενου προϊόντος), πηγές νερού, κ.α.

Από πλευράς ψηφιακής αναπαράστασης, δεδομένα των καλύψεων γης είναι είτε διανυσματική μορφή (vector) είτε σε πλεγματική μορφή πλέγματος (raster).

Η παραμετροποίηση της πληροφορίας(κατηγοριοποίηση των καλύψεων γης) γίνεται με ένα σύστημα γεωταξινόμησης που αποτελεί ένα σύστημα πολλαπλών επιπέδων, όπως φαίνεται στον πίνακα1. Τα πιο γνωστά συστήματα κατηγοριοποίησης χρήσεων γης/ κάλυψης γης με την χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης είναι το σύστημα της US Geological Survey στις Η.Π.Α. και το CORINE στην Ευρώπη.

Πίνακας 1. Σύστημα ταξινόμησης Χρήσεων Γης- Καλύψεων Γης (τα 2 πρώτα επίπεδα) της US Geological Survey.

Επίπεδο I	Επίπεδο II	Επίπεδο I	Επίπεδο II
-----------	------------	-----------	------------

1. Αστική γη	11-Οικιστική 12-Εμπορική γη 13-Βιομηχανική 14-Μεταφορές, επικοινωνίες 16-Μικτές χρήσεις	2.Γεωργική γη	21-Καλλιέργιες βοσκότοποι 22-Οπωροφόρα, αμπέλια 23-Θερμοκήπια 24-Λοιπές γεωργικές εκτάσεις
3.Βοσκότοποι	31-Ποώδη βλάστηση 33-Μικτή	4. Δασική γη	41-Φυλλοβόλα δένδρα 42-Αειθαλή δένδρα 43-Μικτά
5.Νερό	51-Ρέματα & κανάλια 52-Λίμνες 53-Δεξαμενές 54-Κόλποι, εκβολές ποταμιών	6.Υγροβιότοποι	61-Με δασική κάλυψη 62- Χωρίς δασική κάλυψη
7.Άγονη γη	72-Ακτές 73-Αμμώδεις περιοχές ακτών 74-Βράχια 75-Ορυχεία, Λατομεία 77-Μικτή γη	8.Τούνδρα	81-Με θάμνους 82- Ποώδης τούνδρα 83-Γυμνό έδαφος 84-Υδάτινες εκτάσεις 85-Μικτή τούνδρα
9.Χιόνια	91-Ζώνες αιώνιου χιονιού 92- Πάγοι		

7. Ανάλυση Υδρογραφικών Δικτύων

Πρώτα πρέπει να γίνει η αρίθμηση των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Τα μοντέλα αρίθμησης είναι 4 (Horton, Strahler, Shreve, Scheidegger) όπως έχετε μάθει στις «εξωγενείς διεργασίες». Οι μέθοδοι Shreve, Scheidegger πλεονεκτούν από πλευράς υδρολογίας με λεπτομέρειες όλο το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης σε σχέση με το μέγεθος της απορροής.

Η πιο σημαντική παράμετρος που ενδιαφέρει την υδρολογία είναι η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου. Εκφράζεται ως το σύνολο των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου προς το εμβαδόν της λεκάνης.

○ Όταν η πυκνότητα μιας λεκάνης είναι μεγαλύτερη τότε δημιουργούνται πολύ μεγάλης ταχύτητας απορροές στο σημείο εκβολής της λεκάνης με συνέπεια να αυξάνεται η παροχή, να δημιουργούνται πλημμυρικές αιχμές και να αυξάνει η μεταφερόμενη ποσότητα των φερτών υλικών.

○ Εμπειρικός κανόνας υποδηλώνει ότι όσο αυξάνει η πυκνότητα τόσο μικρότερη είναι η αντοχή της λιθολογίας στην μηχανική αποσάθρωση και στην διαβρωτική ικανότητα του νερού.

Ο αριθμός των κλάδων προς το εμβαδόν της λεκάνης υποδηλώνει την συχνότητα κλάδων συγκεκριμένης τάξης. Η συχνότητα εξαρτάται από την τάξη των κλάδων (σε αντίθεση με την πυκνότητα). Ο υπολογισμός της

πυκνότητας/ συχνότητας από τοπογραφικούς χάρτες είναι εξαιρετικά χρονοβόρος διαδικασία, σε αντίθεση με τα ΨΥΜΕ.

Μορφές (ή ΠΡΟΤΥΠΟ) υδρογραφικού δικτύου

Δενδρική, ορθογώνιος, παράλληλη, ακτινωτή, κλιμακωτή(trelis)κ.α. Το πρότυπο συσχετίζεται με την λιθολογία και την τεκτονική.

Συντελεστής διακλάδωσης (Rb)

Δείχνει κατά μέσο όρο τον αριθμό των κλάδων μιας τάξης που είναι απαραίτητες για να προκύψει ένας κλάδος μεγαλύτερης τάξης. Προκύπτει σαν τον μέσο όρο των κλάδων X τάξης προς τους κλάδους X+1 τάξης. Στην πράξη $3 \leq Rb \leq 5$.

Νόμοι της υδρογραφικής σύνθεσης (κατά Horton):

- Νόμος του αριθμού των κλάδων
- Νόμος του μήκους των κλάδων
- Νόμος του εμβαδού των λεκανών απορροής.

Βιβλιογραφία

- Μηλιαρέσης Γ., 2004. Εισαγωγή στην Υδρολογία (Φροντιστηριακές Σημειώσεις. Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας & Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Mc Guen R., 2005. Hydrologic Analysis & Design (3rd ed.). Prentice Hall, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ , 859 p.
- Σακκά Ι. , 1985. Τεχνική Υδρολογία, Τεύχος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Αϊβάζη, Ξάνθη, 371 σελ.
- Σακκά Ι. , 2004. Τεχνική Υδρολογία, Τόμος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων(2^η έκδοση). Εκδόσεις Αϊβάζη, Ξάνθη, 787 σελ.
- Τσακίρης Γ., 1995. Υδάτινοι Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, 675 σελ.
- Τσόγκας Χρ., Υδρολογία. Εκδόσεις ΙΩΝ, Περιστερί, 206 σελ.
- Viessman W., Levis G., 2003. Introduction to Hydrology (5th ed.). Prentice Hall, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ , 612 p.
- Μηλιαρέσης Γ., 2003. Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση. Εκδόσεις ΙΩΝ, Περιστερί, 243 σελ.
- Argialas, D., J. Lyon, and O. Mintzer (1988) Quantitative Description and Classification of Drainage Patterns, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54,505-509.
- Ichoku, C. And J. Chorowicz(1994) A Numerical Approach to the Analysis and Classification of Channel Network Patterns, Water Resources Research,30,161-174.

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΛΕΚΑΝΕΣ

Στόχος: να δοθεί ένα στοιχειώδες υπόβαθρο το οποίο σε συνδυασμό με το διαθέσιμο λογισμικό να δώσει την δυνατότητα στους φοιτητές να εντοπίσουν υδρογραφικές λεκάνες από ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα εδάφους, να τις αναπαραστήσουν παραμετρικά (μορφομετρική ανάλυση), να προσδιορίσουν υδρολογικές παραμέτρους και να τις αξιολογήσουν σε σχέση με συγκεκριμένες δραστηριότητες / τεχνικά έργα

Περιεχόμενα

1. Υψομετρική Πληροφορία
2. Ψηφιακές Αναπαραστάσεις
3. Γεωμορφομετρία (βασικές έννοιες)
4. Προσομοίωση Ροής
5. Εντοπισμός Υδρογραφικού Δικτύου
6. Εντοπισμός Υδρολογικών Λεκανών
7. Μορφομετρική Ανάλυση Λεκανών
8. Δείκτες Διάβρωσης Εδαφών

Ερωτήσεις – Ασκήσεις

1. Να προσδιοριστεί η διεύθυνση του διανύσματος της κλίσης για κάθε σημείο του ΨΥΞΕ (εκτός από τα περιφερειακά σημεία πρώτη γραμμή & στήλη, τελευταία γραμμή & στήλη), να γίνει προσομοίωση ροής και να προσδιοριστεί η απορροή σε κάθε σημείο.

ΨΥΜΕ (μ)					δ/νση του διανύσματος της κλίσης	Απορροή (αριθμός σταγόνων)
80	70	80	90	95		
90	74	79	80	85		
90	75	73	75	80		
90	80	85	70	75		
85	90	76	65	75		
80	75	50	60	70	←	
90	85	45	75	74		

2. Να προσδιοριστεί η διεύθυνση του διανύσματος της κλίσης (τυποποίηση στις 8 δ/νσεις που ορίζονται σε μια πλεγματική εικόνα) για το ΨΥΜΕ. Να εντοπισθούν παγίδες ροής στο διανυσματικό χώρο. Να αντιμετωπισθούν οι παγίδες με κατάλληλη αλλαγή του υψομέτρου (υπερχείλιση) σε επιλεγμένες κορυφές του ΨΥΜΕ. Να επαναπροσδιοριστεί ο διανυσματικός χώρος μετά την υπερχείλιση των παγίδων ροής.

ΨΥΜΕ (μ)					δ/νση του διανύσματος της κλίσης	ΨΥΜΕ (μετά την αντιμετώπιση των παγίδων ροής)					δ/νση του διανύσματος της κλίσης
80	70	80	90	95		80	70	80	90	95	
90	74	79	80	85		90				85	
90	75	73	75	80		90				80	
90	80	85	76	75		90				75	
85	90	76	65	75		85				75	
80	75	50	60	70	←	80				70	
90	85	45	75	74		90	85	45	75	74	

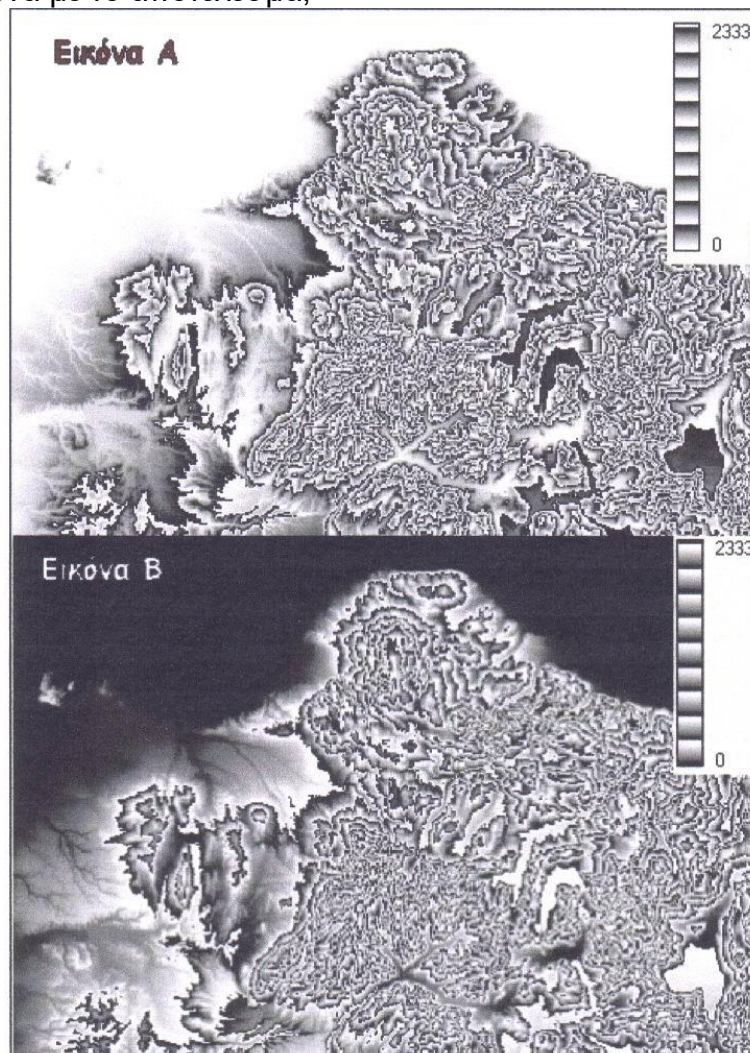
3. Να προσδιοριστεί το μέτρο της κλίσης και η διεύθυνση της κλίσης για το κεντρικό σημείο του ΨΥΜΕ (τα υψόμετρα είναι σε μέτρα) που ακολουθεί αν η διάστασή του είναι 10 μέτρα.

ΨΥΜΕ (τα υψόμετρα είναι σε μέτρα)	60	70	80
	50	<u>70</u>	80
	60	70	80

4. Ποιά η διαφορά στο μέτρο της κλίσης για το κεντρικό σημείο στα 2 ΨΥΜΕ (τα υψόμετρα είναι σε μέτρα) που ακολουθούν εάν ο υπολογισμός γίνει με τον τελεστή SOBEL; (παρακαλώ πολύ να αιτιολογηθεί το αποτέλεσμα χωρίς να γίνουν πράξεις)

ΨΥΜΕ Α→	50	70	80	ΨΥΜΕ Β→	50	70	80
	40	60	75		40	10	75
	50	70	80		50	70	80

5. Να γίνει ερμηνεία του τύπου απεικόνισης του ΨΥΜΕ στην οθόνη σύμφωνα με το αποτέλεσμα,



6. Να δοθεί διάγραμμα στο οποίο να περιγράφετε η διαδικασία εντοπισμού υδρολογικής λεκάνης από ένα ΨΥΜΕ.
7. Σε ποιά στάδια της διαδικασίας εντοπισμού μιας υδρολογικής λεκάνης υπεισέρχεται η υποκειμενικότητα του χρήστη και γιατί;
8. « Η αντιμετώπιση των παγίδων ροής ή των προβλημάτων που δημιουργού οι ζώνες με μηδενική κλίση έχει ως αποτέλεσμα να χαθεί πληροφορία που υπάρχει στη φύση προς όφελος της χαρτογραφικής απεικόνισης ενός υδρογραφικού δικτύου ». Να δοθεί ένα παράδειγμα στη πράξη είναι δυνατό συμβεί και το αντίθετο! , να δοθεί ένα ακόμα παράδειγμα.
9. Δίνεται η παραμετρική αναπαράσταση 2 υδρολογικών λεκανών. Ποιους μορφομετρικούς, γεωμορφολογικούς ή υδρολογικούς δείκτες θα προτιμούσατε να σας δοθούν προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η σύγκριση των 2 λεκανών;
10. Ποιά η επίδραση της μορφομετρίας μιας λεκάνης στην υδρολογία της;
11. Δείκτες Διάβρωση Εδαφών: να γίνει ανάπτυξη (χωρίς τους τύπους) αλλά να γίνει περιγραφή των παραγόντων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό τους.

<p>12. Δίνεται η προσομοίωση ροής (αριθμός σταγόνων ανά σημείο του ΨΥΜΕ) για μια υδρογραφική λεκάνη.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Ζητείται να προσδιορισθεί η διεύθυνση του διανύσματος της κλίσης. {Η διεύθυνση να τυποποιηθεί σε μια από τις 8 γεωγραφικές διευθύνσεις, Β, Ν, Α, Δ, ΒΑ, ΒΔ, ΝΑ, ΝΔ. } 	Προσομοίωση ροής				→	Διάνυσμα κλίσης			
	1	1	1	1					
	2	1	3	1					
	3	2	5	1					
	4	10	7	2					
	11	5	1	4					
	12	13	24	5					

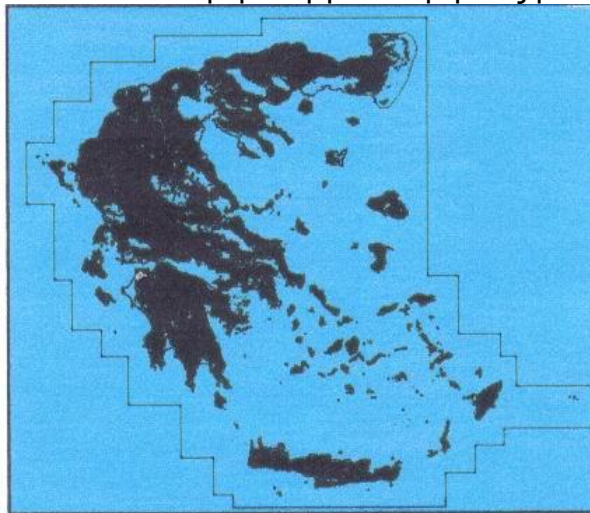
1. Υψομετρική Πληροφορία

Η πιο συνηθισμένη αναπαράσταση της υψομετρικής πληροφορίας είναι με ισοϋψείς καμπύλες σε τοπογραφικούς χάρτες (σχήμα 1). Η πρόσβαση και η αξιοποίηση της πληροφορίας αυτής είναι δύσκολη και χρονοβόρα. Επιπλέον στους τοπογραφικούς χάρτες παρατηρείται κατά κανόνα α) γενίκευση της τοπογραφίας από τους χειριστές των τοπογραφικών οργάνων & β) σφάλματα (συστηματικά ή τυχαία)



Σχήμα 1. Τοπογραφικός Χάρτης

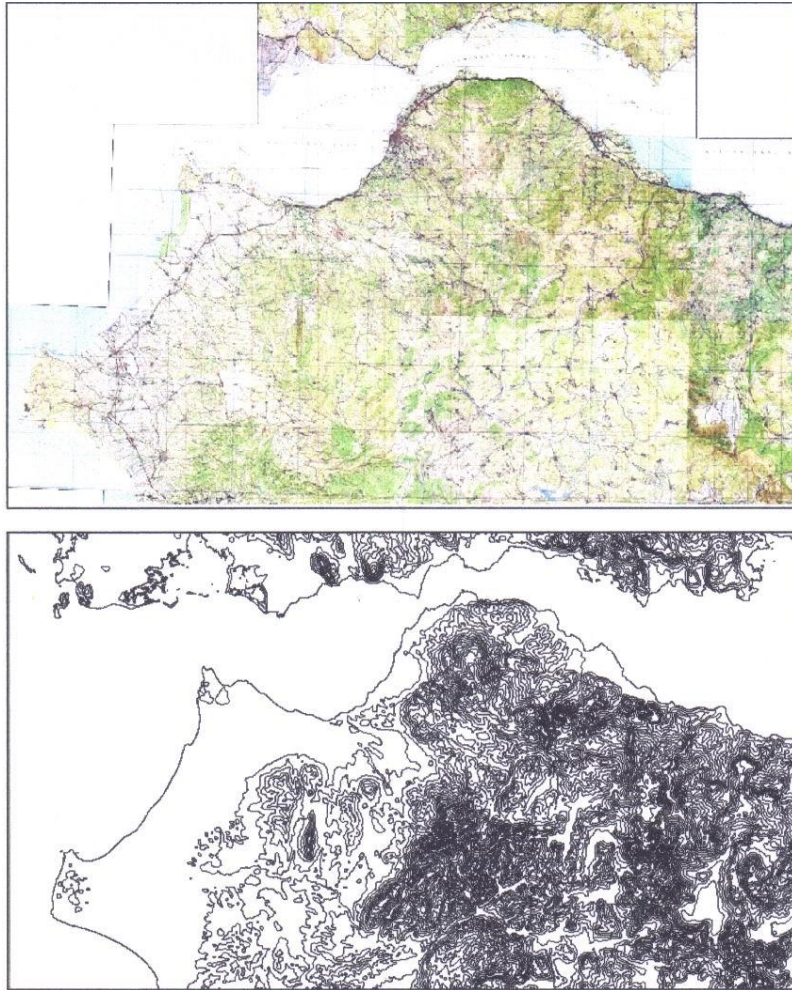
Αυτό έχει σαν συνέπεια οι χάρτες που έχουν γίνει με παραδοσιακές μεθόδους να προσφέρουν μια γενική εικόνα του αναγλύφου της περιοχής μελέτης και τίποτα παραπάνω. Επιπλέον δευτερογενή στοιχεία όπως η κλίση και η καμπυλότητα που καθορίζουν την ταχύτητα και τον τρόπο απορροής (συγκλίνουσα ή αποκλίνουσα απορροή) δε είναι δυνατόν να προσδιοριστούν αξιόπιστα και να αποτελέσουν την βάση για συγκρητικές μελέτες.



Σχήμα 2. Ψηφιακές ισοϋψείς καμπύλες του Ελληνικού Χώρου

Η πρώτη προσπάθεια για την σύνθεση υψομετρικών δεδομένων έγινε με την ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών από τους τοπογραφικούς χάρτες (σχήμα 2). Κατά αυτό το τρόπο έγινε η σύνθεση του πρώτου ψηφιακού χάρτη της Ελλάδας από την γεωγραφική υπηρεσία στρατού. (Γ.Υ.Σ.). Δηλαδή, ψηφιοποιήθηκαν οι ισοϋψείς καμπύλες με ισοδιάσταση 20 μέτρα. Στην προσπάθεια αυτή δεν χρησιμοποιήθηκαν οι τοπογραφικοί χάρτες κλίμακας 1: 50.000, αλλά οι χάρτες κλίμακας 1: 5.000 προκειμένου η αποτύπωση (ψηφιοποίηση) των ισοϋψών καμπυλών να γίνει με μεγαλύτερη οριζοντιογραφική ακρίβεια.

Ήδη αρκετές έννοιες που δεν έχουμε ορίσει μπήκαν στο λεξιλόγιό μας!! Θα τα δούμε όλα αυτά στο μάθημα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών¹. Ακολουθεί τμήμα τοπογραφικού χάρτη και οι αντίστοιχες ψηφιακές ισοϋψείς καμπύλες (σχήμα 3)



Σχήμα 3. Επάνω μωσαϊκό από τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000 (προϋποθέτει ψηφιοποίηση με σάρωση, γεωαναφορά και ένωση των χαρτών). Κάτω οι αντίστοιχες ψηφιακές ισούψεις καμπύλες.

Στην εποχή μας η τεχνολογία προσφέρει νέες τεχνικές προσδιορισμού της υψομετρικής πληροφορίας όπως ενεργητικά τηλεσκοπικά συστήματα (Μικροκυματική Τηλεσκόπηση → SRTM, αυτοματοποιημένη σύνθεση ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων εδάφους από εικόνας στο εγγύς υπέρυθρο → ASTER). Αυτά είναι αντικείμενο ενός άλλου μαθήματος που λέγεται ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ οι τεχνικές αυτές παρόλο που παρουσιάζουν τα δικά τους προβλήματα είναι πολύ περισσότερο αξιόπιστες σε σχέση με τις παραδοσιακές δηλαδή προδιαγραφές ακριβείας της υψομετρικής αναπαράστασης είναι πολύ καλύτερες ιδιαίτερα σε σχέση με τον προσδιορισμό της κλίσης και της καμπυλότητας.

2. Ψηφιακές Αναπαράστασεις

Η πρώτη ψηφιακή αναπαράσταση που γνωρίσαμε μέχρι τώρα είναι αυτή των ψηφιακών υψομετρικών καμπυλών (κάθε ψηφιακή καμπύλη αποτελείται από σημεία με το ίδιο υψόμετρο ενώ για κάθε σημείο της, ο Η/Υ γνωρίζει τις συντεταγμένες του καθώς και πιο σημείο προηγείται και πιο σημείο έπεται). Το πλεονέκτημα που μας δίνουν οι ψηφιακές ισούψεις καμπύλες είναι ότι έχουμε την ίδια εποπτεία του χώρου με αυτή που μας

παρέχουν οι τοπογραφικοί χάρτες. Από την άλλη πλευρά η επεξεργασία αυτής της αναπαράστασης του υψομέτρου στους Η/Υ δεν είναι εύκολη.

Η πιο συνήθης και εύχρηστη υπολογιστικά αναπαράσταση είναι αυτή ενός τετραγωνικού δικτύου στις κορυφές του οποίου υπάρχει η τιμή του υψομέτρου (σχήμα 4). Αυτή η αναπαράσταση ονομάζεται **ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους (ΨΥΜΕ)**.

1036	1038	1036	1033	1029	1025	1022	1018
1013	1007	1001	1000	1003	1006	1005	1001
992	975	963	955	946	938	931	926
921	918	914	910	904	900	896	889
882	877	872	866	855	843	832	816
1101	1092	1077	1069	1065	1062	1056	1046
1038	1032	1026	1024	1025	1032	1040	1045
1049	1052	1052	1049	1044	1038	1035	1037
1040	1041	1038	1034	1029	1024	1020	1018
1015	1011	1009	1007	1008	1009	1007	1003
995	983	971	957	948	942	936	931
926	921	918	913	907	902	898	893
887	882	876	867	857	847	835	823
1100	1092	1082	1076	1070	1064	1057	1047
1038	1032	1028	1027	1030	1036	1042	1048
1053	1057	1057	1053	1047	1041	1039	1040

Σχήμα 4. Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους (ΨΥΜΕ)

Η μετάβαση (μετατροπή) από ψηφιακές υψομετρικές καμπύλες σε αναπαράσταση ΨΥΜΕ γίνεται πολύ εύκολα στο περιβάλλον ενός συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών³ και θα διδαχθεί στα πλαίσια του μαθήματος ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ. Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου μαθήματος θεωρούμε ότι η διαθεσιμότητα ΨΥΜΕ είναι δεδομένη. Άλλωστε υπάρχουν ΨΥΜΕ για όλη τη γη τα οποία είναι διαθέσιμα δωρεάν από το διαδίκτυο⁴

Το ερώτημα που τίθεται είναι α) πώς αξιολογούμε ένα ΨΥΜΕ και β) πώς μπορούμε να το ερμηνεύσουμε στην οθόνη ενός Η/Υ;

Η αξιολόγησή του γίνεται βάση της οριζοντιογραφικής και υψομετρικής του ακρίβειας όπως περιγράφεται από τον Μηλιαρέση (2003). Η οριζοντιογραφική του ακρίβεια καθορίζει την διάστασή του (απόσταση μεταξύ των κορυφών) που ισούται με το διπλάσιο της οριζοντιογραφικής του ακρίβειας.

Επειδή έχουμε μάθει να επικοινωνούμε με όρους κλίμακας πρέπει να γίνει αντιστοιχία της διάστασης του ΨΥΜΕ στη κλίμακα του τοπογραφικού χάρτη. Εμπειρικά η αντιστοιχία είναι : διάσταση 30 μέτρα → κλίμακα 1: 50.000, διάσταση 50 μέτρα → 1: 100.000, διάσταση 100 μέτρα → 250.000. Αναλυτικά η αντιστοιχία κλίμακας και διάστασης περιγράφεται από τον Μηλιαρέση (2003)

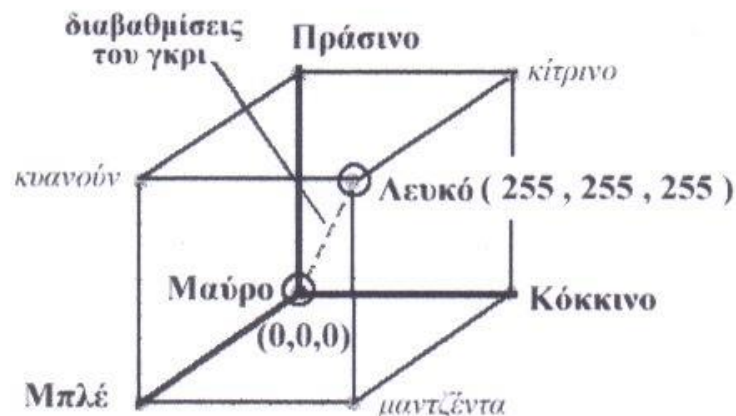
Η υψομετρική ακρίβεια στη συγκεκριμένη περίπτωση (δεδομένα που έχουν προέλθει από ψηφιοποίηση ισοϋψών) είναι ίση με το 1/2 της ισοδιάστασης. Δηλαδή εάν ο τοπογραφικός χάρτης ήταν κλίμακας 1: 50.000 (με ισοδιάσταση 20μέτρα) τότε η υψομετρική ακρίβεια του ΨΥΜΕ είναι +10 μέτρα.

Minimum Value:	0
Maximum Value:	2333
Minimum X:	266088
Maximum X:	358488
Minimum Y:	4182424
Maximum Y:	4248199
Rows:	878
Columns:	1233

Σχήμα 5. Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο Εδάφους (ΨΥΜΕ) Αχαΐας:
Γεωγραφική κάλυψη

Ας υποθέσουμε ότι δίνεται ένα ΨΥΜΕ του νομού ΑΧΑΪΑΣ με διάσταση 75μ. (είναι η απόσταση των κορυφών) το οποίο έχει προέλθει από ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών από χάρτη κλίμακας 1: 50.000 και ζητείται να το απεικονίσουμε στην οθόνη του Η/Υ. Στην προκειμένη περίπτωση οι τιμές του υψομέτρου κυμαίνονται από 0 έως 2,333 μέτρα, ενώ η περιοχή που καλύπτεται από το ΨΥΜΕ αντιστοιχεί σε 878 γραμμές και 1,233 στήλες (Σχήμα 5).

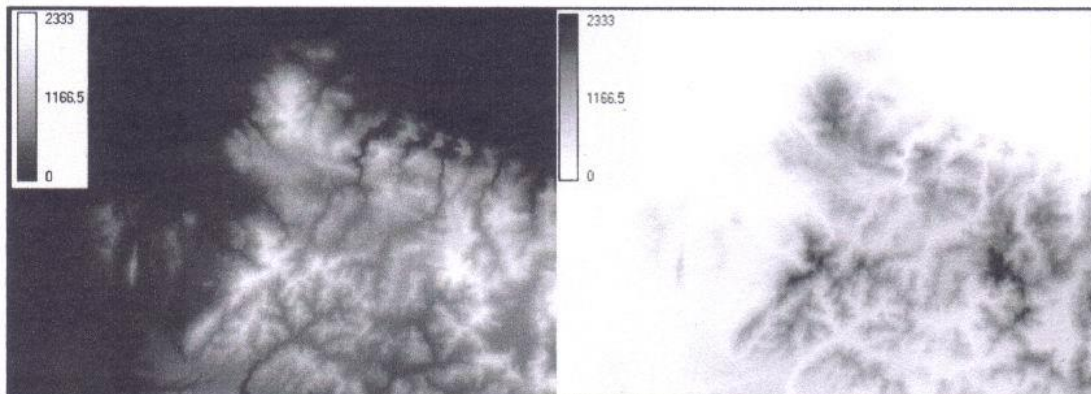
Η οθόνη του Η/Υ δημιουργεί αναλογικές αναπαραστάσεις των ψηφιακών τιμών κάθε εικόνας (είτε πρόκειται για αεροφωτογραφία, είτε για ΨΥΜΕ). Στην πιο απλούστερη περίπτωση γίνεται αντιστοιχία του μαύρου τόνου (0) στην μικρότερη τιμή του υψομέτρου και του λευκού (255) στην μεγαλύτερη τιμή του υψομέτρου. Ας σημειωθεί ότι ο Η/Υ έχει 255 διαβαθμίσεις του γκρι (0→255). Επιπλέον μπορεί να απεικονίζει τα τρία βασικά χρώματα (πράσινο, κόκκινο, μπλέ) με 256 διαβαθμίσεις φωτεινότητας το κάθε ένα. Δηλαδή σε μια οθόνη Η/Υ μπορούμε δυνητικά να δούμε 256^3 χρωματικούς συνδυασμούς (Σχήμα 6). Δυστυχώς η ανθρώπινη όραση είναι περιορισμένη και μπορεί να διακρίνει μόνο 30.000 χρωματικούς συνδυασμούς.



Σχήμα 6. Χρωματικός κύβος

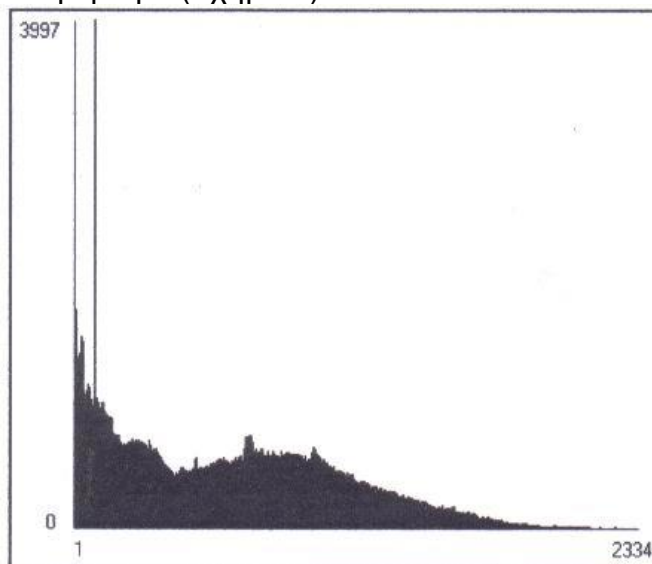
Θα απεικονίσουμε το ΨΥΜΕ της Αχαΐας με διαβαθμίσεις του γκριζου (0→255). Υπάρχουν δυο δυνατότητες ανάλογα με το εάν απεικονισθεί η μικρότερη τιμή υψομέτρου στο μαύρο και η μεγαλύτερη στο λευκό ή το

αντίστροφο (Σχήμα 7). Η αντιστοιχία των τιμών του υψομέτρου με διαβαθμίσεις του γκριζου ή χρώματα στην οθόνη του Η/Υ καθορίζει τον τρόπο απεικόνισης (look up table, palette) και την φωτοερμηνεία του ΨΥΜΕ.



Σχήμα 7. Απεικόνιση ΨΥΜΕ στην οθόνη με διαβαθμίσεις του γκριζου

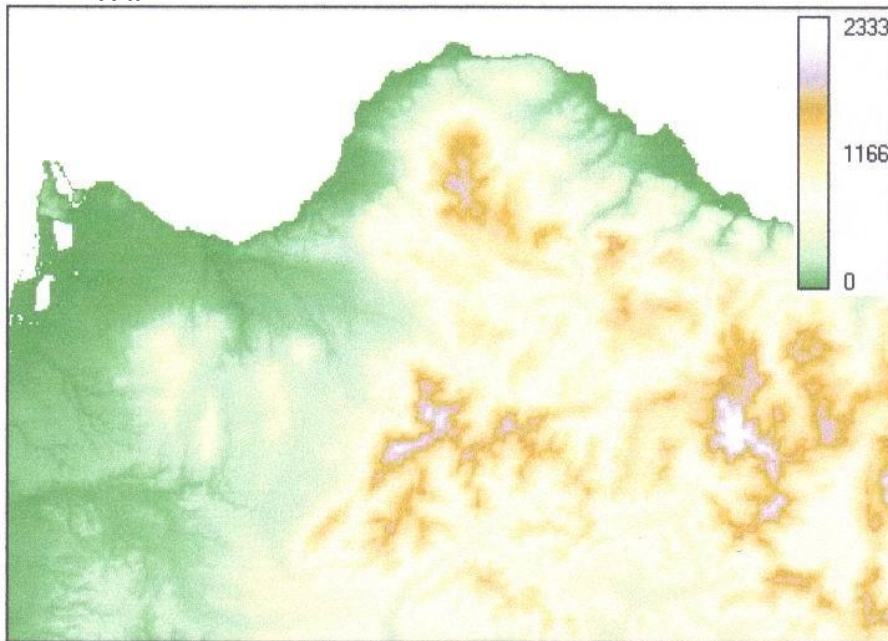
Στο προηγούμενο παράδειγμα είναι πιο εύκολη η φωτοερμηνεία όταν γίνεται αντιστροφή της φωτεινότητας (η μικρότερη τιμή υψομέτρου απεικονίζεται στο λευκό ενώ η μεγαλύτερη στο μαύρο). Αυτό οφείλεται στην κατανομή (συχνότητα) των τιμών του υψομέτρου και στην διαφορική διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου ματιού για διαφορετικής φωτεινότητας φωτογραφικούς τόνους. Πιο συγκεκριμένα η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού δεν είναι ίδια στις φωτεινές περιοχές σε σχέση με τις περιοχές της εικόνας ή τα εικονοστοιχεία που απεικονίζονται με πιο σκούρες διαβαθμίσεις του γκρι. Στις φωτεινότερες περιοχές μπορούμε να διακρίνουμε περισσότερες διαβαθμίσεις. Από την άλλη πλευρά η συχνότητα του υψομέτρου μειώνεται όσο αυξάνεται το υψόμετρο (Σχήμα 8).



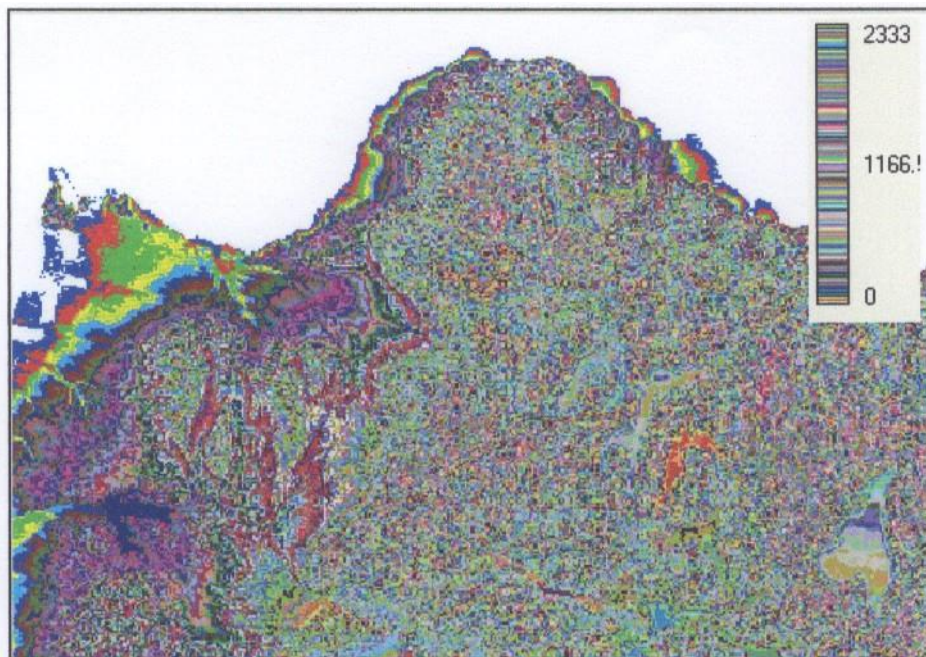
Σχήμα 8. Ιστόγραμμα συχνότητας για το υψόμετρο (ΨΥΜΕ Αχαΐας)

Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό (σε έκταση) της εικόνας θα απεικονιστεί με σκούρους φωτογραφικούς τόνους (δηλαδή με τόνους στους οποίους έχουμε μειωμένη διακριτική ικανότητα). Άρα εάν αντιστρέψουμε την φωτεινότητα τότε η μεγαλύτερη περιοχή σε έκταση θα απεικονισθεί με λευκούς τόνους (στους οποίους μπορούμε να διακρίνουμε ευκολότερα τόνους

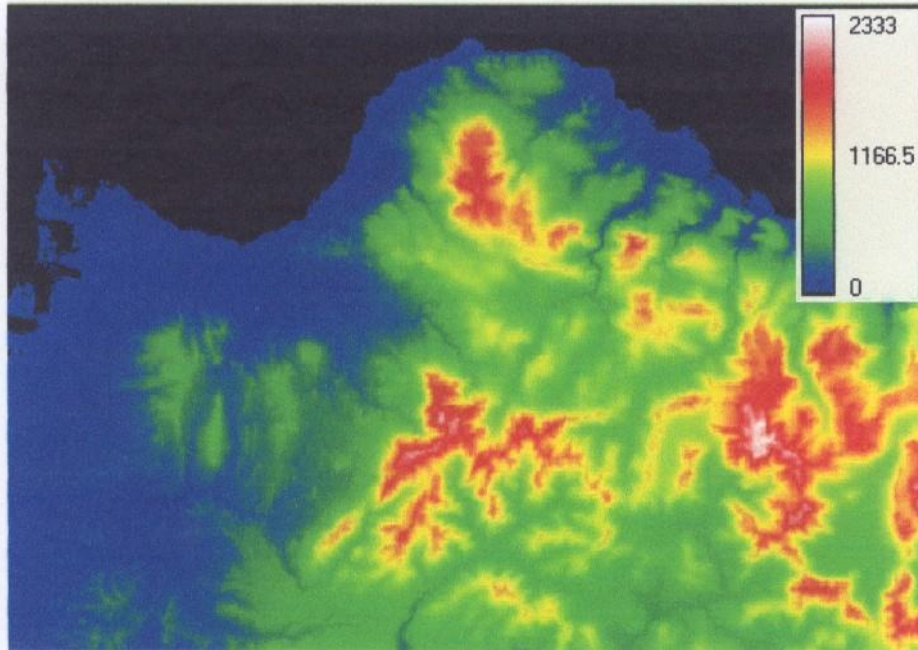
που έχουν παραπλήσια τιμή φωτεινότητας). Μερικά ακόμη παραδείγματα δίνονται στα σχήματα 9, 10 και 11.



Σχήμα 9. Απεικόνιση ΨΥΜΕ με το έγχρωμο LUT/palette ATLAS RELIEF



Σχήμα 10. Απεικόνιση ΨΥΜΕ με το έγχρωμο LUT/palette ATLAS RELIEF

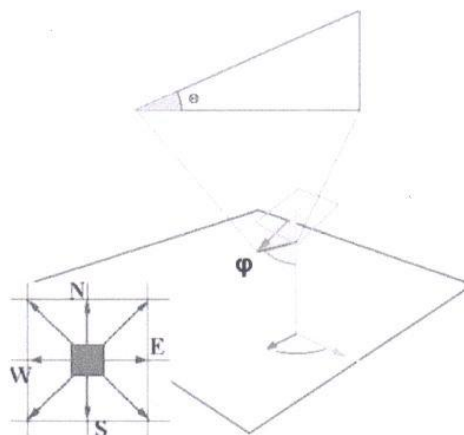


Σχήμα 10. Απεικόνιση ΨΥΜΕ με το έγχρωμο LUT/palette ATLAS RELIEF

Παρατηρούμε ότι στο Σχήμα 10 έχουμε επανάληψη του ίδιου χρώματος για διαφορετικές τιμές υψομέτρου (χρήσιμο για τον εντοπισμό μικρών διαφορών του υψομέτρου σε κορυφές του ΨΥΜΕ που είναι κοντά ή μια στην άλλη). Αντιθέτως στα σχήματα 9 και 10 έχουμε αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ χρώματος και υψομέτρου που οδηγεί σε καλύτερη φωτοερμηνεία των φυσιογραφικών ενοτήτων.

3.Γεωμορφομετρία

Η υψομετρική πληροφορία είναι πολύ χρήσιμη αφού καθορίζει σε ένα βαθμό την ταχύτητα του ανέμου, τις βροχοπτώσεις, το είδος της βλάστησης, τις ζώνες χιονιού κ.α. Από την άλλη πλευρά, η πρώτη (μέτρο και διεύθυνση της κλίσης) και η δεύτερη παράγωγος του υψομέτρου προσδιορίζουν σημαντικές παραμέτρους που συσχετίζονται με την επιφανειακή απορροή.



Σχήμα 11. Μέτρο (θ) και διεύθυνση (φ) του διανύσματος της κλίσης

Παράδειγμα η διεύθυνση (aspect) του διανύσματος της κλίσης (gradient) σε ένα σημείο καθορίζει την διεύθυνση της απορροής, ενώ το μέτρο (slope) της κλίσης συσχετίζεται με την ταχύτητα της επιφανειακής απορροής (Σχήμα 11). Η καμπυλότητα ρυθμίζει το είδος της απορροής συγκλίνουσα / αποκλίνουσα και θα εξετασθεί στο μάθημα ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.

Πως προσδιορίζεται το μέτρο της κλίσης και το διάνυσμα της κλίσης σε ένα τετραγωνικό δίκτυο όπως είναι ένα ΨΥΜΕ; Η πιο απλοϊκή προσέγγιση θεωρεί ένα υποσύνολο διαστάσεων 3*3 σε κάθε σημείο του ΨΥΜΕ. Δηλαδή οι παράμετροι υπολογίζονται σε μια γειτονιά διαστάσεων 3*3. Ο προσδιορισμός γίνεται με τον τελεστή SOBEL.

Έστω η γειτονιά 3*3 γύρω από το Ω προσδιορίζεται με το ακόλουθο σχήμα:

A	B	C
D	Ω	F
G	H	I

Πρώτα προσδιορίζονται οι μερικές παράγωγοι κατά τις διευθύνσεις Δ-Α(dH/dx) και Β-Ν(dH/dy) όπως ακολούθως:

$$dH/dx = (C+2*F+I) - (A+2*D+G) \text{ εξίσωση 1}$$

$$dH/dy = (A+2*B+C) - (G+2*H+I) \text{ εξίσωση 2}$$

Στην συνέχεια προσδιορίζεται, το μέτρο της κλίσης και το διάνυσμα της κλίσης από τις εξισώσεις 3 και 4 αντίστοιχα.

$$slope = \sqrt{\left(\frac{dH}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dH}{dy}\right)^2} \text{ εξ.3} \quad Aspect = \arctan\left(\frac{-\frac{dH}{dy}}{\frac{dH}{dx}}\right) \text{ εξ.4}$$

Το εύρος τιμής του μέτρου της κλίσης είναι 0° έως 90° ενώ η διεύθυνση της κλίσης κυμαίνεται από 0° έως 360° (αζιμούθιο). Πολλές φορές η διεύθυνση της κλίσης τυποποιείται στις 8 γεωγραφικές διευθύνσεις που ορίζονται σε μια πλεγματική εικόνα, όπως φαίνεται παρακάτω:

ΒΔ	Β	ΒΑ
Δ		Α
ΝΔ	Ν	ΝΑ

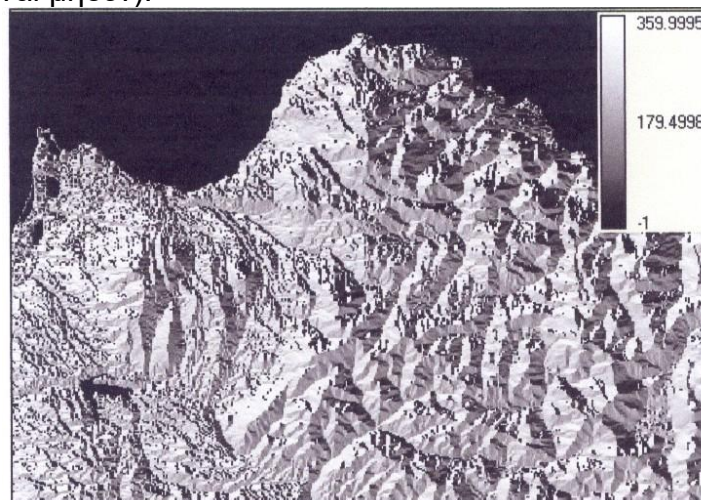
Περισσότερες πληροφορίες και εναλλακτικοί μέθοδοι προσδιορισμού (με πολυώνυμα, κ.α.) θα δοθούν στο μάθημα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα.

Η απεικόνιση του μέτρου της κλίσης στην οθόνη του Η/Υ γίνεται συνήθως με αντιστροφή της φωτεινότητας (Σχήμα 12) (όσο μικρότερο είναι το μέτρο της κλίσης τόσο πιο λευκός είναι ο φωτογραφικός τόνος).

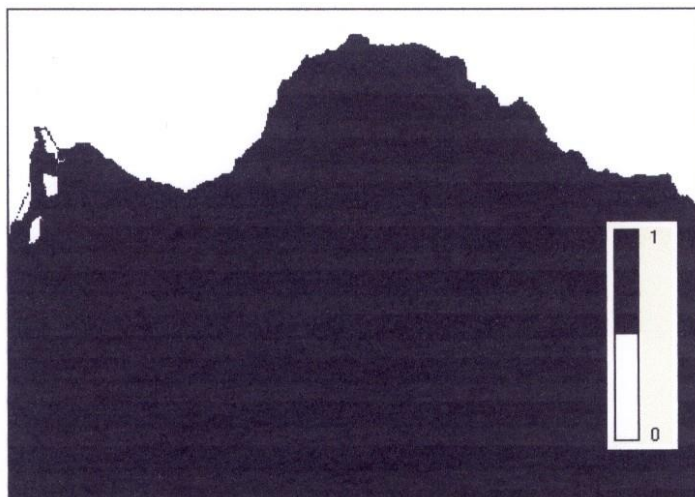


Σχήμα 12. Μέτρο της κλίσης για το ΨΥΜΕ της Αχαΐας

Η φωτοερμηνεία⁶ του μέτρου της κλίσης βοηθάει στον εντοπισμό υδρογραφικών δικτύων I (ιδιαίτερα των κλάδων μεγάλης τάξης), στο εντοπισμό ρηγμάτων εφόσον έχουν τοπογραφική έκφραση, και στον καθορισμό φυσιογραφικών ενοτήτων (πρανή, ορεινοί όγκοι, πεδινές εκτάσεις, κ.α.). Από την άλλη πλευρά εικόνα που αντιστοιχεί στην διεύθυνση της κλίσης βοηθάει στον εντοπισμό ζωνών με ομοιόμορφη διεύθυνση απορροής, στον προσδιορισμό υδροκριτών, στον εντοπισμό των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου 1^{ης} τάξης, (Σχήμα 13) κ.α. Οι αρνητικές τιμές στο Σχήμα 13 υποδηλώνουν σημεία του ΨΥΜΕ στο οποίο το διάνυσμα της κλίσης είναι απροσδιόριστο. Αυτό συμβαίνει όταν όλα τα σημεία σε μια γειτονιά διαστάσεων 3*3 έχουν το ίδιο υψόμετρο (το μέτρο της κλίσης σε αυτή την περίπτωση είναι μηδέν).



Σχήμα 13. Διεύθυνση της κλίσης για το ΨΥΜΕ της Αχαΐας



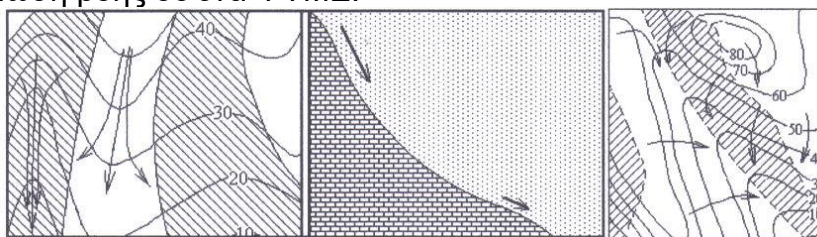
Σχήμα 14. Θαλάσσια ζώνη (λευκός τόνος)

Στο περιβάλλον ενός συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών μπορούν να τεθούν διάφορα χωρικά ερωτήματα. Παράδειγμα : " ποιά σημεία του ΨΥΜΕ έχουν υψόμετρο > 0 " (Σχήμα 14). Αυτό το ερώτημα δημιουργεί μια δυαδική εικόνα, στην οποία ο αριθμός 0 υποδηλώνει σημείο στο οποίο το χωρικό ερώτημα είναι ψευδές (υψόμετρο ≤ 0) ενώ η τιμή 1 υποδηλώνει τα σημεία με υψόμετρο > 0 (το χωρικό ερώτημα είναι αληθές). Στα ΨΥΜΕ κατά σύμβαση όταν ένα σημείο αντιστοιχίσει θάλασσα τότε αριθμητική απεικονίζεται με την υψόμετρο που μπορεί να του αποδοθεί είναι κατά κανόνα ίση 1 μέτρο.

Ποια σύνθετα χωρικά ερωτήματα μπορούν να τεθούν με συνδυασμό δύο ή περισσότερων εικόνων. Παράδειγμα : « ποια σημεία κλίνουν προς ΒΔ, έχουν μέτρο της κλίσης $> 10^\circ$ και είναι σε υψόμετρο από 1000 έως 2000 μέτρα» (περισσότερα παραδείγματα και περιγραφή των τρόπου υλοτόμησης των χωρικών ερωτημάτων στις εργαστηριακές ασκήσεις).

4. Προσομοίωση Ροής

Σε πολλές εφαρμογές της γεωμορφολογίας, της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων αλλά και της υδρολογίας είναι απαραίτητη η προσομοίωση της κίνησης του νερού (Σχήμα 15) σε μια τρισδιάστατη ψηφιακή επιφάνεια (είτε αυτή αντιστοιχεί στην τοπογραφία μιας περιοχής είτε στο φωτογραφικό τόνο που αποτυπώνει κάποιος ψηφιακός πολυφασματικός σαρωτής ενός δορυφορικού συστήματος τηλεπισκόπησης). Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη περιγραφή για το πώς επιτυγχάνεται η προσομοίωση ροής σε ένα ΨΥΜΕ.



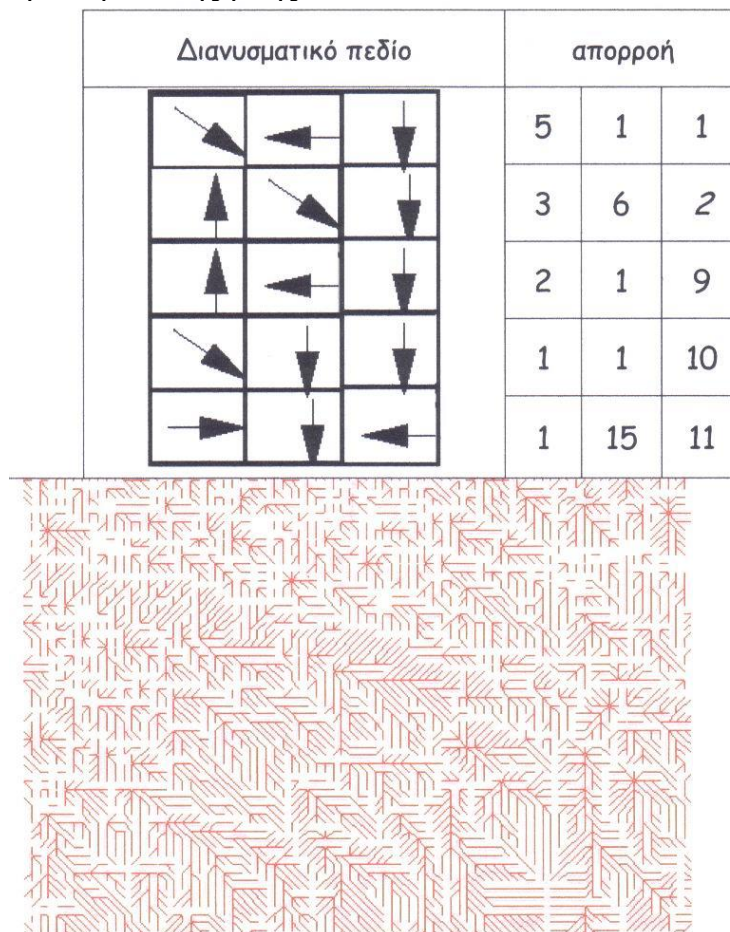
Σχήμα 15. Προσομοίωση ροής (αποκλίνουσα-συγκλίνουσα) σε τοπογραφικό χάρτη.

Με τον προσδιορισμό του διανύσματος της κλίσης έχουμε μια αναπαράσταση του ΨΥΜΕ στην μορφή ενός διανυσματικού πεδίου στο οποίο σε κάθε σημείο αποτυπώνεται ανά διάνυσμα με εύρος τιμών τις 8 γεωγραφικές διευθύνσεις που ορίζονται σε μια πλεγματική αναπαράσταση. Η προσομοίωση ροής βασίζεται σε 2 αρχές που προσδιορίζουν ότι

- A) σε κάθε σημείο του ΨΥΜΕ εισέρχεται μια μόνο σταγόνα νερό
- B) το ταξίδι κάθε σταγόνας γίνεται σύμφωνα με το διάνυσμα της κλίσης

Υποθέτουμε ότι μετρητές είναι εγκατεστημένοι σε κάθε κορυφή του ΨΥΜΕ και καταμετρούν τις σταγόνες που περνούν από κάθε κορυφή. Όταν κάθε σταγόνα ολοκληρώσει το ταξίδι της (φθάσει στα όρια της περιοχής που καλύπτει το ΨΥΜΕ) τότε οι μετρητές έχουν καταγράψει το σύνολο των σταγόνων που διέρχονται από τη κάθε κορυφή. Αυτή η καταγραφή εκφράζει το εμβαδόν της λεκάνης που απορρέει προς κάθε κορυφή του ΨΥΜΕ.

Παράδειγμα προσομοίωσης ροής :

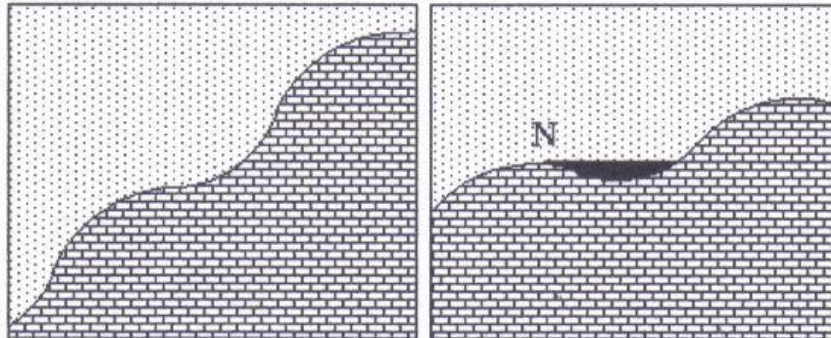


Η διαδικασία δεν είναι ιδανική γιατί πολλές φορές δημιουργούνται παγίδες ροής στο διανυσματικό πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι η ροή παγιδεύεται σε ένα κλειστό μονοπάτι και δεν υπάρχει διέξοδος. Ένα παράδειγμα είναι η παγίδα καθρέπτης :



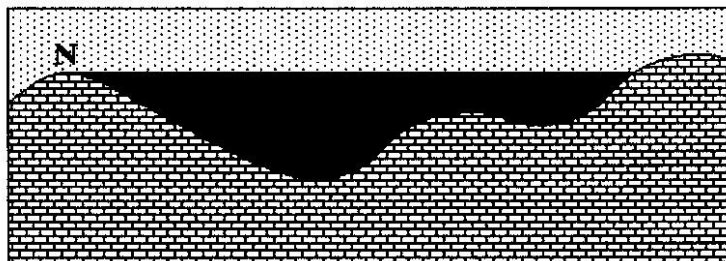
Η ερμηνεία των παγίδων ροής οδηγεί σε γεωμορφές που αντιστοιχούν σε βυθίσματα (καταβόθρες, δολίνες, κ.α.) όπως φαίνεται στο σχήμα 15. Από την άλλη πλευρά παγίδες ροής δημιουργούνται και από μικρά σφάλματα στην τιμή του υψομετρικού ειδικά σε περιοχές με ομοιόμορφο υψόμετρο.

Στην φύση η απορροή συνεχίζεται υπόγεια (εξ-ολοκλήρου ή εν-μέρει). Στο περιβάλλον του Η/Υ δημιουργείται πρόβλημα. Η αντιμετώπισή του γίνεται με μεταβολή των υψομέτρων σε ένα παραλληλόγραμμα που εγγράφει την παγίδα ροής, έτσι ώστε από φυσικής πλευράς να γίνει υπερχείλιση της παγίδας. Δηλαδή δημιουργείται ένα μονοπάτι διαφυγής των σταγόνων που οδηγεί στο σημείο υπερχείλισης.

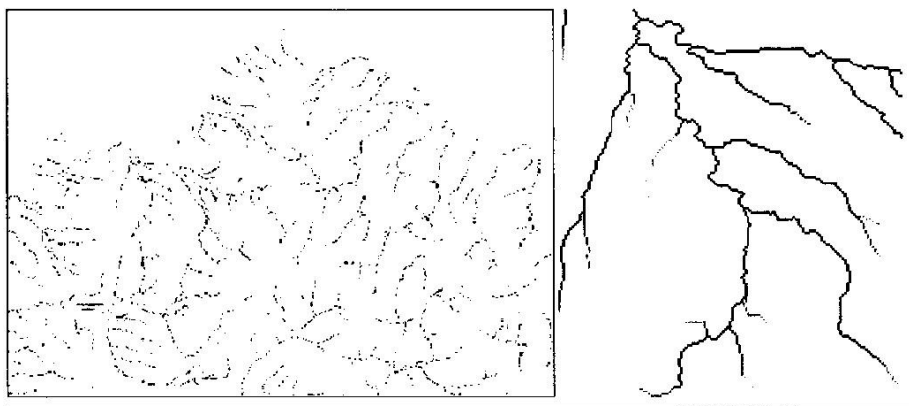


Σχήμα 15. Παγίδα επιφανειακής απορροής

Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει επαναληπτικά ακόμη και διασυνδεδεμένες παγίδες ροής (Σχήμα 16). Η εφαρμογή προσομοίωση ροής στο ΨΥΜΕ του Νόμου Αχαΐας (αφού προηγήθηκε υπερχείλιση των παγίδων ροής) και η εικόνα που αντιστοιχεί στο ψηφιακό αρχείο με τη μέτρηση της απορροής για κάθε σημείο του ΨΥΜΕ δίνεται στο σχήμα 17.



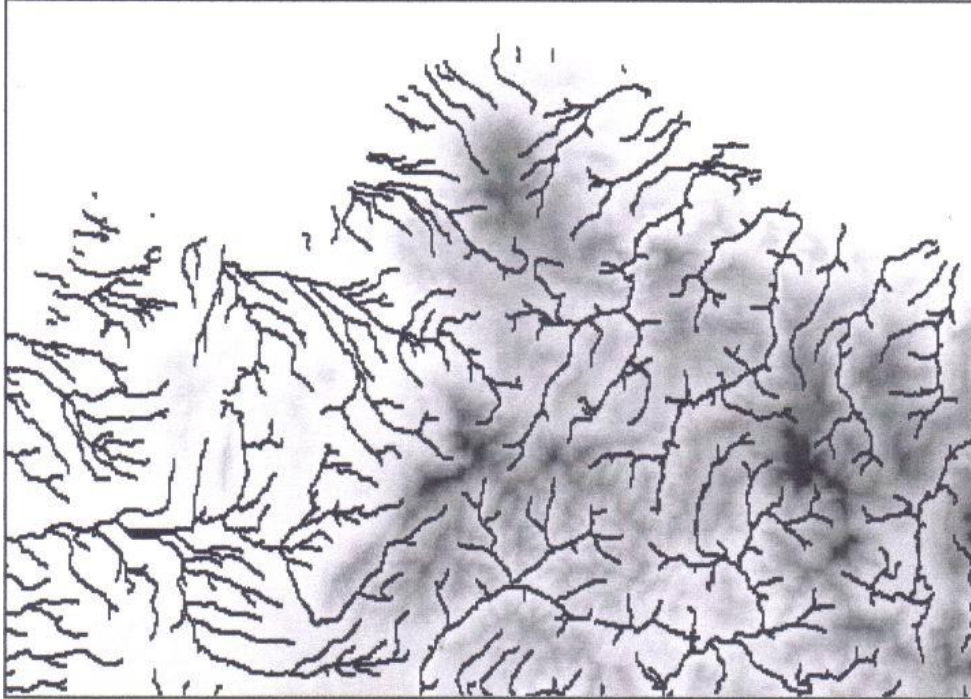
Σχήμα 16. Υπερχείλιση σύνθετης παγίδας απορροής



Σχήμα 17. Απορροή (όσο πιο σκούρο είναι ένα σημείο, τόσο μεγαλύτερη είναι η απορροή).

5. Εντοπισμός του υδρογραφικού δικτύου

Ο εντοπισμός του υδρογραφικού δικτύου γίνεται με βάση το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ροής. Δηλαδή θεωρούμε το ψηφιακό αρχείο της απορροής και υποθέτουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απορροή τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ένα σημείο να ανήκει στο υδρογραφικό δίκτυο.



Σχήμα 18. ΨΥΜΕ και σε υπέρθεση το υδρογραφικό δίκτυο

Στην πράξη αυτό υλοποιείται με την επιλογή μιας τιμής αποκοπής⁹ (threshold) που προσδιορίζει ότι σε ένα σημείο εάν η απορροή είναι η μεγαλύτερη της τιμής αποκοπής τότε αυτό ανήκει στο υδρογραφικό δίκτυο. Κατά αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια δυαδική εικόνα (με 1 συμβολίζονται τα σημεία που ανήκουν στο υδρογραφικό δίκτυο και με 0 τα υπόλοιπα). Στο σχήμα 18 προσδιορίζεται το υδρογραφικό δίκτυο για τιμή αποκοπής ίση με 50.000 σταγόνες.

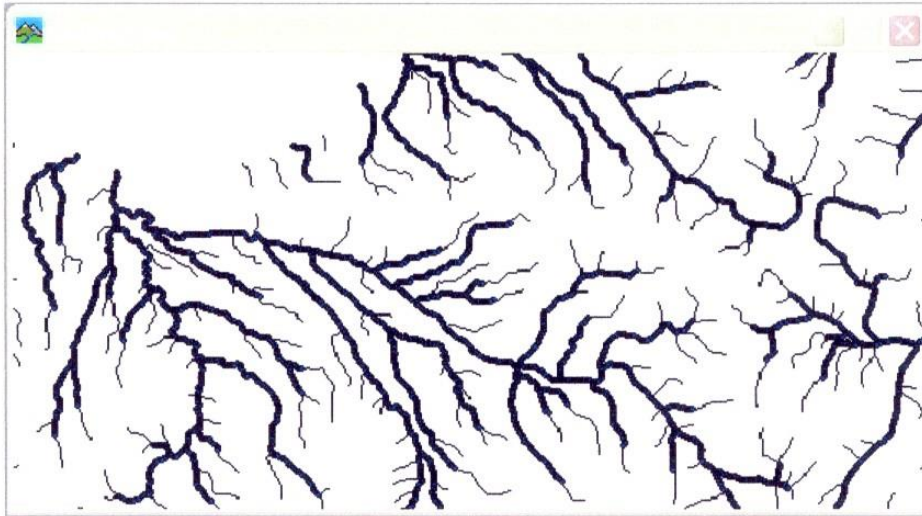
Το ερώτημα που θα θέσει κάποιος είναι τι θα γίνει εάν θεωρηθεί μια μικρότερη τιμή αποκοπής; Σε αυτή την περίπτωση αναμένουμε να αυξηθεί το μήκος των κλάδων πρώτης τάξης ενώ είναι πολύ πιθανόν ή καλύτερα αναμενόμενο να προστεθούν και νέοι κλάδοι πρώτης τάξης.

Παράδειγμα στο σχήμα 19, όπου έχουν καταδειχθεί τα υδρογραφικά δίκτυα για τιμές αποκοπής 50.000 και 100.000. Παρατηρούμε ότι στα ΨΥΜΕ η γενίκευση στο υδρογραφικό δίκτυο εισάγεται κατά την κρίση μας (και τις προδιαγραφές ακρίβειας του ΨΥΜΕ) ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης και όχι κατά ανάγκη από τον τοπογραφικό χάρτη που χρησιμοποιούμε.

Τα βήματα εντοπισμού δικτύου είναι :

- A) προ-επεξεργασία του ΨΥΜΕ έτσι ώστε να γίνει υπερχείλιση των παγίδων ροής
- B) προσομοίωση ροής

Γ) επιλογή τιμής αποκοπής



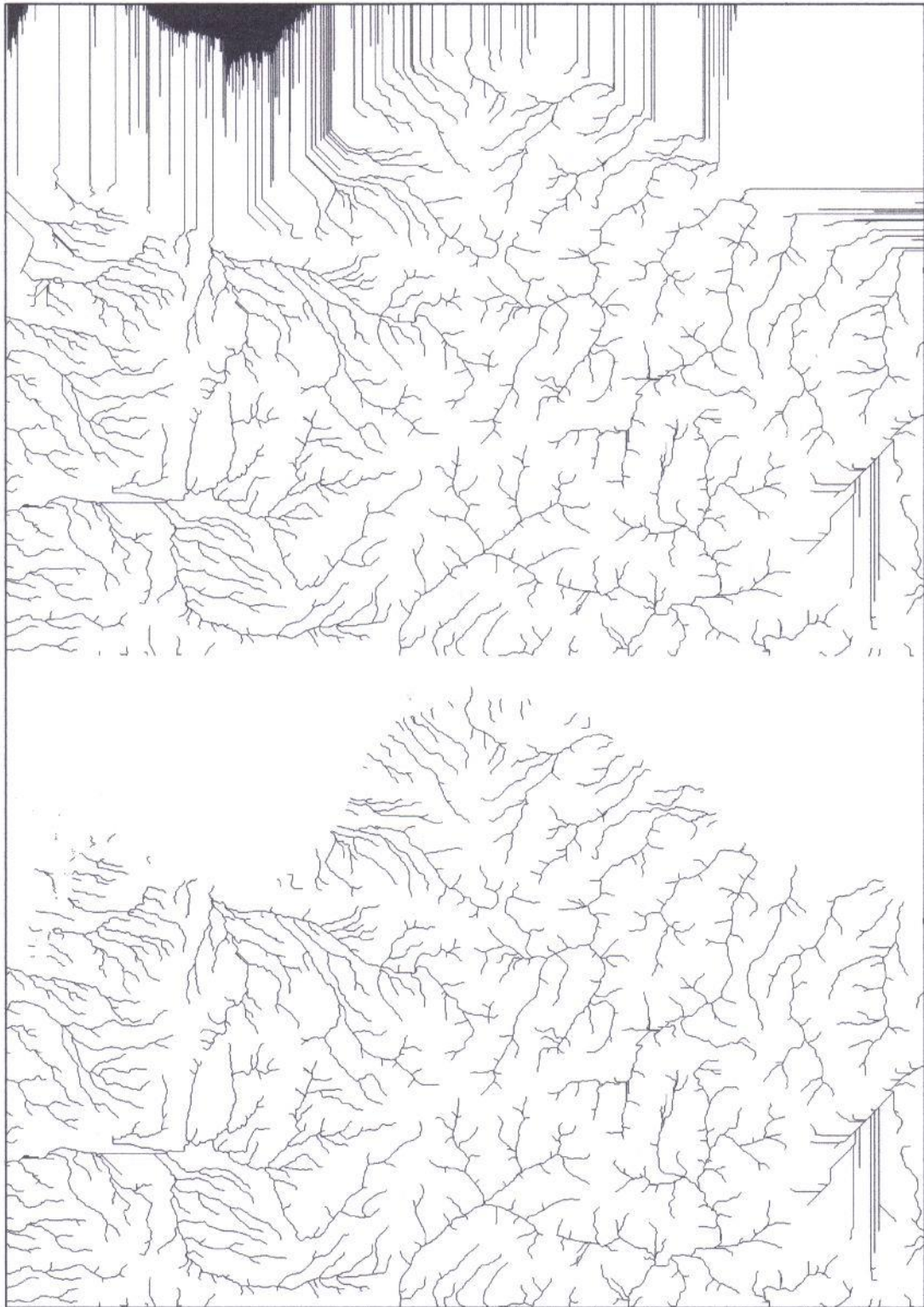
Σχήμα 18. Το δίκτυο με γραμμή μικρότερου πάχους αντιστοιχεί σε τιμή αποκοπής 10000 ενώ το άλλο σε τιμή αποκοπής 50000

Στην πραγματικότητα σε παράκτιες περιοχές πρέπει να εισαχθεί και άλλο ένα βήμα. Η αιτία είναι ότι η θαλάσσια περιοχή θεωρείται από τον αλγόριθμο υπερχείλισης παγίδων ροής σαν ένα τεράστιο βύθισμα.

Αυτό έχει σαν συνέπεια ο αλγόριθμος να προσπαθεί να βρει σημεία υπερχείλισης και να δημιουργεί κλάδους του υδρογραφικού δικτύου μέσα στην θάλασσα (Σχήμα 19), κλάδοι που είναι πλασματικοί.

Αυτό μπορεί να διορθωθεί με τον εντοπισμό της θαλάσσιας περιοχής (Σχήμα 14) με την εφαρμογή λογικής συνθήκης (περιγράφηκε προηγουμένως στο κεφάλαιο 3) και τον πολλαπλασιασμό της δυαδικής εικόνας (Not SEA) με την δυαδική εικόνα του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 19). Για να επιτευχθεί σωστά η αφαίρεση των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 19). Για να επιτευχθεί σωστά η αφαίρεση των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου που έχουν επεκταθεί στην θαλάσσια ζώνη πρέπει στην δυαδική εικόνα Not SEA η τιμή 0 να αντιστοιχεί στην θάλασσα και η τιμή 1 στη ξηρά. Δηλαδή η λογική σχέση που δημιουργεί την εικόνα Not SEA είναι $\text{υψόμετρο} > 0$ ή $\text{υψόμετρο} < 0$ ($<=>$ διάφορο) (και όχι η σχέση $\text{υψόμετρο} = 0$ ή $\text{υψόμετρο} < 1$).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 19 ακόμη και μετά την αντιμετώπιση των προβλημάτων της θαλάσσιας ζώνης, υπάρχει ένα προβληματάκι με τους 3 ευθύγραμμους και παράλληλους κλάδους (κάτω δεξιά ή στο νοτιοανατολικό άκρο της εικόνας 19). Εκεί υπάρχει μια επίπεδη ζώνη στην οποία ο αλγόριθμος δεν ξέρει τι να κάνει και την υπερχειλίζει δημιουργώντας παράλληλους κλάδους όπως στην θάλασσα. Άρα ο αλγόριθμος είναι προβληματικός στις επίπεδες ζώνες σε μεγάλη έκταση. Από την άλλη πλευρά σε αυτές τις ζώνες η κλίση είναι ίση ή πλησιάζει την τιμή 0° και άρα μπορούν να εντοπισθούν και να αποκλειστούν από την επεξεργασία με τον ίδιο τρόπο που αντιμετωπίσθηκε η θαλάσσια ζώνη.



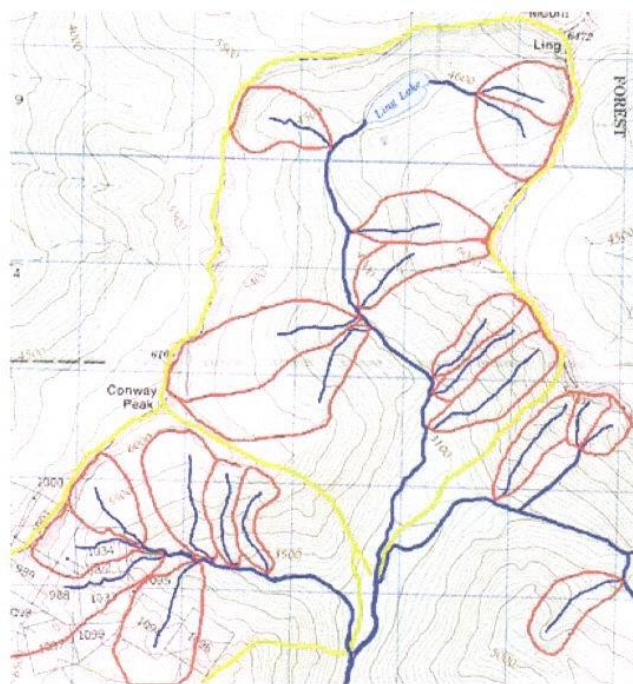
Σχήμα 19. Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο με τις παρενέργειες του αλγόριθμου υπερχείλισης βυθισμάτων. Στην κάτω εικόνα έγινε αφαίρεση των κλάδων που αντιστοιχούν στην θαλάσσια ζώνη.

6. Εντοπισμός Υδρολογικής Λεκάνης

Υδρολογική λεκάνη σε ένα σημείο ή καλύτερα σε ένα σημείο του υδρογραφικού δικτύου ορίζεται σαν η συνολική επιφάνεια που αποστραγγίζεται από το συγκεκριμένο σημείο. Αυτό υπονοεί ότι όλες οι απορροές που δημιουργούνται κατά την διάρκεια μιας βροχόπτωσης πρέπει υποχρεωτικά να διέρθουν από το συγκεκριμένο σημείο. Δηλαδή η υδρολογική λεκάνη ορίζεται πρακτικά για κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας. Ο ορισμός της εξυπηρετεί τον σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου. Τέτοια παραδείγματα είναι ο σχεδιασμός λιμνοδεξαμενών, η διευθέτηση χειμάρρων, η χωροθέτηση οικισμών (εκτίμηση της απορροής σε συνδυασμό με ακραία καιρικά φαινόμενα).

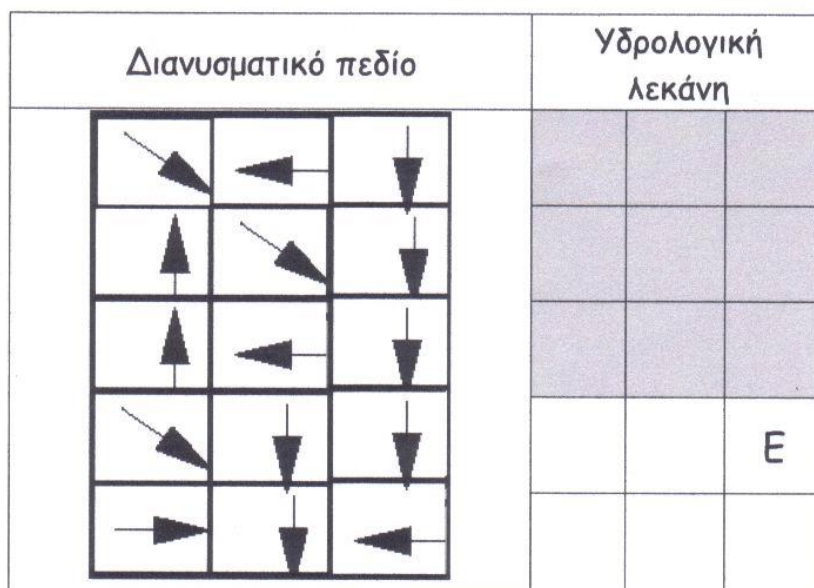
Από την άλλη πλευρά η υδρολογική λεκάνη που μελετάμε για τις ανάγκες ενός τεχνικού έργου ανήκει-είναι ένα υποσύνολο μιας υδρογραφικής λεκάνης. Οι υδρογραφικές λεκάνες ορίζονται από τους υδροκρίτες σε συνδυασμό με το υδρογραφικό δίκτυο μιας περιοχής (Σχήμα 20).

Το όριο της υδρογραφικής λεκάνης καθορίζεται πάντα από τους υδροκρίτες, με μόνη εξαίρεση το σημείο εκβολής της λεκάνης που είναι σημείο στο οποίο διασταυρώνονται σχεδόν κατά κανόνα δύο κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου. Στα σημεία εκβολής τέμνεται το δίκτυο υδροκρίτων με το υδρογραφικό δίκτυο.



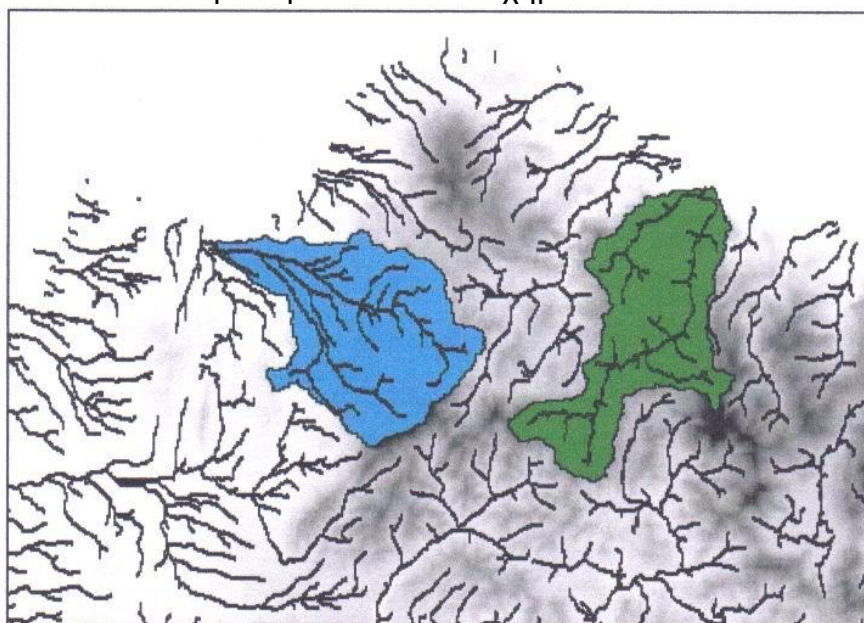
Σχήμα 20. Υδρογραφικές Λεκάνες

Σε αυτές τις σημειώσεις το ενδιαφέρον μας θα περιορισθεί στις υδρολογικές λεκάνες δηλαδή στις λεκάνες απορροής που ορίζονται εάν σαν σημείο εκβολής θεωρηθεί ένα συγκεκριμένο σημείο της γήινης επιφάνειας. Πρώτα θα ασχοληθούμε με την οριοθέτηση τους εφόσον έχει προσδιορισθεί το σημείο εκβολής της στο οποίο θα υλοποιηθεί ένα τεχνικό έργο ή θα γίνει μια μελέτη. Ο προσδιορισμός στο περιβάλλον του Η/Υ γίνεται βάση του ορισμού της υδρογραφικής λεκάνης. Δηλαδή χαρτογραφείται κάθε σημείο με απορροή προς το σημείο εκβολής όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 21):



Σχήμα 21. Εάν σαν σημείο εκβολής θεωρηθεί το σημείο E, τότε η υδρολογική λεκάνη περιλαμβάνει τα σκούρα σημεία + το σημείο E

Παράδειγμα: έστω ότι ορίζοντα δύο σημεία εκβολής με συντεταγμένες α) $\chi=288,269$, $y=4,223,102$ και β) $\chi=340,277$, $y=4,229,320$, τότε οι υδρολογικές λεκάνες που εντοπίστηκαν φαίνονται στο Σχήμα 22.



Σχήμα 22. Εντοπισμός υδρολογικών λεκανών στο Νομό Αχαΐας

Παρατηρούμε ότι επειδή τα σημεία απορροής συμπίπτουν με σημεία τομής δύο κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, οι υδρολογικές λεκάνες συμπίπτουν με τις υδρογραφικές λεκάνες.

7. Μορφομετρική Ανάλυση Λεκανών

Η μορφομετρία¹⁰ μιας λεκάνης (υδρολογικής ή υδρογραφικής λεκάνης) προσδιορίζει χρήσιμες παραμέτρους που συσχετίζονται με την υδρολογική

της ανάλυση (προσδιορισμός της απορροής κ.α.). Οι παράμετροι που προσδιορίζονται σχετίζονται τόσο με το διαδιάστατο σχήμα της λεκάνης όσο και με το ανάγλυφό της. Επιπλέον μια λεκάνη μπορεί να μελετηθεί με βάση τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου που εμπεριέχεται σε αυτή (Εργαστηριακή άσκηση 6).

Οι δείκτες είναι οι ακόλουθοι:

1. **Μέγεθος** (καθορίζει την ποσότητα νερού που δέχεται μια λεκάνη)

Εμβαδόν λεκάνης: καθορίζει δυνητικά την ποσότητα του νερού που δέχεται η λεκάνη και άρα δίνει μια εκτίμηση της ποσότητας του νερού που απορρέει από το σημείο εκβολής της.

Περίμετρος: συσχετίζεται με το μέγεθος αλλά υπεισέρχεται και στον προσδιορισμό του σχήματος της λεκάνης

Μέγιστο μήκος: μέγιστο μήκος (από το σημείο εκβολής προς το πιο απόμακρο σημείο της περιφέρειας της λεκάνης ή παράλληλα προς τον κλάδο μεγαλύτερης τάξης)

2. **Ανάγλυφο** (καθορίζει την ταχύτητα απορροής, την παροχή φερτών υλικών)

Μέσο υψόμετρο λεκάνης συσχετίζεται με το ύψος της βροχής που δέχεται η λεκάνη (όσο αυξάνεται το υψόμετρο τόσο αυξάνεται το ύψος βροχής μέχρι το υψόμετρο των 2500 m όπως θα δούμε στο Β' κύκλο)

Διακύμανση του υψομέτρου

Μέγιστο – Ελάχιστο υψόμετρο (basin relief): συσχετίζεται με την μέση κλίση της λεκάνης αλλά δίνει και μια εκτίμηση για την δυναμική ενέργεια του όγκου νερού που προσπίπτει στην λεκάνη, η οποία στην διάρκεια της απορροής μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια (μεγαλύτερη διακύμανση δυνητικά αυξάνει την παροχή στο σημείο εκβολής της λεκάνης)

Τυπική απόκλιση του υψομέτρου. Συσχετίζεται με την κατά βάθος διάβρωση, και το στάδιο γεωμορφολογικής εξέλιξης

Στάδιο εξέλιξης

Υψομετρικό Ολοκλήρωμα (HI). Το υψομετρικό ολοκλήρωμα (HI) είναι ο δείκτης που συνδέεται με την ταξινόμηση μιας υδρογραφικής λεκάνης σε ένα από τα τρία στάδια (γήρατος, ωριμότητας, νεότητας) γεωμορφολογικής εξέλιξης του Davis. Θα αναρωτηθεί κάποιος γιατί ενδιαφέρει αυτή η ταξινόμηση και ποιά η σχέση της με την υδρολογία; Μας ενδιαφέρει γιατί καθορίζει το ποσοστό της υδροστρωματοροής σε σχέση με την κατευθυνόμενη απορροή κατά μήκος κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Στο στάδιο νεότητας υπερτερεί η κατευθυνόμενη απορροή ενώ στο στάδιο γήρατος η υδροστρωματοροή. Το είδος της απορροής καθορίζει τον βαθμό διεύθυνσης, την υπόγεια απορροή και συνδέεται με το είδος και την ένταση της διάβρωσης και την μεταφορά φερτών υλικών. Ποσοτικά

το υψομετρικό ολοκλήρωμα προσδιορίζεται από την σχέση (Pike & Wilson, 1971)

$$HI = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$$

Όπου H_{mean} → μέσο υψόμετρο της υδρογραφικής λεκάνης

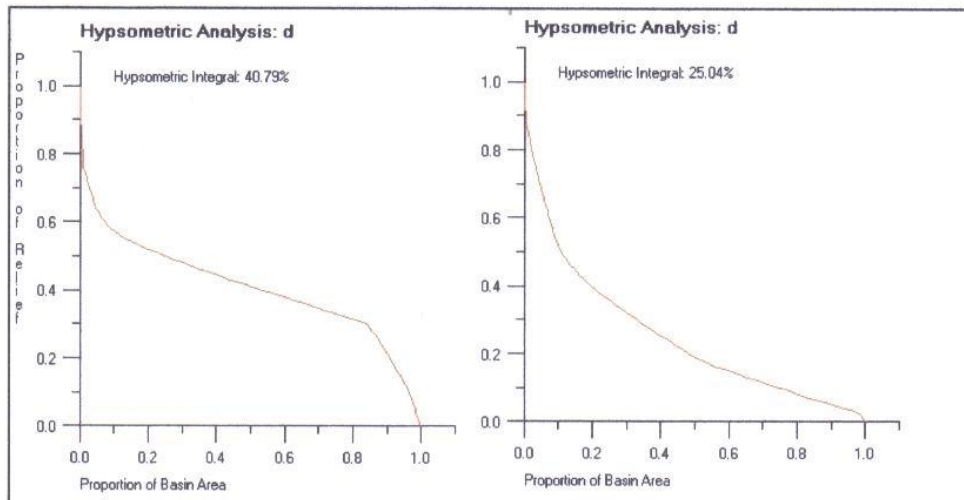
H_{min} → ελάχιστο υψόμετρο

H_{max} → μέγιστο υψόμετρο

Εάν $HI < 0.35$ → στάδιο ξηρότητας

Εάν $0,35 < HI < 0,6$ → στάδιο ωριμότητας

Εάν $HI > 0,6$ → στάδιο νεότητας



Σχήμα 23. Σύγκριση δύο λεκανών με βάση την υψομετρική καμπύλη

Εναλλακτικά το HI μπορεί να προσδιορισθεί από την υψομετρική καμπύλη σαν το εμβαδόν της περιοχής που περικλείεται από τον άξονα των τετμημένων (X) των τεταγμένων (Y) και την υψομετρική καμπύλη, εφόσον το πεδίο ορισμού και το πεδίο τιμών έχουν τυποποιηθεί στο διάστημα [0,1]. Δηλαδή το HI ισούται με το ορισμένο ολοκλήρωμα στο πεδίο ορισμού της ποσοστιαίας υψομετρικής καμπύλης. Η υψομετρική καμπύλη δείχνει το ποσοστό της επιφάνειας από ένα υψόμετρο και πάνω (το εμβαδόν αντιστοιχεί στον άξονα των X ενώ το υψόμετρο στον άξονα των Y).

Στο σχήμα 23 παρατηρούμε ότι οι 2 λεκάνες είναι σε διαφορετικό στάδιο διάβρωσης. Επιπλέον από το σχήμα της υψομετρικής καμπύλης (προσοχή είναι ποσοστιαία) προκύπτει ότι στην μια υπάρχει περισσότερο ποσοστό του εδάφους σε μεγαλύτερο σχετικό υψόμετρο από την άλλη. Αυτό σημαίνει ότι η δυναμική ενέργεια της προσπίπτουσας βροχόπτωσης θα είναι αυξημένη, άρα δυνητικά θα παρατηρηθεί μεγαλύτερη παροχή στο σημείο εκβολής της λεκάνης.

2.3.1. Συντελεστής κατανομής (Ruggedness number) = ανάγλυφο της λεκάνης (basin relief)*υδρογραφική πυκνότητα (drainage density). Συσχετίζεται με το υψομετρικό ολοκλήρωμα και αποτελεί δείκτη της κατά βάθος διάβρωσης.

2.3.2. Όγκος λεκάνης προς εμβαδόν. Είναι μέτρο της κατάτμησης που έχει υποστεί η λεκάνη.

2.4. Κλίση

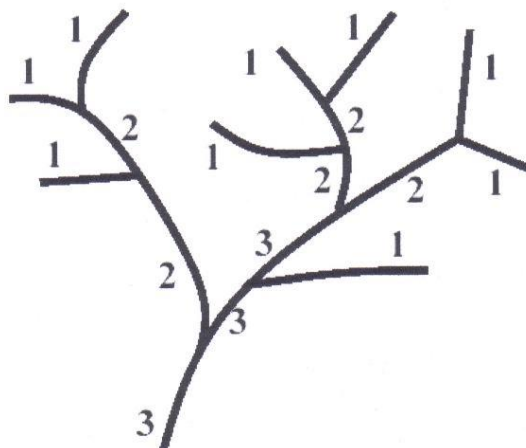
2.4.1. Μέση κλίση λεκάνης. Δίνει μια εκτίμηση για την ταχύτητα απορροής, για την διαβρωτική ικανότητα και την ικανότητα του νερού να μεταφέρει φερτές ύλες.

2.4.2. Λόγος αναγλύφου (Relief ratio) → είναι ο λόγος του αναγλύφου της λεκάνης προς το μέγιστο μήκος παράλληλα προς το κύριο ποτάμι (basin relief/L). Είναι μια εκτίμηση της μέσης κλίσης, εάν η λεκάνη θεωρηθεί σαν ένα επίπεδο που κλίνει ομοιόμορφα και παράλληλα προς το κύριο ποτάμι.

3. Ανάλυση του Υδρογραφικού δικτύου

3.1 Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου

Τα μοντέλα αρίθμησης είναι 4 (Horton, Strahler, Shreve, Scheidegger) όπως έχετε μάθει στις « εξωγενείς διεργασίες». Οι μέθοδοι Shreve, Scheidegger πλεονεκτούν από πλευράς υδρολογίας αφού περιγράφουν με λεπτομέρειες όλο το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης σε σχέση με το μέγεθος της απορροής. Παράδειγμα, μέθοδος Strahler που παρουσιάζει το μειονέκτημα να μην αλλάζει η τάξη μεγέθους ενός τμήματος του δικτύου εάν προστεθεί κλάδος μικρότερης τάξης (Σχήμα 24).



Σχήμα 24. Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler

3.2 Υδρογραφικής πυκνότητας (λόγος του συνολικού μήκους των κλάδων προς το εμβαδόν της λεκάνης απορροής).

Είναι η πιο σημαντική παράμετρος που ενδιαφέρει την υδρολογία. Όταν η πυκνότητα μιας λεκάνης είναι μεγάλη τότε δημιουργούνται πολύ

μεγάλης ταχύτητας απορροές στο σημείο εκβολής της λεκάνης με συνέπεια να αυξάνεται η παροχή, να δημιουργούνται πλημμυρικές αιχμές και να αυξάνει η μεταφερόμενη ποσότητα φερτών υλικών.

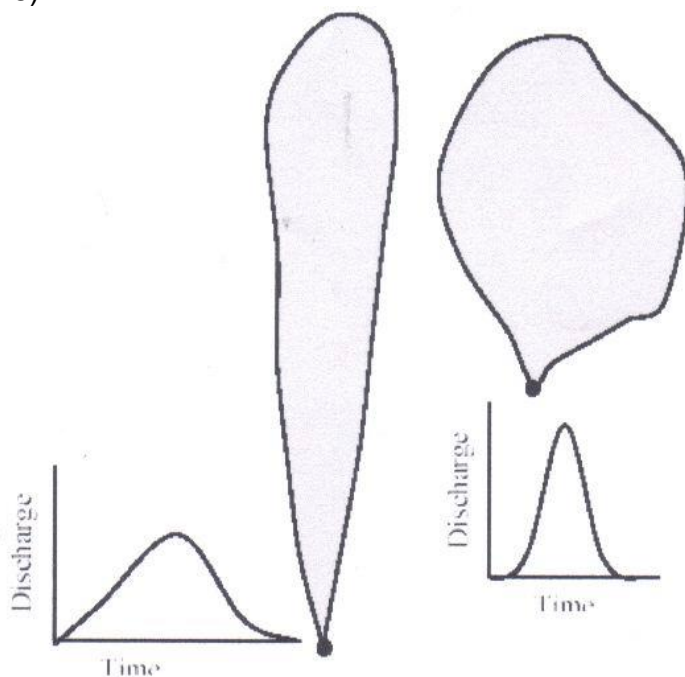
3.3 Υδρογραφική συχνότητα (λόγος του αριθμού των κλάδων προς το εμβαδόν της λεκάνης απορροής).

Πολλοί την θεωρούν μια άλλη έκφραση της πυκνότητας. Το μειονέκτημα είναι ότι εξαρτάται από την τάξη των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου.

3.4 Νόμοι της υδρογραφικής σύνθεσης: (νόμος του αριθμού των κλάδων, νόμος του μήκους των κλάδων, νόμος του εμβαδού των λεκανών απορροής). Ποιο πολλά είτε στο μάθημα « εξωγενείς διεργασίες» είτε στην εισαγωγή.

4. Δείκτες Σχήματος

(A= εμβαδόν λεκάνης, P= περίμετρος, L = μέγιστο μήκος από το σημείο εκβολής προς το πιο απόμακρο σημείο της περιφέρειας της λεκάνης, $\pi = 3.14.15926$)



Σχήμα 24. Επίδραση του σχήματος της λεκάνης στην παροχή

4.1 Επιμήκυνση (elongation): διάμετρος κύκλου ίσης επιφάνειας προς μέγιστο μήκος L

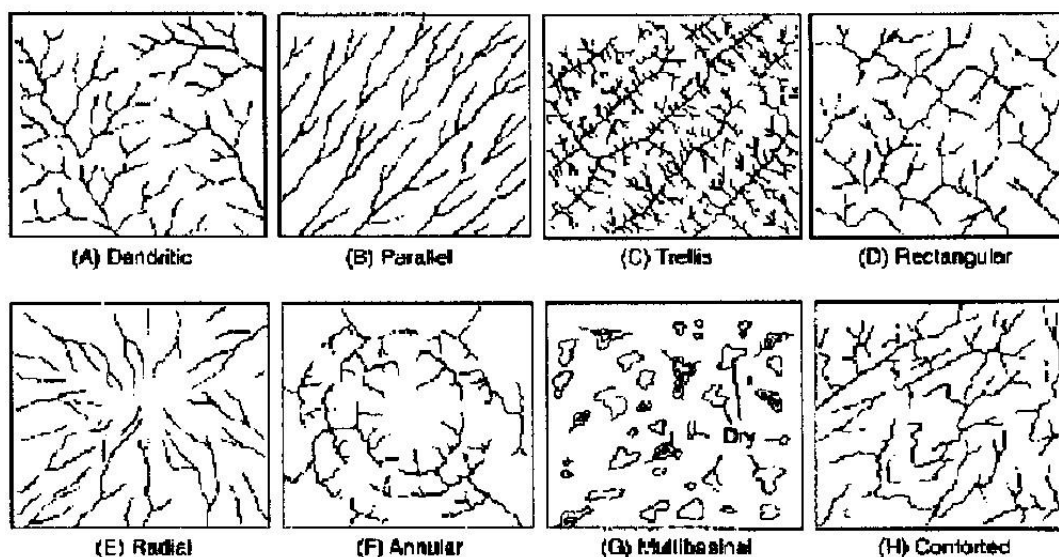
Ισούται με $0.797885 \cdot (\sqrt{A}) / L$

4.2 Δείκτης μορφής (Form factor): εμβαδόν λεκάνης προς μέγιστο μήκος στο τετράγωνο (A/L^2)

4.2 Δείκτης συγκέντρωσης (compactness): περίμετρος λεκάνης προς την περίμετρο κύκλου ίσης επιφάνειας. Ισούται με $0.28 \cdot P/A$.

4.4 Δείκτης Κυκλικότητας (circularity): Εμβαδόν λεκάνης προς εμβαδόν κύκλου με την ίδια περίμετρο. Ισούται με $4 \cdot \pi \cdot A / P^2$.

5. Πρότυπο του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 26): συσχετίζεται με την λιθολογία, την τεκτονική, την υπόγεια απορροή, κ.α. Περισσότερες λεπτομέρειες στην εισαγωγή.



Σχήμα 26. Πρότυπο του υδρογραφικού δικτύου

Η παραμετρική αναπαράσταση των δύο λεκανών του σχήματος 22 δίνεται στον πίνακα:

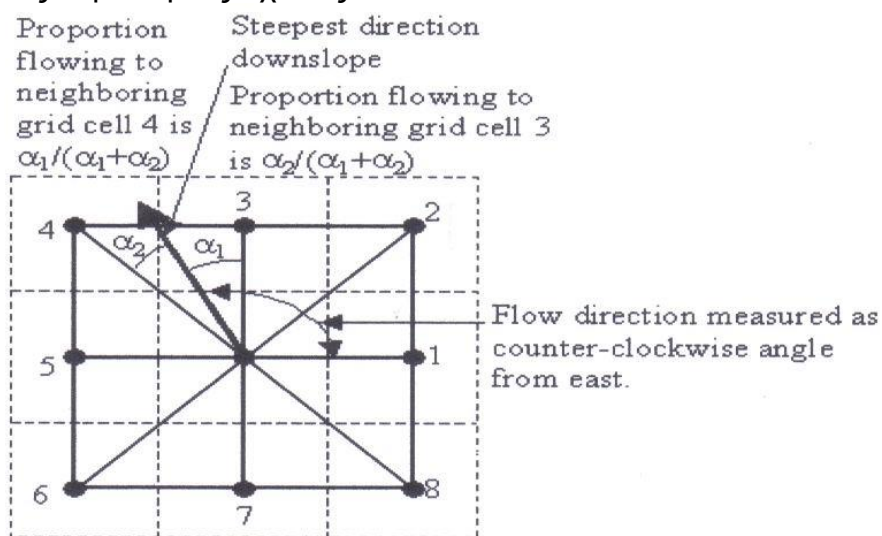
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	Λεκάνη 1	Λεκάνη 2
Εμβαδό (A)	329,083,573	359,500,421
Περίμετρος (P)	140,937	122,355
Μέγιστο μήκος (L)	33,733	30,388
Δείκτης μορφής (Form Factor)	0.289	0.389
Επιμήκυνση (Elongation)	180,514	190,347
Κυκλικότητα (Circularity)	0.208	0.302
Επιμήκυνση (Elongation)	0.607	0.704
Δείκτης ανάγλυφου (Relief Ratio)	0.265	0.189

8. Δείκτες Διάβρωσης Εδαφών

Μέχρι τώρα έχουμε εντοπίσει λεκάνες και τις έχουμε αναπαραστήσει παραμετρικά βάση της μορφομετρίας τους. Το θέμα όμως είναι να τα δούμε όλα αυτά στο πλαίσιο της υδρολογίας και όχι της γεωμορφολογίας – γεωλογίας – ψηφιακής ανάλυση εικόνας – γεωμορφομετρίας – ηλεκτρονικών υπολογιστών. Βέβαια μπορεί κάποιος να υποθέσει ότι υπάρχει το βασικό επίπεδο γνώσεων που απαιτείται (ιδιαίτερα μετά τις εργαστηριακές ασκήσεις 1,2,3,4 και 6) έτσι ώστε να προχωρήσουμε στην υδρολογική αξιολόγηση των λεκανών.

BΔ	B	BA
Δ	Κεντρικό σημείο	A
NΔ	N	NA

Θα ξεκινήσουμε με ξαναορίζοντας την προσομοίωση ροής (!), στην συνέχεια θα αναφερθούμε σε μερικούς υδρολογικούς δείκτες και θα συνεχίσουμε ενσωματώνοντας τους μορφομετρικούς δείκτες του κεφαλαίου 7 σε εμπειρικές υδρολογικές σχέσεις.



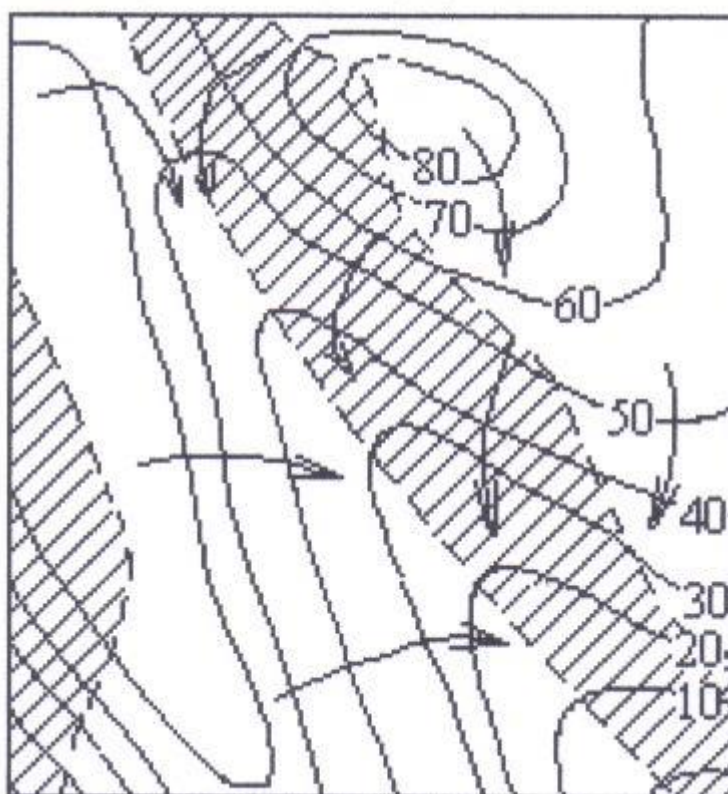
Σχήμα 27. Διασπορά απορροής

Μέχρι τώρα στην προσομοίωση ροής είχαμε θεωρήσει ότι το σύνολο της απορροής (σταγόνες) από το κεντρικό σημείο της γειτονιάς διάστασης (3*3) μεταβαίνει εξ ολοκλήρου σε ένα από τους οκτώ γείτονες (B, N, A, Δ, BA, BΔ, NA, NΔ). Δηλαδή είχε τυποποιηθεί το διάνυσμα της κλίσης σε οκτώ διευθύνσεις και κάναμε την απορροή με βάση τα οκτώ γειτονικά σημεία που ορίζονται σε μια πλεγματική αναπαράσταση.

Στην πραγματικότητα η διεύθυνση της κλίσης λαμβάνει τιμές στο εύρος 0° έως 360° και όχι διακριτές τιμές $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$. Επομένως από θεωρητικής πλευράς σε ένα σημείο, εάν το διάνυσμα της κλίσης είναι 115° τότε ένα μέρος της απορροής πρέπει να κατευθύνεται προς την διεύθυνση 90° και ένα άλλο προς την διεύθυνση 135° (Σχήμα 27). Επιπλέον η απορροή μπορεί από φυσικής πλευράς να διαχυθεί προς περισσότερες διευθύνσεις ανάλογα με τον όγκο νερού (αριθμός σταγόνων) που φθάνει σε ένα σημείο. Το πότε και σε ποία ποσότητα θα γίνει αυτό εξαρτάται από την σχετική θέση του σημείου στο γεωμορφολογικό περιβάλλον (πόσο κοντά στην έξοδο / εκβολή της λεκάνης είναι, πόσο κοντά σε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου μεγάλης τάξης ευρίσκεται ή πόσο μακριά

είναι από τους υδροκρίτες). Επιπλέον η μορφολογία του εδάφους παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην σύγκλιση (Σχήμα 28) ή στην απόκλιση (που λαμβάνει χώρα στους υδροκρίτες – Σχήμα 15) της απορροής.

Επομένως η προσομοίωση ροής που παρουσιάστηκε στην διαδικασία εντοπισμού των υδρογραφικών δικτύων και των λεκανών δεν μπορεί να έχει εφαρμογές στην υδρολογία. Για αυτό και σχεδιάστηκε προσομοίωση ροής στην οποία η μετάβαση της απορροής από σημείο σε σημείο προσεγγίζει περισσότερο την απορροή που λαβαίνει χώρα στο φυσικό περιβάλλον¹³ (δηλαδή θεωρείται η τοπογραφία, η σχετική θέση στο γεωμορφολογικό περιβάλλον και η ποσότητα του νερού που είναι προς μεταφορά από σημείο σε σημείο).



Σχήμα 28. Σύγκλιουσα απορροή

Η επιφανειακή απορροή προσδιορίζει ζώνες διάβρωσης του εδάφους σε μια υδρογραφική λεκάνη. Η διάβρωση σχετίζεται με την τοπογραφία και μια σειρά εδαφολογικών ιδιοτήτων (όπως βάθος του εδαφικού ορίζοντα, σύσταση, κ.α.) αλλά και με άλλους παράγοντες (όπως η βλάστηση κ.α.). Παρόλο που είναι δυνατός ο συνυπολογισμός της επίδρασης του συνόλου των παραμέτρων που σχετίζονται με την διαβρωσιμότητα του εδάφους σε ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών, θα θεωρηθούν μόνο μεταβλητές (WI, RSP, STCI, LS, RUSLE) που συσχετίζουν την επίδραση της απορροής – γεωμορφομετρίας.

8.1.1 Δείκτης υγρασίας {WI} (wetness index)

Ποσοτικά προσδιορίζεται για κάθε σημείο του ΨΥΜΕ από την σχέση των Beven & Kirkby, (1979)¹⁴ και εκτιμά την υγρασία του εδαφικού ορίζοντα:

$$WI = \ln\left(\frac{SCA}{\varepsilon\phi(\beta)}\right)$$

- SCA είναι η απορροή σε ένα σημείο (εκφράζει το σύνολο των σημείων με απορροή που διέρχεται από το προαναφερθέν σημείο) και
- Β το μέτρο της κλίσης στο σημείο αυτό (ln, ο Νεπέρειος λογάριθμος).

Να σημειωθεί ότι η απορροή προσδιορίζεται με προσομοίωση ροής FD8 ή PHO8 ή κατά τον DEMON stream tube algorithm. Από τη σχέση συμπεραίνουμε ότι όσο μειώνεται η κλίση τόσο μεγαλύτερη θα είναι η τιμή του δείκτη WI. Επιπλέον όσο μεγαλύτερη είναι η απορροή (δηλαδή όσο πιο κοντά είναι ένα σημείο στην έξοδο της υδρογραφικής λεκάνης, όσο μεγαλύτερης τάξης είναι ο κλάδος του υδρογραφικού δικτύου που διέρχεται από το σημείο, όσο πιο μακριά είναι από τους υδροκρίτες) τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο δείκτης WI.

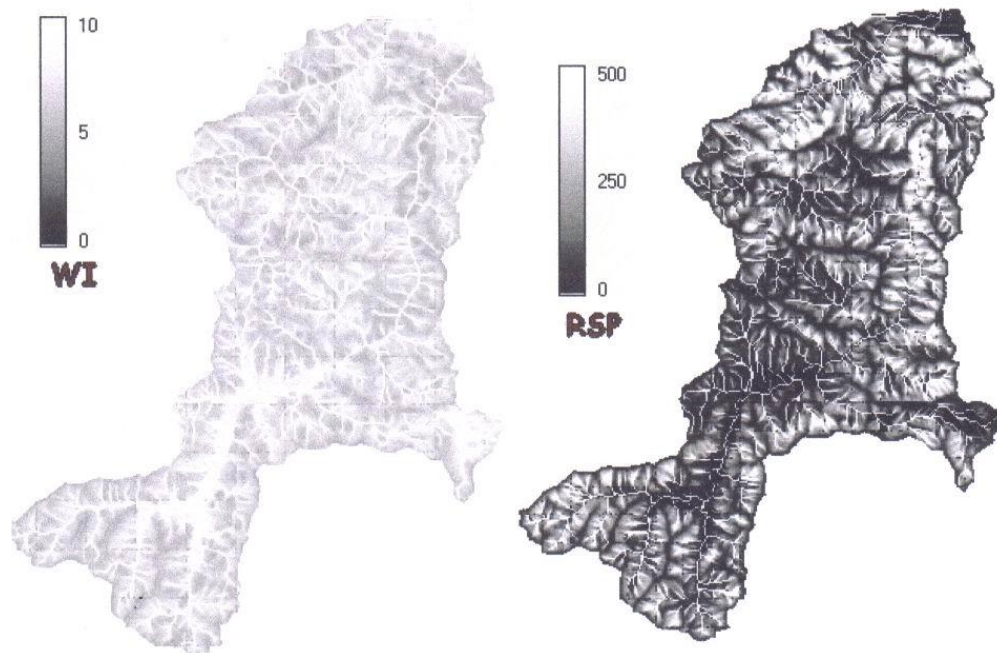
8.1.2. Δείκτης RST (Relative Stream Power)

Εκφράζει τη διαβρωτική ικανότητα του ρέοντος νερού και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$RST = SCA * \varepsilon\phi(\beta)$$

Όπου β και SCA ορίζονται όπως στον δείκτη WI.

Δηλαδή αυξάνεται ο δείκτης όσο αυξάνεται η απορροή και η κλίση. Χρησιμοποιείται σε μέλετες διάβρωσης του εδάφους και προσδιορισμού των φερτών υλικών. Η τιμή των δεικτών WI και RSP για κάθε σημείο μιας υδρολογικής λεκάνης δίνεται στο σχήμα 29.



Σχήμα 29. Δείκτες WI και RSP

Η φωτοερμηνεία του δείκτη WI προσδιορίζει περιοχές στις οποίες μεγιστοποιείται η υγρασία του εδαφικού ορίζοντα σύμφωνα με τα όσα υποθέσαμε από τη μαθηματική σχέση προσδιορισμού.

Από την άλλη πλευρά ο δείκτης RSP προσδιορίζει περιοχές έντονης διάβρωσης κυρίως στο βόρειο τμήμα και σε κλάδους 1^{ης} τάξης. Αυτό υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένοι κλάδοι παρ' ότι παρουσιάζουν μικρή απορροή (αφού είναι 1^{ης} τάξης) έχουν πολύ μεγάλη κλίση (μέτρο).

8.1.3. Δείκτες USLE, RUSLE, L, LS

Για περισσότερο από 40 χρόνια ο δείκτης USLE (Universal Soil Loss Equation) και ο να θεωρημένος δείκτης RUSLE (Revised USLE) χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο σε μικρής κλίμακας μελέτες (Regional Scale) για τον προσδιορισμό της μέσης ετήσιας απώλειας του εδαφικού ορίζοντα για κάθε μονάδα επιφάνειας, σαν συνέπεια τόσο της απορροής κατά μήκος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, όσο και τη υδροστρωματοροής¹⁵. Πρέπει να γίνει σαφές ότι όταν αναφερόμαστε στην απώλεια του εδάφους από μια μονάδα επιφάνειας αυτό δεν σημαίνει ότι η ποσότητα αυτή καταλήγει στη θάλασσα, αφού μπορεί να αποτεθεί εκ νέου σε ζώνες με μικρότερη κλίση. Ο αναθεωρημένος δείκτης RUSLE περιλαμβάνει μεγαλύτερη ποικιλία φυσιογραφικών ζωνών όπως (δασικές εκτάσεις, ζώνες με πούδη βλάστηση, ζώνες μεγάλης κλίσης , και άλλα...) σε αντίθεση με τον δείκτη USLE που είχε εφαρμογή μόνο σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις (Croplands) με πολύ μικρή κλίση.

Στον υπολογισμό του δείκτη RUSLE υπεισέρχεται η τοπογραφία όχι μόνο σαν μέτρο της κλίσης σε ένα σημείο αλλά σαν συνάρτηση ενός πιο σύνθετο τοπογραφικού παράγοντα που ονομάζεται μήκος της κλίσης (Slope Length και συμβολίζεται με το γράμμα L). Ο δείκτης L υποδηλώνει την απόσταση από το σημείο που ξεκινάει η απορροή (υδροστρωματοροή) και καταλήγει στο σημείο που είτε η κλίση αλλάζει ή η ροή μεταβάλλεται από υδροστρωματοροή σε ροή κατά μήκος κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Το σύνολο της επίδρασης της τοπογραφίας στη διάβρωση του εδάφους εκφράζεται με το δείκτη LS που είναι το γινόμενο του δείκτη L επί την κλίση (μέτρο) στο θεωρούμενο σημείο (ο δείκτης). Στο περιβάλλον ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών και εφ' όσον προσδιοριστεί η απορροή με προσομοίωση ροής που λαμβάνει υπ' όψη τις φυσικές διεργασίες, ο δείκτης LS { Length Slope Factor → LS ή εναλλακτικά STCI → Sentiment Transport Capacity Intex } υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$LS = \left(\frac{SCA}{22.13} \right)^{0.6} * \left(\eta \mu \frac{\beta}{0,0896} \right)^{1,3}$$

όπου β και SCA ορίζονται όπως στον δείκτη WI. Εναλλακτικοί τρόποι προσδιορισμού είναι διαθέσιμοι από τον Hickey →

http://www.yogibob.com/slope_ls.pdf και

http://www.yogibob.com/slope/hickey_slope_length.pdf

Ο δείκτης RUSLE (Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας) προσδιορίζεται σαν το γινόμενο 5 παραγόντων σύμφωνα με τη σχέση που ακολουθεί:

$$RUSLE = R * K * C * P * LS$$

Όπου

RUSLE = εδαφική απώλεια (διαφορά της ποσότητας του εδάφους που διαβρώθηκε μείον την ποσότητα που αποτέθηκε ξανά στην ίδια εδαφική έκταση σε δεδομένο χρόνο που είναι συνήθως ένα έτος)

R = δείκτης που εκφράζει την διαβρωτική ικανότητα του κλίματος

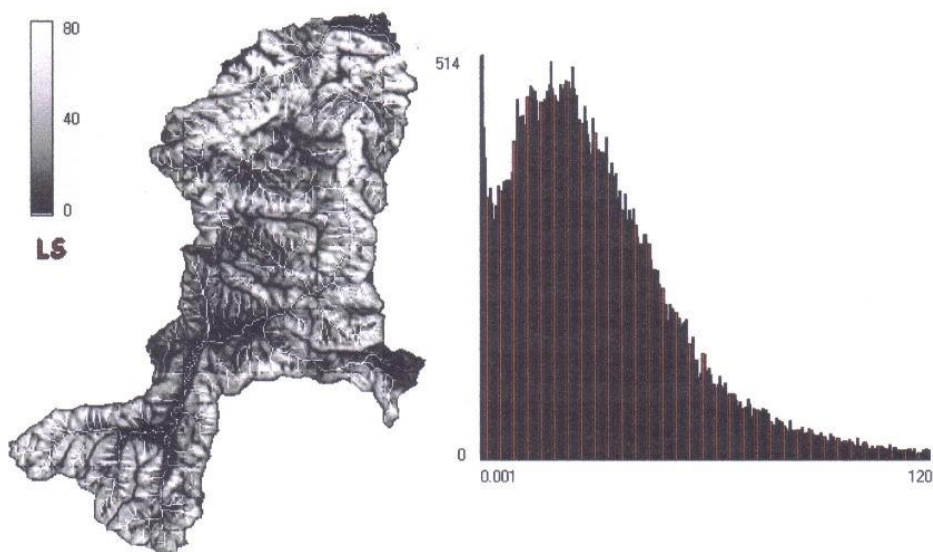
K = δείκτης που εξαρτάται από τον συντελεστή τριβής ενός εδάφους (την μηχανική του σύσταση → ποσοστά σε άργιλο, ιλύ, άμμο)

C = αποτελεί συνάρτηση της κάλυψης γης (κυρίως φυτοκάλυψης)

P = εκφράζει την επίδραση της μικρο-τοπογραφίας σε συνδυασμό με την διάταξη ανθρωπογενών (αρδευτικά κανάλια, γραμμές άρροσης, κ.α.) και φυσικών επιφανειακών στοιχείων που ρυθμίζουν την απορροή (υδροστρωματοροή, ροή κατά κλάδους)

LS = δείκτης που είναι συνάρτηση της γεωμορφομετρίας

Υπορουτίνα για τον προσδιορισμό για τον δείκτη RUSLE (ver. 4, 12/18/2003) δίνεται στη ιστοσελίδα <http://www.yogibob.com/slope /slope.html>



Σχήμα 30. Δείκτης LS

Ο τοπογραφικός δείκτης LS για την υδρολογική λεκάνη δίνεται στο σχήμα 30, μαζί με την συχνότητα τιμών του δείκτη στο υποσύνολο [0,120] του πεδίου ορισμού του.

Βιβλιογραφία

- Μηλιαρέσης Γ. , 2005.** Εφαρμογές Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Σημειώσεις πανεπιστημίου Πατρών
- Μηλιαρέσης Γ. 2003.** Φωτοερμηνεία – Τηλεπισκόπηση. Εκδόσεις ΙΩΝ, Περιστέρι, σελ. 243
- Burrough P. (1986)** Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, New York, 194 p.
- SRTM Documentation, 2004.**
[URL:ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/Documentation/](http://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/Documentation/), U.S. Geological Survey.
- Mather P. (1987).** Computer Processing of Remotely-Sensed Images, John Wiley and Son, New York, 352 p.
- A Bibliography of Terrain Modeling.** http://wrgis.wr.usgs.gov/open-file/of_02-465/
- Εργαστηριακές Ασκήσεις (Γ. Μηλιαρέσης).** <http://miliaresis.tripod.com>
- Jenson, S., & J. Dominique, 1988.** Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 54(11): 1593-1600
- Mark, D.M., 1984.** Automated Detection of Drainage Network from Digital Elevation Models, Cartographica, 21:168-178
- Horton, R.E. 1943.** Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology, Bull. Geol. Soc. Am. Vol. 56.
- Strahler, A.N. 1952.** Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, Bull. Geol. Soc. Am. Vol. 63.
- Pike R. and Wilson S., 1971.** Elevation-Relief Ratio, Hypsometrical Integral, and Geomorphic Area-Altitude Analysis. Geological Society of America Bulletin, vol. 82, 1079-1084.
- Schumm, S.A. 1956.** Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amob, New Jersey, Bull. Geol. Soc. Am., vol 74
- Evans, I., 1980.** An integrated system for terrain analysis and slope mapping. Zeitschrift fuer Geomorphologie N.F. Suppl.- BD., 36, 274-290
- Evans, I., 1981.** General Geomorphometry. In: Geomorphologic Techniques, A. Goudie (Ed.) London, George Allen & Unwin, pp.31-37
- Javis R., 1981.** Specific Geomorphometry. In: Geomorphologic Techniques, A. Goudie (Ed.) London, George Allen & Unwin, pp.42-46
- Argialas, D., J. Lyon , and O. Mintzer (1988).** Quantitative Description and Classification of Drainage Patterns, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54, 505 - 509
- Keller, E., Pinder, N., 1996.** Active tectonics – earthquakes, uplift and landscape. Prentice Hall, New Jersey, 338p.
- Kooi, H., Beaumont, C., 1996.** Large – scale geomorphology: Classical concepts reconciled and integrated with contemporary ideas via a surface process model. Journal of Geophysical Research 101 (B2), 3361 – 3386
- Mark, D., 1975.** Geomorphometric parameters, a review and evaluation. Geographiska Annaler 57A (10), 1461 – 1467.
- Tucker, G., Slingerland, R., 1996.** Predicting sediment flux from and thrust belts. Basin Research 8, 329 – 349.
- Summerfield M. (Ed.), 2000.** Geomorphology and Global Tectonics. John Wiley & Sons, New York, 386p.
- Cogley G., 1985.** Hypsometry of Continents. Zeitschrift f. Geomorphologie N.F. suppl. Bd. 53, 1 – 48.
- Pike R., 1995.** Geomorphometry – process, practice and prospects. Zeitschrift f. Geomorphologie N.F. suppl. Bd. 101, 221 – 238.

- Fairfield J and Leymarie (1994).** Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research* 27: 709-717,2809{PHO8→random eight node }
- Freeman G T (1991).** Calculating catchment area with divergent flow based on regular grid. *Computers and Geosciences* 17: 413 – 22 { FD 8 multiple flow algorithm}
- Quinn, P. K. Beven, P. Chevallier and O. Planchon, (1991).** " The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models", *Hydrological Processes*, 5: 59 – 80 { PHO8 → random eight node}
- Costa-Cadral M C and S J Burges (1994).** Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research* 30: 1681 – 92 { DEMON stream tube algorithm}
- Beven K., Kirkby M., 1979.** A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43 - 69
- Quinn P. F., K. J. Beven and R. Lamb, (1995).** "The $\ln(a/\tan b)$ Index: How to Calculate it and how to use it Within the Topmodel Framework," *Hydrological Processes*, 9:161 – 182
- Moone, I.D. and Wilson, J.P., 1992.** Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simlified method of estimation. *J. Soil and Water. Cons.* 47, 423 – 428
- Remortel R., Maichle R. & Kickey R., 2004.** Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array – based slope processing of digital elevation data using a C++ executable. *Computers & Geosciences*, 30, 1043 – 1053.
- Τσακίρης, Γ., 1995.** *Υδατικοί Πόροι: Τεχνική Υδρολογία.* Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 675 σελ.
- Wilson J., 1986.** Estimating the topographic the factor in universal soil loss equation for watersheds. *Journal of Soil & Water Conservation*, 30 , 27 – 35.
- McCool D., Brown L., Foster G., 1987.** Revised slope steepness factor for the USLE. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30, 1387 – 1396
- Hickey R., 2000.** Slope angle and slope length calculations for GIS. *Cartography* 29, 1 – 8
- Bob's Hickey SLOPE PAGE:** <http://www.yogibob.com/slope/slope.html>

ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

ΣΤΟΧΟΣ: Η εκτίμηση του όγκου του νερού που χάνεται λόγω εξάτμισης , διαπνοής των φυτών.

Περιεχόμενα

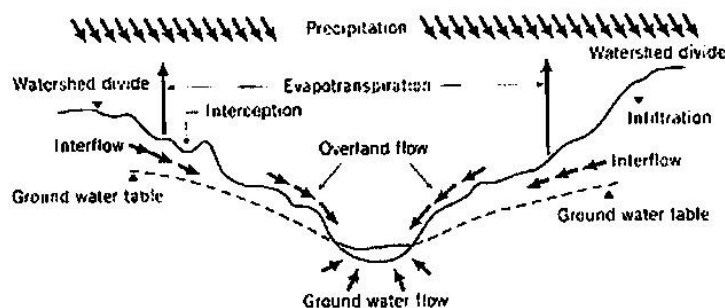
1. Διεργασίες στον υδρολογικό κύκλο
2. Εξάτμιση
3. Διαπνοή
4. Εξατμισοδιαπνοή
Μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου
Μέθοδος Thornthwaite
Μέθοδος Blaney-Criddle
Μέθοδος TURC
Μέθοδος Coutagne
5. Χάρτες κατηγοριοποιήσεων(cluters)

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Να περιγραφούν οι φυσικές διεργασίες στον υδρολογικό κύκλο
2. Ποια η διαφορά της δυναμικής από την ενεργό εξατμισοδιαπνοή; Ποια η ποσοτική διαφορά στην σχέση των παραπάνω ποσοτήτων σε περιοχές με α) ερημικό κλίμα β) με υγρό κλίμα;
3. Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η εξάτμιση και η διαπνοή; Με ποιους τρόπους μπορούν να εκτιμηθούν (μόνο οι αρχές όχι οι τύποι);
4. Δώστε ένα παράδειγμα στο οποίο η εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων (κάτω από συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες) στην ίδια περιοχή θα δώσει δύο εκ διαμέτρου αντίθετες ποσοτικές εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής.
5. Να γίνει ομαδοποίηση των μεθόδων προσδιορισμού της εξατμισοδιαπνοής σε κατηγορίες. Ποια είναι η πιο αξιόπιστη κατά την γνώμη σας μέθοδος;

1. Διεργασίες στον υδρολογικό κύκλο

Στο πρώτο στάδιο της βροχόπτωσης, το νερό που φθάνει στο έδαφος συγκρατείται από τα φύλλα των δένδρων, τα φυτά. Η διεργασία αυτή ονομάζεται **συγκράτηση** (συνήθως συγκράτηση από τα φυτά) και συνιστά μια φυσική διαδικασία που το νερό καλύπτει φυσικές επιφάνειες. Όταν η ικανότητα συγκράτησης (εκφράζεται σε όγκο νερού) ξεπεραστεί από τον όγκο νερού της βροχόπτωσης, τότε σχηματίζεται ένα επιφανειακό στρώμα νερού (surface detention) το οποίο σε πρώτη φάση γεμίζει επιφανειακές κοιλότητες-βυθίσματα. Η φυσική αυτή διεργασία δεσμεύει όγκο νερού της βροχής παρεμποδίζοντας την έναρξη της απορροής και λέγεται **αποθηκευτική ικανότητα βυθισμάτων (depression storage)**. Οι δομές αυτές συσχετίζονται είτε με τη λιθολογία είτε με τις χρήσεις γης (αυλάκια, γραμμές άρσης, κ.α.) Όταν πάλι η αποθηκευτική ικανότητα των βυθισμάτων ξεπεραστεί από τον όγκο του νερού της βροχής, τότε ξεκινάει η απορροή είτε με τη μορφή της υδροστρωματοροής (απορροή κατά στρώσεις) είτε σαν διευθυνόμενη απορροή κατά μήκος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Παράλληλα ένα μέρος του νερού της βροχής διεισδύει στο έδαφος εμπλουτίζοντας τον υδροφόρο ορίζοντα ο οποίος ανάλογα με τις υδρογεωλογικές συνθήκες επαναδιαθέτει (παράδειγμα: διαμέσου πηγών) ένα τμήμα του νερού που λαμβάνει την επιφανειακή απορροή. Επιπλέον κάποιος όγκος νερού φθάνει στην ατμόσφαιρα διαμέσου της διαπνοής των φυτών. (Σχήμα 1.)

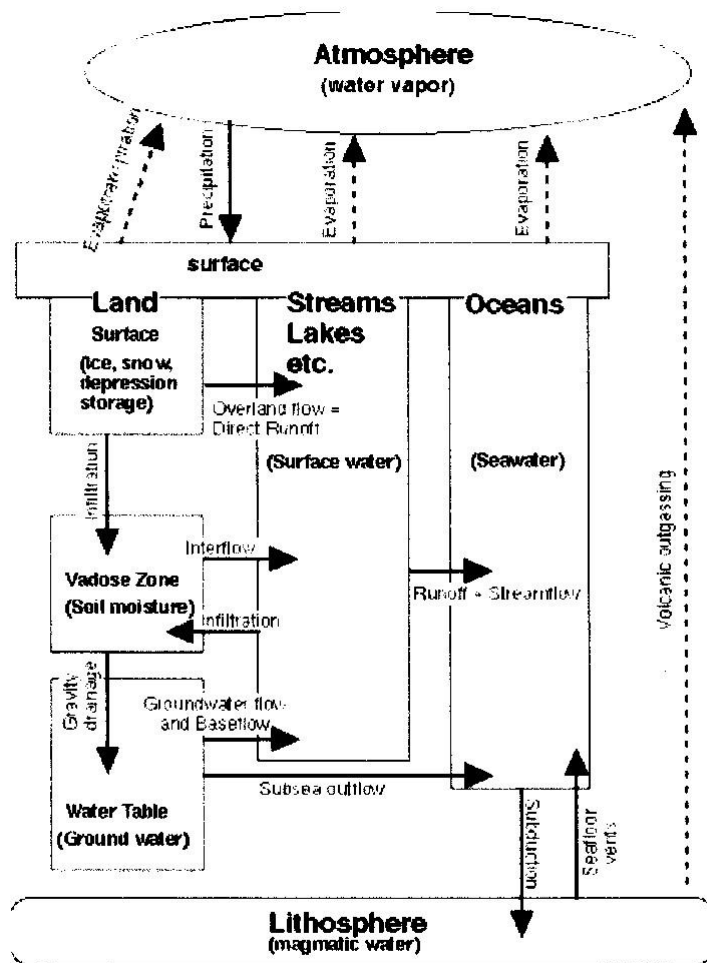


Σχήμα 1. Ο υδρολογικός κύκλος σε τοπογραφική τομή κοιλάδας.

Ο υδρολογικός κύκλος περιγράφεται από 6 συνιστώσες

- (P) Βροχόπτωση (precipitation)
- (E) Εξάτμιση (Evaporation)
- (T) Διαπνοή (Transpiration)
- (I) Διήθηση (infiltration)
- (G) Υπόγεια Απορροή (groundwater flow)
- (R) Επιφανειακή απορροή (surface runoff)

Πολλές φορές οι απώλειες που οφείλονται στην εξάτμιση και στη διαπνοή συνυπολογίζονται σε μια ενιαία ποσότητα που λέγεται εξατμισοδιαπνοή (E+T). Στον υδρολογικό κύκλο δεν λήφθηκε υπόψη η αποθηκευτική ικανότητα βυθισμάτων και το ποσό της συγκράτησης. Το νερό της συγκράτησης (νερό που για παράδειγμα μένει πάνω στα φύλλα) αποδίδεται τελικά μέσω της εξάτμισης στον υδρολογικό κύκλο. Από την άλλη πλευρά η ποσότητα του νερού που παγιδεύεται σε βυθίσματα αποδίδεται στον υδρολογικό κύκλο είτε με τη διαδικασία της εξάτμισης είτε διηθείται στο έδαφος. Αναλυτικότερα οι διεργασίες και οι αλληλεπιδράσεις τους δίνονται στο σχήμα 2.



The Hydrologic Cycle

---> Vapor Flow () = Storage
 -> Liquid Flow

Σχήμα 2. Φυσικές διεργασίες στον υδρολογικό κύκλο

Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα με την οποία το νερό της βροχής διεισδύει στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους λέγεται **διηθητική ικανότητα** (f_p) και εκφράζεται σε mm/h. Η επιφανειακή απορροή ξεκινά όταν το επιφανειακό στρώμα κορεσθεί. Παράλληλα με την απορροή συνεχίζεται η κατακόρυφη κίνηση του νερού από την επιφάνεια έως τον υδροφόρο ορίζοντα ονομάζεται **διείσδυση** (η διείσδυση λαμβάνει χώρα αφού το επιφανειακό στρώμα κορεσθεί με νερό).

Η διηθητική ικανότητα και η διείσδυση είναι συνάρτηση της δομής και της υφής του εδάφους. Παράδειγμα σε στρώμα άμμου, η διηθητική ικανότητα είναι τόσο μεγάλη που δεν λαμβάνει χώρα επιφανειακή απορροή, ενώ αντίθετα σε στρώμα αργίλου η διηθητική ικανότητα τείνει στο μηδέν και η επιφανειακή απορροή μεγιστοποιείται. Επιπλέον η εξαρτάται, από την φυτοκάλυψη, τη χρήση γης, (πχ, είδος καλλιέργειας), την υπάρχουσα εδαφική υγρασία. Σε γενικές γραμμές η διηθητική ικανότητα μειώνεται στη διάρκεια μιας βροχόπτωσης λόγω απόφραξης των πόρων (διόγκωση της αργίλου, απόφραξη με μικρότερα σωματίδια που μεταφέρει το νερό, εγκλωβισμού αέρα στους πόρους του πετρώματος) και συμπίεσης της επιφάνειας του εδάφους από τη βροχόπτωση.

Στο συγκεκριμένο μάθημα θα ασχοληθούμε με την εξατμισοδιαπνοή. Η διήθηση-διείσδυση και η υπόγεια απορροή θα καλυφθούν στο μάθημα της υδρογεωλογίας.

2. Εξάτμιση

Η **εξάτμιση** συνιστά μεταφορά νερού στην ατμόσφαιρα από την επιφάνεια της γης. Το νερό μπορεί να ευρίσκεται σε υδάτινες επιφάνειες (λίμνες, κοιλώματα), στα φύλλα των δένδρων, στο έδαφος (επιφανειακή υγρασία) κ.α. Δεν συμπεριλαμβάνεται η ποσότητα του νερού που φθάνει στην ατμόσφαιρα από τα στόματα των φύλλων, η οποία ονομάζεται **διαπνοή** των φυτών. Η εξάτμιση εξαρτάται από μετεωρολογικούς παράγοντες (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου, ατμοσφαιρική πίεση), την ποιότητα του νερού (περιεχόμενα άλατα) και την φύση/δομή του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα κ.α. Οι μονάδες μέτρησης είναι mm/t. Η μέτρηση μπορεί να γίνει με ατμόμετρα και εξατμισόμετρα.

Η ποσότητα θερμότητας E_o που απορροφάται από την μονάδα μάζας του νερού (που βρίσκεται σε θερμοκρασία Θ) για να μετατραπεί σε ατμούς δίδεται από τη σχέση;

$$E_o = 606,5 - 0,695 \cdot \Theta \quad \text{όπου}$$

E_o η θερμότητα σε cal/gr και Θ η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (C)

1 cal είναι η θερμότητα που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας 1 gr νερού κατά 1°

C. Για την εξάτμιση 1 mm νερού από μια επιφάνεια 1cm² απαιτούνται 60 cal.

Βασικότερος παράγοντας είναι η ακτινοβολία του ήλιου που παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια. Άρα η εξάτμιση του ήλιου που είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους, της εποχής, της ώρας της ημέρας, του υψομέτρου και της νέφωσης. Παρόλο που η ακτινοβολία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι αρκετά δύσκολο να εκτιμηθεί και για αυτό χρησιμοποιείται η θερμοκρασία(που συσχετίζεται με την ακτινοβολία). Η θερμοκρασία είναι μέτρο της θερμικής ενέργειας(δυναμική και κινητική) που εμπεριέχεται σε ένα σώμα. Η εξάτμιση είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου.

Ο προσδιορισμός της εξάτμισης σε ένα ταμιευτήρα μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας:

- **Το ισοζύγιο του ύδατος**, δηλαδή χρησιμοποιώντας την αρχή διατηρήσεως της μάζας. Σε αυτή την περίπτωση η κύρια υπόθεση είναι ότι μπορούν να εκτιμηθούν επακριβώς οι εισροές και οι εκροές νερού σε ένα κλειστό σύστημα. Στην πράξη αυτό είναι δύσκολο (πχ. Η υπόγειος ροή είναι δύσκολο να εκτιμηθεί). Ένα παράδειγμα έχει δοθεί στο κεφάλαιο Α(υδρολογικές λεκάνες → υδρολογικός κύκλος→8,2)
- **Αεροδυναμικός προσδιορισμός**. Βασίζεται στον υπολογισμό της εξάτμισης βάση της θεωρίας της μεταφοράς μάζας σε τυρβώδη ροή.

1. Πειραματικά δεδομένα απέδειξαν ότι η ακόλουθη εμπειρική σχέση;

$$E = b \cdot u \cdot (e_o - e_a) \text{ όπου}$$

$B = 0.29 \cdot A^{-0.05}$ όπου A η επιφάνεια του ταμιευτήρα σε m^2

E = εξάτμιση (mm ανά ημέρα)

U = η ταχύτητα σε ύψος 2 μέτρων από την επιφάνεια του ύδατος (m/sec)

E_o = μέγιστη τάση υδρατμών στη θερμοκρασία της επιφάνειας του ύδατος (mbar)

E_a = μέγιστη τάση υδρατμών του αέρα σε ορισμένο ύψος(mbar).

2. Μια άλλη προσέγγιση έγινε από τον Meyer με την εμπειρική σχέση;

$$E = C \cdot (e_o - e_a) \cdot \{1 + (u/16)\} \text{ όπου}$$

E = εξάτμιση (μέση μηνιαία σε mm)

C = σταθερά ίση με 11,25 για μικρού όγκου και μικρού βάθους ταμιευτήρες

ενώ για μεγαλύτερες μάζες ύδατος η τιμή φθάνει μέχρι 8,25)

U = η μέση μηνιαία ταχύτητα σε ύψος 9 μέτρων από την υδάτινη επιφάνεια(km/h)

E_o = μέγιστη τάση υδρατμών στη θερμοκρασία της επιφάνειας του ύδατος (mbar)

E_a = μέγιστη τάση υδρατμών του αέρα σε ορισμένο ύψος (mbar)

3. Για μικρού βάθους και μικρού όγκου ταμιευτήρες (< 8 m) e_a και e_o προσδιορίζονται από τη μέση μηνιαία θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία

του αέρα. Για μεγαλύτερες μάζες νερού η τιμή εο βασίζεται στη μέση μηνιαία θερμοκρασία ύδατος και η τιμή εα με βάση τις μέσες τιμές θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας σε ύψος 9 μέτρων από την επιφάνεια του νερού.

- **Το ισοζύγιο της ενέργειας.** Απαιτεί τη χρήση ειδικών οργάνων(ακτινομέτρων) για τον προσδιορισμό της ενέργειας που απορροφά το νερό σαν συνάρτηση του μήκους κύματος και δεν εφαρμόζεται στην πράξη.

3.Διαπνοή

Είναι η διεργασία κατά την οποία το νερό μετατρέπεται από υγρή σε αέρια φάση και αποδίδεται στην ατμόσφαιρα με φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα φυτά. Εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση, συν το είδος και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης. Η ποσότητα του διαθέσιμου προς δαπάνη νερού καθορίζεται από τη διαφορά της υδατο-ικανότητας μείον το σημείο μόνιμης μάρανσης.

- **Υδατο-ικανότητα** ονομάζεται η μέγιστη ποσότητα υγρασίας που μπορεί να συγκρατήσει το έδαφος με επαρκή αποστράγγιση.
- Το σημείο **μόνιμης μάρανσης** ταυτίζεται με την περιεχόμενη υγρασία στο έδαφος όταν τα φυτά αρχίζουν να μαραίνονται μόνιμα(κάτω από αυτό το όριο η διαπνοή σχεδόν μηδενίζεται).

4.Εξατμισοδιαπνοή

Στις πιο πολλές περιπτώσεις η εξάτμιση και η διαπνοή δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθούν ξεχωριστά. Η συνολική εκτίμηση ονομάζεται **εξατμισοδιαπνοή**. Η εξατμισοδιαπνοή μεγιστοποιείται όταν υπάρχει επάρκεια υγρασίας(μεγάλη προσφορά νερού έτσι ώστε η επιφάνεια του εδάφους να είναι κορεσμένη σε νερό και να υπερκαλύπτονται οι ανάγκες ανάπτυξης των φυτών). Σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για **δυναμική** εξατμισοδιαπνοή. Αντίθετα η **ενεργός** εξατμισοδιαπνοή αναφέρεται στην εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής που λαμβάνει χώρα σε μια περιοχή κάτω από συγκεκριμένες φυσικές συνθήκες.

Η εξάτμιση από το γυμνό έδαφος είναι συνάρτηση της παροχής νερού προς εξάτμιση. Το νερό αυτό προέρχεται είτε από τον υδροφόρο ορίζοντα(τριχοειδής ανύψωση νερού στην επιφάνεια) είτε από νερό που εμπεριέχεται στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους(εάν είναι κεκορεσμένο τότε η εξάτμιση είναι ίση με τη δυναμική εξάτμιση)

4.1 Μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου

Ο υδρολογικός κύκλος περιλαμβάνει σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ μετεωρολογικών, βιολογικών, χημικών και γεωλογικών παραγόντων. Ο ήλιος είναι ο κινητήριος μοχλός που μετακινεί με την εξάτμιση το νερό από τους ωκεανούς(90% του συνόλου του) στην ατμόσφαιρα

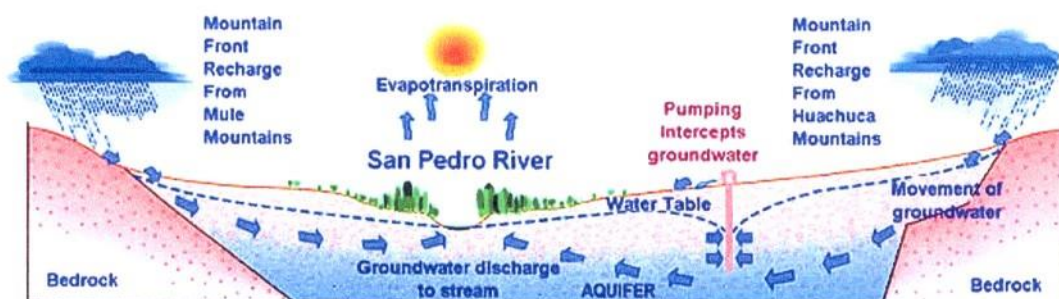
(υδρατμοί, σύννεφα). Στην συνέχεια το μεταφέρεται στην ξηρά αλλά και στην θάλασσα μέσω των βροχοπτώσεων. Στην ξηρά το νερό ακολουθεί επιφανειακή πορεία, ένα μέρος του διηθείται στο υπέδαφος ενώ ένα άλλο προσλαμβάνεται από τους έμβιους οργανισμούς και τα φυτά. Ο υδρολογικός κύκλος θεωρείται ένα κλειστό σύστημα επειδή το συνολικό ποσό του νερού παραμένει σταθερό παρόλο που η κατανομή του στο χώρο (πόλοι, ορεινοί όγκοι, υπόγεια υδάτινα αποθέματα) και στον χρόνο (συνάρτηση των κλιματολογικών αλλαγών, όπως για παράδειγμα οι περίοδοι παγετώνων, κ.α.). Σε γενικές γραμμές έξι κύριες διεργασίες λαμβάνουν χώρα:

- α) βροχοπτώσεις (P),
- β) διήθηση (I),
- γ) εξάτμιση (T),
- ε) διαπνοή (T),
- στ) επιφανειακή ροή (R),
- ζ) υπόγεια ροή (G).

Το Υδατικό ισοζύγιο, είναι ο απολογισμός του νερού που εισέρχεται, εξέρχεται και αποθηκεύεται σε ένα συγκεκριμένο υδρολογικό σύστημα. Τα υδατικά ισοζύγια περιγράφεται βάση των κύριων διεργασιών που ορίστηκαν προηγουμένως, από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P-R-E-T-G = \Delta s$$

Όπου Δs το νερό που αποθηκεύεται στο συγκεκριμένο υδρολογικό σύστημα.



Σχήμα 3. Τομή κοιλάδας στη λεκάνη San Pedro River και οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου.

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου είναι εξαιρετικά σημαντική στην υδρολογία, ιδιαίτερα για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής ($ET = E + T$) όταν δυνατός ο προσδιορισμός των υπολοίπων παραγόντων. Πχ, σε πολύ μεγάλες (με έκταση χιλιάδες km^2) λεκάνες μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες υποθέσεις $G \rightarrow 0$ και $\Delta s \rightarrow 0$. Άρα $ET = E + T \rightarrow P - R$. Οι βροχοπτώσεις και η επιφανειακή ροή μπορούν να προσδιορισθούν ποσοτικά.

Άσκηση: Δίνεται ότι:

- Μια υδρολογική λεκάνη έχει έκταση $11839 km^2$.
- Η μέση ετήσια απορροή είναι $144,4 m^3/sec$.

- Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 1,08 m.

Να προσδιορισθεί το μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής. Επίλυση:

- Η ετήσια απορροή (P) σε m (ύψος) ανά μονάδα επιφανείας(m²)={απορροή(m³) ανά sec} *{το χρονικό διάστημα της απορροής που είναι ένα έτος } / [το εμβαδόν της λεκάνης σε m²]

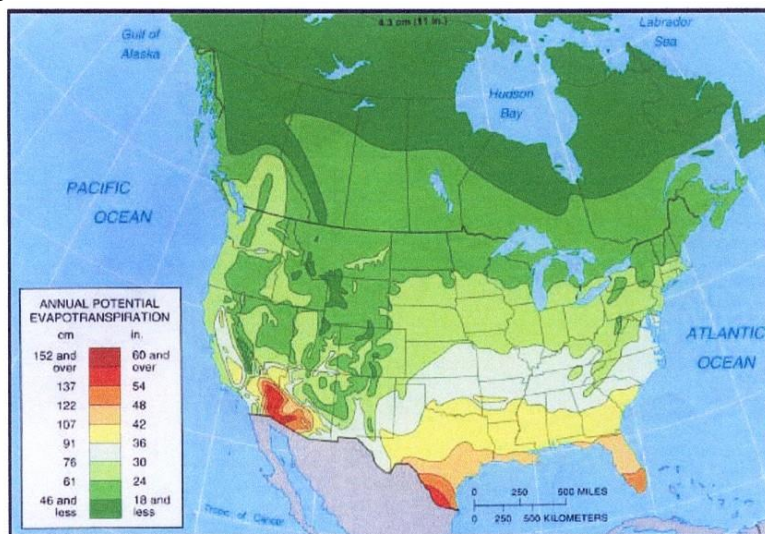
Δηλαδή P= [144.4 m³/sec] * [60*60*24*365 sec] / [11839 * 10⁶ m]=0.38 m (ύψος απορροής ανά m²)

- Υπόθεση: Η λεκάνη είναι πολύ μεγάλη άρα G→0 και Δs→0.Επομένως ET→P-R.

Άρα ET=1.08 m – 0.38 m = 0.7m

4.2 Μέθοδος Thornthwaite

Εκτιμά την εξατμισοδιαπνοή βασιζόμενη μόνο στην εκτίμηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας(δηλαδή βάση κλιματικών δεδομένων) και χωρίς να λαμβάνει υπόψη την υγρασία, την κάλυψη γης και άλλους παράγοντες.



Σχήμα 4. Κατανομή της εξατμισοδιαπνοής με την μέθοδο Thornthwaite στις Η.Π.Α

Παρέχει την μέση μηνιαία τιμή της ανηγμένης εξατμισοδιαπνοής σε mm.

$$ET = 16 * \left[\frac{10 * t}{T} \right]^a \text{ όπου}$$

$$A = 6,75 * 10^{-7} * T^3 - 7,71 * 10^{-5} * T^2 + 0,01792 * T + 0,49239$$

$$T = \sum_1^{12} \left[\frac{t}{5} \right]^{1,514} \text{ (ετήσιος θερμικός δείκτης του Thornthwaite)}$$

και η t η μηνιαία θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου.

Η εξίσωση παρέχει τις τιμές της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής που αναφέρονται σε 12ωρη διάρκεια ημέρας και διάρκεια μηνός ίση με 30 ημέρες. Δηλαδή εκτιμά την ταχύτητα εξάτμισης-διαπνοής όταν υπάρχει πλήρης προσφορά νερού. Ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το μήνα απαιτείται πολλαπλασιασμός της τιμής που προσδιορίστηκε από την προηγούμενη σχέση με έναν συντελεστή διόρθωσης που δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Γεωγραφικό Πλάτος	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
35°	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
40°	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81

Η μέθοδος παρέχει βέλτιστα αποτελέσματα σε περιοχές υγρές με πυκνή φυτοκάλυψη και σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη (30°-60°). Πολλοί τη θεωρούν περισσότερο σαν ένα κλιματικό δείκτη παρά σαν μια εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Προσοχή εάν η μέση μηνιαία θερμοκρασία είναι μικρότερη από 0° C τότε θεωρείται ίση με μηδέν (δηλαδή η μέθοδος υποθέτει ότι δεν υπάρχει ανάπτυξη φυτών για θερμοκρασίες μικρότερες από 0° C και άρα η εξατμισοδιαπνοή μηδενίζεται).

4.3 Μέθοδος Blaney – Criddle

Εκτιμά την κατανάλωση νερού από τα φυτά σαν συνάρτηση της μηνιαίας θερμοκρασίας, και της διάρκειας της ημέρας ανά μήνα του έτους κατά την περίοδο ανάπτυξης των φυτών.

$$ET = K \cdot [32 + (1.8 \cdot T)] / [39.4 \cdot P]$$

ET=εξατμισοδιαπνοή σε cm

K=συντελεστής που καθορίζεται από την μηνιαία ανάπτυξη των φυτών

T=θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου

P=συντελεστής που καθορίζεται από την διάρκεια ημέρας ανά μήνα

Συντελεστής K

Καλλιέργεια	Διάρκεια ανάπτυξης (μήνες)	K
Οπωροφόρα δένδρα	12	0,6-0,7

Βαμβάκι	7	0,6-0,65
Φασόλια	3	0,6-0,7
Καλαμπόκι	4	0,75-0,85

Συντελεστής P

Γεωγραφικό Πλάτος	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
34°	7.1	6.91	8.36	8.8	9.72	9.7	9.88	9.33	8.36	7.9	7.02	6.92
36°	6.99	6.86	8.35	8.85	9.81	9.83	9.99	9.4	8.36	7.85	6.92	6.79

Η εφαρμογή της μεθόδου στην Ελλάδα απέδειξε ότι υπερεκτιμά την εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Πιθανότερη αιτία είναι βασίζεται στον προσδιορισμό της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας χωρίς να λαμβάνει υπόψη την εδαφική υγρασία(που απαιτεί παρατηρήσεις πολλών ετών).

4.4 Μέθοδος TURC

Προσδιορίζει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή με τη σχέση που ακολουθεί:

$$E = \frac{P}{\sqrt{0.90 + \left[\frac{P}{L}\right]^2}} \quad \text{όπου}$$

E= μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή (σε mm)

L=300+25*T³ (σε mm),

T= η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα (σε βαθμούς Κελσίου)

4.5 Μέθοδος COUTAGNE

Η εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τον Coutagne βασίζεται στις ίδιες παραμέτρους με τη μέθοδο του Turc. Πιο συγκεκριμένα:

- $E = P * [1 - (P/L)]$ εάν $(L/8) < P < (L/2)$
E=μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή (σε mm)

- $L = 800 + 140 \cdot T$ (σε mm),
 $T =$ η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα (σε βαθμούς Κελσίου)
- $E = P$ εάν $P < (L/8)$, δηλαδή εάν δεν λαμβάνει χώρα απορροφή
 - $E = 200 + 35 \cdot T$ εάν $P > (L/2)$ οπότε η εξατμισοδιαπνοή είναι ανεξάρτητη από την βροχόπτωση.

4.6 Άλλες μέθοδοι

Άλλες μέθοδοι βασίζονται στην μέτρηση ροής της υγρασίας σε ένα στρώμα αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (Μέθοδος Μεταφοράς Υδρατμών). Άλλη μέθοδος βασίζεται στην ενεργειακή ισορροπία, δηλαδή στην ενέργεια που δέχεται μία επιφάνεια από τον ήλιο και η οποία εξισορροπείται για εξάτμιση, θέρμανση του αέρα και θέρμανση του εδάφους (Μέθοδος Perman).

Μετά από πειράματα διαπιστώθηκε ότι η εξάτμιση από το έδαφος (E) είναι ένα κλάσμα της εξάτμισης από αυτή της ελεύθερης υδάτινης επιφάνειας (E_0). Δηλαδή $E = \alpha \cdot E_0$. Παράδειγμα για γυμνό έδαφος μετά από βροχή $\alpha = 0,9$. Για φυτοκαλυμμένες επιφάνειες το μήνα Σεπτέμβριο $\alpha = 0,7$. Ποιο πολλές λεπτομέρειες στον Τσόγκα (1999).

5.Χάρτες κατηγοριοποιήσεων (cluters)

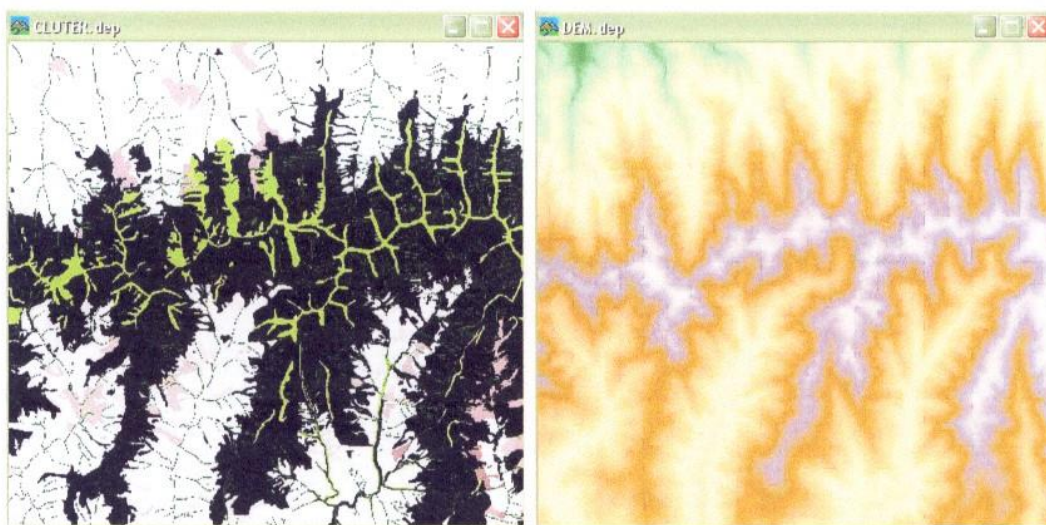
Η Κάλυψη γης αναφέρεται στις φυσικές και τεχνητές οντότητες που καλύπτουν μια στοιχειώδη εδαφική μονάδα. Φυσικές οντότητες είναι για παράδειγμα η βλάστηση, το νερό, κ.α. Από πρακτικής πλευράς η ερμηνεία των καλύψεων γης περιλαμβάνει την οριοθέτηση επιφανειακών μονάδων (πολύγωνα) από δορυφορικές φωτογραφίες (γεωργική γη , βιομηχανικές περιοχές, κ .α). Όμως γραμμικά στοιχεία θγραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, οδικό δίκτυο, συστάδες δένδρων, κ .α.). αλλά και σημειακά στοιχεία (οικίες, νερού, κ . α) μπορεί να συνυπάρχουν. Από πλευράς ψηφιακής αναπαράστασης, τα δεδομένα των καλύψεων γης μπορεί να αποδοθούν είτε σε διανυσματική μορφή (vector) είτε σε πλεγματική μορφή (raster).

Η παραμετροποίηση της πληροφορίας (κατηγοριοποίηση των τύπων κάλυψης γης) γίνεται με ένα σύστημα γεωταξινόμησης που αποτελεί ένα σύστημα πολλαπλών επιπέδων. Ένα παράδειγμα συστήματος γεωταξινόμησης ακολουθεί (περισσότερες πληροφορίες στην εισαγωγή):

1. Καλλιέργειες
 - a . Μόνιμες (δένδρα)
 - b. Εποχικές
2. Πρώτης βλάστηση
3. Δάση
4. Οικιστική

Σχεδόν κατά κανόνα η ψηφιακή αναπαράσταση ενός χάρτη κατηγοριοποιήσεων είναι πλεγματική. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε εικονοστοιχείο του πλεγματικού αρχείου αποδίδεται μια ψηφιακή τιμή, που αντιστοιχεί σε μια κάλυψη γης(ή <<καλύτερα>> στην επικρατούσα κάλυψη

γης στην περιοχή που καλύπτει το εικονοστοιχείο στην επιφάνεια της γης, π χ μια περιοχή διαστάσεων 20*20 m²). Παράδειγμα στην εικόνα που ακολουθεί όπου δίδεται ένας χάρτης κατηγοριοποιήσεων και το αντίστοιχο Ψ Υ Μ Ε .



Οι χάρτες κατηγοριοποιήσεων είναι εξαιρετικά χρήσιμοι στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αφού δίνουν το εμβαδό κάθε κάλυψης γης.

Βιβλιογραφία

- Μηλιαρέσης Γ., 2004. Εισαγωγή στην Υδρολογία (Φροντιστηριακές Σημειώσεις. Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας & Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Mc Guen R., 2005. Hydrologic Analysis & Design (3rd ed.). Prentice Hall, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ , 859 p.
- Σακκά Ι. , 1985. Τεχνική Υδρολογία, Τεύχος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Αιβάζη, Ξάνθη, 371 σελ.
- Σακκά Ι. , 2004. Τεχνική Υδρολογία, Τόμος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων(2^η έκδοση). Εκδόσεις Αιβάζη, Ξάνθη, 787 σελ.
- Τσακίρης Γ., 1995. Υδάτινοι Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, 675 σελ.
- Τσόγκας Χρ., Υδρολογία. Εκδόσεις ΙΩΝ, Περιστερί, 206 σελ.
- Viessman W., Levis G., 2003. Introduction to Hydrology (5th ed.). Prentice Hall, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ , 612 p.
- Μηλιαρέσης Γ., 2003. Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση. Εκδόσεις ΙΩΝ, Περιστερί, 243 σελ.
- Argialas, D., J. Lyon, and O. Mintzer (1988) Quantitative Description and Classification of Drainage Patterns, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54,505-509.
- Ichoku, C. And J. Chorowicz(1994) A Numerical Approach to the Analysis and Classification of Channel Network Patterns, Water Resources Research,30,161-174.

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ

Στόχος: Η επεξεργασία των δεδομένων ενός βροχομετρικού σταθμού. Ο προσδιορισμός των ποσοτικών χαρακτηριστικών της βροχόπτωσης σε μια υδρολογική λεκάνη από τις σημειακές παρατηρήσεις βροχομετρικών σταθμών. Ο προσδιορισμός της πιθανότητας εμφάνισης μιας ακραίας τιμής σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Η χρονική περίοδος είναι συνάρτηση με το εύρος λειτουργίας ενός συγκεκριμένου τεχνικού έργου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή
2. Βροχόπτωση
3. Μέτρηση των βροχοπτώσεων
4. Διορθώσεις των μετρήσεων
Εκτίμηση της παρατήρησης P_x που λείπει σε σταθμό x
Διπλή αθροιστική καμπύλη (ομογενοποίηση)
5. Μέσο ύψος βροχής σε μια υδρολογική λεκάνη
Μέθοδος των Πολυγώνων Thiessen
Μέθοδος των Ισοϋετών Καμπυλών
Προσδιορισμός της Βροχοβαθμίδας
Ψηφιακή Διαμέριση στο Περιβάλλον Η/Υ
6. Ετήσια ύψη βροχής
7. Ένταση-Διάρκεια
Παράδειγμα 1,2 και 3

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Ζητείται να εκτιμηθεί το ετήσιο ύψος βροχής σε μια περιοχή από τις σημειακές εκτιμήσεις 5 βροχομετρικών σταθμών. Δίνεται το πολύγωνο που εμπεριέχει την περιοχή και τα κανονικά ύψη βροχής για 5 σταθμούς. Εάν η υψομετρική διαφορά στην περιοχή μελέτης είναι μηδέν, ποια μέθοδο θα χρησιμοποιήσετε και γιατί;
2. Ποία είναι τα πλεονεκτήματα της μεθόδου προσδιορισμού του όγκου βροχόπτωσης σε μια υδρολογική λεκάνη με προσδιορισμό της βροχοβαθμίδας; Ποιες είναι οι απαιτήσεις από πλευράς επεξεργασίας και πώς μπορεί να υλοποιηθεί εάν σας δοθεί ένα ΨΥΜΕ που εμπεριέχει την περιοχή μελέτης;
3. Εάν διαπιστώσετε ότι η βροχοβαθμίδα δηλαδή η κατανομή των διατεταγμένων ζευγών (H:υψόμετρο, B:ύψος βροχής) δεν είναι γραμμική (δεν είναι πολυώνυμο 1^{ου} βαθμού $\rightarrow B=a \cdot H+b$) πώς θα αντιμετωπίσετε το πρόβλημα;
4. Οι βροχομετρικοί σταθμοί σε μια υδρολογική λεκάνη είναι κατανομημένοι σε υψόμετρο [0,500m]. Αντίθετα στην λεκάνη το υψόμετρο κυμαίνεται στο διάστημα [0,1500m]. Να προταθεί μια μεθοδολογία που να προσδιορίζει εάν η βροχοβαθμίδα έτσι όπως προσδιορίζεται από τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών (υψόμετρο, ύψος βροχής) είναι αξιόπιστη;
5. Δίνονται οι εκτιμήσεις για μέσο ετήσιο ύψος βροχής (περίοδος 30 ετών) από 3 σταθμούς που είναι στην ίδια υδρογραφική λεκάνη.

	A	B	Γ
Υψόμετρο (m)	500	650	780
Μέσο ύψος βροχής(mm)	238.9	250	265
Τυπική απόκλιση	43.9	45.7	49.2
Κυρτότητα (kurtosis)	-0.165	-0.150	-0.100
Ασυμμετρία (skew)	0.178	0.190	0.210

A) Σχολιάστε; B) Να εκτιμηθεί η πιθανότητα, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής να υπερβεί την τιμή 250 mm. Γ) Η πιθανότητα αυτή θα είναι διαφορετική για τους 3 σταθμούς;

6. Η σχέση του Talbot $\{i=a/(D+b)\}$ συνδέει την ένταση με την διάρκεια. Να προσδιορισθούν οι σταθερές a και b για κάθε καμπύλη έντασης-διάρκειας (για περίοδο επαναφοράς ίση με 1,2,5,10,30,50 έτη) με βάση τα δεδομένα του πίνακα:

Διάρκεια (D min)	Μέγιστο ύψος (σε mm) για περίοδο επαναφοράς T (σε έτη)						
	1	2	5	10	20	30	50
5	1,42	1,63	1,98	2,21	2,49	2,82	3,00
10	2,18	2,51	3,05	20,42	3,84	4,34	4,62
15	2,77	3,18	3,84	4,29	4,85	5,49	5,84
20	3,84	4,39	5,33	6,35	6,73	7,62	8,13
45	4,95	5,72	6,86	7,87	8,64	9,65	10,67
60	5,84	6,86	8,38	9,65	10,92	12,19	13,46
75	6,35	7,37	9,40	10,92	12,19	13,46	14,99
90	7,37	8,64	11,18	13,21	14,73	16,51	18,29

105	8,38	10,16	13,21	15,75	17,78	19,81	22,10
120	9,91	11,94	15,75	18,29	21,34	23,62	26,67

7. Να προσδιορισθεί η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για τους σταθμούς A, B και Γ (ανήκουν στην ίδια υδρολογική λεκάνη) είναι οι κατανομές κανονικές; Σχολιάστε. Ποίος είναι ο βαθμός συσχέτισης των σταθμών; Τα δεδομένα χρήζουν ομογενοποίησης;

Βροχομετρικοί σταθμοί (ετήσιο ύψος βροχής σε mm)			
Έτος	A	B	Γ
1978	180,34	53,34	134,62
1979	129,54	38,21	86,36
1980	111,76	48,26	109,22
1981	162,56	60,96	93,98
1982	111,76	12,7	91,44
1983	111,76	45,72	96,52
1984	147,32	25,4	86,36
1985	119,38	43,18	93,98
1986	101,6	58,42	93,98
1987	137,16	43,18	109,22
1988	251,46	58,42	104,14
1989	162,56	20,32	101,6
1990	154,94	45,72	129,54

Βροχομετρικοί σταθμοί (ετήσιο ύψος βροχής σε mm)			
Έτος	A	B	Γ
1990	154,94	45,72	129,54
1991	144,78	22,86	78,74
1992	175,26	27,94	132,08
1993	119,38	50,8	78,74
1994	142,24	38,1	132,08
1995	134,62	15,24	124,46
1996	109,22	20,32	119,38
1997	248,92	22,86	78,74
1998	139,7	48,26	96,52
1999	124,46	48,26	111,76
2000	121,92	22,86	109,22

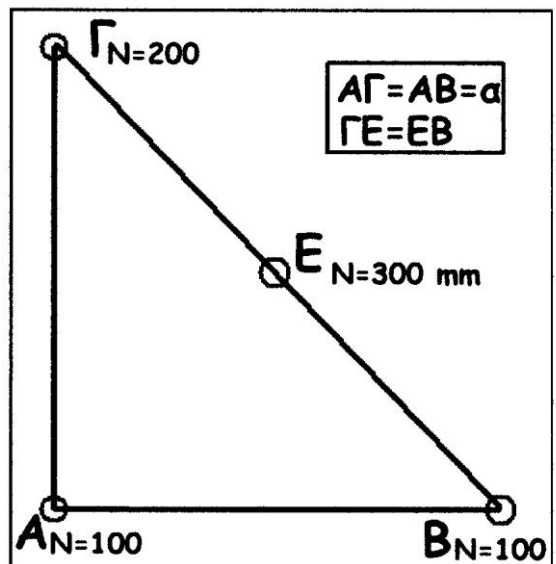
8. Δίνονται τα ετήσια ύψη βροχής σε 3 βροχομετρικούς σταθμούς A, B και Γ της ίδιας υδρολογικής λεκάνης. Να βρεθούν τα ετήσια ύψη βροχής του σταθμού B που λείπουν:

Σταθμός	1980	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
A	111,7	162,5	111,7	111,7	147,3	119,3	101,6	137,1	251,4	162,5	154,9
B	48,2	60,9		45,7			58,4		58,4	20,3	45,7
Γ	109,2	93,9	91,4	96,5	86,3	93,9	93,9	109,2	104,1	101,6	129,5

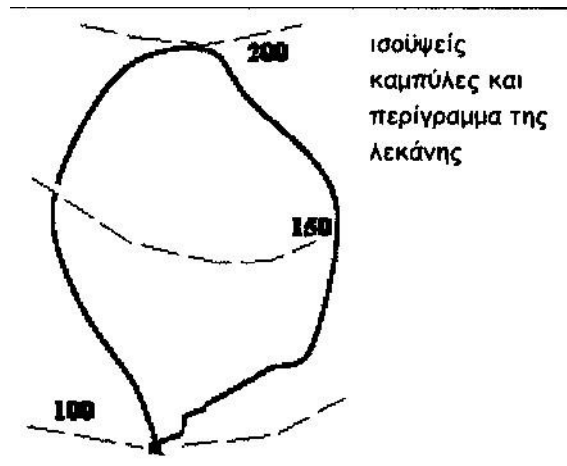
9. Να προσαρμοσθούν οι μετρήσεις του σταθμού Δ στις καταγραφές των σταθμών A, B και Γ με την μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης.

Έτος	A	B	Γ	Δ
1978	30	31	27	29
1979	33	36	32	32
1980	26	27	24	28
1981	34	26	27	29
1982	34	34	30	30
Έτος	A	B	Γ	Δ
1983	31	33	31	29
1984	28	30	24	28
1985	35	34	33	39
1986	37	39	36	41
1987	34	35	35	37

10. Ανάλυση συχνότητας ραγδαίων βροχοπτώσεων. Πώς υλοποιείται (απαιτήσεις σε δεδομένα, μεθοδολογία, διαγράμματα);
11. Σε τι διαφέρουν τα διαγράμματα της έντασης σαν συνάρτηση της διάρκειας με την περίοδο επαναφοράς ως παράμετρο από διάγραμμα της έντασης σαν συνάρτηση της περιόδου με την διάρκεια ως παράμετρο; Ποιες οι διαφορές στην ερμηνεία τους;
12. Δίνεται μια υδρογραφική λεκάνη που έχει το σχήμα ισοσκελούς ορθογωνίου τριγώνου ΑΒΓ.
- $AB = a$ km, παράδειγμα $a = 10$ km.
 - Στις θέσεις Α, Β, Γ και Ε (είναι στο μέσον της πλευράς ΒΓ) υπάρχουν βροχομετρικοί σταθμοί.
 - Οι καταγραφές των σταθμών για τα ετήσια ύψη βροχής είναι $N_A = 100$ mm, $N_B = 100$ mm, $N_\Gamma = 200$ mm και $N_E = 300$ mm.
- Να προσδιοριστεί το ετήσιο ύψος βροχής στην ΑΒΓ με την μέθοδο της κατάτμησης σε πολύγωνα THIESSEN.



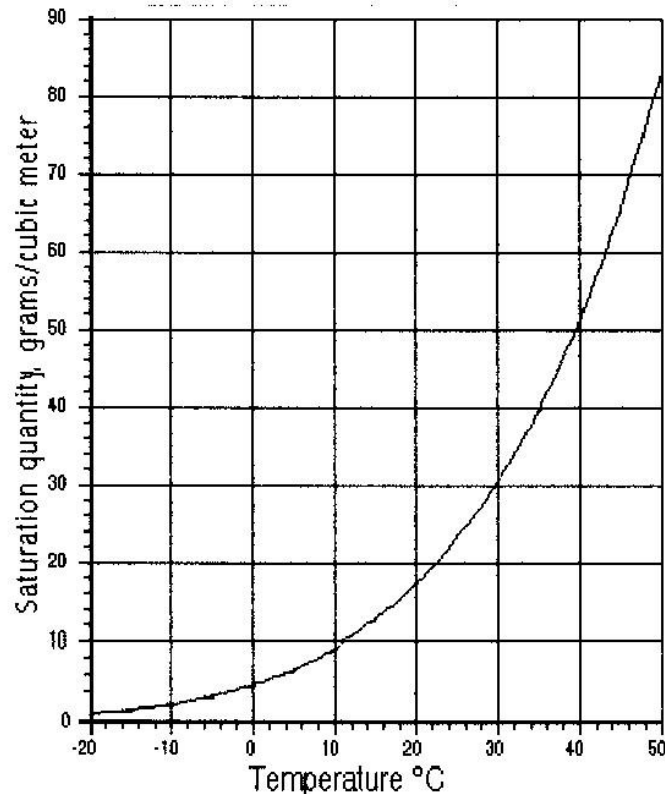
13. Δίνεται μια υδρογραφική λεκάνη
- Η εξίσωση της βροχοβαθμίδας προσδιορίσθηκε ίση με $B = 0,5 \cdot H + 20$. Όπου B: ύψος βροχής σε mm, H: υψόμετρο σε mm.
 - Η υψομετρική καμπύλη της λεκάνης προσδιορίσθηκε από τοπογραφικό χάρτη σε ισοδιάσταση 50 μ (όπως φαίνεται στο σχήμα δίπλα) και ίση με $H = -100 \cdot A + 200$. Όπου A: εμβαδόν στο διάστημα (0...1) και H: υψόμετρο σε m.



14. Να προσδιορισθεί ο ετήσιος όγκος βροχόπτωσης της λεκάνης εάν:
- Η εξίσωση της βροχοβαθμίδας προσδιορίστηκε ίση με $B = a \cdot H + b$
 - Η υψομετρική καμπύλη της λεκάνης προσδιορίστηκε από τοπογραφικό χάρτη με ισοδιάσταση $L(m)$.
 - Η διακύμανση του υψόμετρου στην λεκάνη είναι στο διάστημα (H_{min}, H_{max}) .
 - Η υψομετρική καμπύλη είναι ίση με $H = c \cdot A + d$.
- Όπου
 B: ύψος βροχής σε mm,
 H: υψόμετρο σε mm και
 A: εμβαδόν μεγαλύτερο από ύψος H στο διάστημα $(0 \dots 1)$.

1. Εισαγωγή

Η τροπόσφαιρα, το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας πάχους μόλις 10 χλμ από την επιφάνεια της γης είναι σημαντικό για την υδρολογία αφού σε αυτό εμπεριέχεται το 75% της ατμόσφαιρας και το σύνολο της εμπεριεχόμενης υγρασίας. Η ατμοσφαιρική πίεση κυμαίνεται μεταξύ 940 και 1050 mbar (1 ατμόσφαιρα=1013 mbar). Η περιεκτικότητα σε υδρατμούς του αέρα μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της πίεσης που εξασκούν οι υδρατμοί (πίεση υδρατμών). Όταν ο αέρας εμπεριέχει το ανώτατο ποσό υγρασίας που μπορεί να συγκρατήσει, λέγεται κορεσμένος υδρατμών. Η ποσότητα κορεσμού (η πίεση των κεκορεσμένων υδρατμών).



Σχήμα 1. Πίεση κεκορεσμένων υδρατμών σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας

Η σχετική υγρασία ορίζεται σαν ο λόγος της πίεσης των υδρατμών που εμπεριέχονται στον αέρα σε μια θερμοκρασία θ προς την αντίστοιχη πίεση των κεκορεσμένων υδρατμών στην ίδια θερμοκρασία (είναι ποσοστό επί της ποσότητας κορεσμού). Δηλαδή προσδιορίζει την δυνατότητα της αέριας μάζας να απορροφήσει περισσότερη υγρασία από το περιβάλλον.

Από την άλλη πλευρά η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται με το υψόμετρο ($6,5^{\circ}\text{C}$ ανά 1000 μέτρα), με συνέπεια να μειώνεται η πίεση κεκορεσμένων υδρατμών. Βέβαια είναι δυνατόν κοντά στην επιφάνεια να δημιουργηθούν θερμοκρασίες αναστροφές (αύξηση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο) λόγω της ψύξης του στρώματος της ατμόσφαιρας που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος (ιδιαίτερα κατά τις νυχτερινές ώρες).

2. Βροχόπτωση

Βροχόπτωση \rightarrow Η αποβολή του νερού που εμπεριέχεται στην ατμόσφαιρα και η μετάβαση του στην επιφάνεια της γης είτε σε υγρή είτε σε στερεή κατάσταση. Προϋποθέσεις εμφάνισης : α) κορεσμένος σε υδρατμούς αέρας, β) μετατροπή μέρους των υδρατμών σε υγρή/στερεή κατάσταση (σχηματισμός νεφών), γ) αύξηση του μεγέθους των σταγόνων/παγοκρυστάλλων που εμπεριέχονται στο νέφος έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί πτώση τους λόγω αύξησης του βάρους. Τα σταγονίδια της βροχής έχουν διάμετρο από 0,5 έως 6 mm (εάν είναι μεγαλύτερα διασπώνται κατά την πτώση σε μικρότερα).

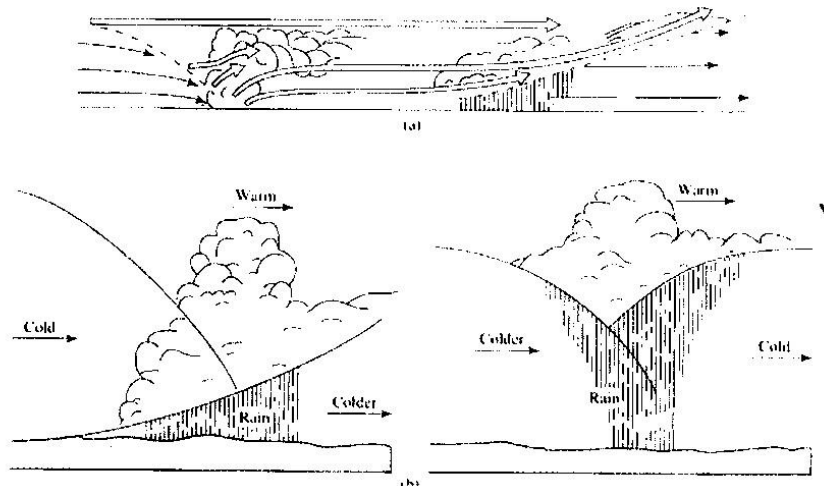
Η πρώτη προϋπόθεση (κορεσμένος σε υδρατμούς αέρας) πληρείται με ψύξη του αέρα που σχεδόν κατά κανόνα πραγματοποιείται λόγω ανοδικής κίνησης.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι ορογραφικές βροχοπτώσεις που προκαλούνται στην προσήνεμη πλευρά της οροσειράς λόγω της μηχανικής ανυψώσεως που έχει σαν συνέπεια την ψύξη του αέρα, με αποτέλεσμα να πλησιάσει το σημείο κορεσμού και να πραγματοποιηθεί συμπύκνωση των υδρατμών.



Σχήμα 2. Ορογραφικές βροχοπτώσεις

Οι βροχοπτώσεις που οφείλονται σε ανοδικές κινήσεις συνέπεια της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας ονομάζονται βροχές μεταφοράς. Αντίθετα οι κυκλωνικές βροχές οφείλονται σε δυναμικές αναταράξεις της ατμόσφαιρας (υφέσεις) που δημιουργούν ψυχρά μέτωπα.

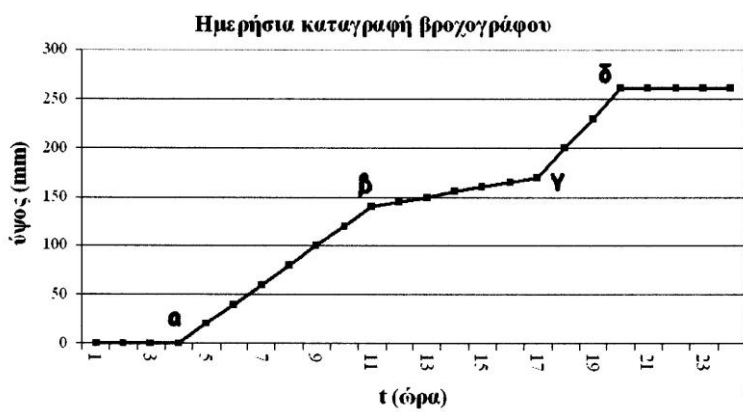


Σχήμα 3. Κυκλώνες βροχοπτώσεις

3. Μέτρηση των βροχοπτώσεων

Γίνεται με ειδικά όργανα που προσδιορίζουν το κατακόρυφο ύψος βροχής σε mm αν δεν συνέβαιναν απώλειες απορροής, διήθησης και εξάτμισης. Προσοχή, ύψος βροχής ίσο με 1 mm αντιστοιχεί σε όγκο νερού ίσο με 1 λίτρο ανά τετραγωνικό μέτρο ($1\text{mm} \rightarrow 1 \text{ lt} / \text{m}^2$). Η διάταξη στο χώρο των οργάνων μέτρησης συνθέτει ένα βροχομετρικό δίκτυο. Σε εθνικό επίπεδο οι σταθμοί μέτρησης τοποθετούνται σε πυκνότητα $600\text{-}900\text{km}^2 / \text{σταθμό}$ σε πεδινές περιοχές ενώ σε ορεινές περιοχές η ελάχιστη πυκνότητα πρέπει να είναι $100\text{-}250 \text{ km}^2 / \text{σταθμό}$ ενώ παράλληλα πρέπει οι σταθμοί να κατανεμηθούν σε υψομετρικές ζώνες των 500 m.

Ένα όργανο που προσδιορίζει το συνολικό ύψος ονομάζεται βροχόμετρο ενώ εάν καταγραφεί το ύψος σαν συνάρτηση του χρόνου λέγεται βροχογράφος. Ημερήσιο ύψος βροχής ορίζεται το συνολικό ύψος βροχής για μια ημέρα. Σε αντιστοιχία ορίζεται το μηνιαίο ύψος βροχής, το ετήσιο ύψος βροχής. Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής ορίζεται ο μέσος όρος των μηνιαίων υψών βροχής για σειρά ετών. Σε αντιστοιχία ορίζεται το μέσο ετήσιο ύψος βροχής για μια σειρά ετών. Εκτός των μέσων τιμών προσδιορίζεται και το ελάχιστο-μέγιστο ύψος βροχόπτωσης. Υδρολογικό έτος → στην Ελλάδα ξεκινάει 1^η Οκτώβρη και τελειώνει 30 Σεπτεμβρίου. Κανονικό ύψος βροχής ορίζεται ο μέσος όρος των ετήσιων υψών βροχής για 30 έτη.



Σχήμα 4. Καταγραφή βροχογράφου
(το παράδειγμα → ΎΨΗ ΒΡΟΧΗΣ, είναι ακραίο)

Στην περίπτωση των βροχογράφων είναι δυνατός ο προσδιορισμός της έντασης της βροχόπτωσης. Ο βροχογράφος συνήθως καταγράφει το ύψος της βροχόπτωσης ανά ώρα (Σχήμα 4). Στο σχήμα 1 παρατηρώ τα σημεία (α) → ένταση της βροχόπτωσης, (β) μείωση της έντασης, (γ) αύξηση της έντασης και (δ) παύση. Η ένταση μπορεί να προσδιορισθεί για τρία διαφορετικά διαστήματα αβ, βγ, γδ σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί.

Διάστημα	Χρονικό διάστημα (ώρες)	Ύψος βροχής (mm)	Ένταση βροχής (mm/ώρα)
αβ	(4,11)→7	140-0→140	140/7→20
βγ	(11,17)→	170-140→30	30/6→5
γδ	(17,20)→3	260-170→90	90/2→30

Διορθώσεις των μετρήσεων

Εκτίμηση της παρατήρησης Π_x που λείπει σε σταθμό x

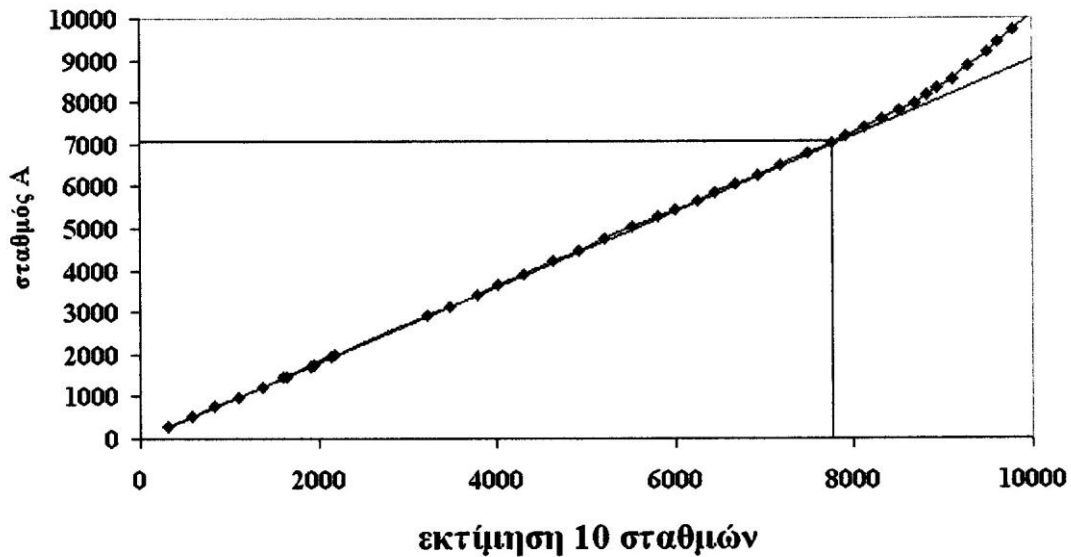
Εάν το κανονικό ετήσιο ύψος βροχόπτωσης $N_\alpha, N_\beta, N_\gamma$. Εάν η διαφορά είναι μεγαλύτερη του 10% έστω και σε ένα σταθμό (έστω N_α, N_x) τότε χρησιμοποιείται η σχέση (δίνεται βάρος ανάλογο του μεγέθους του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης ανά σταθμό):

$$\Pi_x = (1/3) * [(\Pi_\alpha * N_x / N_\alpha) + (\Pi_\beta * N_x / N_\beta) + \Pi_\gamma * N_x / N_\gamma]$$

(περισσότερες λεπτομέρειες στην εργαστηριακή άσκηση L10.pdf).

Διπλή αθροιστική καμπύλη (ομογενοποίηση)

Τα αθροιστικά εποχιακά ή ετήσια ύψη βροχής του σταθμού Χ συγκρίνονται με τις αντίστοιχες αθροιστικές τιμές της μέσης βροχόπτωσης, μιας αντιπροσωπευτικής ομάδας γειτονικών σταθμών (≥ 10).

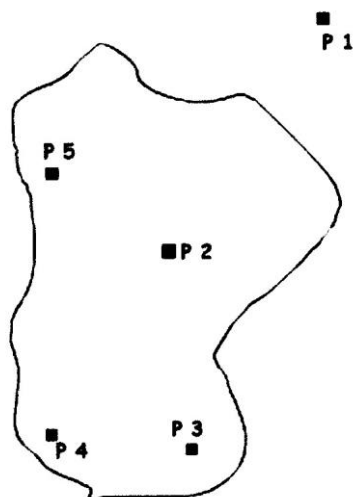


Σχήμα 5. Διπλή αθροιστική καμπύλη.

Η αλλαγή στην κλίση της καμπύλης υποδηλώνει τοπική επίδραση (στο συγκεκριμένο σταθμό) που οφείλεται στην αλλαγή του οργάνου, ή στην χωρική μετατόπιση του υπάρχοντος οργάνου. Αντίθετα εάν υπήρχε μεταβολή στα μετεωρολογικά δεδομένα έπρεπε η επίδραση να ήταν ομοιόμορφη σε όλους τους σταθμούς. Η διόρθωση επιτυγχάνεται με προσαρμογή της κλίσης στο τμήμα που αποκλίνει (περισσότερες λεπτομέρειες στην εργαστηριακή άσκηση L10.pdf).

4. Μέσο ύψος βροχής σε μια υδρολογική λεκάνη

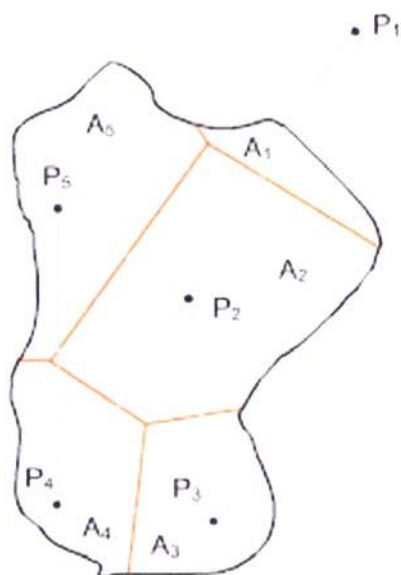
Βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι δυνατή η εκτίμηση του μέσου ύψους βροχής που προσλαμβάνεται σε μια δεδομένη χρονική περίοδο, με βάση της σημειακές παρατηρήσεις βροχομετρικών σταθμών (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Βροχομετρικό δίκτυο

5.1 Μέθοδος των Πολυγώνων Thiessen

Βασική παραδοχή είναι ότι το ύψος βροχής κάθε σταθμού θεωρείται σταθερό μέχρι το μέσο της απόστασης του από τους εγγύτερους σταθμούς. Δηλαδή βασίζεται στην διαμέριση του επιπέδου σε πολύγωνα Thiessen. Σε αυτή την προσέγγιση κάθε σταθμός ενώνεται με ευθύγραμμα τμήματα με τους εγγύτερους του έτσι ώστε να δημιουργηθούν τρίγωνα μέγιστων δυνατών γωνιών. Στην συνέχεια προσδιορίζεται η μεσοκάθετος κάθε πλευράς όλων των τριγώνων και ορίζεται το πολύγωνα που περιβάλλει κάθε σταθμό (περισσότερες λεπτομέρειες στην άσκηση L07.PDF).



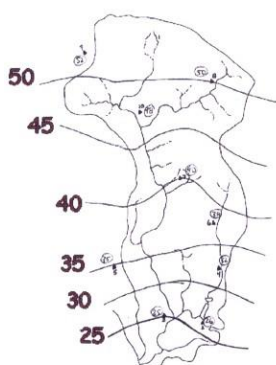
Σχήμα 7. Πολύγωνα Thiessen

Ο λόγος της επιφάνειας κάθε πολύγωνα προς την συνολική επιφάνεια προσδιορίζει το βάρος του ύψους βροχής του σταθμού που βρίσκεται στο κέντρο του πολυγώνου. Το μέσο ύψος βροχής σε κάθε θεωρούμενη περιοχή βρίσκεται από τον πολλαπλασιασμό του ύψους βροχής κάθε σταθμού με το

αντίστοιχο βάρος και την άθροιση των γινομένων (μειονέκτημα δεν λαμβάνονται υπόψη οι ορογραφικές επιδράσεις-επίδραση του υψομέτρου).

5.2 Μέθοδος των Ισοϋετών Καμπυλών

Τα ύψη βροχής κάθε σταθμού σημειώνονται σε χάρτη και ορίζονται καμπύλες που διέρχονται από σημεία με το ίδιο ύψος βροχής. Το μέσο ύψος βροχής προσδιορίζεται από τα εμβαδά των τομέων που ορίζονται από τις ισοϋετείς καμπύλες και τα αντίστοιχα ύψη βροχής που είναι ίσα με το μέσο όρο τιμών των εκατέρωθεν ισοϋετών καμπυλών. Εάν ο προσδιορισμός των ισοϋετών καμπυλών γίνει με γραμμική παρεμβολή τότε τα αποτελέσματα είναι ίδια με αυτά της μεθόδου Thiessen. Δυστυχώς μπορεί να ληφθεί υπόψη η επίδραση του υψομέτρου στο ύψος βροχής εάν είναι διαθέσιμος τοπογραφικός χάρτης. Βέβαια η εκτίμηση αυτή θα είναι ποιοτική και θα συνίσταται στη μετατόπιση των αρχικών καμπυλών έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του υψομέτρου. Πληρέστερη αντιμετώπιση μπορεί να επιτευχθεί μόνο στο περιβάλλον Η/Υ. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις που περιγράφονται από τους Μαμάση & Κουτσογιάννη. Η πιο συνηθής αντιμετώπιση βασίζεται στον προσδιορισμό της υψομετρικής καμπύλης. (περιγράφεται στο πρώτο κεφάλαιο → Υδρολογικές Λεκάνες) της λεκάνης και στην άμεση συσχέτιση του υψομέτρου με την ορογραφική επίδραση στο ύψος των βροχοπτώσεων. Άλλες προσεγγίσεις βασίζονται σε πολυωνυμικά μοντέλα, στην γεωστατική κ.α.



Σχήμα 8. Ισοϋετείς καμπύλες

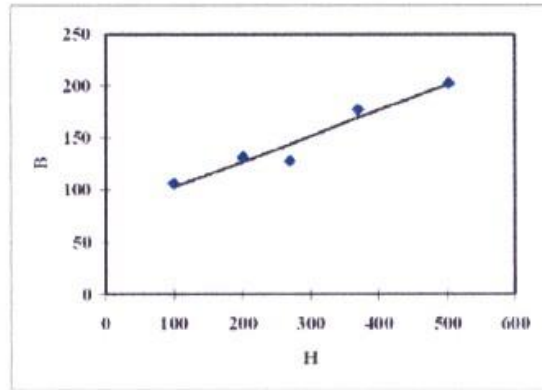
5.3 Προσδιορισμός της Βροχοβαθμίδας

Είναι μια ακόμη μέθοδος προσδιορισμού του ετήσιου ύψους βροχής σε μια υδρολογική λεκάνη. Βασίζεται στον προσδιορισμό της συσχέτισης μεταξύ του υψομέτρου και του ύψους της βροχόπτωσης από τα σημειακά δεδομένα (βροχομετρικοί σταθμοί). Τα δεδομένα έχουν την μορφή ετήσιου ύψους βροχής ανά σταθμό σε μια χρονική περίοδο όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Έτος	Ετήσιο ύψος βροχής σε mm ανά σταθμό				
	α1	α2	α3	α4	α5
1965	85.67	89.56	90.27	144.78	134.11
1966	89.41	104.88	117.73	166.57	166.17
1967	82.40	93.50	98.27	151.08	165.46
1968	138.07	143.64	139.17	201.22	225.96
1969	102.57	121.26	118.95	143.99	224.05
1970	118.57	127.23	129.34	210.77	222.15
1971	124.94	154.10	140.36	218.87	230.94
1972	101.60	146.20	132.51	182.83	218.19
1973	121.26	140.46	133.55	199.03	205.44
1974	116.56	144.22	123.14	196.47	212.09
1975	98.15	131.50	136.04	153.34	178.82
1976	71.15	88.34	92.02	110.21	145.54
1977	85.75	119.15	115.39	151.71	206.93
1978	79.17	100.33	94.89	128.09	151.71
1979	96.27	130.25	119.46	162.76	173.46
1980	100.69	130.40	124.10	169.98	200.84
1981	104.75	141.99	132.51	182.68	215.06
1982	103.17	152.45	130.43	201.68	191.19
1983	140.59	162.59	142.39	225.78	232.46
1984	115.39	156.90	143.94	184.73	220.01
1985	60.30	85.93	86.56	101.07	199.38
1986	100.33	134.37	139.37	173.84	178.74
1987	92.71	113.79	99.97	158.12	153.04
1988	82.93	121.29	124.38	156.82	192.58
1989	70.66	103.28	98.43	116.61	198.30
1990	91.47	140.89	124.08	156.24	204.01
1991	84.86	123.04	116.87	121.54	177.98
1992	84.84	120.90	113.41	134.37	161.95
1993	87.81	136.47	106.43	135.15	149.76
1994	95.53	118.44	99.44	150.62	206.98
1995	123.14	166.52	152.15	224.56	235.97
1996	170.08	194.34	204.27	270.33	301.27
1997	116.23	98.12	123.34	181.66	182.25
1998	132.26	127.94	162.51	227.08	221.54
1999	118.75	107.80	133.68	227.63	191.08

Στο πρώτο στάδιο εξετάζεται εάν οι σταθμοί συσχετίζονται μεταξύ τους. Ο πιο απλός ποσοτικός έλεγχος που μπορεί να γίνει είναι με τον προσδιορισμό του συντελεστή συσχέτισης (ανά ζεύγη). Κατά αυτό τον τρόπο προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Συντελεστής συσχέτισης					
	α1	α2	α3	α4	α5
α1	1				
α2	0,76	1			
α3	0,88	0,83	1		
α4	0,94	0,72	0,86	1	
α5	0,75	0,74	0,78	0,71	1



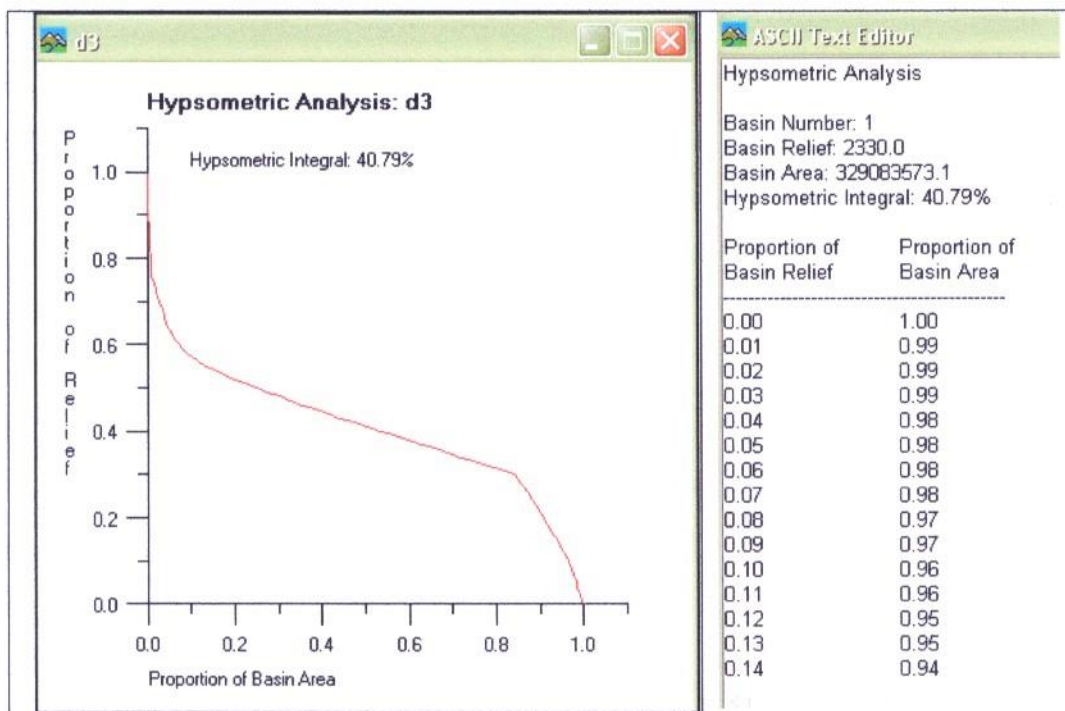
Σχήμα 9. Βροχοβαθμίδα

Παρατηρούμε ότι ελάχιστη συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ των σταθμών α4 και α5 ενώ η μέγιστη μεταξύ των σταθμών α1 και α4. Εάν ο συντελεστής συσχέτισης είναι μικρός τότε μπορεί να γίνει στατιστικός έλεγχος προκειμένου να προσδιορισθεί εάν η συσχέτιση μεταξύ των δυο σταθμών είναι στατιστικά σημαντική ή ακόμη να γίνει ανάλυση διασποράς (για γραμμική παλινδρόμηση). Εάν αποδειχθεί ότι κάποιος σταθμός δεν συσχετίζεται με τους άλλους, τότε μπορεί να γίνει μια προσπάθεια ομογενοποιήσεις των παρατηρήσεων του (βάση της διπλής αθροιστικής καμπύλης). Εάν το πρόβλημα παραμένει τότε η μόνη λύση είναι ο σταθμός αυτός να μην συμπεριληφθεί στην επεξεργασία. Στην συνέχεια προσδιορίζεται το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης ανά σταθμό. Έστω ότι τα ετήσια ύψη βροχόπτωσης και το υψόμετρο κάθε σταθμού δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Σταθμός	B: μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)	H: υψόμετρο σταθμού (m)
α1	105,5	100
α2	131,5	200
α3	127,6	270
α4	177,1	370
α5	202,2	502

Η ευθεία ελάχιστων τετραγώνων (Μέσο ετήσιο ύψος βροχής = $\alpha \cdot \text{Ύψος} + \beta$) είναι η $B=0,248 \cdot H+77,287$, (για $H=0 \Leftrightarrow B=77,3\text{mm}$, το ύψος βροχής στην επιφάνεια της θάλασσας).

Η βροχοβαθμίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με την υψομετρική καμπύλη για να εκτιμηθεί το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης σε μια υδρολογική λεκάνη. Να σημειωθεί ότι το ύψος βροχής αυξάνεται με το υψόμετρο ύψους 2500m. Για μεγαλύτερα υψόμετρα τα ύψος βροχής μειώνεται. Από την υψομετρική καμπύλη μπορεί να προσδιορισθεί το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης με υψόμετρο μεγαλύτερο από κάποια τιμή. Η υψομετρική καμπύλη δίνεται είτε γραφικά είτε σαν ζεύγη τιμών (εμβαδόν, υψόμετρο) όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (το παράδειγμα αφορά την υδρολογική λεκάνη 1 του προηγούμενου κεφαλαίου):



Σχήμα 10. Υψομετρική καμπύλη (γραφικά αριθμητικά)

Αρκετά προγράμματα προσδιορίζουν την ποσοστιαία καμπύλη. Δηλαδή το υψόμετρο και το εμβαδόν έχουν τυποποιηθεί στο διάστημα $[0,1]$. Ο προσδιορισμός του απόλυτου υψομέτρου είναι εύκολος εάν προσδιορισθεί η παραμετρική αναπαράσταση της υδρολογικής λεκάνης (ελάχιστο, μέγιστο υψόμετρο, κ.α.) ενώ με πεπερασμένες διαφορές είναι δυνατός ο προσδιορισμός του εμβαδού της λεκάνης για κάθε υψομετρική διαφορά (πολλές φορές οι υψομετρικές διαφορές ταυτίζονται με την ισοδιάσταση του χάρτη, σε ΨΥΜΕ αυτό δεν ισχύει). Από την άλλη πλευρά από την βροχοβαθμίδα μπορεί να εκτιμηθεί το ύψος βροχής ανά υψομετρική διαφορά. Επομένως το άθροισμα των επιμέρους γινομένων (ποσοστό εμβαδού αν υψομετρική διαφορά ύψος βροχής) προσδιορίζει το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης της λεκάνης. Πολλές φορές η κατανομή των βροχομετρικών σταθμών σε σχέση με το υψόμετρο δεν είναι κανονική (συνήθως υπάρχουν περισσότεροι σταθμοί σε μικρά υψόμετρα και λιγότεροι στα μεγάλα υψόμετρα) και αυτό δημιουργεί πρόβλημα στην εκτίμηση της βροχοβαθμίδας.

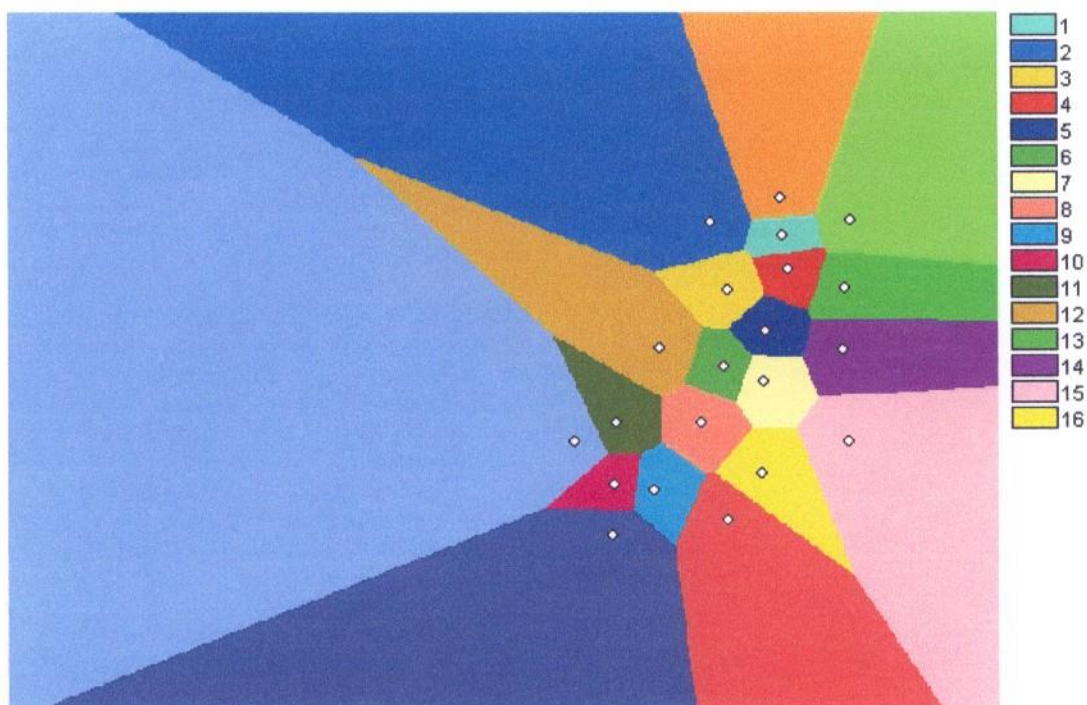
5.4 Ψηφιακή Διαμέριση σε Πολύγωνα Thiessen

Η διαμέριση σε πολύγωνα Thiessen στο περιβάλλον ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών είναι δυνατή εάν είναι διαθέσιμες οι συντεταγμένες των βροχομετρικών σταθμών και το περίγραμμα της υδρολογικής λεκάνης (Σχήμα 11). Θα δοθεί ένα παράδειγμα στο IDRISI σε σχέση με την υδρολογική λεκάνη 1 που χρησιμοποιήθηκε στα παραδείγματα του προηγούμενου κεφαλαίου.



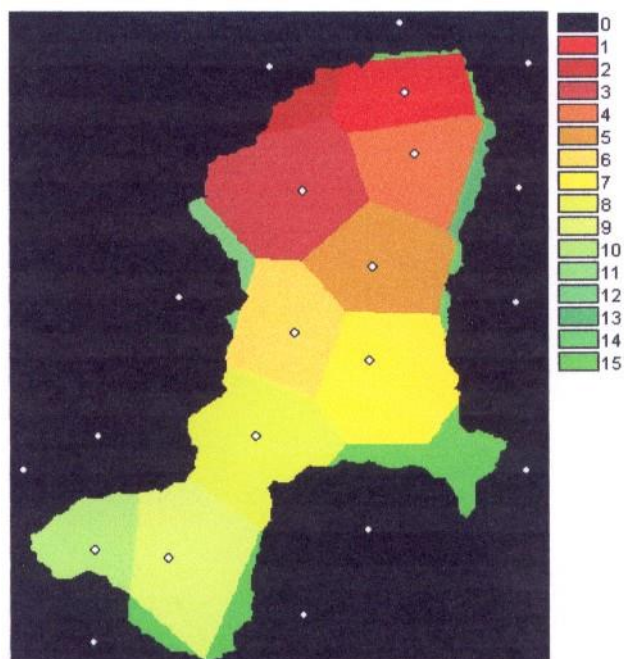
Σχήμα 11. Υδρολογική λεκάνη και οι θέσεις των σταθμών.

Ας υποθέσουμε ότι η λεκάνη δίνεται σε πλεγματική μορφή (κάθε τετραγωνάκι που ανήκει στην λεκάνη έχει σημειωθεί με την τιμή 1, διαφορετικά με την τιμή 0). Πρώτα γίνεται διαμέριση με βάση της συντεταγμένες των σημείων (βροχομετρικοί σταθμοί) και προκύπτει το σχήμα 12.



Σχήμα 12. Διαμέριση σε πολύγωνα Thiessen

Στην συνέχεια πολλαπλασιάζεται η πλεγματική εικόνα που αντιστοιχεί στην λεκάνη (Σχήμα 11) και προκύπτει η εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 13. Διαμέριση της υδρολογικής λεκάνης σε πολύγωνα Thiessen.

Τα τετραγωνάκια (κάθε τετραγωνάκι αντιστοιχεί σε εμβαδόν 75^2 m^2 στο συγκεκριμένο ΨΥΜΕ) που ανήκουν σε κάθε πολύγωνο έχουν αναπαρασταθεί με τον ίδιο ακέραιο αριθμό (κωδικός σταθμού). Το εμβαδόν μπορεί να προσδιορισθεί έμμεσα από το ιστόγραμμα συχνότητας της εικόνας (Σχήμα 14).

Class	Lower Limit	Upper Limit	Frequency	Prop.	Cum. Freq.	Cum. Prop.
0	0.0000	0.9999	1021846	0.9457	1021846	0.9457
1	1.0000	1.9999	3994	0.0037	1025840	0.9494
2	2.0000	2.9999	1188	0.0011	1027028	0.9505
3	3.0000	3.9999	7443	0.0069	1034471	0.9574
4	4.0000	4.9999	4699	0.0043	1039170	0.9618
5	5.0000	5.9999	5564	0.0051	1044734	0.9669
6	6.0000	6.9999	5108	0.0047	1049842	0.9717
7	7.0000	7.9999	7019	0.0065	1056861	0.9782
8	8.0000	8.9999	6731	0.0062	1063592	0.9844
9	9.0000	9.9999	6875	0.0064	1070467	0.9907
10	10.0000	10.9999	3370	0.0031	1073837	0.9939
11	11.0000	11.9999	1	0.0000	1073838	0.9939
12	12.0000	12.9999	899	0.0008	1074737	0.9947
13	13.0000	13.9999	734	0.0007	1075471	0.9954
14	14.0000	14.9999	280	0.0003	1075751	0.9956
15	15.0000	15.9999	1891	0.0018	1077642	0.9974
16	16.0000	16.9999	962	0.0009	1078604	0.9983
17	17.0000	17.9999	929	0.0009	1079533	0.9991
18	18.0000	18.9999	590	0.0005	1080123	0.9997
19	19.0000	19.9999	1	0.0000	1080124	0.9997
20	20.0000	20.9999	187	0.0002	1080311	0.9999
21	21.0000	21.9999	153	0.0001	1080464	1.0000

Σχήμα 14. Εμβαδόν πολυγώνων Thiessen

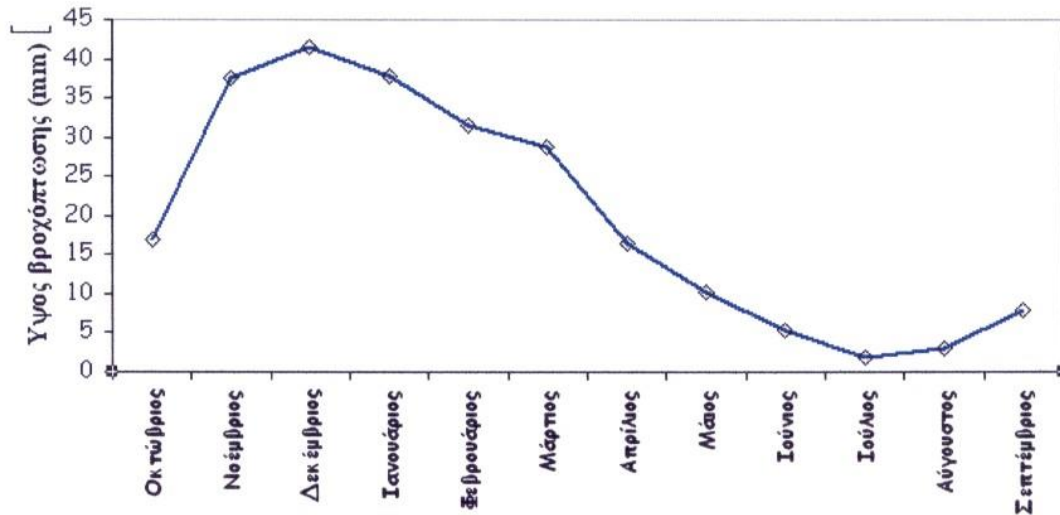
5. Ετήσια ύψη βροχής (στατιστική επεξεργασία)

Τα δεδομένα ενός βροχομετρικού σταθμού έχουν συνήθως την μορφή μηνιαίου ύψους βροχής σε mm (παράδειγμα ο πίνακας που ακολουθεί):

Έτος	Οκτ	Νοέ	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπ	Ετήσιο ύψος
1955	35.2	42.1	60.1	22.7	30.3	38.2	33.5	5.1	3.8	6.2	0.0	9.9	287.0
1956	25.8	10.5	44.6	65.9	44.7	39.1	4.1	3.7	4.8	0.2	1.5	5.9	250.9
1957	14.1	19.4	59.9	18.5	32.9	39.8	13.9	10.8	5.2	2.3	3.0	2.0	221.9
1958	10.8	52.4	30.3	39.0	40.9	19.3	24.7	4.4	5.2	0.0	0.5	8.5	236.0
1959	24.2	21.4	19.1	60.3	29.7	26.8	5.8	14.2	8.2	1.8	0.9	29.2	241.7
1960	19.4	58.8	16.9	23.1	42.2	33.7	19.7	22.9	1.4	0.0	6.7	1.3	245.9
1961	22.1	35.2	40.7	29.5	63.8	51.4	14.2	13.3	1.7	0.8	4.6	5.8	283.0
1962	23.2	44.9	17.7	15.6	32.7	36.9	20.5	8.4	2.7	0.4	4.6	10.8	218.4
1963	17.4	39.7	24.1	14.5	33.6	32.8	27.3	15.2	7.1	3.4	0.3	10.0	225.4
1964	5.8	43.5	82.0	67.6	12.9	30.9	13.0	4.4	4.1	4.2	3.9	4.4	276.8
1965	10.7	38.2	41.1	65.3	18.1	4.9	13.1	10.0	2.6	0.7	1.9	0.2	206.8
1966	16.5	33.5	45.4	46.7	22.0	43.2	6.2	3.9	2.9	1.5	0.9	3.8	226.6
1967	31.4	18.5	35.3	55.4	19.0	35.3	17.6	5.1	1.5	0.0	0.0	3.8	223.0
1968	26.6	40.2	60.7	35.9	36.8	28.3	10.5	12.8	7.4	0.9	14.8	8.0	282.9
1969	17.1	16.4	45.0	50.8	22.5	17.3	15.1	10.0	8.1	0.3	0.0	13.0	215.5
1970	17.2	44.2	54.8	68.0	19.1	13.4	23.6	7.2	5.2	0.1	0.0	9.3	262.1
1971	14.5	46.0	60.6	49.6	29.1	40.6	22.6	13.6	7.9	0.7	2.4	19.6	307.2
1972	4.7	26.6	44.2	59.8	33.5	37.9	30.3	6.6	5.8	0.2	1.4	9.1	260.1
1973	14.5	86.8	59.3	32.1	9.6	24.6	9.5	6.7	6.9	0.0	2.1	16.8	268.9
1974	2.4	29.4	53.4	59.7	48.0	44.6	20.3	10.5	7.7	5.5	0.0	5.4	286.8
1975	24.8	32.5	46.4	47.4	36.9	31.3	15.9	12.3	4.9	2.2	9.7	0.0	264.3
1976	8.9	8.5	8.2	40.0	35.7	26.5	10.9	5.3	2.4	3.1	7.1	2.8	159.4
1977	15.6	42.4	54.7	6.7	21.7	34.4	2.5	15.1	2.8	0.5	8.5	15.0	219.9
1978	3.9	21.4	28.8	31.8	18.8	7.0	24.6	15.9	5.3	1.8	7.1	12.3	178.7
1979	29.2	20.8	37.0	12.4	50.1	14.9	16.3	11.5	2.6	2.8	3.1	8.8	209.5
1980	7.8	33.5	56.7	40.3	23.4	21.2	20.2	4.6	6.9	0.8	1.1	4.5	221.0
1981	29.4	32.5	69.1	9.6	22.7	16.5	16.0	11.3	12.7	1.5	1.0	9.4	231.5
1983	5.5	59.6	35.4	44.9	38.0	48.1	13.7	12.0	9.8	5.4	6.3	2.6	281.4
1984	23.2	58.4	26.2	18.0	36.0	26.8	19.9	18.2	15.0	0.8	0.7	6.1	249.4
1985	23.0	29.5	18.0	2.2	17.4	28.1	6.9	6.2	13.5	2.2	1.8	10.4	159.2
1986	14.0	41.0	17.6	29.2	50.0	15.7	17.9	9.3	2.1	4.3	0.1	15.3	216.4
1987	0.7	19.8	54.9	35.5	27.0	30.2	8.3	9.9	1.1	7.8	0.8	0.6	196.7
1988	1.8	48.6	30.0	39.0	10.5	26.6	13.0	18.3	6.5	0.9	0.4	5.9	201.4
1989	14.0	20.0	13.1	27.1	18.9	42.6	7.2	9.4	3.8	0.0	9.4	2.0	167.5
1991	8.4	30.7	22.9	18.4	26.8	29.4	25.2	12.9	2.3	0.3	4.2	0.1	181.5
1992	14.2	29.2	36.7	28.5	20.3	5.5	25.7	0.5	1.4	1.8	1.9	6.9	172.5
1994	23.7	53.0	37.2	23.3	30.8	16.6	13.0	7.1	8.0	0.3	0.3	5.0	218.0
1995	19.4	55.4	50.4	53.9	21.6	39.0	26.1	7.3	8.8	0.6	3.4	10.1	296.0
1996	24.6	47.9	86.3	52.0	68.8	14.8	27.8	15.4	2.8	4.3	1.3	7.1	353.1
1997	34.7	27.8	23.9	45.6	14.0	34.1	20.1	9.7	8.1	2.5	4.2	18.3	243.0
1998	17.4	57.2	60.8	45.6	41.1	28.2	8.7	14.9	3.3	0.6	0.1	7.2	285.1
1999	13.5	62.9	38.0	51.6	69.3	29.5	8.1	17.5	3.5	0.5	3.0	1.4	298.8
Μηνιαίο	16.9	37.6	41.6	37.7	31.5	28.7	16.5	10.3	5.4	1.8	3.0	7.8	

Στοιχειώδεις στατιστική επεξεργασία απαιτεί να προσδιορισθούν τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής για την περίοδο 1955-1999 (μέση τιμή για κάθε

στήλη) καθώς και το συνολικό ετήσιο ύψος βροχής (άθροιση των μηνιαίων εκτιμήσεων σε κάθε γραμμή). Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται γραφικά στα επόμενα δυο σχήματα αποτελούν σημαντικά στοιχεία της κλιματολογικής ταυτότητας της περιοχής μελέτης όπως αυτή προσδιορίζεται από την σημειακή εκτίμηση ενός βροχομέτρου.



Σχήμα 15. Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής (περίοδος 1955-1999).



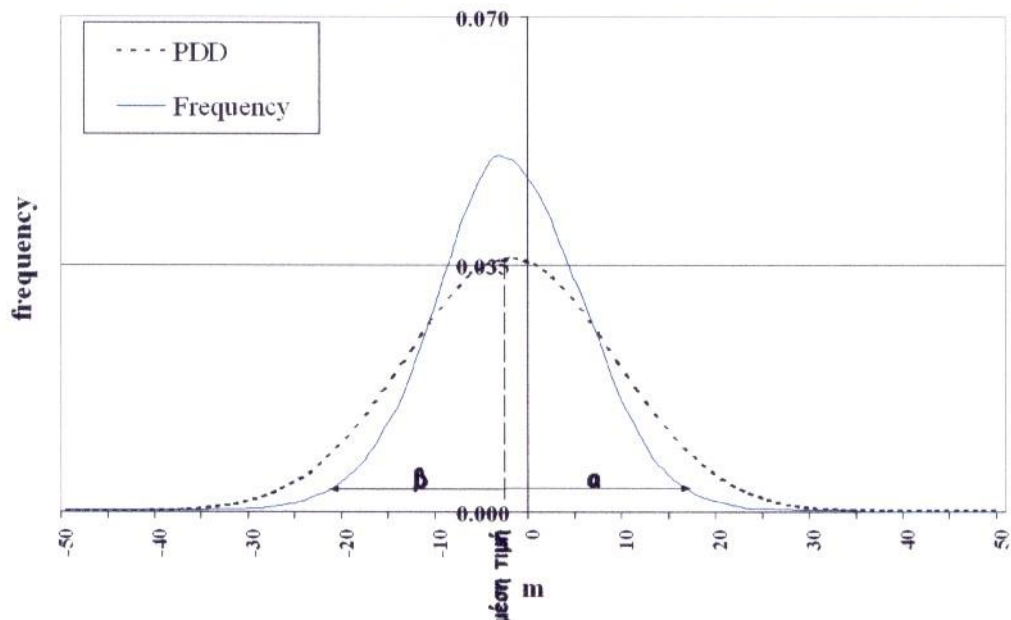
Σχήμα 16. Ετήσια ύψη βροχής (περίοδος 1955-1999).

Η ερμηνεία τους υποδηλώνει ότι το μέγιστο των βροχοπτώσεων παρατηρείται από τον Νοέμβριο έως τον Φεβρουάριο (Σχήμα 15). Η στατιστική εκτίμηση του ετησίου ύψους βροχής απαιτεί στατιστική επεξεργασία χρονοσειρών. Σε αυτή την περίπτωση, μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε εάν το μέσο ύψος-τυπική απόκλιση για σταθερά χρονικά διαστήματα (5 ή 10 έτη) μεταβάλλεται, συνέπεια κλιματικών αλλαγών (φαινόμενο του θερμοκηπίου) ή άλλων παραγόντων (μεταβολή στην κάλυψη γης της περιοχής, εκρήξεις ηφαιστειών). Ένα άλλο στοιχείο της χρονοσειράς είναι ο εντοπισμός κυκλικών μεταβολών που αφορούν αυξομειώσεις που επαναλαμβάνονται για σταθερά περίπου χρονικά διαστήματα (μεταβολές στο κλίμα που έχουν σχέση με την περιοδική αλλαγή που παρουσιάζεται στην κλίση του άξονα περιστροφής της γης με συνέπεια να αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, τον κύκλο που παρουσιάζει η ηλιακή δραστηριότητα). Η επεξεργασία τους περιλαμβάνει προσδιορισμό κινούμενου μέσου, προσέγγιση με σειρές Foyrier, κ.α.

Η κατανομή συχνοτήτων του ετήσιου ύψους βροχής για την περίοδο 1955-1999 μπορεί να χρησιμεύσει για τον προσδιορισμό της πιθανότητας το ετήσιο ύψος βροχής να υπερβεί κάποια τιμή. Για να είναι βάσιμες αυτές οι προσεγγίσεις θα πρέπει η χρονοσειρά να είναι στατιστική (stationary). Δηλαδή να είναι σταθερές οι στατιστικές εκτιμήσεις (παράδειγμα η μέση τιμή) των επιμέρους χρονικών διαστημάτων.

Στην πιο απλοϊκή προσέγγιση μπορεί να γίνει εκτίμηση της πιθανότητας με βάση την συχνότητα (αριθμός εμφανίσεων ύψους βροχής μεγαλύτερο από κάποια τιμή προς το σύνολο των ετησίων παρατηρήσεων). Αυτή η προσέγγιση δεν λαμβάνει υπόψη τυχαία σφάλματα που υπεισέρχονται στην διαδικασία ποσοτικοποίησης-μέτρησης ενός φαινομένου και τα οποία μπορεί να μειώσουν ή να αυξήσουν την τιμή μιας παρατήρησης.

Μια πληρέστερη προσέγγιση μπορεί να γίνει εάν θεωρηθεί ότι η κατανομή συχνοτήτων προσεγγίζεται από μια συγκεκριμένη στατιστική κατανομή (Σχήμα 17).



Σχήμα 17. Η καμπύλη με την διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην καμπύλη κανονικής κατανομής με μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με αυτή των δεδομένων των οποίων η κατανομή συχνοτήτων αντιστοιχεί στην καμπύλη με την συνεχή γραμμή. Είναι σαφές ότι τα δεδομένα πρέπει να παρουσιάζουν θετική κυρτότητα (αφού η καμπύλη συχνοτήτων είναι υπεράνω της καμπύλης της κανονικής κατανομής) και θετική ασυμμετρία (αφού $\alpha > \beta$).

Σε αυτή την περίπτωση προσδιορίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του ετήσιου ύψους βροχής για την περίοδο 1955-1999 και αυτές οι δύο τιμές χρησιμοποιούνται για να προσδιορισθεί η συχνότητα στο πεδίο ορισμού (ελάχιστο, μέγιστο ετήσιο ύψος βροχής) με βάση την κανονική κατανομή (μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες κατανομές εάν δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις της κανονικής κατανομής). Η ικανότητα της κανονικής κατανομής να προσεγγίσει την συγκεκριμένη κατανομή συχνοτήτων κρίνεται από την οριζόντια και κατακόρυφη ασυμμετρία. Η κατακόρυφη ασυμμετρία (κυρτότητα) προσδιορίζει εάν η καμπύλη είναι πάνω ή κάτω από την κανονική κατανομή. Η οριζόντια ασυμμετρία προσδιορίζει εάν η κατανομή είναι ασύμμετρη ως προς μια ευθεία που είναι κάθετη στον άξονα των

τεκμηρίων (X) και διέρχεται από την μέση τιμή (Σχήμα 11). Από μαθηματικής πλευράς:

Η εξίσωση της κανονικής κατανομής:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2*\sigma^2}}$$

Όπου μ , και σ η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα και $X \rightarrow$ ετήσιο ύψος βροχής

Ασυμμετρία (οριζόντια, skew):

$$Skew = \frac{n}{(n-1)*(n-2)} * \sum_1^n \left[\frac{Xi - \mu}{s} \right]^3$$

Κυρτότητα (κατακόρυφη ασυμμετρία, kurtosis):

$$Kurtosis = \left(\frac{n(n+1)}{(n-1)*(n-2)*(n-3)} \sum_1^n \left[\frac{Xi - \mu}{s} \right]^4 \right) - \frac{3*(n-1)^2}{(n-2)*(n-3)}$$

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών (μαζί με την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση) καθώς και της τιμής της κανονικής κατανομής στο πεδίο ορισμού γίνεται πολύ εύκολα στο Excel (άσκηση L08.pdf).

Εάν η ασυμμετρία (skew) >0.5 τότε υπάρχει πιθανότητα η κατανομή να μην είναι κανονική⁶. Βέβαια καλό είναι να μην ληφθούν υπόψη οι πολύ μεγάλες τιμές ή οι πολύ μικρές τιμές (outliers) γιατί επηρεάζουν πάρα πολύ (ανισοβαρώς) την τελική εκτίμηση του skew. Δηλαδή μια κατανομή μπορεί να παρουσιάζει skew > 0.5 και να είναι κανονική, επειδή στην εκτίμηση συμπεριλήφθηκαν οι ακραίες τιμές. Για την κυρτότητα δεν έχω βρει κριτήριο. Βέβαια όταν μελετάμε κατανομές σφάλματος στα γεωγραφικά πληροφορικά συστήματα προτιμούμε kurtosis >0 (Σχήμα 11) για να μην είναι η κατανομή πεπλατυσμένη. Δηλαδή θέλουμε η κατανομή σφάλματος να είναι όσο το δυνατόν γύρω από την μέση τιμή (και φυσικά η τάξη μεγέθους της μέσης τιμής να είναι μικρή). Σε γενικές γραμμές χρησιμοποιούμε τα ποσοτικά μέτρα σε συνδυασμό με την παράλληλη γραφική ερμηνεία της πραγματικής κατανομής συχνοτήτων σε σχέση με την αντίστοιχη κανονική κατανομή (Σχήμα 11).

Για τη χρονοσειρά με τα ετήσια ύψη βροχής που δόθηκε προηγουμένως έχουμε: Mean=238,9 mm, St.dev=43.9, Kurtosis=-01.65, Skew=0.178

Από την στιγμή που μια κατανομή είναι τότε το εμβαδόν της (ολοκλήρωμα) είναι ίσο με την μονάδα. Δηλαδή η πιθανότητα εμφάνισης βροχόπτωσης [120,180] mm είναι ίση με το εμβαδόν της περιοχής που ορίζει ο άξονας X, η καμπύλη κανονικής κατανομής και οι ευθείες (κάθετες στον X) που διέρχονται από τα σημεία 120, 190 m. Επιπλέον μπορούν να προσδιορισθούν διαστήματα εμπιστοσύνης και να γίνουν στατιστικοί έλεγχοι.

Προσοχή στις συνεχείς κατανομές πιθανότητας, η πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός (παράδειγμα \rightarrow ύψος βροχής ίσο με 200mm) θεωρητικά

είναι μηδέν. Μόνο η πιθανότητα το ύψος βροχής να υπερβεί ή να είναι μικρότερο από κάποια τιμή ορίζεται. Η περίοδος επαναφοράς (τα) ενός συγκεκριμένου μεγέθους για κάποιο υδρολογικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται το μέσο χρονικό διάστημα του οποίου το θεωρούμενο υδρολογικό φαινόμενο θα εμφανισθεί μια φορά με τιμή ίση ή μεγαλύτερη από το μέγεθος που έχει δοθεί.

Η περίοδος επαναφοράς είναι ίση με το αντίστροφο της ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης ($T_a=1/p$). Επικινδυνότητα (RISK) ορίζεται ως η πιθανότητα να γίνει υπέρβαση τουλάχιστον μια φορά στα επόμενα έτη και ισούται με : $R=(1-1/T)^n$

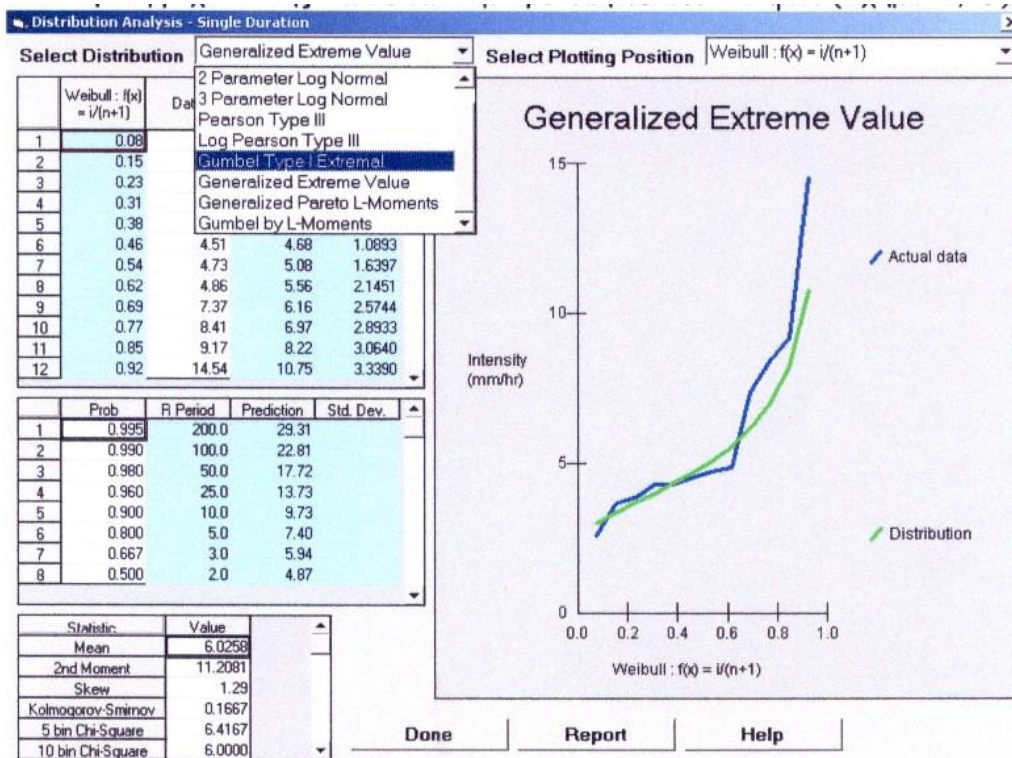
Παράδειγμα: με τι περίοδο επαναφοράς πρέπει να σχεδιασθεί έναν έργο έτσι ώστε η επικινδυνότητα να γίνει υπέρβαση των συντελεστών ασφάλειας του έργου στα επόμενα 5 χρόνια να είναι ίση με 10%; Απ.--> $R=1-(1-1/T)^n \Leftrightarrow 0.1=1-(1-1/T)^5 \Leftrightarrow T=48,1$ έτη

Κατανομή πιθανότητας των ακραίων τιμών: Η μελέτη της κατανομής πιθανότητας των μέγιστων ή ελάχιστων τιμών σε ένα χρονικό διάστημα (παράδειγμα ετήσιες μέγιστες τιμές βροχόπτωσης για την περίοδο 1950-2000) έχει ιδιαίτερη σημασία για την υδρολογία. Από την μελέτη της κατανομής πιθανότητας των ακραίων τιμών που λαμβάνονται από μια σειρά N δειγμάτων (π.χ. ετήσιες παρατηρήσεις την περίοδο 1950-2000) στο κάθε ένα των οποίων υπάρχουν m τιμές (μηνιαίες ή ημερήσιες παρατηρήσεις), προσδιορίσθηκε ότι εάν η αρχική κατανομή είναι κανονική τότε η κατανομή ακραίων τιμών τείνει προς την κατανομή Gumbel ή Κατανομή τύπου I όταν ο αριθμός του m είναι πολύ μεγάλος. Η συνάρτηση πιθανότητας της κατανομής Gumbel είναι η ακόλουθη:

$$p(x) = \frac{1}{c} e^{-y-e^{-y}}, -\infty < x < \infty, y = \frac{(a+x)}{c}, a, c = \text{σταθερές}$$

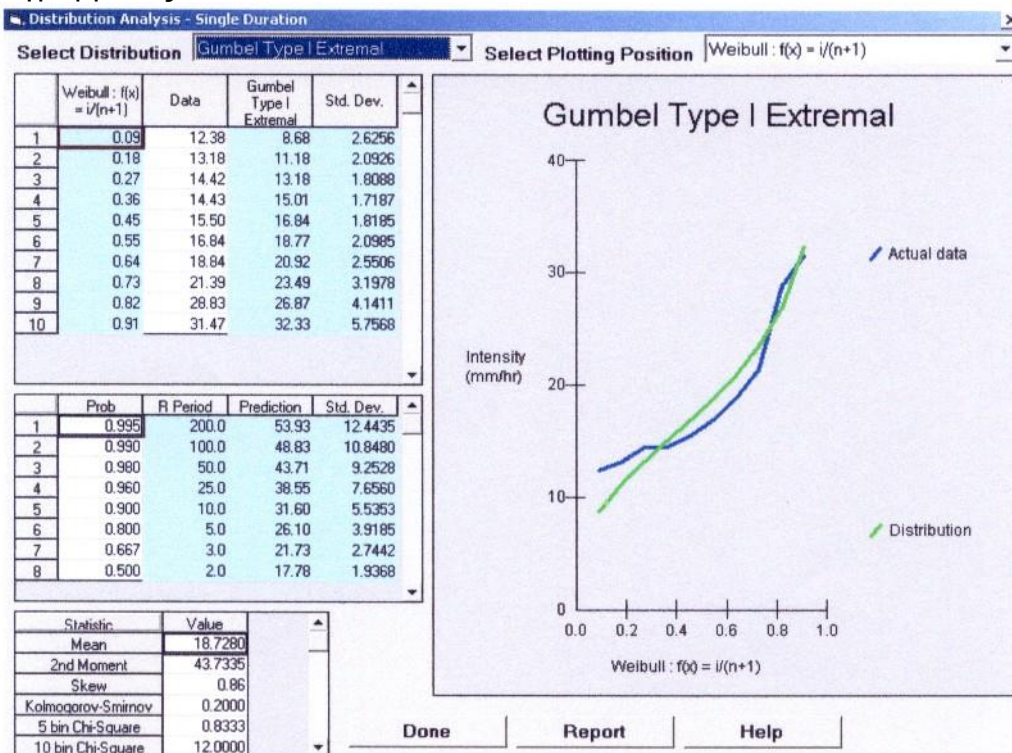
μέση τιμή $\mu=\gamma*c-a$ ($\gamma=0,577216$) και τυπική απόκλιση $\sigma=\pi*c/\sqrt{6}$

Εάν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση έχουν προσδιορισθεί από τα δεδομένα, τότε οι συντελεστές a και c προσδιορίζονται από την επίλυση των παραπάνω σχέσεων. Ανάλυση μέγιστων υψών βροχόπτωσης κατά Gumbel μπορεί να γίνει στο Rainplot (Σχήμα 18,19).



Σχήμα 18. Στατιστική ανάλυση με την κατανομή Gumbel: Generalized Value.

Το λογισμικό Rainplot, τα δεδομένα (πρόγραμμα EXACT) καθώς και οδηγίες χρήσης εγκατάστασης του προγράμματος RainPlot, είναι διαθέσιμα (δωρεάν) στους διαδικτυακούς τόπους της USGS και του ερευνητικού προγράμματος EXACT.



Σχήμα 19. Απεικονίζονται οι πραγματικές τιμές (raw data) καθώς και οι τιμές που προβλέπει η κατανομή (Gumbel Type I, Extremal).

Πιθανή Μέγιστη Βροχόπτωση (ΠΜΒ): Αντιπροσωπεύει ύψος βροχής που μπορεί να συμβεί μια φορά αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να ξεπεραστεί (εκτός εάν αλλάξουν οι κλιματολογικές συνθήκες).
 $PMB = mean + 15 * s$,
Όπου mean η μέση τιμή ετήσιων μέγιστων βροχοπτώσεων και s η τυπική απόκλιση

Βασίσθηκε στις παρατηρήσεις του Chow το 1951, ο οποίος γενίκευσε τις εξισώσεις που περιγράφουν την κατανομή της αθροιστικής πιθανότητας στα υδρολογικά φαινόμενα, θεωρώντας ότι μπορεί να αναπαρασταθεί από μια γραμμική σχέση που είναι συνάρτηση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης. Η σχέση έχει την μορφή

$$X = m_x + K * s_x,$$

Όπου X είναι η τιμή της στατιστικής μεταβλητής, m_x = μέση τιμή, s_x = τυπική απόκλιση και $K=0$ παράγοντας συχνότητας που είναι συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς.

6. Ένταση-Διάρκεια

Ανάλυση συχνότητας ραγδαίων βροχοπτώσεων. Η έννοια ραγδαία προσδιορίζεται ποσοτικά από την ένταση της βροχόπτωσης, ενώ περίοδος επαναφοράς είναι ο χρόνος στον οποίο επανεμφανίζεται μια ραγδαία βροχόπτωση. Η ανάλυση συχνότητας βασίζεται στην μελέτη του υετογράμματος (διάγραμμα του ύψους βροχόπτωσης ως συνάρτηση του χρόνου, εναλλακτικά η καταγραφή μπορεί να έχει την μορφή αθροιστικής καμπύλης → υετόγραμμα στο οποίο εμφανίζεται το συνολικό ύψος βροχής). Η κλίση της γραμμής του υετογράμματος προσδιορίζει την ένταση της βροχής.

Η ανάλυση συχνότητας των ραγδαίων βροχοπτώσεων ενός σταθμού περιλαμβάνει:

- Από το υετόγραμμα προσδιορίζεται η μέγιστη ένταση (ή το μέγιστο ύψος) βροχής για διάφορα διαστήματα αναφοράς. Τα διαστήματα αναφοράς είναι χρονικά διαστήματα με μέγεθος μικρότερο από την συνολική διάρκεια της βροχής. Δηλαδή ο συνολικός χρόνος βροχόπτωσης διαμερίζεται σε υποσύνολα (διαστήματα αναφοράς παράδειγμα 10 λεπτά, 20 λεπτά, 30 λεπτά,, κ.α.) με σταθερή διάσταση. Σε κάθε διάστημα (παράδειγμα σε όλα τα διαστήματα 30 λεπτών) υπολογίζεται η ένταση. Η μέγιστη τιμή έντασης για μια συγκεκριμένη διαμέριση, όπως για παράδειγμα την διαμέριση 1 ώρας, αντιπροσωπεύει την μέγιστη τιμή έντασης για διάστημα αναφοράς ίσο με 1 ώρα.
- Κατά αυτό τον τρόπο προκύπτουν ζεύγη τιμών της μορφής (διάστημα αναφοράς, μέγιστη ένταση). Στην συνέχεια τα ζευγάρια κατά φθίνουσα τάξη και υπολογίζεται η περίοδος επαναφοράς κάθε ζεύγους από τον τύπο $T = (N+1/M) \{P=1/T\alpha\}$ όπου N ο συνολικός αριθμός των ζευγών M η σειρά στην οποία είναι ταξινομημένη η

παρατήρηση. Έτσι προκύπτουν τριάδες αριθμών της μορφής ένταση-διάρκεια-συχνότητα.

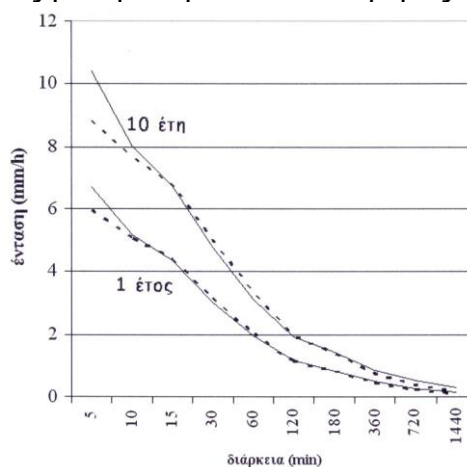
- Τελικά συντάσσονται διάγραμμα της έντασης σαν συνάρτηση της διάρκειας με την περίοδο επαναφοράς ως παράμετρο. Κατά αναλογία μπορούν να συνταχθούν διαγράμματα της έντασης σαν συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς με την διάρκεια ως παράμετρο. Τα δεδομένα ενός σταθμού μόνο, μόνο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μελέτες υδρολογικών λεκανών έκτασης <math> < 15 \text{ km}^2 </math> .

Για διάρκεια (t) βροχής $t < 2$ ώρες ισχύει η σχέση του Talbot: $i = a/(b+t)$. Για μεγαλύτερης διάρκειας βροχοπτώσεις ισχύει η σχέση του Bernard $i = K \cdot T^m / t^n$. (i=ένταση, t=διάρκεια, T=περίοδος επαναφοράς, K,m,n = σταθερές).

Παράδειγμα 1. Έστω ότι έχουν προσδιορισθεί τα παρακάτω δεδομένα (πίνακας που ακολουθεί). Να προσδιορισθεί το διάγραμμα έντασης σαν συνάρτηση της διάρκειας με την περίοδο επαναφοράς ως παράμετρο.

Διάρκεια (minutes)	Ένταση για περίοδο επαναφοράς 1 έτος (mm/h)	Ένταση για περίοδο επαναφοράς 10 έτη (mm/h)
5	6.720	10.44
10	5.160	8.04
15	4.360	6.76
30	3.020	4.8
60	1.950	3.1
120	1.150	1.9
180	0.833	1.43
360	0.483	0.867
720	0.275	0.517
1440	0.163	0.3

Παρατηρούμε ότι η διάρκεια είναι μικρότερη από δυο ώρες άρα θεωρούμε την σχέση του Talbot: $i = a/(b+t)$, η οποία μπορεί να γραφεί ως $1/i = t/a + b/a \Leftrightarrow 1/i = t \cdot A + B$ (όπου $A = 1/a$ και $B = b/a$). Η επίλυση της $[t \cdot A + B + (-1/i) = 0]$ μπορεί να γίνει στο EXCEL με γραμμική παλινδρόμηση (REGRESSION). Προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα έντασης σαν συνάρτηση της διάρκειας με την περίοδο επαναφοράς ως παράμετρο.



Σχήμα 20. Διάγραμμα έντασης-διάρκειας με την περίοδο επαναφοράς ως παράμετρο.

Παράδειγμα 2. Δίνονται τα μέγιστα ύψη για διάρκεια ίση με 3 ώρες στον πίνακα που ακολουθεί. Ζητείται να γίνει η καμπύλη έντασης-περιόδου επαναφοράς.

Έτος	Μέγιστο ύψος (mm)
1990	23.6
1993	26.6
2001	28
1983	28.9
1991	29.9
1984	30.4
1987	31
2000	31.3

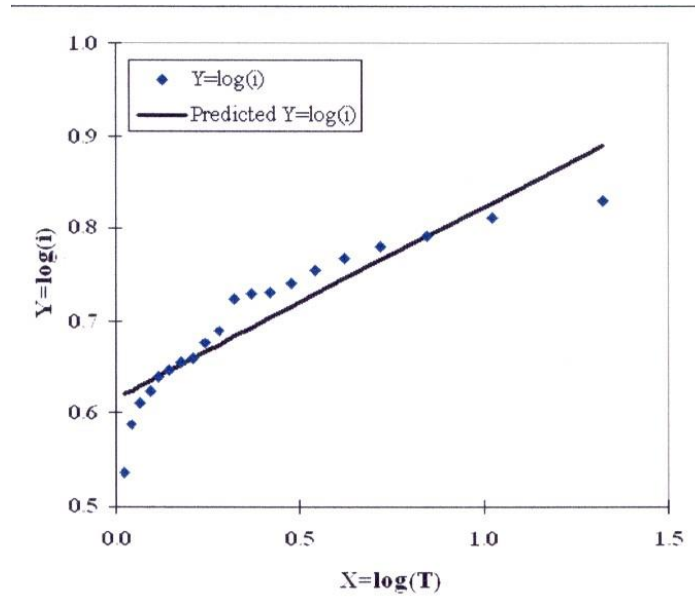
Έτος	Μέγιστο ύψος (mm)
1995	32.5
1988	33.5
1992	36.3
1997	36.8
1996	36.9
1998	37.6
1989	38.9
2002	40.1

Έτος	Μέγιστο ύψος (mm)
1985	41.4
1986	42.4
1999	44.5
1994	46.4

Από την επεξεργασία που περιγράψαμε στην αρχή προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας.

Ένταση- i (mm/h, διάταξη κατά φθίνουσα σειρά)	M	Περίοδος επαναφοράς σε έτη $T=(N+1)/M$	$X=\log(T)$	$Y=\log(i)$
11.8	1	21.000	1.322	1.072
13.3	2	10.500	1.021	1.124
14	3	7.000	0.845	1.146
14.45	4	5.250	0.720	1.160
14.95	5	4.200	0.623	1.175
15.2	6	3.500	0.544	1.182
15.5	7	3.000	0.477	1.190
15.65	8	2.625	0.419	1.195
16.25	9	2.333	0.368	1.211
16.75	10	2.100	0.322	1.224
18.15	11	1.909	0.281	1.259
18.4	12	1.750	0.243	1.265
18.45	13	1.615	0.208	1.266
18.8	14	1.500	0.176	1.274
19.45	15	1.400	0.146	1.289
20.05	16	1.313	0.118	1.302
20.7	17	1.235	0.092	1.316
21.2	18	1.167	0.067	1.326
22.25	19	1.105	0.043	1.347
23.2	20	1.050	0.021	1.365

Η καμπύλη έντασης-περιόδου επαναφοράς είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 21. Ένταση-Περίοδος επαναφοράς για διάρκεια ίση με 2 ώρες (και η προσέγγιση της με μια ευθεία.

Εάν η σχέση που συνδέει την ένταση με την περίοδο επαναφοράς (Bernard) είναι η $i = K \cdot T^m / t^n$ στην προκειμένη περίπτωση $\Leftrightarrow i = \{K/3^n\} \cdot T^m \Leftrightarrow$

$$i = C \cdot T^m \text{ εάν λογαριθμήσουμε τότε } \log i = \log c + m \cdot \log T$$

Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που προσεγγίζει τα δεδομένα (Σχήμα19) είναι η ακόλουθη: $Y = 0.616 + 0.206 \cdot \log T$ άρα

$$\log C = 0.616 \text{ και } m = 0.206 \Leftrightarrow i = 4.13 T^{0.206} .$$

Άρα είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η ένταση για περίοδο επαναφοράς (παράδειγμα T=3 ή 5 ή 10 έτη κ.α.) με εφαρμογή της σχέσης $i = 4.13 T^{0.206} .$

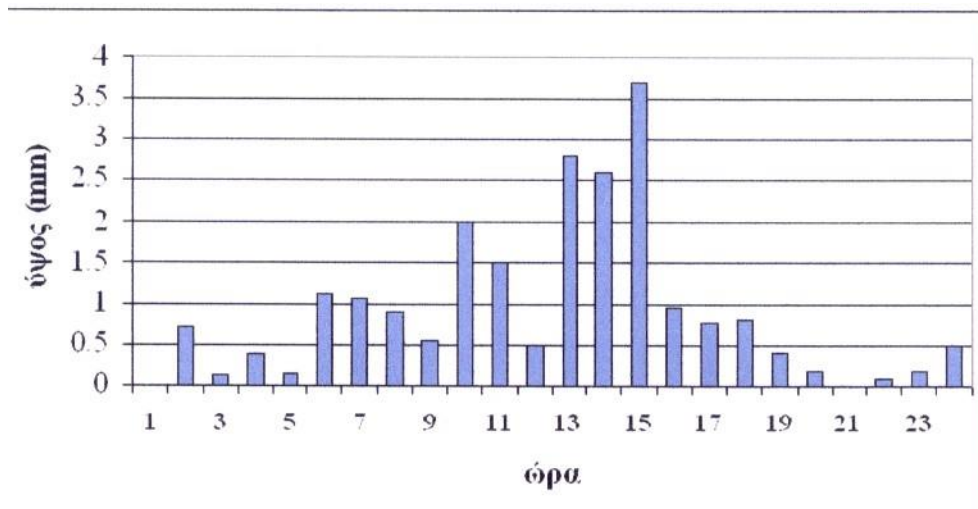
Παράδειγμα 3. Δίνεται η καταγραφή μιας βροχόπτωσης στον πίνακα (οι δυο πρώτες στήλες) που ακολουθεί. Να προσδιορισθεί η μέγιστη ένταση για διαστήματα αναφοράς 1,2,3,4,6,8,12, και 24 ώρες να παρουσιασθούν διαγραμματικά τα υετογράμματα για διαστήματα μια και δύο ώρες από την στιγμή έναρξης της βροχής).

Χρόνος	Αθροιστικό ύψος βροχής (mm)	Ύψος βροχής (mm) για διάρκεια (h)							
		1	2	3	4	6	8	12	24
1	0								
2	0.7	0.7							
3	0.82	0.12	0.82						
4	1.21	0.39	0.51	1.21					
5	1.35	0.14	0.53	0.65	1.35				
6	2.47	1.12	1.26	1.65	1.77	2.47			
7	3.54	1.07	2.19	2.33	2.72	3.54			
8	4.45	0.91	1.98	3.1	3.24	3.75	4.45		
9	5	0.55	1.46	2.53	3.65	4.18	5		
10	7	2	2.55	3.46	4.53	5.79	6.3		
11	8.5	1.5	3.5	4.05	4.96	7.15	7.68		
12	9	0.5	2	4	4.55	6.53	7.79	7	
13	11.8	2.8	3.3	4.8	6.8	8.26	10.45	8.5	
14	14.4	2.6	5.4	5.9	7.4	9.95	11.93	8.3	
15	18.1	3.7	6.3	9.1	9.6	13.1	14.56	10.98	
16	19.05	0.95	4.65	7.25	10.05	12.05	14.6	13.19	
17	19.8	0.75	1.7	5.4	8	11.3	14.8	16.75	
18	20.6	0.8	1.55	2.5	6.2	11.6	13.6	16.58	
19	21	0.4	1.2	1.95	2.9	9.2	12.5	16.26	
20	21.2	0.2	0.6	1.4	2.15	6.8	12.2	16.15	
21	21.2	0	0.2	0.6	1.4	3.1	9.4	16	
22	21.3	0.1	0.1	0.3	0.7	2.25	6.9	14.2	
23	21.5	0.2	0.3	0.3	0.5	1.7	3.4	12.7	
24	22	0.5	0.7	0.8	0.8	1.4	2.95	12.3	22.00

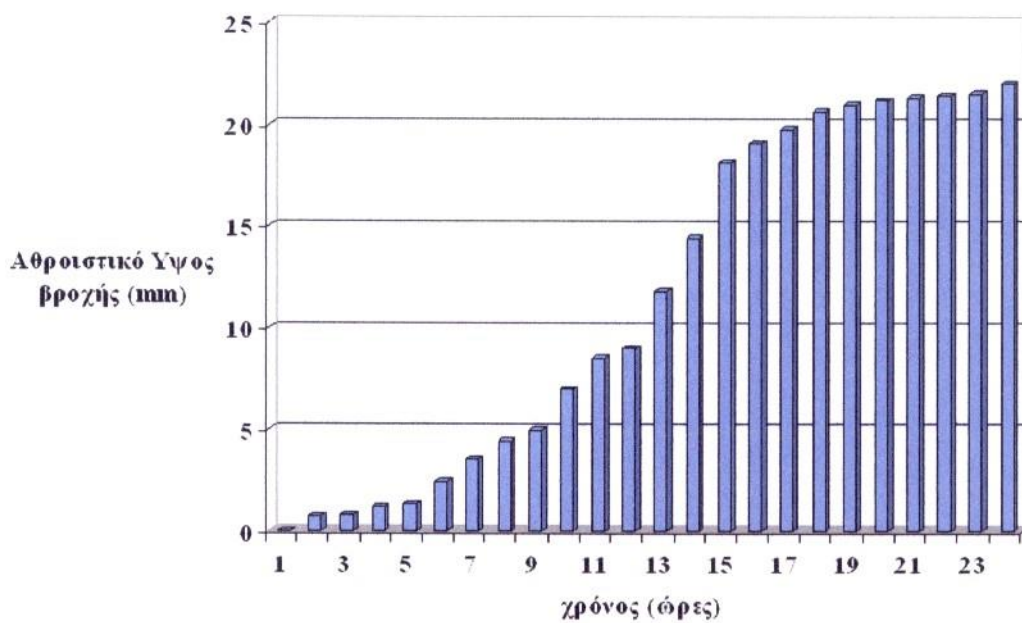
Το συνολικό ύψος βροχής είναι 22mm σε διάρκεια 24 ωρών(βέβαια την 21 ώρα το αθροιστικό ύψος βροχής είναι 0 που σημαίνει ότι υπήρξε μια διακοπή της βροχόπτωσης για 1 ώρα). Τα μέγιστα ύψη βροχής για την αντίστοιχη διάρκεια έχουν σημειωθεί με έντονη γραφή στον προηγούμενο πίνακα. Από τον προηγούμενο πίνακα. Από τον προηγούμενο πίνακα μπορεί να προσδιορισθεί η μέγιστη ένταση ανά συγκεκριμένη διάρκεια, όπως φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Διάρκεια (h)	Μέγιστο ύψος (mm)	Ένταση (mm/h)
1	3.7	3.700
2	6.3	3.150
3	9.1	3.033
4	10.05	2.513
6	13.1	2.183
8	14.8	1.850
12	16.75	1.396
24	22	0.917

Το υετόγραμμα για 1 ώρα προκύπτει από την 3 στήλη του προηγούμενου πίνακα.



Σχήμα 22. Υετόγραμμα (ανά μία ώρα)



Σχήμα 23. Αθροιστική καμπύλη της βροχόπτωσης.

ΑΠΟΡΡΟΗ

Στόχος: Ο προσδιορισμός της χρονικής διαφοροποίησης της απορροής σε μία λεκάνη με την ανάλυση του υδρογραφήματος. Αναγωγή του υδρογραφήματος σε μοναδιαίο και ο προσδιορισμός του συνθετικού υδρογραφήματος όταν δεν υπάρχουν ποσοτικά στοιχεία για την απορροή.

Περιεχόμενα

1. Γεωμορφολογία λεκάνης & απορροή

Συντελεστής Απορροής

Χρόνος Συρροής

Υδρομέτρηση

Προσδιορισμός της απορροής

2. Πλημμυρική Απορροή

3. Πλημμυρικές Εισροές

3.1 Γένεση θαλάσσιων σεισμικών κυμάτων

3.2 Ταξίδι μιας σταγόνας νερού από την ακτογραμμή στο μέγιστο ύψος συσσώρευσης

3.3 Δυναμική ενέργεια στήλης νερού με ύψος H από την επιφάνεια του εδάφους

3.4 Μελέτη – Προσομοίωση

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Συντελεστής απορροής. Ορισμός , πως μπορεί να προσδιορισθεί.
2. Μηκοτομή. Ορισμός, υδρολογικές εφαρμογές.
3. Χρόνος συρροής. Ορισμός και από ποια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής εξαρτάται.
4. Δυο λεκάνες παρουσιάζουν, η μία μικρό χρόνο συρροής και η άλλη μεγάλο. Ποιες οι διαφορές στην απορροή; Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.
5. Θαλάσσια σεισμικά κύματα. Πως μπορούν να μελετηθούν οι επιπτώσεις στην παράκτια ζώνη με χρήση της υψομετρικής καμπύλης; Ποια είναι η κλίμακα του τοπογραφικού χάρτη που είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί για να μελέτη των πιθανών επιπτώσεων των θαλάσσιων σεισμικών κυμάτων στην παράκτια ζώνη και γιατί;
6. Ποιες οι 4 συνιστώσες της απορροής στο σημείο εκβολής (έξοδο) μιας λεκάνης και πως συνδέονται με βάση τις συνθήκες που περιέγραψε ο Horton;
7. Ποια η μορφολογία του υδρογραφήματος πλημμύρας και πως διαχωρίζεται η άμεση από την βασική απορροή;
8. Προσδιορισμός μοναδιαίου υδρογραφήματος. Περιγραφή και απαιτούμενα δεδομένα.

<p>9. Δίνεται το υδρογράφημα (διάρκεια, παροχή) στο σημείο εκβολής μιας λεκάνης (με έκταση 3,06 km²) για μια βροχόπτωση (με συνολικό ύψος βροχής 306mm).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Να προσδιορισθεί η παροχή στο σημείο αιχμής του υδρογραφήματος εάν σας δοθεί ότι ο συντελεστής απωλειών της λεκάνης ισούται με 0,673. 	Υδρογράφημα	Χρόνος (hr)	Απορροή (m³/sec)
		1	10
		2	15
		3	25
		4	-----
		5	35
		6	15
		7	10
<p>10. Δίνεται το υδρογράφημα (διάρκεια, παροχή) στο σημείο εκβολής μιας λεκάνης (με έκταση 3,06 km²) για μια βροχόπτωση. Ο συντελεστής απωλειών της λεκάνης είναι ίσος με 0,673.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Να προσδιορισθεί το ύψος της βροχόπτωσης στην οποία οφείλεται η άμεση απορροή. 	Υδρογράφημα	Χρόνος (hr)	Απορροή (m³/sec)
		1	10
		2	15
		3	25
		4	40
		5	35
		6	15
		7	10

1. Γεωμορφολογία λεκάνης & απορροή

Συντελεστής Απορροής.

Η επιφανειακή απορροή αποτελεί το τμήμα των βροχοπτώσεων που εμφανίζεται στα επιφανειακά ρεύματα είτε είναι παροδικού είτε μόνιμου χαρακτήρα, Η άμεση απορροή είναι αυτή που περιγράφεται σε ρεύματα αμέσως μετά την βροχόπτωση και είναι συνάρτηση τόσο της επιφανειακής όσο και της υπόγειας απορροής. Η βασική απορροή συνίσταται από την ροή των ρευμάτων στα διαστήματα μεταξύ των βροχοπτώσεων και αποτελείται κυρίως από την υπόγεια απορροή. Ο συντελεστής απορροής είναι ο λόγος της ποσότητας του νερού που εκρέει από το σημείο της εκβολής μιας λεκάνης προς το ύψος της βροχής που έπεσε στην λεκάνη σε μια δεδομένη χρονική περίοδο.

Παράδειγμα: Έστω ότι η μέση ετήσια παροχή στο σημείο εκβολής της λεκάνης είναι ίσο με $Q=50\text{m}^3/\text{sec}$, ενώ το μέσο ύψος βροχής είναι $i=1200\text{mm}$ ενώ η έκταση της λεκάνης είναι $A=5000\text{km}^2$.

Η παροχή θα εκφρασθεί σε ύψος (mm) ανά μονάδα επιφάνειας (1m^2).

Συνολικός όγκος νερού (V):

$$V = Q * T \leftrightarrow 50(\text{m}^3/\text{sec}) * 365 (\text{ημέρες}) * 24 * 60 * 60(\text{sec}/\text{ημέρα}) \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow V = 1577 * 10^6 \text{m}^3 / \text{χρόνο}$$

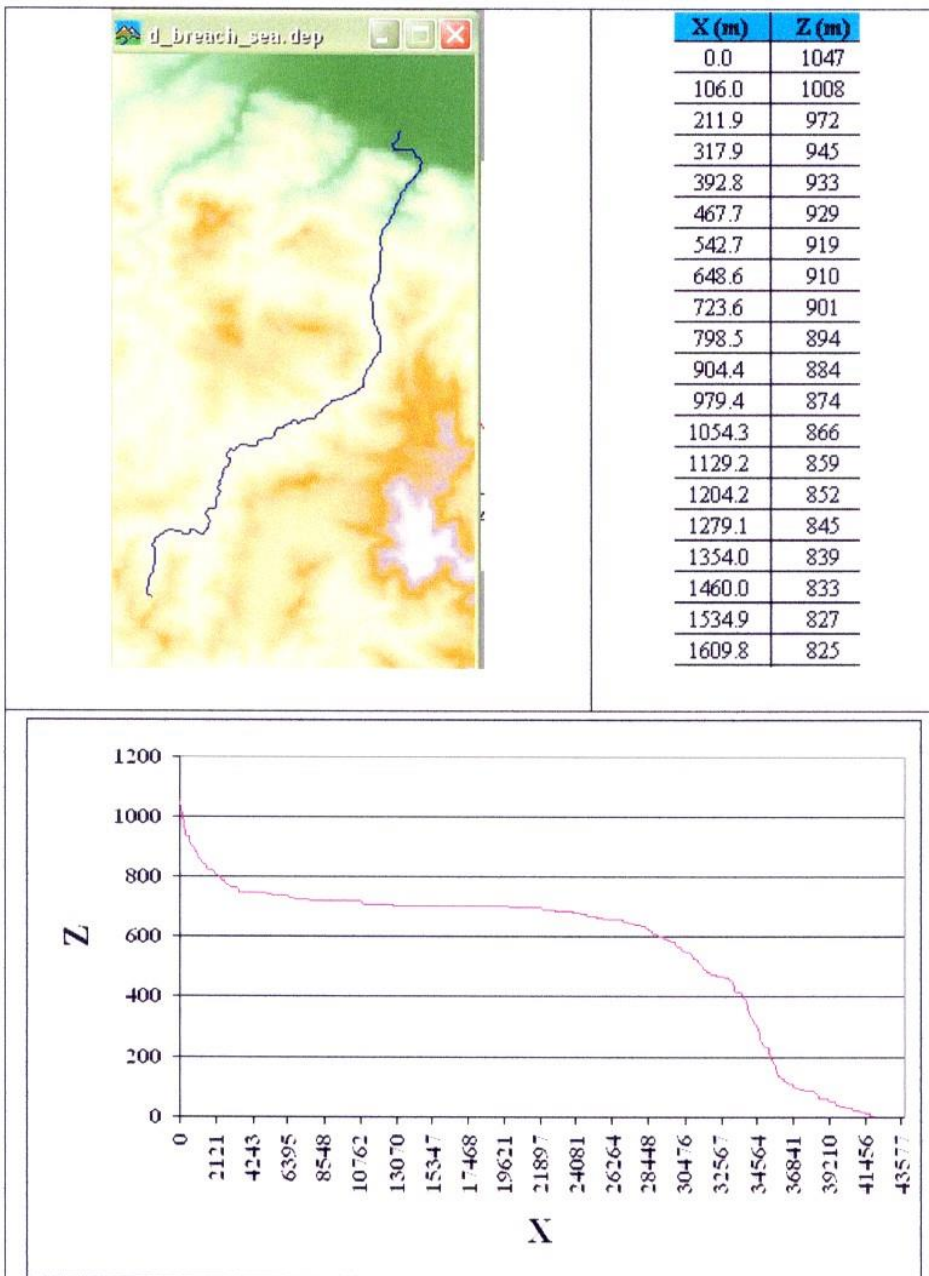
Ύψος παροχής ανά μονάδα επιφάνειας: $V / A = 1577 / 5000\text{m} = 315 \text{mm}$

Συντελεστής απορροής (C): $C = 315 / 1200 \leftrightarrow C = 0.263$

Η μορφοποίηση μιας λεκάνης προσδιορίζει χρήσιμες παραμέτρους που συσχετίζονται με την υδρολογική της ανάλυση (προσδιορισμός της απορροής κ.α.).

- Εμβαδόν λεκάνης: καθορίζει δυνητικά την ποσότητα του νερού που δέχεται η λεκάνη και άρα δίνει μια εκτίμηση της ποσότητας του νερού που απορρέει στο σημείο εκβολής της.
- Μέσο υψόμετρο λεκάνης συσχετίζεται με το ύψος της βροχής που δέχεται η λεκάνη.
- Μέγιστο-Ελάχιστο υψόμετρο(basin relief): συσχετίζεται με τη μέση κλίση της λεκάνης αλλά δίνει και μια εκτίμηση για την δυναμική ενέργεια του όγκου νερού που προσπίπτει στην λεκάνη.
- Υψομετρικό Ολοκλήρωμα. Καθορίζει το ποσοστό της υδροστρωματοροής σε σχέση με την κατευθυνόμενη απορροή κατά μήκος κλάδων του υδρογραφικού δικτύου.
- Μέση κλίση λεκάνης. Δίνει μια εκτίμηση για την ταχύτητα απορροής, για τη διαβρωτική ικανότητα και την ικανότητα του νερού να μεταφέρει φερτές ύλες.
- Υδρογραφική πυκνότητα. Όταν είναι μεγάλη τότε δημιουργούνται πολύ μεγάλης ταχύτητας απορροές στο σημείο εκβολής της λεκάνης με συνέπεια να αυξάνεται η παροχή, να δημιουργούνται πλημμυρικές αιχμές και να αυξάνει η μεταφερόμενη ποσότητα φερτών υλικών.
- Σχήμα. Όσο πιο επιμήκης είναι μια λεκάνη τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος συγκέντρωσης, και άρα μειώνεται η παροχή.

- Μηκοτομή. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ποσοτικοποίηση της ροής σε ένα ρεύμα. Συνίσταται από μια υψομετρική τομή κατά μήκος του κλάδου μεγαλύτερης τάξης του υδρογραφικού δικτύου ή κατά μήκος ενός συγκεκριμένου κλάδου. Η μελέτη της βασίζεται τόσο στα υψομετρικά της χαρακτηριστικά όσο και στο μέτρο της κλίσης. Πολλές φορές προσδιορίζονται διατομές (κάθετα στην διεύθυνση της μηκοτομής) για να προσδιοριστεί η σχέση στάθμης-παροχής(η ταχύτητα απορροής είναι συνάρτηση του μέτρου της κλίσης ενώ ο όγκος νερού προσδιορίζεται από το εμβαδόν των διατομών). Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται το ίχνος του ρεύματος και η αντίστοιχη μηκοτομή (ποσοτικά και γραφικά).



Σχήμα1. Μηκοτομή. Η απόσταση έχει μετρηθεί από το αρχικό σημείο με σταθερό βήμα και κατά την φορά της ροής.

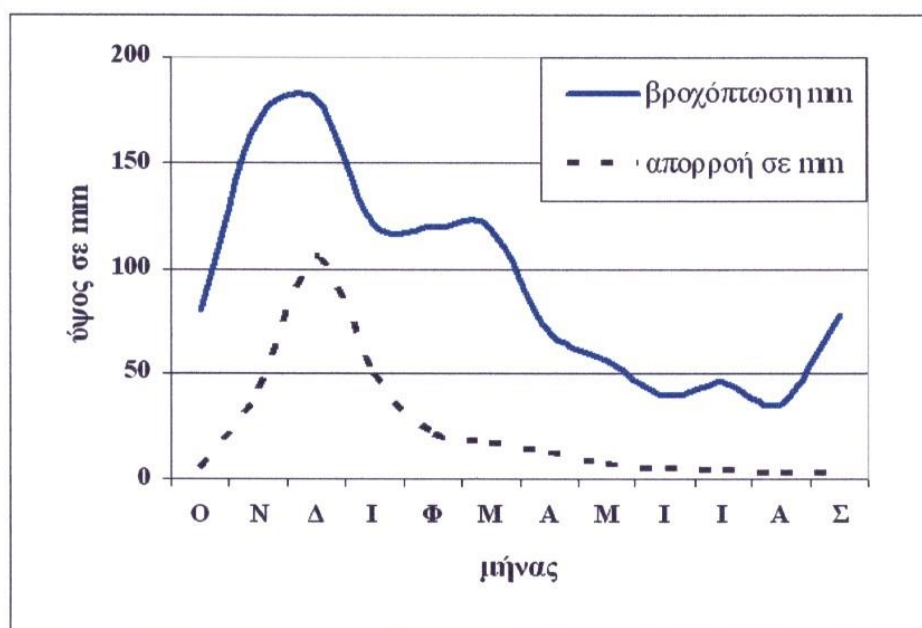
Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή είναι:

Η βλάστηση(που είναι συνάρτηση του κλίματος και της εποχής).

Η χρήση γης (αστική γη, αγροτική γη, κ.α.).

Λιθολογία(θερμοκρασία, υγρασία που συνδέονται με την εξατμισοδιαπνοή, την βροχόπτωση, κ.α.)

Χωρική και χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων. Η συσχέτιση μεταξύ βροχοπτώσεων και απορροών.



Σχήμα 2. Συσχέτιση μεταξύ μηνιαίου ύψους βροχόπτωσης και απορροής.

1.2 Χρόνος Συρροής

Όταν ξεκινήσει μια βροχόπτωση τότε θα περάσει ένα χρονικό διάστημα(T_a) μέχρι να αρχίσει το νερό να απορρέει. Ο χρόνος αυτός είναι συνάρτηση της ποσότητας συγκράτησης από φυτά και βυθίσματα, της διήθησης κ.α. Όταν σχηματισθεί μια κορεσμένη επιφάνεια αρχίζει η απορροή και απαιτείται χρονικό διάστημα T_1 για να φθάσει το νερό στην διατομή ενός ρεύματος. Ο συνολικός χρόνος $T_0 = T_a + T_1$ λέγεται **χρόνος συρροής**.

Για τον προσδιορισμό του χρόνου συρροής έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις όπως:

- Σχέση Giandotti, $T_0 = \frac{4 * \sqrt{A} + 1.5 * L}{0.8 * \sqrt{H}}$
- Σχέση Kirpich, $T_0 = 0,00025 * L^{0.8} / \sqrt{G}$
- $T_0 = L^{.15} / (7700 * H^{.38})$

όπου T_0 = χρόνος συγκέντρωσης σε ώρες

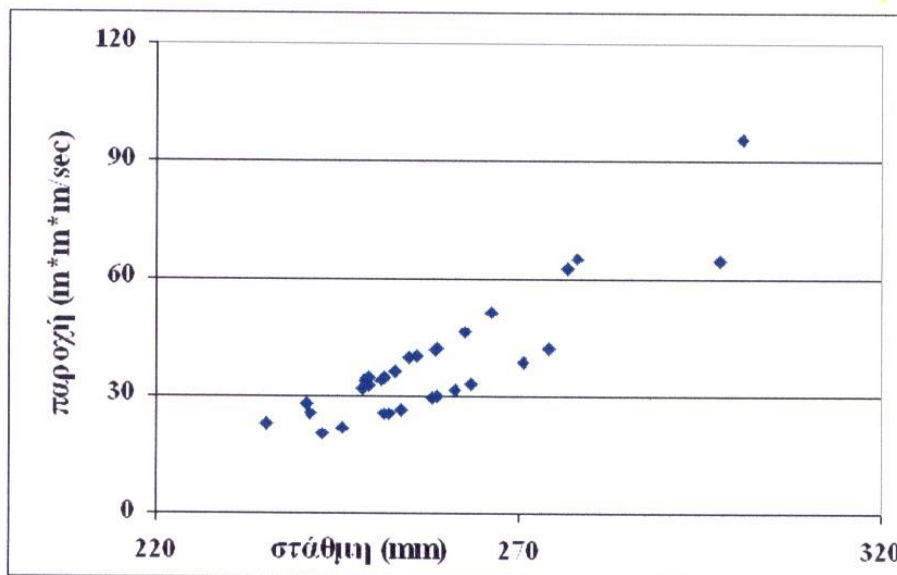
A = το εμβαδόν της λεκάνης σε km^2 , L = το μήκος του κύριου ρεύματος σε km (το μήκος της λεκάνης, κύριος άξονας), H = διαφορά του μέσου

υψομέτρου από το υψόμετρο στο σημείο εκβολής (m), $G = \eta$ μέση κλίση (m/m)

1.3 Υδρομέτρηση

Διεξάγεται σε υδρομετρικούς σταθμούς. Είναι ο προσδιορισμός της παροχής (Q) σε μια διατομή (εμβαδού A) ενός ρεύματος. Δίνεται από την σχέση $Q=A \cdot V$, όπου V η μέση ταχύτητα ροής από την διατομή A. Η μέτρηση της ταχύτητας ροής μπορεί να γίνει με α) μιλίσκο, β) με χημική μέθοδο (σε 2 διαδοχικές διατομές), γ) με την μέθοδο κλίσεων-επιφάνειας.

Οι μετρήσεις των απορροών συνίσταται βασικά στην μέτρηση της στάθμης. Επομένως η σχέση μεταξύ στάθμης και παροχής(μπορεί η σχέση να μην είναι αμφιμονοσήμαντη) είναι πολύ σημαντική αφού επιτρέπει τον προσδιορισμό της παροχής.



Σχήμα 3. Μη αμφιμονοσήμαντη σχέση μεταξύ στάθμης – παροχής.

Στην περίπτωση που η σχέση δεν είναι μονοσήμαντη (Σχήμα3), η μέση παροχή προκύπτει από την μέση τιμή της μέγιστης (άνω καμπύλη) και ελάχιστης παροχής (κάτω καμπύλη) και ονομάζεται μέση καμπύλη ομοιόμορφης ροής.

Από την άλλη πλευρά η καμπύλη στάθμης –παροχής δεν καλύπτει όλο το εύρος των εμφανιζομένων τιμών σε ένα ρεύμα, επειδή βασίζεται στις μεμονωμένες μετρήσεις υδρομετρικών σταθμών. Η επέκταση της καμπύλης στάθμης – παροχής μπορεί να γίνει εάν θεωρηθεί ότι η σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων είναι παραβολική: $Q=k(h-a)^m$, όπου

$$Q = \eta \text{ παροχή}, h = \eta \text{ στάθμη}$$

$a =$ ίσο με το υψόμετρο της στάθμης εάν η παροχή είναι ίση με μηδέν
 $k, a =$ σταθερές

Μια άλλη μέθοδος (Stevens) βασίζεται στην εξίσωση του Chezy από την οποία προκύπτει ότι η παροχή $Q=k \cdot f$, όπου $k =$ σταθερά ενώ $f = A \cdot D^{2/3}$, $D =$ είναι το μέσο βάθος ροής, $A =$ εμβαδόν διατομής. Η σχέση $Q=k \cdot f$ είναι γραμμική και επιτρέπει την επέκταση της καμπύλης στάθμης – παροχής.

1.4 Προσδιορισμός της απορροής

Έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις όπως:

$$Q = \sigma * H * E / T_0$$

Q = παροχή σε m³/sec, H = το ύψος βροχής σε m, E = εμβαδόν λεκάνης σε km², T₀ = χρόνος συρροής σε sec

$$\sigma = 0,02 + (1/\sqrt{E})$$

Η πιο ενδεδειγμένη προσέγγιση βασίζεται στην μελέτη του υδρογραφήματος που δίνει μετρήσεις της παροχής σαν συνάρτηση του χρόνου. Από το υδρογράφημα προσδιορίζεται η μέση ημερήσια παροχή (για διάστημα 24 ωρών). Ο μέσος όρος των ημερήσιων παροχών προσδιορίζει την μέση μηνιαία παροχή. Κατά αντιστοιχία προσδιορίζεται η μέση ετήσια παροχή. Συνήθως δημοσιεύονται οι μέσες ημερήσιες ή οι μέσες μηνιαίες παροχές που εκφράζονται.

Ανομοιογένεια των μετρήσεων μπορεί να προέλθει από αλλαγή της μεθόδου μέτρησης, κ.α. Ο έλεγχος της ανομοιογένειας γίνεται με την διπλή αθροιστική καμπύλη. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται υδρομετρικοί σταθμοί των οποίων οι μετρήσεις είναι ομοιογενείς.

Η μεταβλητότητα της παροχής χρησιμοποιείται κατά την μελέτη υδραυλικών έργων και μπορεί να εκφρασθεί είτε με την καμπύλη διάρκειας της παροχής (ανάλογη με την σχέση ύψους βροχόπτωσης – διάρκειας) είτε με την αθροιστική καμπύλη της απορροής ως συνάρτηση του χρόνου που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την προμελέτη των ταμιευτηρίων νερού.

Η κλίση της αθροιστικής καμπύλης της απορροής σε δεδομένη χρονική στιγμή παριστά την παροχή του ρεύματος σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η διαφορά δύο τεταγμένων παριστά τον όγκο του νερού που διήλθε το χρονικό διάστημα (η διαφορά δύο τετμημένων). Η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει δύο σημεία της αθροιστικής καμπύλης εκφράζει την μέση απορροή στο διάστημα αυτό.

2. Πλημμυρική Απορροή

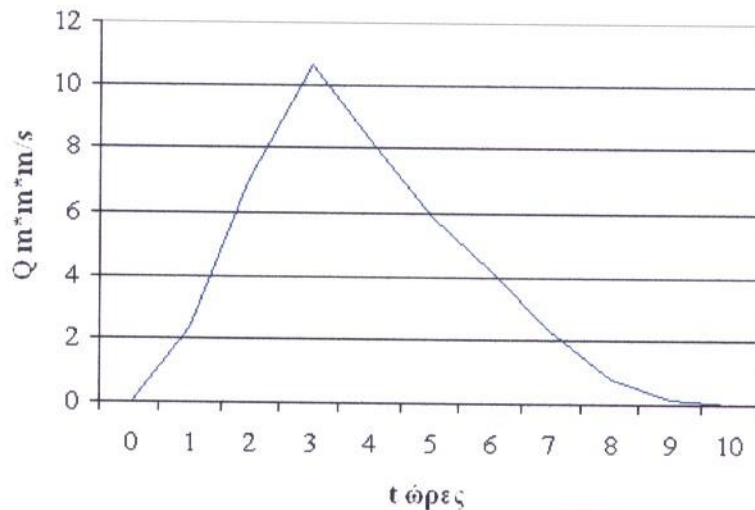
Πλημμυρική απορροή είναι η απορροή που στο μεγαλύτερο μέρος της συνιστάται από τα νερά της άμεσης απορροής και κυρίως από αυτά της επιφανειακής απορροής. Χαρακτηρίζεται από υψηλή ένταση απορροή με διάρκεια από λίγες ώρες μέχρι λίγες ημέρες. Οι βασικές αρχές μιας πλημμυρικής απορροής είναι οι ακόλουθες:

1. Σε μία λεκάνη, βροχοπτώσεις ίδιας διάρκειας και ομοιόμορφες σε ένταση και χωρική κατανομή, παράγουν απορροές με την ίδια διάρκεια αλλά με διαφορετικό όγκο απορροής.
2. Σε μία λεκάνη, διαφορετικές σε ένταση βροχοπτώσεις με την ίδια διάρκεια, παράγουν υδρογραφήματα στα οποία η διαφορά στην απορροή σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι ανάλογη του λόγου της έντασης των βροχοπτώσεων.

Το υδρογράφημα μίας πλημμύρας (Σχήμα 4) αποτελείται από τρεις κλάδους α) ανιόν κλάδος, β) περιοχή κορυφής, γ) κατιόν κλάδος.

- Η μορφή του ανιόντος κλάδου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης όσο και από τα χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης (λιθολογία, γεωμορφομετρία, κ.α.).

- ο Το σημείο αλλαγής της καμπυλότητας (η κορυφή) σε γενικές γραμμές υποδηλώνει το τέλος των επιφανειακών εισροών στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης και συμβαίνει χρονικά συνήθως λίγο μετά το τέλος της βροχόπτωσης. Η χρονική διαφορά μεταξύ του τέλους της βροχόπτωσης και της κορυφής (αιχμή) του υδρογραφήματος, λέγεται **χρονική επιβράδυνση(t_R)** της λεκάνης απορροής. **Χρονική βάση (T)** του υδρογραφήματος είναι η χρονική περίοδος που λαμβάνει χώρα η επιφανειακή απορροή στο σταθμό υδρομέτρησης. Η αρχή του T συμπίπτει με την αρχή του ανιόντος κλάδου (και με την αρχή της βροχόπτωσης συνήθως). Ισχύει η σχέση **$T = t_R + T_0$** (όπου $T_0 =$ ο χρόνος συρροής).
- ο Ο κατιόν κλάδος περιλαμβάνει απορροή που προέρχεται από αποθηκευμένα νερά(επιφανειακά ή υπόγεια) στην λεκάνη.



Σχήμα 4. Υδρογράφημα

Η απορροή στο σημείο εκβολής (έξοδο) μιας λεκάνης αποτελείται από 4 συνιστώσες: α) επιφανειακή, β) υπόγεια, γ) υπεδάφια και δ) την βροχή που πέφτει απευθείας στους κλάδους των υδρογραφικών δικτύων(που από πλευράς ποσοτικής είναι αμελητέα).

Ας θεωρήσουμε τους παρακάτω παράγοντες:

1. Έλλειμμα εδαφικής υγρασίας (h_p) = Υδατο-ικανότητα-υφιστάμενη υγρασία σε δεδομένη χρονική στιγμή.
2. Διηθητικότητα (f) = η ταχύτητα διήθησης νερού στο έδαφος από στρώμα που επικάθεται στην επιφάνεια του εδάφους (cm/h).
3. Συνολικό ύψος διηθημένου νερού (h_i).
4. Ένταση βροχής (i).

Ο Horton περιέγραψε 4 συνθήκες:

A) $i < f$ και $h_i < h_p$: επιφανειακή απορροή = 0, καμία αύξηση της υπόγειας απορροής, επιφανειακή απορροή από την απευθείας βροχόπτωση στα ρεύματα.

B) $i < f$ και $h_i > h_p$: αύξηση της υπόγειας - υπεδάφιας απορροής μετά την κάλυψη του ελλείμματος της εδαφικής υγρασίας.

Γ) $i > f$ και $h_i < h_p$: επιφανειακή απορροή από την απευθείας βροχόπτωση,

καμία αύξηση της υπόγειας απορροής.
 $\Delta) i > f$ και $h_i > h_r$: εμφανίζονται όλες οι συνιστώσες της απορροής.

Ο διαχωρισμός της απορροής από το υδρογράφημα γίνεται σε δύο μόνο συνιστώσες:

1. **την άμεση απορροή** (επιφανειακή, μέρος της υπεδάφιας και απευθείας βροχόπτωση στα ρεύματα) και
2. **την βασική απορροή** (μέρος της υπεδάφιας και την υπόγεια απορροή).

Ο διαχωρισμός άμεσης από την βασική απορροή μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Η απλούστερη βασίζεται στην χάραξη μιας οριζόντιας ευθείας από το σημείο έναρξης του ανιόντος κλάδου μέχρι να τμήσει τον άλλο κλάδο. Η παροχή που αντιστοιχεί στην τετμημένη της ευθείας είναι η βασική απορροή. Παράδειγμα στο σχήμα 4, η βασική απορροή προσδιορίστηκε ίση με $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Στην πράξη η βασική απορροή συνήθως αυξάνει στην διάρκεια μιας βροχόπτωσης. Επομένως η ευθεία μπορεί να παρουσιάζει μικρή θετική κλίση.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνεται η περιγραφική αναπαράσταση του υδρογραφήματος του σχήματος 4 και διαχωρισμός της άμεσης από την βασική απορροή.

Πίνακας 1. Διαχωρισμός βασικής και άμεσης απορροής(Σχήμα 4).

Χρόνος (hr)	Απορροή (m^3/s)	Βασική απορροή (m^3/s)	Άμεση απορροή (m^3/s)	Όγκος (m^3)	Μοναδιαίο υδρογράφημα (m^3/s)
0	1.5	1.5	0	0	0
1	5.7	1.5	4.2	15120	2.36
2	14.1	1.5	12.6	45360	7.09
3	20.4	1.5	18.9	68040	10.64
4	16.2	1.5	14.7	52920	8.28
5	12	1.5	10.5	37800	5.91
6	8.9	1.5	7.4	26640	4.17
7	5.7	1.5	4.2	15120	2.36
8	2.8	1.5	1.3	4680	0.73
9	1.7	1.5	0.2	720	0.11
10	1.5	1.5	0	0	0
Συνολικός όγκος άμεσης απορροής =				266400	

Μοναδιαίο υδρογράφημα: είναι το υδρογράφημα που αντιστοιχεί μόνο σε άμεση απορροή η οποία όταν κατανεμηθεί ομοιόμορφα στην υδρολογική λεκάνη δημιουργεί στήλη νερού ύψους 1cm. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του είναι η χρονική του διάρκεια (αναφέρεται σε βροχόπτωση ορισμένης διάρκειας). Το μοναδιαίο υδρογράφημα χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό του πλημμυρικού υδρογραφήματος από βροχόπτωση οποιασδήποτε έντασης και με διάρκεια ίση με την διάρκεια του μοναδιαίου υδρογραφήματος ή προς ένα ακέραιο πολλαπλάσιό του.

Πίνακας 2. Ύψος απορροής, απώλειες βροχής

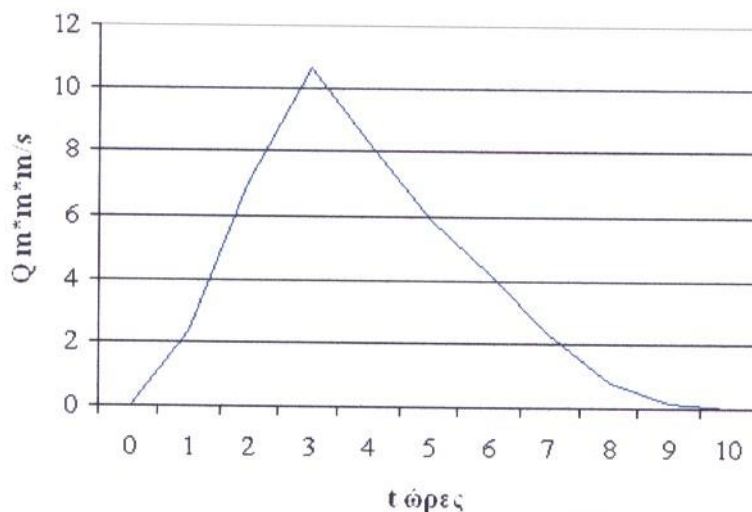
Όγκος απορροής (m ³)	266400	Άμεση απορροή cm (όγκος/εμβαδόν)	1,776
Εμβαδόν λεκάνης(km ²)	15		
Ύψος βροχής (mm)	42	Απώλειες mm (ύψος βροχής - άμεση απορροή)	24,24
Άμεση απορροή(mm)	17,76		
Φ(mm/h)	2,424		

Για τον προσδιορισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος προσδιορίζεται:

A) Ο όγκος της άμεσης απορροής (Πίνακας 2).

B) Διαιρείται ο όγκος της άμεσης απορροής προς το εμβαδόν της λεκάνης, δηλαδή η απορροή εκφράζεται σε ύψος απορροής(cm).

Γ) Διαιρείται η άμεση απορροή (στήλη 4 του πίνακα 1) με το ύψος της απορροής (1,776cm) οπότε προκύπτει το μοναδιαίο υδρογράφημα (Στήλη 6 του πίνακα 1, Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Μοναδιαίο υδρογράφημα

3. Πλημμυρικές Εισροές

Τα κύματα που δημιουργούνται από την επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας μπορούν κάτω από εξαιρετικές περιπτώσεις να δημιουργήσουν αναταράξεις σε βάθος μέχρι 15-20 μέτρων. Τα κύματα τύπου τσουνάμι ή σεισμικά θαλάσσια κύματα προκαλούνται συνήθως από την

μετακίνηση του θαλάσσιου πυθμένα συνέπεια τεκτονικών διαρρήξεων. Κατά αυτόν τον τρόπο έχουμε μετακίνηση της στήλης νερού από τον πυθμένα μέχρι την επιφάνεια του ωκεανού με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν θαλάσσια κύματα με εξαιρετικά μεγάλο μήκος κύματος που κατακλύζουν την παράκτια ζώνη. Ένα ανεμογενές κύμα θραύεται και άρα αρχίζει η απόσβεση- απώλεια της ενέργειας του σε βάθος θάλασσας που είναι ίσο με το ύψος του. Αντίθετα τα τσουνάμι εμπεριέχουν τεράστια ενέργεια λόγω του μεγάλου μήκους κύματος (του όγκου της μάζας που μετακινείται προς την ακτογραμμή) και η ενέργειά τους δεν μπορεί να αποσβεσθεί με τη θραύση του κυματισμού τους. Μπορούν να καταταχθούν στην κατηγορία των πλημμυρικών εισροών κατά την είσοδό τους στην παράκτια ζώνη, ενώ κατά την έξοδό τους έχουν τα χαρακτηριστικά της πλημμυρικής απορροής.

Κατά την διάδοσή τους στον ωκεανό το ύψος του θαλάσσιου σεισμικού κύματος είναι μερικά εκατοστά, έτσι πολλές φορές δεν είναι δυνατός ο εντοπισμός του από παλιρροιογράφους ή η διάκρισή του από τα συνήθη ανεμογενή θαλάσσια κύματα. Ας σημειωθεί ότι η ταχύτητα που διαδίδεται ένα τσουνάμι στον ανοικτό ωκεανό μπορεί να ξεπεράσει τα 800 km/h. Το θαλάσσιο σεισμικό κύμα εκτελεί μία σύνθετη κίνηση από το βυθό της θάλασσας. Όταν πλησιάζει μια παράκτια ζώνη λόγω μείωσης του βάθους της θάλασσας, τα κάτω στρώματα νερού χάνουν ταχύτητα λόγω τριβής με τον πυθμένα και στροβιλίζονται από τα επερχόμενα στρώματα. Η μόνη διέξοδος για να εκτονωθεί η ενέργεια που συσσωρεύεται είναι η βίαιη έξοδος στην παράκτια ζώνη.

Όταν το κύμα πλησιάζει στη ακτογραμμή αυξάνεται το ύψος (συνήθως μπορεί να φθάσει τα 5-6 μέτρα). Η πιο σημαντική παράμετρος δεν είναι το ύψος του κύματος αλλά το μήκος κύματος (η διάρκειά του) που προσδιορίζει τον όγκο της θαλάσσιας μάζας που κινείται προς την ακτή. Το μήκος κύματος μπορεί να φθάσει τα αρκετά χιλιόμετρα, που σημαίνει ότι μια πλημμυρική εισροή θα κατακλύσει την παράκτια ζώνη με διάρκεια αρκετών λεπτών της ώρας σε σχέση βέβαια με την ταχύτητα της παράκτιας μάζας (που στην ακτογραμμή μπορεί να ξεπερνά τα 50 km/h). Η διάρκεια και η ταχύτητα έχουν σαν αποτέλεσμα να σαρωθούν φυσικές (δένδρα, αιολικές αποθέσεις, κ.α.) και τεχνητές οντότητες (δρόμοι, σιδηροδρομικές γραμμές, οικίες, λιμενικές εγκαταστάσεις, κ.α.) στην παράκτια ζώνη.

Το πλάτος της διείσδυσης είναι συνάρτηση της γεωμορφομετρίας της ακτογραμμής. Πιο συγκεκριμένα το τσουνάμι σταματά μόνο όταν συναντήσει έδαφος υψηλότερο από το δικό του μέγιστο ύψος συσσώρευσης. Επιπλέον το πλάτος εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης του θαλάσσιου σεισμικού κύματος επί της ακτογραμμής και την γεωμορφολογία (ανάγλυφο, σύσταση) του πυθμένα της παράκτιας ζώνης. Δευτερεύοντες παράγοντες που επηρεάζουν την διείσδυση είναι η κάλυψη γης, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, η λιθολογία, κ.α. Σε σχέση με τον όγκο του θαλάσσιου ύδατος που μπορεί να κινηθεί προς την ακτογραμμή, οι δευτερεύοντες παράγοντες μπορεί να είναι αμελητέοι. Στα ιαπωνικά (από όπου προήλθε) η λέξη τσουνάμι, σημαίνει κύμα του λιμανιού, υποδηλώνοντας ότι η καταστρεπτική του δύναμη κατανέμεται ανισομερώς επί της ακτογραμμής ιδιαίτερα σε κλειστούς κόλπους ή σε περιοχές μικρού υψόμετρου που περιβάλλονται από ζώνες με πολύ μεγαλύτερο υψόμετρο.

Γένεση θαλάσσιων σεισμικών κυμάτων

- Κατακόρυφη μετατόπιση του θαλάσσιου πυθμένα συνέπεια τεκτονικών διαρρήξεων. Παράδειγμα, τα πρόσφατα γεγονότα στον Ινδικό Ωκεανό.
- Υποθαλάσσια κατολίσθηση σε πρηνή του θαλάσσιου πυθμένα(μπορεί να είναι ένα δευτερογενές φαινόμενο που ενεργοποιείται μετά από σεισμική δράση). Παράδειγμα ο σεισμός του Αιγίου (1995 → μέγεθος 6,5 της κλίμακας Richter) που είχε σαν αποτέλεσμα θαλάσσιο σεισμικό κύμα ύψους μέχρι 3 μέτρα που διείσδυσε σε βάθος 100-200 m από την ακτογραμμή. Το κύμα δημιουργήθηκε από υποθαλάσσια κατολίσθηση στην βόρεια πλευρά του Κορινθιακού κόλπου.
- Κατολισθήσεις στην παράκτια ζώνη (κατολίσθηση της ξηράς προς την θάλασσα).
- Εκρήξεις ηφαιστειών. Ένα παράδειγμα είναι το ηφαιστείο της Σαντορίνης, η έκρηξη του οποίου (τον 17^ο π.χ. αιώνα) δημιούργησε θαλάσσια κύματα που κατέστρεψαν την παράκτια ζώνη της Β. Κρήτης και οδήγησαν στην πτώση του Μινωικού πολιτισμού.

Ταξίδι μιας σταγόνας νερού από την ακτογραμμή στο μέγιστο ύψος συσσώρευσης

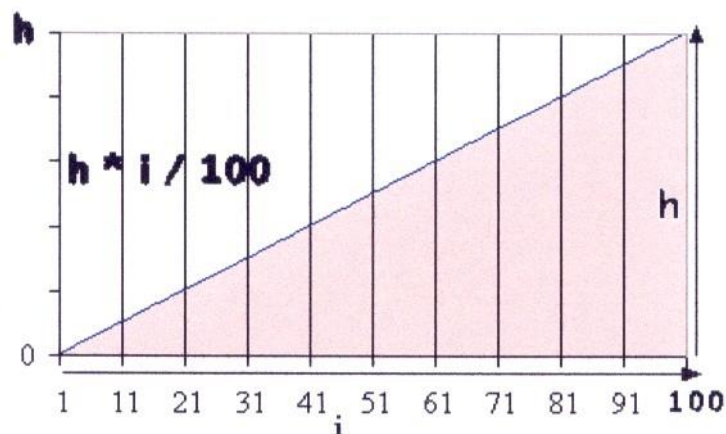
Εάν οι απώλειες ενέργειας (μηχανική ενέργεια(σύνθλιψη), μεταφορά ιζημάτων και η τριβή) θεωρηθούν ότι είναι μηδενικές , τότε το ταξίδι της σταγόνας μπορεί να περιγραφεί από το θεώρημα διατήρησης της ενέργειας.

A)Κινητική ενέργεια στην ακτογραμμή: $E_k = 1/2 * m * U^2$ & $E_\delta = 0$. B) Δυναμική ενέργεια στο μέγιστο ύψος συσσώρευσης: $E_\delta = m * g * h$ & $E_k = 0$. Άρα : $1/2 m * U^2 = m * g * h \leftrightarrow$

$$U = \sqrt{2 * g * H}$$

Δυναμική ενέργεια στήλης νερού με ύψος H από την επιφάνεια του εδάφους.

Η συνολική μάζα της στήλης είναι ίση με m(η πυκνότητα είναι σταθερή). Γίνεται διαμέριση σε οριζόντια παραλληλεπίπεδα(μάζα m/n ενώ $n \rightarrow \infty$). Στο σχήμα που ακολουθεί έγινε διαμέριση της στήλης ύψους h σε 100 παραλληλεπίπεδα και απεικονίζεται γραφικά η επίδραση του υψομέτρου στην δυναμική ενέργεια.



Η δυναμική ενέργεια του(είναι σε ύψος $h*i/n$) παραλληλεπιπέδου ισούται με $(m/n)*g*(h*i/n)$. Η δυναμική ενέργεια για το σύνολο των παραλληλεπιπέδων

είναι ίση με το γινόμενο $(m \cdot g/n) \cdot A$, όπου A είναι το εμβαδόν του γραμμοσκιασμένου τριγώνου. Αλλά $A = 1/2 \cdot h \cdot n$. Επομένως $E = 1/2 \cdot m \cdot g \cdot h$. Μια άλλη απόδειξη με βάση τον απειροστικό λογισμό:

$$E = \sum_{i=1}^n (m/n) \cdot g \cdot (h \cdot i/n). \rightarrow E = (m \cdot g \cdot h / n^2) \cdot \sum_{i=1}^n i \rightarrow E = (m \cdot g \cdot h / n^2) \cdot \int_0^n i \rightarrow$$

$$E = (m \cdot g \cdot h / n^2) \cdot [i^2 / 2]_0^n = (m \cdot g \cdot h / n^2) \cdot (n^2 / 2) \rightarrow E = 0.5 \cdot m \cdot g \cdot h$$

Μελέτη – Προσομοίωση

Η μελέτη ενός θαλάσσιου σεισμικού κύματος μπορεί να βασισθεί σε μακροσκοπικές παρατηρήσεις σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκαλεί. Οι παρατηρήσεις μπορούν να βασισθούν στην μελέτη δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών πριν και μετά την έλευση του κύματος. Επιπλέον από ΨΥΜΕ της παράκτιας ζώνης μπορεί να γίνει εκτίμηση του όγκου της θαλάσσιας μάζας που εισχώρησε στην ξηρά αλλά και της ταχύτητας του κύματος στην ακτογραμμή, οδηγώντας σε ενεργειακές εκτιμήσεις. Τα ΨΥΜΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσομοίωση των καταστρεπτικών αποτελεσμάτων υποθετικών τσουνάμι που μπορεί να προκληθούν από γνωστά ενεργά ρήγματα όπως αυτά που καταγράφονται στον χώρο του Αιγαίου (ΣεισμοΤεκτονικός Χάρτης της Ελλάδος). Να σημειωθεί τα ΨΥΜΕ πρέπει να έχουν μεγάλη υψομετρική ακρίβεια (1 με 2 μέτρα).

- ο **Αυτό σημαίνει ότι τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000 δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες.**

Η χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα (ψηφιακός βυθομετρικός χάρτης και σύσταση του πυθμένα) οδηγεί σε εκτιμήσεις σχετικά με την απόσβεση του θαλάσσιου σεισμικού κύματος ιδιαίτερα σε μικρή απόσταση από την παράκτια ζώνη. Τα δεδομένα αυτά είναι θεμιτό να θεωρηθούν και σε ηπειρωτική κλίμακα σε σχέση με το μέγεθος αλλά και την διεύθυνση της σεισμικής ενέργειας που απελευθερώνεται. Παράδειγμα ο συντελεστής απόσβεσης είναι ίδιος κατά μήκος της διεύθυνσης Α-Δ σε σχέση με την διεύθυνση Β-Ν;

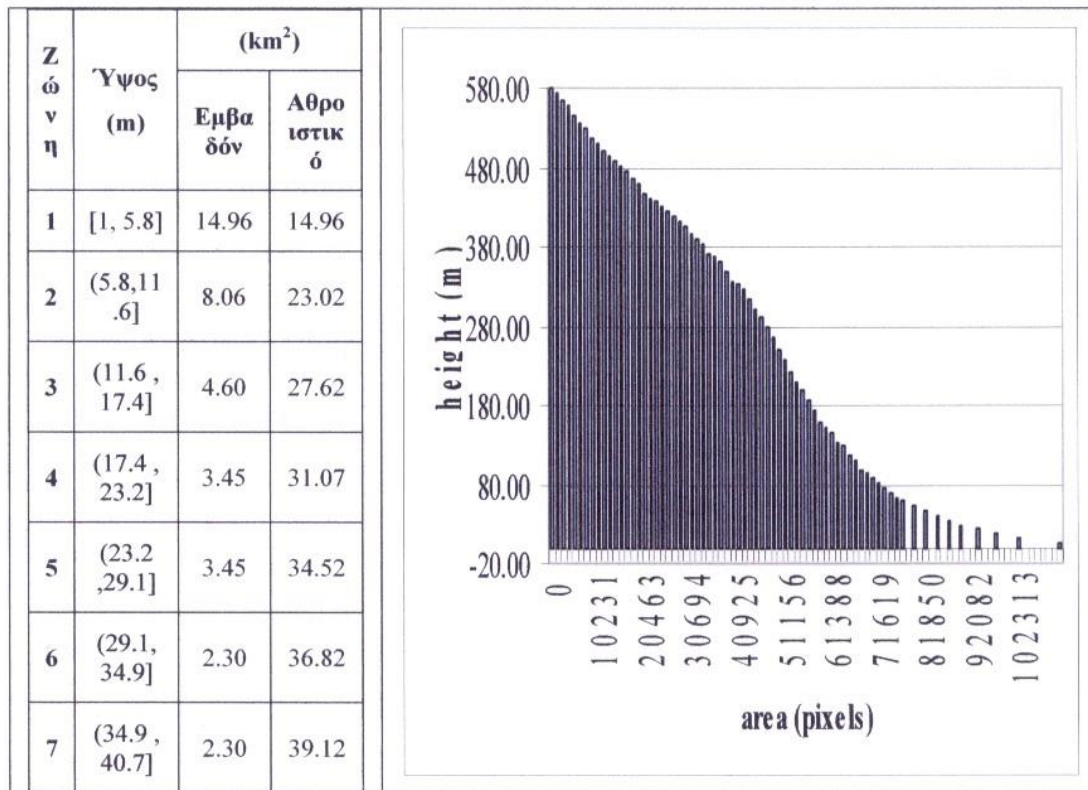
Δεδομένα σε ηπειρωτική κλίμακα είναι διαθέσιμα στις διευθύνσεις:

1. ETOPO5 (<http://www-cger.nies.go.jp/grid-e/gridtxt/grid1.html> και ETOPO2)
2. ETOPO2 (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/seltopo_help.HTML
(to download ETOPO2 : <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html>)

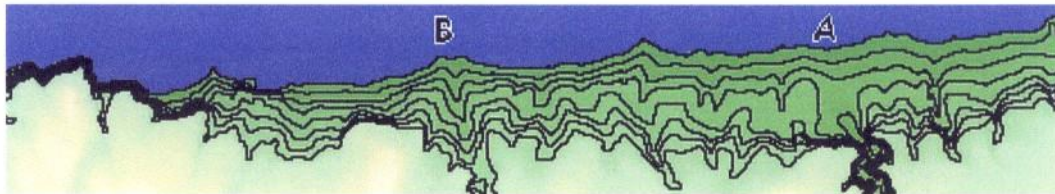
Στην εικόνα που ακολουθεί δίνεται βυθομετρικός και υψομετρικός χάρτης της Α. Μεσογείου (δεδομένα ETOPO2).



Στον πίνακα που ακολουθεί έχει προσδιορισθεί η υψομετρική καμπύλη και το εμβαδόν 7 υψομετρικών ζωνών όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.



Στο σχήμα που ακολουθεί έχουν προσδιορισθεί υψομετρικές ζώνες και το εμβαδόν τους (από την υψομετρική καμπύλη) στην Β. Κρήτη.



Παρατηρούμε ότι στην περιοχή Α (εκβολή κοιλάδας στην ακτογραμμή) το πλάτος διείδυσης από την ακτογραμμή είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι στην περιοχή Β για την υψομετρική ζώνη 3.

Η διείδυση είναι περίπου η ίδια εάν θεωρηθεί η υψομετρική ζώνη 1 ή 2 και για τις δύο περιοχές.

Βιβλιογραφία

- Μηλιαρέσης Γ., 2004. Εισαγωγή στην Υδρολογία (Φροντιστηριακές Σημειώσεις. Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας & Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Mc Guen R., 2005. Hydrologic Analysis & Design (3rd ed.). Prentice Hall, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ , 859 p.
- Σακκά Ι. , 1985. Τεχνική Υδρολογία, Τεύχος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων. Εκδόσεις Αιβάζη, Ξάνθη, 371 σελ.
- Σακκά Ι. , 2004. Τεχνική Υδρολογία, Τόμος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων(2^η έκδοση). Εκδόσεις Αιβάζη, Ξάνθη, 787 σελ.
- Τσακίρης Γ., 1995. Υδάτινοι Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, 675 σελ.
- Τσόγκας Χρ., Υδρολογία. Εκδόσεις ΙΩΝ, Περιστερί, 206 σελ.
- Viessman W., Levis G., 2003. Introduction to Hydrology (5th ed.). Prentice Hall, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ , 612 p.
- Μηλιαρέσης Γ., 2003. Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση. Εκδόσεις ΙΩΝ, Περιστερί, 243 σελ.
- Argialas, D., J. Lyon, and O. Mintzer (1988) Quantitative Description and Classification of Drainage Patterns, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54,505-509.
- Ichoku, C. And J. Chorowicz(1994) A Numerical Approach to the Analysis and Classification of Channel Network Patterns, Water Resources Research,30,161-174.