Δρ. ΓΚΑΝΑΤΣΙΟΣ ΧΑΡΙΣΙΟΣ

Ε.ΔΙ.Π., ΔΑΣΟΛΟΓΙΑΣ & ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ ΟΡΕΙΝΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Δασική Υδρολογία & Υδάτινοι Πόροι

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2025

Αφιερώνεται στον αγαπητό μου δάσκαλο Παυλίδη Θεοφάνη

Διατελέσαντα Επίκουρο Καθηγητή Εργαστηρίου Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων Α.Π.Θ.

© Χαρίσιος Π. Γκανάτσιος

Τίτλος συγγράμματος: Δασική Υδρολογία & Υδάτινοι Πόροι

1η Έκδοση: 2025

ISBN 978-618-87755-1-0

Πρόλογος

Η επιστήμη της Δασικής Υδρολογίας ευθυγραμμιζόμενη με τη Δασολογική επιστήμη του μέλλοντος, δίνει έμφαση σε πληθώρα οικοσυστημικών υπηρεσιών που αφορούν την παραγωγή νερού, την προστασία του εδάφους από τη διάβρωση, τη μείωση των πλημμυρικών αιχμών και την αύξηση της αντοχής της βλάστησης στην ξηρασία. Το βιβλίο αυτό είναι μια προσπάθεια παρουσίασης του γνωστικού αυτού αντικειμένου με απλό και κατανοητό τρόπο, ώστε να αναδειχθεί η επίδραση και σημασία της βλάστησης στο χειρισμό των πλημμυρών και της ξηρασίας περνώντας το μήνυμα ότι αυτά τα προβλήματα μπορούν να μετατραπούν σε ευκαιρίες. Για μεγάλο διάστημα η Δασολογική επιστήμη και πρακτική υπερτόνισε τη σημασία της παραγωγής ξύλου, χρειάζεται όμως να προσαρμόζεται στις ανάγκες των καιρών και να αντιλαμβάνεται τα δάση ως ευφυή, σύνθετα και προσαρμοστικά συστήματα. Στην Ιαπωνία, όπου σε πάρα πολλούς τομείς ζούνε ήδη στο μέλλον, τονίζεται ο ρόλος του δάσους στην ευεξία, τη σωματική και ψυχική υγεία αναγνωρίζοντας ότι η Νο1 νόσος του 21^{ου} αιώνα είναι η κατάθλιψη. Η πρακτική “Forest Bathing” που ενθαρρύνει τους ανθρώπους να περνούν συστηματικά κάποιο θεραπευτικό χρόνο στα δάση (δίνοντας έμφαση μεταξύ άλλων και στους ήχους της βροχής στο φύλλωμα), πρωτοεμφανίστηκε στην Ιαπωνία τη δεκαετία του 1980 και έκτοτε έχει κερδίσει δημοτικότητα παγκοσμίως. Ταυτόχρονα, το νερό και ο κύκλος του αποτελεί θεμελιώδες συστατικό κάθε προσπάθειας περιβαλλοντικής εκπαίδευσης και επομένως η Δασική Υδρολογία συμβάλει τα μέγιστα προς αυτό το σκοπό. Ο πυρήνας αυτής της εκπαίδευσης είναι η κατανόηση των λειτουργιών της φύσης καθώς και της σημασίας και της σχέσης τους με την ανθρώπινη ζωή. Η αυτογνωσία, το Σωκρατικό «Γνωθι’ σαυτόν», η καλλιέργεια του σεβασμού στη Φύση και της ανάγκης αρμονικής συμβίωσης, αποτελεί θεμέλιο κάθε ευημερούντος πολιτισμού. Η συμβίωση και η συνύπαρξη στα δασικά οικοσυστήματα είναι υψίστης σημασίας για την επιβίωσή τους και η κατανόηση των αλληλοεπιδράσεων που διέπουν τη λειτουργία τους δίνει ισχυρή ώθηση στην εκπλήρωση της ανάγκης επαναπροσανατολισμού των ανθρώπινων αξιών και του τρόπου ζωής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Α. Εισαγωγικά ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΓΕΝΙΚΑ 10
2. ΕΝΝΟΙΕΣ, ΟΡΙΣΜΟΙ, ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ 11
3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ 12
4. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ 14
5. ΑΝΑΓΩΓΗ ΒΟΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑΣ) 17
✓ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ 19

Β. ΔΑΣΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 21
1.1. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΚΑΙ ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ 21
1.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΑΣΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ 23
1.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ 24

Β. 1. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ

✓ ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ – ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ & ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ 30
1. ΓΕΝΙΚΑ
2. ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗ, ΚΟΡΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗ, ΚΟΡΜΑΠΟΡΡΟΗ 30
3. ΔΙΑΠΕΡΩΣΑ ΒΡΟΧΗ 31
4. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ 32
5. Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΕΩΣ 32
5.1. Γενικά 32
5.2. ΜΟΡΦΕΣ ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ 33
5.3. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ, ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΤΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ 34
5.4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΑΣΟΣΥΣΤΑΔΩΝ 36
Ι. Κλιματικοί και Φυσιογραφικοί Παράγοντες

α. Χαρακτηριστικά Βροχής

β. Θερμοκρασία Αέρα

γ. Άνεμος

δ. Υγρασία Αέρα

ε. Ηλιοφάνεια, Βαθμός νέφωσης

στ. Εποχή του έτους

ζ. Γεωγραφικό Πλάτος

η. Έκθεση (Γενική, Ειδική) Βαθμός σκίασης

θ. Γεωμορφολογικό ανάγλυφο

ι. Εδαφική Υγρασία

II. Βιολογικά (Χλωριδικά) χαρακτηριστικά της Δασικής Βλάστησης

i. Γενικά

ii. Δασική Βλάστηση (Δάσος, Θαμνώνες, Λιβάδια)

iii. Δομή, Βαθμός συγκόμωσης συστάδων

iv Δασοπονικό είδος

v. Ηλικία συστάδων-δένδρων

vi. Μορφή (habitus) συστάδων-δένδρων

vii. Δασοκομικοί (καλλιεργητικοί) χειρισμοί

viii. Μορφή, είδος, χαρακτηριστικά φυλλώματος

- Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας LAI (Leaf Area Index) 44

5.5. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΘΑΜΝΩΝ ΚΑΙ ΘΑΜΝΩΝΩΝ 45

5.6. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΛΙΒΑΔΙΚΗΣ (ΠΟΩΔΟΥΣ) ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΞΗΡΟΤΑΠΗΤΑ 45

5.7. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΟΡΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΟΡΜΑΠΟΡΡΟΗ

I. ΔΑΣΙΚΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ ΚΑΙ ΔΑΣΟΣΥΣΤΑΔΩΝ 46

II. ΘΑΜΝΩΝ ΚΑΙ ΘΑΜΝΩΝΩΝ 47

6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ 47

6.1. Γενικά περί μεθόδων μέτρησης της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης 47

6.2. Μετρήσεις υδατοσυγκράτησης στη Μόρνα Πιερρίας 48

6.3. Μετρήσεις υδατοσυγκράτησης στο Νεοχώρι Αρναίας Χαλκιδικής 54

6.4. Μετρήσεις υδατοσυγκράτησης στο Πανεπιστημιακό Δάσος Ταξιάρχη-Βραστάμων 55

6.5. Ενδεικτικές έρευνες υπολογισμού κορμοαπορροής και υδατοσυγκράτησης 65

6.6. Εκτίμηση της υδατοσυγκράτησης με τη χρήση μοντέλων-Το μοντέλο Rutter & Gash 74

6.7. Έρευνες που στηρίζονται στο μοντέλο Gash 80

- Η ιδιαιτερότητα των δρυών 82

7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ 84

- Περιορισμοί των μοντέλων 85

✓ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ –ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ 88

Β.2. ΕΞΑΤΜΙΣΗ & ΔΙΑΠΝΟΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 98

2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ 101

3. ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΑΠΟ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ 108

I. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία

II. Χαρακτηριστικά του εδάφους

III. Χρώμα του εδάφους

IV. Φρεάτιος (υδροφόρος) ορίζοντας

V. Παρουσία βλάστησης

V.1. Εξατμισιδιαπνοή δασικών δέντρων

V.2. Εξατμισιδιαπνοή δασικών συστάδων

V.3. Εξατμισιδιαπνοή δασών και λοιπών φυτοκοινωνιών

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ & ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗΣ 118

4.1. Υπολογισμός της εξάτμισης & της εξατμισιδιαπνοής με άμεσες μετρήσεις 118

4.1.1. Υπολογισμός της εξάτμισης με άμεσες μετρήσεις 118

I. Μέτρηση με τη λεκάνη εξάτμισης

II. Μέθοδος ατμομέτρου ή εξατμισίμετρο

4.1.2. Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής με άμεσες μετρήσεις 120

I. Μέτρηση με δεξαμενές

II. Μέτρηση με λυσσίμετρα

III. Μέτρηση με τη χρήση Αγροτεμαχίων

4.2. Υπολογισμός της εξάτμισης & της εξατμισιδιαπνοής με έμμεσες μεθόδους 122

I. Μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου

II. Μέθοδοι ισοζυγίου ενέργειας

III. Μέθοδοι μεταφοράς μάζας

✓ ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΑΠΟ ΥΔΑΤΙΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ 125

IV. Συνδυασμένες μέθοδοι

1. Υπολογισμός εξατμισιδιαπνοής με την εξίσωση Penman-Monteith 128
2. Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής με την εξίσωση Thornthwaite 134

4.3. Μέθοδοι προσδιορισμού της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής 138

- Μέθοδος Turc
- Μέθοδος Παυλίδη
- Μέθοδος Coutagne
- Μέθοδος Ol' Decop
- Μοντέλο Budyko
- Μοντέλο Rutter και μοντέλο Gash

4.4. Παρατηρήσεις επί της προσομοίωσης της εξατμισιδιαπνοής 144

5. ΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ 145

✓ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ- ΕΞΑΤΜΙΣΗ & ΔΙΑΠΝΟΗ 148

Γ. ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ 152

2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

2.1. ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

2.2. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ, ΕΞΑΤΜΙΣΗ & ΔΙΑΠΝΟΗ

3. ΤΑ ΔΑΣΗ ΩΣ ΒΡΟΧΟΠΟΙΟΙ 153

4. ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΧΙΟΝΙ, ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΜΜΑΤΑ, ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ 159

4.1. Εισαγωγή

4.2. Χιονοσυγκράτηση, χιονοσυγκρατητική ικανότητα, διαπερώσα χιόνα

5. ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ 164

5.1. Δάσος και εδαφική υγρασία 164

5.2. Δάσος και υπόγειο νερό 168

5.3. Δάσος και πηγές 172

5.4. Πηγές και βιοποικιλότητα 176

5.5. Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων 177

5.6. Δάσος και αντοχή στην ξηρασία 179

5.7. Δάσος και διάβρωση 181

6. ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΗ 184

6.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή

6.2. Αναδασώσεις και απορροή 187

6.3. Ποσοστό δάσωσης και απορροή 195

6.4 Συντελεστής απορροής 196

7. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΟ 199

8. ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ, ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ 200

8.1. Γενικά- Μέθοδοι εκτίμησης της απορροής

8.1.1. Μέθοδος συντελεστή απορροής

8.1.2. Μέθοδος σύγκρισης με ομοειδείς λεκάνες (μέθοδος Viparelli)

8.1.3. Βελτιωμένη μέθοδος υδατικού ισοζυγίου

8.2. Υπολογισμός Υδατοπαροχών

✓ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ- ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ 212

Δ. ΑΣΚΗΣΗ 217-232

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ε. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ 233-258

ΣΤ. ΧΕΙΡΙΣΜΟΙ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΑΣΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ & ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΦΟΙΤΗΤΩΝ 259-270

Ζ. ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΤΗΣ ΓΗΣ 271-289

Α. Εισαγωγικά

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ενιπέας Ολύμπου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΓΕΝΙΚΑ

Το νερό είναι ταυτισμένο με την ίδια τη ζωή. Το νερό, το «ζωτικότερον γης ύδωρ» του Αριστοτέλη, το «αρχή πάντων ύδωρ» του Θαλή κλπ., αποτελεί το αναντικατάστατο στοιχείο κάθε βιολογικού κύκλου και τον παράγοντα εκείνο που μορφοποιεί, δημιουργεί, ελέγχει και συμμετέχει στη δημιουργία, τον μετασχηματισμό, τη μορφοποίηση του γήινου φλοιού της γης και των εν γένει γεωκλιματικών συνθηκών. Για τους παραπάνω λόγους το νερό λατρεύτηκε ως θεότητα (Νείλος, Γάγγης, Αχελώος, κλπ.) ή ως μέσο εξαγνισμού (Βάπτιση, κλπ.).

Από την ύπαρξη του ανθρώπου και γενικά κάθε έμβιας ζωής πρωταρχικός στόχος ήταν η εξασφάλιση του αναγκαίου για την επιβίωση, κατάλληλου ποιοτικά νερού. Η χωροχρονική έλλειψη (ξηρασία) και η αντίστοιχη υπερεπάρκεια (πλημμύρες) του νερού ήταν και εξακολουθεί να είναι από τα μεγαλύτερα προβλήματα του πλανήτη Γη. Για το λόγο αυτό όλες οι οργανωμένες κοινωνίες και όλοι οι πολιτισμοί προσπάθησαν να κατανοήσουν και να ελέγξουν τα παραπάνω φαινόμενα δημιουργώντας έτσι τις επιστήμες του νερού, κύρια έκφραση των οποίων αποτελεί η επιστήμη της Υδρολογίας. Επίσης, οι άνθρωποι ανάλογα με την ένταση των προβλημάτων του νερού θέσπισαν νόμους, κανόνες και τρόπους προστασίας και χρήσης του υπάρχοντος νερού. Παράλληλα το νερό (θάλασσες, λίμνες, ποταμοί, χείμαρροι) χρησιμοποιήθηκε και χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς, ως πηγή άντλησης και αξιοποίησης της δυναμικής του ενέργειας (μύλοι, ελαιοτριβεία, υδροστρόβιλοι, γεννήτριες, κλπ) και ως μέσο άθλησης, αναψυχής, αισθητικής και οικολογικής ανάδειξης μιας περιοχής (χιονοδρομία, rafting, Canoe-Kayac, χώροι αναψυχής, κλπ.).

Με την πάροδο των ετών την αύξηση και κυρίως την αστικοποίηση του πληθυσμού, τη βιομηχανική έκρηξη, τη μετάβαση στην υδροκαταναλωτική γεωργία και την αύξηση της ατομικής, ομαδικής και βιομηχανικής κατανάλωσης, τα προβλήματα του νερού όπως οι πλημμύρες και ιδιαίτερα η λειψυδρία, αλλά και η συνεχής ρύπανση και μόλυνση του νερού σε όλες τις εκφράσεις του, οδήγησαν στη σημερινή έκρηξη των προβλημάτων αυτών. Το ρητό της σημερινής εποχής «οι μελλοντικοί πόλεμοι θα γίνονται για τον έλεγχο του νερού» αντανακλά στην αγωνιώδη αναζήτηση και εξασφάλιση, ακόμα και με τη βία, του αναγκαίου για κάθε χώρα νερού. Η περίπτωση του Ισραήλ για τον έλεγχο των υδατικών πόρων της Παλαιστίνης, η ένταση στις σχέσεις Τουρκίας με τη Συρία και το Ιράκ για το θέμα των νερών του Ευφράτη, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της σημερινής πραγματικότητας. Πολύ ενδιαφέρουσες γνώσεις παρέχουν τα βιβλία «Αιχμάλωτοι της Γεωγραφίας», (Marshal, 2015) και «Γεωπολιτική του Νερού» (Blanchon, 2024).

Για τους παραπάνω λόγους οι υδρολογικές γνώσεις (παλαιές και νέες), η έρευνα και η φιλοσοφική θεώρηση για ορθολογική διαχείριση του νερού και η αντιμετώπιση του, ως αγαθού εν ανεπαρκεία,

αποτελούν πλέον επιτακτική ανάγκη. Για το λόγο αυτό οι επιστήμες που συντρέχουν την κύρια επιστήμη του νερού την Υδρολογία (Μετεωρολογία, Φυσική, Μαθηματικά, Πληροφορική, Γεωλογία, Δασολογία, Γεωπονία, Βιολογία, κλπ.) απέκτησαν νέα διάσταση. Η ανάπτυξή τους αποτελεί πλέον βασική προϋπόθεση στη νέα εξελισσόμενη μορφή της Υδρολογίας την «Περιβαλλοντική Υδρολογία» που εξετάζει το νερό ως βασικό παράγοντα του Φυσικού Περιβάλλοντος. Στα πλαίσια αυτά μελετάται η Υδρολογία μαζί με τους δυο άλλους πόλους των υδατικών επιστημών την Υδραυλική και την Υδρονομική. Τελευταία εξελίσσονται ως αυτοτελείς επιστήμες, πέραν από τις κλασσικές Υδρολογικές, Υδραυλικές και Υδρονομικές Επιστήμες, νεώτερες επιστήμες όπως η «Υδρογνωσία», η «Πράσινη Υδρονομική», η «Υδροδιαχειριστική», η «Χιονολογία», η «Αθλητική-Αναψυχική Υδρονομική», κλπ.

Η διάρθρωση του παρόντος πονήματος κινείται σε τρία επίπεδα. Το πρώτο καλύπτει τα βασικά στοιχεία της Επιφανειακής Υδρολογίας. Το δεύτερο καλύπτει τα βασικά στοιχεία της αυτοτελούς επιστήμης της Δασικής Υδρολογίας με κορμό του τα κεφάλαια της Υδατοσυγκράτησης και της Εξατμισιδιαπνοής. Το τρίτο επίπεδο ασχολείται με τα αντικείμενα της επιστήμης των Υδατικών Πόρων με έμφαση στη βέλτιστη αξιοποίησή τους.

2. ΕΝΝΟΙΕΣ, ΟΡΙΣΜΟΙ, ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Η Υδρολογία *αποτελεί την επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των μορφών του νερού στη γήινη επιφάνεια.* ***Η Υδρολογία*** *λοιπόν ασχολείται με την εμφάνιση, την κυκλοφορία, την κατανομή, τις ιδιότητες (φυσικές, χημικές) και τις αλληλεπιδράσεις του νερού με το φυσικό περιβάλλον και την έμβια ζωή*. Από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει ότι η υδρολογία χρησιμοποιεί, ενσωματώνει και δανείζεται στοιχεία και δεδομένα πολλών επιστημών όπως η φυσική, η μετεωρολογία, τα μαθηματικά, η γεωλογία, η στατιστική, η ρευστομηχανική, η χημεία, η γεωπονία, η εδαφολογία, η δασολογία, η οικολογία κλπ. Ανάλογα με τις φάσεις (μορφές) του νερού και τις ιδιό-τητές του η υδρολογία διακρίνεται στις ακόλουθες επιμέρους υδρολογικές επιστήμες:

1. ***Υδρομετεωρολογία:*** *Η υδρομετεωρολογία αποτελεί τον κλάδο της υδρολογίας που μελετά τη συμβολή και τις επιπτώσεις των μετεωρολογικών φαινομένων στις υδρολογικές διαδικασίες.* Ουσιαστικά η υδρομετεωρολογία ασχολείται κατά κύριο λόγο με το σχηματισμό των νερών και την κατανομή και την μορφή των υδροκατακρημνισμάτων στο χώρο.
2. ***Επιφανειακή υδρολογία:*** *Η επιφανειακή υδρολογία αποτελεί τον κλάδο της Υδρολογίας που ασχολείται με τα της κίνησης του νερού στην επιφάνεια της γης και στα υδάτινα ρεύματα (χείμαρρους, ποταμούς), καθώς και με τις επιπτώσεις που η κίνηση αυτή προκαλεί.* Η επιφανειακή υδρολογία διακρίνεται περαιτέρω σε σηματικούς υποκλάδους όπως η ***Δασική Υδρολογία***, η ***Ορεινή Υδρονομία***, η ***Ποταμολογία***, η ***Λιμνολογία***, η ***Χιονολογία*** (Κωτούλας 2001, Παυλίδης, 2007) κλπ.

3. ***Υδρογεωλογία ή Υπόγεια Υδρολογία:*** *Η υδρογεωλογία αποτελεί τον κλάδο της Υδρολογίας που ασχολείται με την κίνηση του νερού εντός του γήϊνου μανδύα και τους υπόγειους υδροφορείς*.

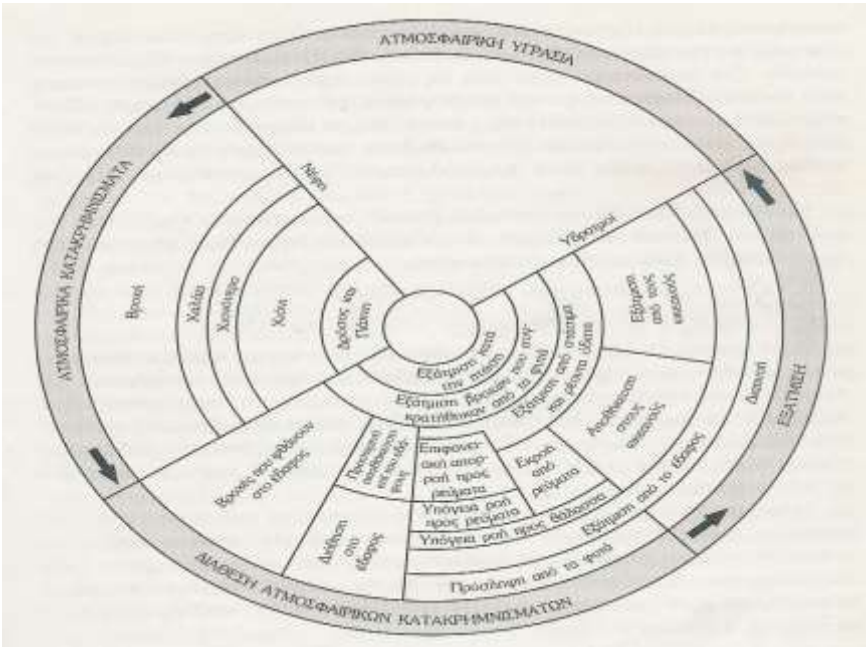
Επειδή η **Υδρολογία** αποτελεί μια σύνθετη επιστήμη με θεωρητικό και πρακτικό (εφηρμοσμένο) υπόβαθρο και επειδή τα όρια μεταξύ θεωρητικής και εφαρμοσμένης επιστήμης είναι συχνά ασαφή ή δυσδιάκριτα, για το λόγο αυτό γίνεται διάκριση μεταξύ ***Θεωρητικής*** και ***Εφαρμοσμένης*** ή ***Τεχνικής Υδρολογίας***. Επομένως η ***Εφηρμοσμένη*** ή ***Τεχνική Υδρολογία*** καλείται ο τομέας της ευρύτατης επιστήμης της υδρολογίας, που ασχολείται με τα προβλήματα του νερού που σχετίζονται ή αφορούν μελέτες, κατασκευές, λειτουργίες, συντηρήσεις, χρήσεις κλπ υδραυλικών έργων. Περισσότερα σχετικά με την επιστήμη της Υδρολογία υπάρχουν στους (Κωτούλας 2001, Παπαζαφειρίου 1980, Παπαμιχαήλ 2001, Σακκάς 2004, Τσακίρης 1995).

Πρέπει να επισημανθεί ότι η υδρολογική θεωρία οφείλει πάντοτε να επαληθεύει τα θεωρητικώς και πρακτικώς σε διάφορες περιοχές και εποχές προκύπτοντα πορίσματα με πραγματικές μετρήσεις και καταγραφές πεδίου στην περιοχή εφαρμογής τους. Σε διαφορετική περίπτωση η προσπάθεια επιβολής των υδρολογικών θεωριών σε έναν μη επαληθευμένο χώρο οδηγεί σε πολύ επικίνδυνες και δύσκολες καταστάσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι υδρολογικές λειτουργίες είναι πολύ ευαίσθητες σε κάθε χωρική ή χρονική μεταβολή και επηρεάζονται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό αστάθμητων παραγόντων. Για το λόγο αυτό, κάθε υδρολόγος-μελετητής πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιό γνώστης του χώρου και των υδρολογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή στην οποία πρόκειται να παρέμβει.

3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Ο υδρολογικός κύκλος (Hydrologic Cycle) ή το ορθότερον υδρολογική ανακύκλιση αφορά τη γενική κυκλοφορία του νερού από τις υγρές επιφάνειες (ωκεανούς, θάλασσες, λίμνες, ποταμούς κλπ) προς την ατμόσφαιρα, την κίνησή του σ'αυτήν, την επαναφορά και την κίνησή του στη γήινη επιφάνεια, μέχρι την επιστροφή του σε κάποια από τις γήινες υγρές επιφάνειες. Ο υδρολογικός κύκλος φαίνεται να μην έχει αρχή και τέλος. Θεωρητικά αποδεχόμαστε ως αρχή του υδρολογικού κύκλου την εξάτμιση του νερού. Οι διάφορες φάσεις του υδρολογικού κύκλου παρουσιάζονται στα Σχήματα 1 και 2.

Σχήμα 1 : Σχηματική απεικόνιση των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου



Σχήμα 2 : Ποιοτική κατά Horton απόδοση των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου (Σακκάς, 2004)

4. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

Το νερό ως το άμεσο συνδεδεμένο στοιχείο με την επιβίωση και την εξέλιξη του ανθρώπου αποτέλεσε, για όλους τους πολιτισμούς, στοιχείο μυθολογίας και αντικείμενο λατρείας και φιλοσοφίας, ενώ ήταν πηγή δοξασιών, ηθών, εθίμων και λαϊκών παραδόσεων. Για το λόγο αυτό είναι μάταιο να αναζητήσει κανείς την απαρχή της Υδρολογικής Επιστήμης, και των πρώτων Υδρολογικών Παρατηρήσεων και καταγραφών, που ταυτίζεται σχεδόν με την πρώτη οργανωμένη κοινωνία.

Τα πρώτα ανθρώπινα υδραυλικά έργα και επεμβάσεις που καταγράφονται σηματοδοτούν και είναι συνυφασμένα με την εμφάνιση και την εξέλιξη κάθε πολιτισμού. Ήδη οι πρώτες καταγραφές τα γνωστά Νειλόμετρα, που κατέγραφαν διακύμανση της στάθμης του Νείλου, τοποθετήθηκαν στο διάστημα 3500-3000 π.Χ. Τον 6^{ο} π.χ. αιώνα τοποθετούνται τα συστήματα μεταφοράς νερού, μέσω διωρύγων, από τους ποταμούς Τίγρη και Ευφράτη προς τις εύφορες πεδιάδες της Μεσοποταμίας. Στην Ελλάδα αρδευτικά και κυρίως υδρευτικά έργα καταγράφονται κατά τους προϊστορικούς χρόνους στην Κρήτη, Πελοπόννησο, Στερεά Ελλάδα, Θεσσαλία, Μακεδονία, Ήπειρο και σε όλα τα νησιά του Αιγαίου Πελάγους. Εξάλλου ο ημίθεος Ηρακλής εξετέλεσε σειρά υδραυλικών έργων (Οι Στυφαλίδες Όρνιθες και η Λερναία Ύδρα σχετίζονται με αποξήρανση των αντίστοιχων ελών, η κόπρος του Αυγείου αποτύπωνε την εκτροπή του ποταμού Αλφειού, η πάλη του Ηρακλή με το θεό-ποταμό Αχελώο συμβόλιζε την πρώτη προσπάθεια πεδινής εκτροπής του ποταμού, κλπ.) (Παυλίδης, 2005). Σημαντικά αρδευτικά έργα καταγράφονται στην Κωπαϊδα, τον Αλφειό και τον Αχελώο κατά την προϊστορική περίοδο ενώ την περίοδο 1250 π.χ. μέχρι το 800 π.χ. καταγράφονται τα πρώτα συστηματικά έργα αξιοποίησης του νερού στην Αθήνα, ιδιαίτερα από τον Πεισίστρατο. Ο Σόλωνας συνέταξε σχετικούς νόμους διαχείρισης και προστασίας του νερού με χαρακτηριστική περίπτωση την απαγόρευση της διάνοιξης πηγαδιών σε απόσταση μικρότερη των 200m. Ο Ιπποκράτης απέδειξε πειραματικά τη διαδικασία της εξάτμισης. Ο Πλάτωνας και ο Αριστοτέλης προσπάθησαν να ερμηνεύσουν τις διαδικασίες και τις φάσεις του υδρολογικού κύκλου, την ίδια εποχή που στην Ινδία γινόταν η πρώτη ποσοτική μέτρηση της βροχής με έναν τύπο βροχομέτρου.

Σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη της Υδρολογίας του υπόγειου νερού έπαιξε η επινόηση των «Κανάτ», δηλαδή των διασυνδεδεμένων φρεατίων με τα υπόγεια κανάλια. Το εξελιγμένο αυτό σύστημα μεταφοράς νερού ελαχιστοποιεί την εξάτμιση και αναπτύχθηκε σε ξηροθερμικές περιοχές όπως η αρχαία Περσία. Όταν βλέπει κανείς ένα "Κανάτ" από ψηλά, έχει την εντύπωση ότι βλέπει μια ευθεία σειρά από μυρμηγκοφωλιές σκαμμένες στην άμμο της ερήμου. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα κανάτ αποτελείται ουσιαστικά από κάθετες σήραγγες (πηγάδια) που ξεκινούν από ένα επικλινές επίπεδο, ψηλότερο από αυτό της πεδιάδας, και συνεχίζουν στο πεδινό και άγονο έδαφος σε απόσταση 20-200 μέτρων μεταξύ τους, έως ότου προσεγγίσουν έναν οικισμό. Κοντά στην κατοικημένη περιοχή το νερό αρκετά συχνά διοχετεύεται σε επίγειες δεξαμενές ή κανάλια, τα οποία διευκολύνουν την άρδευση των χωραφιών, προμηθεύοντας παράλληλα τους κατοίκους με νερό.

Εικόνες 1: Κανάτ στην Περσία και «Παραδεισένιος» κήπος με νερό.

Η λειτουργία των κανάτ βασίζεται ακριβώς στην εκμετάλλευση των κλίσεων του εδάφους, έτσι ώστε να μη χρειάζεται άντληση των υδάτων με τεχνητό τρόπο. Παράλληλα, ο τρόπος λειτουργίας τους δεν επιβαρύνει τον υδροφόρο ορίζοντα ούτε οδηγεί και σε υπεράντληση, άρα δεν εγκυμονεί τον κίνδυνο να ξεραθούν τα πηγάδια. Για αυτόν ακριβώς το λόγο και τα κανάτ, με την κατάλληλη συντήρηση, μπορούν να έχουν διάρκεια ζωής χιλιάδων χρόνων. Χάρη στα κανάτ, οι Πέρσες δημιούργησαν οάσεις απίστευτου κάλους που ονομάζονται paridaiza. Τον όρο και την έννοια του παραδείσου δανείστηκε ο χριστιανικός κόσμος.

Οι Ρωμαίοι στήριξαν την ανάπτυξη και την ευημερία τους εκτός από την διάνοιξη των γνωστών δρόμων (Εγνατία Οδός, Αππία Οδός κλπ) κυρίως σε θαυμαστά υδρευτικά έργα μεγάλης κλίμακας που

τροφοδοτούν με νερό τις μεγάλες πόλεις της Αυτοκρατορίας, ενώ παράλληλα εξασφάλιζαν καλύτερες ποιοτικές συνθήκες μεταφοράς του νερού. Από το 1250 στην Κίνα χρησιμοποιούνται κυλινδρικά βροχόμετρα, αντίστοιχα των σημερινών.

Με την Αναγέννηση οι Leonardo da Vinci και Bernard Polissy προσπαθούν να αναλύσουν και να κατανοήσουν τις φάσεις του υδρολογικού κύκλου και το κατορθώνουν με αρκετή επιτυχία. Τον 17^{ο} αιώνα οι Pervault, Mariotte και Halley δίνουν σημαντική ώθηση στην Υδρολογία. Τον 18^{ο} αιώνα γίνεται η ανακάλυψη του σωλήνα Pitot, και η εξίσωση του Chezy. Επίσης γίνονται ο πρώτες συστηματικές υδρολογικές παρατηρήσεις από τον Άγγλο Dobson και εργασίες διαφόρων άλλων ερευνητών (Antonio Vallisnieri, Antonio Mario Lorgna, James Jurin).

Τον 19^{ο} αιώνα αρχίζουν οι πρώτες αναλύσεις δεδομένων παροχής ρευμάτων από τον Heinrich Berghaus. Την ίδια εποχή συστηματοποιούνται οι υδρομετρήσεις ποταμών σε πολλές χώρες. Οι εργασίες των Darcy, Bazin, Ganguiller, Kutter, Manning, κατέληξαν στη διατύπωση ισάριθμων μαθηματικών εξισώσεων. Η ορθολογική μέθοδος θεμελιώνεται από τον Ιρλανδό Mulvaney. Τέλος σημαντικό γεγονός αποτελεί η εργασία του Darcy για την υδρολογία των υπόγειων νερών.

Την περίοδο 1930-1949 σημαντικές είναι οι προσπάθειες των Shields, Meyer-Peter, Einstein για εμβάθυνση στα θέματα της στερεοπαροχής των ρευμάτων. Επίσης, εισάγεται το μοναδιαίο υδρογράφημα Sherman το 1932 (Linsley et. al., 1949), μελετάται το πλεόνασμα της βροχής και εισάγεται η Στατιστική στη μελέτη υδρολογικών φαινομένων. Στη συνέχεια η εξέλιξη στους Η/Υ και η κατασκευή οργάνων μέτρησης μεγάλης ακρίβειας δίνουν τη δυνατότητα στην Υδρολογία να αναπτυχθεί ακόμα περισσότερο. Με τη χρήση ολοκληρωμένων δικτύων παρατηρήσεων αλλά και τη συστηματική και γρήγορη ανάλυση των δεδομένων η Υδρολογία γίνεται απαραίτητη για τον προγραμματισμό, το σχεδιασμό αλλά και τη διαχείριση σε πραγματικό χρόνο των υδατικών πόρων ευρύτερων περιοχών.

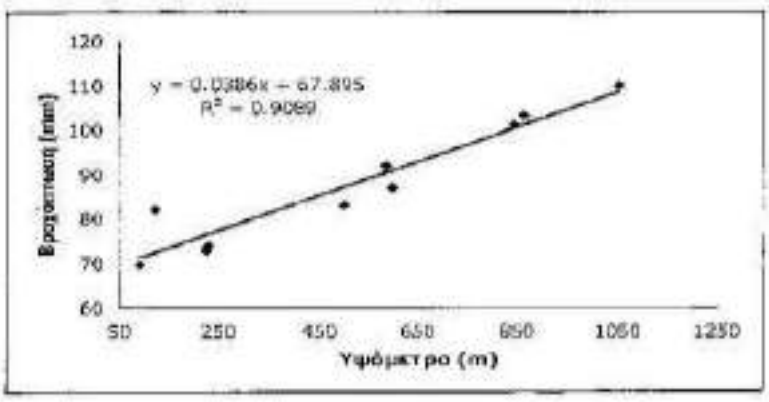
Σήμερα κατανοείται και αναδυκνεύεται η αξία της υδρολογίας για την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων και του περιβάλλοντος, ενώ ήδη δημιουργούνται τριτογενείς επιστήμες που στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στην Υδρολογία (π.χ. Διαχείριση Υδατικών Πόρων).

5. ΑΝΑΓΩΓΗ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΡΟΧΟΒΑΘΜΙΔΑΣ)

Συχνά η συμπλήρωση των βροχομετρικών δεδομένων ενός σταθμού καθίσταται εφικτή από την παρατήρηση ότι το σημειακό ύψος βροχής αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για οποιαδήποτε αναγωγή βροχομετρικών παρατηρήσεων, σε διαφορετικό υψόμετρο από το αρχικό. Η μέση αύξηση του ετήσιου σημειακού βροχομετρικού ύψους, ανά 100m αύξηση του υψομέτρου, ονομάζεται *βροχοβαθμίδα*. Η *βροχοβαθμίδα* συνήθως προκύπτει, για κάθε περιοχή, από τη γραφική παράσταση των μέσων ετήσιων βροχομετρικών υψών των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής, σε συνάρτηση με τα υψόμετρα των σταθμών. Πολλές φορές η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης, που χαράσσεται για τον προσδιορισμό της βροχοβαθμίδας, προκύπτει με χαμηλό βαθμό γραμμικής συσχέτισης. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να ελεγχθούν οι δυνατότητες εξαίρεσης κάποιων σταθμών ή ο χωρισμός της περιοχής σε υποπεριοχές, στις οποίες να προκύπτει η ευθεία γραμμή παλινδρόμησης με ικανοποιητικό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης.

- ***Αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης***

Το ύψος βροχής που δεν λαμβάνει υπόψη το πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης, αλλά το υψόμετρο των σταθμών, χρειάζεται διόρθωση. Συνεπώς, σε μια λεκάνη απορροής που οι περισσότεροι σταθμοί έχουν εγκατασταθεί στα πεδινά, υποεκτιμάται η πραγματική επιφανειακή βροχόπτωση και αντίστροφα. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η διόρθωση της επιφανειακής βροχόπτωσης με βάση το πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Η διόρθωση προϋποθέτει την εκτίμηση της βροχοβαθμίδας και της διαφοράς του μέσου σταθμισμένου υψομέτρου των σταθμών από το πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης (Φλόκας, 1986). Για την εύρεση της βροχοβαθμίδας, συσχετίζεται γραμμικά η βροχόπτωση των σταθμών και το υψόμετρό τους. Η κλίση της ευθείας που σχηματίζεται (λ=0.0386) είναι η βροχοβαθμίδα, δίνει δηλαδή την αύξηση του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης με το υψόμετρο. Συνήθως η βροχοβαθμίδα εκφράζεται σε mm ύψους βροχής ανά 100 μέτρα μεταβολής του υψομέτρου, δηλαδή, στο σχήμα είναι ίση με 3.86.



Σχήμα 3: Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ βροχόπτωσης και υψομέτρου

Παράδειγμα : *Να υπολογιστεί το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (Μ.Ε.Υ.Β.) στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής με τα ακόλουθα δεδομένα:*

- *Βροχοβαθμίδα 135mm/100m*
- *υψόμετρο Μετεωρολογικού Σταθμού 75m*
- *Μέσο ετήσιο ύψος βροχής 679mm*

Λύση:

Υψομετρική διαφορά: Η med – Η Μ.Σ. = 360 -75 =285m

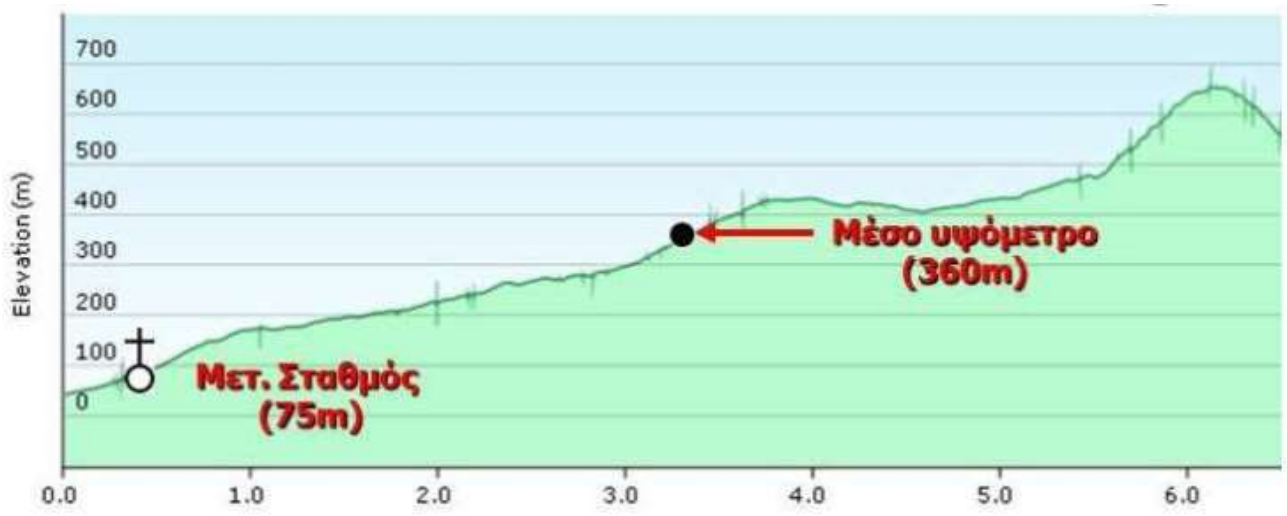
Βροχοβαθμίδα: 135mm/100m σημαίνει ότι για κάθε 100m αύξησης υψομέτρου, η βροχόπτωση αυξάνει κατά 135mm. Με την απλή μέθοδο των τριών δηλαδή:

Κάθε 100m	*αύξηση βροχής κατά*	*135mm*
Στα 285m	*''*	*Χ=384,7mm*

Επομένως ΜΕΥΒ (του Hmed) = 679 + 384.7 =1064.7mm = 1,064m

Η σχετική εξίσωση είναι:

*Ρ μέσου υψομέτρου=Ρ (σταθμού αναφοράς)+(Υψομετρική διαφορά ΔΗ*βροχοβαθμίδα)*



Σχήμα 4: Απεικόνιση της υψομετρικής διαφοράς σταθμού αναφοράς και μέσου υψομέτρου λεκάνης απορροής

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ -ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Biswas, A.K., 1969. ***A short history of hydrology,*** In: Progress of hydrology, Proc. Of the First International Seminar for Hydrology Professors, Univ. of Illinois, Urbana, III., 914-936.

Blanchon D., 2024. ***Γεωπολιτική του Νερού***, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.

Chow, V.T., 1964. ***Hydrology and its development,*** In: Handbook of applied hydrology (Chow V.T., ed.). McGraw-Hill Book Co., New York, Chapter 1, 1-10.

Horton, R.E., 1931. ***The Field, Scope and Status of the Science of Hydrology,*** Trans. Am. Geoph. Un. 12: 189-202.

Linsley, R.K., M.A. Kohler & J.L.H. Paulhus, 1949. ***Applied hydrology,*** McGraw-Hill Book Co., New York, 1-4.

Marshal T. 2015. ***Αιχμάλωτοι της Γεωγραφίας***, Εκδόσεις Διόπτρα

Κωτούλας, Δ., 2001. ***Υδρολογία και Υδραυλική Φυσικού Περιβάλλοντος,*** Θεσ/νίκη

Κωτούλας, Δ., 2001. ***Ορεινή Υδρονομική Ι,*** Θεσ/νίκη

Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1980. ***Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων,*** Έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.

Παπαμιχαήλ, Δ., 2001. ***Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων,*** Εκδ. Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσ/νίκη

Παυλίδης Θ., 2007. ***Χιονολογία-Χιονοδρομικά Κέντρα***, Θεσ/νίκη

Σακκάς, Ι., 2004. ***Τεχνική Υδρολογία,*** *Τόμος Ι. Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων,* Εδ. Αιβαζή, Θεσ/νίκη

Τσακίρης Ι., 1995. ***Υδατικοί Πόροι – 1 Τεχνική Υδρολογία,*** Εκδόσεις Συμμετρία, σελ. 675, Αθήνα

Φλόκας Α., 1986: ***Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας,*** Εκδόσεις Ζήτη, σελ. 387.

World Meteorological Organization, 1974: ***Guide to Hydrological Practices,*** 3rd ed., WMO, No 168, Geneva, Switzerland.

Β. ΔΑΣΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Καταρράκτης στη Χαλκιδική

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΚΑΙ ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ

Γενικά τα περί του υδρολογικού κύκλου διαλαμβανόμενα παρατίθενται στα σχετικά κεφάλαια του μέρους Ι (Επιφανειακή Υδρολογία). Η άμεση εξάρτηση της δασικής βλάστησης από τις κλιματικές συνθήκες (βροχής, θερμοκρασία), καθώς και η εξισορροπιστική δράση των δασών, με τη δημιουργία μικροκλιμάτων, οριοθετεί τη στενή σχέση του δάσους με το φυσικό αλλά και το ανθρωπογενές περιβάλλον. Παράλληλα η λειτουργία της βλάστησης ως προστατευτικής ομπρέλας στην επιθετική δύναμη της βροχής και η ρύθμιση της απορροής με μετατροπή σημαντικού μέρους της επιφανειακής και εν πολλοίς ζημιογόνας απορροής σε επιθυμητή ενδορροή ή διηθούμενη απορροή αποτελούν εξαιρετικής σημασίας παραμέτρους του υδρολογικού κύκλου. Ο ρυθμιστικός ρόλος των δασών στις υδρολογικές διεργασίες αποτελεί κεφαλαιώδους σημασίας υδρολογική παράμετρο και ως τέτοια πρέπει να αντιμετωπίζεται. Ιδιαίτερα σε ξηροθερμικές ή ελλειμματικές σε νερό (ποσοτικό, ποιοτικό) περιοχές, όπως οι Μεσσογειακές, η γνώση του υδρολογικού ρόλου των δασών και ιδιαίτερα των συγκροτημένων δασών αποτελεί σημαντική συμβολή στην κατανόηση, ρύθμιση, αντιμετώπιση και αξιοποίηση των διαφόρων σταδίων του υδρολογικού κύκλου επωφελεία του κοινωνικού συνόλου και του φυσικού περιβάλλοντος.

Σύμφωνα με τις φάσεις του υδρολογικού κύκλου, μέρος του νερού των πιπτόντων κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι κλπ) είναι υποχρεωμένο να διακρατηθεί στην φυτοκόμη της δασικής βλάστησης (δενδρώδης, θαμνώδης, ποώδης) πριν την άφιξή και μέτρησή του στο έδαφος. Με τον τρόπο αυτό, όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό, μειώνεται σημαντικά η αφικνούμενη και μετρούμενη στο έδαφος ποσότητα των πιπτόντων κατακρημνισμάτων. Η ποσότητα αυτή (υδατοσυγκράτηση) επανακάμπτει στην ατμόσφαιρα ως εξάτμιση της φυτοκόμης της βλάστησης. Το υπόλοιπο των κατακρημνισμάτων που φθάνει στο έδαφος έχει τις εξής πιθανότητες:

- να διακρατηθεί στο επιφανειακό έδαφος και τις επιφανειακές κοιλότητες. Από εκεί είτε άμεσα (απευθείας εξάτμιση), είτε έμμεσα διαμέσου του φαινομένου της εξάτμισης και της διαπνοής των φυτών (εξατμισιδιαπνοή) επανέρχεται στην ατμόσφαιρα.
- να διηθηθεί προς τα βαθύτερα στρώματα σχηματίζοντας υπόγεια νερά, πηγές, φρεάτιους ορίζοντες και βασικές παροχές χειμάρρων.
- το μη διακρατούμενο στο έδαφος και τις εδαφικές κοιλότητες νερό και το μη διηθούμενο πλεονάζον υποχρεούται να κινηθεί κατά τη μέγιστη κλίση, υπό την επήρειαν της βαρύτητας προς τις χαμηλότερες περιοχές, σχηματίζοντας το φαινόμενο της απορροής. Η συγκεντρωμένη απορροή στη συνέχεια σχηματίζει τα διαφόρου τύπου υδάτινα ρεύματα (χείμαρροι, χειμαρροπόταμοι, ποταμοί, μεγάλοι ποταμοί) πριν την κατάληξή της στους τελικούς αποδέκτες (λίμνες, θάλασσες, ωκεανοί), από όπου επανέρχεται ως εξατμιζόμενη υγρασία στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας τα νέφη.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ενώ τα κύρια στάδια (φάσεις) του γενικού υδρολογικού κύκλου μορφοποιούνται κατά το Σχήμα 1α, στους τοπικούς υδρολογικούς κύκλους, όπου υπάρχει βλάστηση (λιβάδια, θάμνοι, υψηλά δάση), εκεί η σειρά εμφάνισης των σταδίων διαφοροποιείται κατά το Σχήμα 1β.

Σχήμα 1 α.

Σχήμα 1 β.

Σχήμα 2: Δασοϋδρολογικός κύκλος (Η υδατοσυγκράτηση τελικά επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως εξάτμιση).

1.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΑΣΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

Η Δασική Υδρολογία (Forest Hydrology) είναι η επιστήμη που ασχολείται με τις αμοιβαίες επιδράσεις μεταξύ υδρολογικού κύκλου και δασικής βλάστησης ή πληρέστερα η επιστήμη που εξετάζει τις αμοιβαίες σχέσεις μεταξύ κυκλοφορούντος ύδατος και δασικών φυτοκοινωνιών. Επομένως η Δασική Υδρολογία αποτελεί κλάδο της Επιφανειακής Υδρολογίας καθόσον η βλάστηση υπέρκειται του εδάφους και αποτελεί τον πρώτο δέκτη των πάσης φύσεως κατακρημνισμάτων. Παράλληλα η βλάστηση, ιδιαίτερα η δασική, αποτελεί έναν σημαντικό υδροκαταναλωτή, που απαιτεί ανάλογη υγρασία για την επιβίωσή του. Η σημαντική διαφοροποίηση της δασικής βλάστησης έναντι της τεχνητής (καλλιέργειες) έγκειται στο ότι το δάσος προσαρμόζεται και σε συνθήκες λειψυδρίας, σε αντίθεση με τις καλλιέργειες που απαιτούν άρδευση για να παράγουν την επιθυμητή παραγωγή.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι **το αντικείμενο της Δασικής Υδρολογίας είναι η μελέτη και η έρευνα του συνόλου των άμεσων ή έμμεσων αμοιβαίων αλληλεξαρτήσεων των δασικών φυτοκοινωνιών και του σε αυτές πίπτοντος ή διακινούμενου νερού, με τελικό στόχο την ορθολογική κίνηση του επωφελεία του φυσικού περιβάλλοντος αναπόσπαστο μέρος του οποίου αποτελεί ο άνθρωπος.** Ιδιαίτερα τα επιμέρους αντικείμενα, που πραγματεύεται η Δασική Υδρολογία είναι τα ακόλουθα:

- Δασική βλάστηση και κατακρημνίσματα
- Δασική βλάστηση και υδατοσυγκράτηση
- Δασική βλάστηση και εξαμτισιδιαπνοή
- Δασική βλάστηση και διήθηση
- Δασική βλάστηση και απορροή
- Δασική βλάστηση και χειμαρρικά φαινόμενα
- Δασική βλάστηση και ποιότητα νερού
- Δασική βλάστηση και παλαιομετεωρολογία

Όσον αφορά τα αποτελέσματα επιστημονικών ερευνών, που αφορούν τα αντικείμενα της Δασική Υδρολογίας, πρέπει να τονισθεί ότι αυτά βρίσκουν εφαρμογή μόνο στην περιοχή που διεξήχθηκαν, ή σε περιοχές με παρόμοιες κλιματικές, εδαφογεωλογικές κλπ. συνθήκες. Για το λόγο αυτό πρέπει οι ενδιαφερόμενοι να είναι εξαιρετικά προσεκτικοί στη χρήση ή την αναφορά ερευνών, που έγιναν σε άλλες χώρες, ή περιοχές με εντελώς διαφορετικό σταθμικό περιβάλλον. Ως ακραία περίπτωση διαφορετικότητας αναφέρονται οι δασοϋδρολογικές σχέσεις της έντονα ξηροδερμικής περιοχής της Σαχάρας, όπου το ελάχιστο μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται περί τα 76mm, (Kelly, 2014). με αρκετές περιοχές της να φθάνει ή να ξεπερνά τα 250mm, με την έντονα υγρή και ψυχρή Σιβηρία όπου όμως το μέσο ύψος βροχής ανέρχεται περίπου σε 350mm (είναι μικρότερο της Σαχάρας), καθότι τα κατακρημνίσματα είναι κυρίως με τη μορφή χιονιού.

1.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ο άνθρωπος από την ύπαρξή του, αλλά κυρίως από τη συγκρότηση των πρώτων οργανωμένων κοινωνιών, ζούσε με μια διαρκή προσπάθεια εξασφάλισης τόσο του αναγκαίου νερού, όσο και της αποφυγής της ζημιογόνας δράσης του. Είναι λογικό επομένως να υπάρχουν προφορικές ή και γραπτές αναφορές φαινομένων που σχετίζονται με τον υδρολογικό κύκλο. Δεν είναι τυχαίο ότι όλες οι παλαιές και οι σύγχρονες θρησκείες έχουν αναφορές στο φαινόμενο του κατακλυσμού, που αποτελεί την πρώτη γραπτή υδρολογική αναφορά. Είναι επίσης βέβαιο ότι όλοι οι μεγάλοι αρχαίοι πολιτισμοί (Κινέζοι, Ιάπωνες, Ινδοί, Πέρσες, Ασσύριοι-Βαβυλώνιοι, Χετταίοι, Αιγύπτιοι, Έλληνες, Ρωμαίοι κλπ) όφειλαν τους εντυπωσιακούς πολιτισμούς τους εκτός των άλλων και στα θαυμαστά και εντυπωσιακά υδραυλικά έργα που σχεδίαζαν και εκτέλεσαν (Κρεμαστοί Κήποι της Βαβυλώνας, Νείλος, Κίτρινος Ποταμός, Αχελώος, Υδραγωγεία κλπ). Όπως είναι φυσικό υδραυλικά έργα χωρίς ανάλογες υδρολογικές παρατηρήσεις (βροχές, στάθμες πλημμυρών κλπ) δεν ήταν δυνατόν να υλοποιηθούν. Επομένως είναι πέραν κάθε βεβαιότητας ότι όλοι οι αρχαίοι πολιτισμοί διεξήγαγαν σχετικές υδρολογικές παρατηρήσεις. Ενδεικτικά ξανααναφέρονται οι καταγραφές βροχής των Κινέζων, Ινδών κλπ., τα Νειλόμετρα (σταθμήμετρα) των Αιγυπτίων, τις υδρολογικές παρατηρήσεις και αναφορές των αρχαίων Ελλήνων Ιστορικών, Ποιητών και Φιλοσόφων (Ησίοδος, Όμηρος, Ηρόδοτος, Αριστοτέλης, Θαλής, Πλάτωνας κλπ).

Με δεδομένη την ανάγκη του πρώτου ανθρώπου να έχει πρόσβαση σε τροφή και νερό με ταυτόχρονη παροχή ασφαλούς κατοικίας και με βεβαιότητα ότι οι πρώτοι άνθρωποι για τους λόγους αυτούς εδραστηριοποιούντο σε δασικά οικοσυστήματα πλούσια σε νερό, τροφή και στέγη είναι λογικό να υπήρχαν ανάλογες δασοϋδρολογικές παρατηρήσεις. Οι παρατηρήσεις όμως αυτές αν και ήταν ζωτικής σημασίας για τον άνθρωπο παρέμειναν στη σφαίρα της παράδοσης, των δοξασιών και της θρησκείας (π.χ. Νεφεληγερέτης-Κεραύνιος Δίας, Κατακλυσμοί, Εδέμ κλπ).

Οι αρχαίοι Έλληνες παρουσίασαν γραπτές αναφορές για το νερό και τον κύκλο του, διατύπωσαν σχετικές θεωρίες και ανέπτυξαν υδρολογικές και υδραυλικές εφαρμογές σχετιζόμενες με υδρολογικές παρατηρήσεις. Οι Ρωμαίοι που ακολούθησαν βασιζόμενοι στις ελληνικές θεωρίες και στα πλαίσια εμπέδωσης και ανάπτυξης της αυτοκρατορίας τους, μας έδωσαν θαυμαστά υδραυλικά έργα, που στόχευαν κυρίως στην ύδρευση των πόλεων (υδραγωγεία), ή την εξασφάλιση των οδών μεταφοράς και διακίνησης ανθρώπων και εμπορευμάτων (γεφύρια). Κατά το Μεσαίωνα αναφορές για υδραυλική δραστηριότητα δεν υπάρχουν και φαίνεται ότι την εποχή αυτή διακόπηκε κάθε υδρολογική δραστηριότητα. Επομένως κατά την περίοδο αυτή δεν μας είναι γνωστή η ύπαρξη δασικών υδρολογικών γνώσεων ή εμπειριών από διαφόρους λαούς.

Με τη δημιουργία των πρώτων Δασολογικών Σχολών στην Ευρώπη περίπου πριν από 200 χρόνια (Nancy, Tharand, Giessen κλπ), και την έναρξη της συστηματικής σπουδής του δάσους, των δασικών φυτοκοινωνιών και κυρίως των σχέσεων τους με τα δομικά στοιχεία του περιβάλλοντος, άρχισαν να

διεξάγονται οι πρώτες συστηματικές δασοϋδρολογικές παρατηρήσεις και να δημιουργούνται οι πρώτες εμπειρικές κυρίως γνώσεις, περί των αμοιβαίων επιδράσεων μεταξύ των δασών και του κυκλοφορούντος ύδατος. Ιδιαίτερα η έρευνα επικεντρώθηκε κυρίως στο φαινόμενο της υδατοσυγκράτησης.

Οι πρώτες μετρήσεις της υδατοσυγκράτησης δασών έγιναν από τον Krutsch (1948) στη Γερμανία το 1863 (Weihe, 1974). Επίσης στη Γερμανία ο Ebermayer (1973) μελέτησε την υδατοσυγκράτηση ερυθρελάτης, Οξυάς και Πεύκης (Molchanov, 1960). Ο Mathieu στη Γαλλία (Mathieu, 1978), μελέτησε την υδατοσυγκράτηση δάσους Οξυάς (Delfs, 1955) και ο Hoppe (Hoppe, 1896) την αντίστοιχη υδατοσυγκράτηση ερυθρελάτης, δασικής Πεύκης και Οξυάς (Kittredge, 1948). Στην πρώην Σοβιετική Ένωση, ο Okhlyabinin (1913) προέβη σε αντίστοιχες μετρήσεις της υδατοσυγκράτησης δάσους πεύκης.

Οι πρώτες συστηματικές, εκτεταμένες και πολύχρονες δασοϋδρολογικές έρευνες για τον υδρολογικό ρόλο των δασών, έγιναν αρχικά στην Ελβετία περί τα τέλη του 1900 και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Οι έρευνες έγιναν υπό την εποπτεία του Ελβετού καθηγητή της Δασολογικής Σχολής του Πολυτεχνείου της Ζυρίχης A.Engler. Τα αποτελέσματα που δημοσιεύθηκαν το 1919 με τον τίτλο: «*Έρευνα της επίδρασης του δάσους στα υδάτινα ρεύματα*», αποτέλεσαν σταθμό αναφοράς για την εποχή εκείνη, ιδιαίτερα όσον αφορά τις σχέσεις του δάσους και του απορρέοντος νερού. Κατά το ίδιο έτος (1919) δημοσιεύθηκαν και τα αποτελέσματα συστηματικών ερευνών του αμερικανού καθηγητή Horton για την υδατοσυγκράτηση πολλών δασοπονικών ειδών. Οι δυο παραπάνω έρευνες αποτέλεσαν τα θεμέλια της Δασικής Υδρολογίας και το έναυσμα για την περαιτέρω ανάπτυξή της. Τα πειράματα του Engler που συνεχίσθηκαν μέχρι το έτος 1960 περίπου, αποτελούν μέχρι σήμερα τις μακροβιώτερες συστηματικές δασοϋδρολογικές παρατηρήσεις. Μετά τους Engler και Horton πλήθος επιστημόνων σε διάφορες χώρες ασχολήθηκε με ποικίλα Δασικά Υδρολογικά προβλήματα. Σε αυτό συνέβαλε η ίδρυση πολλών νέων Δασολογικών Σχολών με τη δημιουργία Υδρολογικών-Υδραυλικών Εργαστηρίων, καθώς και η δημιουργία πολυάριθμων Δασικών Υδρολογικών Ερευνητικών ή Μετρητικών Κέντρων ασχολουμένων με ειδικά υδρολογικά θέματα. Έτσι ξεκίνησε να εξελίσσεται η σύγχρονη Δασική Υδρολογική Επιστήμη.

Ιδιαίτερη ανάπτυξη παρουσίασε η Δασική Υδρολογική Επιστήμη αμέσως μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, ιδιαίτερα στις ΗΠΑ και στην τέως Ένωση Σοβιετικών Σοσιαλιστικών Δημοκρατιών και αργότερα στη Γερμανία, τις χώρες των Άλπεων (Αυστρία, Ελβετία, Ιταλία, Γαλλία) και τις Σκανδιναβικές χώρες. Στην ανάπτυξη αυτή, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως συνέβαλε τα μέγιστα η ίδρυση νέων Δασολογικών Σχολών, η δημιουργία σε αυτές εξειδικευμένων Εργαστηρίων και η δημιουργία Κέντρων (Ινστιτούτων) Δασικών Ερευνών σε όλες τις ανεπτυγμένες και σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες.

Ο Horton (1919) διετύπωσε με βάση τα αποτελέσματα των ερευνών του την ακόλουθη γενική σχέση, η οποία συνεχίζει να ισχύει μέχρι σήμερα (Kittredge, 1948):

$$I=S*T*K*E$$

Όπου:

I = Υδατοσυγκράτηση (Interception)

S = Ικανότητα υδατοσυγκράτησης (Storage Capasity) σε mm υπό συνθήκες νηνεμίας

K = Σχέση της συνολικής επιφάνειας της βλάστησης προς την προβολή της (Leaf index-LAI)

E = Ταχύτητα εξάτμισης του νερού από την κομοστέγη (mm/h)

T = Διάρκεια βροχής (h)

Επισημαίνεται ότι αφορμή της ώθησης της Δασοϋδρολογικής Έρευνας στις ΗΠΑ έδωσαν οι μεγάλες πλημμύρες του 1937 του Μισισιπή, οι οποίες αποδόθηκαν (Barner, 1961) στην αλόγιστη καταλήστευση του δασικού πλούτου της χώρας. Εκτός του Horton πολλοί αμερικανοί Δασοϋδρολόγοι, όπως οι Kittredge 1948, Rowe and Hendrix 1951, Trimble 1959, Rogerson 1968, Hewlett 1982, κλπ., ασχολήθηκαν συστηματικά με το αντικείμενο της Δασικής Υδρολογίας. Όπως αναφέρθηκε οι χώρες της τέως Σοβιετικής Ένωσης και ιδιαίτερα η Ρωσία (χώρα με παράδοση στην Δασική Υδρολογία) υπήρξαν πρωτοπόρες στη προώθηση της Δασοϋδρολογικής Επιστήμης με ειδική μνεία στη συμβολή του Δασικού Ινστιτούτου της Ακαδημίας της πρώην ΕΣΣΔ. Στη Ρωσία οι έρευνες διαφόρων Δασοϋδρολογικών θεμάτων έγιναν από Ρώσους Υδρολόγους, Δασολόγους, Μετεωρολόγους και Οικολόγους, από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα και σχετικά αναφέρονται οι δασοϋδρολογικές έρευνες των Okhlyabinin (1913), Mororov (1926), Nesterov (1932), Eitingen (1932, 1938, 1939, 1945), Kharitonov (1940) και πολλών άλλων.

Τονίζεται ότι κύρια αίτια της ανάπτυξης της Δασικής Υδρολογίας ήταν:

- τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα πολλών χωρών, λόγω της ισχυρής υποβάθμισης της δασικής βλάστησής τους. Ιδιαίτερα οι καταστροφές κωνοφόρων δασών από πυρκαγιά προκάλεσαν και προκαλούν έντονα πλημμυρικά και χειμαρρικά φαινόμενα, ιδιαίτερα σε χώρες με ξηροθερμικό περιβάλλον. Η φράση «*μετά την πυρκαγιά η πλημμύρα*», αποτελεί κοινό τόπο χωρών με ξηροθερμικό και όχι μόνο κλιματικό περιβάλλον.
- οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες σε ποιοτικά κατάλληλο νερό, των χωρών, με έντονες υδροκαταναλωτικές απαιτήσεις. Η ανάγκη αυτή οδήγησε σε δημιουργία πολλών Δασοϋδρολογικών Ερευνητικών Κέντρων με αντικείμενο την Δασική Υδρολογία (Forest Hydrology) ως μέσο διαχείρισης και εξοικονόμησης ποσοτικά επαρκούς και ποιοτικά ασφαλούς νερού. (Water management, Watershed management).

Μερικά από τα γνωστά για τις υδρολογικές τους έρευνες Πανεπιστήμια, Ιδρύματα και Κέντρα των ΗΠΑ είναι τα Hydrologic Laboratory (University of North Carolina), Forest Hydrology Laboratory (University of Oxford), Rocky Mountains Forest and Range Experiment Station (University of Fort Collins, Colorado), Forest Hydrology Laboratory (University of Tempe, Arizona), Forest Hydrology Laboratory (University of Columpus, Ohio).

Στην Κεντρική κυρίως αλλά και την λοιπή Ευρώπη, αρχικά τέθηκε ως κυρίαρχο πρόβλημα εκείνο των διαβρώσεων και λιγότερο το πρόβλημα της έλλειψης του νερού. Η Δασοϋδρολογική εξέλιξη με βάση τον παραπάνω στόχο επικεντρώθηκε στην Γερμανία και τις χώρες του τόξου των Άλπεων (Ελβετία, Αυστρία, Ιταλία, Γαλλία). Στη συνέχεια με την εξέλιξη της Δασοϋδρολογικής Επιστήμης στις ΗΠΑ και τον Καναδά τέθηκε και στην Ευρώπη, ως ένας εκ των βασικών στόχων και η εξεύρεση του αναγκαίου ποσοτικά και ποιοτικού νερού. Έτσι μετά το 1965 ιδιαίτερα στη Γερμανία, όπου το ποιοτικό-ποσοτικό πρόβλημα του νερού έγινε οξύτατο (ρυπασμένα νερά), παρουσιάζεται έξαρση της Δασοϋδρολογικής Επιστήμης με την ίδρυση και ανάπτυξη τόσο των Δασολογικών Σχολών όσο και Κρατικών Δασικών Υδρολογικών Ερευνητικών Κέντρων και Υπηρεσιών. Ιδιαίτερα γνωστή είναι η συνδρομή της Γερμανικής Εταιρείας Ερευνών στην ενίσχυση της Δασικής Υδρολογικής Έρευνας μιας ομάδας έρευνας με τίτλο «Δάσος και Νερό» που δραστηριοποιήθηκε στο Ίδρυμα Υδρολογικών Ερευνών του Koblenz. Στην ανάπτυξη της Υδρολογικής Δασικής Έρευνας συνέβαλαν η Δασολογική Σχολή του Πανεπιστημίου του Μονάχου και οι Δασοϋδρολογικοί Σταθμοί του δάσους της Φραγκφούρτης καθώς και του Δασοϋδρολογικού Σταθμού της περιοχής Schawazzsee της Ελβετίας.

Σημαντική πρόοδος στην Δασοϋδρολογική Έρευνα έχει επιτευχθεί στη Ν. Ζηλανδία, την Αυστραλία, την ΝΑ Ασία, την Ιαπωνία, το Ισραήλ, την Ισπανία, την Αλγερία, την Τυνησία, την Σουηδία, την Νορβηγία, την τέως Γιουγκοσλαβική Δημοκρατία, την Τσεχία και αλλού. Ιδιαίτερη μνεία οφείλει να γίνει στους απανταχού αυτόχθονες πληθυσμούς που ζουν σε αρμονία με το φυσικό περιβάλλον και γνωρίζουν βιωματικά την επιστήμη σε τόσο μεγάλο βαθμό που η μοντέρνα επιστήμη οφείλει με σεβασμό να καταγράψει, να διαφυλλάξει και να αναδείξει. Πρόσφατα στην Αυστραλία, η σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία παραδέχθηκε την πλήρη αποτυχία της στην αντιμετώπιση των ανεξέλεγκτων δασικών πυρκαγιών και ζήτησε εν λευκώ τη βοήθεια των Αβορίγινων.

Στη χώρα μας η Δασοϋδρολογική Έρευνα άρχισε να αποκτά συστηματική δομή με τη διδασκαλία του μαθήματος της Δασικής Υδρολογίας στη Δασολογική Σχολή του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με την ίδρυση των Ινστιτούτων Δασικών Ερευνών Αθηνών και Θεσσαλονίκης και την ίδρυση νέων Δασολογικών Τμημάτων (Ορεστιάδα, Καρπενήσι, Καρδίτσα, Δράμα). Ο πρώτος διδάξας το μάθημα της Δασικής Υδρολογίας το 1971 στη Δασολογική Σχολή του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης ήταν ο καθηγητής Δημήτριος Κωτούλας, ο οποίος συνέβαλε στη θεμελίωση των βάσεων της Δασικής Υδρολογικής Παιδείας. Η διδακτορική του διατριβή με τίτλο «Αι φυτείαι τραχείας Πεύκης εις τας λεκάνας απορροής των χειμάρρων εν Ελλάδι» (Κωτούλας, 1965) παρέχει μερικές αρχικές στοιχειώδεις μετρήσεις και καταγραφές για την επίδραση των φυτειών τραχείας πεύκης στη βελτίωση του πορώδους, της υδροπερατότητας, της υδατοχωρητικότητας και της υδατοσυγκρατητικής ικανότητας της φυλλάδας των φυτειών αυτών. Παράλληλα, με αξιόλογους εξειδικευμένους δασουδρολόγους ερευνητές, όπως οι Ιωάννης Παπούλιας και Μιχάλης Νικολαΐδης (Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών Θεσσαλονίκης), οι Γεώργιος Μπαλούτσος και Γεώργιος

Βουζαράς (Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών Αθηνών), η ανάπτυξη της Δασοϋδρολογικής Επιστήμης και Έρευνας απέκτησε νέα δυναμική. Σήμερα τα ΕΘΙΑΓΕ στελεχωμένα με νέους δυναμικούς συναδέλφους, δίνουν νέα ώθηση και όραμα στην πολύ σημαντική αυτή επιστήμη. Οι συνεχιζόμενες μέχρι σήμερα έρευνες στους δημιουργηθέντες δασοϋδρολογικούς σταθμούς στην Καρίτσα της Όσσας, στην Βαρετάδα της Αμφιλοχίας και την Χρυσοπηγή των Σερρών παρείχαν τα πρώτα συστηματικά αποτελέσματα της δασοϋδρολογικής έρευνας. Παράλληλα η ομάδα των ερευνητών του Εργαστηρίου Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων με κύριους εκφραστές τον Επικ. Καθηγητή Θεοφάνη Παυλίδη, τον Καθηγητή Παναγιώτη Στεφανίδη και τον Δασολόγο τέως βοηθό Μιχάλη Καϊκη και πιό πρόσφατα τους Μυρωνίδη Δημήτριο και Σαπουντζή Μάριο, έδωσε νέα ώθηση στην Δασοϋδρολογική Έρευνα και Πράξη. Σε επόμενη έκδοση του παρόντος πονήματος ο συγγραφέας θα ήθελε να εμπλουτίσει την παρούσα καταγραφή και να συμπεριλάβει συναδέλφους που από άγνοια δεν αναφέρονται.

Εικόνα 1: Σταθμός μέτρησης της απορροής σε δάσος οξιάς της Όσσας
https://dasarxeio.com/2019/07/14/69122/

Β.1. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ

✓ ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ – ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ & ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ

1. ΓΕΝΙΚΑ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, μια από τις σημαντικότερες φάσεις του υδρολογικού κύκλου (Σχ. 1.1) είναι η παρεμβολή της Δασικής Βλάστησης -και εν γένει κάθε μορφής βλάστησης- μεταξύ βροχής και εδάφους. Η φάση αυτή συνιστά την κορυφαία και καταλυτική δασοϋδρολογική λειτουργία, που επηρεάζει καταλυτικά, τόσο την ποσότητα της αφικνούμενης στο έδαφος βροχόπτωσης, όσο και την ενεργειακή κατάσταση της βροχής της στιγμή της άφιξής της στο έδαφος. Η όλη λειτουργία έχει ως εξής:

- Τα νερά της βροχής, κατά την πτώση τους, συναντούν την κομόστεγη της βλάστησης την οποία και διαβρέχουν.
- Στη συνέχεια το συγκροτούμενο νερό από την κομοστέγη, τους κορμοκλάδους, τα κλαδιά και τους κορμούς των δένδρων της δασικής βλάστησης, εξατμιζόμενο προς την ατμόσφαιρα απομειώνει κατά το μέγεθος της εξατμιζόμενης ποσότητας την αφικνούμενη στο έδαφος ποσότητα της βροχής. Η υδρολογική αυτή επίπτωση της βλάστησης αποτελεί σημαντικότατη υδρολογική λειτουργία, καθόσον ρυθμίζει την ποσότητα του νερού της βροχής, που φθάνει στο έδαφος και κατ' επέκταση ρυθμίζει όλες τις μετέπειτα υδρολογικές λειτουργίες (απορροή, διήθηση). Ακολούθως, παρατίθεται αναλυτικά η σημαντική αυτή λειτουργία της βλάστησης και αναλύονται οι όροι και οι παράγοντες που τη διαμορφώνουν.

2. ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗ, ΚΟΡΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗ, ΚΟΡΜΑΠΟΡΡΟΗ

Κομοδιαβροχή (Storage Capasity, Interception), *καλείται η ποσότητα νερού της πίπτουσας βροχής, η οποία απαιτείται για την πλήρη διαβροχή της συνολικής επιφάνειας των φύλλων, κλάδων και βλαστών, ώστε να αρχίσει το φαινόμενο της σταγονόπτωσης προς το δασικό έδαφος*. Η κομοδιαβροχή μετράται συνήθως σε mm βροχής. Επομένως η κομοδιαβροχή αποτελεί τη μέγιστη δυνατή ποσότητα νερού, που μπορεί να συγκρατηθεί στην κομοστέγη της δασικής βλάστησης.

Κορμοδιαβροχή *μεμονωμένου δένδρου, συστάδος δένδρων ή θάμνων καλείται η ποσότητα νερού της πίπτουσας βροχόπτωσης, η οποία απαιτείται για την πλήρη διαβροχή της επιφάνειας των κορμών και των κλάδων της δασικής βλάστησης, ώστε να καταστεί δυνατή η έναρξη της κορμαπορροής.* Αποτελεί επομένως η κορμοδιαβροχή τη μέγιστη δυνάμενη να συγκρατηθεί ποσότητα νερού, από τον κορμό και τους κλάδους της δασικής βλάστησης. Η κορμοδιαβροχή, όπως και η κομοδιαβροχή μετράται σε mm νερού της πίπτουσας βροχής.

Κορμαπορροή (Stemflow) *μεμονωμένου δένδρου, συστάδας δένδρων ή θάμνων, καλείται η ποσότητα νερού της πίπτουσας βροχής, που απορρέει από τον κορμό της δασικής βλάστησης, προς το δασικό έδαφος, κατά τη διάρκεια της βροχής.* Η μέτρηση της κορμαπορροής γίνεται με την τοποθέτηση ενός περιβάλλοντα τον κορμό δακτυλίου συλλογής του νερού, που οδηγεί το συλλεγόμενο νερό εντός ενός

ογκομετρικού δοχείου μέτρησης. Η μέτρηση της κορμαπορροής γίνεται σε mm νερού, συχνά δε εκφράζεται και ως ποσοστό % της πίπτουσας βροχής. Η Εικόνα 2 δείχνει το σύστημα μέτρησης της κορμαπορροής.

Εικόνα 2: Μέτρηση της κορμαπορροής δένδρου εντός δασικής συστάδας (https://en.wikipedia.org/wiki/Stemflow).

3. ΔΙΑΠΕΡΩΣΑ ΒΡΟΧΗ

Διαπερώσα βροχή (Throughfall) *καλείται η ποσότητα νερού της πίπτουσας βροχής που διαπερνώντας την κομοστέγη της βλάστησης φθάνει στο δασικό έδαφος εντός μιας χρονικής περιόδου*. Η διαπερώσα βροχή δίνεται σε mm ύψους βροχής ή ως ποσοστό % της πίπτουσας σε διπλανό γυμνό έδαφος βροχής. Η μέτρηση της διαπερώσας βροχής γίνεται είτε με την τοποθέτηση δικτύου απλών βροχομέτρων, εντός της συστάδας στις κορυφές ή τα κέντρα τετράγωνων (Εικ. 3) ή με ειδικού τύπου βροχομετρικές συσκευές (Εικ. 4.) που τοποθετούνται και αυτές σε παράλληλες σειρές εντός της συστάδας με συστηματικό τρόπο.

Εικ. 3: Άποψη τρόπου τοποθέτησης κυλινδρικών βροχομέτρων εντός συστάδας για τη μέτρηση της διαπερώσας βροχής στην Ιαπωνία (Momiyama et al., 2023).

Εικ. 4: Άποψη της ειδικής βροχομετρικής συσκευής, μέτρησης της διαπερώσας βροχής σε συστάδα ερυθρελάτης στη Γερμανία (Delfs, 1954).

Η γνώση της διαπερώσας βροχής αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο υδρολογικό εργαλείο για κάθε υδρολόγο ερευνητή ή μελετητή. Αυτό γιατί καμία υδρολογική έρευνα ή μελέτη δεν μπορεί, όσο και καλά να σχεδιασθεί στη συνέχεια, να στηριχθεί (όπως συνήθως συμβαίνει στην πράξη) σε δεδομένα ύψους βροχής παρεχόμενα από εγκαταστημένα βροχόμετρα ή βροχογράφους, τοποθετημένα σύμφωνα με όσα η επιστήμη της μετεωρολογίας επιτάσσει. Το λάθος είναι προφανές και γίνεται ακόμη μεγαλύτερο όσο η βλάστηση γίνεται πυκνότερη και κατ' επέκταση η διαπερώσα βροχή μικρότερη. Η παραπάνω επισήμανση τοποθετεί τον δασολόγο-υδρολόγο αλλά γενικά κάθε δασολόγο μελετητή σε πλεονεκτικότερη θέση όλων των λοιπών υδρολόγων μελετητών, γιατί ο δασολόγος γνωρίζοντας τα δομικά χαρακτηριστικά της δασικής βλάστησης μπορεί να κατευθύνει τους δασοκομικούς χειρισμούς με τρόπο ώστε να έχει μεγαλύτερα ή μικρότερα ποσά διαπερώσας βροχής.

4. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ

Υδατοσυγκράτηση (Interception) *μεμονωμένου δένδρου, συστάδας δένδρων ή θάμνων ή ποών καλείται το ποσόν της πίπτουσας βροχής, που συγκρατείται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περίοδου (ημέρα, εβδομάδα, μήνα, εποχή, έτος), από την κόμη των δένδρων, θάμνων ή ποών ή την κομοστέγη των συστάδων.* Η συγκρατούμενη ποσότητα νερού εξατμιζόμενη επιστρέφει εκ νέου στην ατμόσφαιρα ως πρωτογενής απώλεια. Αποτελεί επομένως τη καταγραφόμενη διαφορά ύψους βροχής, κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, μεταξύ γυμνής και φυτοκαλυμμένης με δασική βλάστηση επιφάνειας, μετά την αφαίρεση της ποσότητας νερού, που απορρέει, ως κορμαπορροή, από τους κορμούς και τους κλάδους της δασικής βλάστησης. Μετράται συνήθως ως ποσοστό % του συνολικού ύψους βροχής, σπανιότερα δε και σε mm βροχής.

5. Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΕΩΣ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Οι σταγόνες βροχής φθάνουν στην επιφάνεια του εδάφους έχοντας περίπου μέση ταχύτητα 8m/sec. Κατά την άφιξή τους στην κομοστέγη των συστάδων και δένδρων προσκρούουν στα φύλλα και τις βελόνες της δασικής βλάστησης και χάνουν σημαντικό μέρος της κινητικής τους ενέργειας. Παράλληλα οι σταγόνες διασπώνται σε μικρότερα τμήματα. Μέρος της βροχής εκσφενδονίζεται με μορφή σταγονιδίων, ενώ το υπόλοιπο συγκρατείται από τα φύλλα και τις βελόνες με μορφή περιβάλλουσας την επιφάνεια των φύλλων λεπτής υδάτινης στρώσης ή λεπτών σταγόνων.

Όπως είναι φυσικό η ποσότητα και η μορφή του συγκρατούμενου νερού, ως συνάρτηση των δυνάμεων συνοχής και συνάφειας, που το συγκρατούν, εξαρτάται από τη φύση των φύλλων και κυρίως από το κηρώδες επίστρωμά τους. Όσο το φύλλο και το κηρώδες επίστρωμα είναι λεπτό και λείο αρκεί μικρή ποσότητα νερού, για να διαβρέξει ολόκληρη την επιφάνεια του φύλλου. Αντίθετα όσο το φύλλο ή το

κηρώδες επίστρωμα γίνεται τραχύτερο και παχύτερο εκεί συγκρατείται περισσότερο νερό με μορφή χονδρών σταγόνων με μεγαλύτερες δυνάμεις συνοχής και συνάφειας.

Σχετικά με την κύρια διάκριση των δασοπονικών ειδών τα μεν κωνοφόρα συγκρατούν το νερό ιδιαίτερα το νερό των διαρκουσών βροχών, ως επί το πλείστον στα άκρα των βελόνων. Οι πυκνές φυόμενες βελόνες π.χ. της ερυθρελάτης, διακρατούν πολύ περισσότερο νερό λόγω των δημιουργουμένων περισσοτέρων ανωμαλιών και ανομοιογενών στη διαμόρφωση του φυλλώματος της κόμης τους. Γενικά όσο μακρύτερες είναι οι βελόνες, τόσο γρηγορότερα το νερό φθάνει στα άκρα της βελόνας.

Στα πλατύφυλλα, ιδιαίτερα τα έχοντα ευρέα φύλλα, το συγκρατούμενο νερό συγκεντρώνεται κατά κύριο λόγο εντός των κοιλωμάτων των φύλλων και τα άκρα (ακμές) αυτών κυρίως με τη μορφή χονδρών σταγόνων. Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι η υφή της επιφάνειας των φύλλων έχει ιδιαίτερη σημασία για την συγκρατούμενη ποσότητα του νερού. Έτσι, φύλλα με τραχεία επιφάνεια ή τρίχωμα συγκρατούν πολύ περισσότερο νερό από ότι φύλλα με λεία στιλπνή επιφάνεια. Σημασία επίσης έχει στην διακρατούμενη ποσότητα νερού και η θέση και η διάταξη των φύλλων, ως προς το φυτό επηρεάζει. Κεκλιμένα ή κρεμώμενα φύλλα όπως είναι φυσικό αποβάλλουν ταχέως τα πίπτοντα σε αυτά νερά. Μια ώριμη οξιά, έχει ως και 200.000 φύλλα και αν αυτά απλωθούν στο έδαφος, καλύπτουν επιφάνεια λίγο μικρότερη από μισό στρέμμα. (Μανέτας 2019).

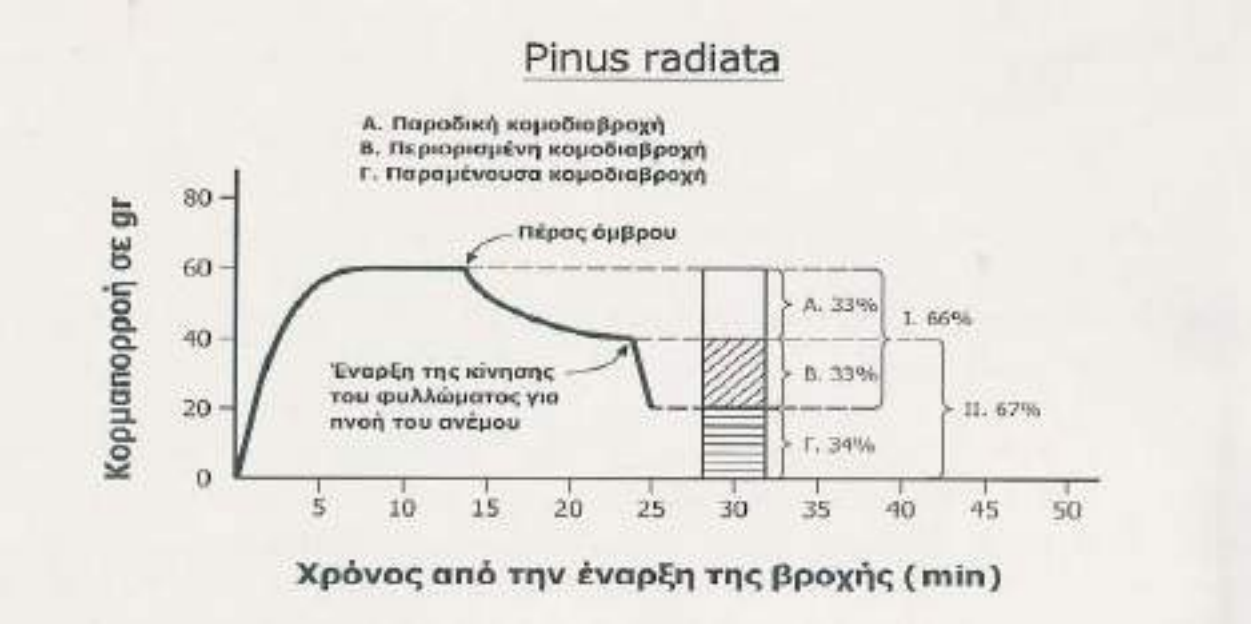
5.2. ΜΟΡΦΕΣ ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ

Όπως αναφέρθηκε, η σταγονόπτωση ενός φύλλου ή μιας βελόνας προς το δασικό έδαφος αρχίζει όταν η συνολική επιφάνεια του φύλλου κορεσθεί με νερό, δηλαδή όταν το βάρος του υπό μορφή σταγόνας συγκρατούμενου νερού υπερβεί τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις συνοχής και συνάφειας. Κατά συνέπεια η σταγονόπτωση εξαρτάται απόλυτα και από την ένταση της βροχής και το μέγεθος των πιπτόντων σταγόνων, αλλά και την ένταση του πνέοντος ανέμου. Υπό ομαλές συνθήκες η σταγονόπτωση διαρκεί γενικά περισσότερο από δύο ώρες.

Όπως είναι φυσικό ο άνεμος μειώνει την κομοδιαβροχή της δασικής βλάστησης, λόγω της μηχανικής κίνησης που προκαλεί και της αδυναμίας μέρους του συγκρατούμενου νερού να διατηρηθεί στο φύλλωμα ως κορμοδιαβροχή. Το μέρος αυτό ως σταγονόπτωση, πέφτει στο έδαφος ή εξαιρετικά σπάνια εξατμίζεται προς την ατμόσφαιρα. Το Σχήμα 3 παρουσιάζει την επίδραση του ανέμου στην υδατοσυγκράτηση της Pinus Radiata. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν βρεθεί και σε άλλα δασικά είδη. Προκύπτει λοιπόν ότι η μορφή και η ποσότητα της κομοδιαβροχής δύναται ανάλογα της κατάστασης του ανέμου να διακριθεί σε:

- ***παραμένουσα κομοδιαβροχή*** *καλείται η μέγιστη δυναμένη να συγκρατηθεί ποσότητα νερού της βροχής στην κομοστέγη της δασικής βλάστησης κατόπιν της επίδρασης ισχυρού ανέμου.*

- ***περιορισμένη κομοδιαβροχή****, καλείται η ποσότητα του νερού της βροχής η οποία δύναται να συγκρατηθεί από την κομοστέγη της δασικής βλάστησης πέραν της παραμένουσας, κατά την διάρκεια νηνεμίας, ήτοι χωρίς την μηχανική επίδραση του ανέμου αλλά μετά παύση της βροχής.*
- ***παροδική κομοδιαβροχή****, καλείται η ποσότητα του όμβριου νερού η οποία συγκρατείται από την κομοστέγη της δασικής βλάστησης πέραν της παραμένουσας και της περιορισμένης, κατά τη διάρκεια της πτώσης της βροχής και υπό πλήρη νηνεμία. Η ποσότητα αυτή συνήθως χάνεται ως «στράγγιση» με το πέρας της βροχής μετασχηματιζόμενη σε σταγονόπτωση προς το έδαφος ή σε κορμαπορροή.*



Σχήμα 3: Πορεία της παραμένουσας (α) της περιορισμένης (β) και της παροδικής (γ) κομοδιαβροχής σε συστάδα Pinus Radiata (Grah και Wilson, 1944)*.

5.3. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ, ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΤΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

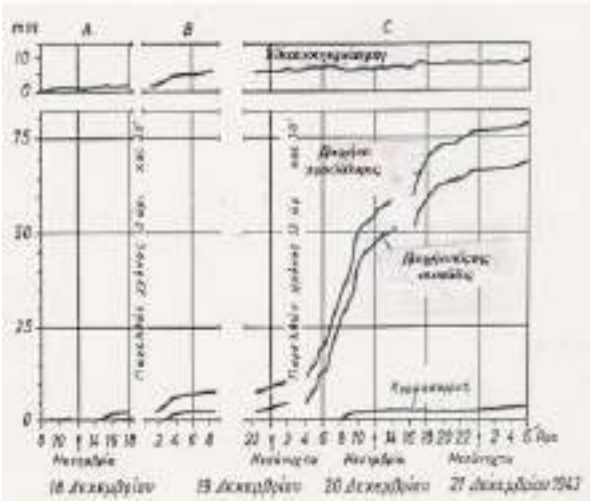
Υδατοσυγκρατητική Ικανότητα *καλείται η δυνάμενη να συγκρατηθεί και να εξατμισθεί υδατοσυγκρατούμενη από τα δασική βλάστηση, ποσότητα νερού.* Ουσιαστικά η υδατοσυγκρατητική ικανότητα συνίσταται από το άθροισμα της παραμένουσας και της περιορισμένης υδατοσυγκράτησης της δασικής βλάστησης.

Υδατοσυγκρατητική Χωρητικότητα *καλείται η μέγιστη δυνάμενη να συγκρατηθεί από τη δασική βλάστηση ποσότητα νερού της βροχής.* Ουσιαστικά η υδατοσυγκρατητική χωρητικότητα αποτελείται από το άθροισμα της παραμένουσας, της περιορισμένης και της παροδικής υδατοσυγκράτησης της δασικής βλάστησης. Εκφράζει δηλαδή τη μέγιστη ποσότητα νερού, που μπορεί να διακρατήσει η κομοστέγη της βλάστησης κάτω από τις ευνοϊκότερες συνθήκες υδατοσυγκράτησης (πλήρη άπνοια).

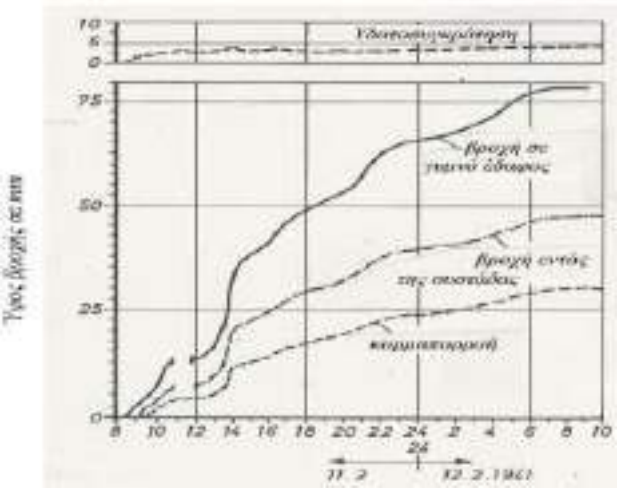
Με βάση τα παραπάνω αποκτούν ιδιαίτερη σημασία τα ακόλουθα:

- Οι ισχυροί άνεμοι όπως και η άπνοια (νηνεμία) δεν είναι συνήθη αλλά έκτακτα φαινόμενα. Στις περισσότερες των περιπτώσεων πνέουν συνήθως άνεμοι ελαφράς ή μέτριας έντασης. Επομένως η κομοστέγη της δασικής βλάστησης βρίσκεται σχεδόν πάντοτε σε μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ πλήρους άπνοιας, δηλαδή της υδατοσυγκρατητικής χωρητικότητας και ισχυρού ανέμου δηλαδή της παραμένουσας υδατοσυγκράτησης, η οποία είναι τμήμα της υδατοσυγκρατητικής ικανότητας.
- Ανεξάρτητα της ποσότητας που συγκρατείται στην κομοστέγη (κομοδιαβροχή), για να συγκρατηθεί εκ νέου η αυτή ποσότητα νερού στην ίδια κομοστέγη απαιτείται να έχει πλήρως εξατμισθεί προς την ατμόσφαιρα. Αν όμως συμβεί, όπως συνήθως συχνά συμβαίνει, πτώση νέας βροχής πριν την πλήρη εξάτμιση της ήδη συγκρατηθείσας ποσότητας νερού στην κομοστέγη της βλάστησης, τότε η νέα διακρατούμενη ποσότητα νερού της κομοδιαβροχής θα είναι μικρότερη της μέγιστης δυνατής κατά το μέγεθος της μη εξατμισθείσας ποσότητας κομοδιαβροχής. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους, που διαμορφώνουν τις διαδοχικές φάσεις της κομοδιαβροχής και επομένως την τελική τιμή της υδατοσυγκράτησης.
- Η ποσότητα της υδατοσυγκρατούμενης κομοδιαβροχής επηρεάζεται επίσης και από την σπαργή του φυλλώματος, δηλαδή την εσωτερική υγρασιακή κατάσταση του φυτού, που αντανακλάται σε μέγεθος (δυνατότητα) υδατοσυγκράτησης του φυλλώματος. Έτσι φυτά με εσωτερική επάρκεια υγρασίας έχουν μικρότερη υδατοσυγκρατητική ικανότητα και επομένως επιτυγχάνουν μικρότερες τιμές συνολικής υδατοσυγκράτησης.

Στα Σχήματα 4 και 5 που ακολουθούν παρέχουν την πορεία του φαινομένου της υδατοσυγκράτησης, σε σχέση με την πίπτουσα βροχή σε συστάδες Pinus ponderosa ηλικίας 65-75 ετών και σε αείφυλλα πλατύφυλλα στις ΗΠΑ.



Σχ. 4: Βροχή σε έδαφος, διαπερώσα βροχή, υδατοσυγκράτηση και κορμαπορροή σε συστάδα Pinus Ponderosa 65-75 ετών (Hendrix and Rowe, 1951)*



Σχ. 5: Βροχή σε γυμνό έδαφος, διαπερώσα βροχή και υδατοσυγκράτηση σε αείφυλλα - πλατύφυλλα στην Καλλιφόρνια (Hamilton and Rowe, 1949)*

5.4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΑΣΟΣΥΣΤΑΔΩΝ

Από τη φύση του, το φαινόμενο της κομοδιαβροχής και κατ' επέκταση της υδατοσυγκράτησης είναι φυσικό να επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων που σχετίζονται τόσο με τη φύση της δασικής συστάδας και των δασικών δένδρων, όσο και με τους λοιπούς σταθμικούς παράγοντες (κλίμα, έδαφος, τοπογραφία-ανάγλυφο κλπ).

Ι. Κλιματικοί και Φυσιογραφικοί Παράγοντες

Α. Χαρακτηριστικά Βροχής

Τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων που επηρεάζουν την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση είναι τα ακόλουθα:

- Το ύψος της βροχής: Το ύψος της βροχής, τόσο το συνολικό ύψος βροχής μιας περιόδου, όσο και ιδιαίτερα το ύψος κάθε επεισοδίου βροχής, όπως είναι φυσικό επηρεάζει σημαντικά τόσο την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση, όσο και την διαπερώσα βροχή. Γενικά με την αύξηση του ύψους ενός επεισοδίου βροχής μειώνεται η υδατοσυγκράτηση της δασικής βλάστησης, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ποσότητα της διαπερώσας βροχής. Επισημαίνεται ότι ενώ αυξανομένου του ύψους των επεισοδίων βροχής μειώνεται η υδατοσυγκράτηση, αντίθετα με μείωση του ετήσιου ύψους βροχής, μειώνεται μεν το απόλυτο ποσό της υδατοσυγκρατούμενης υγρασίας, αυξάνεται όμως σημαντικά το εκατοστιαίο ποσοστό της υδατοσυγκράτησης. Το γεγονός αυτό ενέχει ιδιαίτερη σημασία, για την υδατοσυγκράτηση σε περιοχές μικρού ετήσιου ύψους βροχής.
- Η διάρκεια και η ένταση της βροχής: Από τα χαρακτηριστικά της βροχής τη μεγαλύτερη σημασία, για την υδατοσυγκράτηση και την κομοδιαβροχή, έχει η ένταση αλλά και η διάρκεια της. Αυξανόμενης της έντασης της βροχής (μεγάλο ύψος βροχής-μικρή διάρκεια) μειώνεται η υδατοσυγκράτηση. Ιδιαίτερα μειωμένη εμφανίζεται η υδατοσυγκράτηση καταιγίδων. Τονίζεται ότι η αναφορά σε μείωση ή αύξηση της υδατοσυγκράτησης εκφράζει το εκατοστιαίο ποσοστό υδατοσυγκράτησης της πίπτουσας βροχής και όχι το απόλυτο ύψος της υδατοσυγκράτησης σε mm. Επομένως αύξηση της έντασης βροχής προκαλεί αντίστοιχη ποσοστιαία μείωση της υδατοσυγκράτησης.

Σχετικά με την επίπτωση της βροχής και των χαρακτηριστικών της στο ύψος της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης ασχολήθηκαν διάφοροι ερευνητές συχνά με αρκετές αποκλίσεις στα προκύπτοντα αποτελέσματα. Ο υδρολογικός κύκλος των μικρολεκανών απορροής επηρεάζεται από την υδατοσυγκράτηση που στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι το **10-30%** των κατακρημνισμάτων (Calder, 1990, Chang 2006). Ο Horton, (1919) αναφέρει ότι η υδατοσυγκράτηση δασικής βλάστησης χαμηλού ύψους βροχής μπορεί να φθάσει και το 70% του ύψους βροχής. Αντίθετα σε ισχυρές καταιγίδες το αντίστοιχο ποσοστό της υδατοσυγκράτησης της δασικής βλάστησης φθάνει μόλις το 24% ή και

λιγότερο. Οι ετήσιες διακυμάνσεις της βροχόπτωσης είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει το ρυθμό υδατοσυγκράτησης στα δάση της εύκρατης ζώνης.

Β. Θερμοκρασία Αέρα

Όπως είναι λογικό η θερμοκρασία αέρα αποτελεί σημαντικό κλιματικό παράγοντα της οποίας η αύξηση ή η μείωσή και γενικά η διακύμανσή της επηρεάζει αποφασιστικά την ταχύτητα εξάτμισης της κομοδιαβροχής και επομένως την υδατοσυγκράτηση. Αυξανομένης της θερμοκρασίας αυξάνει η κομοδιαβροχή και η υδατοσυγκράτηση, ενώ μειωμένης της θερμοκρασίας μειώνεται αντίστοιχα η κομοδιαβροχή και η υδατοσυγκράτηση. Παράλληλα η θερμοκρασία επηρεάζοντας τη σχετική υγρασία του αέρα επηρεάζει έμμεσα την ταχύτητα της εξάτμισης και επομένως την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση.

Γ. Άνεμος

Ο άνεμος περισσότερο από κάθε άλλο κλιματικό παράγοντα επηρεάζει καθοριστικά και αποφασιστικά, όχι μόνο την υδατοσυγκράτηση, αλλά και την κομοδιαβροχή την οποία όπως αναφέρθηκε (Κεφ. 5.2, Σχ. 2.1) διακριτοποιεί σε παραμένουσα (ισχυρός άνεμος) περιορισμένη (ήπιος άνεμος) και παροδική (άπνοια) κομοδιαβροχή. Εξάλλου ο άνεμος αποτελεί τον σημαντικότερο επιταχυντή της εξάτμισης της διακρατούμενης ποσότητας νερού της κομοδιαβροχής. Γενικά κάθε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει την εξάτμιση της κομοδιαβροχής και επομένως την υδατοσυγκράτηση, ενώ αντίθετα κάθε μείωση της ταχύτητας προκαλεί αύξηση της υδατοσυγκράτησης.

Δ. Υγρασία Αέρα

Η υγρασία αέρα επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα ανταλλαγής της υγρασίας από τη φυλλική επιφάνεια προς την ατμόσφαιρα και αντιστρόφως. Υψηλή σχετική υγρασία αέρα εμποδίζει την εξάτμιση και επομένως την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση, αντίθετα μειωμένη σχετική υγρασία αέρα αυξάνει την εξάτμιση και επομένως την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση. Όπως είναι φυσικό, μιά κορεσμένη με υγρασία ατμόσφαιρα όχι μόνο εμποδίζει την απώλεια της υγρασίας της φυλλικής επιφάνειας (εξάτμιση προς την ατμόσφαιρα), αλλά και την εμπλουτίζει με πρόσθετα ποσά υγρασίας, μειώνοντας σημαντικά την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση.

Ε. Ηλιοφάνεια, Βαθμός νέφωσης

Η ηλιοφάνεια και αντίστοιχα ο βαθμός νέφωσης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση. Μεγάλη και συνεχής ηλιοφάνεια αυξάνει σημαντικά την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση ενώ η νέφωση (σκίαση) των δασοσυστάδων επιφέρει σημαντική μείωσή της.

ΣΤ. Εποχή του έτους

Η εποχή του έτους ασκεί μεγάλη επίδραση στο ύψος της υδατοσυγκράτησης. Αυτή δύναται να ανέλθει στις συστάδες πλατυφύλλων σε 10 με 15%, ενώ στα κωνοφόρα εμφανίζεται κατά πολύ μικρότερη. Για παράδειγμα, έρευνες του Cepel (1967) στην Τουρκία της οποίας τα αποτελέσματα υπάρχουν στον Πίνακα 2.3 (βλ πιο κάτω Υπολογισμός Υδατοσυγκράτησης), έδειξαν ότι η διαφορά της υδατοσυγκράτησης μεταξύ θέρους και χειμώνα ανέρχεται σε συστάδες Οξυάς σε 7,2%, σε συστάδες Δρυός σε 12,9% και σε συστάδες Πεύκης μόνον σε 2,8%. Η διαφοροποίηση της υδατοσυγκράτησης μεταξύ κωνοφόρων και πλατυφύλλων, ιδιαίτερα η καταγραφόμενη μεγάλη μείωση της υδατοσυγκράτησης των πλατυφύλλων το χειμώνα συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση της κορμαπορροής. Οι μικρότερες τιμές υδατοσυγκράτησης των φυλλοβόλων ιδιαίτερα κατά το χειμώνα ερμηνεύονται από την έλλειψη του φυλλώματος. Αντίθετα η προκαλούμενη μικρή μείωση της υδατοσυγκράτησης το χειμώνα στα κωνοφόρα αποδίδεται στην υψηλή σχετική υγρασία του αέρα τις χαμηλές θερμοκρασίες και το μικρότερο βαθμό ηλιοφάνειας του χειμώνα, που περιορίζουν πολύ την εξάτμιση των κωνοφόρων, γεγονός που μειώνει την υδατοσυγκράτηση. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η υδατοσυγκράτηση της δασικής βλάστησης ανεξάρτητα του αν συγκροτείται από πλατύφυλλα ή κωνοφόρα είδη παρουσιάζεται αυξημένη κατά το θέρος έναντι του χειμώνα. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη στα φυλλοβόλα πλατύφυλλα (8÷12%) από ότι στα κωνοφόρα (2÷3%).

Ζ. Γεωγραφικό Πλάτος

Το γεωγραφικό πλάτος επηρεάζει έμμεσα την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση της δασικής βλάστησης. Η έμμεση επίδραση προέρχεται από την άμεση εξάρτηση των κλιματικών στοιχείων με το γεωγραφικό πλάτος (ύψος και διάρκεια βροχών, διαφοροποίηση των εποχών και της διάρκειας ημέρας-νύχτας, μεταβλητότητα των συνθηκών νέφωσης-ηλιοφάνειας, διαφορετική σχετική υγρασία κλπ). Επομένως το γεωγραφικό πλάτος επηρεάζοντας θετικά ή αρνητικά τους κλιματικούς παράγοντες αυξάνει (μικρό γεωγραφικό πλάτος) ή μειώνει (μεγάλο γεωγραφικό πλάτος) την υδατοσυγκράτηση.

Η. Έκθεση (Γενική, Ειδική) Βαθμός σκίασης

Η έκθεση επηρεάζει τόσο την ποσότητα της αφικνούμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων το πρωί, το μεσημέρι και το απόγευμα, όσο και την θερμοκρασία, την κατεύθυνση και την υγρασία των σχηματιζομένων ανέμων, καθώς και τον βαθμό σκίασης των δασοσυστάδων. Επομένως οι Ν και ΝΔ εκθέσεις εμφανίζουν αυξημένες τιμές υδατοσυγκράτησης, ενώ αντίθετα οι Β και ΒΑ εκθέσεις εμφανίζουν μικρότερες τιμές υδατοσυγκράτησης.

Θ. Γεωμορφολογικό ανάγλυφο

Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο επηρεάζει την υδατοσυγκράτηση και την κομοδιαβροχή, ιδιαίτερα η κατακορυφότητα και η υψομετρική διαφορά, επηρεάζει τη θερμοκρασία, τους ανέμους, τη σχετική υγρασία, το ύψος και τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων, καθώς και τη σχετική υγρασία αέρα. Σε γενικές γραμμές αυξανομένου του υψομέτρου και της κλίσης της επιφάνειας μειώνεται η υδατοσυγκράτηση και η κομοδιαβροχή, ενώ αυξάνει μειωμένου του υψομέτρου και της επικλινότητας.

Ι. Εδαφική Υγρασία

Η εδαφική υγρασία μόνο έμμεσα επηρεάζει την υδατοσυγκράτηση και την κομοδιαβροχή και στο βαθμό που επηρεάζει την ανάπτυξη, τη θολερότητα, τη στιλπνότητα και την εσωτερική υγρασιακή κατάσταση του φυλλώματος της δασικής βλάστησης. Σε γενικές γραμμές ύπαρξη υγρασίας στο έδαφος μειώνει την υδατοσυγκράτηση και την κομοδιαβροχή, ενώ αντίθετα η έλλειψη εδαφικής υγρασίας αυξάνει την υδατοσυγκράτηση και την κομοδιαβροχή.

ΙΙ. Βιολογικά (Χλωριδικά) χαρακτηριστικά της Δασικής Βλάστησης

i. Γενικά

Επειδή ο χώρος που υλοποιείται το φαινόμενο της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης είναι η κόμη των δένδρων και η κομοστέγη των δασικών συστάδων προκύπτει ότι κάθε βιολογικό χαρακτηριστικό της δασικής βλάστησης, που διαμορφώνει, ή επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της κόμης ή της κομοστέγης της δασικής βλάστησης επηρεάζει το φαινόμενο της υδατοσυγκράτησης και της κομοδιαβροχής. Ως γενική αρχή ισχύει ότι κάθε βιολογικό χαρακτηριστικό, που συντελεί στην αύξηση της φυλλικής μάζας, αυξάνει την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση, ενώ αντίθετα ότι μειώνει την φυλλική μάζα μειώνει την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση. Η υδατοσυγκράτηση έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στις κλιματικές παραμέτρους και λιγότερη σε εκείνους που σχετίζονται με τη δομή της κόμης. Ωστόσο, σε υψηλά με μεγάλη ποσότητα βιομάζας δάση της εύκρατης ζώνης, η υδατοσυγκράτηση μπορεί να φτάσει το 40% των κατακρημνισμάτων, ενώ σε τροπικά δάση με μεγάλα ύψη βροχής υψηλής ραγδαιότητας οι τιμές κυμαίνονται από 10-15% (Baiamonte, 2021*).*

ii. Δασική Βλάστηση (Δάσος, Θαμνώνες, Λιβάδια)

Η μορφή της δασικής βλάστησης (δενδρώδης δασική, θαμνώδης δασική, λιβαδική βλάστηση) επηρεάζει το ύψος της αναμενόμενης κομοδιαβροχής και υδατοσυγκράτησης. Η δασική βλάστηση, ανεξάρτητα του είδους και των δομών που τη συγκροτούν, για τον ίδιο βαθμό συγκόμωσης έχει μεγαλύτερη κομοδιαβροχή και υδατοσυγκρατητική ικανότητα σε σχέση με άλλα είδη βλάστησης. Σημαντική είναι η κομοδιαβροχή και η υδατοσυγκράτηση της θαμνώδους δασικής βλάστησης ιδιαίτερα

της σύμπυκνης θαμνώδους βλάστησης, ενώ μικρή έως πολύ μικρή είναι η αντίστοιχη υδατοσυγκράτηση της ποώδους λιβαδικής βλάστησης. Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις (υπεροχή δάσους, έναντι των θαμνωδών και των θαμνωδών έναντι της ποώδους λιβαδικής βλάστησης) προκύπτουν από την σημαντικά μεγαλύτερη αναπτυσσόμενη φυλλική επιφάνεια στην κόμη των δασικών δένδρων ή την κομοστέγη των δασών έναντι των λοιπών μορφών δασικής βλάστησης και των θαμνωδών έναντι της ποώδους λιβαδικής βλάστησης. Επομένως η υδατοσυγκράτηση (Υδ/ση):

Υδ/ση Ποώδους βλάστησης < Υδ/ση Θαμνώδους βλάστησης < Υδ/ση Δενδρώδους βλάστησης.

iii. <u>Δομή, Βαθμός συγκόμωσης συστάδων</u>

Η δομή (ομήλικη, κηπευτή, κ.λ.π.) των συστάδων, καθώς και ο βαθμός συγκόμωσης της κομοστέγης των δασοσυστάδων καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την παρακρατούμενη ποσότητα νερού και επομένως την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση (αυξανομένου του βαθμού συγκόμωσης αυξάνεται και η κομοδιαβροχή και η υδατοσυγκράτηση). Γενικά ισχύει ότι η κηπευτική μορφή, ιδιαίτερα σκιανθετικών ειδών (π.χ. Ελάτη) παρακρατά μεγαλύτερα ποσά νερού από τις λοιπές δομές των δασικών φυτοκοινωνιών. Γενικά η υδατοσυγκράτηση αυξάνει ανάλογα με την ακόλοουθη δομή:

Ομήλικη → Υποκηπευτική → Κηπευτή

Έτσι πυκνές συστάδες π.χ. δρυός ως έχοντες με μεγαλύτερη φυλλική μάζα συγκρατούν μεγαλύτερες ποσότητες νερού σε αντίθεση με τις αντίστοιχες αραιές. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν οι σύμπυκνες συστάδες αείφυλλων πλατύφυλλων, που προσεγγίζουν από άποψη υδατοσυγκράτησης τις τιμές δασοσυστάδων με κανονική συγκόμωση.

iv. <u>Δασοπονικό είδος</u>

Τα διάφορα δασοπονικά είδη ανάλογα με το μέγεθος της φυλλικής τους επιφάνειας, τη μορφή (habitus) της κόμης που αναπτύσσουν καθώς και το είδος και τα χαρακτηριστικά του φυλλώματος και της αναπτυσσόμενης προβολικής κόμης ή κομοστέγης τους έχουν μεγαλύτερη ή μικρότερη κομοδιαβροχή και υδατοσυγκράτηση. Η γενική αρχή είναι ότι τα κωνοφόρα είδη έχουν μεγαλύτερη υδατοσυγκράτηση των πλατύφυλλων ειδών. Από τα κωνοφόρα, τα έχοντα πυκνότερο ιστό βελονών εμφανίζουν μεγαλύτερη υδατοσυγκράτηση έναντι των κωνοφόρων με αραιότερο πλέγμα βελόνων. Από τη μεγαλύτερη πυκνότητα των βελόνων των ορεινών σκιανθετικών κωνοφόρων ειδών έναντι της αντίστοιχης των πεδινών φωτόφιλων κωνοφόρων συνεπάγεται η υπεροχή, ως προς το μέγεθος της υδατοσυγκράτησης, των ορεινών σκιανθεκτικών κωνοφόρων (Ελάτη, Ερυθρελάτη κλπ) έναντι των πεδινών φωτόφιλων κωνοφόρων ειδών (είδη πεύκης, λάρικα κλπ) (Hoover, 1953). Τα παραπάνω ισχύουν και για τα πλατύφυλλα είδη, όπου και εκεί τα σκιανθεκτικά είδη που αναπτύσσουν μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια εμφανίζουν γενικά μεγαλύτερη υδατοσυγκράτηση έναντι των φωτόφιλων ειδών. Συχνά όμως φωτόφιλα ξηρανθεκτικά είδη,

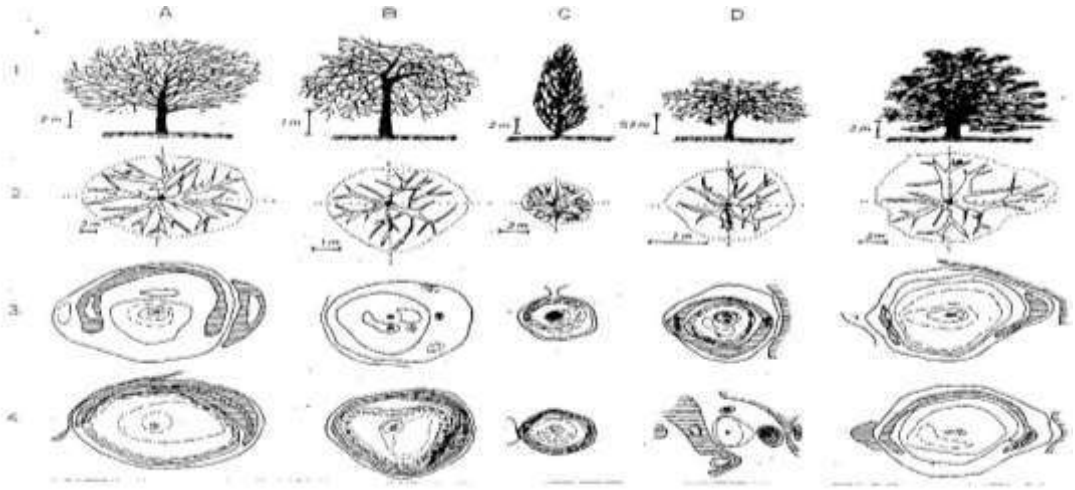
με τραχύ κηρώδες φύλλωμα ή φύλλωμα με τριχοειδείς απολήξεις, εμφανίζουν μεγαλύτερη υδατοσυγκράτηση από αντίστοιχα σκιανθεκτικά πλατύφυλλα. Αυτό συμβαίνει όταν το αυξημένο κηρώδες φύλλωμα ή οι αυξημένες τριχοειδείς απολήξεις είναι αναπτυγμένα σε βαθμό που να καλύπτουν τη διαφορά της φυλλικής επιφάνειας.

v. Ηλικία συστάδων-δένδρων

Από άποψη ηλικίας παρατηρείται ότι οι νεαρές συστάδες ή τα νεαρά δένδρα συγκρατούν γενικά λιγότερο νερό από ότι οι μέσης ηλικίας και οι ηλικιωμένες συστάδες. Παράλληλα οι μέσης ηλικίας συστάδες εμφανίζουν μεγαλύτερη υδατοσυγκράτηση από ότι οι ηλικιωμένες συστάδες. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην με την ηλικία αύξηση της κόμης και του φυλλώματος των δασοσυστάδων, καθώς και στην αντίστοιχη διάσπαση του φυλλώματος και της κόμης και της κομοστέγης των γηρασμένων δασοσυστάδων. Ο Delfs, (1954) για διάφορα στάδια ηλικίας συστάδων ερυθρελάτης στη Γερμανία δίνει τις ακόλουθες τιμές: Πυκνοφυτεία 6%, Νεοφυτεία 23%, Κορμίδια 32%, Κορμοί 42%. Ο Molchanov (1960), σε πειράματα της υδατοσυγκράτησης συστάδων πεύκης απέδειξε ότι υπάρχει συνεχής αύξηση της τιμής της υδατοσυγκράτησης μέχρι του $56^{ου} \div 62^{ου}$ έτους, όπου αποκτά τη μέγιστη τιμή της με ακόλουθη μείωση.

vi. Μορφή (habitus) συστάδων-δένδρων

Η μορφή (habitus) της κόμης των δασοπονικών ειδών και των δασικών συστάδων επηρεάζει σημαντικά την υδατοσυγκράτηση τους. Τα διάφορα δασοπονικά είδη (δενδρώδη, θαμνώδη κλπ), καθώς και οι ποικιλίες (υποείδη) αυτών εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη ποικιλία μορφής κομοστέγης, όπως ευρεία, στενή, πυκνή, χρωματικών αποχρώσεων, επάλληλων με πολλές ή λιγότερες κλαδοσειρές κλπ. Έτσι είδη με πυραμιδοειδή κόμη (είδη πυραμιδοειδών λευκών όπως το καβάκι κλπ) έχουν μικρότερη υδατοσυγκράτηση έναντι ειδών με οποιαδήποτε άλλη μορφή κόμης (habitus), όπως τα λοιπά είδη λεύκης, η δρύς, η οξυά, η πεύκη κλπ. Συμπερασματικά παρατηρούμε ότι η υδατοσυγκράτηση είναι μεγαλύτερη στα κωνοφόρα από ότι στα πλατύφυλλα και αυξάνει με την αύξηση της ηλικίας, της βιομάζας και της κομοστέγης, δηλαδή της προβολής της κομοστέγης στο έδαφος. Γενικά ισχύει ότι αυξανομένου του μεγέθους (ύψος, εύρος, επικάλυψη, προβολή, περίμετρος) της κόμης των δασικών ειδών ή της κομοστέγης της δασικής βλάστησης αυξάνεται η υδατοσυγκράτηση. Το Σχήμα 6 παρουσιάζει έρευνα σε μεμονωμένα δέντρα με διαφορετικό habitus (Linskens, 1951)*.



Σχήμα 6: Κατανομή της διαπερώσης βροχής και κατ' επέκταση της υδατοσυγκράτησης δασικών δένδρων με διαφορετική μορφή κόμης (habitus) (Linskens, 1951)*.

vii. <u>Δασοκομικοί (καλλιεργητικοί) χειρισμοί</u>

Κάθε καλλιεργητικός και εν γένει υλοτομικός δασοκομικός χειρισμός (αποψιλωτικός, αραιωτικός, φωτοδοτικός κλπ) που αφαιρεί το σύνολο ή μέρος της φυλλικής μάζας μιας συστάδας, επηρεάζει την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση. Η επίδραση αυτή μπορεί να είναι εξαιρετικά έντονη (αποψιλωτικές υλοτομίες) ή ήπια (καλλιέργεια κηπευτών συστάδων). Πάντως, οποιοσδήποτε δασοκομικός χειρισμός, όσο και μικρός και να είναι (π.χ. αραίωση ή μορφοποίηση κόμης), επιφέρει μείωση της υδατοσυγκράτησης κατά το μέγεθος της αφαιρούμενης φυλλικής μάζας. Σε μείωση της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης οδηγούν το σύνολο των δασοκομικών χειρισμών μικτών δασών, που οδηγούν σε αυξημένη συμμετοχή ειδών με μικρότερη υδατοσυγκράτηση. Αντίθετα δασοκομικοί χειρισμοί, που αυξάνουν τη συμμετοχή δασοπονικών ειδών με μεγαλύτερη υδατοσυγκρατητική ικανότητα, οδηγούν σε αύξηση της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης.

Οι παραπάνω δασοκομικοί χειρισμοί αποτελούν ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο γιατί επιτρέπει στον Δασολόγο-Υδρολόγο να σχεδιάσει σε κάθε λεκάνη απορροής τη βέλτιστη επέμβαση που θα μεγιστοποιήσει το προσδοκώμενο κατά περίπτωση υδρολογικό όφελος. Οι δασοκομικοί χειρισμοί μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο και να προσφέρουν σημαντικές ποσότητες νερού για τις ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης. Οι αραιώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αλλάξουν τη δομή, τη σύνθεση και την πυκνότητα των δασών και έτσι να αυξήσουν την παραγωγή νερού, ιδιαίτερα σε λείψυδρες περιοχές. Στη σχετική βιβλιογραφία παρουσιάζονται κάποιες οδηγίες σχετικά με το ποσοστό των αραιώσεων σε συνδυασμό με την αναμενόμενη αύξηση της παραγόμενης ποσότητας νερού. Οι δασοκομικοί χειρισμοί οδήγησαν σε μια σταδιακά αύξουσα μείωση της υδατοσυγκράτησης, ανάλογη της αύξησης του βαθμού των αραιωτικών επεμβάσεων. Το ίδιο δε παρατηρείται σε κάθε

επέμβαση που μειώνει το βαθμό συμμετοχής ειδών με μεγαλύτερη υδατοσυγκρατητική ικανότητα (Ελάτη, Ερυθρελάτη, Πεύκη).

Οι Serengil et al. (2007a, 2007b) προτείνουν ως ελάχιστο ποσοστό αραιώσεων το 11% για να παρατηρηθεί αύξηση στην παραγωγή νερού σε οικοσυστήματα οξυάς. Σύμφωνα με τους Brown et al. (2005), οι αλλαγές αρχίζουν να φαίνονται σε ποσοστά αραίωσης άνω του 20%. Ο Γκανάτσιος (2004) βρήκε ότι η αραίωση στο 50% της κυκλικής επιφάνειας αύξησε το συνολικό υδατικό πλεόνασμα κατά 4,6%, ενώ η αποψίλωση κατά 9,7%. Η αποψίλωση δίνει μεγαλύτερο υδατικό πλεόνασμα σε σχέση με την αραίωση ειδικότερα τον πρώτο χρόνο μετά το χειρισμό. Οι μεταβολές τα επόμενα έτη είναι περιορισμένες λόγω αύξησης της υδατοσυγκράτησης κυρίως της παρεδαφιαίας βλάστησης. (David et al., 1994; Bruijnzeel, 2000). Η αποψίλωση αυξάνει τη διάβρωση (Motha, 2003). Ωστόσο ακραία επεισόδια βροχής συγκριτικά με το δασοκομικό χειρισμό, επηρεάζουν καθοριστικά τη διάβρωση και την υδατοπαροχή των ρευμάτων (Eisenbies et al., 2007). Κατά την κρίσιμη θερινή περίοδο η προσαύξηση των συστάδων μειώνεται λόγω μείωσης της **διαπνοής**. Αυξανομένου του ύψους βροχής, και της **υδατοχωρητικότητας** και μειωμένης της **υδατοσυγκράτησης**, (μειώνοντας τις υδροκαταναλώσεις με επέμβαση στο βαθμό συγκόμωσης), **βελτιώνονται σημαντικά οι συνθήκες υγρασίας και ανάπτυξης των δρυοδασών** με παράλληλη αύξηση της απορροής και διήθησης (Γκανάτσιος 2004). Οι Wilm και Dunford (1948)*, απέδειξαν ότι μετά από αραίωση δασοσυστάδων αυξήθηκε η από αυτές απορρέουσα ποσότητα νερού κατά 31%. Η αύξηση αυτή αντιστοιχεί στο βαθμό της γενόμενης αραίωσης και στην αντίστοιχη μείωση της υδατοσυγκράτησης, που αντανακλούσε στο μέγεθος της αύξησης της επελθούσας απορροής. Ο Molchanov, (1960), μετά από σχετικά πειράματα στη Ρωσία απέδειξε ότι μείωση της συγκόμωσης, με αραίωση από 0,9 σε 0,7, αύξησε τη διαπερώσα βροχή, ή το αυτό μείωσε την υδατοσυγκράτηση κατά 4÷8%. Αντίστοιχα μείωση του βαθμού συγκόμωσης των ίδιων συστάδων 0,9÷0,7 σε 0,5÷0,4 επέφερε αύξηση της διαπερώσας βροχής κατά 25% (Περισσότερα στο Κεφ. Υδατινοι Πόροι).

viii. <u>Μορφή, είδος, χαρακτηριστικά φυλλώματος</u>

Η μορφή, το είδος και τα χαρακτηριστικά (βελονοειδής, σφηνόμορφη, πεπλατυσμένη, έντονα πολυσχιδής, σκαφοειδής, κεκαμένη, οξύληκτη, δερματώδης, κηρωμένη, ακιδωτή, τριχοφόρος κλπ) του φυλλώματος επηρεάζουν τη κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση κυρίως με τις δυνάμεις συνοχής και συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ της επιφάνειας του φυλλώματος και του νερού. Όσα επομένως από τα παραπάνω χαρακτηριστικά αυξάνουν τις δυνάμεις συνάφειας μεταξύ φύλλου και νερού ή αυξάνουν την ανά m^3 φυλλώματος διαβρεχόμενη επιφάνεια, αυξάνουν την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση. Αντίθετα όσα χαρακτηριστικά του φυλλώματος δημιουργούν συνθήκες μειωμένων δυνάμεων συνάφειας μεταξύ επιφάνειας νερού και φύλλου ή αναπτύσσουν μικρότερη ανά m^3 φυλλώματος διαβρεχόμενη επιφάνεια, μειώνουν την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση αυξάνουν ή μειώνουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του φυλλώματος:

Χαρακτηριστικά που αυξάνουν την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση	**Χαρακτηριστικά που μειώνουν την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση**
• Φύλλα βελόνες, ή βελονοειδή φύλλα όλα τα φύλλα των κωνοφόρων ειδών)	• Φύλλα ευρεία και ομαλά πεπλατυσμένα (υβρίδια λεύκης, φλαμουριά, φουντουκιά κλπ)
• Φύλλα δερματώδη (ilex, διάφορα είδη δρυός κλπ)	• Φύλλα λεία (σκλήθρο κλπ)
• Φύλλα οξύληκτα πολυσχιδή (Πρίνος, αριά κλπ)	• Φύλλα με ομαλό τελικό περίγραμμα (κερασιά, οξυά)
• Φύλλα χνοώδη ή με τριχίδια (Χνοώδης δρυς, Πλάτανος)	• Φύλλα χωρίς κήρωμα και χνοώδης ή τριχωτές απολήξεις
• Κλαδιά οριζόντια με φύλλωμα οριζόντιο ή φύλλα με οριζόντια τοποθέτηση	• Κλαδιά κεκλυσμένα ή έχοντα φύλλωμα κεκλιμένο κρεμόμενο προς τα κατάντη ή φύλλα με κεκλιμένη ή κατακόρυφη τοποθέτηση (κρεμασμένα φύλλα)

- ***Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας LAI (Leaf Area Index)***

Η υδατοσυγκράτηση συνδέεται στενά με το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) (m^2/m^2). Η επιφάνεια του φυλλώματος που απορροφά ηλιακή ακτινοβολία, συχνά εκφράζεται με τη μορφή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI. Οι Karlik και McKay, (2002) ερευνώντας 14 δέντρα μπλέ δρυός (Quercus douglasii), βρήκαν μέση τιμή δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) 4,4 m^2 /m^2 . Οι συγγραφείς κάνουν αναφορά και για τιμές 4,5-8 σε μικτή συστάδα όπου κυριαρχεί η δρυς στο Castelporziano της Ιταλίας, και 4-6,75 για μεμονωμένα δέντρα δρυός. Οι López-Serrano et al., (2000), σε 20 δέντρα πεύκης εκτίμησαν μέσο LAI 2,69 m^2 /m^2 με τιμές να κυμαίνονται από 1,50 έως 4,58 m^2 /m^2. Οι Briere et al., (2021), στο Barbeau της Γαλλίας σε δρυοδάση Quercus petraea, για την περίοδο 2009-2019 μέτρησαν μέση τιμή LAI 3,7 m^2 /m^2, ενώ η εκτιμούμενη τιμή ήταν 3,1. Οι Lovynska et al., (2018), στην Ουκρανία σε δάση δασικής πεύκης βρήκαν τιμές LAI μεταξύ 1,35 και 1,48. Οι Goude et al., (2019), στη Σουηδία βρήκαν φυλλική επιφάνεια για ερυθρελάτη, σημαντικά μεγαλύτερη εκείνης της δασικής πεύκης. Οι Mason et al., (2012) σε φυτείες Pinus radiata στη Ν Ζηλανδία βρήκαν τιμές LAI να κυμαίνονται από 4,9 έως 8,9. Οι Scurlock et al., (2001) συνέλλεξαν δεδομένα από 300 βιβλιογραφικές αναφοράς που αφορούσαν 1000 τιμές LAI από 400 περιοχές από το 1932-2000. Οι ελάχιστες τιμές βρέθηκαν στο 0,1 (ελάχιστη, αφορά έρημο και τούνδρα) και οι μέσες τιμές (±τυπική απόκλιση) στο 1,31 ± 0,85 για τις ερήμους στο 8,72 ± 4,32 για φυτείες κωνοφόρων ή αειφύλλων πλατυφύλλων ειδών. Οι David et al., (2006) για την αριά, βρήκαν LAI ίσο με 2,6. Οι Hassan et al., (2017) βρήκαν για την Αριά Quercus ilex και της Δρυ των Πυρηναίων Quercus pyrenaica, LAI (m^2/m^2) 2 έως 3,9 και 1,5 έως 3 m^2 αντίστοιχα. Οι Qi et al., (2000) εκτιμούν το LAI με τη μέθοδο NDVI σύμφωνα με την οποία το 97% των εκτιμήσεων LAI για την Αριά βρίσκει τιμές μεταξύ 1,2 και 2,8 m^2 και για τη δρύ των Πυρηναίων το 98% των εκτιμήσεων βρίσκει LAI μεταξύ 1,4 και 2,6 m^2.

Εικόνα 5. Φύλλα Οξυάς & Δρυός

5.5. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΘΑΜΝΩΝ ΚΑΙ ΘΑΜΝΩΝΩΝ

Οι έρευνες της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης θάμνων ή θαμνοσυστάδων είναι σχετικά περιορισμένες. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι στις προηγμένες δασοϋδρολογικές χώρες (Ρωσία, Καναδάς, Ελβετία, Γερμανία, Αυστρία κλπ) το δάσος κυριαρχεί έναντι των θαμνώνων, οι οποίοι αντίθετα κυριαρχούν έναντι των δασών στις μεσογειακές χώρες. Εκτός τούτου, οι αντίστοιχες μετρήσεις της διαπερώσας βροχής θαμνοσυστάδων παρουσιάζουν σημαντικές τεχνικές και κυριώς πρακτικές δυσκολίες. Επισημαίνουμε ότι για χώρες με σημαντικό ποσοστό θαμνοσυστάδων, όπως η Ελλάδα -στην οποία η κυριαρχία των θάμνων και των θαμνόμορφων υποβαθμισμένων δασών (κυρίως πρινώνων κλπ υποβαθμισμένων δρυοδασών) είναι καταλυτική- ο υπολογισμός της υδατοσυγκράτησης και της διαπερώσας βροχής έχει μεγάλη σημασία. Όλοι οι κλιματικοί, βιολογικοί (χλωριδικοί) παράγοντες επηρεάζουν την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση των θαμνώνων όπως ακριβώς επηρεάζουν τα αντίστοιχα φαινόμενα στις δασοσυστάδες (Κεφ. 5.4). Συχνά, ιδιαίτερα σε σύμπυκνους συνηρεφείς θαμνώνες αειφύλλων-πλατύφυλλων, η κομοδιαβροχή και η υδατοσυγκράτηση αποκτούν σημαντικές τιμές σχεδόν εφάμιλλες των δασοσυστάδων. Ο Haynes, (1940)* και ο Clarc, (1940)* αναφέρουν ότι η υδατοσυγκράτηση θαμνοσυστάδων ανέρχεται στο 25% της βροχής, (μεταξύ 20% και 36% κατά τους Exler & Moore, 2022), σπάνια δε η υδατοσυγκράτηση των θαμνώδων προσεγγίζει το 50% της πίπτουσας βροχής.

5.6. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΛΙΒΑΔΙΚΗΣ (ΠΟΩΔΟΥΣ) ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΑΣΙΚΟΥ ΤΑΠΗΤΑ

Η υδατοσυγκράτηση της **ποώδους βλάστησης** αλλά και του ξηροτάπητα (δασικής φυλλάδας) αν και είναι πολύ μικρότερη της δασικής και μικρότερη της θαμνώδους δεν είναι αμελητέα. Σε ξηροθερμικές ζώνες όπως οι μεσογειακές περιοχές, η υδατοσυγκράτηση της ποώδους λιβαδικής βλάστησης παρά τις περιορισμένες τιμές της αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Η σημασία της απώλειας αυτής, παρά το μικρό μέγεθος της, για χώρες με έντονα προβλήματα λειψυδρίας, είναι ιδιαιτέρως σημαντική διότι οποιαδήποτε

μείωση των υδατικών πόρων αποκτά εξαιρετική σημασία. Ειδικότερα οι καταγραφείσες τιμές υδατοσυγκράτησης της ποώδους βλάστησης, υπολογίσθηκε σε 6% της πίπτουσας βροχόπτωσης (Κωτούλας 1995).

Η υδατοσυγκράτηση του **δασικού τάπητα** παρά τις μικρές τιμές της είναι σημαντική και προσεγγίζει τις τιμές της ποώδους (λιβαδικής) βλάστησης. Ιδιαίτερα αν πρόκειται για παχυστρωματώδη φυλλάδα, τότε οι τιμές της υδατοσυγκράτησης καθίστανται σημαντικές. Η τιμή της υδατοσυγκράτησης της δασικής φυλλάδας εξαρτάται από το πάχος (παχύτερη φυλλάδα=αυξημένη υδατοσυγκράτηση) και τη σύνθεση της φυλλάδας (φυλλάδα κωνοφόρων έχει αυξημένη υδατοσυγκράτηση έναντι της φυλλάδας των πλατύφυλλων κλπ). Ο Κωτούλας, (1965) αναφέρει ότι η υδατοσυγκράτηση φυλλάδας τραχείας πεύκης 30 ετών πάχους 1,5 cm ανέρχεται σε 2,8 mm ύψους βροχής. Χαρακτηριστικά αναφέρει ότι η υδατοσυγκράτηση της φυλλάδας πρακτικά ταυτίζεται με το ξηρό βάρος της. Ο Molchanov, (1960) αναφέρει ότι η υδατοσυγκράτηση φυλλάδας δρυός πάχους 2,0cm δύναται να συγκρατήσει 10mm ύψους βροχής, φυλλάδα πάχους 1,5cm υδατοσυγκράτησε 5,5mm ύψους βροχής, ενώ φυλλάδα πάχους 0,5cm υδατοσυγκράτησε 3,0mm ύψους βροχής.

5.7. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΟΡΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΟΡΜΑΠΟΡΡΟΗ

Ι. ΔΑΣΙΚΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ ΚΑΙ ΔΑΣΟΣΥΣΤΑΔΩΝ

Η κορμοδιαβροχή και η απορρέουσα ποσότητα νερού της κορμαπορροής της δασικής βλάστησης (δενδρώδους κυρίως) ποικίλει εξαρτώμενη από ένα πλήθος παραγόντων, που σχετίζονται κυρίως με την υφή και την ποιότητα του φλοιού του κορμού. Παράλληλα όλοι οι αναφερθέντες κλιματικοί και βιολογικοί (χλωριδικοί) παράγοντες που επηρεάζουν τα φαινόμενα της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης, (ένταση, διάρκεια και ύψος της βροχής, εποχή έτους, δασοπονικό είδος κλπ), επηρεάζουν και τη κορμοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση.

Σχετικά με της κορμοδιαβροχή και την κορμαπορροή της δασικής βλάστησης ο γενικός κανόνας είναι ότι η κορμαπορροή των πλατύφυλλων είναι μεγαλύτερη των κωνοφόρων. Αυτό δεν οφείλεται στη μεγαλύτερη κορμαπορροϊκή ικανότητα των πλατύφυλλων, αλλά στο ότι αυτά στερούνται κομοστέγης κατά τη διάρκεια της βροχερής περιόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το χειμώνα που υπάρχει έλλειψη φυλλώματος, ο κορμός των πλατύφυλλων ειδών να δέχεται πολύ μεγαλύτερες ποσότητες νερού από τους αντίστοιχους κορμούς των αειθαλλών πλατύφυλλων ειδών. Στη μεγαλύτερη κορμαπορροή των πλατυφύλλων ειδών έναντι των κωνοφόρων συμβάλλει και το ότι γενικά οι κλάδοι των πλατύφυλλων ειδών προσφύονται υπό οξεία γωνία ενώ των κωνοφόρων, ιδιαίτερα των ορεινών κωνοφορούντων ειδών (ελάτη, ερυθρελάτη κλπ) η γωνία πρόσφυσης των κλάδων τους είναι αμβλεία έως οριζόντια, γεγονός που μειώνει την κορμαπορροή. Η κορμαπορρέουσα ποσότητα επηρεάζεται σημαντικά από τη μορφή της κόμης των δένδρων. Τα υψήκομα δένδρα με κλάδους καμπτόμενους με οξεία γωνία προς τα άνω (δρυς, οξυά, λεύκη, φλαμουριά κλπ.) εμφανίζουν μεγαλύτερη κορμαπορροή από εκείνα με οριζόντιους ή προς τα

κάτω καμπτόμενους κλάδους, όπως τα κωνοφόρα (ελάτη, ερυθρελάτη, πεύκη κλπ.), τα οποία παρουσιάζουν κυρίως έντονη σταγονόπτωση. Περαιτέρω η κοσμαπορροή εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό και από τη μορφολογία του φλοιού των δένδρων. Είδη τραχύφλοια, όπως η δρυς, η πεύκη κλπ., εμφανίζουν μεγαλύτερη κορμοδιαβροχή και μικρότερη κορμαπορροή από τα λειόφλοια, όπως και η οξυά, η φλαμουριά κλπ. Γενικά η κορμαπορροή αυξάνει αυξανομένου του ύψους της βροχής.

II. ΘΑΜΝΩΝ ΚΑΙ ΘΑΜΝΩΝΩΝ

Σχετικά με τη κορμοδιαβροχή και τη κορμαπορροή της θαμνώδους βλάστησης ισχύει σε γενικές γραμμές ότι και για την κορμοδιαβροχή και την κορμαπορροή των φυλλοβόλων πλατύφυλλων. Μερικές φορές είναι δυνατόν η κορμαπορροή των θαμνώνων να είναι μεγαλύτερη εκείνη των δασοσυστάδων. Για παράδειγμα στους αείφυλλους θαμνώνες της Sierra Nevada η κορμαπορροή βρέθηκε ότι ανέρχεται σε 15%, ενώ η υδατοσυγκράτηση στο 5% και στο Dan Dimas η κορμαπορροή φθάνει το 8% (Κωτούλας 1995).

6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ

6.1. Γενικά περί μεθόδων μέτρησης της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης

Κομοδιαβροχή είναι το φαινόμενο της διακράτησης υγρασίας, που έχει κάθε κομοστέγη (φύλλωμα, κλάδοι, κορμός) δέντρων, θάμνων και ποωδών φυτών, για τη διύγρανσή της. Οι ποσότητες νερού της βροχής που συγκρατούν διαδοχικές κομοδιαβροχές εντός μιας χρονικής περιόδου (συνήθως της έτους), συγκροτούν την υδατοσυγκράτηση (L_p) της περιόδου αυτής. Η υδατοσυγκράτηση (Interception loss) είναι σημαντικά μεγαλύτερη στις δασοσυστάδες από ότι στις λοιπές μορφές βλάστησης. Η κορμοδιαβροχή και η υδατοσυγκράτηση (η συγκράτηση νερού της βροχής στην κομοστέγη της βλάστησης και η εν συνεχεία απώλειά της στην ατμόσφαιρα) επηρεάζει την μετέπειτα φάση του υδρολογικού κύκλου (απορροή, διήθηση). Ο υπολογισμός (κυρίως η εκτίμησή) της υδατοσυγκράτησης μιας περιοχής θεωρείται και είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί. Αυτό συμβαίνει επειδή στον υπολογισμό της υδατοσυγκράτησης υπεισέρχονται πάρα πολλοί αστάθμητοι παράγοντες, οι οποίοι ακόμη και αν μπορούσαν να είναι διαθέσιμοι και μετρήσιμοι, πάλι θα υπήρχαν δυσκολίες στον υπολογισμό της. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες σχέσεις, με τις οποίες γίνεται προσπάθεια να προσεγγισθεί η απώλεια υδατοσυγκράτησης μιας περιόδου σε μια περιοχή. Για τον υπολογισμό της υδατοσυγκράτησης υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία (Ενδεικτικά: Molchanov A 1960, Κωτούλας Δ 1972, 1973, 1966, Παπουλιας Ι., 1975, 1976, Anderson, H.W., and others 1976, Rutter. A.J. 1971, Morton A.J. 1977, Aston A.R., 1979, Παπούλιας, Ι., Νικολαϊδης Μ., 1979, Νικολαϊδης Μ. Παπούλιας Ι. 1981, Peteguda L.W., Plyuta P.G. 1986, Frangen, W. And others 1987, Νικολαϊδης Μ. 1988, Χαλυβόπουλος Γ. and others 1992, Παυλίδης Θ., 1997). Όμως παρατηρούνται συχνά αντιφατικά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό (Παυλίδης Θ. 1997) ερμηνεύεται από τις μεγάλες διαφορές που εμφανίζουν τα δεδομένα των μελετηθέντων περιοχών έρευνας. Είναι

λογικό διαφορές στη χωροχρονική κατανομή και τα χαρακτηριστικά των βροχών, στις κλιματικές συνθήκες, στον προσανατολισμό, τις συνθήκες βλάστησης, τα ενδοσυσταδικά περιβάλλοντα κλπ., να διαφοροποιούν τα εκάστοτε αποτελέσματα.

Χαρακτηριστικό όλων των μέχρι σήμερα ερευνών υπολογισμού της υδατοσυγκράτησης (L_p) ήταν ο έμμεσος υπολογισμός της, ως η προκύπτουσα διαφορά μεταξύ της βροχής (P) σε διπλανό γυμνό έδαφος και του αθροίσματος της διαπερώσας βροχής (P_δ) και της μετρώμενης κορμαπορροής (L_r). Δηλαδή ο υπολογισμός της υδατοσυγκράτησης στηρίζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$L_p=P-(P_\delta+L_r)$$

Όπου L_p = η υδατοσυγκράτηση

P = ετήσιο ύψος βροχής

P_δ = διαπερώσα βροχή

L_r = κορμαπορροή (mm)

6.2. Μετρήσεις υδατοσυγκράτησης στη Μόρνα Πιερρίας

Ο Παυλίδης (1997) στα πλαίσια χειρισμού των λεκανών απορροής για την αύξηση των υδατικών αποθεμάτων στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Μορνιώτικο Ρέμα της Πιερίας, ακολούθησε μια διαφορετική προσέγγιση υπολογισμού της υδατοσυγκράτησης. Ο υπολογισμός βασίσθηκε στην κατά το δυνατόν άμεση μέτρηση της υδατοσυγκράτησης σε φυσικές συνθήκες στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Μορνιώτικου στα Πιέρια όρη. Η μέθοδος του Παυλίδη σε γενικές γραμμές είχε ως εξής:

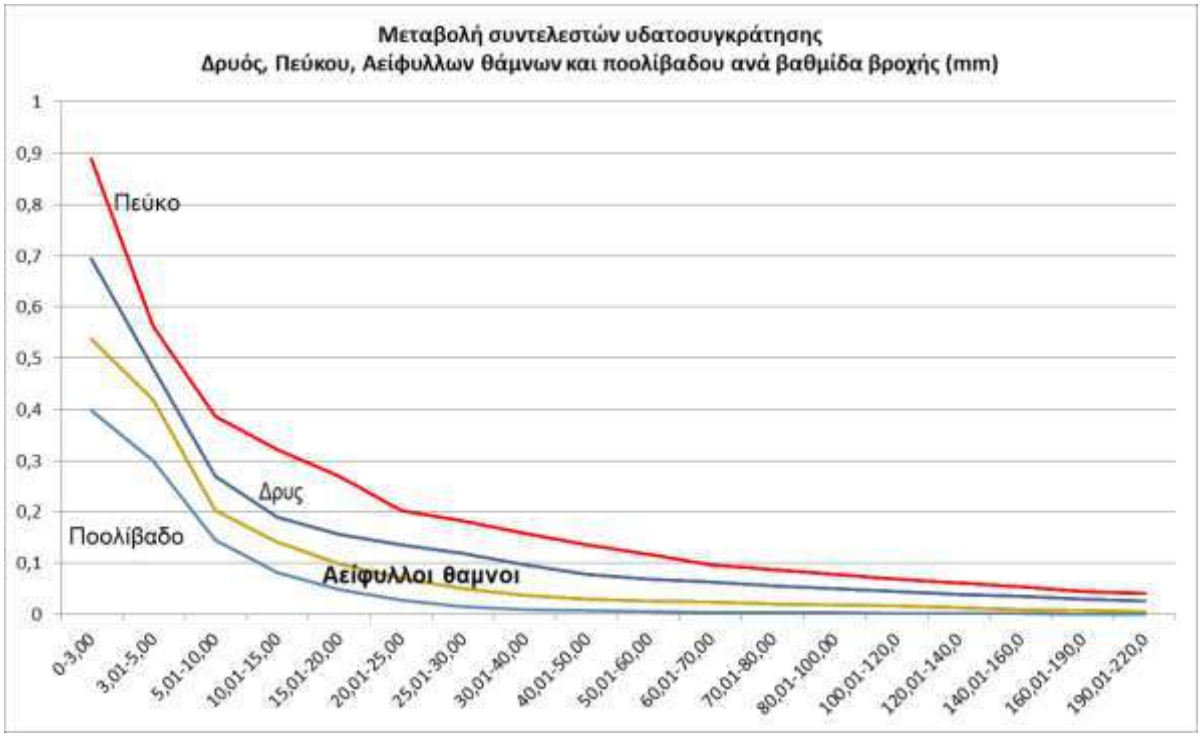
- Στη λεκάνη απορροής του χειμάρρου αναγνωρίσθηκαν, επιλέχθηκαν και διαχωρίστηκαν κατάλληλες περιοχές, με υψομετρική βαθμίδα 500m, που να απαρτίζονται από μικτά δάση (οξυά, δρυς, πεύκη, καστανιά, λοιπά πλατύφυλλα, αείφυλλα-πλατύφυλλα) και στις οποίες να διεξάγονταν υλοτομικές επεμβάσεις (καρπώσεις ή καλλιεργητικές).
- Στη συνέχεια από υλοτομημένα δένδρα αποκόπηκαν για το σκοπό αυτό, μικροί ή μεγάλοι κλάδοι με το φύλλωμα τους.
- Η τομή των κλάδων αυτών ακολούθως καλύφθηκε με στρώμα κεριού πάχους 2mm ώστε να μην καταγράφεται απώλεια υγρασίας από την τομή του κλάδου.
- Οι κηρωθέντες κλάδοι στη συνέχεια ζυγίζονταν τόσο με στεγνό το φύλλωμα τους όσο και μετά από πλήρη τεχνητή διαβροχή και στράγγισή τους. Με τον τρόπο αυτό υπολογίσθηκε η μέγιστη κομοδιαβροχή των κλάδων.
- Ακολούθως οι διαβρεχόμενοι κλάδοι τοποθετήθηκαν στο έδαφος εντός των δασοσυστάδων, εγγύς των υλοτομηθέντων κορμών, εντός κατάλληλης μεταλλικής υποδοχής η οποία είχε εμπηχθεί στο έδαφος.

- Οι κλάδοι αυτοί στη συνέχεια αφαιρούνταν, μετά από επιτόπιες επισκέψεις, ζυγίζονταν και ετοποθετούντο εκ νέου στη μεταλλική υποδοχή. Με τον τρόπο αυτό προέκυπτε η απώλεια υδατοσυγκράτησης. Παράλληλα μετά την πτώση νέας βροχής οι κλάδοι αφαιρούνται από την υποδοχή και ζυγίζονταν, ώστε να βρεθεί η νέα ποσότητα κομοδιαβροχής τους, κ.ο.κ.
- Ταυτόχρονα σε κατάλληλα επιλεγμένες υποδοχές (θέσεις) πάντοτε οι τοποθετημένοι κλάδοι αφαιρούνταν από την υποδοχή τους και επανατοποθετούνταν μετά πλήρη διαβροχή τους. Με τον τρόπο αυτό προέκυπτε η μέγιστη δυνατή υδατοσυγκράτηση σε ενδοσυσταδικό περιβάλλον.
- Επειδή η διάρκεια ζωής του φυλλώματος των κλάδων είναι περιορισμένη (Τ≈10 ημέρες) μετά από 10 ημέρες οι κλάδοι άλλαζαν και ετοποθετούντο στην υποδοχή νέοι αποκοπτόμενοι κλάδοι με νέο φύλλωμα. Η παραπάνω αλλαγή ήταν αναγκαία, για τον πρόσθετο λόγο, ότι με τον τρόπο αυτό παρακολουθείτο στα φυλλοβόλα πλατύφυλλα και η αλλαγή (πτώση) του φυλλώματος τους (Φθινόπωρο), καθώς και η έκπτυξη νέου φυλλώματος την άνοιξη.
- Τέλος δημιουργήθηκαν οι σχέσεις βροχής και υδατοσυγκράτησης, παρά τις σημαντικές χρονικές διαφοροποιήσεις, που σχετίζονταν κυρίως με την ένταση των ανέμων, τη σχετική υγρασία και την άμεση ηλιοφάνεια, σχέσεις βροχής και υδατοσυγκράτησης. Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται τόσο στα κύρια δασοπονικό είδος της περιοχής (Δρυς, Οξυά, Καστανιά, Πεύκη) όσο και στη βαθμίδα ύψους κάθε πίπτουσας βροχής (Πίνακας 1, Σχήμα 7). Έτσι εξάγονται οι αντίστοιχοι μέσοι μηνιαίοι συντελεστές υδατοσυγκράτησης ανά βαθμίδα βροχής.

Στον ακόλουθο Πίνακα 1, Σχήμα 7, ο Παυλίδης δίνει την κύμανση μηνιαίων συντελεστών υδατοσυγκράτησης ανά βαθμίδα βροχής. Η εκάστοτε επιλεγείσα τιμή εξαρτάται από το είδος της βλάστησης. Η δρυς (διάφορα δεντρώδη είδη που κρατάνε τα ξερά φυλλα και μέσα στο χειμώνα), εμφανίζεται με τιμές υδατοσυγκράτησης μεγαλύτερες των αειφύλλων πλατυφύλλων. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη μεγαλύτερη επιφάνεια κόμης των δέντρων. Αυτό όμως μπορεί να αναστραφεί δεδομένου ότι κάποια στιγμή τα φύλλα πέφτουν και έτσι οι τιμές υδατοσυγκράτησης των αειφύλλων πλατυφύλλων θάμνων είναι μεγαλύτερες. Ο Πίνακας σχέσεων υδατοσυγκράτησης –κατακρημνισμάτων δίνει το μέσο ετήσιο όρο συντελεστών που μετρήθηκαν και εντάχθηκαν σε βαθμίδες βροχής. Ο πίνακας αυτός απαιτεί στοιχεία ημερήσιας, (ιδανικά ωριαίας) βροχόπτωσης που δεν είναι πάντα εύκολο να βρεθούν. Όταν είναι διαθέσιμα, κάθε επισόδειο κατακρημνισμάτων αναλύεται χωριστά και υπολογίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η μηνιαία υδατοσυγκράτηση. Οι μετρήσεις αφορούν θερινή περίοδο (πλήρες φύλλωμα στα φυλλοβόλα πλατύφυλλα).

Πίνακας 1: Σχέσεις υδατοσυγκράτησης δασικών ειδών και ύψους βροχής ανά βαθμίδα βροχής (Παυλίδης 1997).

Βαθμίδα Βροχής (mm)	Σχέσεις υδατοσυγκράτησης (mm)					
	Δρυς	Οξυά	Καστανιά	Πεύκη	Θαμνώνες	Λιβάδια
0-3,00	I=0,69336Px	I=0,61435Px	I=0,59973Px	I=0,88924Px	0,537812 Px	0,397524 Px
3,01-5,00	I=0,48041Px	I=0,44002Px	I=0,43348Px	I=0,56143Px	0,418665 Px	0,299958 Px
5,01-10,00	I=0,26864Px	I=0,25345Px	I=0,24861Px	I=0,38711Px	0,202392 Px	0,143982 Px
10,01-15,00	I=0,18844Px	I=0,17810Px	I=0,17454Px	I=0,32212Px	0,141206 Px	0,082038 Px
15,01-20,00	I=0,15636Px	I=0,14017Px	I=0,13954Px	I=0,26984Px	0,098314 Px	0,047290 Px
20,01-25,00	I=0,13601Px	I=0,12242Px	I=0,12190Px	I=0,20263Px	0,069323 Px	0,027591 Px
25,01-30,00	I=0,11814Px	I=0,11341Px	I=0,10891Px	I=0,18172Px	0,049667 Px	0,015332 Px
30,01-40,00	I=0,09691Px	I=0,09110Px	I=0,08844Px	I=0,15836Px	0,037442 Px	0,008851 Px
40,01-50,00	I=0,07803Px	I=0,07416Px	I=0,07156Px	I=0,13589Px	0,029766 Px	0,006723 Px
50,01-60,00	I=0,06887Px	I=0,06543Px	I=0,06316Px	I=0,11722Px	0,026321 Px	0,004892 Px
60,01-70,00	I=0,06212Px	I=0,05965Px	I=0,05776Px	I=0,09716Px	0,022854 Px	0,003724 Px
70,01-80,00	I=0,05541Px	I=0,05965Px	I=0,05121Px	I=0,08680Px	0,020096 Px	0,002961 Px
80,01-100,00	I=0,04970Px	I=0,05329Px	I=0,04606Px	I=0,07854Px	0,018832 Px	0,002412 Px
100,01-120,0	I=0,04363Px	I=0,04821Px	I=0,04045Px	I=0,06893Px	0,016067 Px	0,002016 Px
120,01-140,0	I=0,03861Px	I=0,04232Px	I=0,03600Px	I=0,06165Px	0,012544 Px	0,001732 Px
140,01-160,0	I=0,03402Px	I=0,03785Px	I=0,03174Px	I=0,05412Px	0,009236 Px	0,000527 Px
160,01-190,0	I=0,02941Px	I=0,03337Px	I=0,02715Px	I=0,04486Px	0,007352 Px	0,000389 Px
190,01-220,0	I=0,02543Px	I=0,02820Px	I=0,02351Px	I=0,03976Px	0,005264 Px	0,000296 Px



Σχήμα 7. Το διάγραμμα δείχνει την αισθητή μείωση έως μηδενισμού της υδατοσυγκράτησης αυξανομένου του ύψους βροχής.

Στον Πίνακα 2 ο Παυλίδης παρέχει συντελεστές υδατοσυγκράτησης της βλάστησης κατά μήνα και κατά βαθμίδα μηνιαίων υψών βροχής για φυλλοβόλλα πλατύφυλλα είδη. Οι ελάχιστες τιμές των συντελεστών υδατοσυγκράτησης των βαθμίδων 0-3mm και 3-5mm είναι 0,398 και 0,332 αντίστοιχα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της υδατοσυγκράτησης τους χειμερινούς μήνες ενώ οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τον 1^{ο} πίνακα (Θερινές τιμές) είναι 0,693 & 0,480. Συγκρίνοντας τις υπόλοιπες τιμές των δύο πινάκων δεν προκύπτουν σημαντικές διαφορές και για χάριν απλούστευσης (ελλείψη άλλων μετρήσεων), αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της χειμερινής υδατοσυγκράτησης όλων των άλλων βαθμίδων ύψους βροχής.

Πίνακας 2: Συντελεστές υδατοσυγκράτησης της βλάστησης κατά μήνα και κατά βαθμίδα μηνιαίων υψών βροχής.

ΒΑΘΜΙΔΕΣ βροχης	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΚΑΤΆ ΜΗΝΑ ΚΑΙ ΒΑΘΜΙΔΑ ΜΗΝΙΑΙΩΝ ΥΨΩΝ ΒΡΟΧΗΣ											
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
0-3	0-0,398	0,00-0,407	0,0-0,506	0,0-0,574	0,00-0,687	0,0-0,768	0,0-0,823	0,000-0,796	0,00-0,749	0,00-0,616	0,00-0,559	0,0-0,467
3 έως 5	0,398-0,332	0,407-0,337	0,506-0,418	0,574-0,486	0,687-0,626	0,768-0,722	0,823-0,789	0,796-0,733	0,749-0,689	0,616-0,519	0,559-0,448	0,467-0,373
5 έως 10	0,332-0,262	0,339-0,266	0,418-0,342	0,486-0,407	0,626-0,514	0,722-0,667	0,789-0,705	0,733-0,686	0,689-0,556	0,519-0,438	0,448-0,374	0,373-0,285
10 έως 15	0,262-0,194	0,266-0,198	0,342-0,280	0,407-0,318	0,514-0,395	0,667-0,525	0,705-0,632	0,686-0,589	0,556-0,483	0,438-0,342	0,374-0,298	0,285-0,212
15-20	0,194-0,161	0,198-0,164	0,280-0,234	0,318-0,270	0,395-0,318	0,525-0,447	0,632-0,517	0,589-0,473	0,483-0,417	0,342-0,291	0,298-0,250	0,212-0,176
20-25	0,161-0,136	0,164-0,139	0,234-0,198	0,270-0,229	0,318-0,256	0,447-0,382	0,517-0,437	0,473-0,404	0,417-0,367	0,291-,0,246	0,250-0,212	0,176-0,149
25-30	0,136-0,112	0,139-0,115	0,198-0,164	0,229-0,191	0,256-0,223	0,382-0,318	0,437-0,348	0,404-0,328	0,367-0,306	0,246-0,204	0,212-0,173	0,149-0,124
30-40	0,112-0,094	0,115-0,097	0,164-0,131	0,191-0,156	0,223-0,192	0,318-0,242	0,348-0,263	0,328-0,232	0,306-0,214	0,204-0,166	0,173-0,139	0,124-0,105
40-50	0,094-0,082	0,097-0,085	0,131-0,104	0,156-0,123	0,192-0,166	0,242-0,211	0,263-0,239	0,232-0,218	0,214-0,186	0,166-0,132	0,139-0,110	0,105-0,091
50-60	0,082-0,074	0,085-0,077	0,104-0,086	0,123-0,101	0,166-0,135	0,211-0,163	0,239-0,181	0,218-0,164	0,186-0,147	0,132-0,110	0,110-0,091	0,091-0,080
60-70	0,074-0,063	0,077-0,066	0,086-0,072	0,101-0,087	0,135-0,106	0,163-0,123	0,181-0,153	0,164-0,136	0,147-0,103	0,110-0,095	0,091-0,076	0,080-0,070
70-80	0,063-0,055	0,066-0,058	0,072-0,064	0,087-0,075	0,106-0,088	0,123-0,098	0,153-0,112	0,136-0,101	0,103-0,089	0,095-0,083	0,076-0,067	0,070-0,061
80-100	0,055-0,047	0,058-0,049	0,064-0,055	0,075-0,065	0,088-0,073	0,098-0,085	0,112-0,096	0,101-0,088	0,089-0,074	0,083-0,071	0,067-0,058	0,061-0,052
100-120	0,047-0,041	0,049-0,043	0,055-0,047	0,065-0,056	0,073-0,062	0,085-0,073	0,096-0,082	0,088-0,076	0,074-0,063	0,071-0,060	0,058-0,050	0,052-0,045
120-140	0,041-0,037	0,043-0,039	0,047-0,042	0,056-0,049	0,062-0,053	0,073-0,062	0,082-0,069	0,076-0,064	0,063-0,054	0,060-0,053	0,050-0,045	0,045-0,041
140-160	0,037-0,034	0,039-0,036	0,042-0,039	0,049-0,044	0,053-0,048	0,062-0,055	0,069-0,060	0,064-0,057	0,054-0,049	0,053-0,047	0,045-0,041	0,041-0,038
160-200	0,034-0,031	0,036-0,033	0,039-0,036	0,044-0,039	0,048-0,043	0,055-0,049	0,060-0,052	0,057-0,051	0,049-0,044	0,047-0,042	0,041-0,038	0,038-0,034
200-250	0,031-0,029	0,033-0,030	0,036-0,033	0,039-0,036	0,043-0,040	0,049-0,044	0,052-0,047	0,051-0,045	0,044-0,041	0,042-0,039	0,038-0,035	0,034-0,031
250-300	0,029-0,027	0,030-0,028	0,033-0,030	0,036-0,033	0,040-0,035	0,044-0,038	0,047-0,040	0,045-0,039	0,041-0,036	0,039-0,035	0,035-0,032	0,031-0,029
300-400	0,027-0,025	0,028-0,026	0,030-0,028	0,033-0,030	0,035-0,032	0,038-0,034	0,040-0,036	0,039-0,035	0,036-,0,033	0,035-0,032	0,032-0,029	0,029-0,026
400-500	0,025-0,023	0,026-0,024	0,028-0,026	0,030-0,028	0,032-0,029	0,034-0,031	0,036-0,033	0,035-0,032	0,033-0,031	0,032-0,030	0,029-0,027	0,026-0,024

Πίνακας 3. Μέσες και ελάχιστες τιμές μηνιαίων συντελεστών υδατοσυγκράτησης που προκύπτουν από τον πίνακα 2.

ΒΑΘΜΙΔΕΣ βροχης	ΜΟ βαθμίδας	ΜΟ βαθμίδας	ΘΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ (ΜΑΙΟΣ-ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ)	ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ (ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ – ΑΠΡΙΛΙΟΣ)	Ελάχιστές τιμές μηνιαίων συντελεστών υδατοσυγκράτησης
0-3	$\frac{(0+0{,}596)}{2}$	0,2850	0,729	0,485	0,398
3 έως 5	$\frac{(0{,}596+0{,}539)}{2}$	0,5663	0,680	0,399	0,332
5 έως 10	$\frac{(0{,}539+0{,}459)}{2}$	0,4989	0,594	0,323	0,262
10 έως 15	$\frac{(0{,}459+0{,}372)}{2}$	0,4153	0,494	0,250	0,194
15-20	$\frac{(0{,}372+0{,}310)}{2}$	0,3410	0,411	0,209	0,161
20-25	$\frac{(0{,}310+0{,}263)}{2}$	0,2864	0,349	0,177	0,136
25-30	$\frac{(0{,}263+0{,}217)}{2}$	0,2400	0,288	0,147	0,112
30-40	$\frac{(0{,}217+0{,}169)}{2}$	0,1932	0,218	0,120	0,094
40-50	$\frac{(0{,}169+0{,}146)}{2}$	0,1574	0,192	0,099	0,082
50-60	$\frac{(0{,}146+0{,}117)}{2}$	0,1315	0,150	0,085	0,074
60-70	$\frac{(0{,}117+0{,}096)}{2}$	0,1066	0,119	0,072	0,063
70-80	$\frac{(0{,}096+0{,}079)}{2}$	0,0875	0,095	0,063	0,055
80-100	$\frac{(0{,}079+0{,}068)}{2}$	0,0735	0,081	0,054	0,047
100-120	$\frac{(0{,}068+0{,}058)}{2}$	0,0630	0,069	0,047	0,041
120-140	$\frac{(0{,}058+0{,}051)}{2}$	0,0544	0,059	0,042	0,037
140-160	$\frac{(0{,}051+0{,}046)}{2}$	0,0482	0,053	0,039	0,034
160-200	$\frac{(0{,}046+0{,}041)}{2}$	0,0433	0,047	0,035	0,031
200-250	$\frac{(0{,}041+0{,}038)}{2}$	0,0393	0,043	0,032	0,029

6.3. Μετρήσεις υδατοσυγκράτησης στο Νεοχώρι Αρναίας Χαλκιδικής

Παρά το ενδιαφέρον της χρήσης δασικών περιοχών για παραγωγή νερού, η σχέση μεταξύ δασοκομικών χειρισμών και υδατοσυγκράτησης ερευνήθηκε σε ελάχιστες περιπτώσεις και για λίγα δασικά είδη. Ο Παπούλιας (1975) ερεύνησε την υδρολογική σημασία της υδατοσυγκράτησης σε δάσος τραχείας πεύκης και οι Παπούλιας και Νικολαϊδης (1979), μέτρησαν τις απώλειες υδατοσυγρκάτησης στην τραχεία πεύκη (*P. Brutia) και τον πρίνο (Q. Coccifera)*. Οι ίδιοι ερευνητές ερευνητές μελέτησαν τη σχέση υδατοσυγκράτησης και κατανάλωσης νερού σε συστάδες πλατυφύλλου δρυός (*Q. Conferta)* στο Νεοχώρι Χαλκιδικής, λίγα χιλιόμετρα μακρυά από το Πανεπιστημιακό Δάσος Ταξιάρχη –Βραστάμων.

Ο Παπούλιας (1975) με βάση τη γενική εξίσωση $L_p=P-(p+S_f)$ και τη σχέση $S_f=1/5,637-0,176*P$ δίνει τις ακόλουθες σχέσεις Υδατοσυγκράτησης L_p -Κατακρημνισμάτων P:

Θερινό εξάμηνο: L_p =-1,237+0,824*P (r^2=0,950)

Χειμερινό εξάμηνο: L_p =-1,013+0,859*P (r^2=0,968)

Έτος: L_p =-1,026+0,822*P (r^2=0,963)

Όπου:

L_p = Υδατοσυγκράτηση (mm)

p= Διαπερνώσα βροχή (η ποσότητα της βροχής που διαμέσου του φυλλώματος φθάνει στο έδαφος σε mm)

S_f= Κορμοαπορροή (η ποσότητα της βροχής που φθάνει δια του κορμού στο έδαφος σε mm)

P=Ύψος βροχής (mm) Μετράται σε παρακείμενο ακάλυπτο χώρο ή σε μεγάλα διάκενα

6.4. Μετρήσεις υδατοσυγκράτησης στο Πανεπιστημιακό Δάσος Ταξιάρχη- Βραστάμων

Ο Γκανάτσιος (2004), προσπάθησε: α) να εμπλουτίσει τη γνώση της υδατοσυγκράτησης της πλατυφύλλου δρυός (*Q. conferta*), β) να εξετάσει τις υδρολογικές επιδράσεις των αραιώσεων και αποψιλώσεων στο ίδιο οικοσύστημα, γ) να συγκρίνει τα αποτελέσματα της έρευνάς του με τα αντίστοιχα προηγούμενων ερευνών και να δώσει πρακτικές συστάσεις που μπορούν να ληφθούν υπ' όψιν στην οργάνωση και εφαρμογή των δασοκομικών επεμβάσεων που ασκούνται στην Ελλάδα, ώστε να αυξηθεί η παραγωγή του νερού.

Οι σχέσεις του Παπούλια (1975) μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε μικρά και μέσα ύψη βροχής (h<1000mm). Σε μεγάλα ύψη βροχής (h>1000mm) προκύπτουν μη φυσιολογικές τιμές L_p. Επομένως, για την περιοχή του Ταξιάρχη η παραπάνω σχέση δεν μπορεί να εφαρμοστεί, διότι τις δύο από τις τρείς χρονιές διεξαγωγής της έρευνας το ετήσιο ύψος βροχής ξεπέρασε τα 1000mm (Νοε 2000-Οκτ 2001, Νοε 2002-Οκτ 2003). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις, με τις οποίες γίνεται προσπάθεια να προσεγγισθεί η απώλεια υδατοσυγκράτησης με τα δεδομένα της περιόδου αναφοράς της περιοχής αυτής. Οι πειραματικές επιφάνειες βρίσκονται στο Πανεπιστημακό Δάσος του Ταξιάρχη (40°N 25'N; 23°30'E) και κυρίαρχο δασοπονικό είδος είναι η πλατύφυλλος δρύς (Quercus *frainetto-conferta).* Η ζώνη βλάστησης είναι η Quercetalia (Σχ. 8, Εικ. 6).

Σχήμα 8: Η θέση της περιοχής έρευνας στο Υδατικό Διαμέρισμα της Κεντρικής Μακεδονίας ενταγμένη στη λεκάνη απορροής του Χαβρία (Κωδ. 5)

Εικόνα 6: Η περιοχή έρευνας

Η ανάλυση των κλιματικών δεδομένων έγινε με τη βοήθεια μετεωρολογικών παρατηρήσεων από το μετεωρολογικό σταθμό του Δασαρχείου Ταξιάρχη υψομέτρου 860μ. και οι πειραματικές επιφάνειες βρίσκονται μόλιες 150-200m από αυτόν. Το κλιματικό περιβάλλον της περιοχής σύμφωνα με την κατάταξη κατά Köppen, είναι τυπικό μεσοθερμικό (υποτύπος CSb), με ήπιες σχετικά θερμοκρασίες και τον κύριο όγκο βροχοπτώσεων κατά τη χειμερινή περίοδο από Οκτώβριο έως Μάρτιο, ενώ τα καλοκαίρια έχουν σύντομη ζεστή και ξηρή περίοδο. Το κύριο γνώρισμα του κλίματος της περιοχής είναι οι μεγάλες

διακυμάνσεις της ποσότητας της βροχής κατά τους θερινούς μήνες. Σχετικά με τα κλιματικό περιβάλλον της περιοχής, που όπως αναφέρθηκε διαμορφώνει τις συνθήκες βλάστησης, τα αποτελέσματα της έρευνας για την περίοδο 1974-2003 και ειδικότερα τη διετία Νοέμβριος 2001-Οκτώβριος 2003 δίνονται στη συνέχεια ως εξής:

Πίνακας 4α: Κλιματικά στοιχεία της περιοχής μελέτης για περίοδο 30 ετών πρίν την έρευνα.

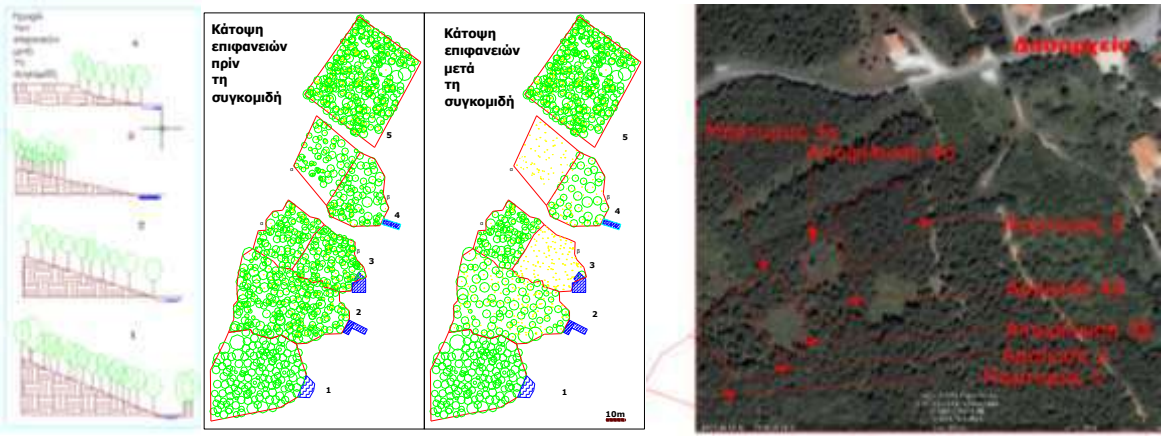
Μέσα ετήσια κατακρημνίσματα	756mm
Μέγιστα μηνιαία κατακρημνίσματα (Φεβ 1986)	387mm
Ελάχιστα μηνιαία κατακρημνίσματα (Ιαν 1990, Ιουν 1994 και Σεπτ 1998)	0mm
Μέγιστα ετήσια κατακρημνίσματα το 2002	1083mm
Ελάχιστα ετήσια κατακρημνίσματα το 1977	478mm
Μέγιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία τον Ιούλιο 2002	23.8^{o}C
Ελάχιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία το Φεβρουάριο 2003	-1.9^{o}C
Μέγιστη μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα το 2001	12.3^{o}C
Ελάχιστη μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα το 1990	9.8^{o}C
Μέγιστο ύψος χιονιού το 1990	700mm

Τα μέσα κατακρημνίσματα κατά την προπαρασκευαστική περίοδο 2000-2001 ήταν 100 mm πάνω από το μέσο όρο της περιόδου 1974-2003.

Πίνακας 4β: Κλιματικά στοιχεία της περιοχής μελέτης από Νοέμβριο 2001 έως Οκτώβριο 2003.

Μέσα ετήσια κατακρημνίσματα	983.2 mm
Μέγιστα μηνιαία κατακρημνίσματα (Δεκέμβριος 2002)	259.7 mm
Ελάχιστα μηνιαία κατακρημνίσματα (Μάρτιος 2003)	5.7 mm
Ετήσια κατακρημνίσματα τον 1ο χρόνο (Νοε.2001-Οκτ.2002)	887.3 mm
Ετήσια κατακρημνίσματα τον 2ο χρόνο (Νοε.2002-Οκτ.2003)	1079.1 mm
Μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (Αύγουστος 2003)	23.2 oC
Ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία (Φεβρουάριος 2003)	0.0 oC
Μέγιστη μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα (Νοε.2001-Οκτ.2002)	14.2 oC
Ελάχιστη μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα (Νοε.2002-Οκτ.2003)	11.4 oC
Μέγιστο ύψος χιονιού (Δεκέμβριος 2001)	89,5mm

Η ηλικία των δέντρων το 2000 που άρχισε η έρευνα ήταν από 45 έως 53 έτη και το δάσος ήταν και είναι υγιές με μέσο ύψος δέντρων τα 15m. Σε κάποια δέντρων ανάλογα τη χρονιά παρατηρείται αποξήρανση των κορυφών. Η κομοστέγη το χειμώνα είναι κλειστή κατά 40% και κατά 100% το καλοκαίρι. Συνολικά επιλέχθηκαν 5 επιφάνειες περίπου 1,7 στρέμματα έκαστη (Σχ. 9, Εικ 7, 8) με παρόμοια έκθεση και διάταξη στο χώρο. Οι 1 και 5 επιλέχθηκαν ως μάρτυρες. Διάφοροι χειρισμοί έγιναν στις επιφάνειες 2,3,4. Το άνω μέρος της 4 (4α) αποψιλώθηκε ενώ το κάτω αραιώθηκε στο 50% της κυκλικής επιφάνειας των δέντρων. Στο άνω μέρος της 3 (3α) δεν έγινε χειρισμός ενώ το κάτω αποψιλώθηκε (3β). Τέλος στη 2 αφαιρέθηκε το 50% της κυκλικής επιφάνειας.



Σχήμα 9: Οι πειραματικές επιφάνειες πριν και μετά την επέμβαση

Εικ. 7: Άποψη της επιφάνειας 1 (Μάρτυρας)

Εικ. 8: Οι τρείς δασοκομικοί χειρισμοί: Μάρτυρας (5), αραίωση (2), αποψίλωση (3)

Τα κατακρημνίσματα μετρήθηκαν στο Μ.Σ. Ταξιάρχη και η διαπερώσα βροχή μετρήθηκε σε εβδομαδιαία βάση για 2 έτη αρχίζοντας από 1 Νοεμβρίου 2001 και τελειώνοντας 31 Οκτωβρίου 2003, με τη χρήση συλλεκτήρων διαμέτρου 30cm σε κάθε λεκάνη (Εικ. 9). Τα ετήσια κατακρημνίσματα τα έτη 2002 και 2003 (μετά τους χειρισμούς) ήταν 1085mm και 936mm αντίστοιχα, σημαντικά υψηλότερα συγκρινόμενα με την προηγούμενη περίοδο των 30 ετών. Η συχνότητα και ο όγκος των κατακρημνισμάτων κατά τη διάρκεια όλης της περιόδου έρευνας (1 προπαρασκευαστικό έτος και 2 έτη μετρήσεων) δίνεται στον Πίνακα 5 α,β. Όλες οι μέσες τιμές των υδρολογικών μετρήσεων αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές όλων των λεκανών με τον ίδιο χειρισμό.

Εικ 9: Συλλεκτήρας διαπερώσας βροχής

❖ **<u>Μεθοδοι υπολογισμού της υδατοσυγκράτησης στο Πανεπιστημιακό Δάσος Ταξιάρχη-Βραστάμων</u>**

Στην παρούσα έρευνα υπολογίστηκε η υδατοσυγκράτηση με τρεις μεθόδους:

- **1η μέθοδος: Ανάλυση του αριθμού και του ύψους κατακρημνισμάτων** σε ημερήσια βάση, ταξινόμησή τους σε βαθμίδες ύψους βροχής.
- **2η μέθοδος:** Μέθοδος υπολογισμού της υδατοσυγκράτησης με τη βοήθεια του **μηνιαίου ύψους κατακρημνισμάτων**.
- **3η μέθοδος**: Μέθοδος **επί τόπου μέτρησης** της υδατοσυγκράτησης.

Για τη συντηρητική εκτίμηση του μεγέθους της απορροής, στην επεξεργασία των στοιχείων χρησιμοποιείται η μέθοδος που δίνει την μεγαλύτερη τιμή υδατοσυγκράτησης. Επισημαίνουμε ότι ο υπολογισμός της υδατοσυγκράτησης μιας περιοχής θεωρείται και είναι εξαιρετικά δύσκολος επειδή υπεισέρχονται πολλοί αστάθμητοι παράγοντες, οι οποίοι ακόμη και αν μπορούσαν να είναι διαθέσιμοι και μετρήσιμοι, πάλι θα υπήρχαν δυσκολίες στον υπολογισμό της. Το γεωγραφικό πλάτος σε συνδυασμό με το υψόμετρο επιδρούν στην υδατοσυγκράτηση, είτε με τη μείωση της έναρξης και της διάρκειας της βλαστητικής περιόδου, είτε με την καθ' ύψος μείωση της θερμοκρασίας, είτε με την υποβοήθηση και διατήρηση εδαφών περισσότερο ή λιγότερο γόνιμων και δυνάμενων να διακρατήσουν (αποθηκεύσουν) μεγαλύτερα ποσά χειμερινής υγρασίας. Αυτό κάνει δύσκολη τη μεταφορά δεδομένων από άλλες περιοχές.

❖ **<u>Περιγραφή των μεθόδων υπολογισμού της υδατοσυγκράτησης</u>**

1η μέθοδος: Αρχικά, έγινε η απαραίτητη η επεξεργασία των χαρακτηριστικών των κατακρημνισμάτων (αριθμός και ύψος σε ημερήσια βάση). Επειδή το δασοπονικό είδος είναι φυλλοβόλο, οι υπολογισμοί της υδατοσυγκράτησης δεν αναφέρονται μόνο στο υδρολογικό έτος αλλά και για στο μέσο **χειμερινό και θερινό** εξάμηνο της περιόδου διεξαγωγής της έρευνας. Ακολούθησε η **ταξινόμησή τους σε βαθμίδες ύψους βροχής** και υπολογίστηκαν οι **μέσοι όροι τριών χειμερινών και τριών θερινών εξαμήνων** με μήνα έναρξης το Νοέμβριο του 2000. Ως χειμερινό εξάμηνο χρησιμοποιήθηκε σε αντίθεση με όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία, η περίοδος από Νοέμβριο εώς Απρίλιο, διότι τα υψόμετρα των πειραμάτων των Cepel, Παπούλια, Νικολαϊδη-με τους οποίους συγκρίνονται τα αποτελέσματα- ασκούν καθοριστική επίδραση στην έναρξη της βλαστητικής περιόδου για τη δρύ. Στον Ταξιάρχη η δρύς αρχίζει να βγάζει φύλλα το Μάϊο ενώ τα κρατάει τουλάχιστον ως τα τέλη Οκτώβρη.

Καταρτίστηκε ο Πίνακας 5α, που δείχνει την κατανομή **του αριθμού** των κατακρημνισμάτων ανά βαθμίδα ύψους βροχής για την περίδο **Σεπτέμβριος 2000 – Δεκέμβριος 2003** και ο Πίνακας 5β που δίνει την κατανομή **του αριθμού** των κατακρημνισμάτων σε κλάσεις ύψους βροχής **ανά εξάμηνο** (θερινό και χειμερινό) για την περίοδο **Νοέμβριος 2001 – Δεκέμβριος 2003 (2έτη), ενώ ο** Πίνακας 5γ δείχνει την αντίστοιχη κατανομή (**του αριθμού** κατακρημνισμάτων) για την περίοδο **2001, 2002, 2003 (3 έτη, 3**

χειμερινά και 3 θερινά εξάμηνα). Ο Πίνακας 5δ δείχνει την κατανομή του **ύψους** των κατακρημνισμάτων ανά εξάμηνο (θερινό και χειμερινό) σε κλάσεις ύψους βροχής για την ίδια περίοδο (2001 – 2003).

Πίνακας 5α: Κατανομή του **αριθμού** των κατακρημνισμάτων σε κλάσεις ύψους βροχής για την περίοδο **Σεπτέμβριος 2000 – Δεκέμβριος 2003**.

Βαθμίδα βροχής (mm)	Αριθμός περιστατικών βροχής βαθμίδας	Μέση μηνιαία τιμή (mm)	Συνολικό ύψος κατακρημνισμάτων βαθμίδας (mm)	Μέσο ύψος κατακρημνισμάτων ανά βαθμίδα
0-3,00	182	4,6	278,8	7
3,01-5,00	78	2,0	313,3	7,8
5,01-10,00	69	1,7	527	13,2
10,01-15,00	23	0,6	304	7,6
15,01-20,00	25	0,6	447	11,2
20,01-25,00	11	0,3	258	6,5
25,01-30,00	9	0,2	253	6,3
30,01-40,00	4	0,1	132	3,3
40,01-50,00	2	0,1	99	2,5
50,01-60,00	3	0,1	176	4,4
60,01-80,00	0	0,0	0	0
80,01-100,00	2	0,1	0	0
Σύνολο	**408**		**2787,1**	

Πίνακας 5β: Κατανομή του **αριθμού** των κατακρημνισμάτων σε κλάσεις ύψους βροχής **ανά εξάμηνο** (θερινό και χειμερινό) για την περίοδο **Νοέμβριος 2001 – Δεκέμβριος 2003 (2έτη)**

Βαθμίδα βροχής (mm)	Αριθμός περιστατικών βροχής βαθμίδας Εξάμηνα:			Μέση μηνιαία τιμή (mm)	Συνολικό ύψος κατακρημνισμάτων βαθμίδας (mm)			Μέσο ύψος κατακρημνισμάτων ανά βαθμίδα
	2 Χειμερινά	2 Θερινά	Έτος		2 Χειμερινά	2 Θερινά	Διετία	
0-3.00	75	52	127	8.3	117.0	80.5	197.5	1.6
3.01-5.00	38	17	55	9.5	155.1	72.2	227.3	4.1
5.01-10.00	27	24	51	16.5	200.1	194.5	394.6	7.7
10.01-15.00	13	7	20	11	166.3	98.1	264.4	13.3
15.01-20.00	5	12	17	12.8	90.6	215.0	305.6	18
20.01-25.00	2	5	7	6.8	46	117	163	23.3
25.01-30.00	3	2	5	5.8	85	53	138	27.6
30.01-40.00	1	1	2	3	33	38	71	35.5
40.01-50.00	0	0	0	0	0	0	0	0
50.01-60.00	0	2	2	4.8	0	115	115	57.5
60.01-80.00	0	0	0	0	0	0	0	0
80.01-100.00	0	1	1	3.8	0	90	90	90
Total	164	123	287		893.1	1073.3	1966.4	

Πίνακας 5γ: Κατανομή του **<u>αριθμού</u>** των κατακρημνισμάτων ανά εξάμηνο (θερινό και χειμερινό) σε κλάσεις ύψους βροχής για την περίοδο 2001- 2003 (3 έτη)

	Αριθμός κατακρημνισμάτων ανά βαθμίδα βροχής για τα έτη 2001-2003 (3 χειμερινά+3 θερινά εξάμηνα)														
Βαθμίδα κατακρημνισμάτων	**Χ1 (Ν2000-Απ2001)**		**Θ1 (Μάι-Οκτ2001)**		**Χ2 2001-2002**		**Θ2 2002**		**Χ3 2002-2003**		**Θ3 2003**		Αθροισμα 3ετίας	ΜΟ 3ετίας	
mm	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ		**Αριθ/έτος**	**%**
0~3	25	4	9	2	36	6	31	5	39	7	21	4	161	**54**	**45**
3,01~5	7	1	7	1	18	3	8	1	20	3	9	2	69	**23**	**19**
5,01~10	9	2	4	1	14	2	13	2	13	2	11	2	64	**21**	**18**
10,01~15	1	1	1	1	5	1	3	1	8	1	4	1	22	**7**	**6**
15,01~20	4	1	1	1	2	0	2	0	3	1	10	2	22	**7**	**6**
20,01~25	1	1	2	1	1	0	4	1	1	0	1	0	10	**3**	**3**
25,01~30	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	2	0	5	**2**	**1**
30,01~40	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	4	**1**	**1**
40,01~50	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	**0**	**0**
50,01~60	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	**1**	**1**
60,01~80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**	**0**
80,01~100	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2	**1**	**1**
Άθροισμα αριθμού βροχών	**48**	**8**	**27**	**5**	**75**	**12**	**65**	**11**	**87**	**15**	**58**	**10**	**360**	**120**	**100**

Πίνακας 5δ: Κατανομή του **<u>ύψους</u>** των κατακρημνισμάτων ανά εξάμηνο (θερινό και χειμερινό) σε κλάσεις ύψους βροχής για την περίοδο 2001 – 2003 (3 έτη)

	΄Υψος κατακρημνισμάτων ανά βαθμίδα βροχής για τα έτη 2001-2003 (3 χειμερινά+3 θερινά εξάμηνα)															
Βαθμίδα κατακρημνισμάτων	**Χ1 (Ν2000-Απ2001)**		**Θ1 (Μάι-Οκτ2001)**		**Χ2 2001-2002**		**Θ2 2002**		**Χ3 2002-2003**		**Θ3 2003**		Αθροισμα 3ετίας	Ετήσιο Άθροισμα		Αθροισμα 2ετίας
mm	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ	**Σ**	Μηνιαίος ΜΟ		**mm/έτος**	**%**	**Ν2001-Ο2003**
0~3	35,9	6,0	13,0	2,2	58,3	9,7	48,2	8,0	59,0	9,8	32,3	5,4	246,7	82,2	10	**197,8**
3,01~5	24,1	4,0	27,9	4,7	69,8	11,6	34,5	5,8	85,3	14,2	38,2	6,4	279,8	93,3	11	**227,8**
5,01~10	58,2	9,7	30,7	5,1	102,5	17,1	100,0	16,7	98,0	16,3	94,8	15,8	484,2	161,4	19	**395,3**
10,01~15	14,4	2,4	12,0	2,0	63,4	10,6	41,9	7,0	103,1	17,2	57,0	9,5	291,8	97,3	11	**265,4**
15,01~20	71,7	12,0	17,0	2,8	36,1	6,0	34,1	5,7	54,5	9,1	181,3	30,2	394,7	131,6	15	**306,0**
20,01~25	24,6	4,1	48,6	8,1	25,0	4,2	92,0	15,3	21,0	3,5	24,5	4,1	235,7	78,6	9	**162,5**
25,01~30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	85,1	14,2	53,0	8,8	138,1	46,0	5	**138,1**
30,01~40	31,0	5,2	30,7	5,1	0,0	0,0	37,5	6,3	33,0	5,5	0,0	0,0	132,2	44,1	5	**70,5**
40,01~50	0,0	0,0	49,4	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	49,4	16,5	2	**0,0**
50,01~60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	55,0	9,2	0,0	0,0	60,0	10,0	115,0	38,3	5	**115,0**
60,01~80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	**0,0**
80,01~100	0,0	0,0	92,0	15,3	0,0	0,0	90,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	182,0	60,7	7	**90,0**
Άθροισμα υψών (mm)	259,8	43,3	321,3	53,6	356,2	59,4	532,6	88,8	540,0	90,0	542,0	90,3	2551,9	850,6	100	**1970,8**
Μέσο μέγεθος (mm)	**21,7**		**26,8**		**29,7**		**44,4**		**45,0**		**45,2**			35,5		

Με βάση την κατανομή του αριθμού και του ύψους των κατακρημνισμάτων ανά βαθμίδα ύψους βροχής και τους μέσους όρους των θερινών και χειμερινών εξαμήνων (Πίνακες 5 α,β,γ,δ), και με τη βοήθεια των συντελεστών του Πίνακα 1, καταρτίστηκε στη συνέχεια ο Πίνακας 6 υπολογισμού των μέσων **μηνιαίων, εξαμηνιαίων και ετήσιων τιμών υδατοσυγκράτησης της περιόδου Νοέμβριος 2001-Οκτώβριος 2003** και το ποσοστό (%) αυτής.

Πίνακας 6: Υπολογισμός της **υδατοσυγκράτησης** βάσει του αριθμού και του ύψους κατακρημνισμάτων ανά βαθμίδα βροχής για τη διετία Νοέμβριος 2001-Οκτώβριος 2003. (E_{IV}: Επιφάνεια που αραιώθηκε κατά 50% της κυκλικής της επιφάνειας).

Μέση μηναιαία και ετήσια υδατοσυγκράτηση της περιόδου Νοέμβριος 2001-Οκτώβριος 2003, και ποσοστό αυτής ανά βαθμίδα κατακρημνισμάτων																				
Βαθμίδα κατακ/των	Υδ/ση 2 ετών	Μέση μηναία	Ετήσια		Υδ/ση 2 ετών	Μέση μηναία	Ετήσια		Υδ/ση 2 ετών	Μέση μηναία	Ετήσια		Υδ/ση 2 ετών	Μέση μηναία	Ετήσια		Υδ/ση 2 ετών	Μέση μηναία	Ετήσια	
mm	Μάρτυρες	mm	mm	%	EIV	mm	mm	%	EII	mm	mm	%	Αποψίλωση	mm	mm	%	EIII	mm	mm	%
0~3	77,2	3,2	38,6	15	56,5	2,4	28,2	15	32,4	1,3	16,2	13	8,3	0,3	4,1	9	42,7	1,8	21,4	14
3,01~5	79,5	3,3	39,7	15	58,5	2,4	29,2	15	33,2	1,4	16,6	14	8,0	0,3	4,0	8	43,7	1,8	21,9	14
5,01~10	109,3	4,6	54,7	21	80,5	3,4	40,2	21	48,4	2,0	24,2	20	16,4	0,7	8,2	17	62,9	2,6	31,4	20
10,01~15	63,0	2,6	31,5	12	46,6	1,9	23,3	12	27,3	1,1	13,7	11	8,1	0,3	4,0	8	35,5	1,5	17,8	12
15,01~20	80,4	3,3	40,2	15	59,4	2,5	29,7	15	40,8	1,7	20,4	17	22,2	0,9	11,1	23	51,3	2,1	25,6	17
20,01~25	37,7	1,6	18,9	7	28,1	1,2	14,0	7	18,5	0,8	9,2	8	8,9	0,4	4,5	9	23,3	1,0	11,7	8
25,01~30	32,8	1,4	16,4	6	24,4	1,0	12,2	6	17,1	0,7	8,6	7	9,9	0,4	4,9	10	21,3	0,9	10,7	7
30,01~40	15,7	0,7	7,8	3	11,7	0,5	5,8	3	7,8	0,3	3,9	3	3,8	0,2	1,9	4	9,8	0,4	4,9	3
40,01~50	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0
50,01~60	19,0	0,8	9,5	4	14,0	0,6	7,0	4	10,9	0,5	5,5	5	7,8	0,3	3,9	8	13,4	0,6	6,7	4
60,01~80	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0
80,01~100	6,9	0,3	3,5	1	5,1	0,2	2,6	1	3,8	0,2	1,9	2	2,4	0,1	1,2	3	4,7	0,2	2,3	2
Σύνολο	521,4	21,7	261	100	384,7	16,0	192	100	240,2	10,0	120	100	95,8	4,0	48	100	308,6	12,9	154	100

Συνοπτικά συμπεράσματα πίνακα σε 287 επεισόδια βροχής (893.1 mm για την αυξητική περίοδο και 1073,3 mm την περίοδο του ληθάργου):

Κατακρημνίματα 1966,4mm	Μάρτυρας	Αραίωση	Αποψίλωση
Υδατοσυγκράτηση (mm)	521,4 mm	384,7 mm	95,8 mm
Υδατοσυγκράτηση (%)	26,5%	19,5%	4,8%

2η μέθοδος: Η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού της υδατοσυγκράτησης στηρίζεται στο μηνιαίο ύψος κατακρημνισμάτων και την επιλογή των ανάλογων συντελεστών υδατοσυγκράτηση του Πίνακα 1. Η αξιοπιστία του μέσου όρου προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα στις μεγάλες βροχές, επειδή η ποσοστιαία παρεμβολή της υδατοσυγκράτησης γίνεται μικρότερη. Η υδατοσυγκράτηση είναι μεγαλύτερη κατά ποσοστό στις ψιλές βροχές.

3η μέθοδος: Ο υπολογισμός της υδατοσυγκράτησης έγινε και με επιτόπιες μετρήσεις με την παραδοχή ότι η κορμοδιαβροχή λόγω του μικρού της μεγέθους, μπορεί να θεωρηθεί ίδια με την ήδη υπολογισμένη από άλλους ερευνητές. Σε κάθε χειρισμό τοποθετήθηκαν ειδικά κατασκευασμένοι για το σκοπό αυτό συλλεκτήρες της διαπερώσας βροχής με επιφάνεια συλλογής του νερού του συλλεκτήρα είχε διάμετρο 20 εκ. (Εικόνα 9). Η μέτρηση της συνολικής βροχής έγινε με βροχογράφο του Μ.Σ. Ταξιάρχη.

Με τη μέθοδο αυτή, η υδατοσυγκράτηση της κομοστέγης, ή διαφορετικά το νερό από κάθε βροχή ή χιόνι που παρέμεινε επάνω στο φύλλωμα και δεν έφτασε ποτέ στο έδαφος, υπολογίστηκε από τη σχέση: **P=p+Sf+Lp.** Από τους τέσσερις αυτούς παράγοντες, η υδατοσυγκράτηση είναι η μόνη που δεν μπορεί να μετρηθεί απ' ευθείας και υπολογίζεται έμμεσα. Η κορμοαπορροή δεν μετρήθηκε αλλά χρησιμοποιήθηκε το ποσοστιαίο μέγεθος της από την έρευνα των Παπούλια & Νικολαΐδη (1979) λόγω του πολύ μικρού ποσοστού (3,3% της ετήσιας βροχής) που καταλαμβάνει. Η μέθοδος χρησιμοποιείται διεθνώς σχεδόν απαράλλακτα και μικρές αλλαγές γίνονται μόνο στην επιλογή αυτογραφικών συσκευών ή απλών δοχείων

με συνδρομή του ερευνητή ή τοπικού παρατηρητή μετά από κάθε επεισόδιο κατακρημνισμάτων. Ως ποσό των κατακρημνισμάτων λαμβάνεται ο μέσος όρος των ενδείξεων των βροχομέτρων. Για να αποφευχθεί η εξάτμιση από τα δοχεία μέτρησης της διαπερώσης βροχής χρησιμοποιείται συνήθως λεπτό στρώμα υγρής παραφίνης, αν και στην εν λόγω έρευνα θεωρήθηκε ότι το χωρί είναι αρκετό (Εικ. 9). Η εγκατάσταση των συσκευών έγινε το Σεπτέμβριο του 2000 και μετά από περίοδο ελέγχου οι μετρήσεις άρχισαν τον Οκτώβριο του 2000 και συνεχίστηκαν ως τον Οκτώβριο του 2003, καλύπτοντας έτσι συνολικά τρία χειμερινά (Νοέμβριος-Απρίλιος) και τρία θερινά (Μάϊος-Οκτώβριος) εξάμηνα.

Με τη βοήθεια της 1^{ης} μεθόδου, η μέση ετήσια υδατοσυγκράτηση για την περίοδο Νοέμβριος 2001-Οκτώβριος 2003 αντιπροσωπεύει το 26,4% των μέσων ετήσιων κατακρημνισμάτων στην αδιατάρακτη επιφάνεια (Μάρτυρας), το αντίστοιχο ποσοστό ανέρχεται σε 19,4% στην επιφάνεια που αραιώθηκε σε ποσοστό 50% επί της κυκλικής επιφάνειας του συνόλου των δέντρων της, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό στην επιφάνεια που υλοτομήθηκε αποψιλωτικά, ανέρχεται σε 4,8% (Πίνακας 6). Από τη 2^{η} μέθοδο τα αντίστοιχα ποσοστά βρέθηκαν ίσα προς 9,45% για το μάρτυρα, 6,97% για την αραίωση και μόλις 1,92% για την αποψίλωση. **1^{η} μέθοδος δίνει τη μέγιστη τιμή υδατοσυγκράτησης και διαφέρει αρκετά από τις άλλες. Το πλεονέκτημά της είναι ότι δίνει συντηρητικές τιμές στον υπολογισμό του ελάχιστου υδατικού πλεονάσματος και επομένως της ελάχιστης αναμενόμενης απορροής.** Το μειονέκτημα της 3^{ης} είναι η δυσκολία διεξαγωγής αξιόπιστων μετρήσεων. Οι μετρήσεις υπαίθρου έδωσαν για την ίδια επιφάνεια (Μάρτυρας) τιμή υδατοσυγκράτησης **9%** επί του ποσοστού των ετήσιων κατακρημνισμάτων, που βρίσκεται πολύ κοντά στην τιμή της 2^{ης} μεθόδου που είναι αντίστοιχα 8,17% (Μάρτυρας), **6,7%** για αραίωση και **1,8%** για αποψίλωση), συμπέρασμα χρήσιμο για την εκτίμησή της όταν δεν είναι εφικτή η μέτρησή της.

- **<u>Επίδραση των δασοκομικών χειρισμών υλοτομιών στην υποβλάστηση</u>**

Για τον υπολογισμό της υδατοσυγκράτησης της υποβλάστησης η τιμή που δίνεται σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία και τις έρευνες του Παυλίδη (1997), αντιστοιχεί στο 23% της υδατοσυγκράτησης της δασοσυστάδας. **Σημαντικές αλλαγές στην υποβλάστηση, παρατηρήθηκαν μόνο στις επιφάνειες που υλοτομήθηκαν αποψιλωτικά**. Για αυτές υπολογίστηκαν οι συντελεστές (αναλογίες) που συνδέουν τις τιμές υδατοσυγκράτησής τους, με εκείνες των μαρτύρων και αντιπροσωπεύουν το στάδιο ανάπτυξης της υποβλάστησης. Ο πρώτος συντελεστής-αναλογία (πηλίκο υδατοσυγκράτησης αραιωμένης επιφάνειας προς υδατοσυγκράτηση Μάρτυρα) (σ_1=0,088) αφορά το πρώτο χειμερινό εξάμηνο, ο δεύτερος (σ_2=0,177) τα επόμενα δύο και ο τρίτος (σ_3=0,262) το τελευταίο θερινό. Οι τιμές υδατοσυγρκάτησης είναι οι μέσοι όροι των συντελεστών που υπολογίστηκαν ανά βαθμίδα ύψους βροχής και φαίνονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Συντελεστές υδατοσυγκράτησης για τις επιφάνειες που υλοτομήθηκαν αποψιλωτικά και αραιώθηκαν κατά 50% επί της κυκλικής τους επιφάνειας.

Βαθμίδα ύψους βροχής mm	Συντελεστής υδατοσυγκράτησης για τις ΕΙV και ΕΙΙβ	Συντελεστές υδατοσυγκράτησης για τις επιφάνειες που υλοτομήθηκαν αποψιλωτικά-σχετίζονται με τα στάδια ανάπτυξης της υποβλάστησης		
	σ	**σ_1**	**σ_2**	**σ_3**
0-3,00	0,732	0,051	0,103	0,153
3,01-5,00	0,737	0,051	0,102	0,152
5,01-10,00	0,738	0,074	0,147	0,218
10,01-15,00	0,739	0,061	0,123	0,183
15,01-20,00	0,739	0,107	0,213	0,318
20,01-25,00	0,744	0,108	0,218	0,323
25,01-60,00	0,751	0,162	0,330	0,485
Μέση τιμή	**0,740**	**0,088**	**0,177**	**0,262**

Εικόνα 10: Κατάσταση της υποβλάστησης το πρώτο χειμερινό εξάμηνο μετά τη συγκομιδή του ξύλου (συντελεστής υδατοσυγκράτησης σ_1) και δύο έτη μετά επέμβαση (συντελεστής υδατοσυγκράτησης σ_3)

Οι υδρολογικές επιδράσεις των χειρισμών μεταξύ φυλλοβόλων και κωνοφόρων διαφέρουν λόγω της απουσίας φυλλώματος το χειμώνα στα φυλλοβόλα. Στην παρούσα μελέτη το Νοέμβριο τα νεκρά φύλλα δρυός παραμένουν στα κλαδιά και δικαιολογούν ποσοστό υδατοσυγκράτησης επί των κατακρημνισμάτων 12%. Ο Απρίλιος εντάχθηκε στο χειμερινό εξάμηνο για τη δρύ στα 850m διότι τα δέντρα δεν έχουν βγάλει ακόμα φύλλα ή είναι πολύ μικρά (Υδατοσυγκράτηση Απριλίου 6% επί των μηνιαίων κατακρημνισμάτων). Έτσι η περίοδος Νοέμβριος-Απρίλιος αποτέλεσε το χειμερινό εξάμηνο και η περίοδος Μάϊου-Οκτωβρίου το Θερινό. Τα κατακρημνίσματα κατανέμονται στα δύο εξάμηνα κατά 54.7% για το θερινό και 45.3% στο χειμερινό εξάμηνο των συνολικών κατακρημνισμάτων αντίστοιχα.

Η υδατοσυγκράτηση έφτασε τη μέγιστη τιμή της (19.2% των μηνιαίων κατακρημνισμάτων) τον Ιούλιο του 2001. Ο Πίνακας 8 δείχνει το ποσό υδατοσυγκράτησης και τη διαφοροποίηση των τιμών της ανά χειρισμό και εξάμηνο για κάθε έτος μέτρησης Για το Μάρτυρα η μέση τιμή της βρέθηκε 13.5% των συνολικών κατακρημνισμάτων για τα θερινά εξάμηνα και ελάχιστη μέση τιμή 0.6% για τα χειμερινά εξάμηνα στο χειρισμό αποψίλωσης.

Για όλη την περίοδο έρευνας (Νοέμβριος 2001-Οκτώβριος 2003) η υδατοσυγκράτηση βρέθηκε στο μάρτυρα, την αραίωση και την αποψίλωση 9,0%, 6,7% και 1,8% αντίστοιχα. Αυτά τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν και βρέθηκαν παρόμοια με τα αντίστοιχα των Παπούλια Νικολαΐδη (1979), που οργάνωσαν μετρήσεις υδατοσυγκράτησης σε συστάδα πλατυφύλλου δρυός στο Νεοχώρι Αρναίας λίγα χιλιόμετρα μακρύτερα από τον Ταξιάρχη με παρόμοιες συνθήκες κλίματος, βλάστησης, τοπογραφίας (Πίνακας 8).

Πίνακας 8: Σύγκριση αποτελεσμάτων δύο ερευνών υπολογισμού υδατοσυγκράτησης, διαπερώσας βροχής και κορμοαπορροής ανά χειμερινό εξάμηνο (ΧΕ) και θερινό (ΘΕ) και για όλη την περίοδο της έρευνας (δύο έτη-Νοέμβριος 2001 έως Οκτώβριος 2003).

		Παρούσα έρευνα Ταξιάρχης			**Παπούλιας (1979) Νεοχώρι Αρναίας**		
	Χειρισμός	ΜΟ ΧΕ (%)	ΜΟ ΘΕ (%)	Μ.Ο 2ετών (%)	ΜΟ ΧΕ (%)	ΜΟ ΘΕ (%)	Έτος (%)
Υδατοσυγκράτηση (% Κατακρημνισμάτων)	Μάρτυρας	4.6	13.5	9.0	2.5	13.1	7.8
	Αραίωση	3.3	10.0	6.7	- -		
	Αποψίλωση	0.6	3	1.8			
Διαπερώσα βροχή (% Κατακρημνισμάτων)	Μάρτυρας	92.0	82.8	87.0	93.6	84.3	88.9
	Αραίωση	93.2	86.4	89.4			
	Αποψίλωση	99.4	97.0	98.1			
Κορμοαπορροή (% Κατακρημνισμάτων)	Μάρτυρας	3.5	3.7	3.6	3.9	2.6	3.3
	Αραίωση	3.5	3.7	3.6			
	Αποψίλωση	0	0	0			

Οι εξισώσεις τυπικής απόκλισης που περιγράφουν την υδατοσυγκράτηση ως ποσοστό των κατακρημνισμάτων δίνεται στον Πίνακα 9. Η σχέση μεταξύ υδατοσυγκράτησης και κατακρημνισμάτων περιγράφεται καλά για τα θερινά εξάμηνα σε όλους τους χειρισμούς αλλά όχι για τα χειμερινά (R^2 ποικίλει

από 0.504 έως 0.517), πιθανόν λόγω της έλλειψης φυλλώματος που μειώνει κατά πολύ την υδατοσυγκράτηση.

Πίνακας 9: Τυπική απόκλιση μεταξύ υδατοσυγκράτησης (I) και κατακρημνισμάτων (P) για τα χειμερινά και θερινά εξάμηνα. Οι μονάδες είναι mm ανά μήνα.

Περίοδος	**Χειρισμός**	**Τυπική απόκλιση**	**R^2**
Χειμώνας	Μάρτυρας	$I= 0.324+0.0911P-0.001P^2+1.91\ 10^{-6}P^3$	0.517
	Αραίωση	$I= 0.236+0.067P-0.011P^2 +1.42\ 10^{-6}P^3$	0.516
	Αποψίλωση	$I= -0.78+0.022P+6.64\ 10\text{-}7P^3$	0.504
Θέρος	Μάρτυρας	$I= 0.188+0.133P$	0.994
	Αραίωση	$I= 0.139+0.098P$	0.994
	Αποψίλωση	$I= 0.024P^{1.044}$	0.918

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των ερευνών της υδατοσυγκράτησης στο Πανεπιστημιακό Δάσος Ταξιάρχη –Βραστάμων βρέθηκαν παρόμοια με τα αντίστοιχα των Παπούλια, Νικολαϊδη (1979). **Η αφαίρεση του 50% της κυκλικής επιφάνειας οδήγησε μείωση της μέσης ετήσιας υδατοσυγκράτησης από 9% (στο μάρτυρα) σε 6,7% των συνολικών κατακρημνισμάτων).** Σε άλλες μελέτες με άλλα είδη η αφαίρεση του 50% της κυκλικής επιφάνειας οδήγησε σε μείωση της υδατοσυγκράτησης στο 18,5% (Veracion and Lopez, 1976)*, 30,2% (Aussenac et al., 1982) και 41,6% (Crockford and Richardson, 2000). Όταν αφαιρεθεί το 35% της κυκλικής επιφάνειας, η υδατοσυγκράτηση μειώνεται στο 30.4% (Breda et al., 1995)* ενώ όταν αφαιρεθεί το 15% της κυκλικής επιφάνειας η αντίστοιχη μείωση είναι στο 11.1% (Aboal et al., 2000). Δεν υπάρχει σχέση μεταξύ διαπερώσας βροχής και πυκνότητας της βλάστησης αλλά η μείωση της διαπερώσας σχετίζεται με την αύξηση της κυκλικής επιφάνειας, της ηλικίας, του ύψους και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) (Muzylo et al., 2009).

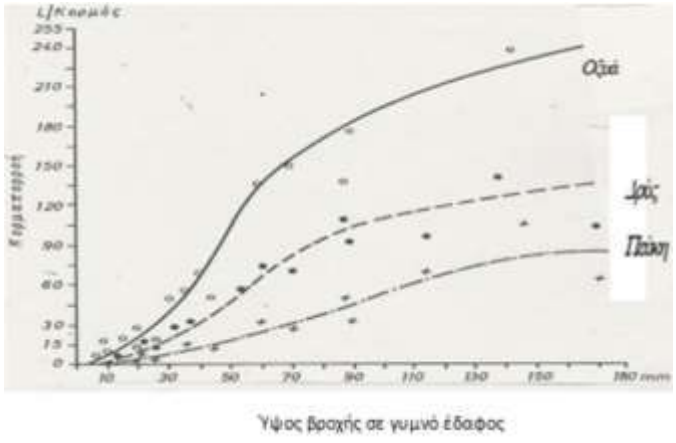
6.5. Ενειδκτικές έρευνες μέτρησης και υπολογισμού κορμοαπορροής και υδατοσυγκράτησης

Ο Wicht (1941, 1967) σε έρευνες σε συστάδα καναδικής λεύκης στη Νότιο Αφρική έδωσε, για τα έτη 1938 και 1939, την εκατοστιαία κατανομή της διαπερώσας βροχής, της κορμαπορροής και της υδατοσυγκράτησης που δίνεται στον Πίνακα 10 όπου φαίνεται πως η κορμαπορροή των γυμνών δένδρων είναι μεγαλύτερη των δένδρων με φύλλωμα. Τα κωνοφόρα είδη δείχνουν γενικά πολύ μικρότερες τιμές κορμαπορροής σε σχέση με τα πλατύφυλλα. Σε συστάδες πεύκης της Ν. Καρολίνας διαπιστώθηκε από γενόμενες έρευνες τιμές κυμαινόμενες μεταξύ 1 έως 5%. Κατά τους Dunford και Niederhoff (1944)* η κορμαπορροή της πεύκης ανέρχεται σε 1,5% και της ερυθρελάτης με 1% (σε νεαρές συστάδες η κορμαπορροή φθάνει το 3%, (Delfs 1955). Στα κωνοφόρα η τήξη του χιονιού της κόμης τους, συνεπεία πτώσης θερμής βροχής, προκαλεί σημαντική αύξηση της κορμαπορροής τους.

Πίνακας 10: Μηνιαία και ετήσια ύψη βροχής των ετών 1938 και 1939 και ποσοστιαία αναλογία της διαπερώσας βροχής τση κορμαπορροής και της υδατοσυγκράτησης σε συστάδα Populus Canescens στη Νότιο Αφρική (Wicht, 1941).

Μήνας	Βροχή (mm)	Διαπερώσα βροχή (%)	Κορμαπορροή (%)	Υδατοσυγκράτηση (%)	Κατάσταση φυλλώματος
1938					
Σεπτέμβριος	141,5	81,2	14,7	4,1	Άνευ φύλλων
Οκτώβριος	80,0	75,9	10,5	13,7	Έναρξη σχηματισμού
Νοέμβριος	31,8	76,0	6,9	17,2	Πλήρως ανεπτυγμένο
Δεκέμβριος	13,5	77,4	7,6	15,1	Πλήρως ανεπτυγμένο
1939					
Ιανουάριος	-	-	-	-	-
Φεβρουάριος	72,1	85,9	6,0	8,1	Πλήρως ανεπτυγμένο
Μάρτιος	8,9	54,3	-	15,7	Πλήρως ανεπτυγμένο
Απρίλιος	104,1	81,2	6,1	12,7	Πτώση φύλλων
Μάιος	132,1	76,2	13,5	10,5	Πτώση φύλλων
Ιούνιος	56,4	84,2	12,5	3,2	Πτώση φύλλων
Ιούλιος	93,7	82,9	12,7	4,3	Πτώση φύλλων
Αύγουστος	137,1	82,7	17,4	0,9	Πτώση φύλλων
Σεπτέμβριος	891,2	80,2	11,6	8,0	Πτώση φύλλων

Ο Κωτούλας (1995), αναφέρει πως ιδιαίτερα ψηλές τιμές εμφανίζει η κορμαπορροή στην οξυά, στην οποία ανέρχεται γενικά στο 12,5% με τη λεύκη να ακολουθεί με 12%, η δρυς με 9,5%, ο σφένδαμνος με 5%, ο φράξος με 4,3% και η φτελιά με 3,7%. Ο Cepel (1967), σε πειράματα που έγιναν στην Ευρωπαϊκή Τουρκία σε μικτές συστάδες οξυάς, δρυός και πεύκης, μέτρησε κορμαπορροή και υδατοσυγκράτηση σε σχέση με το ύψος βροχής (Σχήμα 10, Πίνακας 11). Η κορμοαπορροή ανέρχεται ετησίως στην οξυά σε 15,5% στην δρυ σε 10,9% και στην πεύκη σε 4,0% και η υδατουσγκράτηση 17,4% στην οξυά, 20% στη δρυ και 31,1% στην πεύκη.



Σχήμα 10: Σχέση βροχής σε γυμνό έδαφος και κορμοαπορροής συστάδας οξυάς, δρυός και πεύκης (Cepel 1967).

Πίνακας 11. Μέσες τιμές πενταετίας διαπερώσας βροχής, κορμοαπορροής και υδατοσυγκράτησης σε συστάδα οξυάς, δρυός και πεύκης κατά τον Cepel.

Δασοπονικό είδος	Εποχή έτους	Βροχή επί γυμνού εδάφους	Διαπερώσα βροχή		Κορμοαπορροή		Υδατοσυγκράτηση	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)
Οξυά	Χειμερινό Εξάμηνο	704,4	68,1	479,7	18,1	127,5	13,8	97,2
	Θερινό Εξάμηνο	341,0	66,0	225,0	13,0	44,3	21,0	71,0
	Έτησια	1045,4	67,1	704,6	15,5	171,8	17,4	168,6
Δρυς	Χειμερινό Εξάμηνο	689,0	73,0	502,9	13,4	92,3	13,6	93,7
	Θερινό Εξάμηνο	331,0	65,2	215,8	8,3	27,0	26,5	87,9
	Έτησια	1020,0	69,1	718,7	10,9	119,3	20,0	181,6
Πεύκη	Χειμερινό Εξάμηνο	717,0	63,6	453,8	4,2	30,0	32,5	233,0
	Θερινό Εξάμηνο	344,0	66,5	228,7	3,8	13,0	29,7	102,7
	Έτησια	1061,0	64,9	682,5	4,0	43,0	31,1	335,7

Στο ερευνητικό δάσος αείφυλλων πλατύφυλλων του San Dimas στην Καλιφόρνια της Αμερικής η κορμαπορροή ανέρχεται για βροχές ύψους 2,5 έως 6,4 mm σε 4% και σε βροχές ύψους άνω των 13 mm σε 7% όπως στον φαίνεται στον Πίνακα 12. Όσον αφορά την κορμοδιαβροχή προκύπτει ότι αυτή εξαρτάται βασικά από το δασοπονικό είδος. Η κορμοδιαβροχή είναι μεγαλύτερη στα κωνοφόρα από ότι στα πλατύφυλλα γεγονός που εξηγεί και τη μεγαλύτερη κορμαπορροή των τελευταίων.

Πίνακας 12: Αποτελέσματα ερευνών σχετικών με την υδατοσυγκράτηση και την κορμαπορροή σε ερευνητικό δάσος του San Dimas της Καλιφόρνιας (Delfs, 1955).

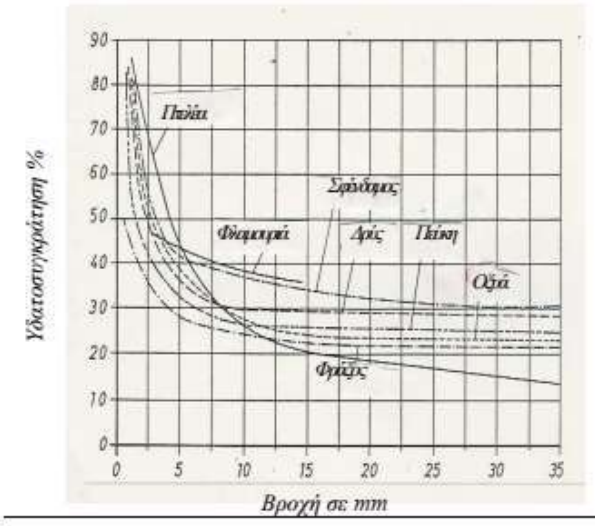
Βαθμίδα βροχής (mm)	**Αριθμός βροχών**	**Βροχές σε γυμνό έδαφος (mm)**	**Διαπερώσα βροχή**		**Κορμαπορροή**		**Υδατοσυγκράτηση**	
			(mm)	**%**	**(mm)**	**(%)**	**(mm)**	**(%)**
2,54-6,35	10	43,2	20,1	46	1,5	4	21,6	50
6,60-12,7	6	59,2	37,3	63	3,6	6	18,3	31
12,95-25,4	14	261,1	195,3	75	19,3	7	46,5	18
25,65-50,8	10	336,8	273,3	81	24,6	7	38,9	12
51,05-152,4	5	407,7	332,6	82	34,0	8	41,1	10
152,65-304,8	5	1006,6	844,0	84	93,7	9	68,9	7
Σύνολο		2114,6	1702,6	81	176,7	8	235,3	11

Ο Sopper (1967) αναφέρει ότι σημαντική κορμαπορροή μπορεί να εμφανίσει η ερυθρελάτη και η πεύκη, μόνο μετά την πτώση βροχής ύψους μεγαλύτερου των 15mm, ενώ στα λειόφλοια πλατύφυλλα η κορμαπορροή αρχίζει μετά από βροχή ύψους 2 έως 5mm. Συμπερασματικά διαπιστώνουμε ότι η κορμαπορροή γενικά είναι μεγαλύτερη στα πλατύφυλλα από ότι στα κωνοφόρα και ανέρχεται στα φυλλοβόλα πλατύφυλλα σε 8-12% (οξυά 12,5%, δρυς 8-10%, λεύκη 12%), στα αείφυλλα πλατύφυλλα σε 8-15% και τέλος στα κωνοφόρα σε 1-3% (ερυθρελάτη 1,4%, πεύκη 2-3%). Κατά συνέπεια η κορμαπορροή των κωνοφόρων ειδών λόγω των χαμηλών τιμών της είναι δυνατόν μερικές φορές για πρακτικούς δασοϋδρολογικούς σκοπούς να μη λαμβάνεται υπόψη. Ο Molchanov (1960) σε διάφορα δασοπονικά είδη και περιοχές της Ρωσίας παρέχει τα ακόλουθα αποτελέσματα υδατοσυγκράτησης (Πίνακας 13).

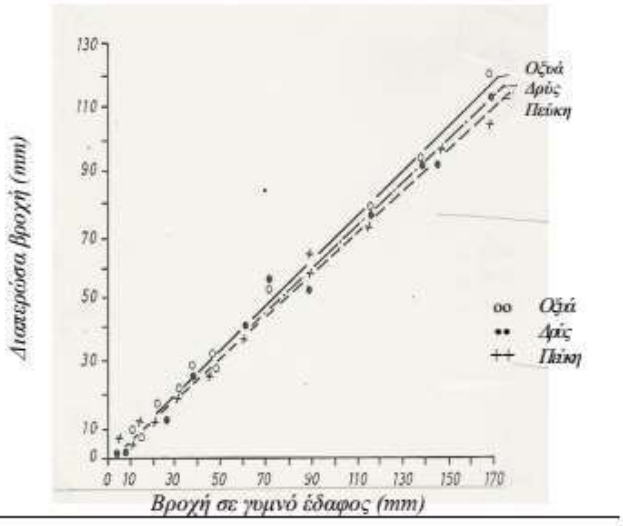
Πίνακας 13: Εξατμισιδιαπνοή και υδατοσυγκράτηση σε διάφορα είδη και περιοχές της Ρωσίας (Molchanov, 1960). (Η εξάτμιση είναι μόνο η επιφανειακή περιλαμβανομένης της εξάτμισης της υποβλάστησης και του εδάφους).

Ετήσιο ύψος βροχής (mm)	Απώλειες ύδατος (mm)	Ηλικία συστάδας σε έτη									
		20	40	60	80	100	120	140	160	220	M.O %
Πεύκη 550	Διαπνοή	236	250	200	185	170	158	146	125		
	εξάτμιση*	48	67	87	100	100	100	103	105		
	Υδατοσυγκράτηση	127	150	140	135	120	105	100	97		
	Υδ/ση (% βροχής)	**23,1%**	**27,3**	**25,5**	**24,5**	**21,8**	**19,1**	**18,2**	**17,6**		**22,1**
	Σύνολο	**411**	**467**	**427**	**420**	**390**	**363**	**349**	**327**		
	(απώλειες ως % βροχής)	**74,7**	**84,9**	**77,6**	**76,4**	**70,9**	**66,0**	**63,5**	**59,5**		**71,7**
Δρυς 523	Διαπνοή	310	324	352	323	289	263	255	252	254	
	εξάτμιση*	65	78	84	90	94	98	104	104	100	
	Υδατοσυγκράτηση	**49**	**63**	**64**	**60**	**58**	**58**	**60**	**60**	**64**	
	Υδ/ση (% βροχής)	**9,4**	**12,0**	**12,2**	**11,5**	**11,1**	**11,1**	**11,5**	**11,5**	**12,2**	**11,4**
	Σύνολο	**424**	**483**	**500**	**473**	**451**	**419**	**419**	**416**	**418**	
	(απώλειες ως % βροχής)	**81,1**	**92,4**	**95,6**	**90,4**	**86,2**	**80,1**	**80,1**	**79,5**	**79,9**	**85,0**
Ερυθρελάτη 581	Διαπνοή	203	291	300	278	219	193	188	188		
	εξάτμιση*	60	55	55	60	58	75	80	83		
	Υδατοσυγκράτηση	158	175	185	160	170	160	144	128		
	Υδ/ση (% βροχής)	**27,2**	**30,1**	**31,8**	**27,5**	**29,3**	**27,5**	**24,8**	**22,0**		**27,5**
	Σύνολο	**421**	**521**	**540**	**518**	**457**	**428**	**412**	**399**		
	(απώλειες ως % βροχής)	**72,5**	**89,7**	**92,9**	**89,2**	**78,7**	**73,7**	**70,9**	**68,7**		**79,5**
Πεύκη 375	Διαπνοή	155	166	158							
	εξάτμιση*	66	70	79							
	Υδατοσυγκράτηση	21	20	19							
	Υδ/ση (% βροχής)	**5,6**	**5,3**	**5,1**							**5,3**
	Σύνολο	**224**	**256**	**256**							
	(απώλειες ως % βροχής)	59,7	68,3	68,3							**65,4**

Ο Horton (1919) και ο Cepel (1967) δίνουν τιμές υδατοσυγκράτησης γιαuser διάφορα δασοπονικά είδη στα Σχήματα 11, 12. Οι Rowe, Storey και Hamilton (1951)* επιβεβαιώνουν την παραπάνω τάση σε πειράματα που έγιναν σε συστάδα Δρυός στην Καλλιφόρνια των ΗΠΑ, τα αποτελέσματα των οποίων παρέχει ο Πίνακας 14. Ο Delfs (1967), σε πειράματα που διεξήχθηκαν στο Harz της Γερμανίας σε 30ετή συστάδα Ερευθρελάτης, έδωσε γραφικά τις σχέσεις της Υδατοσυγκράτησης (L_p), της Κορμαπορροής (L_r), και της διαπερώσας βροχής (H_p) (Σχήμα 13).



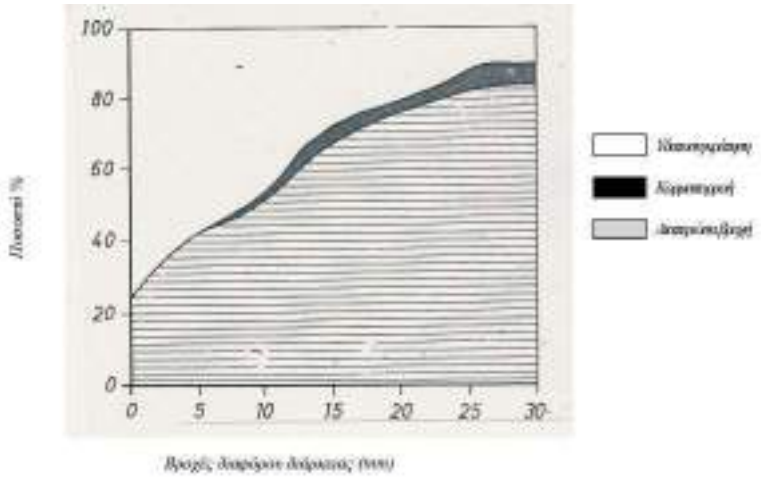
Σχ. 11: Υδατοσυγκράτηση διαφόρων δασοπονικών ειδών συναρτήσει του ύψους βροχής στις ΗΠΑ (Horton 1919)



Σχ. 12: Σχέση ύψους βροχής σε γυμνό έδαφος και διαπερώσας βροχής σε συστάδα Οξυάς, Δρυός και Πεύκης στην Τουρκία (Cepel 1967)

Πίνακας 14: Ύψος βροχής σε γυμνό έδαφος, διαπερώσα βροχή και υδατοσυγκράτηση σε συστάδα Δρυός στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (Rowe, Storey, Hamilton, 1951)*

Βαθμίδα Βροχής	Αριθμός βροχών	Ύψος Βροχής	Διαπερώσα βροχή		Υδατοσυγκράτηση	
(ίντσες)	N	(ίντσες)	ίντσες	%	ίντσες	%
0,10 ÷ 0,25	10	1,70	0,79	46	0,85	50
0,25 ÷ 0,50	6	2,33	1,47	63	0,72	31
0,50 ÷ 1,00	14	10,28	3,69	75	1,83	18
1,00 ÷ 2,00	10	13,26	10,76	81	1,53	12
2,00 ÷ 6,00	5	16,05	13,09	82	1,62	10
6,00 ÷12,00	5	39,63	33,23	84	2,71	7
Σύνολο	50	83,25	67,03	81	9,26	11



Σχήμα. 13: Σχηματική παράσταση τη ποσοστιαίας (%) κατανομής της υδατοσυγκράτησης, της κορμαπορροής και της διαπερώσας βροχής σε συνάρτηση με το ύψος βροχής σε 30ετή συστάδα Ερυθρελάτης στο Harz της Γερμανίας (Delfs, 1967).

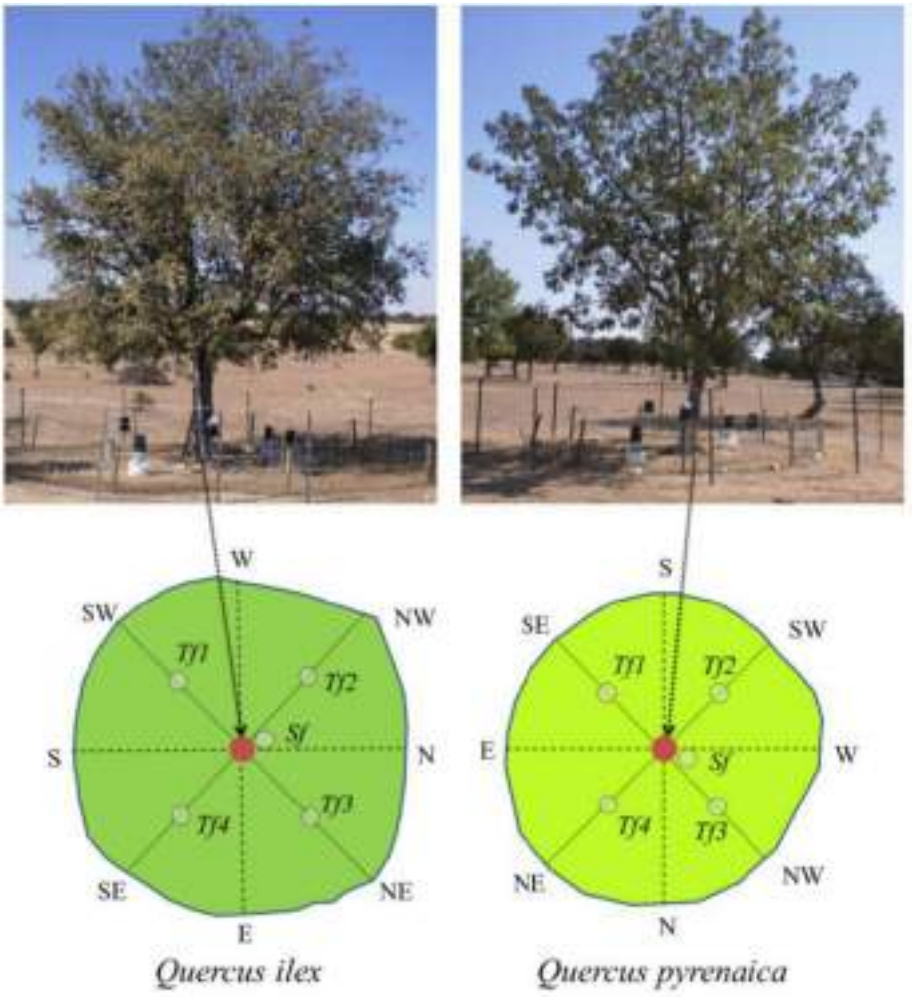
Σε Μεσογειακή σαβάννα με δασοκάλυψη δρυός (Quercus Ilex) στο 39%, που κυριαρχούν λίγες και μεγάλες βροχοπτώσεις, οι David et al (2006) βρήκαν τιμές υδατοσυγκράτησης στο 22% της βροχόπτωσης που φθάνει στην κομοστέγη. Οι αντίστοιχες τιμές υδατοσυγκράτησης ανά μονάδα συνολικής εδαφικής επιφάνειας, έπεσαν στο 8% της βροχόπτωσης και αντιπροσωπεύουν το 28% της εξατμισιδιαπνοής των δέντρων. **Οι ερευνητές αυτοί αναφέρουν ότι η υδατοσυγκράτηση σε μεγάλης διάρκειας επεισόδια βροχής εξαρτάται κυρίως από το ρυθμό εξάτμισης κατά τη διάρκεια του χρόνου κορεσμού της κόμης. Απεναντίας, σε μικρής διάρκειας επεισόδια, η υδατοσυγκράτηση καθορίζεται από την υδατοχωρητικότητα της κόμης. Βρήκαν επίσης ότι στα 2 έτη της έρευνάς τους, η υδατοσυγκράτηση ήταν το 28% της συνολικής εξατμισοδιαπνοής που θεωρείται ως το άθροισμα των απωλειών υδατοσυγκράτησης και διαπνοής.**

Οι Silva & Rodríguez (2001) σε δάση πεύκης και δρυός στο Μεξικό και ετήσια κατακρημνίσματα 974 mm, εκτίμησαν την απώλεια υδατοσυγκράτησης κομοστέγης στο 19,2% για τα πεύκα, στο 13,6% για τη δρύ και στο 23% για μικρές συστάδες.

Οι Hassan et. al., (2017), μέτρησαν υδατοσυγκράτηση σε δύο είδη δρυός, Quercus ilex και Quercus pyrenaica και πολύ μικρή εδαφοκάλυψη (7%), για δύο διαδοχικά έτη. Στην **Quercus ilex**, το 1ο έτος που ήταν ξηρό με ετήσιο ύψος βροχής 335mm, μετρήθηκε υδατοσυγκράτηση 51% και 16% αντίστοιχα για τα 2 είδη, ενώ για διπλάσιο ετήσιο ύψος βροχής 672mm του 2ου έτους οι τιμές της υδατοσυγκράτησης μειώθηκαν στο 46% και 10% αντίστοιχα. Για μικρά ύψη βροχής <5 mm βρήκαν μεγάλες τιμές υδατοσυγκράτησης (66% της βροχόπτωσης P). Για ύψη 5–35 mm η υδατοσυγκράτηση βρέθηκε ίση με το 46% της βροχής, ενώ για ύψη μεγαλύτερα των >35 mm, η υδατοσυγκράτηση βρέθηκε ίση με 32%. Η συνολική διετής υδατοσυγκράτηση βρέθηκε ίση με 47,4% της βροχής (50,7% το 1ο ξηρό έτος και 45,7% το

2ο μέτρια υγρό έτος. Οι τιμές αυτές της αριάς αφορούσαν πυκνότητα 13 ατόμων/Ha και 7% κάλυψη κόμης. Οι Calabuig κ.α. (1978)*, κατέγραψαν υδατοσυγκράτηση ύψους 37% της βροχής σε αριά στην Ισπανία, οι Pereira et al. (2009a), βρήκαν ποσοστό 30% στην Πορτογαλία με μέση ετήσια βροχόπτωση 665 mm αλλά μόλις 21% κάλυψη κόμης και πυκνότητα δέντρων μόλις 35–45 άτομα στο εκτάριο. Οι Mateos και Schnabel (2001)*, βρήκαν στην Ισπανία το ίδιο ποσοστό (30%) σε μόλις 15 άτομα/ha και 8% εδαφοκάλυψη.

Οι Hassan et. al., (2017), για τη δρύ των Πυρηναίων (**Q.pyrenaica**) που είναι φυλλοβόλο είδος, την περίοδο με φύλλα, οι αντίστοιχες τιμές υδατοσυγκράτησης βρέθηκαν σχετικά χαμηλότερες συγκριτικά με εκείνες της Αριάς, για τις ίδιες ως άνω βαθμίδες βροχής, 33%, 22% και 20% αντίστοιχα. Οι μέσες ετήσιες τιμές βρέθηκαν 11,8% της βροχής (15.8% τον 1^{ο} ξηρό χρόνο και 9,8% το δεύτερο υγρότερο). Σύμφωνα με άλλους ερευνητές που αναφέρουν οι συγκεκριμένοι συγγραφείς, σε ίδιο ή παρόμοιο φυλλοβόλο είδος οι τιμές υδατοσυγκράτησης κυμαίνονται από **9% την περίοδο χωρίς φύλλα**, **έως 23% τη θερινή περίοδο**.



Εικόνα 11. Μέτρηση υδατοσυγκράτησης στην Ισπανία (Hassan et al. 2017)

Οι Fischer κ.α. (2023), ερεύνησαν την εξάτμιση της υδατοσυγκράτησης με πολυετείς μετρήσεις σε συστάδα ερυθρελάτης και βρήκαν ότι για μέση ετήσια βροχόπτωση 936 ± 173 mm, τα 376 ± 56 mm (40,17%) εξατμίζονται λόγω υδατοσυγκράτησης. Βέβαια, η πλειονότης των επεισοδίων βροχής (81%) ήταν μικρά (<5mm). Η υδατοσυγκράτηση του δασικού τάπητα είναι δύσκολο να μετρηθεί όπως έδειξαν οι Gerrits κ.α. (2010), που ανέπτυξαν μιά ειδική συσκευή μέτρησης, παρόμοια με λυσσίμετρο για αυτόν ακριβώς το σκοπό. **Συμπέραναν ότι η υδατοσυγκράτηση και άρα η εξάτμιση του δασικού τάπητα λαμβάνει χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και αποτελεί το 22% της διαπερώσας βροχής, επομένως δεν πρέπει να αγνοείται από τα μοντέλα**. Οι Exler & Moore (2022), βρήκαν για τη σημύδα, υδατοσυγκράτηση 15% της βροχόπτωση και μέση τιμή διαπερώσας βροχής μεταξύ 75% (χωρίς φύλλα) και 83% (με φύλλα). Σε 3 συστάδες πεύκης διαφορετικής ηλικίας και πυκνότητας, η υδατοσυγκράτηση βρέθηκε ίσι με 13, 15 και 9% της βροχής. Η κορμοαπορροή μετρήθηκε ίση με 0,4-3% της βροχής και βρέθηκε ότι μικρότερα δέντρα έχουν μεγαλύτερη τιμή. Στον Πίνακα 15 αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες τιμές υδατοσυγκράτησης σε Μεσογειακές χώρες και το Ιράν. Οι Silva Cantú & González-Rodríguez, (2001), για μέσα ετήσια κατακρημνίσματα ύψους 639mm και αθροιστικά ύψους 974mm, εκτίμησαν την υδατοσυγκράτηση πεύκων σε 19,2% και δρυών σε 13,6%. Το ενδιαφέρον είναι πως δίνουν τιμές 23% για μικτό δάσος πεύκης και δρυός στο οποίο η διαπερώσα βροχή μετρήθηκε να έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων (στατιστικά σημαντική διαφορά) συγκριτικά με εκείνη των αμιγών συστάδων. Αυτό είναι ένας ακόμα από τους πολλούς λόγους της υπεροχής των μικτών συστάδων που υπενθυμίζει πως η βιοποικιλότητα προάγει τη σταθερότητα και το αντίστροφο.

Πίνακας 15: Μετρήσεις υδατοσυγκράτησης σε διάφορες χώρες της Μεσογείου & το Ιράν.

Ερευνητική Πηγή	Δασοπονικό είδος	Κατακρημνίσματα mm	Κορμοαπορροή Sf (%)	Υδατοσυγκράτηση I (%)	Πυκνότητα δέντρων ha-1	Κυκλική επιφάνεια m^2ha-1	Ηλικία	Στηθιαία Διάμετρος
ΙΤΑΛΙΑ Mosselo et al 2002	Q. cerris	748	3.1	7,5	2131	25,9	45	12,5
ΙΤΑΛΙΑ Mosselo et al 2002	Q. cerris	991,5	10.4	2,2	1623	25.3	35	14,1
ΙΤΑΛΙΑ Mosselo et al 2002	Q. ilex	861,5	3.4	18,8	2366	30.2	50	12,7
ΠΟΡΤΟΓΑΛΙΑ David et al (2006)	Q. ilex	1736,4		21,7	Εδαφοκάλυψη 20%			59
ΙΣΠΑΝΙΑ Moreno (1994) Moreno et al (2001)	Q. pyrenaica	1056,7	0,9	14,3	820	16	-	15,2
ΙΣΠΑΝΙΑ Moreno (1994) Moreno et al (2001)	Q. pyrenaica	624,7	0,8	15,8	740	21	-	16,5
ΙΤΑΛΙΑ Mosselo et al 2002	Q. petraea	748	4,7	7.2	2131	25,9	45	12,5
IPAN Fathizadeh et al 2018	*Quercus brantii*	822		10,3 (14,9/ 5,7)		11,9		52,1
ΙΣΠΑΝΙΑ Mużyło et al., 2012	*Quercus pubescens*	957	2,6	14,8	828			21,3
ΕΛΛΑΔΑ Papoulias, Nikolaidis	Q. Conferta	781,6	3,4	7,8	5960	9,9	27	4,6
ΕΛΛΑΔΑ Ganatsios (2004)	Q. Conferta-Μάρτυρας 3rd method	983,2	3,6	9,0 (13,5/ 4,6)	1825	16,6	53	14,5
,,	Αποψίλωση 3η Μέθοδος	983,2	0	1,8	1503	15,8	53	13,5
,,	Αραίωση 50% 3η Μέθοδος	983,2	3,6	6,7	1247	20,7	53	16,2
,,	Μάρτυρας 2η Μέθοδος	983,2	4,2	8,1		,,	,,	,,
,,	Αποψίλωση 2η Μέθοδος	983,2	0	1,5		,,	,,	,,
,,	Αραίωση 50% 2η Μέθοδος	983,2	4,2	6,0		,,	,,	,,

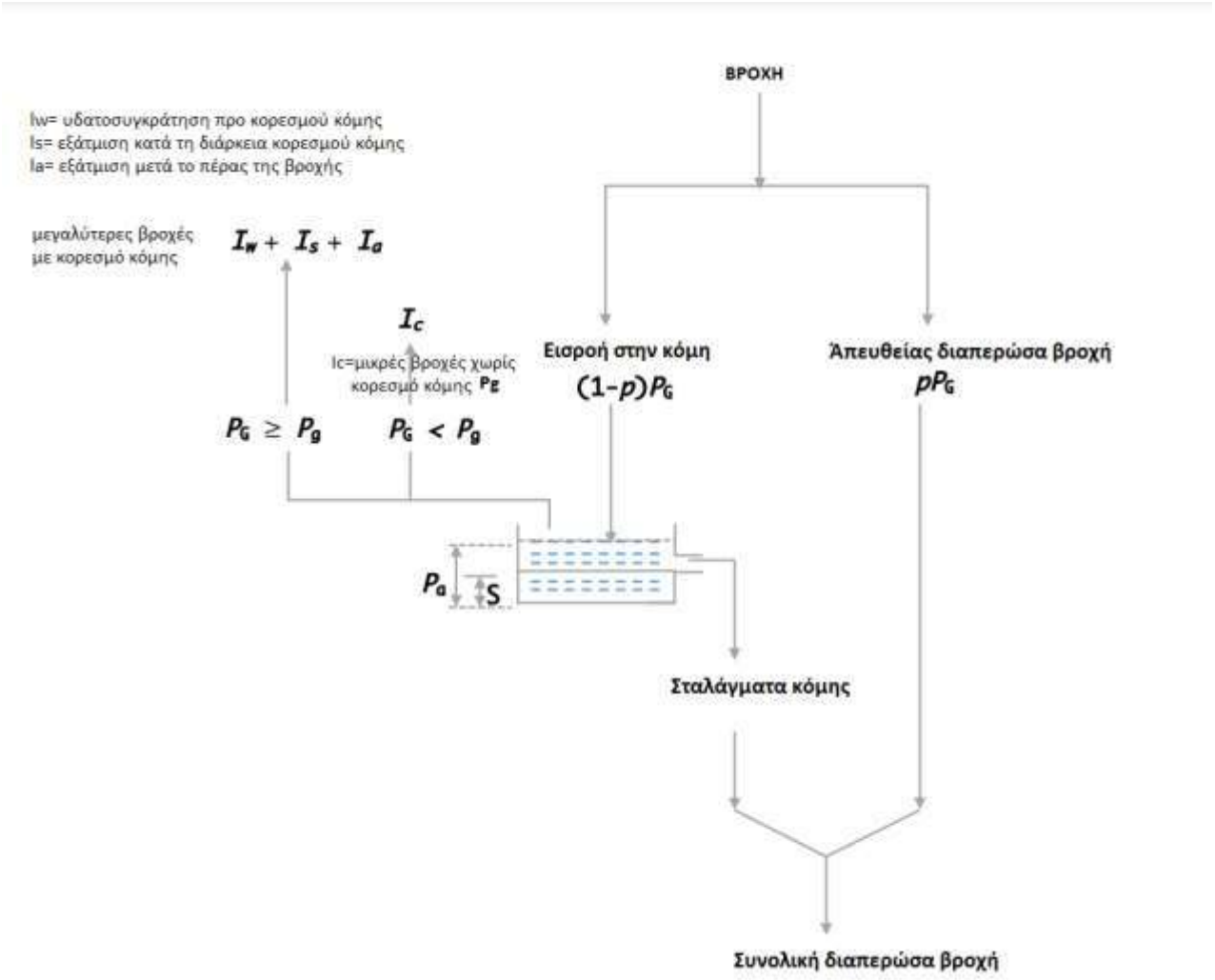
6.6 Εκτίμηση της υδατοσυγκράτησης με τη χρήση μοντέλων-Το μοντέλο Rutter & Gash

Ο Gash, βελτιώνει το μοντέλο των Rutter et al., (1975). Το μοντέλο χρησιμοποιεί ωριαία δεδομένα βροχόπτωσης από μετεωρολογικούς σταθμούς καθώς και μεταβλητές όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία που ελέγχουν την εξάτμιση. Έτσι υπολογίζει το τρεχούμενο υδατικό ισοζύγιο κομοστέγης γνωστής δομής, παράγοντας εκτιμήσεις υδατοσυγκράτησης. Σύμφωνα με τους Rutter et al., (1971), η υδατοσυγκράτηση στα δάση είναι σημαντικού μεγέθους λόγω της υψηλής τους αεροδυναμικής αγωγιμότητας που έχει ως αποτέλεσμα υψηλούς ρυθμούς εξάτμισης. Κυμαίνεται από **10-50% της βροχόπτωσης** αυξάνοντας έτσι το ποσοστό υγρασίας που χρησιμοποιεί το δάσος. Στα επεισόδια μικρότερης βαθμίδας βροχής η υδατοσυγκράτηση είναι μεγαλύτερη. Για όσο διάστημα η κόμη είναι ακόρεστη σε υγρασία, υδατοσυγκρατείται ένα υψηλό ποσοστό της βροχής. Όταν η κόμη κορεστεί, η βροχή που πέφτει στην κόμη αποστραγγίζεται στο έδαφος και η υδατοσυγκράτηση αυξάνει μόνο με την εξάτμιση που συντελείται κατά τη διάρκεια της βροχής. Το αποθηκευμένο νερό εξατμίζεται όταν η βροχή σταματήσει λόγω της αυξημένης διαθέσιμης ενέργειας του υγρασιακού ελλείμματος (Rutter et al., 1971). Για παράδειγμα, στις παρυφές του δάσους που είναι εκτεθειμένες στους ανέμους, η μεγαλύτερη εξάτμιση οφείλεται στη συντομότερη επιστροφή των υδρατμών στην ατμόσφαιρα και τη μεγαλύτερη διαθέσιμή διάρκεια διαπνοής.

Έτσι, η αποθήκευση του νερού εμπεριέχει διαχωρισμό της υδατοσυγκράτησης σε: 1. Εξάτμιση κατά τη διάρκειά της βροχής και 2. Εξάτμιση μετά το πέρας της. **Η υδατοσυγκράτηση λοιπόν**, ισούται με τη βροχόπτωση μείον τη διαπερώσα βροχή, ή αλλιώς**, ισουται με την εξάτμιση κατά τη διάρκεια της βροχής συν την αποθηκευμένη ποσότητα υγρασίας μετά το πέρας της βροχόπτωσης**. Η διάκριση μεταξύ αποθηκευμένης υγρασίας και εξάτμισης κατά τη διάρκεια της βροχής, είναι σημαντική για τη ρεαλιστική περιγραφή της υδατοσυγκράτησης. Επιπλέον, η εξάτμιση του αποθηκευμένου νερού μετά τη βροχή εμποδίζει τη διαπνοή. Επίσης, η εξάτμιση κατά τη διάρκεια της βροχής αποτελεί μια θετική ανάδραση για την ίδια τη βροχόπτωση. Το σύμβολο P ορίζεται ως 'αρχική βροχόπτωση' και T ως διαπερώσα βροχή μαζί με την κορμοαπορροή, ή 'καθαρή βροχή'.

Η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στην κόμη, αυξάνει με τη βροχόπτωση έως το σημείο κορεσμού της. Κατά τη διάρκεια του κορεσμού, η αποθηκευμένη ποσότητα του νερού συνεχίζει να αυξάνεται ελαφρώς και μειώνεται επίσης ελαφρά κατά το πέρας του επεισοδίου όπου η απώλειες εξάτμισης μεγαλώνουν. Η έρευνα των Rutter et al., έγινε σε συστάδα ψευδοτσούγκας 27 ετών, ύψους 18m και LAI 9~13. Η αποθήκευση νερού στην κόμη για επεισόδια βροχής P>4mm βρέθηκε ίση με = 2,4± 0,2 mm. Η μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα που δίνει το μοντέλο εκτιμήθηκε στα 4,6mm. 14 επεισόδια βροχής καταγράφηκαν λεπτομερώς όπου αθροιστικά, αποθηκεύτηκαν 28mm νερού στην κόμη και 8mm εξατμίστηκαν κατά τη διάρκεια της βροχής. Βρέθηκε λοιπόν ότι η αποθήκευση νερού είναι η κυρίαρχη

λειτουργία της υδατοσυγκράτησης σε πυκνό δάσος και η εξάτμιση κατά τη διάρκεια συνεχούς βροχόπτωσης είναι ελάσσονος σημασίας (κατά μέσο όρο 4,6% της βροχής). Η εξάτμιση αποκτά μεγαλύτερες τιμές μετά το πέρας της βροχής.



Σχήμα 14. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου Gash

Ο Gash (1979) υπολογίζει **α.** την υδατοσυγκράτη πριν τον κορεσμό της κόμης, **β.** τη βροχή που απαιτείται για τον κορεσμό της κόμης, **γ.** την εξάτμιση της κορεσμένης κόμης και **δ.** την εξάτμιση από τους κορμούς. **Ο Gash αναφέρει ότι η συνολική τοπική εξατμισιδιαπνοή είναι το άθροισμα της υδατοσυγκράτησης και της διαπνοής, ταυτίζοντας έτσι την εξάτμιση με την υδατοσυγκράτηση**. Ταυτοποιεί τους 2 κύριους παράγοντες που ελέγχουν την εξατμιση της βροχής που υδατοσυγκρατείται:

1. Ο **χρόνος που παραμένει κορεσμένη σε νερό η κόμη** των δέντρων κατά τη διάρκεια της βροχής και ο ρυθμός εξάτμισης υπό αυτές τις συνθήκες

2. Η **μέγιστη χωρητικότητα** (κορεσμός της κόμης σε υγρασία) υδατοσυγκράτησης και οι φορές που αδειάζει αυτή η αποθήκη από την εξάτμιση, μετά το πέρας της βροχής.

Το μοντέλο Gash χρησιμοποιεί **ανάλυση γεγονότων βροχής** και συγκεκριμένα, στηρίζεται στην ανάλυση διακριτών επεισοδίων βροχής και θεωρεί ότι η βροχόπτωση είναι μια διαδοχή επεισοδίων, χωρισμένων από αρκετά μεγάλες περιόδους παύσης που επιτρέπουν την κόμη να στεγνώσει τελείως. Έτσι λοιπόν, ο υπολογισμός των χρονικών φάσεων της υδατοσυγκράτησης διαχωρίζεται με κριτήριο το μέγεθος των επεισοδίων βροχής, τη μέση ποσότητα βροχής που απαιτείται για τον κορεσμό της κόμης (P_g)

Κάθε ένα από τα **επεισόδια βροχής αποτελείται από τρεις διακριτές φάσεις**:

1. Τη διαβροχή της κόμης με αφετηρία την έναρξη της βροχής έως τον πλήρη κορεσμό της.
2. Την περίοδο που η κόμη παραμένει πλήρως κορεσμένη.
3. Τη φάση που αρχίζει με το πέρας της βροχόπτωσης και διαρκεί έως ότου οι κορμοί και η κόμη στεγνώνουν τελείως.

Το μοντέλο Gash υπολογίζει χωριστά την εξάτμιση της κόμης που λαμβάνει χώρα πριν και μετά το πέρας της βροχής καθώς και την εξάτμιση των κορμών. Αναλυτικότερα:

- Για μεγαλύτερα ύψη βροχής που αρκούν να κορέσουν την κόμη $P_G >= P_g$, υπάρχουν **τρία στάδια υδατοσυγκράτησης:**

1. Εκτιμάται η υδατοσυγκράτηση κατά τη διάρκεια διαβροχής της κόμης πριν τον κορεσμό ($\mathbf{I_w}$)
2. Εκτιμάται η εξάτμιση ενώ η κόμη είναι ήδη κορεσμένη ($\mathbf{I_s}$)
3. Εκτιμάται η εξάτμιση μετά το πέρας της βροχής ($\mathbf{I_a}$) με την υπόθεση ότι δεν πέφτει νερό από την κόμη στο έδαφος (σταλάγματα).

Έτσι, η συνολική υδατοσυγκράτηση είναι

$$\mathbf{I_{net} = I_c + I_w + I_s + I_a}$$

- Για μικρότερα επεισοδία βροχής που όμως είναι ανεπαρκή να κορέσουν την κόμη, ($P_G < P_g$), η υδατοσυγκράτηση είναι (**Ic**).
- Εκτιμάται η διαβροχή και η εξάτμιση των κορμών. Η κορμοσυγκράτηση που εξατμίζεται είναι 1-5% της αντίστοιχης κομοσυγκράτησης και συνήθως αγνοείται. Οι απώλειες υδατοσυγκράτησης με τη μορφή εξάτμισης από τους κορμούς είναι μόνο η ποσότητα του νερού μετά το πέρας της κορμοαπορροής (που καταλήγει στο έδαφος).

Δεδομένου ότι η υδατοσυγκράτηση είναι η ποσότητα της βροχής που πέφτει στη βλάστηση και εξατμίζεται χωρίς να φτάσει ποτέ στο έδαφος (περιλαμβάνει και την υδατοσυγκράτηση του δασικού τάπητα –που καλύπτει το έδαφος, καθώς και της παρεδαφιαίας βλάστησης), παρέχεται από τη σχέση:

$$I = P_G - T$$

I= υδατοσυγκράτηση

P_G=κατακρημνίσματα

T= διαπερώσα βροχή και κορμοαπορροή

Όταν αρχίζει η βροχόπτωση, διαπερώσα βροχή είναι το ποσοστό της που άμεσα φθάνει στο έδαφος χωρίς να ακουμπά στα φύλλα ή τα κλαδιά. Η ποσότητα αυτή αντιπροσωπεύεται από ένα δείκτη ελεύθερης διαπερώσας βροχής (p). Η διαπερώσα βροχή αυξάνεται γραμμικά με τα κατακρημνίσματα P_G *(mm) με ένα συνεχή ρυθμό <1, μέχρι τον κορεσμό της κόμης*. Το υπόλοιπο μέρος της διαπερώσας βροχής (c=1- *p*) είναι το μέτρο του ποσοστού εδαφοκάλυψης από τη βλάστηση και αποθηκεύεται προσωρινά στην κόμη, εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα (E, mm/h) ή αποστραγγίζεται από το δασικό τάπητα (D, mm/h). Για ένα επεισόδιο βροχής, η διαπερώσα βροχή πριν τον κορεσμό δίνεται από τη σχέση

$$T=p\,P_G \text{ , } P_G < P_g$$

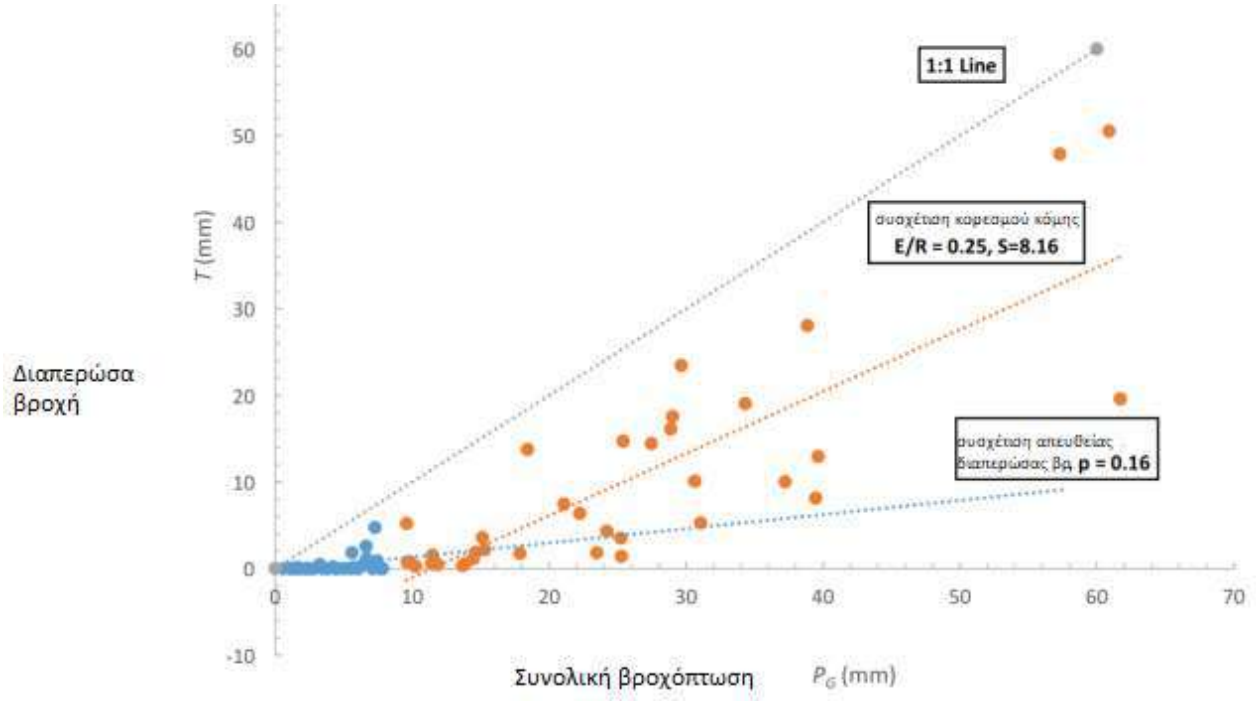
Μόλις η αθροιζόμενη βροχή κορέσει την κόμη $P_G >= P_g$, η διαπερώσα βροχή δίνεται από τη σχέση:

$$T = pP_g + (1 - \bar{R}/\bar{E})(P_G + - P_g)$$

Εξετάζοντας τη σχέση μεταξύ διαπερώσας βροχής και συνολικής βροχόπτωσης, εισάγονται κύριες παράμετροι του μοντέλου όπως:

- ο λόγος (ρυθμός) E/R, (παρέχεται από την κλίση της γραμμής παλινδρόμησης κορεσμού του Σχ. 15),
- ο συντελεστής απευθείας διαπερώσας βροχής (*p*) και c, (δίνεται από την κλίση της γραμμής παλινδρόμησης διαπερώσας βροχής του Σχ. 15),
- και η αποθηκευτική χωρητικότητα της κόμης (S), (παρέχεται από την κλίση της γραμμής παλινδρόμησης κορεσμού του Σχ. 15)

Μόλις η συγκεντρωμένη ποσότητα κατακρημνισμάτων φτάσει στο σημείο κορεσμού της κόμης (P_G), η κλίση της γραμμής συσχέτισης (Σχ. 15) είναι μεγαλύτερη πριν τον κορεσμό αλλά <1, διότι η εξάτμιση συνεχίζεται και κατά τη διάρκεια της βροχής.



Σχήμα 15. Συσχέτιση ποσοστού απευθείας διαπερώσας βροχής και χωρητικότητας κορεσμού κόμης, ρυθμού εξάτμισης προς βροχόπτωση (https://mlws.landfood.ubc.ca/all-projects/huang-2016-an-analytical-model-of-rainfall-interception-by-urban-trees/)

Ο μέσος ρυθμός εξάτμισης $\bar{E}$ υπολογίζεται από την εξίσωση **Penman-Monteith** (αναλύεται στο κεφάλαιο της εξάτμισης) αρκεί να υπάρχουν επαρκή μετεωρολογικά στοιχεία. Συγκεκριμένα χρειάζονται:

- Καθημερινή θερμοκρασία αέρα, ($T,^{\circ}C$)
- Σχετική υγρασία αέρα, (*RH, %)*
- Ταχύτητα ανέμου, *(μ,* m/s)
- Καθημερινή ηλιακή ακτινοβολία (*Q,* mm/h) (https://power.larc.nasa.gov/)
- Βροχοπτώσεις (συνολικό ύψος R και διάρκεια επεισοδίων h) Ο μέσος ρυθμός βροχόπτωσης $\bar{R}$ (mm/h) = *R/h* είναι η βροχόπτωση προς τη διάρκειά της.
- Οι δύο παράμετροι της μορφής κόμης *p, S* εκτιμώνται χρησιμοποιώντας το δείκτη φυλλικής επιφάνειας LAI ανάλογα το δασοπονικό είδος. Ο δείκτης LAI παίρνει για τα φυλλοβόλα της μέγιστη τιμή του το καλοκαίρι και την ελάχιστη το χειμώνα που μένει μόνο ο κορμός και τα κλαδιά. Οι μεταβατικές εποχές Άνοιξη-Φθινόπωρο δηλώνουν αντίστοιχα την έκπτυξη και πτώση των φύλλων. Το χειμώνα κυριαρχεί ο δείκτης BAI, ο δείκτης υφής του κορμού.

$$c = 1 - \exp(-k*LAI)$$

$$S = S_L*LAI + S_b*BAI$$

- Το p=1-c (Gash 1995), και ορίζεται από τη σχέση του με το LAI.
- *k* είναι συντελεστής που κυμαίνεται από 0.6 and 0.8 για τα δάση.

- Για την υδατοχωρητικότητα της κόμης (*S*), γίνεται υπόθεση ότι σχετίζεται γραμμικά με το LAI. Η σχεση μεταξύ S & LAI περιέχει και το S_L (m) που δείχνει την αποθηκευτική ικανότητα των εκάστοτε φύλλων, δηλαδή το μέγιστο νερό που συγκρατείται από τα φύλλα ενός δασοπονικού είδους ανά φυλλική επιφάνεια. Παρόμοια, S_b (m) δείχνει την αποθηκευτική ικανότητα του κορμού (BAI), τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να αποθηκευτεί στον κορμό και τα κλαδιά ενός δασοπονικού είδους ανά μονάδα επιφάνειας. Η εποχική διακύμανση του LAI αλλάζει τα c και S.

<u>Γλωσσάρι κατανόησης του μοντέλου Gash</u>

BAI = Bark Area Index, δείκτης επιφάνειας φλοιού.

c= Canopy Cover, κάλυψη κομοστέγης

$\bar{R}$ /$\bar{E}$ = αναλογία ρυθμού εξάτμισης προς ρυθμό βροχόπτωσης σε συνθήκες υδατοκορεσμού κόμης

I_a= Απώλειες υδατοσυγκράτησης κατά το διάστημα αφύγρανσης της κόμης (mm)

I_c = Απώλειες υδατοσυγκράτησης κατά το διάστημα διαβροχής της κόμης για μικρές βροχοπτώσεις που δεν αρκούν για τον κορεσμό της κόμης PG <Pg (mm)

I_{net}= Καθαρές απώλειες υδατοσυγκράτησης (mm)

I_s= Απώλειες υδατοσυγκράτησης κατά το διάστημα κορεσμού της κόμης (mm)

I_w = Απώλειες υδατοσυγκράτησης κατά το διάστημα διαβροχής της κόμης για βροχοπτώσεις που αρκούν να κορέσουν την κόμη PG ≥ Pg (mm)

LAI = Leaf Area Index, δείκτης φυλλικής επιφάνειας (αφορά μόνο την επάνω επιφάνεια των φύλλων)

K = συντελεστής εξαφάνισης, δείκτης βαθμού απορρόφησης του φωτός

P = αναλογία απευθείας διαπερώσας βροχής

P_G= Βροχόπτωση (mm)

*P*g = Βροχόπτωση που απαιτείται για τον κορεσμό της κόμης (mm)

Q = Ηλιακή ακτινοβολία (J/m2 /s)

S = Υδατοχωρητικότητα κορεσμού της κόμης (mm), η μέγιστη υδατοσυγκρατητική ικανότητα όταν σταματά η βροχή και η κόμη είναι κορεσμένη. Με άλλα λόγια, είναι το ελάχιστο αναγκαίο νερό για τον κορεσμό της κόμης (κομοϋδατοχωρητικότητα)

SL = Ειδική αποθηκευτική χωρητικότητα Φύλλων

S_b=Ειδική αποθηκευτική χωρητικότητα Φλοιού

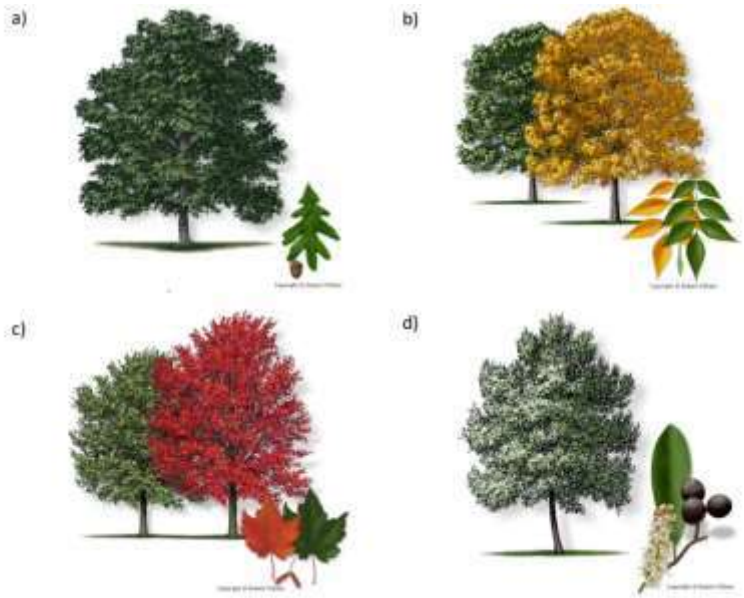
T = Ελεύθερη διαπερώσα βροχή (mm)

T_a= Θερμοκρασία αέρα (◦C)

μ= Ταχύτητα ανέμου (m s -1)

6.7.Έρευνες που στηρίζονται στο μοντέλο Gash

Σε έρευνα του Πανεπιστημίου της Βρετανικής Κολομβίας του Καναδά (Huang 2016) με 4 είδη, Λευκή δρύ (Quercus alba), Σφενδάμι (Acer platanoides), Φράξο (Fraxinus pennsylvanica Marsh.), και Προύνο (Prunus spp), η Δρύς έδειξε τη μεγαλύτερη υδατοσυγκράτηση καθόλη τη διάκρεια της έρευνας. Η μέση απώλεια υδατοσυγκράτησης για κάθε ανοιξιάτικη βροχή άρχισε από 1.42 mm και 1.14 mm για τη δρυ και το σφενδάμι αντίστοιχα και σταδιακά αυξήθηκε με το χρόνο. Τον Ιούνιο παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη τιμή της σε όλα τα είδη. **Οι υψηλότερες τιμές υδατοσυγκράτησης το θέρος εξηγούνται από τον υψηλότερο ρυθμό εξάτμισης που ελέγχεται από τη θερμοκρασία αέρα**.



Εικόνα 12: Κόμη και μορφολογία φύλλου α) δρυός, β) φράξου, γ) σφένδαμου, δ) προύνου (Texas A & M Forest Service)

Εμφανώς οι ετήσιες καμπύλες θερμοκρασίας αέρα και υδατοσυγκράτησης είναι παρόμοιες την άνοιξη και νωρίς το καλοκαίρι, ενώ παρατηρούνται αποκλίσεις αργά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Παρότι ο ρυθμός εξάμτισης είναι καθοριστικής επίδρασης στην υδατοσυγκράτηση, ο ρυθμός βροχόπτωσης μπορεί να αλλάξει την πορεία υδατοσυγκράτησης όταν εμφανιστούν μεγάλες διακυμάνσεις. Στον Καναδά και ειδικότερα στο Βανκούβερ, η διαχείριση του νερού των καταιγίδων είναι προτεραιότητα, ειδικά την υγρή χειμερινή περίοδο. Οι Καναδοί εξετάζουν τις ευεργετικές επιπτώσεις της υδατοσυγκράτησης των δέντρων της πόλης στη μείωση των πλημμυρικών επιπτώσεων. Η μείωση και η καθυστέρηση της απορροής μέσω του σχεδιασμού φύτευσης περισσότερων δέντρων είναι δεδομένη και χρησιμοποιείται (Huang 2016), (Κεφ. Υδάτινοι Πόροι).

Οι Fathizadeh et. al., 2018, αξιολόγησαν το μοντέλο Gash εποχιακά σε ξηρανθεκτικές συστάδες δρυός *Quercus brantii* στα όρη Ζάγρος της Περσίας με μέση ετήσια βροχόπτωση 652,6mm και μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα 17 ^{o}C. Κατά την περίοδο της έρευνας αυτής, το 91,5% των κατακρημνισμάτων έπεσε τη

χειμερινή περίοδο και οι ερευνητές έλαβαν υπ' όψιν τους τις ακόλουθες παραμέτρους που διαφοροποιούνται εποχιακά:

1. Συντελεστής διαπερώσας βροχής,
2. Υδατοχωρητικότητα κόμης
3. Σημείο κορεσμού κόμης

Η υδατοχωρητικότητα της κόμης S, βρέθηκε ήταν σημαντικά μεγαλύτερη την περίοδο με φύλλα (0,97 mm, SD: 0,43) συγκριτικά με την αντίστοιχη χωρίς φύλλα (0,10 mm, SD:0,43). Την περίοδο με φύλλα, από την εκτιμώμενη υδατοσυγκράτηση και συγκεκριμένα από το 86,4% της συνολικής, το 55.4% εξατμίστηκε από την κορεσμένη κόμη κατά τη διάρκεια και το 31,0% μετά τα επεισόδια βροχής και λιγότερη εξάτμιση έλαβε χώρα κατά την αρχική διύγρανση της κόμης. Την περίοδο του ληθάργου, κυριάρχησε η εξάτμιση κατά τη διάρκεια των επεισοδίων βροχής (82,4%). Συνολικά μετρήθηκαν 70 επεισόδια βροχής συνολικού ύψους 822,8 mm. Τα 405 mm την αυξητική περίοδο και τα 417,8 mm την περίοδο του ληθάργου. Η μέση υδατοσυγκράτηση βρέθηκε 60,2 mm (**14,9%)** κατά την αυξητική περίοδο και 24.0 mm (**5,7%)** την περίοδο του ληθάργου (**10,3% Μέση ετήσια τιμή)**. Ο Γκανάτσιος (2004) μέτρησε παρόμοιες τιμές **13,5% και 4,6% (9% Μέση ετήσια τιμή**).

Υπάρχουν αρκετά μοντέλα εκτίμησης της υδατοσυγκράτησης, περιορισμένης όμως χρησιμότητας αναφορικά με την εποχιακή διακύμανση των τιμών της. Λίγες οι έρευνες που συνέλλεξαν στοιχεία πεδίου κατά την αυξητική περίοδο (με φύλλα) και εκείνη του λήθαργου (χωρίς φύλλα). Το μοντέλο υποεκτίμησε την υδατοσυγκράτηση κατά 4% και 7,5% για την περίοδο με και χωρίς φύλλα αντίστοιχα. Η εκτιμώμενη από το μοντέλο υδατοσυγκράτηση τη θερινή περίοδο βρέθηκε ίση με 57.8 mm (SD: 20.9) mm (14.3% βροχής, υποεκτιμώντας κατά 4% την πραγματική τιμή). Την περίοδο χωρίς φύλλα, η υδατοσυγκράτηση εκτιμήθηκε στο 22.2mm (SD: 12.4) mm (5.3% της βροχής, υποεκτιμώντας κατά 7,5% την πραγματική τιμή).

Οι Mużyło et al., 2012 στα Πυρηναία της Ισπανίας, σε δάσος ποδισκοφόρου δρυός, με ετήσια κατακρημνίσματα 862 mm και επί συνόλου 957 mm κατακρημνισμάτων και δυναμικό εξατμιστιδιαπνοής ίσο με 823 mm, βρήκαν διαπερώσα βροχή 448,8 mm και 340,9 mm (81,2% & 84,4% της βροχόπτωσης, μέση τιμή 82,6%) την αυξητική και ληθάργου περίοδο αντίστοιχα. Η κορμοαπορροή βρέθηκε 10,0 mm & 14,7 mm (1,8% & 3,6% της βροχόπτωση, μέση τιμή 2,6%), και η υδατοσυγκράτηση 94,0 mm & 48,5 mm (**17,0% & 12,0% της βροχόπτωσης, μέση τιμή 14,8%)** την αυξητική και ληθάργου περίοδο αντίστοιχα. Έτσι, σύγκριναν τις τιμές που δίνουν τα μοντέλα Gash & Rutter βρίσκοντας ότι αυτά (συσχετίζουν γραμμικά την υδατοσυγκράτηση με τη φυτοκάλυψη) υποεκτιμούν την υδατοσυγκράτηση κατά την περίοδο του ληθάργου συγκριτικά με την εκτίμηση της τιμής κατά την αυξητική περίοδο. Η κορμοαπορροή κατά την περίοδο του ληθάργου (χωρίς φύλλα) βρέθηκε ίση με 3,6% της βροχής (όσο υπολόγισαν οι Παπούλιας Νικολαίδης), ειδικότερα για μεγάλα επεισόδια βροχής.

- **Η ιδιαιτερότητα των δρυών**

Για την απλούστευση του μοντέλου Gash αλλά και όχι μόνο αυτού, θεωρείται ότι τις δύο μεταβατικές εποχές, φθινόπωρο και άνοιξη, οι τιμές των φύλλων είναι το 80% των αντίστοιχων θερινών. Η δρυς λόγω της μεγάλης ποικολομορφίας που παρουσιάζει μεταξύ των ειδών της, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Για τις φυλλοβόλες δρύες, η πτώση και η ξήρανση των φύλλων εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες (άρα και το υψόμετρο) και το είδος της δρυός. Ορισμένες φυλλοβόλες δρύες κρατάνε έως και τον Ιανουάριο τα ξερά τους φύλλα ενώ άλλες σχεδόν καθόλου. Αυτό, όπως είναι φυσικό επηρεάζει την υδατοσυγκράτηση. Στην άσκηση παράδειγμα που δίνεται στο τέλος του βιβλίου για λόγους απλοποίησης, η δρύς του περιαστικού δάσους Θεσσαλονίκης, θεωρείται ότι διατηρεί τα ξερά φύλλα της μέχρι την άνοιξη. Αν όμως το παράδειγμα αφορούσε δρυμείς χειμώνες και δρύες όπως η πλατύφυλλη (φύεται σε μεγάλα υψόμετρα), η χειμερινή περίοδος μπορεί να χωριστεί ως εξής:

- ο Νοέμβριος θεωρείται μήνας όπου τα φύλλα έχουν ξεραθεί και διατηρούνται στο δέντρο,
- Από το Δεκέμβριο έως το Μάρτιο οι τιμές υδατοσυγκράτησης ελαχιστοποιούνται (δέντρα χωρίς φύλλωμα),
- τον Απρίλιο που βγαίνουν τα νέα και δεν έχουν ακόμα πλήρως αναπτυχθεί, μπορεί να θεωρηθεί ότι η υδατοσυγκράτηση είναι στο 80% της θερινής τιμής της.

Εικόνα 13. Οι εποχιακές διαφορές στην κομοστέγη της δρυός.

Εικόνα 14. Οξυά και Δρυς στο Χολομώντα Χαλκιδικής

(Το ένα δέντρο χτυπήθηκε από κεραυνό, ξεράθηκε και κόπηκε)

7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΟΜΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ

Αξιολογώντας των ερευνών και των αποτελεσμάτων εκτίμησης της κομοδιαβροχής και της υδατοσυγκράτησης προκύπτουν τα ακόλουθα σημαντικά γενικά και ειδικά συμπεράσματα:

1. Η κομοδιαβροχή και η υδατοσυγκράτηση αποτελούν μια πολύ σημαντική πρωτογενή υδατική απώλεια. Η απώλεια αυτή ουσιαστικά απομειώνει, κατά το μέγεθός της, την ποσότητα των πιπτόντων κατακρημνισμάτων, με αποτέλεσμα το υδατικό ισοζύγιο μιας περιοχής να πρέπει να σχεδιάζεται με βάση τη διαπερώσα βροχή και όχι την καταγραφόμενη σε ελεύθερο αναπεπταμένο έδαφος.
2. Η κομοδιαβροχή της δενδρώδους δασικής βλάστησης είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης θαμνώδους και εξαιρετικά μεγαλύτερη της φυσικής ποώδους βλάστησης.
3. Η χρονική έλλειψη φυλλώματος των φυλλοβολούντων δένδρων, καθώς και η κατά την περίοδο έκπτυσης και πτώσης των φύλλων μειωμένη φυλλομάζα τους καθιστούν την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση των φυλλοβόλων ειδών μικρότερη των αειφύλλων πλατυφύλλων ειδών και σαφώς μικρότερη των κωνοφόρων ειδών.
4. Μεταξύ των κωνοφόρων ειδών η ελάτη εμφανίζει την μεγαλύτερη κομοδιαβροχή και υδατοσυγκράτηση και οι φιλόστατες πεύκες την μικρότερη.
5. Η ποσότητα της υδατοσυγκράτησης των διαφόρων δασοπονικών ειδών αν και παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις παραμένει εξαιρετικά σημαντική κυμαινόμενη μεταξύ **10-50%** της βροχόπτωσης (Rutter et al., 1971). Γενικότερα, οι απώλειες υδατοσυγκράτησης αντιπροσωπεύουν το ¼ της ετήσιας βροχόπτωσης που επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Τη μεγαλύτερη υδατοσυγκράτηση (τιμές κατά προσέγγιση) εμφανίζουν κατά σειρά η Ελάτη (40%), η Ερυθρελάτη (35%), η Πεύκη (30%), η Δρυς (20%) και η Οξυά (18%). Σημαντική είναι και η υδατοσυγκράτηση των αειφύλλων-πλατυφύλλων, ιδιαίτερα των συνηρεφών θαμνοσυστάδων, η οποία προσεγγίζει το 25% έως ακόμα και το 36%.
6. Η ημερήσια κομοδιαβροχή των κωνοφόρων ειδών κυμαίνεται από 1,5-4,0mm/ημέρα και των πλατυφύλλων από 0,5-2,0mm.
7. Η συνολική κομοδιαβροχή και ιδιαίτερα η ετήσια τιμή της υδατοσυγκράτησης εξαρτάται από πολλούς αλληλεξαρτώμενους παράγοντες και κυρίως η ένταση και το ύψος της ημερήσιας βροχόπτωσης, η εποχή του έτους, οι άνεμοι, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα, ο προσανατολισμός και το ενδοσυσταδικό μικροκλίμα, η μορφή (habitus) και η πυκνότητα του φυλλώματος την εποχή πτώσεων της βροχής κλπ.
8. Θερμοκρασίες κάτω του μηδενός και σχετική υγρασία 100% δεν επιτρέπουν την εξέλιξη της κομοδιαβροχής και πρακτικά στις περιόδους αυτές η υδατοσυγκράτηση είναι μηδενική.

9. Συνήθως η υδατοσυγκράτηση αγνοείται από τα υδρολογικά μοντέλα διότι θεωρείται μικρή αλλά και διότι είναι δύσκολη η ακριβής μέτρησή της. Αν πάλι συνυπολογιστεί, αυτό γίνεται με την υπόθεση ότι είναι μια συνεχής λειτουργία, που δεν ισχύει, διότι διαφοροποιείται έντονα στο χωροχρόνο.

- **Περιορισμοί των μοντέλων**

Τα μοντέλα υδατοσυγκράτησης (Valente et al., 1997, Van Dijk and Bruijnzeel, 2001) αναπτύχθηκαν για να κάνουν εκτιμήσεις της υδατοσυγκράτησης και βασίζονται στη βροχόπτωση και τα χαρακτηριστικά της κόμης. Στηρίχθηκαν στα μοντέλα των Rutter (Rutter et al., 1975, Rutter et al., 1971) και Gash (Gash, 1979, Gash et al., 1995). Το μοντέλο του Gash (1979) δοκιμάστηκε από πειραματικές μετρήσεις σε αρκετά δάση και θεωρείται η πιο σημαντική και αξιοπιστη μέθοδος εκτίμησης της υδατοσυγκράτησης, χρειάζεται λιγότερα δεδομένα και αντιπροσωπεύει μια εμπειρική προσέγγιση ενώ διατηρεί και στηρίζεται στο θεμελιώδες μοντέλο των Rutter et al., (1971). Έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις ώστε να αποφευχθούν οι σχετικές μετρήσεις, αυτός άλλωστε είναι ο πρωταρχικός σκοπός του μοντέλου.

Για να υπολογιστεί το υδατικό ισοζύγιο, παρότι το μοντέλο Gash σχεδιάστηκε να τρέχει για κάθε επεισόδιο βροχής, συνήθως εφαρμόζεται με την υπόθεση ενός επεισοδίου βροχής ανά ημέρα. Η κατηγοριοποίηση των επεισοδίων βροχής έγινε ανάλογα εάν υφίσταται κορεσμός της κόμης και του κορμού ή όχι. Έτσι το μοντέλο χρησιμοποιεί ωριαίο ρυθμό βροχόπτωσης και εξάτμισης για συνθήκες κορμεσμού και για όλα τα επεισόδια βροχής. Το μοντέλο Rutter εισάγει τιμές ανά 5 λεπτά, ενώ το Gash εφαρμόζεται για κάθε επεισόδιο βροχής. Καθώς το μοντέλο Rutter χωρίζει τα επεισόδια βάσει της ποσότητας νερού που αποθηκεύεται στην κόμη, εάν η κόμη ή ο κορμός δεν αδειάσει, αρκετά συνεχόμενα επεισόδια βροχής μπορούν να συνδυαστούν σε ένα μεγάλο επεισόδιο. Αντίθετα, το μοντέλο Gash χρησιμοποιεί ημερήσια ή νυχτερινά επεισόδια βροχής (ανά 6 ή 12 ώρες), έτσι δε γίνεται άμεση σύγκριση των εξαγόμενων στοιχείων των 2 μοντέλων.

- Ωστόσο, για τα **αραιά δάση**, το μοντέλο **υπερεκτιμά** κατά 29-44% την υδατοσυγκράτηση (I=17% του P για πεύκη) (Gash et al., 1995, Valente et al., 1997) διότι θεωρείται ότι η εξατμιζόμενη επιφάνεια καταλαμβάνει ολόκληρη την εδαφική έκταση ενώ η πραγματική τιμή είναι σαφώς πολύ μικρότερη. Έτσι, αντιμετωπίζοντας χωριστά τις ανοιχτές επιφάνειες από εκείνες με πυκνή δασοκάλυψη, οι Gash et al., (1995) τροποποιούν τα αρχικά μοντέλα προσεγγίζοντας πολύ καλύτερα τις μετρούμενες τιμές υδατοσυγκράτησης.
- Τα προγνωστικά μοντέλα συνήθως εφαρμόζονται σε δάση κωνοφόρων ή αειφύλλων πλατυφύλλων με **ελάχιστες μελέτες να αφορούν φυλλοβόλα**, ακόμα λιγότερες για τα φυλλοβόλα τη χειμερινή περίοδο, **πόσο μάλλον συγκριτικές για χειμερινή και θερινή περίοδο** (Mużyło et al., 2012). Το

μοντέλο Gash λοιπόν εκτιμά την υδατοσυγκράτηση των δέντρων το **θερινό εξάμηνο και** είναι πολύ λιγότερο ακριβές για τη χειμερινή *περίοδο.*

- Επίσης, η δομή της κόμης στο μοντέλο Gash είναι λιγότερο σημαντική. *Οι* Lovynska et. al., (2018), σε φυτεία Pinus pinaster 18 ετών, εκτίμησαν την υδατοσυγκράτηση με το μοντέλο Gash και βρήκαν εποχική διακύμανση από 12,6-21% Η πρώτη τιμή αφορούσε περίοδο με λίγες μικρές βροχοπτώσεις ή καθόλου ενώ η μεγαλύτερη τιμή τις περιόδους με περισσότερες μικρές βροχοπτώσεις.
- Είναι **χρονοβόρο** στη σύστασή και τη λειτουργία του **απαιτεί ωριαίες βροχοπτώσεις** και ικανοποιητικά δεδομένα **διαπερώσας βροχής**.
- Εξαρτάται από **δεδομένα που δεν είναι εύκολο να βρεθούν**.
- Ο Gash **υποθέτει** προκειμένου να λειτουργήσει το μοντέλο του, ότι κατά τη διαβροχή της κόμης έως τον κορεσμό της, **δεν πέφτει νερό στο έδαφος και επίσης το ποσό του νερού που κομοσυγκρατείται έως και το πέρας της βροχής, γρήγορα μειώνεται** (εντός 20-30λεπτών) στο S, την τελική τιμή κομουδατοσυγκράτησης.
- Επίσης τα $\bar{R}$ /$\bar{E}$, S & *p*, **θεωρείται ότι είναι σταθερά** καθ' όλη τη διάρκεια του επεισοδίου βροχής. $\bar{R}$, $\bar{E}$ αφορούν την περίοδο του υδατοκορεσμού της κόμης.
- Οι τιμές **LAI λαμβάνονται από διαφορετικά περιβάλλοντα**, ακόμα και αν αφορούν τα ίδια δασοπονικά είδη. Διάφοροι τύποι οικοσυστημάτων δίνουν διαφορετικές τιμές LAI για το ίδιο είδος, διότι μετριέται η συνολική φυλλική επιφάνεια (η μία πλευρά μόνο) και διαιρείται με τη συνολική έκταση του οικοσυστήματος. Από το LAI υπολογίζεται το S και το *p*, έτσι λανθασμένος υπολογισμός του οδηγεί γενικότερα σε λανθασμένα αποτελέσματα. Από την άλλη, **τα όργανα μέτρησης LAI είναι ακριβά** και ως εναλλακτική με καλά αποτελέσματα δίνεται η εφαρμογή για κινητά (με πληρωμή) (Cassandra, 2014). Κυμάνσεις στη φαινολογία των φύλλων των διαφόρων ειδών που αφορά το χρόνο έκπτυξης τους, αγνοούνται. Το μοντέλο απλώς υπολογίζει έκπτυξη φύλλων την άνοιξη και πτώση το φθινόπωρο. Επίσης το μοντέλο **δε λαμβάνει υπ' όψιν το σχήμα της κόμης**.
- Γενικότερα, αποκλίσεις των υπολογισμών του μοντέλου από πραγματικές μετρήσεις αποδίδονται σε παράγοντες όπως η θερμοκρασία αέρα, η ταχύτητα ανέμου, η σχετική υγρασία, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας και ο ρυθμός βροχόπτωσης και η αναλογία εξάτμισης προς βροχόπτωση.
- Οι Fathizadeh et. al., (2018), αναφέρουν ότι η **μέγιστη υδατοσυγκρατητική ικανότητα της κομοστέγης είναι ο επιδραστικότερος παράγοντας στη μοντελοποίηση της υδατοσυγκράτησης**. Το μοντέλο Gash, λειτουργώντας με ένα επεισόδιο βροχής ανά μέρα **μειώνει την κομοσυγκρατιτική ικανότητα στα όρια λάθους.** Η βροχή που υδατοσυγκρατείται μπορεί να εξατμιστεί κατά τη διάρκεια ή μετά το επεισόδιο της βροχής. Ως αποτέλεσμα, σύμφωνα με τους Klaassen et al., (1998) προκύπτει το συμπέρασμα ότι **οι κοινές μέθοδοι (μοντέλα) εκτίμησης της υδατοσυγκράτησης, υποεκτιμούν την υδατοχωρητικότητα της κόμης και υπερεκτιμούν την εξάτμιση κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης.** Οι

ερευνητές αυτοί, προτείνουν μικρότερη εξάτμιση εισάγοντας την ένοια της αντίστασης στην μεταφορά των υδρατμών. Οι Momiyama et al., 2023, μετρώντας την υδατοσυγκράτηση, βρέθηκαν ότι το μοντέλο Gash την **υποεκτιμά για τα μεγάλα επεισόδια βροχής**. Αυτό δείχνει ότι το μοντέλο δεν μπορεί να περιγράψει κάποιους μηχανισμούς περιλαμβανομένης της υδατοχωρητικότητας της κόμης. Πιθανή εξήγηση είναι η εξάτμιση των σταλαγμάτων βροχής. Η κομοστέγη αλλάζει την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων βροχής. Επίσης, κάποιες σταγόνες βροχής γίνονται σταλάγματα με σχετικά μεγάλη επιφάνεια συγκριτικά με το μικρό τους όγκο και εκτίθενται σε μεγαλύτερη εξατμιση. (Αναφορά για Murakami, 2006, εντός του Momiyama κ.α., 2023). Η χρήση του μοντέλου Penman–Monteith για την εκτίμηση της εξάτμισης σε υγρή κόμη (Muzylo et al., 2009), δίνει τιμές πολύ μικρότερες από τις παρατηρούμενες (αναφορά εντός Momiyama κ.α. (2023), για Van Dijk et al., 2015).

Γενικότερα, διάφορα μοντέλα εκτιμούν την αποθηκευτική ικανότητα της κόμης S, το ρυθμό εξάτμισης κατά τη διάρκεια της καταιγίδας Er αλλά παραμένει η ανάγκη για ανεξάρτητη εκτίμηση αυτών και τελικά της υδατοσυγκράτησης. Ο Návar (2020), στηρίχθηκε σε 44 έρευνες στο Μεξικό και προσπάθησε να αναπτύξει ένα ανεξάρτητο μοντέλο εκτίμησης των μεγεθών αυτών, να το συγκρίνει με άλλα μοντέλα και να ταυτοποιήσει δυνάμεις και περιορισμούς αυτής της πρότασης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ –ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ

Βουζάρας Α., 1981. ***Χαρακτηριστικά των βροχών περιοχής Βαρετάδας Αμφιλοχίας,*** Περιοδικό Δασική Έρευνα Ι (4) σελ. 443-448.

Κωτούλας Δ., 1995. ***Μαθήματα Δασικής Υδρολογίας,*** Εκδόσεις Α.Π.Θ.

Μανέτας Ι. 2019. ***Τι θα έβλεπε η Αλίκη στη χώρα των φυτών***, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.

Μπαλούτσος Γ., 2019. ***Ακραίες πλημμύρες και ορεινές υδρολογικές λεκάνες στην Ελλάδα,*** ΕΛΓΟ/ΔΗΜΗΤΡΑ, Τεύχος 28/2019. https://dasarxeio.com/2020/02/26/76003/

Παυλίδης Θ., 2005. ***Δασική Υδρολογία & Υδάτινοι Πόροι***, Εκδόσεις Α.Π.Θ.

Aboal, J. & Ânez, M & Morales, D & Gil, P. 2000**.** ***Effects of thinning on throughfall in Canary Islands pine forest - The role of fog,*** Journal of Hydrology - J HYDROL. 238. 10.1016/S0022-1694(00)00329-2.

Aponte Cr., García L.V., Perez-Ramos I., Gutiérrez E., 2011. ***Oak trees and soil interactions in Mediterranean forests: A positive feedback model,*** Journal of Vegetation Science 22(5):856 – 867. doi:10.1111/j.1654-1103.2011.01298.x

Aponte Cr., García L.V., Marañón T., 2013. ***Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence,*** Forest Ecology and Management (309):36, doi:10.1016/j.foreco.2013.05.035

Aston, A.R., 1979. ***Rainfall interception by eight small trees,*** Hydrol. 41: 383-396.

Aussenac G., 1969: ***Influences du couvert forestier sur les precipitation,*** Revue Forestiere Fransaise 1967/7, pp. 631-635.

Baiamonte, G. 2021. ***Simplified Interception/Evaporation Model***. Hydrology, 8, 99. https:// doi.org/10.3390/hydrology80300

Baumgartner A., 1965. ***Untersuchungen uber den Warme – Wasserhaushalt eines jungen Waldes,*** Ber. Der Deuts. Wett 1956/5, pp. 4-53.

Baurgy and Pomeroy C. 1958. ***Interception losses in grassy vegetation,*** Amer. Geophys. Union Trans. 1958/39, 1095-1100.

Briere M., C. François, F. Lebourgeois, I. Seynave, G. Vincent, N. Korboulewsky, F. Ningre, T. Perot, S. Perret, A. Calas, E. Dufrêne, 2021. ***The preprint server for biology***, bioRxiv. doi: https://doi.org/10.1101/2021.08.05.454476

Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A., 2005. ***A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation***, Journal of Hydrology 310, 28–61

Bruijnzeel, L.A., 1988. **(*De)Forestation and dry season flow in the tropics: A closer look***, Journal of Tropical Forest Science 1, 229–243.

Cassandra 2014. ***Pocket LAI,*** Retrieved from: http://www.cassandralab.com/mobiles/1

Cepel N. 1967. ***Interzeption in einem Buchen-einem Eichen–und einem Kieferbestand des Belgraden Waldes bei Instabul.*** Forstwiss. 1967/5, p301-314.

Chang, M., 2006. ***Forest Hydrology: An Introduction to Water and Forests*,** Second Edition Taylor and Francis.

Crockford, R. H. and David Richardson 2000. ***Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate***, *Hydrological Processes* 14: 2903-2920.

Corti G., Agnelli A., Cocco S., Cardelli V., Masse J., Courchesne F. 2019. ***Soil affects throughfall and stemflow under Turkey oak (Quercus cerris L.),*** Geoderma, Volume 333, pp.43-56, ISSN 0016.7061, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.010.

Copernicus ***Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle,*** https://esd.copernicus.org/articles/5/471/2014/esd-5-471-2014.html.

David, J.S., Henriques, M.O., David, T.S., Tomé, J., Ledger, D.C., 1994. ***Clearcutting effects on streamflow in coppiced Eucalyptus globules stands in Portugal***, J. Hydrol. 162, 143-154.

David Teresa, Gash J., Valente Fernanda, Pereira Joao, Ferreira Maria, David Jorge, 2006. ***Rainfall interception by isolated evergreen oak tree in Mediterranean savannah,*** Hydrological Processes. 20. 2713-2726, https://doi.org/10.1002/hyp.6062. https://www.researchgate.net/publication/227774223_Rainfall_interception_by_isolated_evergreen_oak_tree_in_Mediterranean_savannah

Delfs J., 1955. ***Die Nederschlagszuzuckhaltung in Walde,*** Mitt. Des Arbeitskreises «Wasser», 1955/2, p. 54.

Delfs J., 1967. ***Interception and Stemflow in stands of Norway Spruce and Beech in West Germany,*** In Intern. Sympos. On Forest Hydrology. Edit. Sopper W., and Lull H. Pergamon Press 1967, pp. 179-185.

Ebermayer E., 1873. ***Pie phusikalische Einwirkung des Waldes auf Luft und Boden,*** Berlin 1973 (Molchanov A., 1960, p. 16).

Eisenbies, M.H., Aust, W.M., Burger, J.A., Adams, M.B., 2007. ***Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians*—A review**, Forest Ecology and Management 242: 77-98.

Engler A., 1919. ***Untersuchungen uber den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewasser,*** Mitt. Des

Exler J. L., R.D. Moore, 2022. ***Quantifying throughfall, stemflow and interception loss in five vegetation communities in a maritime raised bog***, Agricultural and Forest Meteorology 327, 109202

Fathizadeh O., S.M. Hosseini, R.F. Keim, A. Darvishi Boloorani, 2018. ***A seasonal evaluation of the reformulated Gash interception model for semi-arid deciduous oak forest stands,*** Forest Ecology and Management, Volume 409, Pages 601-613, ISSN 0378-1127, https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.058. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112717318510)

Federal, C., 1975. ***Evapotranspiration,*** Rev. Geophys.Space, Phys.Vol. 13, pp. 442-445, 487-494.

Fischer S., Moderow U., Queck R., Bernhofer Ch., 2023. ***Evaporation of intercepted rainfall–Comparing canopy water budget and energy balance related long term measurements at a Norway spruce site,*** Agricultural and Forest Meteorology 341, 109637

Frangen, W., Leopoldo, R.R., Matsui, E., Ribeiro, M.N.G., 1987. **Study of interception of rainfall in firme type Amazon forest cover,** For. Abstr. Vol. 48. No. 7, 3418.

Ganatsios H., Papaioanou E., Pipinis E., Valeta Ch., 2024. ***Topsoil and Tree Changes in an Oak Ecosystem within a Period of 37 Years***, Sustainability and Climate Change Vol. 17, No. 4. 40. pp. 281-297. https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/scc.2024.0032

Gash J. H. C., 1979. ***An analytical model of rainfall interception by forests,*** Quart. J . R. Met. SOC.(1979), 105, pp. 43-55. https://doi.org/10.1002/qj.49710544304

Gash J.H.C. , C.R. Lloyd, G. Lachaud 1995. ***Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model.*** J. Hydrol., 170 (1995), pp. 79-86

Gerrits, A.M.J., Pfister, L., Savenije, H.H.G., 2010. ***Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest,*** Hydrol. Process. 24, 3011–3025. https://doi.org/10.1002/hyp.7712.

Gessler A., Schaub M., McDowell NG., 2016. ***The role of nutrients in drought-induced tree mortality and recovery,*** New Phytologist, vol.214/2, pp.513-520, https://doi.org/10.1111/nph.14340

Good, S.P., Noone, D., Bowen, G., (2015). ***Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes,*** Science 349, 175–177. https://doi.org/10.1126/ science.aaa5931.

Goude, M., Nilsson, U. & Holmström, E. 2019. ***Comparing direct and indirect leaf area measurements for Scots pine and Norway spruce plantations in Sweden***, *Eur J Forest Res* 138, 1033–1047. https://doi.org/10.1007/s10342-019-01221-2

Hassan S.M. Tanvir, Chandra Prasad Ghimire , Maciek W. Lubczynski, 2017. ***Remote sensing upscaling of interception loss from isolated oaks: Sardon catchment case study***, Spain. Journal of Hydrology 555 (2017) 489–505. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.016

Hewlett J.D., 1982. ***Principles of Forest Hydrology,*** Second ed. The Univ. of Georgia Press, Athens, U.S.A.

Hoover M., 1953. ***Interception of rainfall in a young loblolly pine plantation,*** Southeastern Forest Exp. Sta. paper 21, p. 13.

Horton R., 1919. ***Rainfall interception,*** Monthly, Weather Rev. 1919/51 pp. 291-304 (Kittredge J., 1948, p. 99-114).

Huang Jie Ying, 2016. ***An Analytical Model of Rainfall Interception by Urban Trees***. Final report. https://mlws.landfood.ubc.ca/all-projects/huang-2016-an-analytical-model-of-rainfall-interception-by-urban-trees/

Karlik John F. and McKay Alistair H. 2002. ***Leaf Area Index, Leaf Mass Density, and Allometric Relationships Derived From Harvest of Blue Oaks in a California Oak Savanna,*** USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-184.
www.fs.usda.gov/psw/publications/documents/psw_gtr184/psw_gtr184_061_Karlik.pdf

Kelley Ow. 2014. ***Where the Least Rainfall Occurs in the Sahara Desert, the TRMM Radar Reveals a Different Pattern of Rainfall Each Season***, American Meteorological Society. pp. 6919–6939, DOI:https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00145.1,

Klaassen Wim, Bosveld Fred, de Water E., 1998. ***Water storage and evaporation as constituents of rainfall Interception,*** Journal of Hydrology 212–213, 36–50

Koppa, A., Rains, D., Hulsman, P. *et al.* 2022. ***A deep learning-based hybrid model of global terrestrial evaporation,*** Nature Communications 13, 1912. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29543-7

López-Serrano Francisco R., Tomás Landete-Castillejos, Javier Martínez-Millán, Antonio del Cerro-Barja, 2000. ***LAI estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique***, Agricultural and Forest Meteorology, Volume 101, Issues 2–3, Pages 95-111, ISSN 0168-1923, https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00171-9.

Loustau D., P. Berbigier, A. Granier, F.El Hadj Moussa, 1992***. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy***. Journal of Hydrology, Volume 138, Issues 3–4. Pages 449-467, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90130-N.

Lovynska Viktoriia, Petro Lakyda, Petro Lakyda Svitlana, 2018. ***LAI estimation by direct and indirect methods in Scots pine stands in Northern Steppe of Ukraine.*** Journal of Forest Science 64(No. 12):514-522. doi: 10.17221/79/2018-JFS

Mason Euan G., Mathijs Diepstraten, Guy L. Pinjuv, Jean-Pierre Lasserre, 2012. ***Comparison of direct and indirect leaf area index measurements of Pinus radiata D***. Don, Agricultural and Forest Meteorology, Volumes 166–167, Pages 113-119, ISSN 0168-1923,

Molchanov, A., 1960. ***The hydrological role of forest***, Moska (Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1963).

Momiyama Hiroki, Tomoyomi Kumagai, Naoya Fujime, Tomohiro Egusa, Takanori Shimizu, 2023. ***Forest canopy interception can reduce flood discharge: Inferences from model assumption analysis,*** Journal of Hydrology 623 (2023) 129843, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129843

Motha, J.A., Wallbrink, P.J., Hairsine, P.B., Grayson, R.B., 2003. ***Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia.*** Water Resources Research 39 (3) 1056, doi:10.1029/2001WR000794.

Muzylo A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J.J., Domingo, F., Gash, J.H.C. 2009. ***A review of rainfall interception modeling,*** J. Hydrol. 2009, 370, 191–206. [CrossRef]

Muzylo A., F. Valente, F. Domingo, P. Llorens, 2012. ***Modelling rainfall partitioning with sparse Gash and Rutter models in a downy oak stand in leafed and leafless periods,*** Hydrol. Process., 26 (2012), pp. 3161-3173

Návar José, 2020. ***Modeling rainfall interception loss components of forests,*** Journal of Hydrology, Volume 584. 124449, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124449.

Pickles BJ., Simard SW. 2017a. ***Mycorrhizal Networks and Forest Resilience to Drought***. Chapter 18 - Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage, pp.319–339, Elsevier, Book. ISBN 9780128043127, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804312-7.00018-8.

Pickles, B.J., Wilhelm, R., Asay, A.K., Simard, S.W., Mohn, W.W. 2017b. ***Transfer of ^{13}C between paired Douglas-fir seedlings reveals plant kinship effects and uptake of exudates by ectomycorrhizas***, New Phytologist, 214(1), pp.400–411. https://doi.org/10.1111/nph.14325

Rakhmanov V. 1962. ***Role of Forest in water conservation***, Moska (Isael Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1966).

Rowe P.B. and Hendrix T.M. 1951. ***Interception of rain and snow by second-growth ponterosa pine,*** Amer. Geophys. Union Trans. 1951/32, 903-8

Rutter A.J., Kershaw K.A. , Robins P.C., Morton A.J., 1971. ***A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine***, Agricultural

Meteorology, Volume 9, Pages 367-384, ISSN 0002-1571, https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90034-3.

Scurlock, J. M. O., G. P. Asner, and S. T. Gower. 2001. ***Global Leaf Area Index Data from Field Measurements, 1932-2000***. Available on-line http://www.daac.ornl.gov/] from the Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

Serengil, Y., Gökbulak, F., Özhan, S., Hizal, A. Sengönül, K., Balci, A.N. Özyuvaci, N., 2007. ***Hydrological impacts of a slight thinning treatment in a deciduous forest ecosystem in Turkey,*** Journal of Hydrology 333, 569–577.

Silva Cantú I, González Rodríguez H. 2001. ***Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico***. Tree Physiol. 2001 Aug;21(12-13):1009-13. doi: 10.1093/treephys/21.12-13.1009. PMID: 11498348.

Simard SW. 2009b. ***Mycorrhizal networks and complex systems: Contributions of soil ecology science to managing climate change effects in forested ecosystems.*** Canadian Journal of Soil Science, 89(4), pp.369–382. https://doi.org/10.4141/cjss08078

Sopper W., and Lull H. 1967. **Forest Hydrology**, Pergamon Press

Stephenson NL., Das AJ., Condit R., Russo SE., Baker PJ., Beckman NG., Coomes DA., Lines ER., Morris WK., Rüger N., 2014. ***Rate of Tree Carbon Accumulation Increases Continuously with Tree Size***, Nature 507:90-93. https://doi.org/10.1038/nature12914

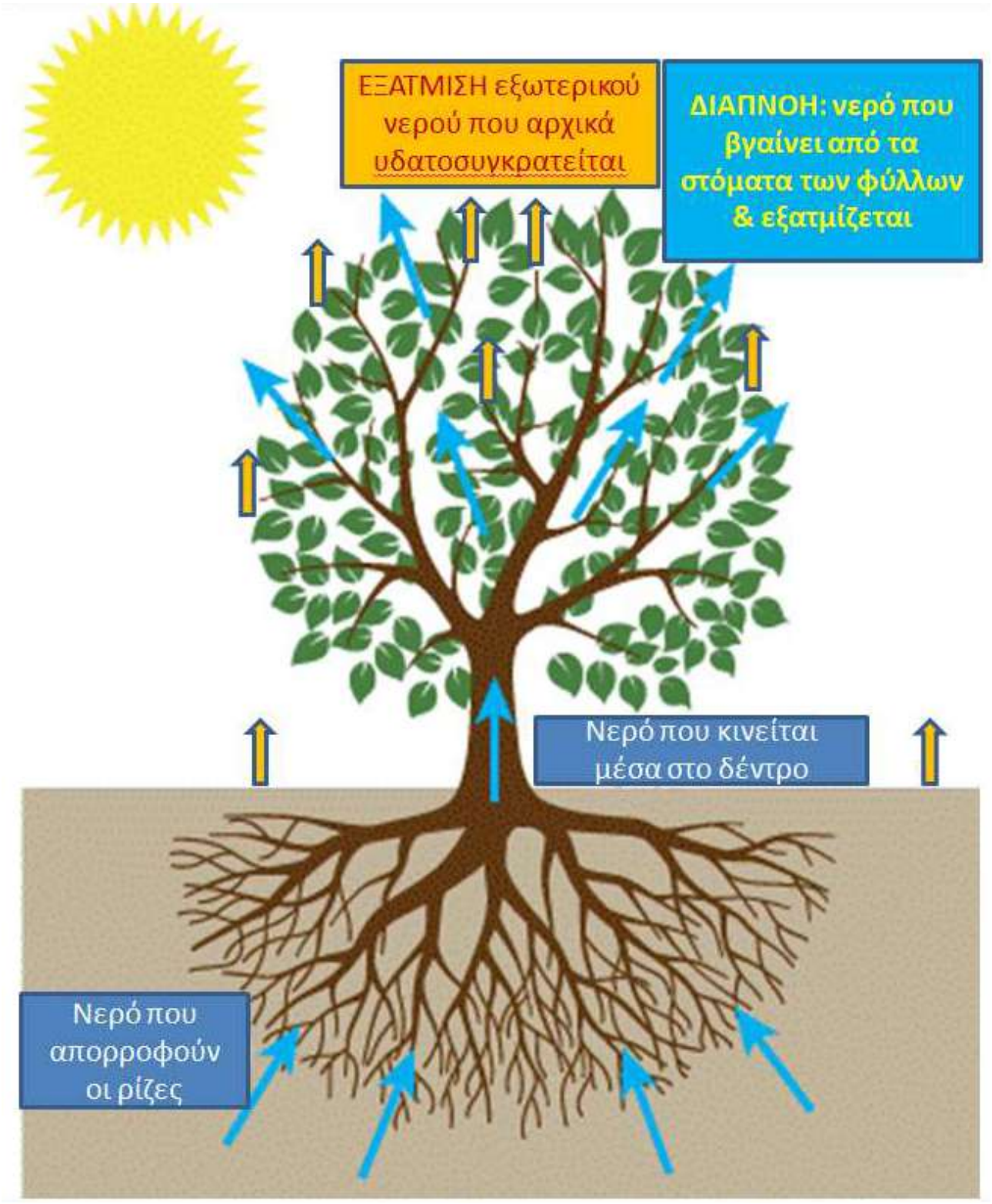
Valente F., J.S. David, J.H.C. Gash, 1997***. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models,*** J. Hydrol., 190 (1997), pp. 141-162

Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J., and Savenije, H. H. G. 2014. ***Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land***, Earth Syst. Dynam., 5, 441–469, https://doi.org/10.5194/esd-5-441-2014, 2014., Part 2: Moisture recycling, Earth Syst. Dynam., 5, 471–489, https://doi.org/10.5194/esd-5-471-2014, 2014.

Wicht C.L., 1967. ***Forest hydrology research in South African Republic,*** pp. 75-94. In Intern. Sympos. On Forest. Hydrol. Edit. Sopper W. and Lull W. Pergamon Press.

Zanella A., Ponge JF., Andreetta A., et al. 2020. **Combined forest and soil management after a catastrophic event,** Journal of Mountain Science 17(10). https://doi.org/10.1007/s11629-019-5890

Β.2. ΕΞΑΤΜΙΣΗ & ΔΙΑΠΝΟΗ



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξάτμιση-διαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον από ελεύθερες υδάτινες και από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης αποτελεί μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Η διαρκής προσφορά νερού -υπό τη μορφή υδρομετεώρων- από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης προέρχεται από την επιστροφή του νερού στην ατμόσφαιρα, μέσω της εξάτμισης και της εξάτμισης-διαπνοής. Για το λόγο αυτό, η γνώση της εξατμιζόμενης ή διαπνεόμενης ποσότητας νερού, είναι απαραίτητη στη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου μιας περιοχής και κατ' επέκταση στο σχεδιασμό, τη μελέτη και τις συνθήκες λειτουργίας πολλών υδραυλικών έργων. Για παράδειγμα, η εξάτμιση από μια τεχνητή λίμνη ελαττώνει την ωφέλιμη χωρητικότητά της, ενώ η διαπνεόμενη ποσότητα νερού από τα καλλιεργούμενα φυτά, αποτελεί παράγοντα καθορισμού των απαιτήσεων τους σε νερό. Επομένως η εξάτμιση καθορίζει το σχεδιασμό αξιοποίησης των υδατικών πόρων, καθώς και τη δομή του υπάρχοντος ή του μελλοντικού αρδευτικού δικτύου.

Η εξατμισιδιαπνοή από φυτοκαλυμμένες περιοχές και η εξάτμιση από ελεύθερες επιφάνειες νερού, είναι από τις λιγότερο κατανοητές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου και η εκτίμησή τους παραμένει δύσκολη ακόμα και σήμερα. Για το λόγο αυτό, συχνά η εκτίμηση τους γίνεται με τη βοήθεια του υδατικού ισοζυγίου, αφού έχουν πρώτα εκτιμηθεί οι λοιπές συνιστώσες του. **Η εξάτμιση αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ του υδατικού και του ενεργειακού ισοζυγίου.** Το μεγαλύτερο ποσοστό της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από την επιφάνεια της γης και μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια. Η εσωτερική αυτή ενέργεια μετατρέπεται σε ακτινοβολία μεγάλου κύματος, που επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως αισθητή θερμότητα. Η αισθητή θερμότητα μεταφέρεται προς (ή από) την ατμόσφαιρα, προκαλώντας την εξάτμιση του νερού, ή τη θέρμαση της γήινης επιφάνειας. Οι διεργασίες αυτές επηρεάζουν και ρυθμίζουν σε σημαντικό βαθμό τη θερμοκρασία, την υγρασία και τις άλλες μεταβλητές της ατμόσφαιρας. Η εξάτμιση για να συντελεστεί, απαιτεί, μεταφέρει και αναδιανέμει μεγάλα ποσά λανθάνουσας ενέργειας. Για το λόγο αυτό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κλίματος μιας περιοχής. **Συχνά η ξηρότητα μιας περιοχής εκφράζεται, ως το μέτρο σύγκρισης μεταξύ πραγματικής και δυνητικής εξάτμισης.**

Η απώλεια υγρασίας από την κόμη των δένδρων και την κομοστέγη των συστάδων προς την ατμόσφαιρα αποτελεί θερμοδυναμικό φαινόμενο βασιζόμενο στην αρχή της διατήρησης της ενέργειας και της ποσότητας του νερού (Baumgartner, 1967). Ως εκ τούτου, η εξατμισιδιαπνοή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμική διαφορά μεταξύ των φύλλων και του αέρα στο δάσος. Από θερμοδυναμική άποψη η τραχύτητα της κομοστέγης του δάσους έχει ιδιαίτερη σημασία. Ο Baumgartner (1971) διαπιστώνει ότι η επιφάνεια της κομοστέγης του δάσους δύναται να είναι έως 300 φορές τραχύτερη της επιφάνειας ενός λιβαδιού. Παράλληλα η κόμη και η κομοστέγη των δασών εκτός από τραχύτερη είναι κατά κανόνα σκοτεινότερη από τις λοιπές επιφάνειες με αποτέλεσμα να παρακρατά μεγαλύτερα ποσά θερμότητας, γεγονός που καθορίζει -μέσω της ανταλλαγής θερμικής ενέργειας- την ποσότητα και την ταχύτητα της

εξατμισιδιαπνεόμενης υγρασίας. Ακολούθως παρατίθενται οι βασικές έννοιες της εξάτμισης και της διαπνοής:

Εξάτμιση (Evaporation) E: *Είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου τα μόρια ενός σώματος μεταπίπτουν από την υγρή ή τη στερεά φύση, στην αέρια.* (Η μετάβαση του νερού από τη στερεά στην αέρια μορφή καλείται εξάχνωση). Η σημαντικότερες πηγές εξάτμισης του νερού στην ατμόσφαιρα είναι οι ωκεανοί, οι λίμνες και οι ποταμοί ενώ στην εξάτμιση συμβάλλουν τα έλη, το έδαφος, η δασική βλάστηση και οι υγρές καλλιέργειες.

Διαπνοή (Transpiration) T: *Διαπνοή καλείται η διαδικασία με την οποία τα φυτά χρησιμοποιούν το νερό, για το μεταβολισμό και την ανάπτυξή τους.* Τα φυτά απορροφούν το εδαφικό νερό με το ριζικό τους σύστημα και το μεταβιβάζουν υπό μορφή υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Οι ρίζες συλλέγουν νερό από το έδαφος με τη **φωτοσύνθεση** και οι μικροσκοπικοί πόροι των φύλλων ελευθερώνουν στον αέρα το μη χρησιμοποιούμενο νερό με τη μορφή ατμού. Η διαδικασία, παρόμοια με την αφίδρωση στους ανθρώπους, είναι γνωστή ως διαπνοή. Η διαπνοή αποτελεί ανάλογη προς την εξάτμιση διαδικασία, με τη διαφορά ότι τα φυτά ελέγχουν την ποσότητα του διαπνεόμενου νερού, ανοίγοντας και κλείνοντας τα στόματα του φυλλώματος. Η διαπνοή των φυτών Τ, όπως είναι φυσικό, καθορίζεται από το βιοοικολογικό περιβάλλον που διαβιούν. Επομένως η διαπνοή Τ επηρεάζεται από βιολογικούς (είδος, υφή, δομή, επιφάνεια και πυκνότητα του φυλλώματος των φυτών) και από περιβαλλοντικούς παράγοντες (κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών, θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος, η διαθέσιμη εδαφική υγρασία). Επισημαίνεται πάντως ότι η προσέγγιση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων στη διαπνοή γίνετε αρκετά διαφοροποιημένα από ότι συμβαίνει στη καθαρή από υγρές επιφάνειες και το έδαφος εξάτμιση.

Φωτοσυνθεση: $6CO_2 + 12H_2O \rightarrow$ φώς χλωροφύλλη$\rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$

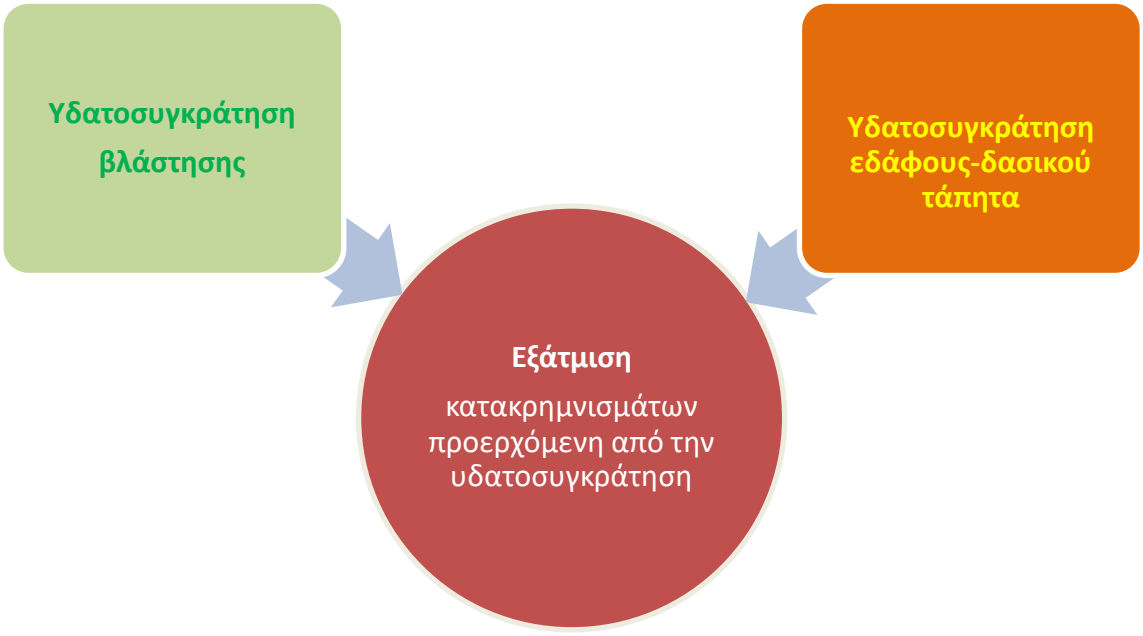
Στην πράξη, δεν είναι δυνατή η διάκριση της απώλειας της εδαφικής υγρασίας με τη μορφή της εξάτμισης (Evaporation E) και της διαπνοής (Transpiration T). Εξάτμιση όσο και η διαπνοή αποτελούν απώλεια υπό μορφή υδρατμών και επειδή σε φυτοκαλυμμένο έδαφος και είναι πρακτικά αδύνατο να διαχωρισθούν. Για το λόγο επικράτησε και χρησιμοποιείται ο ενιαίος όρος **εξατμισιδιαπνοή (Evapotranspiration** ET). Η εξατμισιδιαπνοή ή κατά πολλούς εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ) περιλαμβάνει τόσο τη διαπνοή από τη βλάστηση (Τ) όσο και την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες, το έδαφος, το χιόνι, τον πάγο και τη βλάστηση. Ο όρος εξατμισιδιαπνοή, χρησιμοποιείται για την έκφραση της διεργασίας της μεταφοράς των υδρατμών προς την ατμόσφαιρα, μιας ολικά ή μερικά καλυμμένης με βλάστηση επιφάνεια. Συνεπώς, η τροφοδοσία της ατμόσφαιρας με υδρατμούς από μη υδάτινες επιφάνειες πρακτικά γίνεται με το φαινόμενο της εξατμισιδιαπνοής.

Εξατμισιδιαπνοή (Evapotranspiration) *καλείται γενικά η με μορφή υδρατμών συνολικά αποβαλλόμενη ποσότητα νερού από την επιφάνεια της κόμης ή της κομοστέγης της δασικής βλάστησης, εκφρασμένη σε mm ύψους βροχής ή ως ποσοστό % του πίπτοντος ύψους βροχής ή ακόμη και σε gr νερού*

ή σε gr νερού ανά gr μάζας φυλλώματος. Από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει ότι η **εξατμισιδιαπνοή** αποτελεί το άθροισμα της **εξάτμισης (Evaporation)** της στην κόμη των φυτών συγκρατηθείσας ποσότητας νερού (υδατοσυγκράτηση) και της **διαπνοής (Transpiration)**, που διεξάγεται από το φύλλωμα της δασικής βλάστησης. Η διάκριση του φαινομένου σε δύο φάσεις έχει ιδιαίτερη σημασία για την Δασική Υδρολογία. Αντίθετα στη Γενική Υδρολογία, για πρακτικούς δασοϋδρολογικούς σκοπούς, ο διαχωρισμός αυτός συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη. Το φαινόμενο της αποβολής υδρατμών από μια επιφάνεια χαρακτηρίζεται συνήθως ως εξάτμιση, εξετάζεται δε και αναφέρεται ενιαία, ανεξάρτητα του εάν σημαντικό μέρος του νερού αυτού οφείλεται στο φαινόμενο της διαπνοής.

Ο υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής αφορά τόσο τη **Δυνητική (Potential) ή Δυναμική εξατμισιδιαπνοή** (ETp ή PE ή PET)* όσο και την **Πραγματική (Real) ή αληθή εξατμισιδιαπνοή*** (ETr ή AE). Ο όρος εξατμισιδιαπνοή εισήχθη για πρώτη φορά από τον Thornthwaite (1948), σύμφωνα με τον οποίο, η δυνητική η δυναμική εξατμισιδιαπνοή (ETp)* ορίζεται ως η υδροκατανάλωση της βλάστησης (έκφραση των απωλειών εδαφικού νερού από τη βλάστηση), υπό καθεστώς συνεχούς επάρκειας εδαφικής υγρασίας. Την ίδια εποχή ο Penman (1948) ανέπτυξε την πρώτη βασιζόμενη σε κλιματικά δεδομένα εξίσωση και περιέγραψε τη δυνητική εξατμισιδιαπνοή. Στην πραγματικότητα η εξατμισιδιαπνοή εξαρτάται από το έδαφος, την καλλιέργεια και τους κλιματικούς παράγοντες, χωρίς να είναι εύκολο να προσδιοριστούν επακριβώς αυτές οι επιδράσεις. Κατά τον Penman και τους συνεργάτες του (1948), ως δυνητική ή δυναμική εξατμισιδιαπνοή* ορίζεται η εξάτμιση μιας εκτεταμένης επιφάνειας καλυπτόμενης από μικρού ύψους και ενιαίου ύψους πράσινης βλάστησης, που σκιάζει απόλυτα το έδαφος και στην οποία υπάρχει πάντοτε πλήρης επάρκεια νερού. Από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει ότι η δυνητική ή δυναμική εξατμισιδιαπνοή εκφράζει το μέγιστο της δυνατής απώλειας νερού λόγω εξάτμισης από μια φυτοκαλυμμένη περιοχή. Η **δυνητική λοιπόν εξατμισιδιαπνοή πραγματοποιείται σε πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες με χλωρίδα επιφάνειες, κάτω από συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού**. Όπως προκύπτει από τους παραπάνω ορισμούς **η πραγματική εξατμισιδιαπνοή είναι πάντοτε μικρότερη της δυνητικής, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες, όπου πολύ συχνά σχεδόν μηδενίζεται, ενώ είναι ίση όταν υπάρχει υπερεπάρκεια προσφερόμενης υγρασίας.**

* *Θεωρούμε ότι η παραπάνω έννοια αποδίδεται καλύτερα με τον όρο Δυναμικό Εξατμισιδιαπνοής ή Μέγιστη Δυνατότητα Εξατμισιδιαπνοής. Για το λόγο αυτό όπου στη συνέχεια χρησιμοποιούμε τον όρο Δυναμικό Εξατμισιδιαπμοής (Δ.Ε.) ή Μέγιστη Δυνατότητα Εξατμισιδιαπνοής (Μ.Δ.Ε.), οι έννοιες αυτές ταυτίζονται με τη Δυνητική ή Δυναμική Εξατμισιδιαπνοή.*



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση της σχέσης εξάτμισης και υδατοσυγκράτησης.

2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗ

Η δυνητική ή δυναμική εξατμισιδιαπνοή (ETp ή PE ή PET) ουσιαστικά καθορίζεται αποκλειστικά από μετεωρολογικούς παράγοντες, σε αντίθεση με την αληθή ή πραγματική εξατμισιδιαπνοή που διαμορφώνεται από έναν συνδυασμό μετεωρολογικών και εδαφικών παραγόντων, καθώς και των παραγόντων που διαμορφώνουν τη φυτοκάλυψη της περιοχής. Οι σημαντικότεροι μετεωρολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη **δυναμική εξατμισιδιαπνοή** (ETp) είναι:

- η ηλιακή ακτινοβολία,
- η θερμοκρασία,
- η ατμοσφαιρική υγρασία
- ο άνεμος

Γενικά, η δυνητική εξατμισιδιαπνοή αυξάνεται με την θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου και μειώνεται με την αύξηση της σχετικής υγρασίας. Σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία αέρα, η αύξησή τους προκαλεί επιτάχυνση της φωτοσύνθεσης και της κυκλοφορίας του νερού στο φυτό, με επακόλουθο την αύξηση της ημερήσιας και εποχιακής διαπνοής. Η αύξηση αυτή εμφανίζει ένα μέγιστο κατά τη διάρκεια της ημέρας ή των θερινών μηνών και ένα ελάχιστο κατά τη διάρκεια της νύχτας ή των χειμερινών μηνών.

Παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις της επίδρασης της βλάστησης στη Δυνητική Εξατμισιδιαπνοή ETp. Όμως, είναι κοινή η διατύπωση ότι η ανακλαστικότητα της φυτικής κάλυψης

επηρεάζει το ενεργειακό ισοζύγιο της εξατμίζουσας επιφάνειας και επομένως το ρυθμό της Δυνητικής Εξατμισιδιαπνοής ETp. Με δεδομένο ότι η Δυναμική Εξατμισιδιαπνοή ETp είναι δυνατή, μόνο όταν στη φυτική κάλυψη δεν καταγράφεται έλλειμμα νερού, προκύπτει άμεσα ο βαθμός εξάρτησής της από την υγρασιακή πληρότητα. Παράλληλα είναι αρκετά δύσκολος και πολύπλοκος ο καθορισμός του ρυθμού μείωσης της υγρασίας του εδάφους, κάτω από την οποία παύει να πραγματοποιείται η Δυνητική Εξατμισιδιαπνοή ETp. Από σχετικές έρευνες και μετρήσεις γίνεται αποδεκτό ότι το σημείο του μαρασμού των φυτών αποτελεί μία καλή προσέγγιση του κατώτατου ορίου της εδαφικής υγρασίας, από όπου το φυτό μπορεί να αντλεί νερό για την πραγματοποίηση του φαινομένου της διαπνοής. *Το κατώτατο αυτό όριο, που ποικίλλει, για τους διάφορους τύπους εδαφών, θεωρείται ότι βρίσκεται στα 4 cm νερού, ανά 100 cm βάθος αμμώδους εδάφους και φθάνει τα 17 cm ή και περισσότερο για βάθος 100 cm πλουσίου λεπτοφυούς εδάφους (αργιλώδη, πηλώδη εδάφη). Όπως είναι φυσικό, για τα συνήθως μικρού πάχους δασικά εδάφη (0,20÷0,80 m) οι παραπάνω αναφερθείσες ποσότητες μειώνονται σημαντικά.*

Η πραγματική ή αληθής εξατμισιδιαπνοή (ETr ή AE), πέραν των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό της δυνητικής ETp, επηρεάζεται εκτός των άλλων και από:

- την έλλειψη υγρασίας,
- το βαθμό πυκνότητας της βλάστησης
- το είδος και το στάδιο της ανάπτυξης της βλάστησης μιας περιοχής.

Σχήμα 2. Σχέση Πραγματική –δυνητικής εξατμισιδιαπνοής και εξάρτώμενοι παράγοντες.

Έτσι, στο αρχικό στάδιο της ανάπτυξης των φυτών, έχουμε μια τάση αύξησης της αληθούς εξατμισιδιαπνοής ETr, ενώ στα τελευταία στάδια (καρποφορία, ωρίμανση κλπ), ή κατά τη διάρκεια του Φθινοπώρου η πραγματική εξατμισιδιαπνοή ελαττώνεται και αποκλίνει σημαντικά από τις τιμές της αντίστοιχης δυνητικής ή δυναμικής εξατμισιδιαπνοής ETp. **Ουσιαστικά εφόσον υπάρχει επάρκεια εδαφικής υγρασίας η αληθής ή πραγματική εξατμισιδιαπνοή ETr θεωρείται ότι ταυτίζεται με τη δυνητική ETr (ETr=ETp**). Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της ακμής της βλαστιτικής περιόδου κάθε μορφής βλάστησης, ενώ υπολείπεται κατά τις λοιπές φάσεις της βλαστητικής περιόδου και ιδιαίτερα κατά τη φάση της πλήρους αναστολής της.

Η **εξάτμιση** είναι καθοριστικής σημασίας στον παγκόσμιο υδρολογικό κύκλο: **περίπου τα 2/3 των κατακρημνισμάτων επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα** (Πίνακας 1). Η εξάτμιση είναι σημαντικός δείκτης στρεσαρίσματος της βλάστησης και χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση των συνθηκών ξηρασίας και χρησιμοποιείται στη διαχείριση του νερού, την εκτίμηση της οικοσυστημικής υγείας και την αγροτική παραγωγή. Η εξάτμιση εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- ✓ την ηλιακή ακτινοβολία,
- ✓ το γεωγραφικό πλάτος,
- ✓ την εποχή του έτους,
- ✓ το υψόμετρο,
- ✓ την ώρα της ημέρας,
- ✓ τη νέφωση
- ✓ τη διαθέσιμη προς εξάτμιση ποσότητα υγρασίας. Η εξάτμιση ως διαδικασία μεταφοράς νερού προς την ατμόσφαιρα, με τη μορφή υδρατμών, εξαρτάται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία, την πίεση των υδρατμών, την ταχύτητα του ανέμου και τη φύση της επιφάνειας εξάτμισης.

Η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη την ημέρα από τη νύχτα, τη θερμή από την ψυχρή περίοδο και σε προσήνεμες από ότι σε υπήνεμες περιοχές. Όπως είναι φυσικό η ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται από τους σημαντικότερους παράγοντες της εξάτμισης, γιατί προσκομίζει την απαιτούμενη ενέργεια. Η εξάτμιση μετράται συνήθως ως η απώλεια μάζας νερού ανά μονάδα επιφάνειας σε ορισμένο χρονικό διάστημα (συνήθως λαμβάνεται το έτος). Εναλλακτικά, μετράται ως ισοδύναμο ύψος νερού εξάτμισης σε mm, σε ορισμένο χρονικό διάστημα.

Ο Πίνακας 2, παρέχει τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας, για τα γεωγραφικά πλάτη $36^{o} \div 46^{o}$ του βορείου ημισφαιρίου (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999). Παράλληλα η εξάτμιση σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου* και της διαφοράς της πίεσης των υδρατμών μεταξύ του νερού και του υπερκείμενου στρώματος αέρα. Οι

* Ο Αριστοτέλης θεωρούσε ότι ο άνεμος επηρεάζει περισσότερο την εξάτμιση από ότι ο ήλιος, ενώ ο Dalton το 1982 έθεσε τις αρχές της σύγχρονης αντίληψης του φαινομένου της εξάτμισης, την οποία θεωρούσε ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας, του ανέμου, της περιεκτικότητας του ανέμου σε υγρασία και τα τοπογραφικά-γεωφυσικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

παραπάνω παράγοντες είναι ισχυρά αλληλοεξαρτώμενοι με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η ακριβής επιμέρους αποτίμισή τους.

Πίνακας 1: Παγκόσμιο Υδατικό ισοζύγιο για τη στεριά και σχέση κατακρημνισμάτων και συνολικής γήϊνης εξάτμισης. (Livia Peiser)

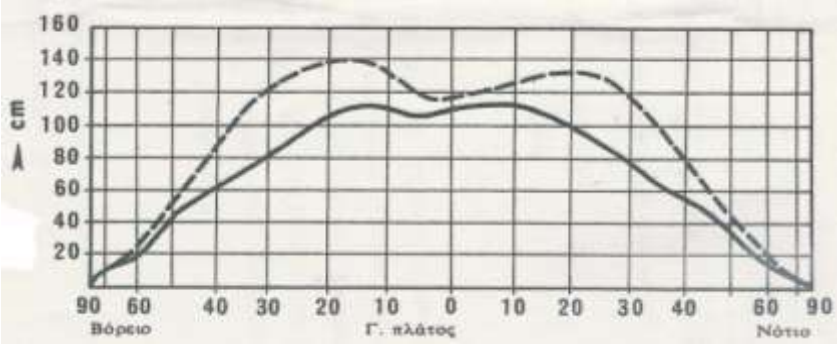
Παγκόσμιο υδατικό ισοζύγιο Ξηράς	10^9 m^3	(mm)
Κατακρημνίσματα	105.316	805
Εξάτμισης συντηρούμενη από βροχή	61.106	467
Ανανεώσιμοι υδατικοί πόροι	44.211	338
Σταδιακή εξάτμιση από ανοιχτές υδατοσυλλογές	1.184	9
Σταδιακή εξάτμιηση από υγροτόπους	2.899	22
Σταδιακή εξάτμισης από άρδευση	1.268	10
Εκροή στη θάλασσα	38.859	297

Πίνακας 2: Μέσες μηνιαίες τιμές της αφικνούμενης ηλιακής ακτινοβολίας S_o σε kj/(m^2d) για γεωγραφικά πλάτη (φ) 36°÷46° του Βορείου Ημισφαιρίου.

Μήνας	**Γεωγραφικό πλάτος φ (°)**					
	36	**38**	**40**	**42**	**44**	**46**
Ιαν.	17.604	16.383	15.156	13.926	12.696	11.470
Φεβ.	22.349	21.230	20.092	18.935	17.762	16.575
Μάρ.	28.967	28.100	27.198	26.265	25.300	24.305
Απρ.	35.447	34.964	34.441	33.878	33.278	32.641
Μάϊ.	39.820	39.711	39.564	39.380	39.161	38.908
Ιούν.	41.571	41.658	41.711	41.730	41.718	41.677
Ιούλ.	40.725	40.731	40.701	40.637	40.539	40.410
Αύγ.	37.255	36.942	36.590	36.199	35.771	35.306
Σεπτ.	31.510	30.800	30.053	29.271	28.453	27.601
Οκτ.	24.651	23.624	22.571	21.494	20.395	19.274
Νοέ.	18.879	17.689	16.488	15.279	14.065	12.849
Δεκ.	16.230	14.993	13.755	12.519	11.289	10.069

Γεωγραφική κατανομή των τιμών της δυνητικής ETp και της πραγματικής ETr εξατμισιδιαπνοής (ETr)

Οι τιμές τόσο της δυνητικής ETr όσο και της πραγματικής ETr εξατμισιδιαπνοής ελαττώνονται από τα τροπικά γεωγραφικά πλάτη προς τους πόλους, λόγω μείωσης της βλαστητικής περιόδου και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ ως εξαρτώμενες από τις διαθέσιμες ποσότητες εδαφικού νερού, στις ερήμους λαμβάνουν πάρα πολύ μικρές τιμές. Οι κατά γεωγραφικό πλάτος, διακυμάνσεις, των μέσων ετησίων τιμών της πραγματικής ETr και της δυνητικής ETp εξατμισιδιαπνοής παρέχονται στο Σχήμα 3, όπου διακρίνονται δύο μέγιστα των τιμών της δυνητικής ETp εξατμισιδιαπνοής στη ζώνη γεωγραφικού πλάτους 15°-20°.

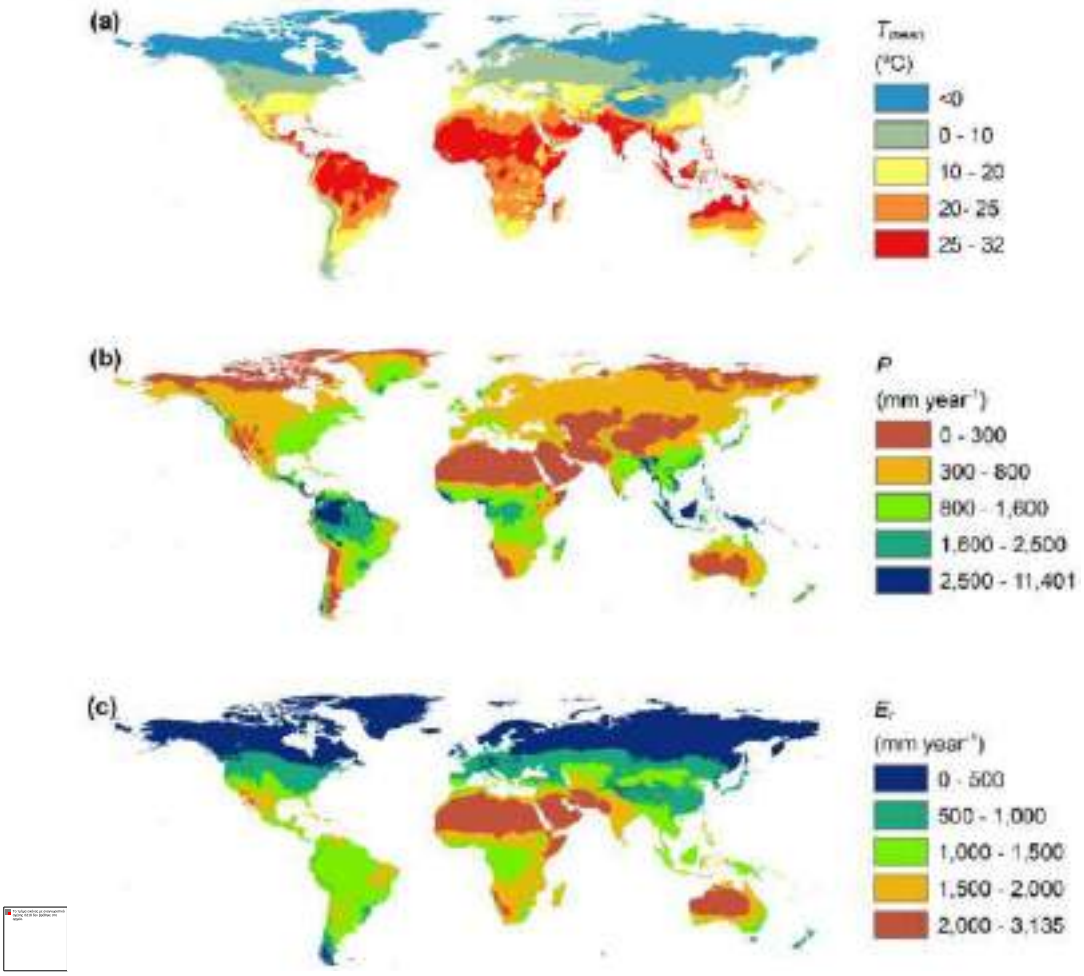


Σχήμα 3: Η κατά γεωγραφικό πλάτος μεταβολή των τιμών της Πραγματικής (ETr) (——) και της Δυνητικής (ETp) (----) Εξατμισιδιαπνοής (Threwartha, 1961)*.

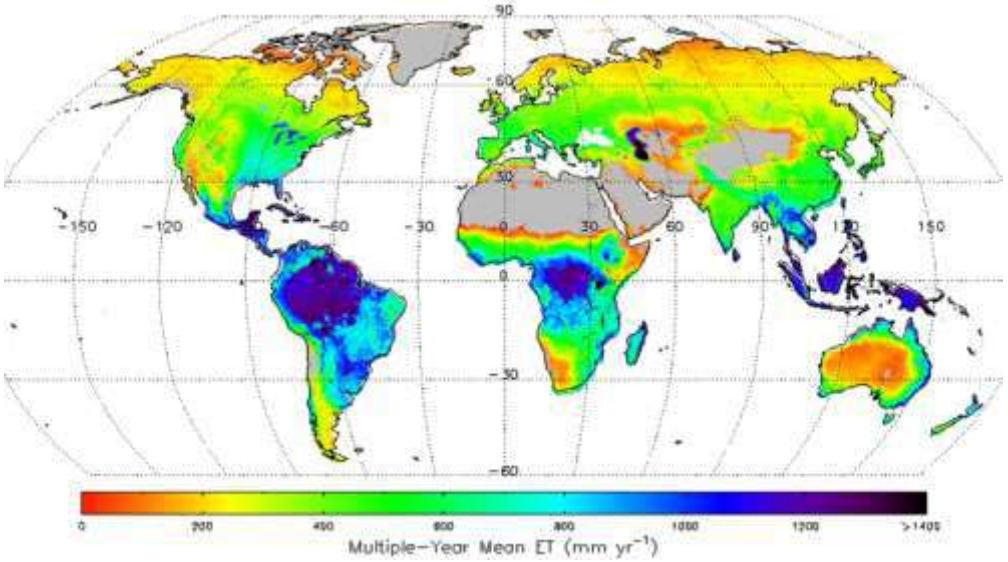
Τα 2/3 και πλέον της συνολικής ποσότητας της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής ETr συντελείται στην ζώνη της γης που περιλαμβάνεται μεταξύ των παραλλήλων φ=30° Β και φ=30° Ν, η οποία καταλαμβάνει περίπου το ½ της γήινης επιφάνειας. Επισημαίνεται ότι όπως είναι φυσικό, **στα περισσότερα γεωγραφικά πλάτη, η πραγματική εξατμισιδιαπνοή είναι μεγαλύτερη στους ωκεανούς λόγω της εξάτμισης του νερού, από ότι στις ηπείρους. Το φαινόμενο όπως αντιστρέφεται περί τον Ισημερινό, στη ζώνη (ΓΠ 0°÷10°), στην οποία οι τιμές της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής ETr στην ξηρά καθίστανται μεγαλύτερες από εκείνες των ωκεανών.** Αυτό συμβαίνει λόγω των εντόνων και συχνών βροχοπτώσεων στη ζώνη αυτή και των ιδιαίτερα υψηλών τιμών πραγματικής εξατμισιδιαπνοής ETr των τροπικών δασών. Συχνά οι ιδιαίτερες τιμές μιας περιοχής διαφοροποιούν τα παραπάνω στοιχεία. Έτσι η μεγάλη τιμή της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής ETr των ανατολικών ακτών των Η.Π.Α., αποδίδεται στο θερμό ρεύμα του Κόλπου που προκαλεί έντονη και ταχεία εξάτμιση όταν ψυχρές-ξηρές ηπειρωτικές αέριες μάζες κινούνται πάνω από τις περιοχές αυτές. Ανάλογο μέγιστο των τιμών της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής ETr, αν και λιγότερο έντονο, σημειώνεται ανοιχτά των ανατολικών ακτών της Ασίας.

Η μέση ετήσια κατανομή της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής στην **Ευρώπη** δίνεται στο Σχήμα 4, από όπου προκύπτει ότι υπάρχει βαθμιαία μείωση των τιμών της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής με το γεωγραφικό πλάτος. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αποδίδονται στην παρεμβολή οροσειρών όπου η εξάτμιση είναι μικρότερη, καθώς και στην περμπόδιση της πορείας ή την μεταβολή της υγρασιακής πληρότητας των κινούμενων μαζών. Στον **Ελλαδικό χώρο** η μέση ετήσια κατανομή της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής ETr με τη μέθοδο των Thornthwaite παρουσιάζει ένα μέγιστο στην ηπειρωτική κεντρική και νότια Ελλάδα και ένα ελάχιστο στη Β, ΒΔ ορεινή Ελλάδα, ενώ αντίθετα η μέση μέγιστη τιμή της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής ETr επικεντρώνεται στη Δυτική Ελλάδα (ΝΔ Κρήτης, Νησιά Ιονίου, Δυτική Πελοπόννησος, Δυτική Στερεά, Ήπειρος), (Παυλίδης 2005). Η **Παγκόσμια** κατανομή ετήσιων θερμοκρασιών, κατακρημνισμάτων και εξατμισιδιαπνοής δίνεται στο Σχήμα 5. Η Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας τιμής της εξάτμισης (σε cm) στη στεριά του πλανήτη δίνεται στο Σχήμα 6. Η μέση ετήσια παγκόσμια πραγματική εξατμισιδιαπνοή στη στεριά δίνεται στο Σχήμα 7 και η μέση ετήσια παγκόσμια εξάτμιση (σε cm) πάνω από τους ωκεανούς την περίοδο 1958-2005 δίνεται στο Σχήμα 8.

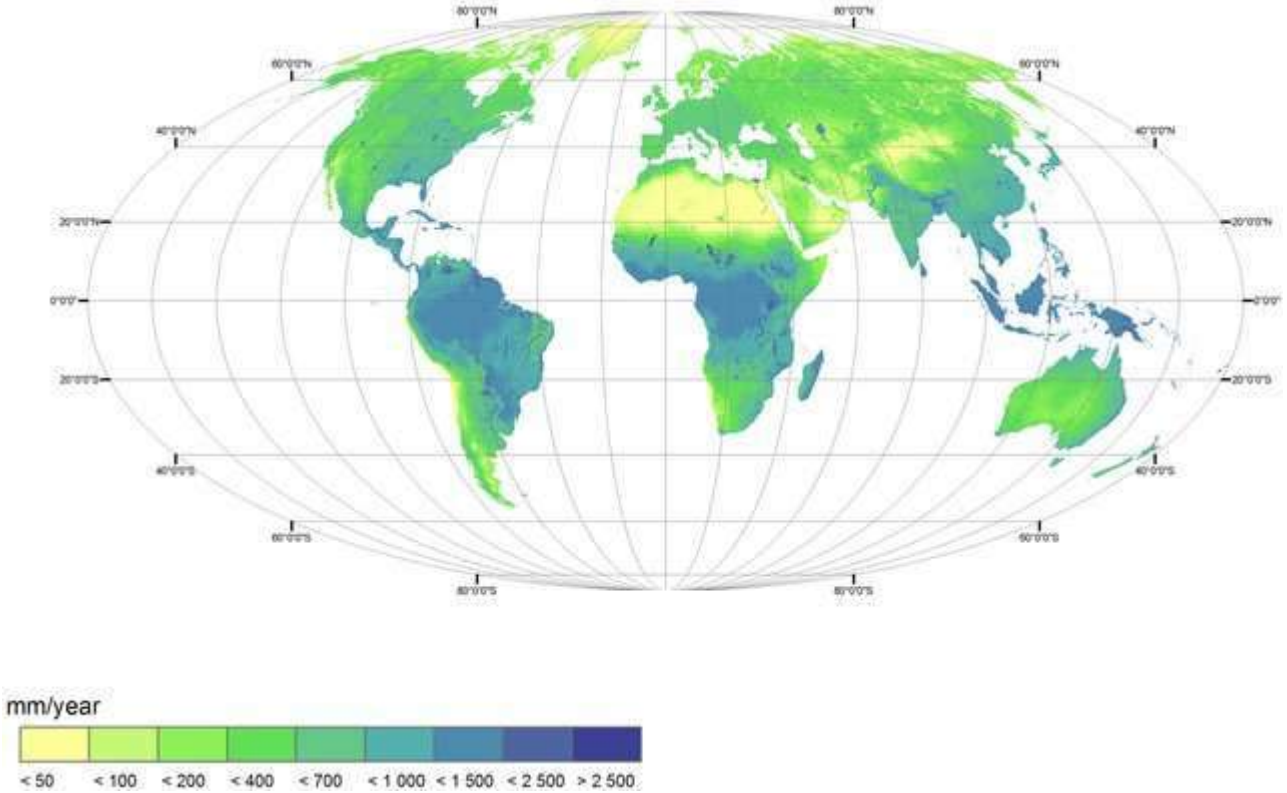
Σχήμα 4 : Κατανομή της μέσης ετήσιας τιμής της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής (σε mm) στην Ευρώπη (Ward, 1967).



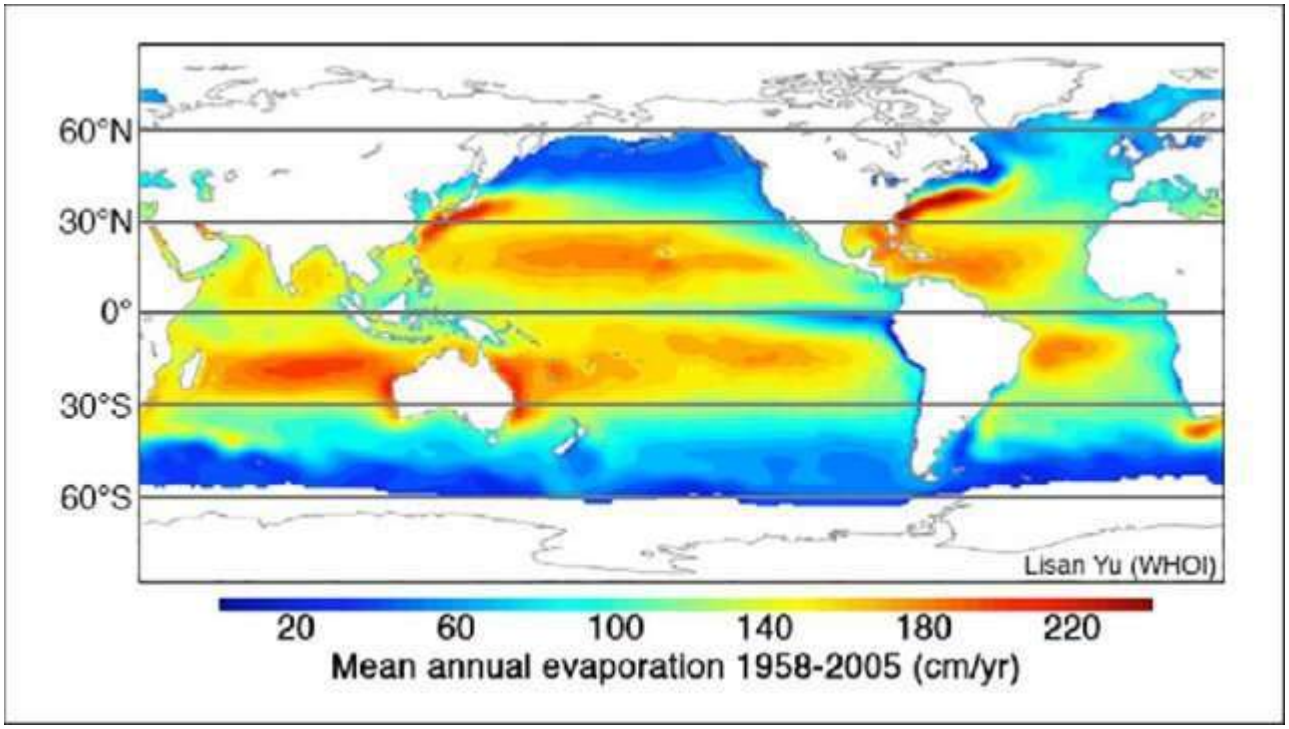
Σχήμα 5. Παγκόσμια κατανομή ετήσιων θερμοκρασιών, κατακρημνισμάτων και εξατμισιδιαπνοής (Aschonitis et. al, 2021).



Σχήμα 6: Γεωγραφική κατανομή της μέσης ετήσιας τιμής της εξάτμισης (σε cm) στην ξηρά του πλανήτη. (Πανεπιστήμιο της Μοντάνα, ΗΠΑ, https://www.umt.edu/numerical-terradynamic-simulation-group/project/global-et.phpavailable/)



Σχήμα 7. Μέση ετήσια παγκόσμια πραγματική εξατμισιδιαπνοή στη στεριά (Livia Peiser, Hoogeveen et al., 2015)



Σχήμα 8. Μέση ετήσια παγκόσμια εξάτμιση (σε cm) πάνω από τους ωκεανούς την περίοδο 1958-2005.
(COMET, http://meted.ucar. edu/ of the University Corporation for Atmospheric Research)

Η εξάτμιση διαχωρίζεται στην εξάτμιση από εδαφικές και υδατικές επιφάνειες και ακολούθως παρατίθενται μέθοδοι υπολογισμού της εξάτμισης και της εξατμισιδιαπνοής. Ο υπολογισμός της εξάτμισης υδατικών επιφανειών για πρακτικούς λόγους παρατίθεται εντός των μεθόδων υπολογισμού της εξάτμισης –εξατμισιδιαπνοής και συγκεκριμένα στο υποκεφάλαιο «Μέθοδος μεταφοράς μάζας».

3. ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΑΠΟ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Ενώ η **δυνατότητα εξάτμισης από υδάτινες επιφάνειες είναι απεριόριστη**, σε εδαφικές επιφάνειες, κυμαίνεται μεταξύ μιας μέγιστης (κορεσμένο έδαφος) και μιας μηδενικής (ξηρό έδαφος) τιμής. Η μετρηθείσα λοιπόν εξάτμιση -σε διάφορες έρευνες- δεν αντιπροσωπεύει ταυτόχρονα και την εξάτμιση παρακείμενων υδατοσυλλογών (λίμνες κ.λ.π), αλλά μόνο των οργάνων μέτρησής της. Παράλληλα υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν την ταχύτητα και την ποσότητα εξάτμισης, κυριότεροι των οποίων είναι το βάθος και η επιφάνεια (καθρέφτης) των υδάτινων συλλογών (Λιμνών, ελών, λιμνοδεξαμενών κ.λ.π). Ένα μόνο ώριμο δέντρο ελεθευρώνει διαπνέοντας εκατοντάδες λίτρα νερού κάθε μέρα. Με το φύλλωμα να παρέχει άφθονη επιφάνεια για την ανταλλαγή, **ένα δάσος μπορεί να παρέχει στην ατμόσφαιρα περισσότερη υγρασία σε σχέση με την εξάτμιση μιάς υδάτινης επιφάνειας**[1].

Ο ρυθμός εξάτμισης από εδαφικές επιφάνειες επηρεάζεται από τους ίδιους κλιματικούς παράγοντες, που καθορίζουν την εξάτμιση ελεύθερων υδάτινων επιφανειών. Η εξάτμιση από εδαφική επιφάνεια πραγματοποιείται από τα λεπτά υδάτινα στρώματα, που περιβάλλουν τους κόκκους του

[1] *ακολουθεί σχετικό παράδειγμα που παρατίθεται στον υπολογισμό λιμναίας εξάτμισης τη μέθοδο Penman*

εδάφους, ή γεμίζουν τα μεταξύ τους κενά. Είναι φυσικό η εδαφική εξάτμιση να είναι μικρότερη, από ότι στις υδάτινες επιφάνειες, επειδή δεν υπάρχουν μεγάλα αποθέματα νερού διαθέσιμα για εξάτμιση. Η ταχύτητα της εδαφικής εξάτμισης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, η ύπαρξη ελεύθερου υδροφορέα, τα εδαφικά χαρακτηριστικά, το χρώμα του εδάφους κ.λ.π. Ειδικότερα οι παράγοντες αυτοί έχουν ως εξής:

I. Η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία

Η ταχύτητα εξάτμισης από μια εδαφική επιφάνεια επηρεάζεται καταλυτικά από την υπάρχουσα ποσότητα της εδαφικής υγρασίας. Έτσι ελαττωμένης της εδαφικής υγρασίας μειώνεται η εδαφική εξάτμιση, ενώ αυξάνει κατακόρυφα αυξανομένης της εδαφικής υγρασίας. Όταν η εδαφική υγρασία μηδενισθεί τότε μηδενίζεται και η εδαφική εξάτμιση. Επισημαίνεται πάντως ότι η έντονη εξάρτηση της εξάτμισης από τα κορεσμένα με υγρασία εδάφη αφορούν μόνο τα επιφανειακά εδαφικά στρώματα. Για το λόγο αυτό με τον όρο περιεκτικότητα σε υγρασία ενός εδάφους χαρακτηρίζεται εκείνο το επιφανειακό εδαφικό στρώμα του οποίου η επίδραση στο ρυθμό εξάτμισης είναι πολύ σημαντική. Τα βαθύτερα στρώματα, ενώ μπορεί να είναι κορεσμένα με υγρασία -λόγω της πολύ βραδείας ανοδικής μεταφοράς της προς την επιφάνεια- επηρεάζουν σε πολύ μικρό βαθμό την λαμβάνουσα χώρα εξάτμιση από την υπερκείμενη εδαφική επιφάνεια.

Επειδή η εδαφική υγρασία των μη καλλιεργούμενων (αρδευόμενων) εδαφών καθορίζεται αποκλειστικά από τις βροχοπτώσεις, προκύπτει ότι το ύψος, η κατανομή και τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες της εδαφικής εξάτμισης. Με την παραδοχή ότι οι κλιματικές-φυσικογεωγραφικές συνθήκες μιας περιοχής παραμένουν αμετάβλητες, η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη σε εδαφική επιφάνεια διαβρεχόμενη από μια ήπια-διαλείπουσα βροχή, παρά στην ίδια επιφάνεια που κορέστηκε, από μια ραγδαία βροχόπτωση, του ίδιου βροχομετρικού ύψους.

II. Χαρακτηριστικά του εδάφους

Στις περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις αποτελούν το μόνο προσαγωγό σύστημα υγρασίας στο έδαφος, όπως συμβαίνει στα δασικά εδάφη και τις εν γένει μη καλλιεργούμενες δασικές εκτάσεις, η ένταση της εξάτμισης εξαρτάται αποκλειστικά από την ικανότητα του δασικού εδάφους να αντλεί νερό από τα υποκείμενα εδάφη. Η ένταση του ρυθμού άντλησης της υποκείμενης εδαφικής υγρασίας εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα εδαφικά χαρακτηριστικά και ιδιαίτερα από το μέγεθος, τη δομή και την υφή των εδαφοστρωμάτων. Σε εδάφη με λεπτόκοκκη υφή (πηλώδη, αργιλώδη), η ανυψωτική δύναμη του τριχοειδούς είναι δυνατόν να φθάσει το 1m και περισσότερο, ενώ σε χονδρόκκοκα εδάφη (αμμώδη, χαλικώδη), αυτή περιορίζεται σε μερικά μόνο εκατοστά. Επισημαίνεται πάντως ότι η ταχύτητα της ανοδικής κίνησης του νερού είναι αντιστρόφως ανάλογη του βάθους (ύψους) άντλησης του νερού.

III. Χρώμα του εδάφους

Το χρώμα του εδάφους, ανάλογα με τη χρωματική του απόχρωση (albedo) ρυθμίζει την ποσότητα της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας και μέσω αυτής επηρεάζει την εξατμιζόμενη από το έδαφος υγρασία. Έτσι τα σκουρόχρωμα εδάφη εμφανίζουν αυξημένο ρυθμό εξάτμισης, ενώ τα ανοιχτόχρωμα μειωμένο.

IV. Φρεάτιος (υδροφόρος) ορίζοντας

Η εξάτμιση μιας εδαφικής επιφάνειας σε συνδυασμό με το βαθμό ικανότητας τριχοειδούς ανύψωσης του εδάφους επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία και το απαντώμενο βάθος, υποκείμενων υδροφόρων οριζόντων. Το μέγιστο της εξάτμισης σημειώνεται όταν ο υδροφόρος ορίζοντας φθάνει μέχρι την εξατμίζουσα εδαφική επιφάνεια, ενώ αντίθετα η εξάτμιση μειώνεται ταχύτατα όσο το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα γίνεται μεγαλύτερο.

V. Παρουσία βλάστησης

Η παρουσία βλάστησης αποτελεί τον πιο πολύπλοκο παράγοντα υπολογισμού της εδαφικής εξάτμισης καθόσον τα δομικά χαρακτηριστικά της (είδος, ύψος, μορφή, εδαφοκάλυψη κλπ) δεν επιτρέπουν τον λεπτομερή καταμερισμό του βαθμού επίδρασής της στη συντελούμενη εξάτμιση. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η παρουσία βλάστησης ελαττώνει το ρυθμό της εξάτμισης του εδάφους ως εξής: Αρχικά η βλάστηση -ιδιαίτερα η δασική- μειώνει την αφικνούμενη στο έδαφος ποσότητα των κατακρημνισμάτων μέσω του φαινομένου της υδατοσυγκράτησης μειώνοντας έτσι την εδαφική υγρασία. Σε αντιδιαστολή όμως μειώνει σημαντικά την αφικνούμενη στο έδαφος άμεση ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας, αλλά και την ταχύτητα του ανέμου (μείωση της ταχύτητας απαγωγής των δημιουργούμενων υδρατμών) και επομένως και την εξάτμιση. Παράλληλα επηρεάζει την εξάτμιση αυξάνοντας την υγρασία των παρεδαφίων αερίων στρωμάτων. Στην υγροποίηση του περεδαφιαίου αέρα, την πρωινή δρόσο που εμφανίζεται στο φύλλωμα, στηρίζουν την επιβίωσή του πολλά είδη πανίδας. Η βλάστηση, ιδιαίτερα η υψηλή δενδρώδης δασική βλάστηση, με το ισχυρό και πλούσιο ριζικό σύστημα αφενός αντλεί νερό από υποκείμενα εδαφικά υγρά στρώματα εδάφους αυξάνοντας έμμεσα την μέσω της διαπνοής απώλεια του νερού προς την ατμόσφαιρα και αφετέρου διασωληνώνοντας το έδαφος αυξάνει τα εδαφικό πορώδες και τη δομή του εδάφους συντελώντας έτσι στον ταχύτερο εμπλουτισμό των δασικών εδαφών με υγρασία (εφόσον υπάρχουν αυξημένα κατακρημνίσματα).

V.1. Εξατμισιδιαπνοή δασικών δέντρων

Ως συνολική εξατμισιδιαπνοή των δασικών ειδών θεωρείται το άθροισμα της διαπνοής και της υδατοσυγκράτησης τους, το οποίο εξατμιζόμενο επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Όπως προαναφέρθηκε, ένα μόνο ώριμο δέντρο ελεθευρώνει διαπνέοντας εκατοντάδες λίτρα νερού κάθε μέρα. Η διαπνοή εξαρτάται τόσο από τις σταθμολογικές συνθήκες (κλίμα, υγρασία, δομή και θρεπτικά συστατικά του

εδάφους κ.λ.π.), όσο και από το είδος των δένδρων (κωνοφόρα, πλατύφυλλα), την ηλικία, τη φύση και τα χαρακτηριστικά του φυλλώματος. Από άποψη ειδικής διαπνοής τα κωνοφόρα αλλά και τα σκιόφυτα είδη διαπνέουν γενικά λιγότερο από τα πλατύφυλλα είδη και φωτόφυτων. Η κατάταξη αυτή, μπορεί να μεταβληθεί ή ακόμη και να αντιστραφεί ανάλογα με την πυκνότητα του φυλλώματος των δένδρων. Στα φύλλα των πλατυφύλλων, σε σύγκριση με τις βελόνες των κωνοφόρων, η διαπνοή αρχίζει πιο νωρίς, με αποτέλεσμα η διαπνοή των πλατυφύλλων να φθάνει σε υψηλά επίπεδα. Ο Πίνακας 3 που ακολουθεί παρέχει μια εικόνα της διαπνοής μερικών δασικών δένδρων, θάμνων και ποών (Lyr, Polster, Fiedler, 1967)* όπου προκύπτει ότι σε αναλογία προς το χλωρό τους βάρος, οι θάμνοι καταναλώνουν μεγαλύτερες ποσότητες νερού, συχνά και από τα πλέον απαιτητικά δασικά δένδρα.

Πίνακας 3: Ημερήσια διαπνοή δένδρων, θάμνων και ποών, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Berger-Landefeldt (1948), Pisek και Cartellieri (1939), Polster (1950, 1957) και Stocker (1929*), (Lyr, Polster, Fiedler, 1967)*.*

	Ε ί δ ο ς	**Διαπνοή gr H_2O/gr νωπής μάζας φύλλου ή βελόνας**
α.	Δένδρα, Θάμνοι	
	Populus alba	13-14
	Populus (τμήμα aigeiros)	9-15
	Betula pendula	8.1
	Quercus robur	6.0
	Corylus avellana	4.2
	Fagus sylvatica	3.9
	Larix decidua	3.8
	Pinus cembra	2.2
	Pinus strobus	2.1
	Pinus sylvestris	2.0
	Picea abies	1.4
	Pseudotsuga menziessii	1.3
β.	Ποώδης βλάστηση	
	Stachys recta	18.0
	Leontondon incanus	15.0
	Oxalis acetosella	1.5-2.0

Γενικά τα υγρόφυλλα πλατύφυλλα είδη όπως το σκλήθρο, η ιτιά, ο πλάτανος, η λεύκη κ.λ.π., θεωρούνται είδη μεγάλης διαπνευστικής ικανότητας (Leibundgut, 1970)*. Το συμπέρασμα αυτό, ιδιαίτερα όσον αφορά το σκλήθρο, την ιτιά και τον πλάτανο, δεν στηρίζεται τόσο σε αποτελέσματα σχετικών μετρήσεων, όσο στην κατεξοχήν στην οπτική καταγραφή και παρατήρηση της φυσικής εξάπλωση ή εμφάνισης των ειδών αυτών, που αναπτύσσονται αποκλειστικά σε υγρές ή κάθυγρες θέσεις.

V.2. Εξατμισιδιαπνοή δασικών συστάδων

Η εξατμισιδιαπνοή του δάσους είναι η διαπνοή της βλάστησης και η εξάτμιση που προέρχεται από την υδατοσυγκράτηση του δασικού τάπητα και του εδάφους και την υδατοσυγκράτηση της δασικής βλάστησης. Διαφορές στη δομή των συστάδων επηρεάζουν κυρίως τα επιμέρους ποσοστά της διαπνοής και της εδαφικής εξάτμισης, αλλά όχι το αθροιστικό τους ποσοστό (αναφορές εντός Momiyama κ.α.,

2023). Εντός των δασικών συστάδων, λόγω της απομόνωσης του ενδοσυσταδικού περιβάλλοντος, της μείωσης του ανέμου, αλλά και της ισχυρής σκίασής τους, καταγράφεται σημαντική μείωση της τιμής της εξατμισιδιαπνοής. Επομένως οι τιμές εξατμισιδιαπνοής των δασοσυστάδων εξαρτώνται κατεξοχήν από το ιδιαίτερο ενδοσυσταδικό περιβάλλον κάθε συστάδας, εκτός από το δασικό είδος και από τη συγκρότηση, τη δομή, την ηλικία της συστάδας.

Από άποψη δασικού είδους ο Πίνακας 4 παρέχει την κατά τον Polster* μέση ημερήσια διαπνοή διαφόρων συστάδων, ανάλογα με τη χλωρή τους μάζα σε mm βροχής / ha / ημέρα, μήνα ή έτος. Παρόλο που οι τιμές του Πίνακα 4 θεωρούνται σημαντικές, εντούτοις, προκύπτει σαφώς ότι οι διαφορές διαπνοής μεταξύ πλατυφύλλων και κωνοφόρων ειδών στις δασικές συστάδες εμφανίζονται περισσότερο συγκλίνουσες από ότι οι αντίστοιχες των μεμονωμένων δένδρων. Στα κωνοφόρα αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διατήρηση του φυλλώματός τους και επομένως τη διατήρηση κάποιας μικρής διαπνοής ακόμη και τον χειμώνα. Γενικά η διαπνοή των δασικών συστάδων θεωρείται συνάρτηση της μάζας των φύλλων ή των βελονών αυτών. Αντίθετα με τις τιμές του Polster, ο Raber (1937)* όσον αφορά τις ετήσιες τιμές της διαπνοής δίνει, για τις συστάδες των διάφορων δασοπονικών ειδών, τις ακόλουθες, κατά πολύ μικρότερες τιμές ετήσιας διαπνοής:

- συστάδες ξηρόφυτων κωνοφόρων, όπως η **πεύκη** 75 mm/έτος
- συστάδες ξηρόφυτων πλατυφύλλων, όπως η **δρυς** 120 mm/έτος
- συστάδες μεσόφυτων κωνοφόρων, όπως η **ερυθρελάτη** 215 mm/έτος
- συστάδες ξηρόφυτων πλατυφύλλων, όπως η **οξυά** 260 mm/έτος

Πίνακας 4: *Διαπνοή συστάδων, κωνοφόρων & πλατυφύλλων κατά Polster (1954)*, (Lyr, Polster, Fiedler, 1967).*

Δασοπονικό είδος	**Μέση ημερήσια διαπνοή φύλλων (gr ύδατος ανά gr μάζας φύλλου)**	**Διαπνοή συστάδων (mm βροχής / ha)**	
		ημερήσια	ετήσια
Betula verrucosa	8,1	4,0	430-480
Fagus sylvatica	3,9	3,1	320-370
Larix decidua	3,8	4,6	460-580
Pinus sylvestris	2,0	2,1	240-300
Picea abies	1,4	3,7	390-450
Pseudotsuga menziessii	1,3	4,7	480-580

Η ηλικία των δένδρων επηρεάζει την διαπνοή, τόσο μέσω της αύξησης του φυλλώματός τους με την ηλικία, όσο και με την υφή των φύλλων των νεαρής ηλικίας ατόμων. Παράλληλα, η σχετική διαπνοή των δασικών συστάδων, ανά τόνο φυλλώματος, είναι περίπου η ίδια για όλες τις ηλικίες. Με την ηλικία όμως μεταβάλλεται η πυκνότητα του φυλλώματος της κομοστέγης και επομένως διαφοροποιείται σημαντικά η καταγραφόμενη διαπνοή. Ο Molchanov (1960) μελέτησε το φαινόμενο της εξατμισιδιαπνοής και υδατοσυγκράτησης δασοσυστάδων διαφόρων δασοπονικών ειδών στη Ρωσία (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Διαπνοή συστάδων Πεύκης και Σημύδας κατά τον Molchanov.

Είδος	Ηλικία συστάδας (έτη)	Μάζα φυλλώματος (tn/ha)	Διαπνοή σε mm			
			Θερμοδυναμική μέθοδος		Μέθοδος ισολογισμού	
			απόλυτη	σχετική	απόλυτη	σχετική
Πεύκη	10	11,5	260	22,6	-	-
	33	16,0	361	22,6	371	23,2
	65	12,0	272	22,7	245	20,4
	150	9,0	203	22,6	181	20,1
Σημύδα	35	6,5	335	51,5	350	54,0
	60	6,3	323	51,3	-	-
	77	5,6	286	51,1	-	-

Από τον Πίνακα 5 προκύπτει ότι με τη μείωση του βαθμού συγκόμωσης των μεγάλης ηλικίας δασοσυστάδων προκαλείται σημαντική μείωση της διαπνοής. Αυτό όμως συχνά έχει ως συνέπεια την αντίστοιχη αύξηση της διαπνοής της υποβλάστησης και του δασικού εδάφους με τελικό επακόλουθο την ουσιαστική εξισωτική αλληλεπίδραση της εξατμισιδιαπνεόμενης ποσότητας από την επιφάνεια. Η μέγιστη διαπνοή των διαφόρων δασοσυστάδων συμπίπτει με την ηλικία της μέγιστης αύξησης των δασικών δένδρων. Έτσι η μέγιστη διαπνοή της λεύκης εμφανίζεται στην ηλικία των 20 ετών, της πεύκης εμφανίζεται στην ηλικία των 40 ετών, της ερυθρελάτης και της δρυός στην ηλικία των 60 ετών κ.λ.π. Οι πάσης φύσεως υλοτομικές επεμβάσεις (καρπωτικές, αραιώσεων, φωτοδότιδες, αναγέννησης κ.λ.π.) μεταβάλλοντας την πυκνότητα της κομοστέγης των δασοσυστάδων είναι λογικό να επηρεάζουν την ποσότητα και την ποιότητα της διαπνοής.

Ο Molchanov (1960), αναφέρει ότι μετά από αραιωτικές επεμβάσεις σε συστάδες μέχρι την επίτευξη βαθμού συγκόμωσης 0,7 επιτεύχθηκε μείωση της διαπνοής κατά 50 – 60 mm. Μείωση όμως (με αραίωση) του βαθμού συγκόμωσης συστάδων μεγαλύτερη του 0,5, προκαλεί έντονη ανάπτυξη της υποβλάστησης, που έχει ως αποτέλεσμα την έντονη διαπνευστική δραστηριότητα της υποβλάστησης και οδηγεί σε αύξηση της ολικής διαπνοής. Για παράδειγμα, σε μετρήσεις της εξατμισιδιαπνοής σε αποψιλωθείσες λωρίδες πλάτους 100 m, η συνολική διαπνοή αυξάνει με την ηλικία ως εξής:

- κατά το πρώτο έτος της υλοτομίας η σύνολος διαπνοή ανέρχεται σε 332 mm
- κατά το τρίτο έτος της υλοτομίας η σύνολος διαπνοή έφθασε τα 356 mm
- κατά το έβδομο έτος της υλοτομίας η σύνολος διαπνοή προσέγγισε τα 395 mm και
- κατά το δέκατο έτος της υλοτομίας, οπότε επετεύχθει ο αρχικός βαθμός συγκόμωσης, η διαπνοή επανήλθε στην αρχική περίπου τιμή των 480 mm

Πίνακας 6: Εξατμισιδιαπνοή διαφόρων δασοπονικών ειδών στη Ρωσία (Molchanov, 1960).

Ετήσιο ύψος βροχής (mm)	Απώλειες ύδατος	Ηλικία συστάδας σε έτη									
		20	40	60	80	100	120	140	160	220	Μ.Ο.
550	Διαπνοή	236	250	200	185	170	158	146	125		
	εξάτμιση*	48	67	87	100	100	100	103	105		
	Υδατοσυγκράτηση	127	150	140	135	120	105	100	97		
	Υδ/ση (% βροχής)	23,1	27,3	25,5	24,5	21,8	19,1	18,2	17,6		22,1
	Σύνολο	**411**	**467**	**427**	**420**	**390**	**363**	**349**	**327**		
	(απώλειες ως % βροχής)	74,7	84,9	77,6	76,4	70,9	66,0	63,5	59,5		71,7
523	Διαπνοή	310	324	352	323	289	263	255	252	254	
	εξάτμιση*	65	78	84	90	94	98	104	104	100	
	Υδατοσυγκράτηση	49	63	64	60	58	58	60	60	64	
	Υδ/ση (% βροχής)	9,4	12,0	12,2	11,5	11,1	11,1	11,5	11,5	12,2	11,4
	Σύνολο	**424**	**483**	**500**	**473**	**451**	**419**	**419**	**416**	**418**	
	(απώλειες ως % βροχής)	81,1	92,4	95,6	90,4	86,2	80,1	80,1	79,5	79,9	85,0
581	Διαπνοή	203	291	300	278	219	193	188	188		
	εξάτμιση*	60	55	55	60	58	75	80	83		
	Υδατοσυγκράτηση	158	175	185	160	170	160	144	128		
	Υδ/ση (% βροχής)	27,2	30,1	31,8	27,5	29,3	27,5	24,8	22,0		27,5
	Σύνολο	**421**	**521**	**540**	**518**	**457**	**428**	**412**	**399**		
	(απώλειες ως % βροχής)	72,5	89,7	92,9	89,2	78,7	73,7	70,9	68,7		79,5
375	Διαπνοή	155	166	158							
	εξάτμιση*	66	70	79							
	Υδατοσυγκράτηση	21	20	19							
	Υδ/ση (% βροχής)	5,6	5,3	5,1							5,3
	Σύνολο	**224**	**256**	**256**							
	(απώλειες ως % βροχής)	59,7	68,3	68,3							65,4

* Εξάτμιση = επιφανειακή εξάτμιση από τα λοιπά φυτά της υποβλάστησης και από το έδαφος

Η εξάτμιση αποψιλωθείσας λωρίδας πλάτους 50 m είναι ελαφρά μικρότερη της προηγούμενης, καθίσταται σε ακόμη μικρότερη σε μικρότερες λωρίδες πλάτους 25 –30 m. Από άποψη της κατά χώρο κατανομής της, η διαπνοή εμφανίζεται μεγαλύτερη στο μέσο των λωρίδων από ότι στα άκρα τους (στις παρυφές του δάσους). Μεγαλύτερη επίσης διαπνοή καταγράφεται στη δυτική από ότι στην ανατολική πλευρά. Τη διαπνοή επηρεάζει επίσης η ορογραφία και το γεωγραφικό πλάτος, η διαπνοή των δασικών συστάδων μειώνεται με το υπερθαλάσσιο ύψος λόγω αύξησης της υγρασίας της ατμόσφαιρας και μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα. Στη Ρωσία βρέθηκε ότι η διαπνοή μειώνεται γενικά από δυτικά προς τα ανατολικά και από το μέσο αυτής προς τις στέπες και προς το νότο (Molchanov, 1960).

Οι φυτείες ταχυαυξών ειδών, π.χ. της λεύκης, σκλήθρου κ.λ.π., καταναλώνουν πολύ μεγάλες ποσότητες νερού, ώστε να επιτευχθεί σημαντική ξυλοπαραγωγή το ταχύτερο δυνατό. Η μεγαλύτερη ξυλοπαραγωγή συνεπάγεται αντίστοιχα αυξημένη υδατοκατανάλωση (Huber, 1953)*. Εάν η διαπνοή υπερβεί τα πίπτοντα κατακρημνίσματα, όπως π.χ. καταγράφηκε σε φυτείες ευκαλύπτου στην Αφρική, όπου διαπνοή 1200 – 2500 mm αντιστοιχεί σε ύψος βροχής μόλις 760 mm, η προκύπτουσα διαφορά καλύπτεται αποκλειστικά από τα υδατικά διαθέσιμα των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής με αποτέλεσμα να δημιουργείται κίνδυνος προοδευτικής πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού και εξαφάνισης των πηγών.

V.3. Εξατμισιδιαπνοή δασών και λοιπών φυτοκοινωνιών

Ο Polster (1954) δίνει στον Πίνακα 7, που ακολουθεί, υδατοκατανάλωση διαπνοής διαφόρων μορφών φυτοκοινωνιών. Από τον Πίνακα αυτόν προκύπτει ότι το δάσος για μεσευρωπαϊκές κυρίως συνθήκες φαίνεται από όλες τις μορφές φυτοκοινωνιών να καταναλίσκει την μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Επίσης από τον Πίνακα 6 προκύπτει η σημαντική υδατοκατανάλωση διαπνοής των υγρών λειμώνων.

Πίνακας 7: *Ετήσια κατανάλωση διαπνοής διαφόρων φυτοκοινωνιών σε ύψος βροχής κατά τους Polster (1954) και (Lyr, Polster, Fiedler, 1967).*

Μορφή Φυτοκοινωνίας	Κατανάλωση διαπνοής (mm)
Παρεδαφιαία βλάστηση υγρών σκιαζόμενων δασικών εδαφών	περίπου 60
Ξηροί λειμώνες (Bromus erectus κ.λ.π.)	" 190
Χορτοτάπητας δασικής πεύκης σε συνθήκες στέπας	" 260
Γόνιμοι λειμώνες Arhenatyrus	" 320
Υγροί λειμώνες	" 1160
Μεσευρωπαϊκό νεαρό δάσος 15 ετών (διάφορα δασοπονικά είδη)	220 - 350
Μεσευρωπαϊκό δάσος 30 – 50 ετών	240 - 600
Μεσευρωπαϊκές ηλικιωμένες συστάδες (100 ετών)	100 - 450
Τεχνητές φυτείες ευκαλύπτου (Ν Αφρική)	1200 - 2500

Οι Wundt 1953 και Wechman 1964* για γερμανικές συνθήκες δίνουν τις ακόλουθες τιμές διαπνοής της βλαστητικής περιόδου, για διάφορα καλλιεργούμενα είδη (Πίνακας 8).

Πίνακας 8: Διαπνοή κατά τη βλαστητική περίοδο *(Wundt 1953, Wechman 1964)*.

Είδος βλάστησης	Διαπνοή (mm βροχής)
1. Επιφάνεια καλυμμένη με χόρτο (λιβάδια)	184 … 272
2. Λειμώνες (τριφύλλι, μηδική)	194 … 248
3.Δημητριακά	
▪ σίκαλη ▪ σιτάρι ▪ κριθάρι	132 … 278
▪ αραβόσιτος ▪ βρώμη	60 … 154
4. Σκαλιστικά	162 … 176
5. Πλατύφυλλα	161
6. Κωνοφόρα	167

Από τον Πίνακα 8 προκύπτει ότι οι λιβαδικές εκτάσεις και οι λειμώνες τριφυλλιού εμφανίζουν, ιδιαίτερα κατά τη βλαστητική περίοδο, σημαντικά μεγαλύτερη διαπνοή από εκείνη των δασών. Μικρότερες τιμές διαπνοής δίνουν οι καλλιέργειες των δημητριακών, ιδιαίτερα ο αραβόσιτος και η βρώμη. Κατά συνέπεια το δάσος για τις κεντροευρωπαϊκές αλλά και τις ρωσικές συνθήκες δεν αποτελεί πάντοτε τον μεγαλύτερο καταναλωτή νερού. Πάντως οι διαφορές διαπνοής, που εμφανίζουν τα διάφορα φυτοκαλύμματα -πλην της μεγάλης σημασίας την οποία έχουν για τη διαμόρφωση της υδατικής οικονομίας μιας λεκάνης απορροής- μπορεί να επηρεάσουν τη θερμική ισορροπία των λεκανών αυτών, επειδή το φαινόμενο της διαπνοής, απαιτεί σαφώς υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας (Baumgartner, 1967). Επίσης, ενδιαφέρουσα είναι η σύγκριση της συνόλου εξατμισιδιαπνοής μεταξύ δασωμένων και γυμνών επιφανειών ή μεταξύ δάσους και γεωργικών καλλιεργειών.

Πίνακας 9. Ταξινόμηση φυτοκαλλυμάτων κατά πραγματική εξατμισιδιαπνοή ET_r (% των κατακρημνισμάτων) (Baumgartner 1967).

Φυτοκοινωνία	**ET_r/P (%)**
Γυμνό έδαφος	30
Γεωργικό έδαφος με σιτηρά	40
Γεωργικό έδαφος με κηπευτικά	45
Έδαφος καλυμμένο διαρκώς με ποώδη βλάστηση	65
Δάσος ερυθρελάτης	70
Ελεύθερη επιφάνεια νερού	75
Ελώδεις λειμώνες	100

ET_r = αληθής εξατμισιδιαπνοή των διαφόρων φυτοκαλυμμάτων συναρτήσει του ετήσιου ύψους βροχής P (%)

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι από άποψη εξατμισιδιαπνοής, για τις μεσευρωπαϊκές συνθήκες, το δάσος φαίνεται ότι υπερτερεί όλων των λοιπών φυτοκοινωνιών. Ωστόσο, ο Πίνακας 10 (Keller, 1961), βασιζόμενος σε έρευνες στην Ελβετία, τις ΗΠΑ και τη Γερμανία, δείχνει σαφώς ότι, παρά τη σημαντική υπεροχή της διαπνοής των δασωμένων επιφανειών έναντι των γυμνών, των αποψιλωτικώς υλοτομηθέντων δασοσυστάδων και των γεωργικά καλλιεργούμενων εδαφών, οι διαφορές μεταξύ τους, ως

προς τη συνολική εξατμισιδιαπνοή και υδροκατανάλωση είναι μικρές, ώστε συχνά να μπορούν να θεωρηθούν, από πρακτική άποψη, επουσιώδεις. Κατά συνέπεια οι δευτερεύουσες φυτοκοινωνίες, οι οποίες αναπτύσσονται μετά από αποψιλωτική υλοτομία ή σε γυμνή επιφάνεια, με τη διαπνοή τους, καθώς και το αποκαλυπτόμενο δασικό έδαφος, με την εξάτμισή του, τείνουν να αναπληρώσουν και να εξισώσουν τη μείωση της διαπνοής λόγω της απομάκρυνσης του δάσους και μάλιστα, συχνά καταγράφεται μεγαλύτερη εξατμισιδιαπνοή σε γεωργικά καλλιεργούμενα εδάφη, ακόμη και σε χέρσα. Όμως το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κατά τη θερινή βλαστητική περίοδο και δεν αφορά το σύνολο του έτους, όπου η υδατοκατανάλωση διαπνοής των δασικών ειδών παραμένει σημαντικά μεγαλύτερη (Πίνακας 10). Επομένως **η τελικά πραγματοποιούμενη εξατμισιδιαπνοή σε διάφορες επιφάνειες φαίνεται να διατηρείται σε σχετικά σταθερό επίπεδο**. Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύνονται και για ρωσικές συνθήκες, όπως προκύπτει από σχετική έρευνα του Molchanov (1960).

Πίνακας 10: Εξατμισιδιαπνοή σε διάφορες πειραματικές επιφάνειες *(Keller, 1961)*.

Περιοχή	Κατακρημνίσματα (mm)	Συνολική εξατμισι-διαπνοή (mm)	Υδατο-συγκράτηση (mm)	Εξατμισι-διαπνοή εδαφών (mm)	Διαπνοή (mm)
Sperbelgraben (ΕΛΒΕΤΙΑ) (δασωμένο)	1600	649	232	117	300
Rappengraben (ΕΛΒΕΤΙΑ) (30% δάσος)	1660	629	196	298	135
Wagon Wheei Gap, Colorado (ΗΠΑ)	540	382	64	190	123
α) δασωμένο	528	343	13	229	101
β) γυμνό					
Coweeta, N.Carol. (ΗΠΑ)	1690	1076	181	395	500
α) δασωμένο	1800	682	13	593	76
β) γυμνό*					
Winterbachtal (ΓΕΡΜΑΝΙΑ) (δασωμένο)	1253	579	239	80	260
Lange Bramke (ΓΕΡΜΑΝΙΑ) (γυμνό)	1221	521	80	241	200

* Στην επιφάνεια αυτή καταπολεμήθηκε μετά την υλοτομία η παραβλάστηση της περιοχής, όσο και η φυσική αναγέννηση, γεγονός που επηρεάζει την εξατμισιδιαπνοή, όπως αποδεικνύεται με την πολύ μικρή τιμή της (682 mm) έναντι εκείνης του δάσους (1076 mm).

Ακολούθως παρατίθενται τρόποι υπολογισμού (μέτρησης-άμεσοι και εκτίμησης-έμμεσοι) της εξάτμισης και της εξατμισιδιαπνοής.

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ & ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΙΔΙΑΠΝΟΗΣ

Ο υπολογισμός της εξάτμισης & της εξατμισιδιαπνοης γίνεται είτε άμεσα με μετρήσεις, είτε έμμεσα με προσεγγιστικές μεθόδους.

4.1. Υπολογισμός της εξάτμισης & της εξατμισιδιαπνοης με άμεσες μετρήσεις

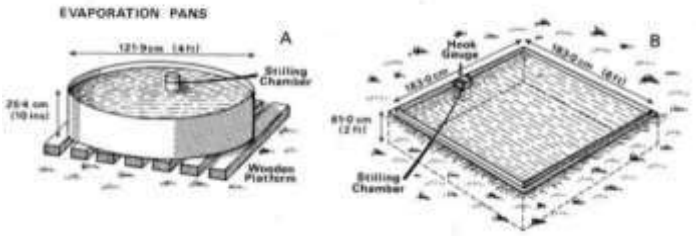
4.1.1. Υπολογισμός της εξάτμισης με άμεσες μετρήσεις

Η άμεση μέτρηση της εξάτμισης από εκτεταμένες επιφάνειες, κατά τρόπον ανάλογο με τη μέτρηση της βροχής, είναι πρακτικώς ανέφικτη, ως συνέπεια του μεγάλου αριθμού και της αλληλεξάρτησης των παραγόντων που την επηρεάζουν. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι έμμεσης μέτρησης ή εκτίμησης της εδαφικής εξάτμισης, ως συνάρτηση της λαμβάνουσας χώραν εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες, όπως είναι η μέτρηση της εξάτμισης με τη μέθοδο των λεκανων εξάτμισης, η μέτρηση με ατμόμετρο κ.λ.π.

Ι. Μέτρηση με τη λεκάνη εξάτμισης

Το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο όργανο μέτρησης της εξάτμισης από υδάτινες επιφάνειες είναι το *εξατμισίμετρο ανοιχτού δοχείου*. Από τους διάφορους τύπους εξατμισιμέτρων το πιο κοινό είναι η Λεκάνη Εξάτμισης Κατηγορίας Α της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ. Συχνά χρησιμοποιείται και η μορφή εξατμισιμέτρου, που παρέχει ο Βρετανικός Μετεωρολογικός Οργανισμός (https://www.metoffice.gov.uk). Η λεκάνη εξάτμισης αποτελείται από κυλινδρικό δοχείο με γαλβανισμένη λαμαρίνα διαμέτρου 122 cm και ύψους 25,40 cm, που στηρίζεται σε ξύλινη βάση ύψους 15 cm από το έδαφος, με τρόπο ώστε ο αέρας να κυκλοφορεί ελεύθερα και κάτω από το δοχείο (Σχήμα 9). Η λεκάνη εξάτμισης πληρούται με νερό σε βάθος 20 cm και αναπληρώνεται όταν το βάθος του νερού κατέλθει στα 18 cm. Οι μετρήσεις της στάθμης του νερού γίνονται σε φρεάτιο ηρεμίας με μετρητική συσκευή. Το ύψος του εξατμιζομένου νερού προσδιορίζεται από τη διαφορά δύο διαδοχικών αναγνώσεων, κατόπιν βέβαια διόρθωσης λόγω προσθήκης (βροχόπτωση ή τεχνητή προσαγωγή) αφαίρεσης νερού από τη λεκάνη. Δεδομένου ότι η εξάτμιση από μικρές επιφάνειες είναι μεγαλύτερη από την εξάτμιση μεγάλων υδάτινων επιφανειών, η εκτίμηση της εξάτμισης από ταμιευτήρα ή λίμνη πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή, που ονομάζεται συντελεστής λεκάνης εξάτμισης. Η τιμή του συντελεστή αυτού σε ετήσια βάση κυμαίνεται από 0,60 έως 0,80, με μέση τιμή 0,70-0,75. (Για υδρολεκάνες λιμνών, ταμιευτήρων κ.λ.π. βάθους <8,00m συντελεστής μείωσης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0,80÷0,70 και για υδρολεκάνες βάθους >8,00m ο συντελεστής μείωσης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0,70÷0,60).

ΕΞΑΤΜΙΣΙΜΕΤΡΟ ΤΥΠΟΥ Α **ΕΞΑΤΜΙΣΙΜΕΤΡΟ ΤΥΠΟΥ Β**



Σχήμα 9: (α) Ο τύπος κυλινδρικού εξατμισιμέτρου τύπου Α που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ (U.S. Weather Bureau Class A, Pan A), (β) και ο αντίστοιχος τύπος εξατμισιμέτρου τύπου Β, που χρησιμοποιείται στη Βρετανία (British Meteorogical Office, Pan B).

ΙΙ. Μέθοδος ατμομέτρου ή εξατμισίμετρο

Το ατμόμετρο είναι όργανο μέτρησης της εξάτμισης. Η λειτουργία του ατμόμετρου είναι ανάλογη με αυτή την εξατμισίμετρου, με τη διαφορά ότι στο όργανο αυτό δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια νερού, αλλά μια πορώδης επιφάνεια, που τροφοδοτείται από δοχείο με νερό. Η ελάττωση της στάθμης του νερού στο δοχείο, συνδέεται με την εξάτμιση, με τη χρήση κατάλληλων διορθωτικών συντελεστών. Τα ατμόμετρα είναι απλά, οικονομικά και εύχρηστα όργανα, αλλά ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να δίνεται στην καθαρότητα της εξατμίζουσας πορώδους επιφάνειας.

Σχήμα 10: Ατμόμετρο. (https://www.tecnopenta.com/en/products-services/meteorology/evaporation/atmometer)

4.1.2. Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής με άμεσες μετρήσεις

Η εξατμισιδιαπνοή μπορεί να μετρηθεί άμεσα με τους ακόλουθους τρόπους:

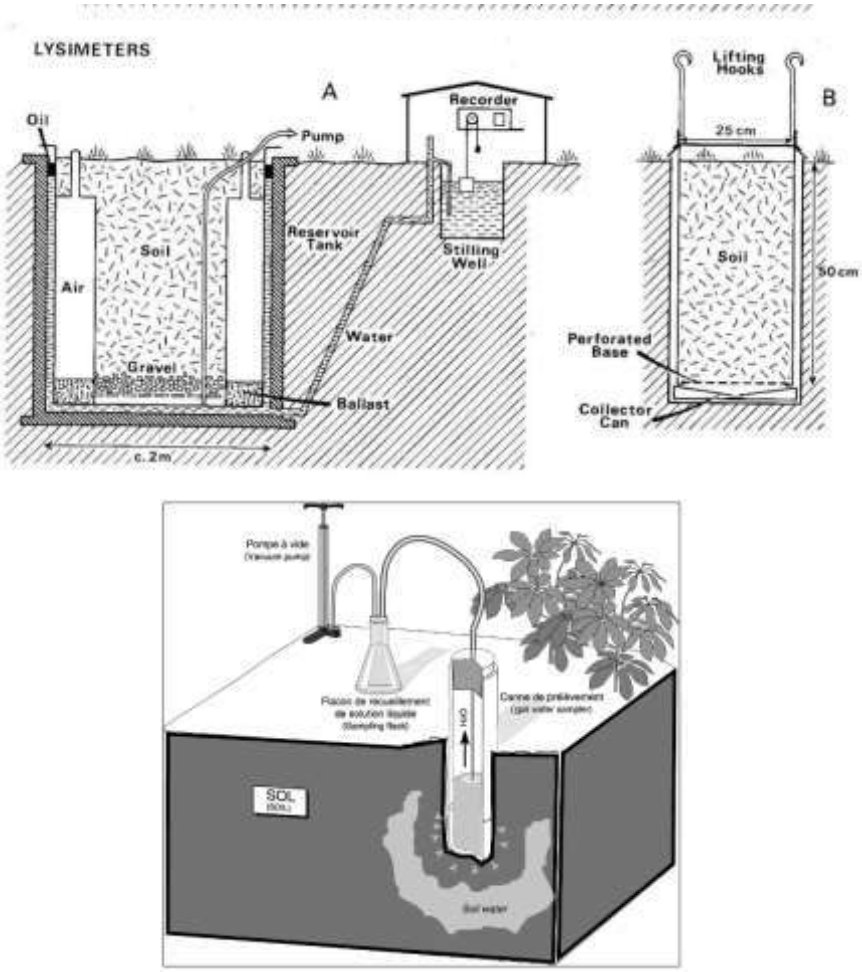
- *με δεξαμενές,*
- *με λυσίμετρα,*
- *με την χρήση αγροτεμαχίων*

I. Μέτρηση με δεξαμενές

Πρόκειται για στεγανά δοχεία, που τοποθετούνται με το χείλος τους περίπου στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια του εδάφους. Το μέγεθος των δοχείων ποικίλει, φτάνοντας σε πλάτος τα 10 m και βάθος τα 3 m. Το μέγεθος τους πρέπει να είναι επαρκές ώστε να μπορεί να προσομοιώσει τις φυσικές συνθήκες ανάπτυξης των χρησιμοποιούμενων φυτών. Η εξατμισιδιαπνοή προσδιορίζεται μετρώντας την εκάστοτε προσαγόμενη ποσότητα του νερού, που απαιτείται για τη διατήρηση του επιπέδου της σταθερής και βέλτιστης υγρασίας στο συγκεκριμένο δοχείο.

II. Μέτρηση με λυσίμετρα

Τα λυσίμετρα αποτελούν την περισσότερο διαδεδομένη και ακριβή μέθοδο μέτρησης της εξατμισιδιαπνοής. Τα λυσίμετρα είναι κυλινδρικά δοχεία (βάθους και πλάτους 1-2 m και μήκους 1-6 m) στα οποία απομονώνεται ένα τμήμα χώματος και βλάστησης και ελέγχεται το υδατικό του ισοζύγιο (Σχ. 11). Η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος εδάφους-βλάστησης και η απομόνωσή του με την ελάχιστη διαταραχή, καθώς και μη τροποποίηση του μικροκλίματος της περιβάλλουσας επιφάνειας, είναι οι ουσιαστικοί παράγοντες, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη χρήση των λυσιμέτρων. Τα λυσίμετρα διακρίνονται σε ζυγιζόμενα και μη ζυγιζόμενα. Τα ζυγιζόμενα λυσίμετρα παρά το υψηλό κόστος τους χρησιμοποιούνται ευρύτατα επειδή παρέχουν ακριβείς μετρήσεις της εξατμισιδιαπνοής σε ημερήσιες ή μικρότερες χρονικές περιόδους. Σταδιακά έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές κατασκευής, τοποθέτησης των συστημάτων ζύγισης των λυσιμέτρων, που επιτρέπουν τη μέτρηση της εξατμισιδιαπνοής με ακρίβεια της τάξης των 0,01 mm νερού, για διάστημα μικρότερο ακόμη και της μιας ώρας. Ως εκ τούτου, ένα κατάλληλα σχεδιασμένο λυσίμετρο μπορεί εκτός του να παρέχει με ακρίβεια την πραγματική εξατμισιδιαπνοή, να χρησιμοποιείται και ως σταθμός ελέγχου για τον έλεγχο μικρομετεωρολογικών μεθόδων, καθώς και τη βαθμονόμηση (έλεγχο) των λοιπών και εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της πραγματικής ή δυναμικής εξατμισιδιαπνοής.



Σχήμα 11: Χαρακτηριστικές μορφές λυσιμέτρου.

Τα μη ζυγιζόμενα λυσίμετρα κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται για την υδρολογική απομόνωση μιας μονάδας εδάφους-βλάστησης και μερικές φορές, έμμεσα για την μέτρηση της διήθισης (στράγγισης). Ο τύπος αυτός του λυσίμετρου είναι εύκολο να εγκατασταθεί, έχει χαμηλό κόστος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας π.χ. για περιόδους που μεσολαβούν μεταξύ δύο βροχοπτώσεων (εάν τα λυσίμετρα δέχονται μόνο φυσική βροχή), ή μεταξύ δύο αρδευτικών περιόδων (εβδομάδα, δεκαήμερο κλπ), εάν τα λυσίμετρα αρδεύονται.

III. Μέτρηση με τη χρήση Αγροτεμαχίων

Πρόκειται για ειδικά σχεδιασμένα αγροτεμάχια, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της εξατμισιδιαπνοής κάτω από διάφορες συνθήκες. Τα αγροτεμάχια σχεδιάζονται έτσι ώστε το νερό που απορρέει από την επιφάνειά τους να μπορεί να συλλεχθεί στη συνέχεια και να μετρηθεί. Για το λόγο αυτό το νερό, που διηθείται σε βαθύτερα στρώματα, συλλέγεται με υπόγεια στεγανωτική στρώση. Για να καθοριστεί η εξατμισιδιαπνοή, μετράται ταυτόχρονα και η εισροή νερού από βροχόπτωση ή άρδευση. Οι απώλειες της απορροής ή της βαθιάς διήθησης αφαιρούνται από το εισερχόμενο νερό, ενώ γίνεται διόρθωση της εκάστοτε καταγραφόμενης εδαφικής υγρασίας.

4.2. Υπολογισμός της εξάτμισης & της εξατμισιδιαπνοής με έμμεσες μεθόδους

Συνήθως η άμεση μέτρηση της εξάτμισης από εδαφική επιφάνεια δεν είναι δυνατή, για το λόγο αυτό η όλη προσπάθεια προσέγγισής της βασίστηκε στην αναζήτηση **έμμεσων** εφικτών προσεγγιστικών κατά το δυνατόν μεθόδων εκτίμησής της οι κυριότερες εκ των οποίων είναι οι εξής:

I. Μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου.
II. Μέθοδος ισοζυγίου ενέργειας.
III. Μέθοδοι μεταφοράς μάζας.
IV. Συνδυασμένες μέθοδοι.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές μέθοδοι εκτίμησης της πραγματικής και της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής. Από αυτές άλλες είναι αρκετά ακριβείς και άλλες παρέχουν απλές προσεγγίσεις. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από τα προσφερόμενα στοιχεία, τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτης επιφάνειας και το σκοπό για τον οποίο προορίζεται η πληροφορία. Εξίσου σημαντικοί παράγοντες είναι το κόστος, η ευκολία και η τεχνική της κάθε μεθόδου. Η επιλογή της προτεινόμενης να χρησιμοποιηθεί μεθόδου πρέπει να γίνεται προσεκτικά σε κάθε περίπτωση λαμβάνοντας πάντα υπόψη τα υπάρχοντα στοιχεία και δεδομένα, τις προϋποθέσεις εφαρμογής της και την ακρίβεια και την αξιοπιστία των στοιχείων που απαιτεί η χρησιμοποίησή της. Οι μέθοδοι διακρίνονται σε δύο ευρείες κατηγορίες, τις υδρολογικές και τις μικρομετεωρολογικές (Τσακίρης, 1995). Στις υδρολογικές μεθόδους κυρίαρχη είναι η θέση της μεθόδου του υδατικού ισοζυγίου, ενώ στις μικρομετεωρολογικές ανήκουν πολλές χρησιμοποιούμενες ευρέως μέθοδοι με βάση τα υπάρχοντα στην περιοχή κλιματικά δεδομένα. Στη συνέχεια περιγράφονται οι μέθοδοι αυτές και αρχικά η μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου με τις διάφορες παραλλαγές ή βελτιώσεις της.

<u>I. Μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου</u>

Με την εφαρμογή της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου γίνεται έμμεσος προσδιορισμός της εξατμισιδιαπνοής ιδιαίτερα της πραγματικής. Στις περισσότερες μελέτες που βασίζονται στην εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου, η εξατμισιδιαπνοή υπολογίζεται, ως ο υπολειπόμενος όρος της εξίσωσης, ενώ οι άλλες συνιστώσες μετρούνται ή υπολογίζονται. Με βάση την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου η εξατμισιδιαπνοή παρέχεται από την ακόλουθη σχέση:

$$ET = P + \Delta SW \pm RO - D$$

όπου, *P* : *το ύψος των κατακρημνισμάτων (mm),*
ΔSW : *η μεταβολή της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό (mm),*
RO : *η επιφανειακή απορροή (mm), και*
D : *η βαθιά διήθηση (mm).*

Η παραπάνω υδρολογική προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε κλίμακα και μέγεθος και έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα, για τη συλλογή δεδομένων, με σκοπό τον υδρολογικό σχεδιασμό. Η

ακρίβεια της μεθόδου αυτής εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης των λοιπών συνιστωσών (βροχόπτωση, επιφανειακή απορροή, διήθηση, μεταβολή της εδαφικής υγρασίας). Συχνά όμως τα σφάλματα μέτρησης των συνιστωσών αυτών, που είναι και σημαντικά και δύσκολα αποτιμήσιμα επηρεάζουν τον υπολογισμό της εξατμισιδιαπνοής. Ειδικότερα οι προϋποθέσεις για την ορθή μέτρηση της βαθιάς διήθησης είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και επαλήθευση. Συχνά, στις μελέτες του υδατικού ισοζυγίου, το ΔSW υποτίθεται ότι είναι μηδέν, τα P και RO μετρούνται και το D είτε αγνοείται, είτε μετράται, είτε εκτιμάται. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση λαμβάνει τη μορφή ET = P – RO και χρησιμοποιείται προσεγγιστικά, για χρονικά διαστήματα, στα οποία θεωρείται ότι το περιεχόμενο εδαφικό νερό δεν μεταβάλλεται, ή δεν αποκλίνει σημαντικά.

Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η χαμηλού επιπέδου ακρίβεια των μετρήσεων και οι δυσκολίες εκτίμησης της ET στη διάρκεια των βροχών. Ακόμη και με τη χρησιμοποίηση προσεκτικών μετρήσεων είναι δύσκολο να ανιχνεύσει κανείς αλλαγές εδαφικού νερού με ακρίβεια μεγαλύτερη των ± 2 mm νερού. Τα σφάλματα που συνδέονται με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου καθιστούν τη χρήση της σε ημερήσια βάση ανεπαρκή. Όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε μεγάλες εκτάσεις, το κύριο πρόβλημα δεν είναι αυτή καθ' αυτή η μέθοδος, αλλά η έλλειψη αξιόπιστων τιμών των επιμέρους συνιστωσών της, εξαιτίας της μεγάλης κατά χώρο μεταβλητότητας της βροχόπτωσης λόγω της αναμενόμενης μεγάλης ανομοιογένειας της τοπογραφίας των λεκανών των χειμάρρων και των ποταμών της Ελλάδας.

II. Μέθοδοι ισοζυγίου ενέργειας

Γνωρίζοντας ότι η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_n = S_n - L_n$$

και ότι η ποσότητα της ενέργειας αυτής μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα Λ και δαπανάται για την εξάτμιση του νερού ως έκφραση της αισθητής θερμότητας, προκύπτει ότι αυτή η ποσότητα ενέργειας επάγεται από το υδάτινο σώμα στην ατμόσφαιρα. Θεωρώντας αμελητέες τις μικρότερες απώλειες ενέργειας (π.χ. αγωγή προς το έδαφος, βιοχημικές διαδικασίες, προσωρινή αποθήκευση κλπ) μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει προσεγγιστικά η ακόλουθη εξίσωση (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$R_n = H + \Lambda$$

Το μέγεθος που ενδιαφέρει κυρίως στις ενεργειακές μεθόδους είναι η λανθάνουσα θερμότητα Λ, αφού αυτή παρέχει στο νερό την απαιτούμενη ενέργεια, για να πραγματοποιηθεί η εξάτμιση. Ο λόγος Bowen συνδέει τη λανθάνουσα θερμότητα Λ με την αισθητή θερμότητα, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$B = \frac{H}{\Lambda}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζεται στη συνέχεια η εξάτμιση, ως ο λόγος της λανθάνουσας θερμότητας Λ, προς τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού λ, από τη σχέση:

$$E_t = \frac{dh}{dt} = \frac{\Lambda}{\lambda} = \frac{R_n}{\lambda \cdot (1+B)} \quad kg/(m^2 d)$$

όπου, E_t : dh/dt = εξάτμιση σε kg νερού ανά ημέρα και m^2 επιφάνειας,

Λ : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (kJ/Kg),

R_n : η καθαρή ακτινοβολία στη μάζα του νερού ($kJ/m^2 d$), και

B : ο λόγος Bowen (αδιάστατο μέγεθος).

III. Μέθοδοι μεταφοράς μάζας

Οι μέθοδοι μεταφοράς μάζας θεωρούν την εξάτμιση, ως μεταφορά μάζας ή διάχυσης των υδρατμών, από μεγαλύτερες προς μικρότερες συγκεντρώσεις. Η διεργασία διάχυσης, μπορεί να περιγραφεί από το νόμο διάχυσης του Fick, ο οποίος στην περίπτωση της εξάτμισης λαμβάνει τη μορφή:

$$E_\alpha = -M \cdot \frac{de}{dz}$$

όπου, E_α : ο ρυθμός εξάτμισης,

e : η μερική πίεση υδρατμών,

M : ο συντελεστής μεταφοράς,

Z : το τοπογραφικό υψόμετρο.

Με βάση την τελευταία εξίσωση, έχουν αναπτυχθεί αρκετά πολύπλοκες σχέσεις που υπολογίζουν το ρυθμό εξάτμισης, χρησιμοποιώντας το λογαριθμικό προφίλ της ταχύτητας του ανέμου κοντά στην επιφάνεια, που εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Στην πράξη χρησιμοποιείται η εμπειρικά προσδιορισμένη σχέση που αποδίδεται στον Dalton, ήδη από το 1802, σύμφωνα με την οποία ο ρυθμός εξάτμισης δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{E_\alpha = (e_s - e) \cdot F(u) = D \cdot F(u) \quad kg/(m^2 d)}$$

όπου, D : es-e[hPa] το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών, και

F(u): η συνάρτηση του ανέμου.

Η συνάρτηση του ανέμου F(u), εμπεριέχει την ταχύτητα του ανέμου και κατά Penman δίνεται από τη γραμμική εξίσωση:

$$\mathbf{F(u) = 0{,}26 \cdot (1+0{,}54u) \quad kg/(hPa \cdot m^2 d)}$$

όπου, u: η ταχύτητα του ανέμου σε (m/s) μετρημένη σε ύψος 2 m από το έδαφος.

Η τελευταία σχέση είναι μία μόνο από τις πολλές υφιστάμενες προσεγγίσεις για τη γραμμική συσχέτιση του F(u) με την ταχύτητα του ανέμου u.

Οι Pereira et al (2009) βρήκαν μέσο ρυθμό εξάτμισης από κορεσμένες σε υγρασία κομοστέγες αριάς (*Quercus ilex*) 0,27-0,30mm h^{-1}, οι Router et al., (1971) για την ψευδοτσούγκα βρήκαν 0,23mm ενώ ο Dolman (1987) (αναφορά εντός Router et al., 1971), για τη δρυ, δίνει τιμές 0,32mm και 0,11mm για τη θερινή και χειμερινή περίοδο αντίστοιχα. Οι Fathizadeh et. al., (2018), σε ξηρανθεκτικές συστάδες δρυός *Quercus brantii* στα όρη Ζάγρος της Περσίας βρήκαν ρυθμό μέσης υγρής εξάτμισης προς μέση ένταση βροχής ίσο με 0,60, 1,0 mm, 2,6 mm, και 0,15 mm για την περίοδο με φύλλα, και 0,80, 0,1 mm, 0,5 mm, και 0,04 mm για την περίοδο χωρίς φύλλα.

✓ **ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΑΠΟ ΥΔΑΤΙΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ**

Για τον υπολογισμό της εξάτμισης από υδάτινες επιφάνειες χρησιμοποιείται η εν λόγω **μέθοδος μεταφοράς μάζας ή αεροδυναμική μέθοδος** καθώς και **συνδυαστικές μέθοδοι** (παρατίθενται πιο κάτω) της οποίας η εξίσωση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{E=K_E*u_m*(e_s-e_m)}$$

Όπου:

E= η λαμβάνουσα χώραν από τη λιμναία επιφάνεια εξάτμιση (cm/d)

K_E= ο συντελεστής στιγμιαίας εξάτμισης ή συντελεστής ρυθμού εξάτμισης (cm/d). Ο συντελεστής K_E υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$\mathbf{K_E=1,265*10^{-4}\ (mb^{-1})}$$

Όπου:

u_m= η ταχύτητα του ανέμου (cm/s)

e_s= η τάση των υδρατμών στο ύψος των 2m

e_m= η τάση των υδρατμών στο ζητούμενο ύψος

Για τον προσδιορισμό της εξάτμισης από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες χρησιμοποιούνται επίσης διάφορες εμπειρικές εξισώσεις, οι οποίες έχουν την ακόλουθη γενική μορφή:

$$\mathbf{E=k*f(u_a)\ *(e_s-e_m)}$$

Όπου: E, k, u, e_s ως ανωτέρω και

e_a = η πραγματική τάση των υδρατμών

u_a= η ταχύτητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε ύψος Z_m πάνω από την υδάτινη επιφάνεια.

Οι παραπάνω εμπειρικές εξισώσεις ονομάζονται εξισώσεις Dalton προς τιμή του Άγγλου χημικού Dalton, που πρώτος διατύπωσε το 1802 την αρχική μορφή των παραπάνω εξίσωσης. Στην πράξη χρησιμοποιούμε την ακόλουθη απλή μορφή της παραπάνω εξίσωσης.

$$\mathbf{E=1,46*10^{-4}\ *F^{-0,05}*u_2*(e_s-e_2)}$$

Όπου:

F =η λιμναία επιφάνεια (km^2), u_2= η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος των 2μ=200cm, e_s και e_2=η τάση των υδρατμών στο ζητούμενο ύψος και στο ύψος των 2μ αντίστοιχα (mb)

Εκτός από την παραπάνω σχέση, πολύ ευρεία εφαρμογή βρίσκει η παρακάτω σχέση με την οποία υπολογίζονται οι μηνιαίες εξατμίσεις των υδάτινων επιφανειών (λιμνών, ταμιευτήρων, ελωδών εκτάσεων).

$$\mathbf{E=c*(1+ u_9/16) *(e_s-e_2)}$$

Όπου:

E= η μέση μηνιαία εξάτμιση (mm/μήνα)

U_9 =η μέση μηναία ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H=9,00m

e_s και e_2= η μέγιστη e_s και η πραγματική τάση των υδρατμών της ατμόσφαιρας (mb). Οι τιμές αυτές προσδιορίζονται με βάση τις μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας. Για μικρές και αβαθείς λίμνες ή ταμιευτήρες νερού (βάθους<8,0m, όπως οι περισσότερες Ελληνικές λίμνες), οι τιμές αυτές προσδιορίζονται με βάση τις μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, λαμβανόμενες από γειτονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Αντίθετα για μεγάλες, βαθειές λίμνες αντί της θερμοκρασίας αέρα χρησιμοποιούνται μόνο οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες του νερού των λιμνών.

c= συντελεστής εξάτμισης. Η τιμή του συντελεστή εξάτμισης c για μικρές υδάτινες επιφάνειες με μικρό βάθος (<8m), λαμβάνει την τιμή c=11,25 και για πολύ μεγάλες και βαθιές λίμνες λαμβάνει την τιμή c=8,25. Σε ενδιάμεσου μεγέθους και βάθους λίμνες η τιμή του c προσαρμόζεται ανάλογα.

Ακολούθως παρατίθεται σχετικό παράδειγμα υπολογισμού της εξάτμισης με τις παραπάνω μεθόδους.

Παράδειγμα: Να υπολογιστεί με τις παραπάνω σχέσεις η ημερήσια (10.8.1994) και η μέση μηνιαία (Αύγουστος 1978), εξάτμιση του λιμναίου ταμιευτήρα Αναρράχης Πτολεμαϊδας:

Δίνονται:

- Εμβαδόν υδάτινης επιφάνειας (λιμναίος καθρέφτης): F=0,285 km^2=285.000m^2
- Μέσο λιμναίο βάθος ταμιευτήρα: H_f=4,35m
- Μέση ημερήσια θερμοκρασία στις 10.8.1994: 32.6^oC
- Μέση ημερήσια σχετική υγρασία στις 10.8.1994: hp=62%
- Μέση ημερήσια ταχύτητα αέρα στις 10.8.1994: u_2=2,2m/s
- Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα Αυγούστου 1978: T_A : 22,5^oC
- Μέση μηνιαία σχετική υγρασία Αυγούστου 1978: hp=56%
- Μέση μηνιαία ταχύτητα αέρα Αυγούστου 1978: u_2=2,8m/s

Λύση: Επειδή το μέσο βάθος της λίμνης είναι μικρό (αβαθής ταμιευτήρας με βάθος H_f=4,35 m<8,00m, θεωρείται ότι η θερμοκρασία της λιμναίας επιφάνειας ταυτίζεται με τη θερμοκρασία αέρα. Με βάση τον ακόλουθο Πίνακα 11 που παρέχει τη μέγιστη τάση υδρατμών e_s σύμφωνα με τη θερμοκρασία αέρα έχουμε:

Πίνακας 11. Σχέση θερμοκρασίας αέρα και μέγιστης τάσης υδρατμών. (Vapour pressure in bar/mbar)
(https://www.sugarprocesstech.com/vapour-pressure-water/)

	Μέγιστη τάση υδρατμών (bar, mb)							
Θερμοκρασία (°C)	bar	mb	(°C)	bar	mb	(°C)	bar	mb
1	0.00657		34	0.05318		67	0.2733	
2	0.00706		35	0.05622		68	0.2856	
3	0.00758		36	0.0594		69	0.2984	
4	0.00813		37	0.06274		70	0.3116	
5	0.00872		38	0.06624		71	0.3253	
6	0.00935		39	0.06991		72	0.3396	
7	0.01001		40	0.07375		73	0.3543	
8	0.01072		41	0.07777		74	0.3696	
9	0.01147		42	0.08198		75	0.3855	
10	0.01227		43	0.08639		76	0.4019	
11	0.01312		44	0.091		77	0.4189	
12	0.01401		45	0.09582		78	0.4365	
13	0.01497		46	0.10086		79	0.4547	
14	0.01597		47	0.10612		80	0.4736	
15	0.01704		48	0.11162		81	0.4931	
16	0.01817		49	0.11736		82	0.5133	
17	0.01936		50	0.12335		83	0.5432	
18	0.02062		51	0.12961		84	0.5557	
19	0.02196		52	0.13613		85	0.578	
20	0.02337		53	0.14293		86	0.6011	
21	0.02485		54	0.15002		87	0.6249	
22	0.02642	26,42	55	0.15741		88	0.6495	
23	0.02808	28,08	56	0.16511		89	0.6749	
24	0.02982		57	0.17313		90	0.7011	
25	0.03166		58	0.18147		91	0.7281	
26	0.0336		59	0.19016		92	0.7561	
27	0.03564		60	0.1992		93	0.7849	
28	0.03738		61	0.2086		94	0.8146	
29	0.04004		62	0.2184		95	0.8453	
30	0.04241		63	0.2286		96	0.8769	
31	0.04491		64	0.2391		97	0.9094	
32	0.04753	47,53	65	0.2501		98	0.943	
33	0.05029	50,029	66	0.2615		99	0.9776	
						100	10.133	

Για 32.6°C, $\mathbf{e_{s\ (10.8.1994)}}$**=49,61mb, για και** 22,5°C, $\mathbf{e_{s\ (Αυγ.\ 1978)}}$**=27,52mb**

Από τις παραπάνω τιμές και από τη βασική σχέση hp=100e/e_s που αποτελεί την η έκφραση της σχετικής υγρασίας του αέρα, προκύπτουν οι αντίστοιχες πραγματικές υγρασίες αέρα στο ύψος μέτρησης του αέρα των 2m και 9m αντίστοιχα:

$$\mathbf{e_{(2m)} = e_{s\ (10.8.1994)} * hp/100 = 49,61*62/100 = 30,76mb}$$

$$\mathbf{e_{(2m)} = e_{s\ (Αυγ.\ 1978)} * hp/100 = 27,52*56/100 = 15,41mb}$$

Με βάση τα παραπάνω, επιλύοντας τις αναφερθείσες σχέσεις υπολογισμού της εξάτμισης (ημερήσιας και μηνιαίας) προκύπτει ότι:

I. Ημερήσια Εξάτμιση (10.8.1994)

$E=K_E*u_m*(e_s-e_m)$= 1,265*10-4*220cm*(49,61-30,76)=0,5246cm/d

(u_m= u_2=2,2m/s=220cm/s)

$E=1,46*10^{-4}*F^{-0,05}*u_2*(e_s-e_2)=1,46*10^{-4}*0,285^{-0,05}*220*(49,61-30,76)=0,6447cm/d$

(F =0,285km^2, u_2=2,2m/s=220cm/s)

II. Μηνιαία εξάτμιση (Αύγουστος 1978)

$E=c*(1+u_9/16)*(e_s-e_9)=11,25(1+9,818/16)*(27,52-15,41)=219,84mm$

Όπου η τιμή του u_9 (ταχύτητα αέρα σε km/h στο ύψος 9m, που διαμορφώνει τις συνθήκες εξάτμισης) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{u_m / u_9 = (z_m/z_1)^9}$$

Όπου u_m , u_9 η ταχύτητα ανέμου στα 9m, u_2=η ταχύτητα του ανέμου ίση με 2,2m/s, z_m=9m, z_1=2m, α= εκθέτης ίσος με 1/7.

Άρα: $u_9/\ 2,2= (9/2)^{1/7} \Rightarrow u_9=2,2\ (9/2)^{1/7}=2,727m/s=9,818km/h$

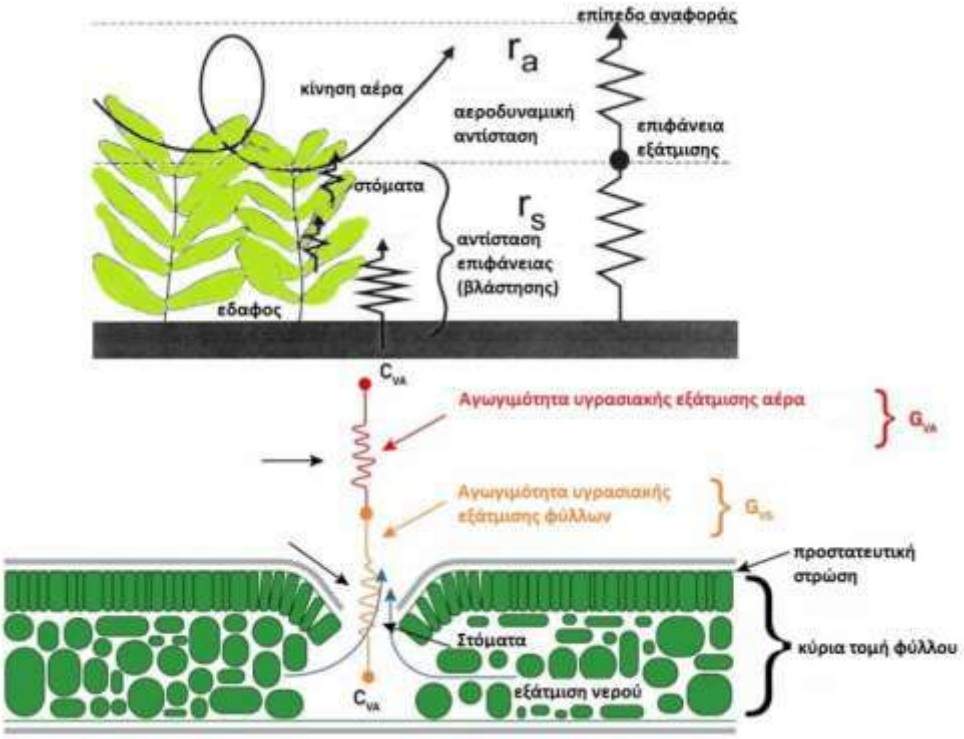
IV. <u>Συνδυασμένες μέθοδοι</u>

Οι συνδυασμένες μέθοδοι εκτίμησης της εξάτμισης & της εξάτμισιδιαπνοής, αποτελούν συνδυασμό των μεθόδων ισοζυγίου ενέργειας & μεταφοράς μάζας. Εδώ εντάσσονται οι Μετεωρολογικές-Κλιματικές Μέθοδοι που που βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην επιστήμη και την πράξη: 1. Penman-Monteith, 2. Blaney-Criddle, 3. Jensen-Haise, 4. Makkink, 5. Hargreaves, 6. Kirilova και Ogneva, 7. Thornthwaite, 8. Μοντέλο Budyko.

1. Υπολογισμός εξατμισιδιαπνοής με την εξίσωση Penman-Monteith

Είναι η μέθοδος που καθιερώθηκε από τον FAO, απαιτεί όμως δεδομένα που δεν είναι εύκολα διαθέσιμα. Η πρώτη μέθοδος συνδυασμού, για τον υπολογισμό της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια, διατυπώθηκε από τον Penman το 1948. Ο Penman συνδύασε το ενεργειακό ισοζύγιο με τη μέθοδο μεταφοράς μάζας και δημιούργησε μια εξίσωση υπολογισμού της εξατμισιδιαπνοής ανοιχτών υδατοσυλλογών από μετεωρολογικά αρχεία ηλικακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας, υγρασίας και

ταχύτητας ανέμου. Αργότερα (1965) η εξίσωση Penman τροποποιήθηκε από τον Monteith, ώστε να υπολογίζει και την εξατμισιδιαπνοή από εδαφικές επιφάνειες. Τα μετεωρολογικά στοιχεία που χρησιμοποιεί η μέθοδος Penman είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, σχετική ηλιοφάνεια και η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 12. Υγρασιακή εξάτμιση βλάστησης και κίνηση νερού μέσω φυλλικών στομάτων

$$Εξατμισοδιαπνοή = \frac{\Delta * (καθαρή\ ακτιμοβολία) + \gamma * (ενέργεια\ μεταφερόμενη\ με\ τους\ υδρατμούς}{\gamma + \Delta}$$

$$Εξατμισοδιαπνοή\ ETo = \frac{0{,}408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\gamma + \Delta * (1 + 0.34 * u_2)}$$

ETo= εξατμισιδιαπνοή σε mm/μέρα

R_n= ηλιακή ακτινοβολία στην βλαστητική επιφάνεια MJ ανά m^2 και ανά μέρα

G= πυκνότητα εδαφικής θερμικής ροής MJ ανά m^2 και ανά μέρα

T= μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα σε ύψος 2μ

u_2=ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2μ

e_s=πιέση εξάτμισης κορεσμού (kPa/^oC)

e_a=πραγματική πίεση εξάτμισης (kPa/^oC)

e_s-e_a=έλειμμα πίεσης εξάτμισης κορεσμού αέρα (kPa)

Δ: η κλίση της καμπύλης που παριστάνει τη σχέση μέγιστης τάσης υδρατμών και θερμοκρασίας, στη θερμοκρασία του αέρα (kPa/^{o}C)

γ= ψυχρομετρική σταθερά (kPa/^{o}C)

Στον παρονομαστή, το $(1 + 0.34 * u_2) = (1 + \frac{r_s}{r_a})$

r_a= αεροδυναμική αντίσταση

r_s= αντίστασης επιφάνειας ενός φύλλου ίση με την αντίσταση των στομάτων καλά φωτιζόμενων φύλλων προς $LAI_{ενεργό}$.

$LAI_{ενεργό}$ είναι φυλλική επιφάνεια σε m^2 ανά m^2 εδαφικής επιφάνειας που ενεργά συνεισφέρει στη μεταφορά επιφανειακής θερμότητας και υγρασίας. Είναι συνήθως το κορυφαίο φωτεινό τμήμα μιάς πυκνής κόμης. Εξαρτάται από το είδος της βλάστησης και την πυκνότητά της.

Ο παράγοντας επιφανειακής αντίστασης r_s περιγράφει την αντίσταση της ροής υγρασίας μέσα από τα ανοίγματα των στομάτων, τη συνολική φυλλική αλλά και εδαφική επιφάνεια. Η αεροδυναμική αντίσταση r_a, περιγράφει την αντίσταση της βλάστησης στην ανοδική κίνηση του αέρα. Αφορά την δύναμη τριβής του αέρα που κινείται μέσα στη βλάστηση. Η αντίσταση αυτή των στομάτων επηρεάζεται από το κλίμα και τη διαθέσιμη υγρασία. Όταν το φυτό είναι στρεσαρισμένο, η αντίσταση αυξάνεται και η διαθέσιμη εδαφική υγρασία περιορίζει την εξατμισιδιαπνοή. Γενικά ισχύει για την παρεδαφιαία βλάστηση ότι:

$$LAI_{ενεργό}=\frac{LAI}{2}$$

Η εξάτμιση από υδάτινη επιφάνεια με τη μέθοδο του Penman δίνεται από την εξίσωση:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\cdot\frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}\cdot F(u)\cdot D \quad (kg/m^2d)$$

όπου,

E : η λαμβάνουσα χώραν ποσότητα ημερήσιας εξάτμισης ανά m^2 επιφάνειας (kg/m^2d),

γ : ψυχρομετρικός συντελεστής (hPa/°C),

Δ : η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών (hPa/°C),

R_n : η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας (kJ/m^2d),

λ : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (kJ/kg),

F(u) : η συνάρτηση ταχύτητας του ανέμου [$kg/(hPa \cdot m^2d)$], και

D : το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών (hPa)

Επειδή η εξάτμιση E δίνεται σε kg νερού ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας και ημέρα, διαιρούμενη με την πυκνότητα του νερού (kg/m^3), προκύπτει η αντίστοιχη ημερήσια εξάτμιση E σε m/ημέρα. Συνήθως τα

τελικά αποτελέσματα δίνονται σε mm/ημέρα ή mm/μήνα. Στη συνέχεια δίνεται σχετικό παράδειγμα υπολογισμού της εξάτμισης με τη μέθοδο του Penman.

Παράδειγμα: Να υπολογιστεί με τη μέθοδο Penman η εξάτμιση του μήνα Μαϊου του λιμναίου ταμιευτήρα φράγματος. (*το δάσος μπορεί να παρέχει στην ατμόσφαιρα περισσότερη υγρασία σε σχέση με την εξάτμιση μιάς υδάτινης επιφάνειας*).

Δίνονται:

- το γεωγραφικό πλάτος του ταμιευτήρα είναι 40° βόρειο (Γ.Π.=40°Β)
- η μέση θερμοκρασία του Μαϊου είναι 18°C,
- η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από το έδαφος είναι u_2 = 18 km/h,
- η σχετική υγρασία είναι U = 65%,
- η μέση παρατηρηθείσα ηλιοφάνεια ανά ημέρα είναι 12 ώρες, και
- ο συντελεστής ανάκλασης είναι r = 0,06.

Λύση

Η εξάτμιση, υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση του Penman ως εξής:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\cdot\frac{R_n}{\lambda}+\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}\cdot F(u)\cdot D$$

Οι επιμέρους παράγοντες της σχέσης του Penman υπολογίζονται ως εξής:

I. Υπολογισμός της κλίσης της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών Δ: Η κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών Δ υπολογίζεται από τη σχέση ως εξής:

$$\Delta = \frac{4.098\cdot e_s}{(T+237{,}3)^2}\text{, σε hPa/°C}$$

όπου:

e_s=η πίεση κορεσμού των υδρατμών σε θερμοκρασία T^{o}C. Η πίεση των υδρατμών υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$e_s = 6{,}11\cdot e^{\frac{17{,}27\cdot T}{T+237{,}3}}$$

e= η βάση των νεπέριων λογάριθμων e=2,1718

T=η θερμοκρασία αέρα σε ^{o}C (T=18 ^{o}C). Για αυτή τη θερμοκρασία η πίεση υδρατμών e_s ανέρχεται σε:

$$e_s = 6{,}11\cdot e^{\frac{17{,}27\cdot 18}{18+237{,}3}} = 20{,}647 \quad \text{hPa και επομένως έχουμε:}$$

$$\Delta = \frac{4.098\cdot 20{,}65}{(18+237{,}3)^2} = 1{,}298 \quad \text{hPa/°C}$$

II. Υπολογισμός του ψυχρομετρικού συντελεστή γ:

Ο ψυχρομετρικός συντελεστής γ, έχει τιμή: γ = 0,67 hPa/°C

III. Υπολογισμός της λανθάνουσας θερμοκρασίας εξάτμισης του νερού λ:

Η λανθάνουσα θερμοκρασία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda = 2.501\text{-}2{,}361 \cdot T$$

$$\text{άρα } \lambda = 2.501\text{-}2{,}361 \cdot 18 = 2.458{,}502 \quad kJ/kg$$

IV. Η συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου F(u) σε kg/(hPa·m^{2}d) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση ως εξής:

$$F(u) = 0{,}26 \cdot (1+0{,}54 \cdot u_2)$$

όπου,

Fu= η συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου kg/(hPa·m^{2}d)

u_2= η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m από το έδαφος, (m/sec).

Για ταχύτητα ανέμου u_2:18km/h έχουμε u_2:5,0m/s

Άρα έχουμε:

$$F(u) = 0{,}26 \cdot (1+0{,}54 \cdot u_2)=0{,}26(1+0{,}54*5{,}0=0{,}962 kg/(hPa \cdot m^2 d)$$

V: Το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών D υπολογίζεται από την εξίσωση ως εξής:

$$D = e_s\text{-}e = e_s\text{-}Ue_s \quad (hPa)$$

$$D = e_s\text{-}e = e_s\text{-}(Ue_s)= 20{,}647\text{-}(0{,}65 \cdot 20{,}647) =20{,}647\text{-}13{,}421=7{,}226 \text{ hPa}$$

όπου η τιμή της μερικής πίεσης των υδρατμών e που δίνεται από την εξίσωση:

$$e = U \cdot e_s \quad (hPa)$$

U=0,65, είναι η σχετική υγρασία και $e = 0{,}65 \cdot 20{,}647 = 13{,}421$ hPa

VI: Υπολογισμός της ολικής καθαρής ενέργειας ακτινοβολίας Rn :

Το άθροισμα των εισερχόμενων–εξερχόμενων ακτινοβολιών είναι ίσο με $R_n = S_n\text{-}L_n$, όπου S_n το αλγεβρικό άθροισμα της εισερχόμενης-ανακλώμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας και L_n η καθαρή μακροκυματική ακτινοβολία. Το άθροισμα της εισερχόμενης-ανακλώμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας προκύπτει από τη σχέση ως εξής:

$$S_n = (1-r) \cdot S_0 \cdot (0{,}29 \cdot \cos\varphi + 0{,}55 \cdot \frac{n}{N})$$

όπου,

r : ο συντελεστής ανάκλασης (albedo) ίσος με 0,06,

S_o : η ακτινοβολία βραχέων κυμάτων στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας S_o. Η ακτινοβολία προκύπτει ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους του μήνα που εξετάζεται και λαμβάνεται από τον Πιν. 12 για το μήνα Μάιο σε γεωγραφικό πλάτος φ=40° ανέρχεται σε:

S_o = 39,564 kg/m^2ημ

φ : το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (φ=40° Γ.Π.)

n : οι πραγματικές ώρες, και

N : οι δυνατές ώρες ηλιοφάνειας. Οι δυνατές ώρες ηλιοφάνειας N δίνονται στον Πίν. 12 (για τα δεδομένα της άσκησης έχουμε N = 14,2 ώρες) και οι πραγματικές ώρες ηλιοφάνειας n, σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματος είναι 12.

Με βάση τα παραπάνω επιλύοντας τη σχέση προκύπτει η ακόλουθη η τιμή του S_n:

$$S_n = (1-0,06)\cdot 39.564 \cdot \left(0,29\cdot\cos 40^o + 0,55\cdot\frac{12}{14,2}\right) =$$

S_n = 25.547,47 kJ/m^2d

VII: Η καθαρή μακροκυματική ακτινοβολία L_n δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$L_n = E_n \cdot f_1 \cdot \sigma \cdot (T+273)\cdot 4$$

όπου,

Ln : η καθαρή μικροκυματική ακτινοβολία Ln

σ : η σταθερά του νόμου θερμικής εκπομπής σ = 4.910^{-6} (m^2k^4d), και

E_n: αδιάστατος συντελεστής που, υπολογίζεται κατά Penman, από τη σχέση:

$$E_n = 0,56 + 0,08\cdot e^{0,5}$$

(e= η τιμή της μερικής πίεσης των υδρατμών: e=13,421)

άρα: $E_n = 0,56 - 0,08\cdot 13,421^{0,5} = 0,293$

Πίνακας 12: Μέσες μηνιαίες τιμές της αστρονομικής διάρκειας ημέρας N σε ώρες για γεωγραφικά πλάτη (φ) 36° – 46° στο Βόρειο Ημισφαίριο.

Μήνας	**Γεωγραφικό πλάτος φ (^{o})**					
	36	**38**	**40**	**42**	**44**	**46**
Ιαν.	9,8	9,7	9,5	9,3	9,1	8,9
Φεβ.	10,6	10,5	10,4	10,3	10,2	10,1
Μάρ.	11,7	11,7	11,7	11,7	11,6	11,6
Απρ.	12,9	13,0	13,0	13,1	13,2	13,3
Μάϊ.	13,9	14,0	14,2	14,4	14,5	14,7
Ιούν.	14,4	14,6	14,8	15,0	15,2	15,5
Ιούλ.	14,2	14,4	14,5	14,7	14,9	15,2
Αύγ.	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9
Σεπτ.	12,2	12,2	12,3	12,3	12,3	12,3
Οκτ.	11,1	11,0	10,9	10,8	10,7	10,7
Νοέ.	10,1	9,9	9,8	9,6	9,4	9,2
Δεκ.	9,6	9,4	9,2	9,0	8,8	8,5

Ο συντελεστής επίδρασης της νέφωσης f_1 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_1 = 0{,}1 + 0{,}9 \cdot (\frac{n}{N})$$

άρα, $f_1 = 0{,}1+0{,}9\cdot(12/14{,}2) = 0{,}861$

και συνεπώς η τιμή της καθαρής μακροκυματικής ακτινοβολίας, ανέρχεται σε:

$$L_n = E_n\ f_1 \cdot \sigma\ (T + 273)^4 = 0.293 \cdot 0.861 \cdot (4.91 \cdot 10^{-6}) \cdot (18+273)^4 = 8.882.28\ kj/(m^2 d)$$

Επιλύοντας τη σχέση $R_n = S_n - L_n$ για (S_n= 25.547,47 kj/m^2d και L_n = 8.882,28kj/m^2d) έχουμε:

$$R_n = 25.547{,}47 - 8.882{,}28 = 16.665{,}19\ kJ/m^2 d$$

VIII: Τελικός υπολογισμός της εξάτμισης Ε με τη μέθοδο (εξίσωση) Penman:

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω υπολογισθείσες τιμές στην εξίσωση, προκύπτει η ακόλουθη τιμή της εξάτμισης Ε:

$$E = \left[\left(\frac{1{,}298}{(1{,}298 + 0.76)}\right) \cdot \left(\frac{16.665{,}19}{2.458.502}\right)\right] + \left[\left(\frac{0.76}{1{,}298 + 0{,}76}\right) \cdot 0{,}962 \cdot 7{,}226\right] = 6{,}842 \quad kg/(m^2 d)$$

με δεδομένο ότι η πυκνότητα του νερού είναι: ρ=1.000 kg/m^3, προκύπτει ότι η μέση ημερήσια εξάτμιση Ε του Μαϊου στην μελετούμενη περιοχή ανέρχεται σε:

$$E = \frac{6{,}842}{1.000} = 0{,}006842 \quad m/d \quad \text{ή} \qquad E = 6{,}842\ mm/d$$

Επομένως η μέση συνολική εξάτμιση του μήνα Μάιου ανέρχεται σε:

$$\Sigma E_{Μαΐου} = E \cdot Nd \cdot 6{,}842mm \cdot 31 = 212{,}10\ mm$$

2. **Υπολογισμός της εξατμισιδιαπνοής με την εξίσωση Thornthwaite**

Ο Thornthwaite (1948) δημιούργησε μία εξίσωση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού. Η εξίσωση που εκτιμά τη μηνιαία εξατμισιδιαπνοή με βάση μόνο τη μέση μηνιαία θερμοκρασία, έχει τη μορφή της σχέσης που ακολουθεί και παρέχει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα σε υγρές περιοχές με επαρκή φυτοκάλυψη.

$$ET_\rho = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot t_i}{J}\right)^\alpha \cdot \frac{\mu \cdot N}{365}$$

όπου, ET_ρ *: η μέση μηνιαία δυνητική ή δυναμική εξατμισιδιαπνοή ETp (mm/μήνα),*

L_d *: ο λόγος της μέσης διάρκειας ημέρας κάθε μήνα προς ημέρα διάρκειας 12 ωρών*

$$L_d = \frac{\mu \cdot N}{365}$$

μ *: ο αριθμός ημερών του μήνα,*

N *: η μέση διάρκεια της ημέρας,*

t_i : *η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C,*

J : *ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας, που δίνεται από τη σχέση:*

$$J = \sum_{i=1}^{12} j_i$$

Ο μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας j_i είναι συνάρτηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας t και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$j_i = \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1,514}$$ *ή σε $j_i = 0,09 \cdot t_i^{3/2}$ (απλοποιημένη μορφή)*

α : *μια εμπειρική παράμετρος που είναι συνάρτηση του δείκτη J και υπολογίζεται από τη σχέση:*

$\alpha = (675 \cdot 10^{-9})J^3-(771 \cdot 10^{-7})J^2+(179 \cdot 10^{-4})J+0,492$

$\alpha = 0,016 \cdot J+0,5$ *(απλοποιημένη κατά Serra μορφή).*

(Η διαφορά του αποτελέσματος των δύο τύπων είναι αμελητέα)

Οι τιμές του παράγοντα L_d, που παρέχονται στον Πίνακα 13 α,β, αναφέρονται στο γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μελέτης σε συνάρτηση με το μήνα του έτους. Η χρήση του διορθωτικού συντελεστή θεωρείται απαραίτητη διότι κάθε μήνας δεν έχει 30 μέρες ούτε 12 ώρες ηλιοφάνεια.Τα μηνιαία λοιπόν ποσοστά ωρών ημέρας επί τοις % ωρών ημέρας του έτους έχουν ως ακολούθως.

Πίνακας. 13α: Μηνιαία ποσοστά ωρών ημέρας % των ωρών ημέρας του έτους.

Β. Γεωγρ Πλάτος	**ΜΗΝΑΣ**											
	Ιαν.	**Φεβ**	**Μάρ**	**Απρ.**	**Μάϊ.**	**Ιούν.**	**Ιούλ.**	**Αύγ.**	**Σεπ.**	**Οκτ.**	**Νοε.**	**Δεκ.**
24	7,58	7,17	8,40	8,60	9,30	9,20	9,41	9,05	8,31	8,09	7,43	7,46
26	7,49	7,12	8,40	8,64	9,38	9,49	9,10	8,31	8,06	9,30	7,36	7,35
28	7,40	7,07	8,39	8,68	9,46	9,38	9,58	9,16	8,32	8,02	7,27	7,27
30	7,30	7,03	8,38	8,72	9,53	9,49	9,67	9,22	8,34	7,99	7,19	7,14
32	7,20	6,97	8,37	8,75	9,63	9,60	9,77	9,28	8,34	7,93	9,11	7,05
34	7,10	6,91	8,36	8,80	9,72	9,70	9,88	9,33	8,36	7,90	7,02	6,92
36	6,99	6,86	8,35	8,85	9,81	9,83	9,99	9,40	8,36	7,85	6,92	6,79
38	6,87	6,79	8,34	8,90	9,92	9,95	10,10	9,47	8,38	7,90	6,82	6,66
40	6,76	6,73	8,33	8,95	10,02	10,08	10,22	9,54	8,38	7,75	6,72	6,52
42	6,62	6,65	8,31	9,00	10,14	10,21	10,35	9,62	8,40	7,70	6,62	6,38
44	6,40	6,58	8,30	9,05	10,26	10,38	10,49	9,70	8,41	7,63	6,49	6,22
46	6,33	6,50	8,29	9,12	10,39	10,54	10,64	9,79	8,42	7,58	6,36	6,04
48	6,17	6,42	8,27	9,18	10,53	10,71	10,80	9,89	8,44	7,51	6,22	5,86
50	5,98	6,32	8,25	9,25	10,69	10,93	10,99	10,00	8,44	7,43	6,07	5,65

Πίνακας 13β: Διορθωτικός συντελεστής εξατμισιδιαπνοής λόγω γεωγραφικού πλάτους

Γ.Π.	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
20	0,95	0,9	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1	0,93	0,94
30	0,9	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,2	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
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
39	0,85	0,84	1,03	1,11	1,23	1,24	1,26	1,18	1,04	0,96	0,84	0,82
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
41	0,83	0,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	0,96	0,82	0,8
45	0,8	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75

Στη συνέχεια των ανωτέρω ακολουθεί ένα παράδειγμα υπολογισμού της δυνητικής κατά Thornthwaite εξατμισιδιαπνοής $ET_ρ$.

Παράδειγμα: Στον Πίνακα 14 που ακολουθεί δίνονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιοχής της λεκάνης απορροής του χειμάρρου Λιαπατόρεμα του νομού Φθιώτιδας του οποίου το κέντρο βάρους της λεκάνης βρίσκεται σε Γ.Π. 36 Βόρειο. Να εκτιμηθούν οι μηνιαίες και η ετήσια τιμή της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής κατά Thornthwaite $ET_ρ$.

Πίνακας 14: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιοχής.

Μήνας	Θερμοκρασία	Μήνας	Θερμοκρασία αέρα	Μήνας	Θερμοκρασία αέρα
ΙΑΝ	5,1	ΜΑΙΟΣ	18,9	ΣΕΠΤ.	20,4
ΦΕΒΡ.	6,5	ΙΟΥΝ.	24,2	ΟΚΤ.	15,7
ΜΑΡΤ.	8,5	ΙΟΥΛ.	25,6	ΝΟΕΜ.	9,9
ΑΠΡ.	13,8	ΑΥΓ.	24,6	ΔΕΚ.	5,8
				ΕΤΟΣ	14,92

Βήμα 1^{ο} : Σε πρώτη φάση υπολογίζεται η αρχική μέση τιμή της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής ($ET_ρ$), έκαστου μήνα, που αποτελεί το πρώτο σκέλος της εξίσωσης του Thornthwaite:

$$(ET_ρ)_x = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot t_i}{J}\right)^{α}$$

Όπου:

- Οι θερμοκρασίες t_i λαμβάνονται από τα δεδομένα του Πίνακα 14
- Ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας υπολογίζεται από τη σχέση ($J = \sum j_i$)

Ένθα: j_i=ο μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας που υπολογίζεται από την σχέση $j_i = \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1,514}$

Ο συντελεστής α υπολογίζεται από τη σχέση α = 0,016·J+0,5 = 1,43

Βήμα 2^{ο} : Ακολουθεί ο υπολογισμός της διορθωμένης ή προσαρμοσμένης στα κλιματικά δεδομένα εκάστης περιοχής τελική τιμή της μηνιαίας δυνητικής εξατμισιδιαπνοής ETp με την επίλυση της ακόλουθης σχέσης:

$$ET_p = (\mathrm{ET}_p)_x \cdot \frac{\mu \cdot \mathrm{N}}{365}$$

Η μέση διάρκεια της ημέρας N και ο αριθμός ημερών του μήνα μ, παρέχεται από σχετικούς πίνακες.

Βήμα 3° : Η ετήσια τελική τιμή της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής ETp υπολογίζεται ως το άθροισμα των μηνιαίων τιμών από τη σχέση:

$$ET_\rho = \sum_{i=1}^{12} (ET_\rho)_i \quad \text{(mm)}$$

Βήμα 4° : Η όλη εργασία υπολογισμού της αρχικής και της διορθωμένης ή προσαρμοσμένης στα κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, μορφοποιείται στον Πίνακα 15.

Πίνακας 15: Εκτίμηση της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής ET_ρ, με τη μέθοδο του Thornthwaite.

Μήνας	Μέση μηνιαία θερμ. αέρα t_i (^{o}C)	Μηνιαίος δείκτης θερμ. j_i	Ετήσιος δείκτης θερμ J ET_ρ	Συντελεστής α	Αρχική μέση μηνιαία εξατμισιδιαπνοή (ETp) mm	Αριθμός ημερών του μήνα M	Διορθωμένη μέση μηνιαία εξατμισιδιαπνοή (ETp) mm
Ιανουάριος	5,1	1,03			9,94	31	8,55
Φεβρουάριοςς	6,5	1,49			14,59	28	12,40
Μάρτιος	8,5	2,23			22,30	31	22,97
Απρίλιος	13,8	4,65			48,00	30	52,32
Μάιος	18,9	7,49			78,95	31	96,31
Ιούνιος	24,2	10,89			116,72	30	142,40
Ιούλιος	25,6	11,85			127,59	31	158,21
Αύγουστος	24,6	11,16			119,79	31	138,96
Σεπτέμβριος	20,4	8,41			89,08	30	91,76
Οκτώβριος	15,7	5,65			58,87	31	57,10
Νοέμβριος	9,9	2,81			28,38	30	24,12
Δεκέμβριος	5,8	1,25			12,18	31	10,23
Έτος	14,92	68,91	68,91	1,603	726,4	365	815,3

Η μεθοδος Thornthwaite είναι διεθνώς η καταλληλότερη υποψήφια για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές εκτίμησης της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής και την αξιολόγηση των συνθηκών ξηρασίας διαφορετικών κλιμάτων και γαιών διότι έχει πολύ μικρές απαιτήσεις εισροής δεδομένων συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Μέθοδοι όπως η Penman (1948), που είναι εκφράσεις του ενεργειακού ισοζυγίου, προϋποθέτουν πολύπλοκες κλιματικές παραμέτρους για την ακριβή εκτίμηση της δυνητικής ή της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής. Εφαρμογές μεγάλης κλίμακας δεν είναι εφικτές λόγω αυτών των περιορισμών και έτσι η συνήθης επιλογή είναι η χρήση μοντέλων που στηρίζονται στις θερμοκρασίες.

Ωστόσο, η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα μοντέλα που στηρίζονται μόνο στη θερμοκρασία αέρα έχουν μικρή απόδοση διότι η θερμοκρασία δεν περιγράφει επαρκώς τις διακυμάνσεις εξάτμισης.

Οι Aschonitis et. al., (2021), όπως άλλοι ερευνητές στο παρελθόν, δημιούργησαν παγκόσμιες βάσεις δεδομένων τοπικών διορθωτικών συντελεστών, ώστε να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα εκτίμησης της μηνιαίας εξατμισιδιαπνοής της μεθόδου Thornthwaite χρησιμοποιώντας ως βάση αναφοράς τη μέθοδο εκτίμησης της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής του FAO. Η διόρθωση στηρίζεται στην υπόθεση ότι τοπικοί διορθωτικοί συντελεστές που ενσωματώνουν την τοπική επίδραση της ταχύτητας του ανέμου, της υγρασίας αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του αρχικού μοντέλου Thornthwaite. Η βάση δεδομένων αναπτύχθηκε με τη χρήση παγκόσμιων βαθμίδων θερμοκρασίας και πραγματικής εξατμισιδιαπνοής 50 ετίας των ελεύθερα προσβάσιμων κλιματικών βάσεων δεδομένων. Οι διοθρωμένοι συντελεστές προέκυψαν ως μερικώς σταθμισμένοι μέσοι της μηνιαίας αναλογίας ETr/ETp εξαιρώντας τις μηνιαίες τιμές ETr ή ETp που είναι μικρότερες των 45mm/μήνα (ETp<45mm/μήνα), διότι αυτή η αναλογία γίνεται εξαιρετικά ασταθής για χαμηλές θερμοκρασίες (όπου παρατηρείται μικρή εξάτμιση). Με τους διορθωτικούς συντελεστές, οι χειμερινές τιμές (Δεκεμβρίου, Γενάρη και Φλεβάρη) εκτιμώνται εξαιρετικά υψηλά. Σε περίπτωση τοποθεσίας όπου όλες οι μηνιαίες τιμές εξατμισιδιαπνοής είναι <45mm/μήνα, οι ερευνητές προτείνουν τη χρήση διορθωτικού συντελεστή παρακείμενης περιοχής ή της αρχικής τιμής του μοντέλου Thorthwaite (χωρίς διόρθωση). Η απόδοση των ξηροθερμικών δεικτών με τη χρήση της διορθωμένης φόρμουλας βελτιώθηκε πάρα πολύ στις μη υγρές βαθμίδες. Οι διορθωτικοί συντελεστές μείωσαν την εκτιμώμενη μηνιαία ETp από 37,2mm σε 30,0mm και την ετήσια από 388,8mm σε 174,8mm. Γενικά, η αρχική μέθοδος **υποεκτιμά** τη δυνητική εξατμισιδιαπνοή σε **ξηρά** περιβάλλοντα, ενώ σε υγρά περιβάλλοντα την **υπερεκτιμά (σημαντικά)** άρα οι διοθρωτικοί συντελεστές μειώνουν το εκτιμώμενο αποτέλεσμα. Για την Ελλάδα οι διορθωτικές τιμές κυμαίνονται από 1.1-1.5. Η βάση δεδομένων των Aschonitis et. al., 2021, δίνεται στο https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.932638

4.3. Μέθοδοι προσδιορισμού της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής

Για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής ETr μικρού σχετικά χρονικού διαστήματος, θα απαιτείται η γνώση του συστήματος έδαφος – φυτό – ατμόσφαιρα. Η μέση πραγματική εξατμισιδιαπνοή μεγαλύτερων χρονικά περιόδων μπορεί να προκύψει με ικανοποιητική προσέγγιση συναρτήσει των μέσων τιμών εύκολα μετρήσιμων παραγόντων, όπως η βροχόπτωση και η θερμοκρασία αέρα. Η μέση ετήσια πραγματική εξατμισιδιαπνοή μιας περιοχής εξαρτάται από πολλούς παραγόντες που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα της εξάτμιση και τη διαπνοή όπως το συνολικό ύψος βροχής και η κατανομή της βροχής, η μορφή και η έκταση της φυτοκάλυψης, το γεωλογικό χαρακτηριστικό και οι μετεωρολογικές συνθήκες που επηρεάζουν την εξάτμιση και διαπνοή. Σε μία ομοιογενή γεωλογικά, εδαφικά και κλιματικά περιοχή η ετήσια πραγματική εξατμισιδιαπνοή μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του ετήσιου ύψους

βροχής και της ετήσιας θερμοκρασίας. Οι σημαντικότερες από τις ημιεμπειρικές μεθόδους είναι οι μέθοδοι **Turc και Coutagne και Ol'Deop**, που περιγράφονται στη συνέχεια. Παράλληλα ευρεία εφαρμογή βρίσκουν οι μέθοδοι προσωμοίωσης των λεκανών με κυριότερες μεθόδους εφαρμογής τη μέθοδο του συντελεστή απορροής, της σύγκρισης με ομοειδείς λεκάνες, τη μέθοδο Viparelli και τη βελτιωμένη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου (Μέθοδος Thornthwaite-Mather).

Οι τιμές της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας Τ, είναι εύκολα μετρήσιμες ή μπορούν να προσδιοριστούν με ικανοποιητική ακρίβεια μέσω σχετικών διαγραμμάτων. Για περαιτέρω απλοποίηση και προς αποφυγή σφαλμάτων οι σχετικές εξισώσεις των μεθόδων Turc και Coutagne τίθενται υπό αδιάστατη μορφή με την εισαγωγή αδιάστατων μεταβλητών ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{E}{P} \ , \ H = \frac{P}{L}, \ \eta = \frac{P}{1}$$

- **Μέθοδος Turc**

Ο Turc (1961) ανέλυσε δεδομένα που συνέλεξε από 254 λεκάνες απορροής, τοποθετημένες πρακτικά σε κάθε μέρος του κόσμου και συσχέτισε την εξάτμιση με τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία. Η παραπάνω συσχέτιση απέδωσε την ακόλουθη εξίσωση:

$$ET_r = \frac{P}{\left[0{,}9 + \left(P/I_T\right)^2\right]^{0{,}5}}$$

Όπου:

ET_r: η πραγματική ή αληθής εξατμισιδιαπνοή σε (mm),

P: το μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων (mm),

I_T ή L : Σταθερά θερμοκρασίας υπολογισμένη από τη σχέση:

$$L = 300+25 \cdot T+0{,}05 \cdot T^3$$

Ένθα: Τ: η μέση ετήσια θερμοκρασία σε °C.

Ο Turc προχώρησε περαιτέρω και διατύπωσε μια νέα τροποποίηση της εξίσωσης, που λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση της μεταβολής της εδαφικής υγρασίας. Η νέα τροποποιημένη εξίσωση Turc έχει ως εξής:

$$ET_r = E = \frac{P + E_{10} + K}{\left[I + \left(\frac{P+E}{I_T} + \frac{K}{2 \cdot I_T}\right)\right]^{0{,}5}}$$

όπου:

E : η εξάτμιση ή η πραγματική εξατμισιδιαπνοή σε mm, περιόδου 10 ημερών,

E_{10} : η εκτιμώμενη εξάτμιση (στην ίδια 10ήμερη περίοδο) που λαμβάνει χώρα σε γυμνό έδαφος, υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει κατακρήμνιση αν συμβαίνει αυτή δεν είναι μεγαλύτερη από 10mm,

K : παράγοντας καλλιέργειας που εκφράζεται από τη σχέση:

$$K = 25 \cdot (c \cdot M/G)^{0,5}$$

Όπου:

100M : είναι η τελική απόδοση της ξηρής ύλης σε kg/ha,

10G : το μέγεθος της περιόδου ανάπτυξης σε μέρες, και

c : συντελεστής καλλιέργειας,

I_T : είναι η ικανότητα εξάτμισης του αέρα, υπολογισμένη από την ακόλουθη σχέση:

$$I_r = (T + 2) \cdot R_s^{0,5} / 16$$

Όπου:

T: η μέση θερμοκρασία του αέρα της 10ήμερης περιόδου σε °C, και

R_s: η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε cal/cm^2 ημέρα.

Για τις κλιματικές συνθήκες της Δυτικής Ευρώπης, ο Turc υπολόγισε ότι η πραγματική εξατμισιδιαπνοή (ET_r) σε mm/ημέρα για 10ήμερες περιόδους είναι:

α) για σχετική υγρασία RH>50%:

$$ET_r = 0,013 \cdot \frac{T}{T + 15} \cdot (R_s + 50)$$

β) για σχετική υγρασία RH<50%

$$ET = 0,013 \cdot \frac{T}{T + 15} \cdot (R_s + 50) \cdot \left(1 + \frac{50 - RH}{70}\right)$$

Όπου:

T = η μέση θερμοκρασία σε °C, και

R =η ηλιακή ακτινοβολία σε ly/ημέρα.

<u>Απλοποιημένη μορφή:</u>

E = (0,90+H2)-1/2 για H>0,316

Είναι προφανές ότι η εξίσωση Turc ισχύει για τις τιμές Η οι οποίες παρέχουν ε≤1 ή για Η≥0,316. Για μικρότερες τιμές του Η ισχύει η σχέση για δοσμένες τιμές του μέσου ετήσιου ύψους βροχής Ρ και της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας.

ε = 1 για H<0,316

- **Μέθοδος Παυλίδη**

Ο Παυλίδης στη βελτιωμένη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου (βλ κεφάλαιο Υδατικοί Πόροι), η οποία περιλαμβάνει την υδατοσυγκράτηση, υπολογίζει την πραγματική εξατμισιδιαπνοή ως εξής:

Όταν υπάρχει μηνιαίο ύδατικό πλεόνασμα, τότε Etr=Etp,

Όταν όμως καταγράφεται μηνιαίο υδατικό έλειμμα, τότε ETr=P-I+ΔS

όπου:

P: μηνιαία κατακρημνίσματα

I: Υδατοσυγκράτηση

ΔS: Κατανάλωση εδαφικής υγρασίας (διαφορά εδαφικής υγρασίας τρέχοντος μήνα μειον την εδαφική υγρασία προηγούμενου μήνα).

Για τα μετεωρολογικά δεδομένα της άσκησης που δίνεται στο τέλος του βιβλίου, ο Turc εκτιμά την ετήσια Etr=418,31mm, σημαντικά μικρότερη του μισού της αντίστοιχης δυνητικής Etp=904,5mm. Αφαιρώντας από τα ετήσια κατακρημνίσματα, την ετήσια Etr προκύπτει υδατοσυγκράτηση ίση με 28,39mm, πολύ κοντά στην αθροιστική τιμή της για τους μήνες που εμφανίζεται υδατικό πλεόνασμα (29,86mm).

- **Μέθοδος Coutagne**

Η μέθοδος Coutagne, της μέσης ετήσιας τιμής της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής βασίζεται στα ίδια δεδομένα με τη μέθοδο του Turc για τον υπολογισμό. Η σχέση που διατύπωσε ο Coutagne έχει ως εξής:

$$ET_r = E = P \cdot \left(1 - \frac{P}{1}\right)$$

Όπου:

E, ET_r και P = όπως έχουν οριστεί παραπάνω από στη μέθοδο του Turc,

I = είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$I = 800+140 \cdot T \quad (mm)$$

T = η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρος σε °C.

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν μόνο εφόσον το ύψος της βροχόπτωσης περιέχεται μεταξύ των ορίων 1/8 και 1/2 δηλαδή ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{8} \le P \le \frac{1}{2}$$

Περίπτωση 1η : Στη περίπτωση που το ύψος της βροχόπτωσης είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο του ελλείμματος ροής ισχύουν τα ακόλουθα: Εάν το ύψος της βροχόπτωσης είναι μικρότερο του 1/8 τότε το έλλειμμα ροής ισούται προς τη βροχόπτωση και συνεπώς καμία απορροή δεν λαμβάνει χώρα. Ισχύει δηλαδή η σχέση:

$$E = P \text{ για } (P<1/8)$$

Περίπτωση 2η : Εάν το ύψος βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερο του 1/2 τότε το έλλειμμα ροής είναι ανεξάρτητο, οπότε η βροχόπτωση προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$ET_r = E = \frac{1}{4} = 200 + 35 \cdot T$$

E, ET_r και P = όπως έχουν οριστεί παραπάνω από στη μέθοδο του Turc,

$$\varepsilon = \frac{1}{4 \cdot \eta} \text{ για } \left(\eta > \frac{1}{2} \right)$$

Απλοποιημένη μορφή:

$$\varepsilon = 1 \text{ για } \eta < \frac{1}{8}$$

$$\varepsilon = 1\text{-}\eta \text{ για } \left(\frac{1}{8} \le \eta \le \frac{1}{2} \right)$$

- **Μέθοδος Ol' Decop**

Ο Ol' Decop για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής, διατύπωσε την παρακάτω εξίσωση:

$$E = P \cdot \left[1 - \exp\left(- \frac{ET_\rho}{P} \right) \right]$$

Όπου:

E = η ετήσια πραγματική εξατμισιδιαπνοή σε mm,

P = η ετήσια βροχόπτωση σε mm,

ET_ρ = η ετήσια δυνητική εξατμισιδιαπνοή σε mm.

- **Μοντέλο Budyko**

Η εξάτμιση είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού που πέφτει στη στεριά. Η γνώση του μεγέθους της θα βοηθήσει στην ανάπτυξη νέων στρατηγικών διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Το μοντέλο Budyko εκτιμά την παγκόσμια εξάτμιση και δε χρησιμοποιεί τοπικές πληροφορίες αλλά μόνο δεδομένα βροχόπτωσης και βλάστησης που παρέχουν οι δορυφόροι (Mianabadi et al., 2019). Η σχέση μεταξύ μέσου ετήσιου ύψους κατακρημνισμάτων, πραγματικής και δυνητικής εξάτμισης και απορροής σε κλίμακα λεκανών απορροής, εξηγήθηκε από αρκετά φυσικά, εμπειρικά, και στατιστικά υδρολογικά μοντέλα. Το δίκτυο Budyko, (1948, 1958, 1974), αρχικά αναπτύχθηκε για να εκτιμήσει την πραγματική εξάτμιση υπό σταθερές συνθήκες και δίνει τη σχέση μέσης ετήσιας πραγματικής εξάτμισης, μέσων ετήσιων κατακρημνισμάτων και δείκτη ξηρασίας σε επίπεδο λεκάνης απορροής, γνωστή και ως η καμπύλη Budyko. Θεωρείται απλό και χρειάζεται λίγα δεδομένα σε σχέση με άλλα περίπλοκα μοντέλα. Εκτός από την άμεση εκτίμηση της εξάτμισης, χρησιμοποιείται για να διαπιστωθεί ο βαθμός ανταπόκρισης της απορροής σε αλλαγές των κλιματικών δεδομένων. Στηρίζεται στην υπόθεση ότι η μέση ετήσια εξάτμιση ελέγχεται από τη διαθέσιμη υγρασία, από τα κατακρημνίσματα και την ατμοσφαιρική ζήτηση που σχετίζεται με την ακτινοβολία. Σε πολύ ξηρές περιοχές η εξάτμιση μπορεί να φτάσει τον περιοριστικό παράγοντα των κατακρημνισμάτων. Αντίθετα, σε πολύ υγρές περιοχές, η ετήσια εξάτμιση μπορεί να φτάσει την ατμοσφαιρική ζήτηση ή τη δυνητική εξάτμιση, δηλαδή τον ενεργειακό περιοριστικό παράγοντα. Εάν η διαθέσιμη ενέργεια είναι αρκετή για την εξάτμιση της διαθέσιμης υγρασίας, η ετήσια

εξατμισιδιαπνοή μπορεί να προσεγγίσει τα ετήσια κατακρημνίσματα (που αποτελούν περιοριστικό υγρασιακό παράγοντα). Εάν η διαθέσιμη ενέργεια δεν είναι αρκετή, τη ετήσια εξατμισιδιαπνοή προσεγγίζει τη πραγματική εξατμισιδιαπνοή (ενεργειακός περιοριστικός παράγοντας). Χρησιμοποιώντας το υδατικό ισοζύγιο αλλά και το ενεργειακό ισοζύγιο, το προτεινόμενο μοντέλο Budyko μπορεί να διαχωρίσει την εξάτμισιδιαπνοή σε υδατοσυγκράτηση και διαπνοή (Mianabadi et al., 2019) και περιγράφεται ως δείκτης ξηρασίας που είναι ο λόγος της ετήσιας εξάτμισιδιαπνοής προς τα ετήσια κατακτημνίσματα. Ανάλογα με την ξηρότητα της περιοχής και τους περιορισμούς σε διαθέσιμο νερό ή σε ενέργεια, η εξάτμιση εκφράζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{E}{P} \to 1 \text{ όταν } \frac{R_n}{P} \to \infty \ (\pi o \lambda \acute{u}\ \xi \eta \rho \acute{\varepsilon} \varsigma\ \sigma \upsilon \nu \theta \acute{\eta} \kappa \varepsilon \varsigma)$$

$$E \to R_n \text{ όταν } \frac{R_n}{P} \to 0 \ (\pi o \lambda \acute{u}\ \upsilon \gamma \rho \acute{\varepsilon} \varsigma\ \sigma \upsilon \nu \theta \acute{\eta} \kappa \varepsilon \varsigma)$$

E, η μέση ετήσια εξάτμιση, P, κατακρημνίσματα και R_nακτινοβολία.

Η σχέση που συνδέει την απορροή Q με τα κατακρημνίσματα P, την εξάτμιση E και τη χρονική μεταβολή των υδατικών αποθεμάτων $\frac{dS}{dt}$, είναι:

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - E \qquad \& \qquad R_n = \rho\, \lambda\, E + H + G$$

λ= ο λανθάνων δείκτης εξάτμισης του νερού, η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για νε μετατραπεί 1γρ υγρού νερού σε ατμό χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας. Latent, σημαίνει λανθάνων δείκτης, κρυμμένος δείκτης και προέρχεται από τη λατινική λέξη latere που σημαίνει να μένει κρυμμένο, καλυμένο. Λανθάνουσα είναι η επιπρόσθετη θερμότητα που απαιτείται ώστε να αλλάξει η κατάσταση ενός υγρού και να μεταβεί αυτό σε αέρια μορφή. Για το νερό στη 1 atm και τους 100 °C (σημείο βρασμού του νερού στη 1 atm), ο δείκτης εξάτμισης είναι $2.25 \div 10^6$ J kg.

H= ορθολογικός δείκτης ροής θερμότητας. Σε αντίθεση με τον προηγούμενο δείκτη, δεν λαμβάνει χώρα αλλαγή της κατάστασης του υλικού (από υγρή σε αέρια) και η ενέργεια μεταφέρεται μέσω αγωγιμότητας μεταξύ υδάτινων επιφανειών και ατμόσφαιρας.

G= Η ροή εδαφικής θερμότητας. Σε ετήσια βάση, η καθαρή ροής εδαφικής θερμότητας θεωρείται ότι είναι αμελητέα.

Διαιρώντας την εξίσωση της ακτινοβολίας με τα κατακρημνίσματα προκύπτει ότι:

$$\frac{R_n}{P} = \frac{\rho\, \lambda\, E}{P} + \frac{H}{P}$$

Ο δείκτης ξηρότητας $\phi = \frac{E_p}{P}$

Η γενική εξίσωση Budyko παίρνει τελικά τη μορφή $\frac{E}{P} = F\left(\frac{E_p}{P}\right)$ (Mianabadi et al., 2019)

- **Μοντέλο Rutter και μοντέλο Gash**

Σχετικά αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο της Υδατοσυγκράτησης. Για περισσότερες πληροφορίες (Rutter, 1964, 1967, 1970, Rutter et.al 1971, Gash 1979, Gash et.al, 1995).

4.4. Παρατηρήσεις επί της προσομοίωσης της εξατμισιδιαπνοής

Ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που θα περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες της ροής του νερού μέσα από το σύστημα έδαφος – φυτό – ατμόσφαιρα και θα βασίζεται σε καταξιωμένες φυσικές αρχές θα αποτελούσε το ιδανικό μοντέλο, το οποίο θα μπορούσε να εφαρμοσθεί για την εκτίμηση της εξατμισιδιαπνοής σε κάθε περίπτωση. Όμως, η δημιουργία ενός τέτοιου ιδανικού μοντέλου δεν είναι δυνατή γιατί οι διεργασίες της ροής του νερού δεν είναι απόλυτα κατανοητές και γιατί ακόμη και εάν ήταν κατανοητές η μαθηματική τους απόδοση λόγω του πλήθους των απαιτούμενων παραμέτρων θα ήταν ανέφικτη. Έτσι τα μοντέλα προσομοίωσης της εξατμισιδιαπνοής ποικίλουν, από τα πλέον σύνθετα, που αναφέρονται στις φυσικές διεργασίες που διέπουν την εξατμισιδιαπνοή, έως τα πλέον απλά, που βασίζονται σε απλές συσχετίσεις της εξατμισιδιαπνοής με μια μόνο φυσική παράμετρο. Επειδή όμως, η μέτρηση της πραγματικής συντελούμενης στη φύση εξατμισιδιαπνοής έχει αποδειχθεί δύσκολη και δαπανηρή, ακόμη και σήμερα γίνονται πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη εμπειρικών ή ημιεμπειρικών μοντέλων υπολογισμού της. Έτσι, έχουν διατυπωθεί πολλά μοντέλα που καλύπτουν διάφορες επιμέρους πτυχές της εξατμισιδιαπνοής. Όπως είναι φυσικό τα μοντέλα αυτά δεν είναι δυνατόν να αναφερθούν στο παρόν κείμενο όπου έγινε μια προσπάθεια ταξινόμησης ων διαφόρων προσεγγίσεων λαμβάνοντας υπόψη τις προϋποθέσεις που θέτουν, τις απαιτήσεις τους σε δεδομένα και την πρακτική εφαρμογή που έχουν. Στα περισσότερα μοντέλα εκτίμησης της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής από φυτοκαλυμμένες επιφάνειες, είναι χρήσιμη η εκτίμηση της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής. Όταν η διαθεσιμότητα νερού είναι περιορισμένη, η πραγματική εξατμισιδιαπνοή είναι μικρότερη από τη δυνητική. Αυτό εμφανίζεται στα μοντέλα, είτε εμπειρικά με συσχετίσεις, είτε με θεώρηση των διεργασιών που συσχετίζονται με τη ροή του νερού μέσα στο σύστημα έδαφος – φυτό – ατμόσφαιρα. Έτσι, για λόγους ευκολίας, τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης της δυνητικής και της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής, ταξινομούνται σε εκείνα που βασίζονται σε συσχετίσεις και εκείνα που βασίζονται στις διεργασίες της εξατμισιδιαπνοής. Η ταξινόμηση αυτή αν και είναι αυθαίρετη, εκφράζει μια σειρά μοντέλων, που κυμαίνονται από τα πλέον θεωρητικά έως τα καθαρώς εμπειρικά.

Ωστόσο, σύμφωνα με τους Koppa, Rains, Hulsman, P. *et al.* (2022), τα υπολογιστικά μοντέλα έχουν σοβαρά μειονεκτήματα στην προσπάθεια αναπαράστασης των γήινων διεργασιών. Δεν υπακούουν σε φυσικά όρια όπως η εγγύτητα υδατικών πόρων και το ενεργειακό ισοζύγιο. Επιπλέον το «μαύρο κουτί» της εκπαίδευσης υπολογιστικών μηχανών εμποδίζει την ερμηνεία αγνοώντας την επίδραση εξατομικευμένων μεταβλητών και αναγκών που πρέπει να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς προκειμένου να βελτιωθεί η διαδικασία κατανόησης. Ο πιο περιοριστικός παράγοντας αξιοπιστίας των μοντέλων εκτίμησης της εξάτμισης σε τοπικό επίπεδο είναι η μικρή αντιπροσωπευτικότητα εκτίμησης της

σε παγκόσμια κλίμακα. Το παγκόσμιο μοντέλο Amsterdam για παράδειγμα που εκτιμά την εξάτμιση, την υπολογίζει ως το σύνολο των ακόλουθων παραμέτρων: 1. Εξάτμιση ακάλυπτου εδάφους, 2. Εξάτμιση ανοιχτών υδατοσυλλογών, 3. Υπολογισμός χιονιού, 4. Υδατοσυγκράτηση.

Όπως προαναφέρθηκε, η μεθοδος Thornthwaite είναι διεθνώς η καταλληλότερη υποψήφια για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές εκτίμησης της δυνητικής εξατμισιδιαπνοής διότι απαιτεί μόνο θερμοκρασίες και διάρκεια ημέρας. Γενικά, υποεκτιμά τη δυνητική εξατμισιδιαπνοή σε ξηρά περιβάλλοντα. Ο Thornthwaite επίσης, δε λαμβάνει υπ' όψιν του τον τύπο και την πυκνότητα βλάστησης κάτι που γίνεται με την εισαγωγή των σχετικών συντελεστών υδατοσυγκράτησης. Στην περίπτωση λοιπόν του περιαστικού δάσους Θεσσαλονίκης (βλ σχετική άσκηση μετά το κεφάλαιο Υδατικών Πόρων), καθώς και σε άλλα αντιστοίχως ξηροθερμικά περιβάλλοντα, ορθώς ο Παυλίδης προσθέτει τις τιμές υδατοσυγκράτησης στις εκτιμώμενες τιμές δυνητικής εξατμισιδιαπνοής Thornthwaite ώστε οι τελικές τιμές να προσεγγίσουν έτσι καλύτερα την πραγματικότητα (βλ Υδατικοί Πόροι-βελτιωμένη μέθοδος Υδατικού Ισοζυγίου).

5. ΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ

Η Διαπνοή σε παγκόσμια κλίμακα εκτιμάται ως το **59%** της Εξατμισιδιαπνοής από τους Wang-Erlandsson et al., (2014), ως το **71%** από τους Gerrits et al. (2009) και το **64%** από τους Good et al., (2015). Οι Good et al., επίσης δίνουν 6% για την εξάτμιση του δασικού τάπητα και 27% για την υδατοσυγκράτηση. Οι Novák & Havrila (2005) στην αναφορά των μεθόδων υπολογισμού της διαπνοής των φυτών, αναφέρουν ότι οι εκτιμήσεις της **συνολικής ετήσιας εξατμισιδιαπνοής στη Γη είναι περίπου 0,5m ύψος νερού**. Από αυτή την ποσότητα, η διαπνοή αντιπροσωπεύει το **70%** της συνολικής γήϊνης εξατμισιδιαπνοής, δηλαδή 0,336m νερού. Η διαπνοή καταναλώσει το 40% της γήϊνης ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι η διαπνοή είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας ρύθμισης του γήϊνου ενεργειακού ισοζυγίου. Η διαπνοή καθορίζει τη φυτική παραγωγή αλλά επηρεάζει και τη θερμοκρασία του αέρα.

Η μείωση της βλάστησης με τη μορφή αποδάσωσης επηρεάζει τη θερμοκρασία αέρα (βλ περισσότερα στο κεφάλαιο Υδάτινοι Πόροι). Το στρές της διαπνοής δημιουργείται στα φυτά από την έλλειψη διαθέσιμου νερού. Αναφέρεται στην απελευθέρωση εσωτερικού νερού, χαρακτηρίζεται από καθυστέρηση, ενώ η εξάτμιση έχει πιο άμεσο χαρακτήρα και αναφέρεται περισσότερο στην απελευθέρωση εξωτερικού νερού. Η περισσότερη διαπνοή λαμβάνει χώρα αρκετές ώρες ή μέρες μετά το επεισόδιο βροχής ενώ η υδατοσυγκράτηση είναι άμεση. Κατά μέσο όρο, η άμεση υγρασία που εξατμίζεται (εξάτμιση που στην ουσία της είναι υδατοσυγκράτηση) βρέθηκε να μένει στην ατμόσφαιρα 8 μέρες ενώ η διαπνοή (διαπνεόμενη υγρασία) συνήθως μένει στην ατμόσφαιρα 9 μέρες. Σύμφωνα με τους Wang-Erlandsson et al. (2014), **η εξατμιζόμενη υδατοσυγκράτηση είναι πιθανότερο να επιστρέψει από την ατμόσφαιρα ως κατακρημνίσματα συγκριτικά με το διαπνεόμενο νερό**. Ο κύκλος της εξάτμισης είναι πιο τοπικός για την υδατοσυγκράτηση συγκρινόμενος με τη διαπνοή, έτσι η υδατοσυγκράτηση γενικά συνδέεται αμεσότερα με την πηγή της εξάτμισης συγκριτικά με τη διαπνοή. **Η υδατοσυγκράτηση κυρίως**

λειτουργεί ως ενισχυτής τοπικών υδρολογικών κύκλων κατά τη διάρκεια βροχερών περιόδων. **Από την άλλη πλευρά, η διαπνοή παραμένει λειτουργική κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων και μεταφέρεται από τον άνεμο σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις, όπου μπορεί να λειτουργήσει ως σημαντική πηγή υγρασίας**. Έτσι, οι διάφορες χρήσεις γης συμπεριφέρονται διαφορετικά ως προς τις λειτουργίες διαπνοής και υδατοσυγκράτησης. Για παράδειγμα, **η μετατροπή δάσους σε καλλιέργεια, δεν επηρεάζει μόνο το μέγεθος ανακύκλωσης της υγρασίας αλλά μπορεί να επηρεάζει και τους τρόπους αυτής της ανακύκλωσης οδηγώντας σε αναδιανομή των υδατικών πόρων. Έτσι, οι αλλαγές χρήσεων γης μπορούν να έχουν σύνθετες επιδράσεις στο ατμοσφαιρικό μέρος του υδρολογικού κύκλου** (βλ περισσότερα στο κεφάλαιο Υδάτινοι Πόροι).

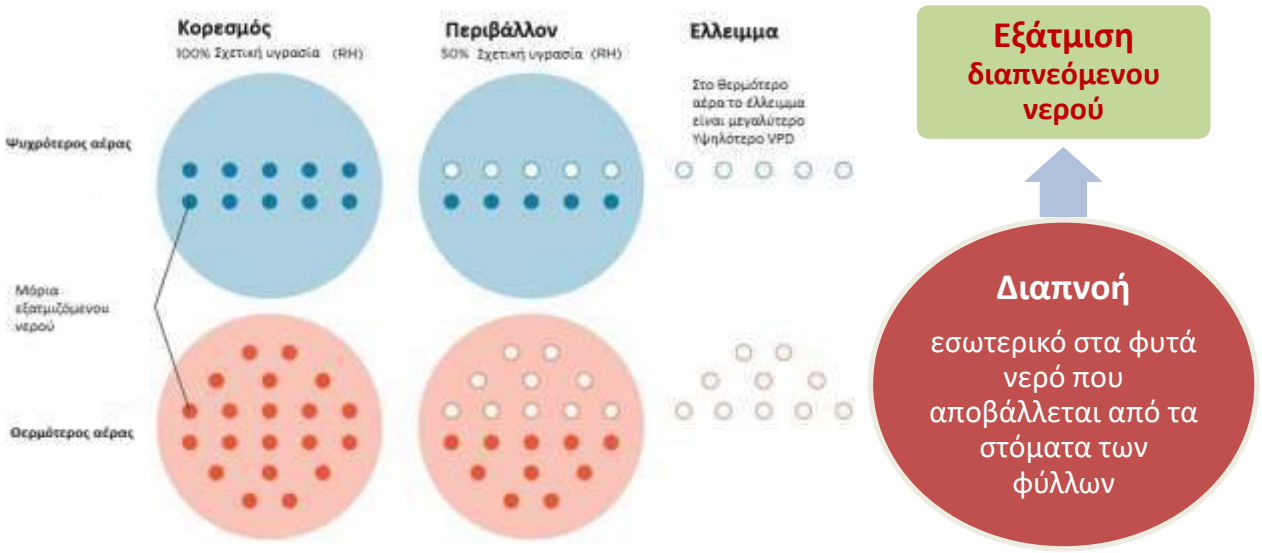
Οι μέθοδοι **μέτρησης** της διαπνοής σχετίζονται με το μέγεθος και τη φύση των φυτών. Τα μικρά φυτά τοποθετούνται σε μικρά ελεγχόμενα κλειστά δοχεία, στα οποία στη συνέχεια μετράται η διαπνοή, ως η απώλεια υγρασίας από το δοχείο (διαφορά βάρους πριν και μετά). Μία παραλλαγή της μεθόδου αποτελεί η μέτρηση της διαπνοής με φυτόμετρο. Το φυτόμετρο είναι ένας αρκετά μεγάλος υποδοχέας πληρωμένος με χώμα, στο οποίο αναπτύσσονται τα φυτά. Ο πυθμένας, τα πρανή και η εδαφική επιφάνεια του δοχείου στεγανοποιούνται πλήρως, ώστε η μοναδική διαφυγή υγρασίας να γίνεται μέσω της διαπνοής της βλάστησης. Η διαπνοή μετράται με αλλαγή του βάρους του δοχείου. Ο ρυθμός διαπνοής δίνεται από τη σχέση:

Kgs νερού που εξατμίζεται / Kgs παραγόμενης ξηρής ύλης

Η αναλογία αυτή για το καλαμπόκι είναι περίπου 350 Kg. Σε παράδειγμα παραγωγής 3600Kg, αυτό θα χρειαζόταν 1,26 X 10^6 Kg ή 1.260 tn δηλαδή 30 cm βροχόπτωσης (υπολογίζοντας την έκταση που απαιτείται για την καλλιέργεια). Δεδομένου ότι το καλαμπόκι είναι θερινή καλλιέργεια που η βροχόπτωση είναι συνήθως λιγότερη & η εξάτμιση μεγαλύτερη, η ανάγκη άρδευσης είναι μεγάλη. Στις περισσότερες πεδινές περιοχές της χώρας που τα κατακρημνίσματα δεν ξεπερνούν τα 500-600 mm, η καλλιέργεια καλαμποκιού είναι αειφορικά ασύμφορη αφού εξαντλεί τους υπόγειους υδροφορείς.

Σε ανέγγιχτες περιοχές της Αμαζονίας, σχεδόν το μισό νερό της βροχής που πέφτει, διαπνέεται από τη βλάστηση. **Σε κάποιες περιοχές το ποσοστό φθάνει το 85%. Κατά τη διάρκεια της ζωής ενός καλαμποκιού, διαπνέεται σχεδόν το 99% του νερού που απορροφούν οι ρίζες του**. Προκειμένου να φωτοσυνθέσουν, τα φυτά πρέπει να ανοίξουν τα στόματά τους, χάνοντας έτσι μεγάλες ποσότητες νερού. Προκειμένου να λάβουν CO_2 τα φυτά πληρώνουν το κόστος με μεγάλες απώλειες νερού. Το υδατικό δυναμικό της ατμόσφαιρας είναι χαμηλό (-300 bars, -30 MPa). Εντός των φύλλων όμως, η σχετική υγρασία είναι 100%, έτσι το υδατικό δυναμικό είναι 0 MPa. Γνωρίζοντας τη θερμοκρασία του φύλλου (υπάρχουν όργανα μέτρησης) και ανατρέχοντας στο σχετικό πίνακα θερμοκρασίας-σχετικής υγρασίας (υπάρχει στο διαδίκτυο), παρέχεται το έλλειμα πίεσης εξάτμισης (Vapor pressure deficit, VPD). Αυτό υπολογίζεται ως η διαφορά της ποσότητας υγρασίας μεταξύ του αέρα και της υγρασίας κορεσμού του αέρα. Είναι η διαφορά

πίεσης εξάτμισης μεταξύ φύλλου και αέρα και αντιπροσωπεύει τη δύναμη κίνησης εξόδου της υγρασίας αέρα από τα φύλλα (Σχήμα 13).



Σχήμα 13. α. Αναπαράσταση της διαφορά πίεσης εξάτμισης μεταξύ φύλλου και αέρα.

(https://blog.ucsusa.org/carly-phillips/what-is-vapor-pressure-deficit-vpd-and-what-is-its-connection-to-wildfires/)

β. Σχέση Διαπνοής-εξάτμισης

Τα φυτά αναπτύσσονται καλά σε τιμές VPD μεταξύ 0,4 -1,6 Kpa. Υπολογιστής VPD παρέχεται στο διαδίκτυο. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι σύνδεσμοι (https://www.doctorgreenhouse.com/vpd-calculator) & https://www.appstate.edu/~neufeldhs/pltphys/transpirationbasics.htm

Η σχέση που συνδέει το VPD με τη διαπνοή E είναι:

$$E = [VPD/BP]*g_{sw}$$

E: ο ρυθμός διαπνοής σε mmol H_2O m^{-2} s^{-1}

VPD: το έλλειμμα πίεσης εξάτμισης σε KPa

BP: η βαρομετρική πίεση σε KPa (101.3 στο επίπεδο της θάλασσας)

g_{sw} : η αγωγιμότητα εξάτμισης νερού των στομάτων (400 mmol H_2O m^{-2} s^{-1})

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ- ΕΞΑΤΜΙΣΗ & ΔΙΑΠΝΟΗ

Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ., 1999. ***Τεχνική Υδρολογία***, Εκδοση 3, 418 pages, doi:10.13140/RG.2.1.4856.0888, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κωτούλας Δ., 1995. ***Μαθήματα Δασικής Υδρολογίας***, Εκδόσεις Α.Π.Θ.

Παυλίδης Θ., 2005. ***Δασική Υδρολογία & Υδάτινοι Πόροι***, Εκδόσεις Α.Π.Θ.

Τσακίρης Ι., 1995. ***Υδατικοί Πόροι – 1 Τεχνική Υδρολογία,*** Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, σελ. 675.

Aschonitis, Vassilis & Touloumidis, Dimos & Ten Veldhuis, Marie-Claire & Coenders-Gerrits, Miriam. 2021. ***Correcting Thornthwaite potential evapotranspiration using a global grid of local coefficients to support temperature-based estimations of reference evapotranspiration and aridity indices***, doi:10.5194/essd-2021-115.

Baumgartner A., 1965. ***Untersuchungen uber den Warme – Wasserhaushalt eines jungen Waldes,*** Ber. Der Deuts. Wett 1956/5, pp. 4-53.

Budyko, M., 1948. ***Evaporation under natural conditions***, Gidrometeo. ed. Leningrad.

Budyko, M., 1958. ***The Heat Balance of the Earth's Surface***, US Department of Commerce, Washington DC.

Budyko, M., 1974. ***Climate and life***, Academic Press, Orlando, Fla (1974)

Fathizadeh O., S.M. Hosseini, R.F. Keim, A. Darvishi Boloorani, 2018. ***A seasonal evaluation of the reformulated Gash interception model for semi-arid deciduous oak forest stands,*** Forest Ecology and Management, Volume 409, Pages 601-613, ISSN 0378-1127, https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.058.

Gerrits, A.M.J., Savenije, H.H.G., Veling, E.J.M., Pfister, L., 2009. ***Analytical derivation of the 11 Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evaporation model,*** Water 12 Resour. Res. 45, W04403, doi:10.1029/2008WR007308.

Good, S.P., Noone, D., Bowen, G., 2015. ***Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes,*** Science 349, 175–177. https://doi.org/10.1126/ science.aaa5931.

Hoogeveen, Jippe & Faures, Jean Marc & Peiser, Livia & Burke, Johanna & van de Giesen, Nick. 2015. ***GlobWat - A global water balance model to assess water use in irrigated agriculture*****,** Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 12. 801–838. 10.5194/hessd-12-801-2015.

Koppa, A., Rains, D., Hulsman, P. et al. 2022. ***A deep learning-based hybrid model of global terrestrial evaporation***, Nature Communications 13, 1912. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29543-7

Mianabadi A., Coenders-Gerrits M., Shirazi P., Ghahraman B., Alizadeh A., 2019. ***A global Budyko model to partition evaporation into interception and transpiration***, Volume 23, issue 12, Hydrology and Earth System Sciences, HESS, 23, 4983–5000, 2019. https://doi.org/10.5194/hess-23-4983-2019

Molchanov, A., 1960. ***The hydrological role of forest***, Moska (Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1963).

Momiyama Hiroki, Tomoomi Kumagai, Naoya Fujime, Tomohiro Egusa, Takanori Shimizu, 2023. ***Forest canopy interception can reduce flood discharge: Inferences from model assumption analysis***, Journal of Hydrology 623 (2023) 129843, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129843

Novák Viliam, Havrila Ján, 2005. ***Transpiration of Plants: A Review of Calculation Methods***, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 07181. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-07181. © European Geosciences Union 2005

Pennman, 1948. ***Evapotranspiration equation***, FAO. https://www.fao.org/4/X0490E/X0490E06.htm

Pereira F.L., Gash J.H.C., J.S. David, F. Valente, 2009. ***Evaporation of intercepted rainfall from isolated evergreen oak trees: Do the crowns behave as wet bulbs*****?** Agricultural and Forest Meteorology, Volume 149, Issues 3–4, 2009, Pages 667-679, ISSN 0168-1923, https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.013. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016819230800289X)

Rutter A.J., 1963. ***Studies in water relations of Pinus silvestris in plantation conditions,*** J. Ecology 1963/51, 191-243.

Rutter A.J., 1967. ***An Analysis of Evaporation from a stand of scots pine,*** pp. 403-417. In Intern. Symp. On Forest. Hydrol. Edit. Sopper Wand Lull W. Pergamon Press.

Rutter A. J., 1970. ***Evaporation from forest. In Aspectus of forest climates***. Memorandum No 13. Imperial college, London F1-F11.

Rutter A.J., Kershaw K.A. , Robins P.C., Morton A.J., 1971. ***A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine***, Agricultural Meteorology, Volume 9, Pages 367-384, ISSN 0002-1571, https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90034-3.

Thornthwaite, C. 1948. ***An Approach toward a Rational Classification of Climate***, Geogr. Rev., 38(1), 55–94, https://doi.org/10.2307/210739.

Turc L. 1954. ***The water balance of the soil. Relationship between precipitation, evaporation and runoff,*** Ann. Agron., 5, pp. 491-569

Turc, L. 1961. ***Water requirements assessment of irrigation, potential evapotranspiration: Simplified and updated climatic formula,*** Annales Agronomiques, 12, 13-49.

VPD Vapour pressure deficit links: https://blog.ucsusa.org/carly-phillips/what-is-vapor-pressure-deficit-vpd-and-what-is-its-connection-to-wildfires/

https://www.doctorgreenhouse.com/vpd-calculator)

https://www.appstate.edu/~neufeldhs/pltphys/transpirationbasics.htm

Ward R.C., 1967. ***Principles of Hydrology,*** p. 403. McGraw-Hill N. York-London.

Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J., and Savenije, H. H. G. 2014. ***Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land*****,** Earth Syst. Dynam., 5, 441–469, https://doi.org/10.5194/esd-5-441-2014, 2014., Part 2: Moisture recycling, Earth Syst. Dynam., 5, 471–489, https://doi.org/10.5194/esd-5-471-2014.

**με αστερίσκο είναι οι αναφορές που εμπεριέχονται εντός της παρατιθέμενης βιβλιογραφίας.*

Γ. ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ

Τζουμέρκα

Άποψη της λίμνης των Κρεμαστών

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Ως υδατικοί πόροι νοούνται, στα πλαίσια του παρόντος, το σύνολο των δυνάμενων να αξιοποιηθούν πηγών γλυκού νερού, για την αειφορική κάλυψη των υδατικών αναγκών όλων των έμβιων όντων. Επομένως με την έννοια υδατικών πόρων, νοούνται όλες οι δυνατές πηγές γλυκού νερού που άμεσα ή έμμεσα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση όλων ή μέρους των υδατικών αναγκών, όπως είναι οι πηγές, τα νερά των χειμάρρων, των ποταμών και λιμνών, οι υπόγειοι υδροφορείς, οι τεχνητές υδροσυλλογές, ακόμη και το νερό των επεξεργασμένων βιολογικών καθαρισμών ή το αφαλατωμένο θαλασσινό νερό.

Με δεδομένο ότι το δυνάμενο να χρησιμοποιηθεί, μετά από φυσικό, χημικό ή μικροβιολογικό καθαρισμό (επεξεργασμένα αστικά απόβλητα, αφαλατωμένο νερό κ.λ.π.) νερό απαιτεί την εφαρμογή ειδικών τεχνικών, δεν αποτελεί αντικείμενο του παρόντος πονήματος. Επίσης στα αντικείμενα του παρόντος δεν εντάσσονται οι υδατικοί πόροι των υπόγειων υδροφορέων, που αποτελούν αντικείμενο της υπόγειας υδρογεωλογίας (αν και ο ρόλος-βαθμός αναπλήρωσης του αποτελεί βασικό αντικείμενο των υδατικών πόρων), καθώς και πηγές, που δημιουργούνται με την επανεμφάνιση-εκφόρτιση υπερκείμενων υπό πίεση υπόγειων υδροφορέων μεγάλου βάθους. Με τους υδατικούς πόρους των υπόγειων υδροφορέων μεγάλου βάθους, καθώς και των αντίστοιχων εκφορτιζόμενων πηγών (που δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμες) ασχολείται η επιστήμη της υδρογεωλογίας (ιδιαίτερα με τα των βαθέων ή μέσου βάθους υπόγειων υδροφορέων). *Βασικό αντικείμενο των «Υδατικών Πόρων» στα πλαίσια του παρόντος μαθήματος είναι η διερεύνηση και ο υπολογισμός των διαθέσιμων (διακινούμενων) επιφανειακών υδατικών πόρων, σε επίπεδο λεκανών απορροής ή τμημάτων λεκανών απορροής.*

Η δομή του κειμένου, μετά από μια σύντομη αναφορά στα προσαγόμενα υδατοφορτία των κατακρημνισμάτων και στην πρωτογενή απώλεια της υδατοσυγκράτησης αφορά τον υπολογισμό του προσαγόμενου υδατικού δυναμικού και του διαμορφούμενου υδατικού ισοζυγίου των λεκανών απορροής, με τις μεθόδους του συντελεστή απορροής, των ομοειδών λεκανών απορροής (μέθοδος Viparelli) και τη βελτιωμένη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου, όπως αυτή διαμορφώθηκε από τον Παυλίδη (Παυλίδης Θ. 1997, 1998).

2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

2.1. ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

Γενικά, η αναφορά στα κατακρημνίσματα μια μελετώμενης περιοχής γίνεται επί τη βάση των υπαρχόντων σε αυτήν καταγραφών, εφόσον βέβαια στη μελετούμενη λεκάνη υπάρχουν όργανα μέτρησης της βροχόπτωσης (απλά ή αυτογραφικά). Στην περίπτωση που εντός της μελετούμενης λεκάνης υπάρχουν περισσότερα του ενός όργανα μέτρησης (εξαιρετικά σπάνια περίπτωση σε λεκάνες χειμάρρων) τότε ο υπολογισμός της βροχόπτωσης βασίζεται είτε στον πλησιέστερο προς το μέσο υψόμετρο και το κέντρο βάρους όργανο καταγραφής, είτε ακολουθείται η μέθοδος του Thiessen ή η μέθοδος των ισοϋετών

καμπύλων. Επειδή όμως τα παραπάνω υπολογισθέντα ή εκτιμηθέντα κατακρημνίσματα δεν απηχούν στις μέσες συνθήκες της λεκάνης, κάτι πολύ συνηθισμένο για τις Ελληνικές και όχι μόνο χειμαρρικές συνθήκες, πρέπει να γίνεται αναλογική προσαρμογή τους στις συνθήκες και τα δεδομένα του μέσου υψομέτρου της μελετούμενης λεκάνης. Όταν λοιπόν εντός της λεκάνης ή στα όρια αυτής δεν απαντάται κανένας σταθμός μέτρησης, τότε αναζητούμε τον εγγύτερο και κυρίως τον αντιπροσωπευτικότερο προς τις μέσες συνθήκες της λεκάνης σταθμό μέτρησης, τα δεδομένα του οποίου στη συνέχεια προσαρμόζονται με τη χρήση της τοπικής βροχοβαθμίδας της περιοχής και την υψομετρική διαφορά μεταξύ του υψομέτρου του σταθμού μέτρησης και του μέσου υψομέτρου της μελετούμενης λεκάνης (Μέρος Ι).

2.2. ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ- ΕΞΑΤΜΙΣΗ – ΔΙΑΠΝΟΗ

Συζητήθηκαν εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια.

3. ΤΑ ΔΑΣΗ ΩΣ ΒΡΟΧΟΠΟΙΟΙ

Είναι αρκετά γνωστό ότι το δάσος συμβάλλει στο σχηματισμό βροχών. Αντίθετα, θεωρείται ότι η καταστροφή των δασών οδηγεί σε μείωση των βροχών και στη δημιουργία περισσότερων ξηροθερμικών συνθηκών. Ως επιστέγασμα των παραπάνω και προκειμένου να βελτιωθούν (αυξηθούν) οι συνθήκες βροχής διαφόρων περιοχών προτείνεται η δάσωση ή αναδάσωση των γυμνών τμημάτων των περιοχών αυτών. Στην Αφρική, όπου επιχειρήθηκε η ανάσχεση της επέκτασης της ερήμου με φυτεύσεις, η προσπάθειες στέφθηκαν με επιτυχία. **Με το πέρας της βροχής, η υγρασία που συγκρατήθηκε από τη βλάστηση, εξατμίζεται αυξάνοντας την υγρασία του αέρα και δημιουργώντας ευνοϊκό μικροκλίμα, ή αργά φτάνει στο έδαφος και του δίνει τη δυνατότητα να την απορροφήσει ολόκληρη. Γι' αυτό λέγεται ότι στο δάσος πάντα βρέχει δύο φορές.** Επιπλέον, μια μόνο ενήλικη οξιά μπορεί να αποβάλλει με τη διαπνοή της πολλές εκατοντάδες λίτρα τη μέρα (Μανέτας, 2019) καθορίζοντας έτσι το μικροκλίμα. **Με αυτό τον τρόπο, τα δάση δημιουργούν και προστατεύουν τα δικά τους αποθέματα νερού** (Wohlleben, 2018)**.** Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η **υδατοσυγκράτηση κυρίως λειτουργεί ως ενισχυτής τοπικών υδρολογικών κύκλων κατά τη διάρκεια βροχερών περιόδων, ενώ η διαπνοή παραμένει λειτουργική κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων και μεταφέρεται από τον άνεμο σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις, όπου μπορεί να λειτουργήσει ως σημαντική πηγή υγρασίας**.

Γενικά ισχύει κατά κανόνα ότι τα δασικά οικοσυστήματα απαντώνται στις περιοχές της γης με μεγάλα ύψη κατακρημνισμάτων. Αντίθετα, σε περιοχές με μικρά ύψη βροχής εμφανίζεται πτωχή δασική βλάστηση. Φαίνεται ότι είναι δυνατόν να υπάρξει αύξηση της πίπτουσας βροχής από την παρουσία του δάσους από την ταυτόχρονη συνεπίδραση του αναγλύφου. Στις σχηματιζόμενες τοπικές βροχές αναγλύφου, το δάσος με την παρουσία του και κυρίως με την ανομοιομορφία και την εξαιρετικά τραχεία εξωτερική επιφάνειά του, επιφέρει μείωση της ταχύτητας του ανοδικά κινούμενου αέρα τον οποίο και υποχρεώνει να ανυψωθεί. Έτσι με τον τρόπο αυτό, εντείνεται η εκτόνωση και η ψύξη του αέρα γεγονός

που αυξάνει το ύψος των βροχοπτώσεων. Επίσης, η κατά Perrin μικρή ψύξη του υπεράνω του δάσους αέρα, λόγω της φωτοσύνθεσης των δένδρων, θα οδηγήσει σε συμπύκνωση υδρατμών και επομένως στο σχηματισμό βροχής.

Κατά κανόνα η ηπειρωτική γη βρίσκεται ψηλότερα από τη θάλασσα. Το νερό, λόγω βαρύτητας, κυλάει πάντα στο πιο χαμηλό σημείο, και έτσι οι ήπειροι θα είχαν απόλυτη ξηρασία. Αυτό αποτρέπεται μέσω σταθερού ανεφοδιασμού που παρέχουν τα σύννεφα που σχηματίζονται στους ωκεανούς και μεταφέρονται μέσω του ανέμου. Ο μηχανισμός αυτός ωστόσο λειτουργεί μόνο σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων από την ακτή. Όσο προχωράμε προς την ενδοχώρα, τόσο πιο ξηρό γίνεται το κλίμα, επειδή τα σύννεφα γίνονται βροχή και εξαφανίζονται. Ήδη μετά από 600 km το κλίμα είναι τόσο ξηρό που εμφανίζονται οι πρώτες έρημοι. Η ζωή θα ήταν δυνατή ουσιαστικά μόνο σε μια στενή λωρίδα στην εξωτερική –παράκτια ζώνη των ηπείρων, το εσωτερικό θα ήταν ξηρό. Ευτυχώς όμως υπάρχουν τα δάση, η μορφή βλάστησης με τη μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια, ανά τετραγωνικό μέτρο δάσους απλώνονται στις κόμες 27 m^2 φύλλα και 30 m^2 βελόνες (Wohlleben., 2018). Εκεί πάνω συγκρατείται ένα μέρος της βροχής και εξατμίζεται ξανά αμέσως. Επιπλέον, το καλοκαίρι τα δέντρα καταναλώνουν ανά km^2 έως και 2.500 m^3 νερό, το οποίο επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα μέσω της αναπνοής. Από τον ατμό αυτό δημιουργούνται πάλι σύννεφα που στην πορεία κινούνται προς την ενδοχώρα και μετατρέπονται ξανά σε βροχή. Το παιχνίδι αυτό συνεχίζεται διαρκώς, με αποτέλεσμα να εφοδιάζονται με νερό ακόμα και οι πιο απομακρυσμένες περιοχές. Αυτή η αντλία νερού λειτουργεί τόσο καλά, ώστε σε κάποιες μεγάλες περιοχές της Γης όπως ο Αμαζόνιος, ακόμα και αρκετές χιλιάδες χιλιόμετρα μέσα στην ενδοχώρα οι βροχοπτώσεις δε διαφέρουν αυτό αυτές στην ακτή. **Μοναδική προϋπόθεση:** θα πρέπει από τη θάλασσα μέχρι και την πιο απομακρυσμένη γωνία να υπάρχει δάσος, όταν καταστραφεί το παράκτιο δάσος, το σύστημα καταρρέει και αυτό συμβαίνει έντονα στη ΝΔ Βραζιλία όπου η αποψίλωση του τροπικού δάσους συνδυάζεται με εκείνη του παράκτιου δάσους Μάτα Ατλάντικα.

Η ανακάλυψη αυτής της απίστευτα σημαντικής αλληλεξάρτησης οφείλεται στη Ρωσίδα Anastasia Makarieva και το δάσκαλό της Victor Gorshov (2007) που αρχικά αναζήτησαν την επίδραση της Τάϊγκα- του μεγαλύτερου δάσους στον πλανήτη, των δασών της Σιβηρίας και του Καναδά- στο κλίμα της Βόρειας Ασίας. Η ομάδα μελέτησε πολλά διαφορετικά δάση παγκοσμίως και κάθε φορά κατέληγε στο ίδιο συμπέρασμα. Είτε επρόκειτο για βροχερά δάση είτε για τη σιβηρική τάϊγκα, πάντα τα δέντρα ήταν εκείνα που διοχέτευαν τη ζωτικής σημασίας υγρασία στην ενδοχώρα.

Η ανακάλυψη στηρίχθηκει σε απλή φυσική και περιγράφει το πώς η εξάτμιση του νερού από τα δέντρα οδηγεί-κατευθύνει τους ανέμους. Άνεμοι που κινούνται κοντά στην επιφάνεια της γης, περνούν από περιοχές με μεγάλη εξάτμιση. Έτσι, τα δάση κυριολεκτικά «ρουφάνε» τον υγρό αέρα από τους ωκεανούς και η διεργασία ονομάζεται «**βιοτική αντλία της ατμοσφαιρικής υγρασίας**». Σύμφωνα με την Makarieva: "***τα δάση είναι σύνθετα, αυτοσυντηρούμενα συστήματα που δημιουργούνε βροχή και επίσης κύριοι οδηγοί της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας των ανέμων. Ανακυκλώνουν τεράστιες***

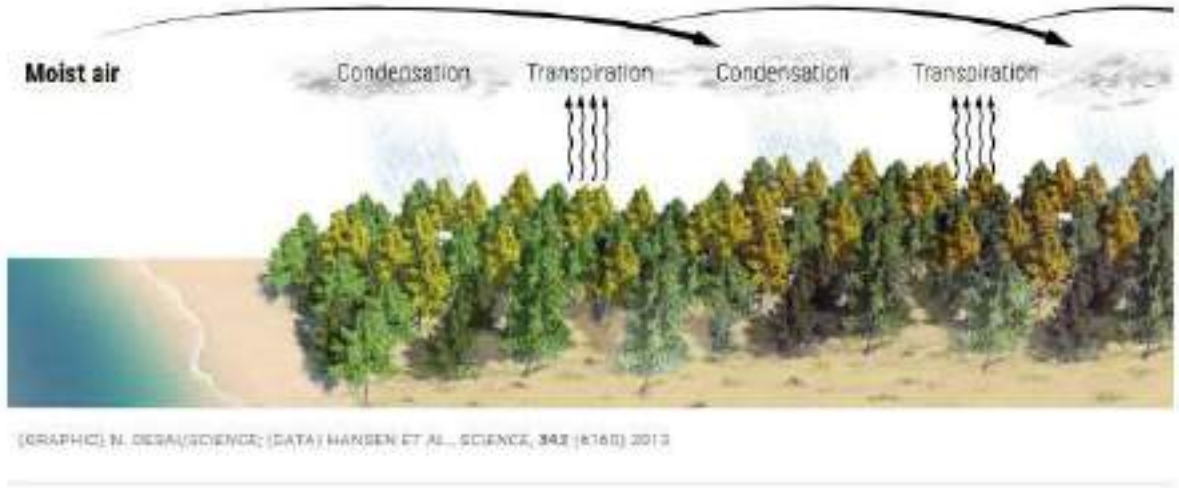
ποσότητες αέρα και κατά τη διαδικασία, ενεργοποιούν ανέμους που διαμοιράζουν την υγρασία στον πλανήτη". Αυτοί οι άνεμοι διασχίζουν την Ασία και μεταφέρουν υγρασία από την Ευρώπη μέσω της Σιβηρίας στην Κίνα και τη Μογγολία. Άνεμοι που δίνουν βροχή και συντηρούν γιγαντιαία ποτάμια όπως ο Ομπ, ο Γενισέι, ο Λένας, ο Αμούρ, ο Γιάνγκ Τσε και ο Κίτρινος ποταμός και ποτίζουν και θρέφουν ένα από τα δύο πολυπληθέστερα έθνη στη Γη. **Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία των Makarieva & Gorshkov, το νερό που εξατμίζεται από τα δάση μέσω της υδατοσυγκράτησης και της διαπνοής συμβάλει στη δημιουργία νέων βροχοφόρων σύννεφων. Τα δάση λοιπόν, δεν παρέχουν μόνο την υγρασία αλλά και τους ανέμους που τη μεταφέρουν.** Άλλωστε, οι άνεμοι δημιουργούνται από θερμοκρασιακές διαφορές και ο αέρας στα δάση είναι ψυχρότερος.

Η θεωρία αυτή προκάλεσε το κυρίαρχο δόγμα της μετεωρολογίας ότι ο ζεστός αέρας ανυψώνεται χαμηλώνοντας την ατμοσφαιρική πίεση στα υποκείμενα στρώματα και δημιουργώντας έτσι χώρο στην επιφάνεια ώστε να εισέλθει ο άνεμος. Το θέρος για παράδειγμα, η γήϊνη επιφάνεια ζεσταίνεται γρηγορότερα και προσελκύει τη δροσερή υγρασία των ωκεανών. Σύμφωνα όμως με τη Makarieva και το Gorshkov, υπάρχει και μια δεύτερη διεργασία που κάποιες φορές μπορεί μάλιστα να γίνει η κυρίαρχη. Όταν το νερό εξατμίζεται από το δάσος δημουργώντας σύννεφα που με τη σειρά τους υγροποιούνται ως κατακρημνίσματα, το αέριο γίνεται υγρό και καταλαμβάνει λιγότερο όγκο. Έτσι, ελαττώνεται η πίεση του αέρα και αυτός οδηγείται οριζόντια από περιοχές με μικρότερη συμπύκνωση. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι τα παράκτια δάση στροβιλίζουν τη θαλασσινή αύρα, ρουφώντας υγρασία και οδηγώντας της προς την ενδοχώρα όπου τελικά θα επιστρέψει στη γη με τη μορφή βροχής. Εάν υπάρχει συνέχεια στη ζώνη του δάσους προς την ενδοχώρα, ο κύκλος μπορεί να συνεχιστεί συντηρώντας υγρούς ανέμους για χιλιάδες χιλιόμετρα. **Η θεωρία ανατρέπει την παραδοσιακή σκέψη: Δεν είναι η αμτοσφαιρική κυκλοφορία που κατευθύνει τον υγρολογικό κύκλο, αλλά ο υδρολογικός κύκλος που κατευθύνει την κυκλοφορία του αέρα.**

Οι ερευνητές ανακάλυψαν ότι η όλη διαδικασία σταματά όταν κόβονται τα δέντρα που βρίσκονται στα παράκτια δάση. Είναι σα να έχει κάποιος μια ηλεκτρική αντλία και να βγάζει από το νερό τον αγωγό αναρρόφησης. Στη Βραζιλία όπως αναφέρθηκε, οι συνέπειες είναι ήδη αισθητές: Στο τροπικό δάσος του Αμαζονίου επικρατεί όλο και μεγαλύτερη ξηρασία. Στην κεντρική Ευρώπη, οι περιοχές εντός ζώνης 600km είναι εντός της ζώνης αντλίας αναρρόφησης και εξακολουθούν να υπάρχουν δάση παρά τη συρρίκνωσή τους. Η θεωρία εξηγεί το γεγονός ότι παρά την απόσταση από τους ωκεανούς, απομονωμένη δασωμένη ενδοχώρα λαμβάνει τόση βροχή όση και η ακτογραμμή ενώ μη δασωμένη ενδοχώρα είναι ξηρή. Επίσης, η θεωρία αυτή εξηγεί γιατό τα δάση από την Τάϊγκα έως τον Αμαζόνιο, δεν αναπτύσσονται εκεί που το κλίμα είναι κατάλληλο αλλά ότι δημιουργούν το κλίμα. Σύμφωνα με τον Douglas Sheil, εξειδικευμένο στη Δασική Οικολογία στο Νορβηγικό Πανεπιστήμιο Επιστημών της Ζωή: "*Όσα έχω μάθει έως τώρα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η βιοτική αντλία είναι σωστή και παρέχει τεκμηρίωση της δύναμης των ποταμών*

εξηγώντας μάλιστα το «κρύο παράδοξο του Αμαζονίου»". Από το Γενάρη έως τον Ιούνιο που η λεκάνη του Αμαζονίου είναι ψυχρότερη του ωκεανού, ισχυροί άνεμοι πνέουν από τον Ατλαντικό προν τον Αμαζόνιο. Δηλαδή, ακριβώς το αντίθετο από το αναμενόμενο σύμφωνα με την κυρίαρχη θεωρία της Μετεωρολογίας.

Τα δάση κωνοφόρων του Βορείου ημισφαιρίου έχουν μια επιπλέον δυνατότητα να επηρεάζουν το κλίμα και τη διαχείριση του νερού. Εκλύουν τερπένια, ουσίες που αρχικά χρησιμεύουν στην άμυνα ενάντια σε ασθένειες και παράσιτα. Αν αυτά τα μόρια φθάσουν στην ατμόσφαιρα, η υγρασία συμπυκνώνεται γύρω τους. Έτσι δημιουργούνται δύο φορές πιο πυκνά σύννεφα απ' ότι στις περιοχές όπου δεν υπάρχουν δάση. Η πιθανότητα βροχής αυξάνεται και αντανακλάται επιπλέον γύρω στο 5% του ηλιακού φωτός. Το τοπικό κλίμα γίνεται πιο δροσερό -δροσιά και υγρασία είναι οι προτιμήσεις των κωνοφόρων.

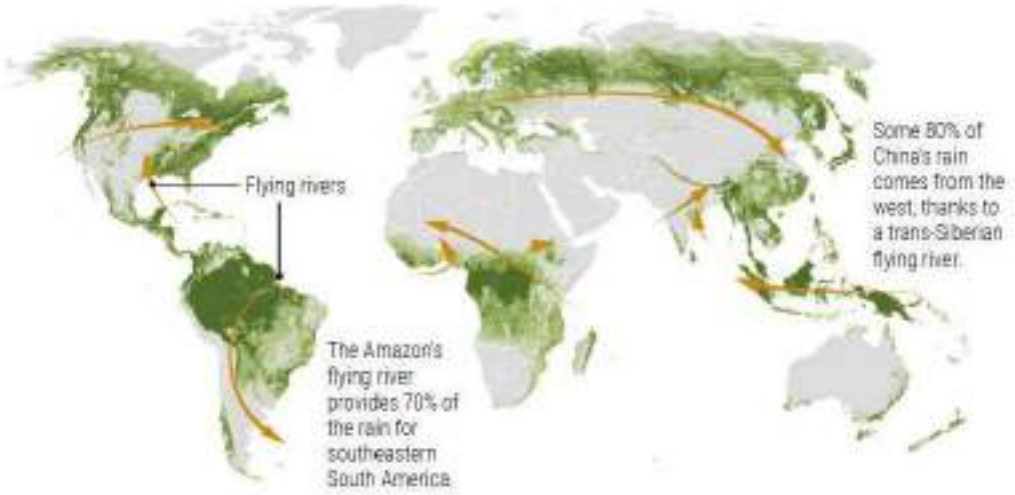


Σχήμα 1: Η σχηματική παράσταση της συμπύκνωσης –υγροποίησης (Condensation) και της διαπνοής

Η σημασία της ανακυκλούμενης υγρασίας που θρέφει τις βροχές, είχε υποεκτιμηθεί μέχρι το 1979 οπότε η Βραζιλιάνα Μετεωρολόγος Eneas Salati δημοσίευσε έρευνες ισοτοπικής σύστασης του νερού της βροχής της λεκάνης απορροής του Αμαζονίου. Νερό ανακυκλούμενο από τη διαπνοή περιέχει περισσότερα μόρια βαρέως οξυγόνου –ισότοπο 18 συγκριτικά με το νερό που εξατμίζεται από τους ωκεανούς. **Η Salati έδειξε ότι η μισή βροχή του Αμαζονίου προέρχεται από τη διαπνοή του ίδιου του δάσους.** Σήμερα, οι μετεωρολόγοι παρατηρούν τα ρεύματα αέρα σε ύψος 1.5 km. Είναι γνωστά ως South American Low-Level Jet, και φυσούν από την Ανατολή προς τη Δύση διασχίζοντας τη λεκάνη απορροής του Αμαζονίου και φθάνουν στις Άνδεις όπου αναγκάζονται να κατευθυνθούνε Νότια. Αυτούς τους ανέμους οι επιστήμονες τους ονομάζουν «**Ιπτάμενα ποτάμια**». Το Ιπτάμενο ποτάμι οτυ Αμαζονίου υπολογίστηκε ότι μεταφέρει όση ποσότητα μεταφέρει και ο ίδιος ο Αμαζόνιος κάτω στη Γη, όπως αναφέρει ο Antonio Nobre, ένας ερευνητής του κλίματος στο Εθνικό Ινστιτούτο Διαστημικής Έρευνας της Βραζιλίας. Για κάποια χρόνια οι επιστήμονες θεωρούσαν ότι τα ιπτάμενα ποτάμια αφορούσαν μόνο τον Αμαζόνιο. Τη δεκαετία

του 1990 όμως, ο Hubert Savenije, ένας Υδρολόγος στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Delft, άρχισε να ερευνά την ανακύκλωση τυης υγρασίας στη Δυτική Αφρική. Χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά στοιχεία, βρήκε ότι το ποσοστό της βροχής που προέρχεται από τα δάση ήταν αυξημένο φθάνοντας το 90% στην ενδοχώρα. Το εύρημα αυτό εξηγεί το γιατί στη ζώνη Σαχέλ της υποσαχάριας Αφρικής η ξηρασία έγινε έντονη μετά την εξαφάνιση των παράκτιων δασών που έλαβε χώρα τα τελευταία 50 έτη. Όπως προαναφέρθηκε, οι κατάλληλες δράσεις (φυτεύσεις) μπορούν να αναιρέσουν το πρόβλημα αυτό.

Ένας από τους μαθητές του Savenije, ο Ruud Van der Ent, συνεχίζοντας την έρευνα του δασκάλου του, δημιούργησε ένα παγκόσμιο μοντέλο αερομεταφερόμενης υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας με θεωρητικές εκτιμήσεις εξάτμισης και διαπνοής, ώστε να δημιουργήσει το 1° μοντέλο ροής υγρασίας σε κλίμακα μεγαλύτερη από αυτή των λεκανών απορροής. Το 2010, ο Van der Ent* και οι συνάδελφοί του δημοσίευσαν τα αποτελέσματα του μοντέλου: Παγκοσμίως, το 40% και πλέον όλων των κατακρημνισμάτων προέρχεται από τη στεριά. Τα ιπτάμενα ποτάμια του Αμαζονίου παρέχουν το 70% της βροχής που πέφτει στη λεκάνη απορροής του Río de la Plata, κολοσσιαίο ποτάμι που εκτείνεται στη ΝΑ Νότια Αμερική. Ο Van der Ent προς μεγάλη του έκπληξη, βρήκε ότι η Κίνα δέχεται το 80% των κατακρημνισμάτων της από τη Δύση, κυρίως υγρασία του Ατλαντικού που ανακυκλώνεται από το Βόρειο δάσος της Σκανδιναβίας και της Σιβηρίας. Το ταξίδι έχει διάφορα στάδια που διαρκούν 6 ή περισσότερους μήνες—κύκλοι διαπνοής διαδέχονται βροχοπτώσεις διαδεχόμενες από νέα διαπνοή. Το παράδοξο είναι πως η Κίνα βρίσκεται στον Ειρηνικό Ωκεανό και όμως, η υγρασία που λαμβάνει προέρχεται από τη μακρυνή Δύση.



Σχήμα 2: Τα ονομαζόμενα εναέρια ποτάμια είναι επικρατούντες άνεμοι που συλλέγουν την υγρασία από τα δάση και δίνουν βροχή σε απομακρυσμένες λεκάνες απορροής. Τα ιπτάμενα ποτάμια του Αμαζονίου παρέχουν το 70% της βροχής της ΝΑ Νότιας Αμερικής και το 80% της βροχής στην Κίνα έρχεται από τη Δύση χάρις τα ιπτάμενα ποτάμια της Σιβηρίας, (δημοσίευση που αναπαράγεται από τον Pearce, 2020).

Ακόμα και εκείνοι που αμφισβητούν τη θεωρία της βιοτικής αντλίας, δέχονται πως η απώλεια του δάσους έχει μεγάλης εμβέλειας κλιματικές επιπτώσεις. Η αποψίλωση των δασών χιλιάδες χρόνια πριν, ευθύνεται για την ερημοποίηση της Αυστραλίας και της Δυτικής Αφρικής. Είναι πλέον υπαρκτός ο φόβος ότι η τωρινή και μελλοντική αποδάσωση (μετατροπή του τροπικού δάσους σε σαβάνα) θα ερημοποιήσει ολόκληρες περιοχές. Στη ζώνη υψηλού κινδύνου βρίσκονται η Κίνα, τη ζώνη του Σαχέλ στην Αφρική και η Αργεντίνικη Πάμπας, όπως αναφέρει ο Patrick Keys, χημικός της ατμόσφαιρας στο Πανεπιστήμιου του Colorado State University. Το 2018, ο Key και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο παρόμοιο με του van der Ent, για να εντοπίσουν υδάτινους πόρους για 29 μεγαπόλεις (με πληθυσμό πολλών εκατομμυρίων κατοίκων) στον πλανήτη. Βρήκαν ότι οι 19 από αυτές ήταν πολύ εξαρτημένες για την υδροδότησή τους από μακρυνά δάση. "**Ακόμα και μικρές αλλαγές στο ύψος των κατακρημνισμάτων οφειλώμενες σε αλλαγές χρήσεων γης που επηρεάζουν τα ανοδικά ρεύματα αέρα, θα μπορούσαν να έχουν μεγάλη επίδραση στα ευάλωτα υδάτινα αποθέματα των μεγαλουπόλεων**."

Σύμφωνα με κάποια μοντέλα, η απομάκρυνση πηγών υγρασίας όπως με την αποδάσωση, θα μπορούσε να αλλάξει το κλίμα σε περιοχές μακρυά από τα ιπτάμενα ποτάμια. Ακριβώς όπως το El Niño, μια ροή ρευμάτων αέρα στον Τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό είναι γνωστό ότι επηρεάζει το κλίμα σε απομακρυσμένες περιοχές μέσω διεργασιών γνωστών ως «τηλεσυνδέσεις». Παρόμοιως, η αποδάσωση του Αμαζονίου ελαχιστοποιεί τη βροχόπτωση στις μεσοδυτικές ΗΠΑ και τη χιονόπτωση στη Sierra Nevada, σύμφωνα με τον Κλιματολόγο Roni Avissar, του πανεπιστημίου του Μαϊάμι. Σε αντίθεση με την αποδάσωση, ο τρόπος δράσης του El Niño είναι ξακάθαρος στα όργανα μέτρησης, ωστόσο, και **οι δύο αυτοί κλιματικοί παράγοντες προκαλούνται από μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας και της υγρασίας που επιστρέφει στην ατμόσφαιρα**.

Ο Lan Wang-Erlandsson του πανεπιστημίου της Στοκχόλμης, ο οποίος ερευνά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ γης, νερού και κλίματος αναφέρει πως είναι καιρός για τους διαχειριστές των υδάτινων πόρων να μετατοπίσουν το εδνιαδέρον τους από τη χρήση νερού και γης εντός λεκανών απορροής, προς τις αλλαγές χρήσεων γης εκτός αυτών των ορίων. Όπως αναφέρει: «Χρειαζόμαστε μια νέα υδρολογική συμφωνία ώστε να διατηρηθούν τα δάση που σχετίζονται με τους υδάτινους πόρους». Σε Φόρουμ των Ηνωμένων Εθνών για τα δάση, ο ερευνητής David Ellison, παρουσίασε έρευνα που έδειξε ότι έως και το 40% της συνολικής βροχόπτωσης των υψιπέδων της Αιθιοπίας –πηγές του Νείλου- παρέχεται από υγρασία που ανακυκλώνεται από τα δάση της λεκάνης απορροής του Κογκό. Αίγυπτος, Σουδάν και Αιθιοπία διαπραγματεύονται ένα μακρόπνοο σχέδιο κοινής διαχείρισης των νερών του Νείλου. Όμως, ένα τέτοιο σχέδιο είναι άχρηστο εάν η αποδάσωση εξαφανίζει την πολύτιμη μεταφερόμενη υγρασία. Οι αλληλεπιδράσεις δασών και νερού μέχρι σήμερα, έχουν σχεδόν εξ' ολοκλήρου αγνοηθεί στη διαχείρηση των παγκόσμιων πόρων πόσιμου νερού. Η θεωρία της βιοτικής αντλίας και η αποδάσωση που δε μεταβάλει μόνο τις πηγές υγρασίας αλλά και τους τρόπους που πνέουν οι άνεμοι, με κρίσιμες εφαρμογές

στην παγκόσμια κυκλοφορία των ανέμων. Στη Ρωσία η θεωρία της βιοτικής αντλίας είχε τέτοια επίδραση που πλέον η διαχείριση των δασών εμπεριέχει την έννοια των «**δασών ως κλιματικών προβολών**».

Η Makarieva σε δημοσίευσή της το 2017 στο περιοδικό *Atmospheric Research* γράφει πως ο ίδιος μηχανισμός της βιοτικής αντλίας μπορεί να επηρεάσει τους τροπικούς κυκλώνες που δημιουργούνται από την απελευθέρωση θερμότητας κατά την εξάτμιση της υγρασίας στους ωκεανούς. Τα δάση του Αμαζονίου και του Κογκό, ως βιοτικές αντλίες, ρουφάνε τόσο πολύ υγρασία από το χώρο που δημιουργούνται οι κυκλώνες στους ωκεανούς, ώστε να μην υπάρχει αρκετή τροφοδοσία για να δημιουργηθούν τυφώνες. Γι' αυτό, εξηγεί, εμφανίζονται σπάνια οι κυκλώνες στο Νότιο Ατλαντικό Ωκεανό.

Η θεωρία των δασών ως βροχοποιών, υιοθετείται από αρκετούς επιστήμονες. Η «βιοτική αντλία» όμως δέχτηκε μεγάλη κριτική από επιστήμονες που εξιδικεύονται στα κλιματικά μοντέλα και που θεωρούν ότι η επίδραση των δασών είναι αμελητέα. Σύμφωνα με τον Pearce (2020), μιά Ρωσίδα, γυναίκα φυσικός σε κόσμο που κυριαρχούν άντρες επιστήμονες και μάλιστα από τη δύση, ήταν σίγουρο ότι θα συναντήσει την αμφισβήτηση. Η Makarieva αναφέρει πως η επιστήμη διακατέχεται συνήθως από φυσιολογική αδράνεια παραπέμποντας στο ρητό του Max Planck για την επιστήμη ότι «προχωρά κάνοντας μια κηδεία τη φορά» (η επιστήμη δύσκολα αφήνει πίσω της κυρίαρχες θεωρίες της). Με τις εξαιρέσεις όμως προχωρά ο κόσμος και πάντοτε μια νεά ιδέα συναντά την αντίδραση του κατεστημένου το οποιο στην προκειμένη περίπτωση εξιδανικεύει τα προγνωστικά μοντέλα και κάνει δογματικές προγνώσεις για το κλίμα της Γης το 2050, ενώ αποτυνχάνει να κάνει ασφαλή πρόγνωση καιρού ακόμα και για την επόμενη μέρα. Αντίθετα, επιστήμονες που διακατέχονται από ταπεινότητα δηλώνουν ότι η επιστήμη της μετεωρολογίας κέρδισε σε μια 20 ετία, μόνο μια επιπλέον μέρα πρόγνωσης (από τις 3 στις 4 μέρες).

4. ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΧΙΟΝΙ, ΧΙΟΝΟΚΑΛΥΜΜΑΤΑ, ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

4.1 Εισαγωγή

Το χιόνι αποτελεί μετά τη βροχή το σημαντικότερο υδάτινο κατακρήμνισμα, κύριο χαρακτηριστικό του οποίου είναι η δυνατότητα προσωρινής ή σημαντικής αποθήκευσης σε κάθε μορφής επιφάνεια σε αντίθεση με τη βροχή, που μετά την πτώση της, είναι υποχρεωμένη ή να διηθηθεί ή να απορρεύσει παραμένουσα μόνο στις όποιες εδαφικές κοιλότητες συναντά. Επομένως το χιόνι αποτελεί σημαντικό υδατικό πόρο, που στις ορεινές και μεγάλου γεωγραφικού πλάτους περιοχές αποτελεί υδατικό πόρο σπουδαιότερο της βροχής. Παράλληλα η μεγάλη σημασία του οφείλεται και στην ιδιότητά του να τήκεται μετά από πολύμηνη παρουσία στο έδαφος.

Εκτός όμως από υδατικός πόρος, το χιόνι αποτελεί αφενός μεν έναν παράγοντα που συχνά στις ακραίες εκφράσεις του (έντονες χιονοπτώσεις) προκαλεί σημαντικά προβλήματα (αποκλεισμό οικισμών, περιοχών, ειδικών χώρων, κλείσιμο δρόμων, επικινδυνότητα δρόμων, περιοχών κλπ), αφετέρου αποτελεί σπουδαίο αναπτυξιακό αθλητικό, αναψυχικό κλπ παράγοντα (χιονοδρομικά κέντρα, χιονοδρομικά

αθλήματα, χιονολογικές μορφές αναψυχής όπως snowboard, snowmobile, snowbicycle, κλπ). Για το λόγο αυτό κάθε παράγοντας, που άμεσα ή έμμεσα επηρεάζει τη δομή, τη συγκρότηση, την παραμονή και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του χιονιού και των σχηματιζόμενων χιονοστρωμάτων, εξετάζεται σε σχέση με την επίπτωσή του σ' αυτό. Η δασική βλάστηση με την παρεμβολή της μεταξύ ατμόσφαιρας και δασικού εδάφους επηρεάζει εκτός από τη βροχή και την πίπτουσα χιόνα. Η επίδραση αυτή της δασικής βλάστησης επί του πίπτοντος χιονιού οφείλεται γενικά στα ακόλουθα:

- Η κομοστέγη των δασικών δέντρων και θάμνων συγκρατεί σημαντική ποσότητα χιονιού, η οποία εξατμιζομένη επιστρέφει στην ατμόσφαιρα.
- Με την σκίαση που παρέχει στο δασικό έδαφος, η δασική βλάστηση επιβραδύνει την τήξη του όπου σκιάζομενου στρώματος χιονιού.
- Με τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει, η δασική βλάστηση επέρχεται γενικά μείωση του πάχους του χιονιού.

Οι παραπάνω επιδράσεις της δασικής βλάστησης στα στρωματοποιημένα στρώματα του χιονιού, εμφανίζονται με διαφορετική ένταση, επηρεάζοντας κυρίως από δασικό είδος και την πυκνότητα των συστάδων. Από τις τρεις παραπάνω βασικές (πρωτογενείς) επιδράσεις, για τη Δασική Υδρολογία ενδιαφέρει κυρίως η χιονοσυκράτηση από τη δασική βλάστηση και η προκαλούμενη επιβράδυνση της τήξης του χιονιού στο δασικό έδαφος. Η δασική βλάστηση ρυθμίζει τη στο δασικό έδαφος φθάνουσα ποσότητα χιονιού και η διάρκεια τήξης του, επηρεάζοντας έτσι την ποσότητα και τη δίαιτα της εντός αυτού (του εδάφους). Οι βασικές ιδιότητες της δασικής βλάστησης που επηρεάζουν το χιόνι και κατ'επέκταση τα σχηματιζόμενα χιονοστρώματα είναι η χιονοσυγκράτηση, η χιονοσυγκρατητική ικανότητα και η διαπερώσα χιόνα.

4.2. Χιονοσυγκράτηση, χιονοσυγκρατητική ικανότητα, διαπερώσα χιόνα

Η χιονοσυγκράτηση, η χιονοσυγκρατητική ικανότητα και η διαπερώσα χιόνα αντιστοιχούν προς εκείνες της υδατοσυγκράτησης, της κομοδιαβροχής και της διαπερώσας βροχής.

Χιονοσυγκράτηση: *Χιονοσυγκράτηση μεμονωμένων δένδρων και θάμνων ή συστάδων είναι το ποσόν του χιονιού, το οποίο συγκρατείται από την κόμη των φυτών αυτών ή της κομοστέγης των δασοσυστάδων κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.* Εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό % της πίπτουσας χιόνας, σπανιώτερα δε σε ύψος χιονιού ή σε mm βροχής.

Χιονοσυγκρατητική ικανότητα: *Χιονοσυγκρατητική ικανότητα μεμονωμένων δένδρων, θάμνων ή συστάδων είναι η μέγιστη δυνατή ποσότητα χιονιού την οποία η κόμη των δένδρων ή η κομοστέγη των συστάδων δύναται να συγκρατήσει.* Εκφράζεται συνήθως σε ύψος χιονιού ή σε mm βροχής.

Διαπερώσα χιόνα: *Διαπερώσα χιόνα είναι η ποσότητα του χιονιού, η οποία διαπερνώντας την κόμη των δασικών δένδρων ή την κομοστέγη των δασικών συστάδων φθάνει στο δασικό έδαφος.* Μετράται συνήθως σε ύψος χιονιού (Εικ. 1, 2) επί τοις % του πίπτοντος χιονιού ή και σε mm βροχής.

Γενικά η χιονοσυγκρατητική ικανότητα της δασικής βλάστησης είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης κομοδιαβροχής. Αυτό συμβαίνει επειδή η χιονοσυγκράτηση μπορεί να χρησιμοποιεί ολόκληρη σχεδόν την επιφάνεια του φυλλώματος, ενώ στην κομοδιαβροχή οι σταγόνες της βροχής συγκρατούνται, κυρίως σε ορισμένες περιοχές των φύλλων. Σε αυτό βοηθά και η διαμόρφωση των χιονονιφάδων, οι οποίες είναι σαφώς μεγαλύτερες και ελαφρότερες των σταγόνων βροχής και μπορούν να συγκρατηθούν καλύτερα στην κόμη και την κομοστέγη των δένδρων λόγω της στερεάς μορφής τους και της τραχυτέρας επιφάνειάς της. Πάρα ταύτα όμως, **η τελική (συνολική) χιονοσυγκράτηση των διαφόρων δασικών φυτών εμφανίζεται στην πράξη μικρότερη της αντίστοιχης υδατοσυγκράτησης** όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1 των Rowe and Hendrix (1951). Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι το χιόνι μόνο για μικρό χρόνο δύναται να διακρατηθεί στην κόμη, στη συνέχεια δε πέφτει στο έδαφος λόγω βάρους ή του ανέμου. Πάντως, η χιονοσυγκράτηση συνεπάγεται -ιδιαίτερα κατά την τήξη του χιονιού- αυξημένη κορμαπορροή συχνά δε μεγαλύτερης και εκείνης, η οποία οφείλεται σε πτώση βροχής.

Εικ. 1α,β: Χαρακτηριστική χιονοσυγκράτηση (πεπηγμένη χιόνα) φυλλοβόλων ειδών στα Πιέρια (α) & ελάτης στο Περτούλι (β)

Εικ. 2: Διαπερώσα χιόνα στο ελατοδάσος Περτουλίου

Πέραν από τη συγκράτηση ποσότητας χιονιού, το δάσος παρατείνει το χρόνο τήξης στο δασικό έδαφος του χιονιού (Σχήμα 3), γεγονός το οποίο επιτρέπει τη βραδεία τήξη αυτού και επομένως τη μεγαλύτερη διήθηση και εξάτμιση, άρα και τη μικρότερη απορροή του τηκομένου χιονιού. Από τις έρευνες του Cennaughton (1935)* σε συστάδες παρθένου δάσους Pinus ponderosa, η παραμονή της διαπερώσας χιόνας στην συστάδα παρετάθη για 5-8 ημέρες. Όσον αφορά τη διαφορά στη συμπεριφορά του χιονιού μεταξύ κωνοφόρων και πλατύφυλλων διαπιστώθηκε ότι **η συγκρατούμενη ποσότητα χιονιού είναι μεγαλύτερη στα κωνοφόρα, δυναμένη να υπερβεί μέχρι και 25% εκείνης των πλατυφύλλων**. Η περίοδος τήξης του χιονιού επιμηκύνεται στα δάση κωνοφόρων κατά 20% περίπου, ενώ στα δάση πλατύφυλλων είναι αρκετά μικρότερη. Γενικά, γίνεται δεκτή η εξής σειρά σε ότι αφορά τη χιονοσυγκρατητική ικανότητα των διαφόρων δασοπονικών ειδών με αύξουσα σειρά:

Ελάτη>Ερυθρελάτη>Πεύκη>Λάρυκα>ΦυλλοβόλαΠλατύφυλλα

Πίνακας 1: Υδατοσυγκράτηση και χιονοσυγκράτηση σε συστάδα Pinus ponderosa 65-75 ετών στην Καλιφόρνια κατά τους Rowe and Hendrix (1951).

Έτος	Είδος κατάκρημνισμάτων	Αριθμός κατάκρημνισμάτων	Κατακρημνίσματα σε γυμνό έδαφος (mm)	Κορμαπορροή (%)	Υδατοσυγκράτηση ή χιονοσυγκράτηση (%)
1940-41	Βροχή	36	1252	3,9	12,9
	Χιόνι	5	234	4,4	13,0
	Άθροισμα	41	1486	3,9	13,0
1941-42	Βροχή	29	848	3,3	15,3
	Χιόνι	6	417	3,7	8,5
	Άθροισμα	35	2651	3,4	13,1
1942-43	Βροχή	34	859	4,5	12,4
	Χιόνι	6	434	5,8	7,6
	Άθροισμα	40	1293	4,9	10,8
1943-44	Βροχή	30	455	2,8	15,7
	Χιόνι	31	503	2,0	11,6
	Άθροισμα	43	958	2,4	13,5
1944-45	Βροχή	22	665	3,8	12,2
	Χιόνι	11	612	2,5	10,0
	Άθροισμα	33	1277	3,2	11,1
1945-46	Βροχή	16	632	2,8	13,3
	Χιόνι	6	302	0,9	10,9
	Άθροισμα	22	934	2,2	12,5
Ετήσιο μέσο	Βροχή	28	785	3,6	13,6
	Χιόνι	8	417	3,0	9,8
	Άθροισμα	**36**	**1202**	**3,4**	**12,3**

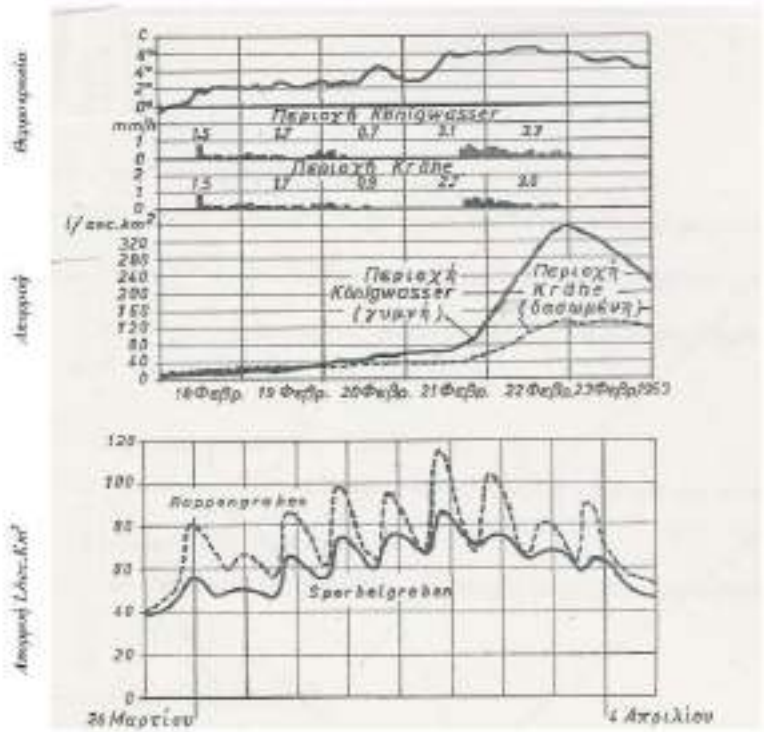
Η ποσότητα της διαπερώσας χιόνας, που εξαρτάται κυρίως από το βαθμό συγκόμωσης των δένδρων, αυξάνει κατά σχέση αντιστρόφως ανάλογη. Οι Anderson, Rice and West (1958)* δίνουν την εξής σχέση μεταξύ βαθμού συγκόμωσης και του ύψους της διαπερώσας χιόνας:

Πίνακας 2. Σχέση βαθμού συγκόμωσης και ύψους χιονιού που φθάνει στο έδαφος

Βαθμός συγκόμωσης	Ύψος χιονιού που φθάνει στο έδαφος (cm)
0.2-0,5	145,4
0,5-0,8	127,7
0,8-1,0	122,1

Ανάλογη επίπτωση της συμπεριφοράς της δασικής βλάστησης στο χιόνι παρατηρήθηκε και κατά τις αραιώσεις. Γενικά έντονη αραίωση προκαλεί συσσώρευση χιονιού στο δασικό έδαφος και μειώνει το χρόνο τήξης, ενώ ασθενής αραίωση επιτρέπει τη συγκέντρωση μικρότερης ποσότητας χιονιού, αυξάνει

όμως το χρόνο τήξης του. Η ταχύτητα τήξης του χιονιού εξαρτάται από το βαθμό συγκόμωσης και το δασοπονικό είδος. Αυτή ανέρχεται κατά τον Molchanov (1960) (για ρωσικές συνθήκες) σε ασκεπές έδαφος σε 6-12 μέρες, σε διάκενα δάσους σε 10-20 μέρες, σε αμιγείς συστάδες πεύκης σε 15-25 μέρες και σε μικτά δάση 20-30 έως 45 ημέρες. Ταχύτερα τήκεται το χιόνι κυρίως στις νότιες εκθέσεις, ενώ αντίθετα οι βόρειες εκθέσεις η τήξη παρατείνεται κατά 5-8 μέρες. Σε στενές λωρίδες μικτού δάσους από τα είδη Robinie, Fraxus και Acer ύψους 5-8m, η τήξη που λαμβάνει χώρα είναι μεγαλύτερη από ότι το ακάλυπτο χώρο (Molchanov, 1960). Γενικά η τήξη του χιονιού σε γυμνό έδαφος είναι ταχύτερη από ότι σε δασωμένο όπου επιβραδύνεται και το γεγονός αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για την χρονική εξέλιξη της απορροής όπως φαίνεται στα Σχήματα 3 α,β.



Σχήμα 3. α) Η πορεία τη τήξης του χιονιού προελθούσα υδαταπορροή, συνεπεία της ανόδου της θερμοκρασίας την δασωμένη λεκάνη Krahe και τη γυμνή Konigswasser στη Γερμανία (Kirwald, 1971)*. β) Υδαταπορροή στους δυο ελβετικούς χειμάρρους Sperbelgraben (δασωμένου πλήρως) και Rappengraben (δασωμένου κατά το 1/3) κατά τη διάρκεια της τήξης του χιονιού (Burger, 1943)*

Από άποψη επίδρασης της τήξης του χιονιού στην απορροή των διαφόρων υδάτινων ρευμάτων, ο Molchanov (1960) βρήκε ότι στα μικρά υδάτινα ρεύματα της Ρωσίας, η τήξη του χιονιού δύναται να επηρεάσει την απορροή κατά 2-3 ημέρες, ενώ για τα μεγάλα υδάτινα ρεύματα, όπως οι ποταμοί, η επίδραση της τήξης του χιονιού δύναται να παραταθεί για περίπου 10 ημέρες. Ο χειρισμός του δάσους με κατάλληλα σχεδιασμένες υλοτομίες κατορθώνει να επηρεάσει σημαντικά την ποσότητα του συσσωρευμένου χιονιού στο δασικό έδαφος, όπως και την ταχύτητα τήξης. Έτσι με κατάλληλο χειρισμό

των δασοσυστάδων μπορεί να επηρεάστεί σημαντικά η δίαιτα και η ποσότητα του απορρέοντος νερού. Ο Anderson (1956)* σε έρευνες που έγιναν σε δάση κωνοφόρων, στη Sierra Nevada της Καλιφόρνιας, χρησιμοποιώντας διάφορες συγκομιστικές μεθόδους, διαπίστωσε ότι η ποσότητα του χιονιού αυξάνει και η τήξη αυτή επιβραδύνεται. Εάν οι υλοτομίες αυτές σχεδιάζονται ώστε οι νότιες θέσεις να σκιάζονται οι δε βόρειες να προστατεύονται γενικά από το δάσος, τότε θα επιτευχθεί αύξηση της υδαταπόδοσης του τηκόμενου χιονιού μέσω της επιβράδυνσης της τήξης του. Για το λόγο αυτό προτείνονται υλοτομίες κατά λωρίδες (κρασπεδικές υλοτομίες) με άξονα τοποθετημένο από Δύση προς Ανατολή, πλάτους όσον το ύψος των δένδρων (Παυλίδης, 2005). Έρευνες του Goodells (1959)* στο Colorado των ΗΠΑ, έδειξαν ότι η αραίωση της κομοστέγης αύξησε την αποτιθέμενη εντός των δασοσυστάδων ποσότητα χιονιού, επομένως και τη σε νερό απόδοσή της. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η ταχύτητα τήξης του χιονιού και επετεύχει το μέγιστο της τήξης του πολύ νωρίτερα από ότι στις πειραματικές επιφάνειες μάρτυρες.

5. ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ, ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ

5.1. Δάσος και εδαφική υγρασία

Όπως αναφέρθηκε, από όλες τις μορφές βλάστησης, η δασική βλάστηση, αφενός μεν συγκρατεί σημαντικά ποσά κατακρημνισμάτων στην κομοστέγη της και αφετέρου καταναλώνει μεγάλα ποσά για την κάλυψη των αναγκών της. Τα δέντρα είναι μεγάλοι καταναλωτές νερού, μια ζεστή μέρα, μια διψασμένη ώριμη οξιά μπορεί να πιεί 500 λιτρα νερού που τα αντλεί από το έδαφος. Χρησιμοποιεί αυτό το εδαφικό νερό με διάφορους τρόπους, το περισσότερο όμως από αυτό το νερό διαπνέεται από τα στόματα των φύλλων. Με τον τρόπο αυτό, το δάσος επηρεάζει καθοριστικά και καταλυτικά τις εν συνεχεία φάσεις του υδρολογικού κύκλου. Ιδιαίτερα η παρουσία της δασικής βλάστησης επηρεάζει απόλυτα την υποκείμενη εδαφική υγρασία, καθώς και την ανανεωτική τροφοδοσία των υπόγειων υδροφορέων και των πηγών. Τα λιβάδια και οι αγροτικές εκτάσεις έχουν σαφώς μειωμένη ικανότητα απορρόφησης της βροχής συγκριτικά με το δάσος. Η ποώδης βλάστηση χρησιμοποιεί πολύ λιγότερο νερό. Ωστόσο, το έδαφος θερμαίνεται και ξηραίνεται γρηγορότερα και η ζωοδότρια υγρασία εξατμίζεται στον αέρα εντείνοντας την αποξήρανση του εδάφους. Το δάσος είναι το καλύτερο μέσο για την προστασία του εδάφους και των σημαντικών μικροοργανισμών του. Τα δέντρα, ειδικά τα φυλλοβόλα, πλεονεκτούν συγκριτικά με την ποώδη βλάστηση διότι συλλέγουν νερό. Η συλλογή γίνεται μέσω των κλαδιών που είναι προσανατολισμένα προς τα πάνω και απλώνονται γύρω από τον κορμό, δημιουργώντας ένα μεγάλο χωνί που οδηγεί και κατευθύνει το νερό της βροχής και την υγρασία του αέρα προς τις ρίζες. Μόλις το νερό φτάσει στο έδαφος, αορροφάται από το υψηλό πορώδες του που λειτουργεί σα σφουγγάρι. Ακόμα και ισχυρές βροχοπτώσεις απορροφώνται και αργά διηθούνται προς τα βαθύτερα εδαφικά στρώματα.

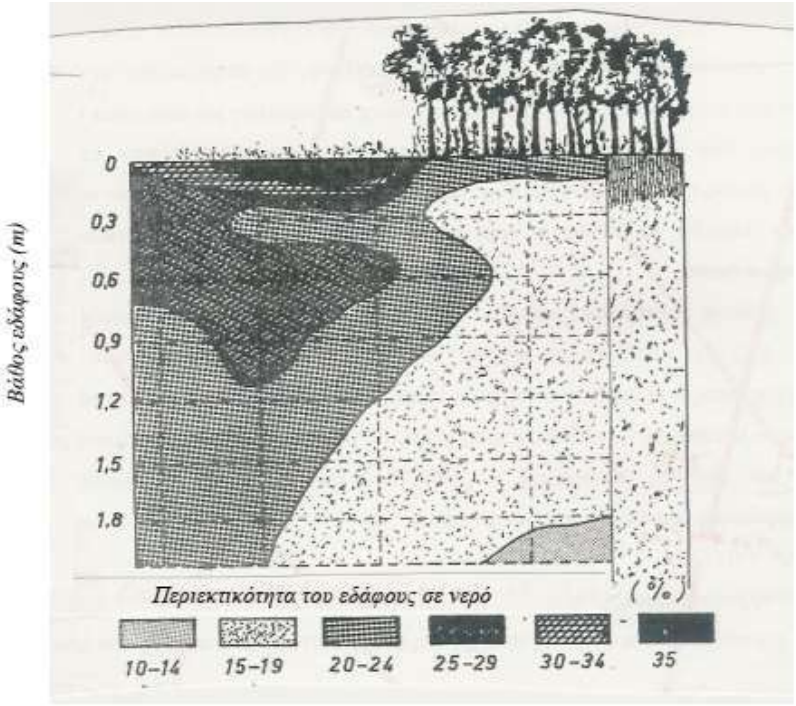
Οι επιδράσεις που ασκεί η δασική βλάστηση κα το δάσος εν γένει στην εδαφική υγρασία, ιδιαίτερα περί τον χώρο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος των δασοσυστάδων, αποτελεί και αντικείμενο της Δασικής Εδαφολογίας και της Δασικής Οικολογίας. Επί το παρόντος θα περιορισθούμε μόνο στη

συνοπτική παρουσίαση βασικών θεμάτων που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη Δασική Υδρολογία. Το δάσος εμπλουτίζει το δασικό έδαφος με χούμο, βελτιώνοντας το πορώδες του και αυξάνοντας σημαντικά την υδροπερατότητά του (Wilde, 1962, Aaltonen, 1948, Κωτούλας, 1965)*. Τα δασικά εδάφη εμφανίζονται γενικά ξηρότερα του γυμνού εδάφους (Πιν. 3). Η επίδραση της δασικής βλάστησης στην εδαφική υγρασία, όπως είναι φυσικό είναι εντονότερη κατά τη διάρκεια της βλαστητικής περιόδου. Η επίδραση αυτή επικεντρώνεται κυρίως στην επιφανειακή μάζα βάθους 0,80m, όπου αναπτύσσεται το μεγαλύτερο μέρος του ριζικού συστήματος των δασοσυστάδων. Η αποψίλωση μιας δασικής έκτασης γενικά συμβάλει στην αύξηση του εδαφικού νερού. Η ποσοτικοποίηση αυτής της σχέσης ερευνήθηκε από πολλούς μεταξύ των οποίων και από το συγγραφέα (Γκανάτσιος 2004). Στα Σχήματα 4 και 5 τα οποία παρέχουν την εδαφική υγρασία σε κεκαλυμμένα με δασική βλάστηση και γυμνά εδάφη επιβεβαιώνουν τα παραπάνω συμπεράσματα.

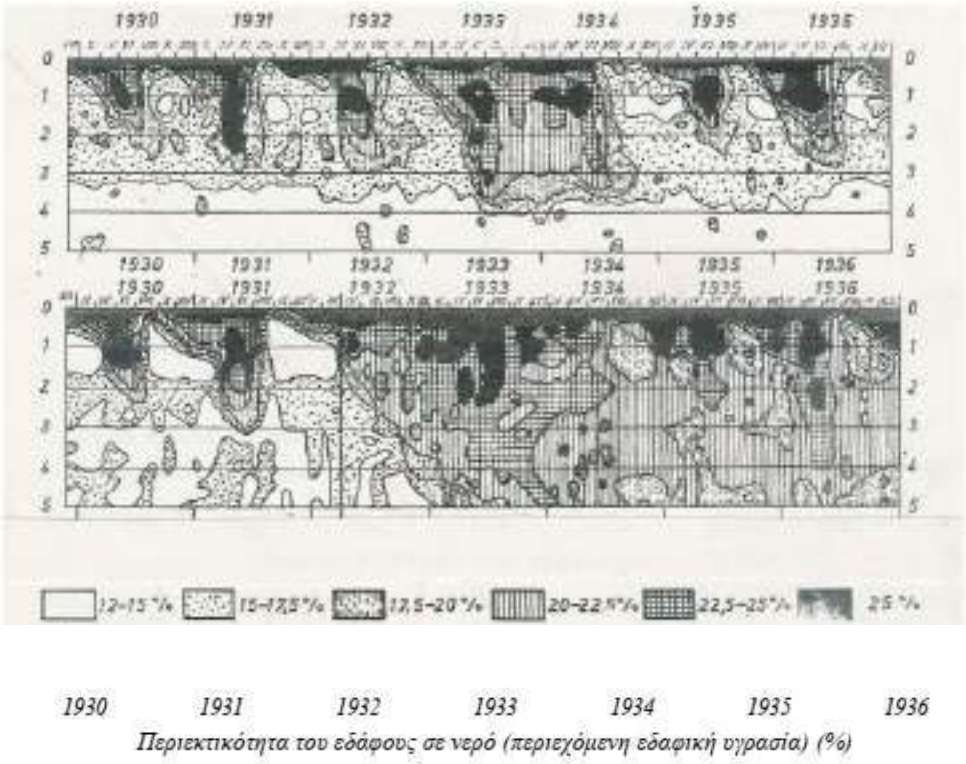
Πίνακας 3: Καταγραφόμενη υγρασία σε γυμνό και δεδασωμένο έδαφος κατά Heinrich (1936) και Aaltonen (1948)*.

Βάθος εδάφους (cm)	**Ποσοστό υγρασίας (%) κατ' όγκο**	
	Δασωμένο έδαφος	**Γυμνό έδαφος**
0-10	9,30	9,78
10-20	8,40	9,56
20-30	7,73	9,29
30-40	7,42	8,86
50-60	6,51	7,91
70-80	6,81	7,88
90-100	7,57	7,45

Η παραπάνω επίδραση του δάσους στην ποσότητα της απαντώμενης εδαφικής υγρασίας όπως είναι φυσικό επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που εντάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη είναι οι παράγοντες που καθορίζουν τις ιδιότητες του εδάφους με κυρίαρχη την κοκκομετρική διαβάθμιση του δασικού εδάφους η οποία καθορίζει -μαζί με το βάθος του- την υδατοσυγκρατητική του ικανότητα. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται οι καλούμενοι φυσιογραφικοί παράγοντες που σχετίζονται με τα δομικά-βιολογικά χαρακτηριστικά της δασικής βλάστησης, όπως το δασοπονικό είδος, η συγκρότησή τους, η δομή, ο βαθμός συγκόμωσης, ο βαθμός μίξης, η μορφή της καλλιέργειας, η ηλικία συστάδων κλπ. Άλλοι όμως ερευνητές όπως ο Ramar (Aaltonen, 1948)* σε διεξαχθείσες έρευνες σε ελαφρά εδάφη, διαπίστωσαν την αντίθετη (της προαναφερθείσας) επίδραση του δάσους στη μείωση της εδαφικής υγρασίας. Έτσι στις περιπτώσεις αυτές (ελαφρά αμμώδη εδάφη) το δασικό έδαφος παρουσιάζεται υγρότερο του γυμνού. Το ίδιο φαινόμενο επίσης καταγράφεται και κατά τη διάρκεια μακρόχρονης ξηρασίας. Επισημαίνεται ότι το δασοπονικό είδος αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά την εδαφική υγρασία τόσο με το φύλλωμά του, όσο και με το ριζικό του σύστημα. Τα αποτελέσματα σχετικών ερευνών κατά τους Heinrich (1936), Ijjasz (1936), Aaltonen (1948)*, παρέχονται στους Πίνακες 4 και 5.



Σχήμα 4: Κατανομή της εδαφικής υγρασίας σε ηλικιωμένη συστάδα πλατυφύλλων και σε κοντινή αποψιλωτικά υλοτομηθείσα συστάδα (Wissotzky, 1930)*



Σχήμα 5: Άνω: Κατανομή της εδαφικής υγρασίας 50ετούς δρυοσυστάδας (Το έτος 1933 ήταν πολύ υγρό)
Κάτω: Κατανομή της εδαφικής υγρασίας 60ετούς δρυοσυστάδας μετά από αποψιλωτική υλοτομία κατά τα έτη 1930, 1931 και 1933 (η υλοτομία έγινε την άνοιξη του 1930). (Falkovski 1935, Vysotskij 1938)*

Πίνακας 4: Δασοπονικό είδος, εδαφική υγρασία (Heinrich, 1936, Aaltonen 1948)*

Βάθος εδάφους (cm)	**Ποσοστό εδαφικής υγρασίας κατ' όγκο (%)**		
	Γυμνό έδαφος	**Δασωμένο με σημύδα**	**Δασωμένο με οξυά**
0-10	7,76	4,86	4,77
10-20	8,76	5,80	5,57
20-30	8,51	5,93	5,76
30-40	8,02	6,39	6,07
50-60	8,54	6,87	5,40
90-100	8,47	7,01	5,88

Πίνακας 5: Δασοπονικό είδος, εδαφική υγρασία (Ijjasz 1936, Aaltonen 1948)*

Βάθος εδάφους (cm)	**Ποσοστό εδαφικής υγρασίας % (σε ξηρό βάρους)**		
	Γυμνό έδαφος	**Δασωμένο με ερυθρελάτη**	**Δασωμένο με δρυ**
0	13,5	12,7	17
10	14,0	10,0	8,5
20	14,1	9,4	7,6
30	15,5	9,1	6,9
40	17,1	9,5	9,0
60	18,8	9,2	10,4
120	18,3	10,5	11,3
Μ.Ο.	15,3	9,9	9,2

Κατά τον Aaltonen (1948)* τα δάση οξυάς αλλά και τα δάση δρυός ξηραίνουν περισσότερο το έδαφος από ότι τα δάση ερυθρελάτης. Παράλληλα όμως αναφέρει ότι δασικά εδάφη, ιδιαίτερα εδάφη ξηρών σταθμών υποκείμενα σε αραιωτικές επεμβάσεις, εμφάνισαν αύξηση της εδαφικής υγρασίας. Ωστόσο, σε ετήσια βάση, τα φυλλοβόλα πλατύφυλλα επιτρέπουν σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα νερού να φθάσει στο έδαφος κατά την εποχή μάλιστα που παρατηρούνται οι περισσότερες βροχοπτώσεις. Όπως αναφέρθηκε ήδη στο κεφάλαιο της υδατοσυγκράτησης, τα κωνοφόρα επιτρέπουν μικρότερη ποσότητα νερού να φθάσει στο έδαφος με αποτέλεσμα, σε ξηρές χρονιές, να αντιμετωπίζουν υδατικό στρες, να εξασθενούν και να προσβάλλονται έτσι δευτερογενώς από έντομα. Ο Adams (Aaltonen, 1948)* επίσης, δίνει τα ακόλουθα ποσοστά προσαύξησης της εδαφικής υγρασίας, συναρτήσει του βάθους του εδάφους, μετά αραίωση δασοσυστάδας Pinus banksiana και Pinus strobus:

Πίνακας 6: Σχέση βάθους εδάφους και προσαύξησης εδαφικής υγρασίας

Βάθος εδάφους (cm)	**Προσαύξηση εδαφικής υγρασίας (%)**
0-30	+47,6
30-60	+10,7
60-90	+2,7

Η εποχική διακύμανση της εδαφικής υγρασίας και το βάθος του εδάφους είναι σημαντικοί περιοριστικοί παράγοντες της βλαστητικής ανάπτυξης. Ιδιαίτερα κατά την παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο, λίγα εκατοστά επιπλέον εδάφους μπορεί να κάνουν τη διαφορά μεταξύ επιβίωσης και θανάτου. Περισσότερα για το θέμα υπάρχουν στο κεφάλαιο του υδατικού ισοζυγίου και την αναφορά στη **μέγιστη διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα του εδάφους (Sto).**

5.2. Δάσος και υπόγειο νερό

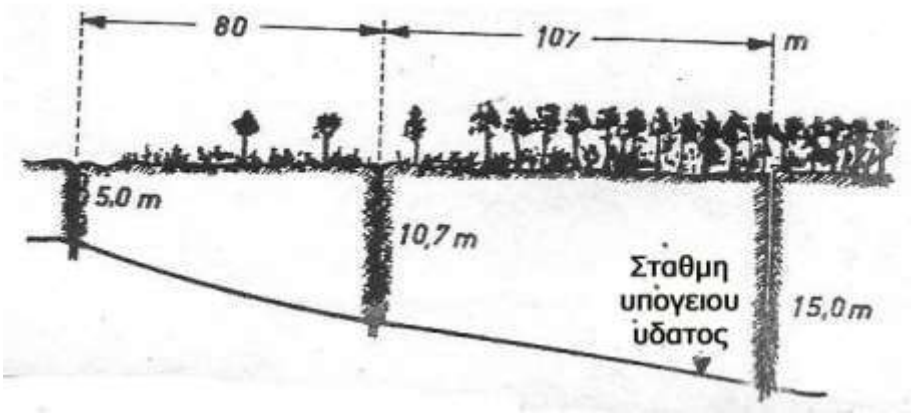
Ο καλύτερος τρόπος να προστατευτούν οι υπόγειοι υδροφορείς είναι το δάσος. Τα δάση είναι τόσο σημαντικά για το υπόγειο νερό, που κάποιες εταιρίες νερού στη Γερμανία, επιδοτούν τους δασοκτήμονες ώστε να υιοθετήσουν υπεύθυνες-αειφορικές πολιτικές διαχείρισης των δασών τους. Όταν η βροχή σταματήσει, τα δέντρα χρησιμοποιούν μέρος του εδαφικού νερού για τις ανάγκες τους, το υπόλοιπο όμως διηθείται σε βαθύτερα στρώματα, πέραν από τη ζώνη των ριζών. Σε αυτά τα βάθη, το νερό γίνεται αργά μέρος της ροής του υπόγειου νερού.

Η φρέατιος στάθμη (επιφάνεια) του ενδόγειου ή υπογείου νερού παρουσιάζει σύμφωνα με την εξέλιξη (πορεία) των βροχών, σημαντικές διακυμάνσεις, που αντικατοπτρίζουν τις αντίστοιχες διακυμάνσεις της αφικνούμενης ποσότητας νερού από τα υπερκείμενα εδαφική στρώματα. Οι εποχιακές αυτές διακυμάνσεις που μπορεί να φθάσουν τα 1,50-2,00m, εξαρτώνται κυρίως από την υδροπερατότητα των δασικών εδαφών, την επικλινότητα των αδιαπερατών στρωμάτων και εν γένει την τοπογραφική διαμόρφωση της περιοχής. Οι διακυμάνσεις της στάθμης του υπογείου νερού μπορούν εύκολα να διαπιστωθούν με άμεσες και εύκολες σχετικές μετρήσεις και καταγραφές (π.χ. πιεζόμετρα στάθμης, ηλεκτρικοί ανιχνευτές κλπ) αποτελώντας ασφαλή κριτήρια του ρόλου των δασών στην αναπληρωτική τροφοδοσία των υπογείων υδροφορεών. Το όλο φαινόμενο της επίδρασης του δάσους στην υπόγεια υδροφορία και κατ' επέκταση στην υδατική οικονομία μιας περιοχής έχει ως εξής:

Αρχικά το δάσος συγκρατεί στην κόμη του μια σημαντική ποσότητα νερού (υδατοσυγκράτηση) και διαπνέει επίσης μια σημαντική ποσότητα νερού με αποτέλεσμα τη μείωση της υγρασίας του εδάφους, ιδιαίτερα κατά τη θερμή βλαστητική περίοδο. Συνήθως η τροφοδότηση του υπόγειου νερού γίνεται το χειμώνα που οι απαιτήσεις των δέντρων σε νερό ελαχιστοποιούνται, οι οξυές και οι δρύες είναι σε βλαστητικό λήθαργο και έτσι μεγαλύτερες ποσότητες νερού καταλήγουν στους υπόγειους υδροφορείς. Αντίθετα, το καλοκαίρι, η βροχή σχεδόν ποτέ δεν είναι αρκετή για να κορέσει τη δίψα των δέντρων. Τότε είναι που η υγρασία του εδάφους μειώνεται σημαντικά. Επομένως είναι φυσιολογική και αναμενόμενη η πτώση της στάθμης της υπόγειας υδροφορίας των δασικών εδαφών ιδιαίτερα, κατά τη θερμή βλαστητική περίοδο.

Εικόνες 3: Οξυές στο Χολομώντα Χαλκιδικής

Ως παράδειγμα εμπειρικής επίδρασης του δάσους στην στάθμη των υπογείων υδάτων το 1868, αναφέρονται οι αναδασώσεις ευκαλύπτου από μοναχούς σε ελώδη περιοχή της Ρώμης, που οδήγησαν σε πτώση της στάθμης του υπογείου νερού, την εξαφάνιση των ελών της περιοχής και την εξάλειψη της ελονοσίας (Wilde, 1962)*. Επίσης σχετικές έρευνες και μετρήσεις που έγιναν περί το 1900 στις ρωσικές στέπες (Aaltonen, 1948, Wilde, 1962)* έδειξαν ότι η στάθμη του υπόγειου νερού στο έδαφος των δασών της Τάϊγκα, βρέθηκε βαθύτερα από ότι στο αντίστοιχο έδαφος των στεπών της περιοχής (Σχήμα 6). Σχετικές έρευνες του Ototzkij* έδειξαν ότι στο δάσος η υπόγεια στάθμη του νερού βρέθηκε σε βάθος 12-27m, ενώ η αντίστοιχη στάθμη στις στέπες βρέθηκε σε βάθος 3-10m. Η πτώση αυτή της στάθμης ήταν εντονότερη στις ώριμες συστάδες παρά στις νεαρές. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του Ototzkij επιβεβαιώθηκαν και από άλλους ερευνητές. Επίσης σε σχετικές μετρήσεις του Henry στη Γαλλία το 1902-1903 και του Pearson στην Ινδία το 1907 οδήγησαν στα ίδια συμπεράσματα (Aaltonen, 1948)*.



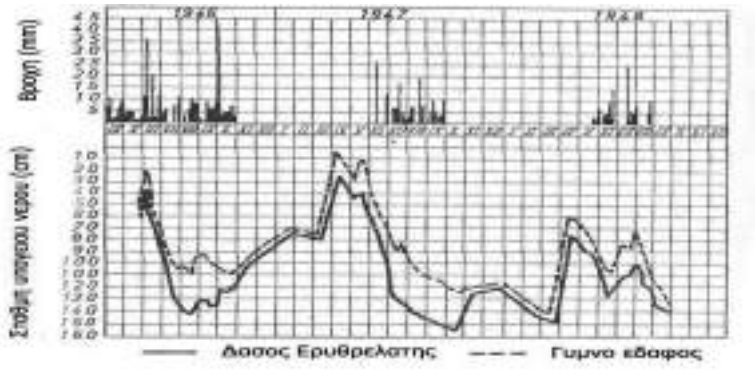
Σχήμα 6: Βάθος στο οποίο απαντάται η στάθμη του υπογείου νερού σε στέπες και σε δάσος της νότιας Ρωσίας. Η στάθμη κατέρχεται σταδιακά από τις στέπες προς το δάσος κατά 10m (Ototzky, 1905)*

Οι Ebermayer και Harmann (1904)*, που διεξήγαγαν παρόμοια πειράματα σε επίπεδα και κεκλιμένα εδάφη, διαπίστωσαν ότι το βάθος της στάθμης του υπογείου νερού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (ποσότητα, ένταση, κατανομή βροχής, υπόγεια συλλεκτήρια λεκάνη, υγρασία εδάφους, πάχος διαπερατών εδαφικών στρωμάτων, κλίσεις υδροφόρων στρωμάτων, στρωμάτωση και αλληλουχία διαπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών, δυνατότητα εκφόρτισης ως πηγαίο νερό ή ως κορεσμένη υγρασίας και επιφάνεια, δασοπονικό είδος). Ο Buhler το 1918 (Aaltonen, 1948)*, επιβεβαίωσε σε σχετικά πειράματα τα συμπεράσματα του Ototzkij και απέδειξε ότι μετά από αποψιλωτικές υλοτομίες προκλήθηκε άνοδος της στάθμης των υπογείων υδάτων.

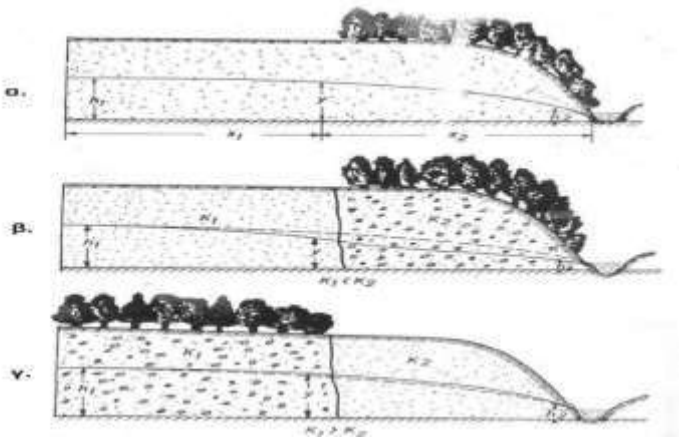
Ο Ijjasz (Aaltonen, 1936-1938)* από πειραματικά αποτελέσματα που προήλθαν από έρευνες στις ουγγρικές πεδιάδες, αναφέρει την υπό του δάσους προκαλούμενη πτώση της στάθμης του υπεδάφιου ύδατος. Παράλληλα όμως περιγράφει και πολλές περιπτώσεις, στις οποίες συστάδες ψευδακακίας προκάλεσαν ανύψωση στη στάθμη του νερού. Το γεγονός αυτό δημιούργησε την εντύπωση ότι το είδος αυτό δρα ως υδροσυλλέκτης στις ουγγρικές πεδιάδες. Αντίθετα ο Hesselmann (1971)* στη Σουηδία διεπίστωσε σαφή πτώση της στάθμης του υπογείου νερού, ιδιαίτερα σε συστάδες λάρικας αλλά και αντίστοιχες ερυθρελάτης. Τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύτηκαν τόσο από τον Thurmann – Moe (1941)* σε δασοσυστάδες της Νορβηγίας όσο και από τον Lukkala (1942)* σε αντίστοιχες έρευνες σε δασοσυστάδες της Φιλανδίας.

Ο Molchanov (1960) αναφέρει ότι δάση με χουμώδη εδάφη μόνον μικρή επίδραση μπορούν να ασκήσουν στη στάθμη των υπογείων νερών. Στο συμπέρασμα αυτό εξηγείται λόγω της αδυναμίας επίδρασης του ριζικού συστήματος των δένδρων κάτω από το βάθος των 3,0-3,5m (όπου συνήθως δε φθάνουν οι ρίζες). Κατά τον Molchanov ιδιαίτερα αισθητή γίνεται η επίδραση του δάσους, όταν η στάθμη του υπογείου νερού βρίσκεται περί τα 2,0m, βάθος όπου απαντάται το σύνολο σχεδόν του μυζητικού ριζικού συστήματος των δασικών δένδρων και θάμνων. Η μέγιστη δε επίπτωση του δάσους στα υπόγεια νερά βρίσκεται περί το 1,0-1,5m επικεντρωμένη κυρίως κατά την βλαστητική περίοδο.

Από τα παραπάνω, γίνεται δεκτό ότι σε επίπεδες επιφάνειες η στάθμη του υπεδαφίου νερού βρίσκεται κάτω από το ριζικό σύστημα των δένδρων και κατά κανόνα βαθύτερα από ότι σε παρακείμενο γυμνό έδαφος με παρόμοιες λοιπές συνθήκες. Η διαφορά αυτή αποδίδεται κατά κύριο λόγο στη μεγαλύτερη διαπνοή του δάσους και καθίσταται ακόμη μεγαλύτερη όταν επικρατούν συνθήκες όπου ευνοούν την εξατμισιδιαπνοή, όπως π.χ. δασοπονικά είδη μεγάλης διαπνευστικής ικανότητας και μεγάλων απαιτήσεων σε νερό καθώς και σε καλά αναπτυγμένες συστάδες. Η διακύμανση της στάθμης δεν είναι σταθερή αλλά κυμαίνεται κατ' έτος και εποχιακά (Σχήμα 7). Επίσης κυμαίνεται ανάλογα με το είδος του εδάφους αλλά και των τοπικών συνθηκών αναγλύφου (Σχήμα 8). Δεν αποκλείεται μερικές φορές η ανωτέρω διαφορά να μηδενίζεται, ενώ σε άλλες περιπτώσεις να αναστρέφεται. Έτσι, δύσκολα εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα χωρίς τη διεξοδική σπουδή όλων των τοπικών παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν τη στάθμη του υπογείου νερού.



Σχήμα 7: Διακύμανση της στάθμης, υπογείου νερού σε γυμνό και δασωμένο έδαφος (Molchanov, 1960)



Σχήμα 8: Καμπύλη της στάθμης του υπογείου νερού, εντός υδροφόρου εδαφικού στρώματος (Rakhmanov, 1962)

α) Όταν το έδαφος παραμένει αμετάβλητο

β) Κατά τη μετάβασή του σε έδαφος με μεγαλύτερη υδροπερατότητα

γ) Κατά τη μετάβασή του σε λιγότερο διαπερατό έδαφος

K_1, K_2: μέσοι συντελεστές υδροπερατότητας

h_1: το αρχικό βάθος στάθμης του κινουμένου υπογείου νερού

h_2: το βάθος της στάθμης του νερού στη θέση εκροής του από το έδαφος

5.3. Δάσος και πηγές

Κατά την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου αναφέρθηκε ότι μέρος του νερού που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους, διηθείται εντός αυτού προς τα βαθύτερα στρώματα με ταχύτητα εισόδου και κατακόρυφης κίνησης νερού εξαρτώμενη από το βαθμό κατείσδυσης (εισόδου) και ενδοπερατότητας των επιμέρους εδαφών. Με τον τρόπο αυτό αφενός μεν αναπληρώνεται η καταναλισκόμενη από τα φυτά εδαφική υγρασία και αφετέρου τροφοδοτούνται οι πηγές και οι υποκείμενοι υδροφορείς. Όταν το διηθούμενο νερό συναντήσει αδιαπέρατα ή ολιγότερο διαπερατά στρώματα, τότε υποχρεωτικά το νερό που δε διηθήθηκε βαθύτερα, συγκεντρώνεται στη ζώνη αυτή του εδάφους σχηματίζοντας τις γνωστές μας **πηγές**. Σε διαφορετική περίπτωση παραμένει εγκλωβισμένο ως ελεύθερος ή υπό πίεση υπόγειος υδροφορέας, ο οποίος αποτελεί σημαντική πηγή κάλυψης των υδατικών αναγκών μιάς περιοχής. Αυτή διεργασία αποτελεί ένα διηθητό μηχανικό φυσικό φίλτρο με σημαντικές ευεργετικές επιπτώσεις στην ποιότητα του διηθούμενου νερού.

Η επίδραση του δάσους στην παροχή και την ανάπτυξη των πηγών αποτελεί αντικείμενο το οποίο δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς. Εάν η επίδραση αυτή συνδυαστεί μόνο με την επίπτωση του δάσους στα υπόγεια ύδατα, το δάσος με την προκαλούμενη πτώση του υπογείου στάθμης του νερού είναι λογικό να επιφέρει γενικά μείωση στην παροχή των πηγών που μπορεί να οδηγήσει μέχρι και την πλήρη εξαφάνισή τους. Ο Ototzkij κατά τα πειράματά του σε ρωσικές στέπες (Aaltonen, 1948)* διαπίστωσε ότι οι πηγές της περιοχής βρίσκονται κατά κανόνα εκτός του δάσους. Ο Biswell και Λιάκος (1962)* αναφέρουν περίπτωση όπου με την υλοτομία ιτιάς φυομένης εγγύς μιας πηγής προέκυψε σημαντική αύξηση της παροχής πηγαίου νερού. Στην περίπτωση αυτή όμως η αύξηση προήλθε από την απελευθέρωση του υδροφόρου στρώματος το οποίο είχε εμφραγεί από το ριζικό σύστημα της ιτιάς. Ωστόσο, η επίδραση του δάσους στις πηγές θα ήταν μονόπλευρο εάν εξεταζόταν μόνο σε σχέση με την αυξημένη κατανάλωση εδαφικής υγρασίας κατά τη βλαστητική περίοδο.

Εικόνα 4: Πηγές και νερόμυλος στον Αχέροντα, προς το Σούλι Ηπείρου

Εικόνα 5 α,β; Επάνω: πηγές στο Άγγιστο Σερρων. Μέση και Κάτω αριστερά: Πηγές στο Χολομώντα. Κάτω δεξιά: Πηγή στο δρόμο για τους Καλαρρύτες.

Οι αρχαίοι Έλληνες αντίθετα, πίστευαν ότι τα δάση αυξάνουν γενικά τόσο τις παροχές όσο και το αριθμό των πηγών. Αντίθετα, τα φαινόμενα λειψυδρίας τα απέδιδαν στην αποδάσωση των δασών. Οι αποψιλώσεις δασών, η διάβρωση και οι πλημμύρες είναι συνήθη γεγονότα που κατέγραψε και καταγράφει η ιστορία σχεδόν σε κάθε γωνιά του πλανήτη. Στην αρχαία Ελλάδα, οι λόφοι της Αττικής αποψιλώθηκαν σε διάστημα δύο γενεών και περίπου το 590 π.χ., ο Σόλωνας απαγόρεψε την καλλιέργεια στους λόφους λόγω απώλειας εδάφους. Αργότερα ο Πεισίστρατος εισηγήθηκε επιχορήγηση αγροτών για φύτευση ελιάς, είδους ανθεκτικού στο υποβαθμισμένο έδαφος. Την πιο παραστατική περιγραφή της διάβρωσης την άφησε ο Πλάτων στο έργο του Κριτίας :

«Το έφορο και μαλακό χώμα απομακρύνονταν από τα υψώματα στα χρόνια που περάσαν γλιστρώντας σε μεγάλες ποσότητες και εξαφανιζόταν στα βάθη της θάλασσας. Έτσι αυτό που έχει απομείνει είναι μόνο ο ρηχός φλοιός της γης που μοιάζει με σκελετό άρρωστου κορμιού και παράγει μόνο τροφή για μέλισσες. Παλαιότερα ο τόπος μας διατηρούσε της ακεραιότητά του και αντί για ξερά βουνά είχε ψηλούς χωμάτινους λόφους, με πολλά δάση, από τα οποία ακόμα και σήμερα φαίνονται τα σημάδια. Από τα δάση αυτά έχουν γίνει και οι στέγες πολλών κτιρίων που εξακολουθούν να είναι άθικτες ακόμα και σήμερα. Ακόμα υπήρχαν πολλά άλλα καρποφόρα δέντρα και άφθονα βοσκοτόπια. Ο τόπος εμπλουτιζόταν κάθε χρόνο από το νερό της βροχής που δε χανόταν όπως σήμερα που κυλάει πάνω στην αποψιλωμένη γη και καταλήγει στη θάλασσα, αλλά έχοντας πολλά χώματα, η ίδια η γη το συγκρατούσε. Έτσι όλα τα μέρη είχαν τρεχούμενα νερά από πηγές και ποτάμια. Οι βωμοί που έχουν απομείνει μέχρι σήμερα στα μέρη όπου υπήρχαν πηγές είναι σημάδια που επιβεβαιώνουν ότι όσα λέγονται είναι αληθινά.»

Αλλά και σήμερα επικρατεί γενικά η άποψη ότι τα δάση αυξάνουν τις πηγές και εμπλουτίζουν (αυξάνουν) τις παροχές τους. Τα δάση αυτά τα καλούμενα «κεφαλάρια», θεωρείται ότι πέραν της προστατευτικής τους επίδρασης επενεργούν ευνοϊκά και στις πηγές. Οι εκ πρώτης όψεως αυτές αντιφατικές θέσεις της επίδρασης του δάσους στις πηγές, έχουν την ερμηνεία τους στη σχέση βάθους στάθμης υπογείων νερών και ριζικού συστήματος των δένδρων. Στις περιπτώσεις λοιπόν κατά τις οποίες το υπόγειο νερό βρίσκεται σε μικρό βάθος (≤ 3,0-3,5m) και επηρεάζεται από το ριζικό σύστημα των δένδρων τότε το δάσος μπορεί να προκαλέσει την υποβίβαση της στάθμης του υπογείου νερού με αποτέλεσμα να έχει δυσμενή επίπτωση στην δίαιτα ή ακόμη και την ύπαρξη των υποκείμενων του δάσους πηγών. Αντίθετα στις περιπτώσεις εκείνες κατά τις οποίες η στάθμη του υπεδαφίου νερού βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του ριζικού συστήματος των δασικών δέντρων τότε το υπερκείμενο δάσος με την αύξηση του πορώδους (ιδιαίτερα του μεγαλοπορώδους του δημιουργούμενου από τις ρίζες) τη χουμοποίηση της φυλλάδας και των εδαφών και τη μείωση της επιφανειακής ταχύτητας κίνησης του νερού (μείωση ποσότητας και ταχύτητας) της επιφανειακής απορροής, συντελεί στην αύξηση τωνυπογείων υδροφορέων.

5.4. Πηγές και βιοποικιλότητα

Είναι αυτονόητη η επίδραση των πηγών στη βιοποικιλότητα και το μικροκλίμα. Όπου υπάρχει νερό, η ζωή ευημερεί. Οι τακτικές βροχοπτώσεις είναι εξαιρετικά σημαντικές, αφού το νερό και το δάσος πάνε σχεδόν πάντα μαζί. Ρυάκια, λιμνούλες, το σύνολο του δασικού οικοσυστήματος προσφέρει στους κατοίκους του όσο το δυνατόν πιο σταθερές θερμοκρασίες. Τα γαστερόποδα του γλυκού νερού δεν αντέχουν τις μεγάλες θερμοκρασιακές αλλαγές, συχνά μικρότερα από δύο εκατοστά, αγαπούν το γλυκό νερό. (max 8°C) και η εξήγηση βρίσκεται στο παρελθόν τους. Οι πρόγονοί τους ζούσαν στα νερά των παγετώνων που έλιωναν και που κατά την τελευταία εποχή των παγετώνων, υπήρχαν σε μεγάλα τμήματα της Ευρώπης. Ανάλογες συνθήκες προσφέρουν και οι καθαρές πηγές του δάσους. Στα σημεία αυτά το νερό κυλάει με επίσης σταθερή χαμηλή θερμοκρασία αφού οι πηγές είναι εκροές υπόγειου νερού, το νερό βρίσκεται σε βαθιά στρώματα εδάφους, απομονωμένο από εξωτερικές θερμοκρασίες και άρα εξίσου κρύο χειμώνα καλοκαίρι. Για τα γαστερόποδα αυτά, σήμερα που δεν υπάρχουν πιά παγετώνες, είναι το ιδεώδες υποκατάστατο του βιοτόπου τους (Wohlleben., 2018). Το νερό όμως πρέπει να αναβλύζει όλο το χρόνο και εδώ αναδεικνύεται ο ρόλος του δάσους, το δασικό έδαφος λειτουργεί σα μια μεγάλη αποθήκη και συγκεντρώνει όλα τα νερά των βροχοπτώσεων. Τα δέντρα προστατεύουν το έδαφος από τη ραγδαιότητα της βροχής με τα κλαδιά-φύλλα τους να μειώνουν την κρουστική δύναμη του νερού. Το αφράτο έδαφος απορροφά το νερό ώστε να μη σχηματίζει ρυάκια και να απορρέει αλλά να συγκρατείται στην εδαφική μάζα. Όταν το έδαφος κορεστεί, όταν η δεξαμενή για τα δέντρα γεμίσει, η πλεονάζουσα υγρασία μεταφέρεται αργά και για πολλά χρόνια σε όλο και πιο βαθιά στρώματα. Αυτό μπορεί να διαρκέσει δεκαετίες μέχρι η υγρασία να βγει πάλι στην επιφάνεια με τη μορφή πηγής που αναβλύζει σταθερά. Συχνά μοιάζει με βαλτώδες, λασπώδες σημείο του δασικού εδάφους. Με προσεκτικότερη παρατήρηση διακρίνονται μικροσκοπικά ρυάκια που σηματοδοτούν την έναρξη της πηγής και ξεχωρίζουν από επιφανειακά νερά εάν η θερμοκρασία τους είναι κάτω από 9°C, τότε πρόκειται πραγματικά για πηγή. Το χειμώνα, ενώ οι μικρές υδάτινες συλλογές παγώνουν, στις πηγές εξακολουθεί να κυλάει νερό. Τα γαστερόποδα ζουν έτσι σε σταθερή θερμοκρασία χάρις το ρόλο του δασικού εδάφους αλλά και της κομοστέγης που εμποδίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας να φτάσει στο έδαφος. Στα ρυάκια το δάσος προσφέρει παρόμοια υπηρεσία πολύ σημαντική, διότι το νερό τους σε αντίθεση με εκείνο των πηγών που εφοδιάζεται σταθερά, είναι εκτεθειμένο σε μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Πολλοί οργανισμοί χρειάζονται δροσερό νερό για να διατηρείται το οξυγόνο. Όταν παγώνουν τα πάντα, μπορεί να πεθάνουν και οργανισμοί όπως οι σαλαμάνδρες. Στα φυλλοβόλα πλατύφυλλα, τα γυμνά κλαδιά του χειμώνα αφήνουν πολλή θερμότητα να περνάει στο έδαφος. Επίσης, η κίνησή του νερού, το εμποδίζει να παγώσει. Την άνοιξη αντίθετα με την άνοδο της θερμοκρασίας, η νέα κόμη προστατεύει τους οργανισμούς από υπερθέρμανση. Το φθινόπωρο που οι θερμοκρασίες πέφτουν πάλι, ο ουρανός ανοίγει ξανά πάνω από το ρυάκι αφού τα φύλλα έχουν πέσει. Για τα ρυάκια που βρίσκονται κάτω από κωνοφόρα,

τα πράγματα είναι διαφορετικά, το νερό παγώνει συχνά και επειδή την άνοιξη δε ζεσταίνεται παρά μόνο σταδιακά, αποκλείεται σα βιότοπος για πολλούς οργανισμούς.

Η σημασία των δέντρων για τα ρυάκια δε μειώνεται ούτε μετά θάνατον. Για παράδειγμα, αν μια νεκρή οξιά πέσει στην κοίτη του ρυακιού, θα μείνει εκεί για δεκαετίες λειτουργώντας σα μικρό φράγμα, δημιουργώντας λίμνες με αργή ροή του νερού όπου μπορούν να αναπτυχθούν πολλά είδη που δεν αντέχουν τα ισχυρά ρεύματα. Στις λιμνούλες αυτές συσσωρεύεται λάσπη και αιωρούμενα σωματίδια και λόγω της μειωμένης ροής, τα βακτήρια που διασπούν τις βλαβερές ουσίες, έχουν περισσότερο χρόνο δράσης. Άρα δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας όταν μετά από δυνατές βροχοπτώσεις δημιουργείται αφρός. Το φαινομενικό περιβαλλοντικό έγκλημα είναι χουμικά οξέα που συγκρούονται με τον αέρα όταν σχηματίζονται μικροί καταρράκτες, αυτά τα οξέα δημιουργούνται κατά την αποσύνθεση των φύλλων και του νεκρού ξύλου και είναι εξαιρετικά χρήσιμα για το οικοσύστημα (Wohlleben., 2018).

5.5. Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων

Οι διαχειριστικές πρακτικές της Δασοπονίας και της Αγροδασοπονίας στην κατεύθυνση της αειφορικής κυκλικής οικονομίας τοπικής κλίμακας, στηρίζονται και στο νερό. Ο τύπος της βλάστησης επηρεάζει με την υδατοσυγκράτησή του το ποσό του νερού που φτάνει στο έδαφος και είναι σημαντικός ο προσδιορισμός αυτής της υδατικής ποσότητας καθώς και της δημιουργίας μικροταμιευτήρων προς όφελος της βιοποικιλότητας (Γκανάτσιος, 2024).

Η μείωση της ταχύτητας του απορρέοντος νερού, δεν περιορίζει μόνο τη διάβρωση αλλά αυξάνει και την ποσότητα του διηθούμενου νερού. Η ενίσχυση της διήθησης του νερού είναι από τους καλύτερους τρόπους αειφορικής διαχείρισής του. Η συνεχής άντληση νερού (ανάληψη) χωρίς πρόνοια δημιουργίας πλεονασματικού υδατικού ισοζυγίου και για διήθηση (κατάθεση) μπορεί να παρομοιαστεί με την τύχη ενός τραπεζικού λογαριασμού όπου γίνονται μόνο αναλήψεις. Ένα παράδειγμα δημιουργίας μικροδεξαμενών πολλαπλών σκοπών σε οικοσύστημα δρυός δίνεται από το συγγραφέα (Γκανάτσιος 2004, Ganatsios et al 2019). Αρχικός του σκοπός ήταν η συλλογή και μέτρηση της απορροής. Το 2001 κατασκευάστηκαν 4 ορυγμάτα των 15 m^2 & βάθους 1m, διήρκησε 2 ώρες και κόστισε 100 ευρώ (50 ευρώ την ώρα) με τη χρήση μικρού ερπυστριοφόρος εκσκαφέας ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συμπίεση του εδάφους. Τα ορύγματα επενδύθηκαν με οικονομικό και ανθεκτικό υλικό pvc, που είναι σε καλή κατάσταση σήμερα (2024) και διατηρεί το συλλεγόμενο νερό. Εκτός από το παράδειγμα κεκλιμένων επιφανειών χωρίς εμφανείς ρεματιές όπου μπορούν να δημιουργηθούν επενδεδυμένα ορύγματα κατά μήκος των χωροσταθμικών στα πρότυπα των πεζούλων, όταν η διαθέσιμη επιφάνεια έχει ρεματιές, μπορούν αυτές κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μικροταμιευτήρων. Συγκεκριμένα, σε κατάλληλες θέσεις των ρεμάτων που υπάρχει φυσική υποσκαφή, αυτή μπορεί να ενισχυθεί στα κατάντη και να δημιουργηθουν μικροφράγματα με φυσικά υλικά (ξύλα, πέτρες) που θα επιστρωθούν με αδιαπέρατο υλικό ώστε να δημιουργηθούν μικρές υδατοσυλλογές.

Εικόνες 6: Δημιουργία μικρών λιμνοδεξαμενών στο Χολομώντα Χαλκιδικής

Σχήμα 9: Παράδειγμα κατασκευής μικρών υδατοσυλλογών. **Εικόνα 7:** Αμμότοπος Άρτας

Η αποθήκευση μικρού ποσοστού των ετήσιων κατακρημνισμάτων σε μικρές υδατοσυλλογές (Ganatsios, et. al, 2019) στα πρότυπα κατασκευής αναβαθμίδων αλλά και μικροφραγμάτων στις ρεματιές, μπορεί να προσφέρει σημαντικά οικοσυστημικά οφέλη. Στο Χολομώντα, οι τεχνητές υδατοσυλλογές, εκτός από τα απευθείας κατακρημνίσματα, μάζεψαν και απορρέον ύδωρ και κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους παρείχαν τα οφέλη ενός υγροτόπου. Προτείνεται λοιπόν η κατασκευή βαθμίδων με σκάψιμο βάθους 1m και ανοιχτής επιφάνειας πλάτους 0,5-1m σε γραμμές διαφόρων μηκών κατά τις χωροσταθμικές (Σχήμα 9). Αν η επιφάνεια είναι επίπεδη, τα ορύγματα μπορούν να κατασκευαστούν οπουδήποτε και να αποθηκεύσουν μέρος του πλεονάσματος της χειμερινής βροχόπτωσης, έχοντας υπ' όψιν ότι μόλις 1mm βροχής αντιστοιχεί σε 1tn νερού/στρέμμα. Επομένως, δύο ορύγματα αθροιστικής επίπεδης επιφάνειας 100m^2/0,1ha, μπορούν με κατάλληλη επένδυση να αποθηκεύσουν 100 lt κατακρημνισμάτων ύψους μόλις 1mm. Είναι λοιπόν απλό και εφικτό να αποθηκευτούν κάποιοι τόνοι νερού ως ποσοστό του ετήσιου υδατικού πλεονάσματος και να προσφέρουν οικοσυστημικές υπηρεσίες την ξηροθερμική περίοδο.

5.6. Δάσος και αντοχή στην ξηρασία

Η εδαφική κατάσταση περιλαμβανομένων των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων, η ευρωστία των μυκοριζικών δικτύων και η ωριμότητα των δασών καθορίζουν την αντοχή των δασών στην ξηρασία. Η αντοχή των δασών στις κλιματικές αλλαγές είναι στην κορυφή των προτεραιοτήτων συζήτησης διεθνών οργανισμών και φορέων. Η προσαρμοστική ικανότητα των δασών στη ξηρασία και τις συνεχείες κλιματικές αλλαγές είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ύπαρξη και την ευρωστία της μυκόριζας. Ο βαθμός αυτοοργάνωσης ενός οικοσυστήματος και κυρίως του εδάφους συνδέεται με την ανταπόκρισή του σε μια καταστροφή όπως ανεμοριψία, πυρκαγιά, κ.λ.π., ο κανόνας είναι ότι όσο περισσότερο οργανωμένο, τόσο πιο ανθεκτικό είναι (Zanella et al., 2020). Σε πειραματική επιφάνεια στο Χολομώντα Χαλκιδικής (Εικόνα 8), ο συγγραφέας (Ganatsios et al., 2024) ερεύνησε τις εδαφικές και αυξητικές αλλαγές δρυοδάσους 70-72ετών κατά τη διάρκεια 37 ετών. Τα δέντρα ψήλωσαν κατά 5,1m και η στηθαία διάμετρός τους αυξήθηκε κατά 5,4cm. Ο δασικός τάπητας αύξησε κατά 18,3tn/ha το βάρος του, η οξύτητα του εδάφους μειώθηκε και αυξήθηκε η γονιμότητά του. Ερευνήθηκε η σημασία της συμβίωσης, των οικοσυστημικών αλληλεπιδράσεων και αλληλοσυνδέσεων, η αντοχή των δέντρων στην ξηρασία και ο ρόλος της μυκόριζας και των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους.

Εικόνες 8: Άποψη της περιοχής έρευνας (Χολομώντας)

Γενικά, τα ελληνικά δρυοδάση διαχειρίζονται αειφορικά από τη Δασική Υπηρεσία (δυστυχώς με κάποιες εξαιρέσεις). Αυτό σημαίνει ότι απαγορεύονται οι αποψιλώσεις και κατά κανόνα οι επιλογικές υλοτομίες δεν αφαιρούν περισσότερο από το 10-15% της κυκλικής επιφάνειας των συστάδων. Έτσι, το έδαφος προστατεύεται και οι μικροοργανισμοί και η μυκόριζα αναπτύσσονται φυσιολογικά ανταποδίδοντας σε εδαφική γονιμότητα και ενισχύοντας την αντοχή των δέντρων με τα οποία συμβιώνουν. Τα αειφορικώς διαχειριζόμενα δρυοδάση έχουν την ευκαιρία να ωριμάσουν (οι δρύες ηλικίας 70 ετών διανύουν ακόμα τη νεότητα τους δεδομένου ότι ζουν αρκετούς αιώνες) και να προσφέρουν πολλές οικοσυστημικές υπηρεσίες. Οι Stephenson et al., (2014), βρήκαν ότι ακόμα και με

αυξητικούς όρους, τα ώριμα δάση παρουσιάζουν αξιοσημείωτους ρυθμούς αύξησης όγκου και υπερέχουν σημαντικά των νεότερων δασών. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ωριμότητας των δέντρων είναι η ικανότητα να συμβιώνει. Τα δέντρα είναι δυνατοί οικοσυστημικοί μηχανικοί που επηρεάζουν ευνοϊκά τις εδαφικές ιδιότητες και οργανισμούς ενισχύοντας έτσι τη δική τους ευρωστία (Aponte et al., 2011, 2013). Η συμβίωση φυτών-μυκήτων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους με τη μορφή μυκόριζας, είναι από τις πιο κοινές συμβιώσεις στον πλανήτη Γη. Τα δίκτυα αυτά καθιστούν εφικτή την επιβίωση των μικρών φυταρίων, την ανάπτυξη και την ισχυροποίηση των αμυντικών τους μηχανισμών. Μέσω αυτών των δικτύων μεταφέρονται χημικές πληροφορίες, CO2, θρεπτικά στοιχεία και βεβαίως νερό. Έτσι, η μέγιστη διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα του εδάφους θα πρέπει να συμπεριλάβει εκτός από τη δομή και το βάθος του, το βαθμό ανάπτυξης δικτύων μυκόριζας.

Χωρίς τη δροσερή σκιά των δέντρων, το έδαφος θερμαίνεται με αποτέλεσμα τα πολύτιμα βακτήρια και μύκητες να αναγκάζονται να δραστηριοποιηθούν βαθύτερα, όπου όμως η οργανική ουσία και το πορώδες μειώνονται (Wohlleben, 2018). Το καλύτερο μέσο για την διατήρηση της γονιμότητας και την προστασία του εδάφους και των σημαντικών μικροοργανισμών του από την υπερθέρμανση και τη διάβρωση είναι το δάσος. Γι' αυτό και τα δασικά ή τα αγροδασικά οικοσυστήματα πλεονεκτούν συγκριτικά με τα αγροτικά. Η υδατοσυγκράτηση μειώνει την παρασυρτική δύναμη του νερού (Chang, 2006). Με το πέρας της βροχής, η υγρασία που συγκρατήθηκε από τη βλάστηση, εξατμίζεται αυξάνοντας την υγρασία του αέρα και δημιουργώντας ευνοϊκό μικροκλίμα, ή φτάνει αργά στο έδαφος και του δίνει τη δυνατότητα να την απορροφήσει ολόκληρη. Χωρίς τα δέντρα, η κατάσταση επειδεινώνεται σημαντικά. Ενώ τα λιβάδια μπορούν να μειώσουν την επίδραση των ισχυρών βροχοπτώσεων, οι οργωμένοι αγροί είναι ανυπεράσπιστοι απέναντι στη δύναμη του νερού και ευδιάβρωτοι. Οι εποχικές καλλιέργειες αφήνουν το έδαφος για πολλούς μήνες το χρόνο ακάλυπτο και απροστάτευτο στην υπερθέρμανση. Ειδικά σε κεκλιμένα εδάφη και ραγδαίες βροχοπτώσεις, η επιφανειακή απορροή που παρασύρει το έδαφος συνδέεται με τη μειωμένη διήθηση.

Την περίοδο (1981-2001) που το δρυοδάσος στο Πανεπιστημιακό Δάσος Ταξιάρχη –Βραστάμων ήταν μικρότερης ηλικίας, τα θρεπτικά στοιχεία του εδάφους λιγότερα και η πυκνότητα των δέντρων μεγαλη, οι ξερές κορυφές των δέντρων τη θερινή ξηρή περίοδο δεν ήταν σπάνιο φαινόμενο (Ganatsios et.al., 2024). Από το 2001 και μετά, παρά τα ξηρά καλοκαίρια, τα δέντρα φαίνονται υγιέστερα και αυξάνονται καλύτερα και αυτό αποδίδεται στις καλύτερες συνθήκες ανάπτυξής τους μέσω της συνεχούς βελτίωσης της αυτοοργάνωσης του οικοσυστήματος, (Pickles & Simard 2017a). Η Simard (2009b) προτείνει μια προστατευτική προσέγγιση της διαχείρισης των δασών για την οικολογική ενδυνάμωση των ώριμων δέντρων και των μυκοριζικών δικτύων. Η διεπιστημονική έρευνα που εμπεριέχει τη δυναμική πολλαπλών, επικαλυπτόμενων δικτύων θα βοηθήσει στην ανάπτυξη διαχειριστικών πρακτικών που διατηρούν τα οικοσυστήματα στους καιρούς των κλιματικών αλλαγών. Οι μυκοριζικοί μήκυτες είναι γνωστό ότι

παρέχουν στα δέντρα με τα οποία συμβιώνουν, αυξημένη αντίσταση στην ξηρασία (Pickles & Simard 2017a).

Η ικανότητα των μυκήτων να δημιουργούν μυκοριζικά δίκτυα στα οποία ένα μυκήλιο συνδέεται με τις ρίζες διαφόρων δέντρων, παρέχει το μηχανισμό αναδιανομής του νερού εντός του εδάφους. Επίσης, οι εδαφικές ιδιότητες περιλαμβανομένης της εδαφικής γονιμότητας (που με τη σειρά της καθορίζει την ευζωϊα της μυκόριζας) παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αντοχή των δέντρων στην ξηρασία. Σε έρευνα των εδαφικών ιδιοτήτων, της διαπερώσας βροχής και κορμοαπορροής σε δρυοδάσος βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στη μορφή των δέντρων (μέγεθος κόμης και γωνία έκφυσης κλάδων) όταν το έδαφος έχει μικρότερες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων (Corti et al., 2019).

Οι Gessler et al., 2016 ερευνώντας τι **ρόλο της θρέψης στην επιβίωση και ανάκαμψη των δασών** κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την ξηρασία, βρήκαν ότι η υψηλή διαθεσιμότητα σε θρεπτικά στοιχεία παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιβίωση από την ξηρασία. Χαμηλή πρόσληψη σε θρεπτικά στοιχεία ευνοεί την έλλειψη άνθρακα (επομένως το θάνατο) σε συνθήκες παρατεταμένου υδατικού στρες.

Η ωρίμανση επίσης των δέντρων εμπεριέχει μια σημαντική αλλαγή στο έδαφος που πρέπει να διαφυλαχθεί. **Όσο περισσότερο αναπτύσσονται τα δάση σε βιομάζα και ποικιλομορφία, τόσο πιο ανθεκτικά γίνονται.** Οι Ganatsios et. al. 2024 συζητούν εκτενών τη σημασία της συμβίωσης και της αντοχής των δέντρων σε στρεσογόνους παράγοντες όπως η ξηρασία για την οποία η θρέψη παίζει καθοριστικό ρόλο.

5.7. Δάσος και διάβρωση

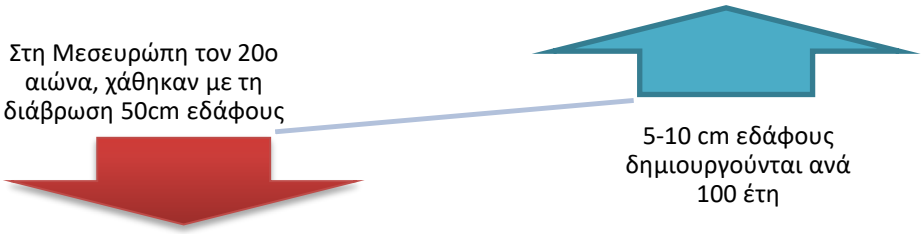
Η διάβρωση έχει δύο όψεις. Μια όψη της διάβρωσης είναι ότι αυτό το μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα αποτέλεσε την αιτία δημιουργίας μεγάλων πολιτισμών. Η λάσπη είναι συνδυασμός νερού και σκόνης, και η σκόνη είναι αποσαθρωμένο πέτρωμα. Μικρά τεμάχια που αποκολλήθηκαν από ένα βουνό και μεταφέρθηκαν με τον άνεμο ή το νερό σε πεδινά μέρη. Η γονιμότητά τους προέρχεται από τα θρεπτικά στοιχεία που κατέβηκαν από τα βουνά. Μεγάλοι πολιτισμοί όπως ο Αιγυπτιακός, η Μεσοποταμία (Τίγρης-Ευφράτης ποταμός), εκείνος του Ινδού ποταμού, οφείλουν την ύπαρξή τους στη διάβρωση του εδάφους και την αποσάθρωση των πετρωμάτων των ορεινών περιοχών και τη μεταφορά τους στις πεδιάδες. Το διαβρωτικό έργο των ρεόντων υδάτων είναι τεράστιο. Ο Μισισιπής μεταφέρει κάθε χρόνο $220*10^6$ κυβικά μέτρα φερτών υλών (220 εκατομμύρια), ο Κίτρινος ποταμός $500*10^6$, ο Δούναβης $36*10^6$. Οι αρχαίοι πολιτισμοί άνθισαν διότι εξασφάλιζαν επάρκεια τροφής που με τη σειρά του έδωσε τη δυνατότητα αφιέρωσης χρόνου σε πολιτισμικές δραστηριότητες. Επίσης, χάρις τη μεταφορά φερτών υλικών, τα δέλτα των ποταμών και τα παράκτια οικοσυστήματα ευημερούν. Στην Ιαπωνία είναι βιωματική

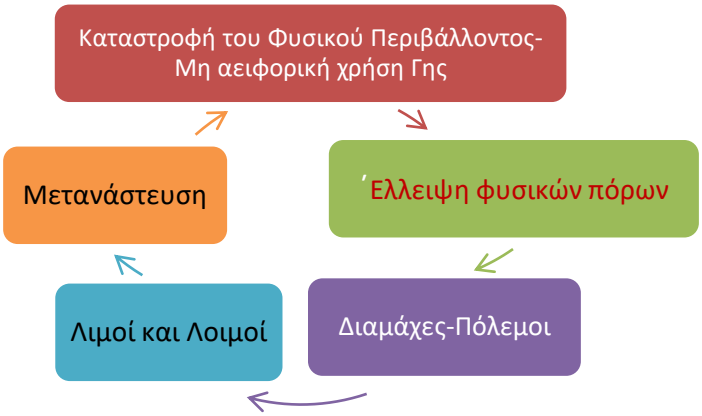
εμπειρία η σχέση αλληλεξάρτησης και ευημερίας των παραθαλάσσιων οικοσυστημάτων με τα παράκτια δάση. Ωστόσο, χρειάζεται όπως σε όλα, να υπάρχει μια ισορροπία και επι του παρόντος, μια ισορροπία μεταξύ ρυθμού διάβρωσης και εδαφογένεσης.

Όσο ο ρυθμός διάβρωσης είναι χαμηλότερος από το ρυθμό εδαφογένεσης, το βάθος του εδάφους θα αυξάνεται (Κεφ. Υδάτινοι Πόροι, σημασία υδατοχωρητικότητας εδάφους). Πηγή δημιουργίας νέου εδάφους είναι το μητρικό πέτρωμα το οποίο αποσαθρώνεται συνεχώς. Ταυτόχρονα, η βλάστηση αυξάνει και διατηρεί υψηλά επίπεδα οργανικής ουσίας που με τη βοήθεια του καθοδικά διηθούμενου νερού, εμπλουτίζει το ενόργανο έδαφος εξασφαλίζοντας τον πλούτο του. Για τις συνθήκες της Μεσευρώπης, κάθε χρόνο, κατά μέσο όρο 300-1000 τόνοι πετρώματος ανά Km^2, μεταμορφώνονται σε έδαφος. Αυτό σημαίνει ότι το βάθος του εδάφους αυξάνεται από 0,3-1mm/έτος, δηλαδή τουλάχιστον 5cm/100 έτη, χωρίς να υπολογίζεται η αύξηση που οφείλεται στην οργανική ουσία και έτσι, υπολογίζεται ότι θα χρειαστούνε 10.000 χρόνια για ένα γυμνό λόφο χωρίς έδαφος ώστε να επιστρέψει στην πρότερη, δασωμένη κατάστασή του (Wohlleben, 2018). Αυτή περίπου είναι η διάρκεια από το πέρας της τελευταίας παγετωνικής περιόδου έως σήμερα. Ωστόσο, γνωρίζουμε ότι τα δάση επέστρεψαν πολύ γρηγορότερα διότι οι ρυθμοί της Φύσης δεν ακολουθούν πάντα γραμμικό μοτίβο. Η υποχώρηση των παγετώνων αύξησε με γεωμετρικούς ρυθμούς την ταχύτητα και ποσότητα της αποσάθρωσης συμβάλλοντας έτσι στην ταχύτατη εδαφογένεση.

Η άλλη όψη της διάβρωσης σχετίζεται με τη μη αναστρέψιμη (για τους ανθρώπινους χρόνους) απώλεια πολύτιμου εδάφους. Μια γυμνή βραχώδης βουνοπλαγιά θα χρειαστεί χιλιάδες έτη για να γίνει πλούσιο έδαφος στο οποίο φύεται μεγάλο δάσος. Το δάσος είναι η πρώτη γραμμή άμυνας ενός φυσικού οικοσυστήματος για την αποτροπή της διάβρωσης και της μείωσης της γονιμότητάς του εδάφους. Η υδατοσυγκράτηση μειώνει την παρασυρτική δύναμη του νερού, ενώ χωρίς τα δέντρα η κατάσταση επειδεινώνεται σημαντικά. Παρόλο που τα λιβάδια μπορούν να μειώσουν την επίδραση των ισχυρών βροχοπτώσεων, οι οργωμένοι αγροί είναι ανυπεράσπιστοι απέναντι στη δύναμη του νερού. Αυτό καταστρέφει τη δομή του εδάφους και το κάνει ευάλωτο στη διάβρωση. Οι εποχιακές καλλιέργειες αφήνουν για πολλούς μήνες το χρόνο ακάλυπτο το έδαφος και απροστάτευτο στη δύναμη της διάβρωσης και της υπερθέρμανσης. Ειδικά σε κεκλιμένα εδάφη και ραγδαίες βροχοπτώσεις, η επιφανειακή απορροή που παρασύρει το έδαφος (διάβρωση) συνδέεται με τη μειωμένη διήθηση. Ένα βαρύ σύννεφο καταιγίδας βρέχει 30.000 m^3/km^2 νερού σε λίγα μόνο λεπτά. Εάν το νερό δεν κατευθυνθεί με κατάλληλο τρόπο προς τους ανοιχτούς εδαφικούς πόρους, δημιουργούνται γρήγορα μικροχείμαρροι και περισσότερο έδαφος απομακρύνεται οριστικά. Κλίση 2% είναι αρκετή να οδηγήσει σε μη αναστρέψιμη απώλεια εδάφους. Οι αρχαιολογικές ανακαλύψεις προϋποθέτουν εκσκαφή, θα ήταν λοιπόν λογικό τα αρχαιολογικά ευρήματα να ήταν καλυμμένα μόνο από βλάστηση, όμως, η διάβρωση λοιπόν είναι η αιτία που τα ευρήματα αυτά είναι θαμμένα βαθιά στη γη (Wohlleben, 2018).

Ένα χιλιοστό (1mm) διαβρωμένου εδάφους ισοδυναμεί με εδαφική απώλεια 1000 tn/Km^2. Οι αγροί της κεντρικής Ευρώπης χάνουν κατά μέσο όρο 200 tn/km^2/χρόνο, δηλαδή 50 cm/100 έτη. Χωρίς το έδαφος (κυρίως την επιφανειακή οργανική ουσία), η γονιμότητα της γης μειώνεται δραστικά με αποτέλεσμα το λιμό (πείνα) τους λοιμούς (μολυσματικές επιδημίες) και τελικά τη μετανάστευση που είναι αποτέλεσμα της διάβρωσης και υποβάθμισης του εδάφους λόγω της καταστροφής των δασών. Η κατάρρευση των μεγάλων πολιτισμών συνδέεται με τη μη αειφορική χρήση της Γης (καταστροφή εδάφους και δασών). Τη δεκαετία του 1930 στις ΗΠΑ, λόγω της αλλαγής χρήσης (τα φυσικά λιβάδια έγιναν εποχιακές μονοκαλλιέργειες) τεράστιων εκτάσεων στις Μεγάλες Πεδιάδες των ΗΠΑ, η αιολική διάβρωση έθαψε κυριολεκτικά το Σικάγο κάτω από έδαφος τουλάχιστον 20 cm. Στη Μεσευρώπη, η τάση για γρήγορο κέρδος μετάτρεψε τα φυλλοβόλα δάση της σε μονοκαλλιέργειες κωνοφόρων με τραγικές συνέπειες.





Σχήμα 10 α,β. και Εικόνες 9: Αποτελέσματα μη αειφορικής χρήσης της Γης.

6. ΔΑΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΗ

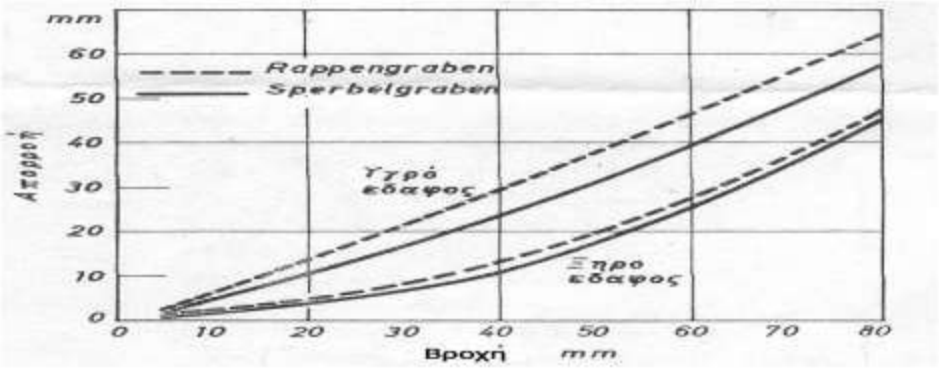
6.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή

Μία από τις βασικές φάσεις του υδρολογικού κύκλου είναι η απορροή. Το μέρος του πίπτοντος όμβριου ύδατος που δεν συγκρατείται από την κομοστέγη της δασικής βλάστησης και δεν διηθείται εντός του εδάφους, κινείται επιφανειακά κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, σχηματίζοντας το φαινόμενο της απορροής. Οι βασικοί παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η απορροή είναι: α) **Τα κατακρημνίσματα**, β) το **δασικό έδαφος** και γ) η **δασική βλάστηση** του δάσους. Στη συνέχεια εξετάζονται πιό αναλυτικά οι τρεις αυτοί βασικοί παράγοντες.

Το **δασικό έδαφος** ανάλογα με τα δομικά του χαρακτηριστικά (κοκκομετρική διαβάθμιση, περιεχόμενη οργανική μάζα, πάχος εδάφους, ανάγλυφο, κλίσεις κλπ), επηρεάζει καταλυτικά την μορφή και την ποσότητα της απορροής. Σχετικά με την κοκκομετρική σύνθεση των δασικών εδαφών επισημαίνεται η καταλυτική της επίπτωση στην απορροή. Για παράδειγμα, αν θεωρηθεί στο 100% η απορροή ενός πηλώδους δασικού εδάφους τότε η απορροή δασικού αμμοπηλώδους εδάφους, υπό τις αυτές λοιπές συνθήκες, λαμβάνει τιμές μεταξύ 25-30% (μείωση 3÷4 φορές). Σε αμμώδες δασικό έδαφος, η τιμή της απορροής κυμαίνεται μόλις περί το 10-15%, μειώνεται δηλαδή κατά 6,7÷10 φορές (Molchanov, 1960). Η κλίση του εδάφους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, καθόσον με αύξηση της κλίσης αυξάνει και η ταχύτητα του απορρέοντος νερού με αποτέλεσμα τη μείωση της εντός του εδάφους διηθουμένης ποσότητας νερού. Ο Burger (1954) εφαρμόζοντας συστήματα τεχνητής βροχής, στους χειμάρρους Sperbelgraben και Rappengraben διαπίστωσε ότι σε εδάφη με κλίση 75-85% η απορροή στις δασωμένες επιφάνειες γινόταν διαμέσου του εδάφους (ενδορροή), ενώ στο παρακείμενο γυμνό έδαφος, ήδη με κλίση επιφάνειας 50%, το νερό έρεε επιφανειακά προκαλώντας συχνά διαβρώσεις. Η εντός του δάσους επιφανειακά απορρέουσα ποσότητα νερού είναι, πολύ μικρή σε δασωμένες λεκάνες με κλίσεις ≤22°, με την προϋπόθεση τη διατήρηση της εκεί απαντωμένης δασικής φυλλάδας (Molchanov, 1960). Αντίθετα ενδεχόμενη διαταραχή της δασικής φυλλάδας, από βόσκοντα ζώα ή άλλες αιτίες, προκαλεί αύξηση της επιφανειακής απορροής αλλά και διαβρώσεις. Κατά τον Kirwald (1971)* η επίδραση του δάσους στην απορροή κεκλιμένων εδαφών ισοδυναμεί με μείωση της κλίσης τους τουλάχιστον κατά 50%. Παράλληλα κάθε μορφή πληγώσεων του εδάφους, προερχόμενη από ρίψεις - μετατοπίσεις δένδρων και κορμών ή άλλων εργασιών συγκομιδής του ξύλου, λόγω της αυξημένης συμπίεσης των εδαφών, στις θέσεις αυτές, προκαλεί αύξηση της υδαταπορροής. Επισημαίνεται ότι η υγρασία του εδάφους επηρεάζει σημαντικά την απορροή (Σχήμα 11). Ο Burger (1954)* αναφέρει ότι καταιγίδα ύψους 18mm, με υγρό καιρό, έδωσε εντός των 3 πρώτων ωρών ποσοστό απορροής μεταξύ 43-45%, ενώ καταιγίδα ύψους 58mm, με ξηρό καιρό, έδωσε μετά 12 ώρες απορροή ανερχόμενη μόλις στο 13% του συνολικού ύψους βροχής. Στο ανάγλυφο εντάσσεται και η έννοια της έκθεσης της επιφανείας του δασικού εδάφους η οποία επηρεάζει επίσης την απορροή. Έτσι οι βόρειες εκθέσεις εμφανίζουν -συγκριτικά με τις νότιες- αυξημένη υδαταπορροή οφειλόμενη στο υγρότερο και το ψυχρότερο κλίμα και κατ'επέκταση στη μικρότερη διαπνοή των εκεί

απαντωμένων φυτών. Επίσης κατ' αναλογία οι ανατολικές εκθέσεις εμφανίζουν μεγαλύτερη απορροή από ότι οι δυτικές. Τέλος σε ψυχρές περιοχές πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η κατά το χειμώνα ισχυρή και σε μεγάλο βάθος παγοποίηση των γυμνών εδαφών, συγκριτικά με τα καλυμμένα από την κομοστέγη του δάσους δασικά εδάφη. Αυτά τα εδάφη διατηρούνται λοιπόν επί μακρότερο χρόνο σε κατάσταση πήξης. Η παγοποίηση αυτή εμποδίζει την ταχύτητα διήθησης και επομένως αυξάνει την απορροή. Αντίθετα το δάσος, εξομαλύνοντας τις ακραίες κλιματικές συνθήκες, δεν επιτρέπει την σε βάθος και για μεγάλο χρόνο διατήρηση των παγοποιημένων δασικών εδαφών, με αποτέλεσμα τη συνέχιση της διηθητικής λειτουργίας του, με ευνοϊκές συνέπειες στην τροφοδοσία των υπογείων υδροφορέων και των πηγών και τη μείωση της απορροής.

Από άποψη **κατακρημνισμάτων,** το ύψος, η κατανομή, η ένταση και η διάρκεια βροχής, αλλά και το ύψος, η ένταση, το πάχος και τα χαρακτηριστικά του χιονιού και των χιονοστρωμάτων αποτελούν παράγοντες, που επηρεάζουν σημαντικά το ύψος και τη χρονική εξέλιξη της απορροής. Ως γενική αρχή διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνει το ύψος της βροχής και του χιονιού, τόσο μεγαλύτερο καθίσταται το ποσό του απορρέοντος νερού (Σχήμα 11).



Σχήμα 11: Συνολική απορροή σε αρχικά ξηρό και υγρό έδαφος στους ελβετικούς χειμάρρους Sperbelgraben (δασωμένος) και Rappengraben (δασωμένος κατά το 1/3), (Casparis, 1959)*

Κατά τον Kirwald (1971)* η γενική εξίσωση της σχέσης μεταξύ κατακρημνισμάτων και απορροής εντός δασωμένων λεκανών δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q=a+b\cdot P$$

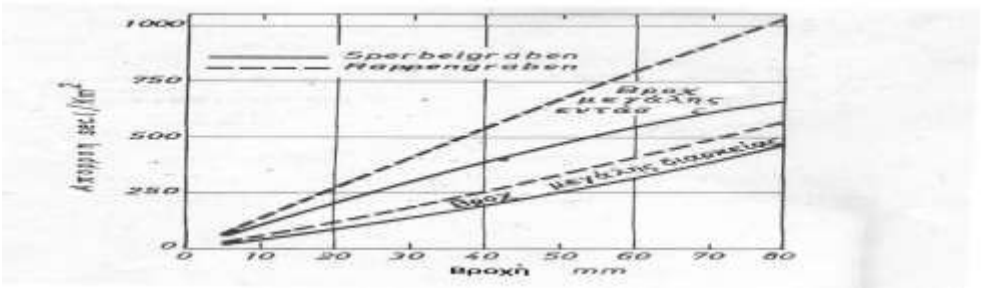
Όπου: Q=υδαταπορροή (mm), P = κατακρημνίσματα (mm) και a και b σταθερές προκύπτουσες από τα τοπικά δεδομένα των λεκανών απορροής υδατορευμάτων της περιοχής Schmalau (άνευ δάσους) και Krähe (δασωμένο) της Γερμανίας. Η παραπάνω σχέση στις περιοχές αυτές αποκτά την ακόλουθη μορφή:

Χείμαρρος Schmalau	Χείμαρρος Krähe	
	(γυμνό έδαφος)	(δασωμένο έδαφος)
Απορροή	Q = - 292+1,00P	Q = -215+0,77P
Συντελεστής συσχέτισης	r = 0,90	r = 0,79

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η επίδραση στην απορροή των δασωμένων επιφανειών καθίσταται λιγότερο στενή και ασφαλής από ότι στο γυμνό έδαφος. Παράλληλα κατά τον ίδιο συγγραφέα η ανωτέρω σχέση, ερευνηθείσα κατά τη διάρκεια 15 ετών σε δέκα μικρές και δύο μεγάλες λεκάνες απορροής διαφόρων υδατορευμάτων της περιοχής αυτής, έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 7. Απορροή και εδαφοκάλυψη Kirwald (1971)*

	Εξίσωση	Συντελεστής συσχέτισης
Δάσος	Q=α+0,76·P (0,52-0,87P)	r = 0,87
Γεωργικές καλλιέργειες	Q=α+1,04·P (1,00-1,09P)	r = 0,93
Ποταμοί (καλυπτόμενοι από δάσος κατά 0,5)	Q=α+0,96·P (0,91-1,02P)	r = 0,90



Σχήμα 12: Επίδραση της έντασης της βροχής στην πλημμυρική απορροή των ελβετικών χειμάρρων Sperbelgraben (δασωμένος) και Rappengraben (δασωμένος κατά το 1/3), (Casparis, 1959).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η αύξηση της απορροής με την αύξηση του ύψους των κατακρημνισμάτων επιτυγχάνεται ισχυρότερα και εντονότερα στις γυμνές επιφάνειες. Συχνά η προκαλούμενη αναλογία αύξησης καθίσταται για b=1,00 & εφ45°=1, ίση με 1:1. Στις περιπτώσεις όμως που η βροχή, διατηρεί την έντασή της και αυξανει τη διάρκειας της, τότε η επίδραση του δάσους επί της απορροής φθίνει. Στις περιπτώσεις αυτές η διαφορά απορροής μεταξύ δασωμένων και γυμνών λεκανών καθίσταται συνεχώς μικρότερη. Η διάρκεια όμως της βροχής συνήθως βρίσκεται σε ευθεία αντιστρόφως ανάλογη σε σχέση προς την ένταση της, με αποτέλεσμα όσο αυξάνει η διάρκεια της βροχής τόσο να ελαττώνεται η έντασή της. Για το λόγο αυτό η ένταση της βροχής, αποτελεί τελικά το βασικό παράγοντα, που διαμορφώνει τις σχέσεις του δάσους και της απορροής. Γενικά το δάσος, σε σχέση με το γυμνό έδαφος, κατά την πτώση ισχυρών καταιγίδων (ιδιαίτερα μικρής διάρκειας ισχυρών καταιγίδων), μειώνει την απορροή κατά πολύ περισσότερο από ότι στις ηπιότερες καταιγίδες των γενικών βροχών. Όπου κυριαρχούν οι πολύ ισχυρές μικρής διάρκειας βροχές αναγλύφου (π.χ. Ελλάδα), το γεγονός αυτό αποκτά εξαιρετική σημασία καθόσον το δάσος πρακτικά είναι δυνατόν να εξαφανίζει οποιασδήποτε ένταση βροχής με διάρκεια μικρότερη των 1,0÷2,0 ωρών. Ενώ αυξανομένης της έντασης της βροχής, η επίδραση

του δάσους επί της απορροής καθίσταται συνεχώς μικρότερη, αυξάνει πολύ η σχετική επίδραση του δάσους (ως η διαφορά απορροής μεταξύ γυμνού και δασωμένου εδάφους). Τέλος τα υγρά (πολύομβρα) και ξηρά έτη επηρεάζουν την απορροή δασικών και γυμνών εδαφών κατά διαφορετικό τρόπο. Ο Πίνακας 8 του Kirwald (1971) δείχνει ότι το δάσος, παρέχει κατά τα υγρά έτη πολύ λιγότερο νερό από ότι οι γυμνές επιφάνειες, ενώ κατά τα ξηρά έτη η διαφορά αυτή καθίσταται πολύ μικρή η και μηδενίζεται. *Αποδεικνύεται λοιπόν ότι το δάσος λειτουργεί ως ρυθμιστική δεξαμενή, της οποίας η χωρητικότητα καθορίζεται από το πάχος του δασικού εδάφους και τα δομικά του χαρακτηριστικά (δομή, σύνθεση, χούμου και φυλλάδας, κοκκομετρική διαβάθμιση, ενεργά κολλοειδή κλπ).*

Πίνακας 8: Σύγκριση της υδαταπορροής ξηρού και υγρού έτους με διαφορετικό ύψος βροχής σε λεκάνες απορροής (του ποταμού Rhur) διαφορετικής φυτοκάλυψης, (Kirwald, 1971).

Λεκάνη απορροής	**Υδαταπορροή ($m^3/sec.km^2$)**	
	Ξηρό έτος 1959	**Υγρό έτος 1961**
Δασωμένες μικρές λεκάνες απορροής	11,2	26,1
Περιοχές με γεωργικές καλλιέργειες	11,0	31,6
Λεκάνες απορροής ποταμών (δάσωσης 0,5)	13,8	33,4
Λεκάνη του Rhur ($4444km^2$)	10,9	27,5

Από άποψη **δασικής βλάστησης**, το δασοπονικό είδος, η δομή, η συγκρότηση, η ηλικία και η καλλιέργεια των συστάδων επηρεάζουν την **υδατοσυγκράτησή** τους και επομένως επηρεάζουν τις σχέσεις δάσους και απορροής (Κεφ 7, Η σημασία της υδατοσυγκράτησης και ο ρόλος της στον υδρολογικό κύκλο).

6.2. Ποσοστό δάσωσης και απορροή

Η εξαιρετικά μεγάλη σπουδαιότητα του φαινομένου της απορροής και των επιπτώσεων της οδήγησε στην αναζήτηση των σχέσεων που διέπουν την απορροή με τη δασική βλάστηση. Για το λόγο αυτό η σχέση αυτή αποτέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνών ήδη από τα τέλη του $19^{ου}$ αιώνα. Πέραν όμως από τη γενική επίδραση του δάσους επί του απορρέοντος νερού, η έρευνα στράφηκε και στη διατύπωση σχέσεων για την επίδραση του ποσοστού δάσωσης των δασών αλλά και την πορεία των αναδασώσεων στην απορροή και γενικότερα. Παράλληλα, επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν ή μπορούν να επηρεάσουν την απορροή. Τα αποτελέσματα των σχετικών ερευνών αφορούν και στοχεύουν στην επίλυση των δύο εξαιρετικά σημαντικών προβλημάτων που προκαλεί η μη ελεγχόμενη απορροή, των πλημμυρών και της λειψυδρίας (περιοδική έλλειψη απορροής).

Οι πρώτες συστηματικές έρευνες, για την κατανόηση της επίδρασης του δάσους στην ποσότητα και τον έλεγχο του απορρέοντος ύδατος, έγινε σε δύο χειμάρρους στην Ελβετία από τον Engler κατά τα έτη 1900 – 1915. Οι μετρήσεις συνεχίσθηκαν και μετά το 1915, μέχρι το 1957, κυρίως από τον Burger (1954)* Αργότερα ο Casparis (1959)* ανακεφαλαίωσε το σύνολο των αποτελεσμάτων αυτών. Έτσι, τα πειράματα

του Engler στην Ελβετία αποτέλεσαν όχι μόνον την αρχή της σύγχρονης Δασικής Υδρολογίας αλλά και λόγω της πολύ μεγάλης διάρκειάς τους (περίπου 60ετία), την πλέον μακρόχρονη και αξιόπιστη σειρά πειραμάτων. Τα συμπεράσματα της μακρόχρονης αυτής έρευνας είναι κεφαλαιώδους σημασίας και χρησιμοποιούνται ή αναφέρονται σε όλες σχεδόν τις υδρολογικές έρευνες, μελέτες και συγγράμματα. Μετά το 1957 η έρευνα αυτή απέκτησε μία διαφορετική οπτική και στράφηκε και στη διερεύνηση άλλων υδρολογικών παραμέτρων και μεγεθών (διήθηση, φερτά υλικά, χρονική υστέρηση υδρογραφημάτων κ.λ.π.). Από τους δύο ερευνώμενους χειμάρρους, ο χείμαρρος Sperbelgraben ήταν πλήρως καλυμμένος με κηπευτό δάσος ερυθρελάτης (ποσοστό δάσωσης 97%), ενώ ο χείμαρρος Rappengraben είχε πολύ μικρότερο ποσοστό δάσωσης ανερχόμενο σε 35,1% (Εικ. 10). Στο χείμαρρο Sperbelgraben, του οποίου η επιφάνεια ανέρχεται σε 55,8Ha, καταγράφηκε μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανερχόμενο σε 1589 mm. Στο χείμαρρο Rappengraben, του οποίου η επιφάνεια ήταν 59,2 Ha, το αντίστοιχο μέσο ετήσιο ύψος βροχής έφθανε τα 1536 mm. Βρέθηκε λοιπόν ότι η απορρέουσα ποσότητα νερού από τις δασωμένες περιοχές, ήταν σαφώς μικρότερη εκείνης των ολιγότερο δασωμένων και έτσι προκύπτει ότι το δάσος προκαλεί μείωση της συνολικής απορροής, όπως φαίνεται στα Σχήματα 13 και 14, καθώς και στον Πίνακα 9 του Burger (1954).

Πίνακας 9: Απορρέουσα ποσότητα νερού σε δασωμένη και γυμνή επιφάνεια αντίστοιχα κατά τον Burger (1954)*

Χείμαρρος	Ύψος βροχής (mm)	Απορροή (mm)	(%)
Sperbelgraben (δασωμένος κατά 97%)	1685	843	50
Rappengraben (δασωμένος κατά 35,1%)	1736	1081	62

Οι έρευνες αυτές έδειξαν ότι η επίδραση του δάσους επί της μέγιστης και της ελάχιστης απορροής συνίσταται, *αφενός μεν στη σημαντική μείωση (απάλυνση) των πλημμυρικών αιχμών* και αφετέρου στην αύξηση της ποσότητας των απορρεόντων χαμηλών υδάτων. Το δάσος λοιπόν ασκεί μια καταλυτική εξισωτική επίδραση στις ακραίες τιμές της απορροής. Παρά λληλα κατεδείχθηκε ότι στο δασικό έδαφος η απορροή λαμβάνει χώρα βραδέως και κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της, διαμέσου της φυλλάδας και του δασικού εδάφους (ενδορροή-υποδερμική απορροή), ενώ στο γυμνό έδαφος, η απορροής γίνεται κυρίως επιφανειακά. Κατά τον Burger (1954), στα καλυμμένα με δάσος έδαφη, μετά βροχή 50mm διάρκειας 50΄, δεν παρατηρήθηκε καμία εμφανής (μετρητέα) μεταβολή στο ύψος της απορροής, ενώ αντίθετα σε παρακείμενο γυμνό βοσκόμενο έδαφος, μετά από βροχή ύψους 10mm απόρρευσε επιφανειακά το 20 με 40% της βροχής. Στο φαινόμενο αυτό συντελεί, εκτός των άλλων, το πολύ μεγαλύτερο πορώδες και η πολύ

* Τα παρεχόμενα ύψη βροχής προέρχονται από διπλάσιο χρονικό διάστημα σε σχέση με εκείνο των μετρήσεων του Engler.

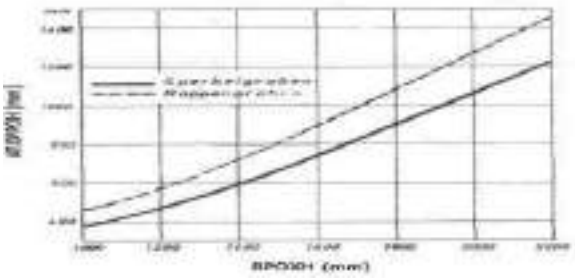
μεγαλύτερη υδροπερατότητα των δασικών εδαφών, γεγονός πάλι οφειλόμενο στην παρουσία και τις λειτουργίες του δάσους. Παράλληλα ο ελλοχεύον κίνδυνος διάβρωσης της δασικού εδάφους στη δασωμένη λεκάνη περιορίσθηκε στο ελάχιστο.

1

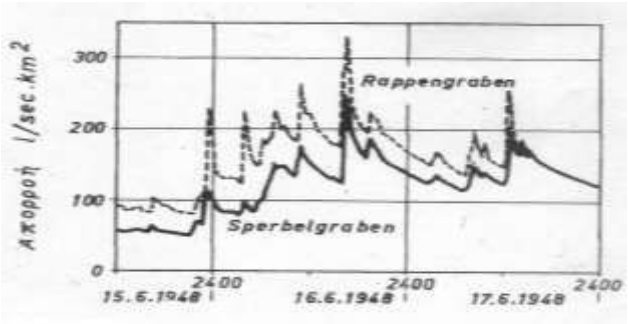
2

Εικόνα 10: 1.Γενική άποψη του δασωμένου ελβετικού χειμάρρου Sperbelgraben (Engler, 1919).

2. Γενική άποψη του δασωμένου κατά το 1/3 ελβετικού χειμάρρου Rappengraben (Engler, 1919).



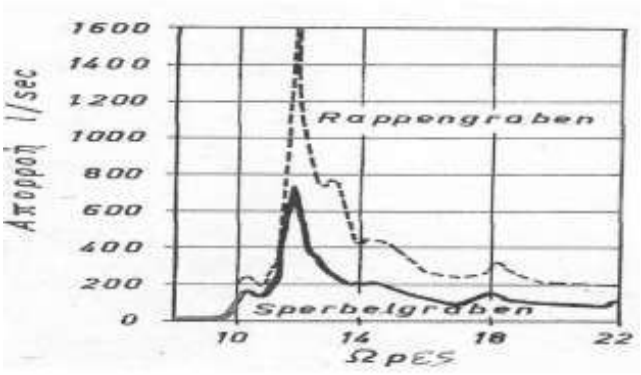
Σχ. 13: Μέσες τιμές απορροής για διάφορα ύψη βροχής στους χειμάρρους Sperbelgraben (δασωμένος) και Rappengraben (δασωμένος κατά το 1/3) στην Ελβετία (Casparis, 1959).



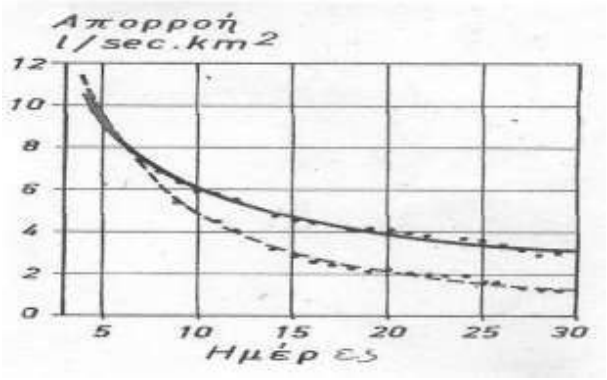
Σχ. 14: Υδαταπορροή των χειμάρρων Sperbelgraben (δασωμένος) και Rappengraben (δασωμένος κατά το 1/3) στην Ελβετία (Burger, 1954)

Τα συμπεράσματα των πρώτων ερευνών του Engler, κυρίως η λόγω της παρουσίας του δάσους μείωση της απορρέουσας ποσότητας νερού και ιδιαίτερα η ισχυρή απάλυνση των πλημμυρικών αιχμών καθώς και η βραδεία διαμέσου του εδάφους ροή (ενδορροή-υποδερμική απορροή) (Σχήμα 15, 16), επιβεβαιώθηκαν στην συνέχεια και από άλλους ερευνητές. Χαρακτηριστικά ο Burger (1954)*, αναφέρει τη μείωση των πλημμυρικών αιχμών κατά τη διάρκεια των υψηλότερων καταγραφέντων πλημμυρικών υδάτων στους ελβετικούς καταγραφικούς σταθμούς του Emmental. Μετά από καταιγίδα 37mm, απέρρευσαν μόνο 840 l/sec km^2 στο δασωμένο Sperbelgraben, ενώ στον σαφώς λιγότερο δασωμένο χείμαρρο Rappengraben η

απορροή ανήλθε στα 3150 l/sec km^2. Παρατηρήθηκε λοιπόν στο χείμαρρο Rappengraben τριπλάσια απορροή εκείνης του χειμάρρου Sperbelgraben.

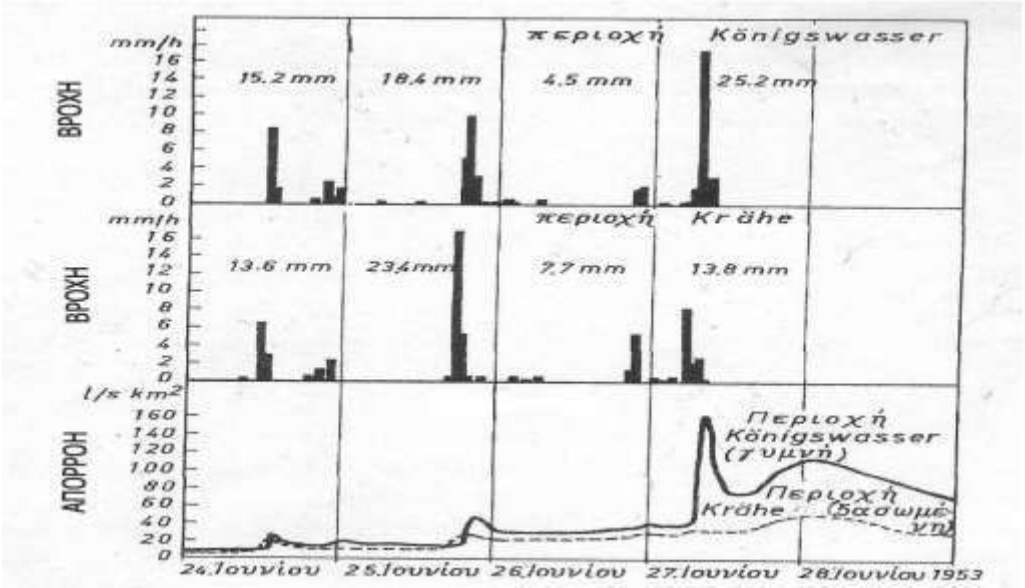


Σχ. 15: Υδαταπορροή στο δασωμένο χείμαρρο Sperbelgraben και στον κατά το 1/3 δασωμένο χείμαρρο (Rappengraben) κατά την περίοδο καταιγίδων στην Ελβετία (Engler, 1919)

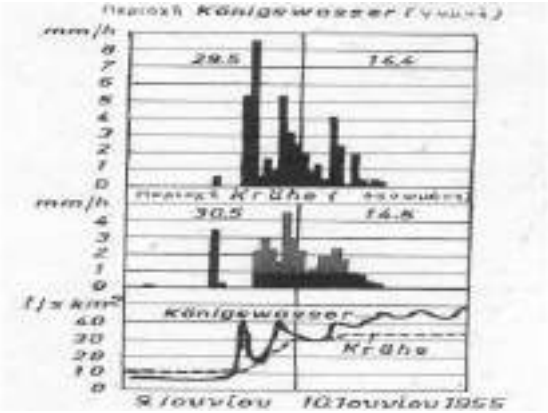


Σχ. 16: Καταγραφόμενη μείωση της υδαταπορροής στους χειμάρρους Sperbelgraben και Rappengraben μετά από ξηρασία διάρκειας 30 ημερών στην Ελβετία (Burger, 1954)

Ο Jonson (Sopper & Lull, 1965)* σε σχετικές έρευνες στην Αμερική, απέδειξε ότι με την υλοτομία δάσους πλατυφύλλων επήλθε αύξηση των χαμηλών υδάτων, ο δε Nakano (Sopper & Lull, 1965), σε ανάλογες έρευνες στην Ιαπωνία, κατέδειξε ότι η απομάκρυνση του δάσους αύξησε σημαντικά τα χαμηλά νερά κατά 74% έως 84%. Επίσης οι Banks και Kromhout (Sopper & Lull, 1965)*, έδειξαν ότι η αναδάσωση λεκάνης απορροής επέφερε μετά την πάροδο 10 ετών, μείωση της ελάχιστης θερινής παροχής κατά 26%. Γενικά, το δάσος προκαλεί μείωση των χαμηλών υδάτων, γεγονός ιδιαίτερης σημασίας για τις λείψυδρες ξηροθερμικές περιοχές.



Σχ. 17: Υδαταπορροή από την δασωμένη λεκάνη Krahe και τη γυμνή Konigswasser στη Γερμανία (Kirwald, 1971).



Σχ. 18: Διακυμάνσεις της ποσότητας του απορρέοντος ύδατος κατά τη διάρκεια καταιγίδων στις λεκάνες Krähe (δασωμένη) και Königswasser στη Γερμανία (Kirwald, 1971)*.

Παρόμοιες έρευνες με εκείνες του Engler έκαναν οι Bates και Henry (1928)* στο Colorado των ΗΠΑ, με τη διαφορά ότι και οι δυο περιοχές έρευνας ήταν αρχικά δασωμένες. Στη συνέχεια, πριν την υλοτομία της μιας από αυτές, έγιναν κατά την περίοδο 1911-1919 και στις δυο αυτές λεκάνες ταυτόχρονες μετρήσεις βροχοπτώσεων, απορροών, υδατοσυγκράτησης και εξατμισιδιαπνοής. Βασικός σκοπός της έρευνας ήταν η σύγκριση των αντιδράσεων των δυο λεκανών, καθώς και του βαθμού ομοιότητάς τους. Κατόπιν η μία λεκάνη (Α) διατηρήθηκε ως είχε, ενώ η άλλη (Β) υλοτομήθηκε αποψιλωτικά. Τονίζεται ότι οι σχετικές μετρήσεις συνεχίσθηκαν μέχρι το 1927 και σύνοψή τους παρέχεται στον Πίνακα 10.

Πινακας 10: Επίδραση του δάσους επί της απορροής κατά τους Bates & Henry (1928), Aaltonen (1948)*

		Κατακρημνίσματα (mm)	**Απορροή (mm)**
Προ της υλοτομίας	A	534	154
	B	536	157
Μετά την υλοτομία στο B	A	537	158
	B	529	184

Από τον Πίνακα 10 προκύπτει ότι η απομάκρυνση του δάσους με υλοτομία στη λεκάνη Β επέφερε σημαντική αύξηση της απορροής ανερχόμενη σε 184-157=37mm. Σημαντικό είναι ότι και η έρευνα των Αμερικανών Jonson και Konver (1956)* στην Cooweta αν και διεξήχθη σε τελείως διαφορετικές κλιματικές συνθήκες από ότι στην Ελβετία (ωκεάνιο κλίμα έναντι ηπειρωτικού), οδήγησαν τελικά στο ίδιο συμπέρασμα. Οι Jonson και Konver βρήκαν ότι, μετά την απομάκρυνση του θαμνώδους υπορόφου συστάδας χωρίς να θιγεί ο δενδρώδης ανώροφός της, επιτεύχθηκε ετήσια αύξηση της απορροής κατά 15mm. Σε σχετικά πειράματα στο Harz Γερμανίας (Keller, 1966)* προέκυψε ότι, μετά την υλοτομία δάσους και πλήρη παύση της παραβλαστικότητας της δασικής υποβλάστησης με χημικό τρόπο, η απορροή αυξήθηκε κατά 29%, για μέσο ετήσιο ύψος βροχής 1200mm.

Ο Hirata (1929) σε παρόμοια πειράματα στην Ιαπωνία παρατήρησε ότι το ποσοστό του απορρέοντος νερού μετά την υλοτομία του δάσους, αυξήθηκε κατά 15%. *Το σημαντικότερο στα πειράματα του Hirata ήταν ότι η αύξηθείσα ποσότητα αντιστοιχούσε στη μετρηθείσα ποσότητα υδατοσυγκράτησης των υλοτομηθέντων δασοσυστάδων*. Στην Ιαπωνία επίσης ο Takeda (1951)* συγκρίνοντας δύο λεκάνες απορροής με ποσοστά δάσωσης 69% και 100% αντίστοιχα, διαπίστωσε, με βάση τις εκεί τοπικές κλιματικές συνθήκες, (ύψος βροχής 3000mm) ότι από τη δασωμένη λεκάνη απέρρευσε μόνο το 70%, ενώ από τη μερικώς δασωμένη το 85%. Ο Nakano (Lull, 1964, Sopper και Lull, 1965*) απέδειξε πειραματικά, μετά την υλοτομία δάσους, ότι το ποσοστό της μέσης ετήσιας απορροής αυξήθηκε από 8% έως 24%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό των μεγίστων παροχών αυξήθηκε κατά 69% έως 114%.

Σε περιοχές της Τσεχίας και της Σλοβακίας οι έρευνες των Valek (1959) και Zelleny (1965)* έδειξαν ότι η καταγραφόμενη διαφορά απορροής μεταξύ γυμνής και δασωμένης επιφάνειας (κηπευτό δάσος ερυθρελάτης, οξυάς και ελάτης) ήταν πολύ μικρή (10mm) ανερχόμενη μόλις στο 2% του πίπτοντος ύψους βροχής. Ο Kirwald (1955)* σε έρευνες που διεξήγαγε στην περιοχή του Ruhr της Γερμανίας απέδειξε ότι η ετήσια ειδική απορροή της πλήρως δασωμένης λεκάνης απορροής του χειμάρρου Krähe, σε σύγκριση με την κατά το 1/3 δασωμένη λεκάνη του χειμάρρου Königswasser, ήταν μικρότερη κατά 27% ή κατά 145mm. Επίσης διαπίστωσε ότι με αποψιλωτική υλοτομία 75 ha δάσους στην περιοχή Oberharz της Γερμανίας, επετεύχθηκε, κατά τους Kiesenkamp (1951)* και Delfs (1958), αύξηση της απορροής κατά μέσο όρο 58mm. Αντίθετοι με τα παραπάνω αποτελέσματα εμφανίζονται μερικοί ερευνητές κυρίως Ρώσοι όπως ο Buchkov (1957)* και άλλοι, οι οποίοι βάση σχετικών ερευνών τους διατύπωσαν την άποψη ότι σε λεκάνες απορροής ποταμών της Ευρωπαϊκής Ρωσίας μέσου μεγέθους (F>1000km2), όπου το ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 400 και 600mm, το δάσος γενικά προκάλεσε αύξηση της απορρέουσας ποσότητας νερού. Όμως, τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών, λόγω των ιδιαίτερων τοπικών συνθηκών (επίπεδες ελλώδεις εκτάσεις) και της ελλιπούς τους περιγραφής, δύσκολα μπορούν να μεταφερθούν σε άλλες περιοχές.

Ο συγγραφέας το 2000, παρατήρησε πως 49mm/3h απορροφήθηκαν από το έδαφος και το οικοσύστημα της δρυός απέτρεψε πλήρως τη διάβρωση. Ο Μπαλούτσος (2020) σύμφωνα με στοιχεία από τις ορεινές δασωμένες πειραματικές υδρολογικές λεκάνες της Ευρυτανίας και της Όσσας (Κισσάβου), το δάσος αποκρίνεται ως εξής: Αποτρέπει τις πλημμύρες στα πεδινά από καταιγίδες ύψους βροχής περίπου 100 – 140 mm, τις μετριάζει από 150 – 180 mm και αδυνατεί να τις αποτρέψει από μεγαλύτερα ύψη βροχής, όχι μόνο στις πεδινές περιοχές αλλά και στις δασωμένες ορεινές.

Οι Momiyama κ.α. (2023), έδωσαν έμφαση στο σημαντικό ρόλο που παίζει η υδατοσυγκράτηση στον πλημμυρικό έλεγχο των δασωμένων λεκανών απορροής και η διαχείριση του δάσους (μεταβολή της κομοστέγης) έχει το δυναμικό του ελέγχου των πλημμυρών. Οι Momiyama κ.α. (2023), αναφέρουν έρευνες επί της επίδρασης των **διαχειριστικών αλλαγών** της δομής του δάσους στην υδατοσυγκράτηση (Fan et al., 2014; Ghimire et al., 2012; Grunicke et al., 2020; Nanko et al., 2016; Shinohara et al., 2015; Sun

et al., 2015; Takahashi et al., 2011). Έρευνες που αξιολόγησαν διάφορα μοντέλα εξατμισιδιαπνοής σχετικά με την προσομοίωση της απορροής, έδειξαν ότι τα απλά μοντέλα μπορούν να λειτουργήσουν εξίσου με τα πιο πολύπλοκα (αναφορές εντός εντός Momiyama κ.α., για Bai et al., 2016; Oudin et al., 2005a, Oudin et al., 2005b). Οι Momiyama κ.α. (2023) χρησιμοποίησαν αναλυτικές παρατηρήσεις περιόδου άνω των 6 ετών περιλαμβανομένης της υδατοσυγκράτησης. Η έρευνα αφορούσε τα κωνοφόρα Cryptomeria japonica 35 και 65 ετών (1280 & 780 άτομα/Ha, μέση DBH 27.3cm & 42.2cm, μέσου ύψους 20.9m & 26.0m), Chamaecyparis obtuse 35 ετών (1770 άτομα /Ha, μέση DBH 24cm, μέσου ύψους 17.5m) και τα φυλλοβόλλα πλατύφυλλα Cercidiphyllum japonicum και Aesculus turbinate Blume (Ιπποκαστανιά). Η μέση ετήσια βροχόπτωση της περιόδου 2010–2015 ήταν 3028 mm. Μεγάλα επεισόδεια βροχής συνέβησαν την περίοδο των βροχών μεταξύ μέσων Ιουνίου έως αρχές Ιουλίου (668 ± 142 mm) και κατά την περίοδο των τυφώνων από Σεπτέμβριο έως Οκτώβριο (915 ± 200 mm). Η μέση ετήσια απορροή Q της εξαετίας εκτιμήθηκε σε 2261 mm. Για τα 3765 mm της περιόδου μετρήσεων (από το 2020 και για 19 μήνες), η διαπερώσα βροχή, η κορμοαπορροή και η υδατοσυγκράτηση, βρέθηκαν ίσες με 61%– 77%, 5%–20%, και 18%–23% της βροχής, αντίστοιχα.

Γενικά, με βάση τα παραπάνω προκύπτουν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα: *α) το δάσος προκαλεί μείωση της ετήσιας απορροής σε ποσοστό κυμαινόμενο περί το 10÷20%, β) το δάσος προκαλεί μείωση των πλημμυρικών υδάτων σε ποσοστό 30÷60% περίπου, και γ) το δάσος προκαλεί μείωση των χαμηλών υδάτων σε ποσοστό περίπου 20%. Πέραν τούτου όμως δεν πρέπει να παραγνωρίζονται οι λοιπές εξαιρετικά σημαντικές υδρολογικές επιδράσεις του δάσους και ιδιαίτερα το γεγονός ότι το δάσος αναγκάζει στο δασικό έδαφος απορρέον νερό να ρέει βραδέως και διαμέσου του εδάφους.*

Εκτός των ήδη αναφερθέντων ευεργετικών επί των απορρεόντων υδάτων επιδράσεων τους δάσους, μεγάλο ενδιαφέρον από πρακτική κυρίως σκοπιά εμφανίζει η σχέση μεταξύ του ποσοστού δάσωσης των λεκανών απορροής και του γενικού φαινομένου της απορροής. Αυτό διότι μπορεί να σχεδιαστεί η βέλτιστη ποσοτική δάσωση γυμνών, καμένων ή ολίγο δασωμένων εδαφών. Γενικά γίνεται δεκτό ως βασική αρχή, ότι όσο μικρότερο είναι το ποσοστό δάσωσης μιάς λεκάνης, τόσο μεγαλύτερη είναι η απορροή. Σχετικά, ο Molchanov (1960) δίνει την εξής σχέση μεταξύ ποσοστού δάσωσης και συντελεστού απορροής, σχέση η οποία βρίσκει αποδοχή μέχρι σήμερα:

Ποσοστό δάσωσης:	0	10	30	50	90	%
Συντελεστής απορροής :	0,7	0,3	0,13	0,10	0,04	

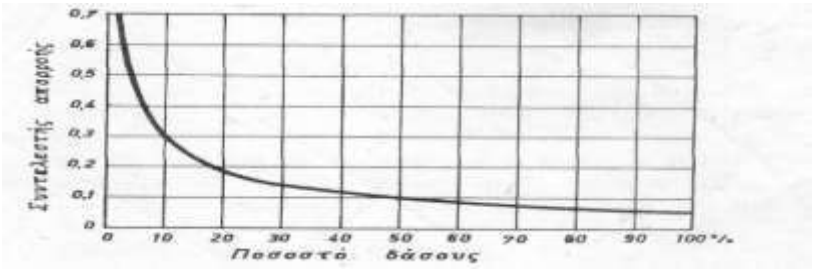
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 19, για ποσοστό δάσωσης μέχρι 35%, η μεταβολή του συντελεστή απορροής είναι πολύ σημαντική, ενώ σε αύξηση της δάσωσης πάνω από το 30% η μεταβολή παραμένει πολύ μικρή. Αλλά και η μείωση της υπάρχουσας δασοκάλυψης σε ποσοστό έως 10% στις περιπτώσεις ύπαρξης ικανοποιητικού ποσοστού δάσωσης δεν φαίνεται να επηρεάζει αισθητά την απορροή (Molchanov 1960). Ο Rutkowskii (Molchanov, 1960)* δίνει, την ακόλουθη σχέση μεταξύ ποσοστών δάσωσης και απορροής:

Ποσοστό δάσωσης	:	0	8	48	90	100
Απορροή (%)	:	100	77	58	43	25

Στο ίδιο περίπου αποτέλεσμα κατέληξαν και έρευνες όπως εκείνη του Hibbert (Baumgartner, 1966) που δίνει την ακόλουθη σχέση μεταξύ ποσοστού δάσωσης και απορροής:

Ποσοστό δάσωσης	:	0	10	20	30	40	60	100
Απορροή/ κατακρημνίσματα, Q/P:		0,42	0,36	0,33	0,30	0,26	0,21	0,18

(όπου Q = απορροή, P = κατακρημνίσματα)



Σχήμα 19: Σχέση μεταξύ ποσοστού δάσωσης και συντελεστή απορροής

Κατά συνέπεια η αύξηση κατά 10-35% του ποσοστού δάσωσης γυμνών λεκανών απορροής, προκαλεί σημαντική μείωση της απορρέουσας ποσότητας νερού. Συμπερασματικά αποδεχόμαστε ότι η παραπάνω μείωση προκαλείται λόγω της σημαντικής αύξησης του ποσοστού, της διαμέσου του εδάφους κινούμενης απορροής (Ενδορροή – Υποδερμική απορροή). Χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση το εάν και κατά πόσο η κατά χώρο κατανομή του ποσοστού δάσωσης εντός των λεκανών απορροής (συγκεντρωμένη δάσωση), επηρεάζει το μέγεθος και το ρυθμό εξέλιξης της απορροής.

Γενικά με την ένταση του βαθμού των αραιώσεων αυξάνει η από το δάσος αποδιδόμενη ποσότητα νερού. Κατά τους Hewlett (1982) και Hibbert (1961)*, αραίωση δασών σε λεκάνες απορροής σε ποσοστό 22%, 50% και 100% απέδωσε ένα έτος αργότερα ποσότητες νερού 71, 198 και 380mm. Κατά τον Nagami (1964), ισχυρές αραιώσεις στο 50% του ξυλαποθέματος αύξησαν την απορροή σε ποσοστό 13%. Σε επιλεκτικές αραιώσεις στη Virginia, σε δρυοδάση με ξυλαποθέματα από 150-180m^3/ha, παρέμεινε ποσοστό δάσους ανερχόμενο σε 80, 69, 41 και 20%. Η απορροή αυξήθηκε κατά 8, 35, 46 και 76mm αντίστοιχα κατά την επακολουθήσασα βλαστητική περίοδο και κατά 8, 35, 63, 130mm κατά το επόμενο μετά τις υλοτομίες έτος. Αυτό δείχνει ότι κατά τη βλαστητική ηρεμία, μόνο ισχυρές αραιώσεις μπορούν να επηρεάσουν την υδαταπορροή των φυλλοβόλλων πλατυφύλλων. Στα αείφυλλα κωνοφόρα και πλατύφυλλα η επίδραση ασθενών αραιώσεων γίνεται άμεσα αισθητή στην εκ μέρους του δάσους υδαταπόδοση. Ο Love (1955)* διαπίστωσε ότι η πενταετής επιδημία δασών στο δυτικό Colorado προκάλεσε τη νέκρωση του 60% του δάσους και είχε ως αποτέλεσμα την άμεση αύξηση της ετήσιας απορροής κατά 30mm ή 11%. Τα αίτια του φαινομένου αυτού αποδίδονται στη μείωση της υδατοσυγκράτησης, της χιονοσυγκράτησης και της εξατμισιδιαπνοής τους.

Εικόνες 11: Βασική απορροή α) στα Ελληνοβουλγάρικα σύνορα (Άγγιστρο Σερρών), β) Άραχθος

6.3. Αναδασώσεις και απορροή

Με τις αναδασώσεις επιδιώκεται η δημιουργία δάσους σε γυμνές ή λίγο δασωμένες λεκάνες απορροής. Για να φθάσουν όμως οι δημιουργούμενες φυτείες στο στάδιο εκείνο της δημιουργίας με την παρουσία τους του μέγιστου ευνοϊκού υδρολογικού περιβάλλοντος, ώστε να μπορούν να ασκήσουν τις θετικές επί της απορροής υδρολογικές επιδράσεις ενός ωρίμου δάσους, απαιτείται να φθάσουν σε κάποιο ελάχιστο ηλικιακό όριο. Παρουσιάζει επομένως μεγάλο ενδιαφέρον, η μελέτη της επίδρασης των αναδασώσεων στην πορεία εξέλιξης της απορροής, από τη δημιουργία των φυτειών μέχρι την πλήρη ωριμότητά τους. Ο Hibbert (Baumgartner, 1967) μετά από σχετικές έρευνες παρέχει τα ακόλουθα αποτελέσματα της επίδρασης ενός επαναδημιουργούμενου μετά από αποψιλωτική υλοτομία δάσους στην απορροή τα πρώτα δέκα έτη μετά την υλοτομία (Σχήμα 20):

Έτος μετά την υλοτομία	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Απορροή (mm βροχής)	375	320	280	250	225	205	190	180	170	165

Σχήμα 20: Σχέσεις μεταξύ αναδάσωσης δασικής επιφάνειας και απορροής

Το δάσος λοιπόν, ήδη από τα πρώτα έτη δημιουργίας του ασκεί πολύ μεγάλη επίδραση στην ποσότητα του απορρέοντος νερού, όμως η επίδραση των αναδασώσεων στην απορροή μειώνεται σημαντικά μετά το $9^{ο}$ με $10^{ο}$ έτος της ηλικίας του. Οι Schneider και Ayer (Keller, 1961)* διαπίστωσαν ότι η αναδάσωση μεταβάλει σταθερά τη σχέση μεταξύ κατακρημνισμάτων και απορροής, ιδιαίτερα κατά τα αρχικά έτη δημιουργίας της νέας συστάδας, η επίδραση όμως αυτή σταδιακά μειώνεται. Για παράδειγμα, σε λεκάνη έκτασης 800ha, στην οποία το ποσοστό δάσωσης αυξήθηκε με αναδάσωση από 35 έως 58%, μειώθηκε η υδαταπορροή κατά 9mm βροχής. Επίσης κατά τον Eschner (1965)* και παρατηρήσεις ήδη από το 1912, έδειξαν ότι αναδασώσεις κωνοφόρων ειδών σε λεκάνες απορροής της Νέας Υόρκης επέφεραν έως το έτος 1950 μείωση της ετήσιας απορρεούσης ποσότητας νερού κατά 196mm. Παράλληλα ο Rothacher (1953)* αναφέρει ότι μετά την αναδάσωση γυμνής λεκάνης απορροής κατά 34% στο Tennese των ΗΠΑ, καταγράφηκε μετά από 15 έτη η ίδια περίπου απορροή. Αντίθετα, οι πλημμυρικές απορροές μειώθηκαν σημαντικά. Έτσι λοιπόν, *η αναδάσωση προκαλεί γενικά σημαντική μείωση της υδαταπορροής ιδιαίτερα των πλημμυρικών αιχμών, η δε επίδρασή της επί της απορρέουσας ποσότητας νερού είναι πολύ μεγαλύτερη κατά τα πρώτα έτη ανάπτυξης των αναδασώσεων.*

6.4 Συντελεστής απορροής

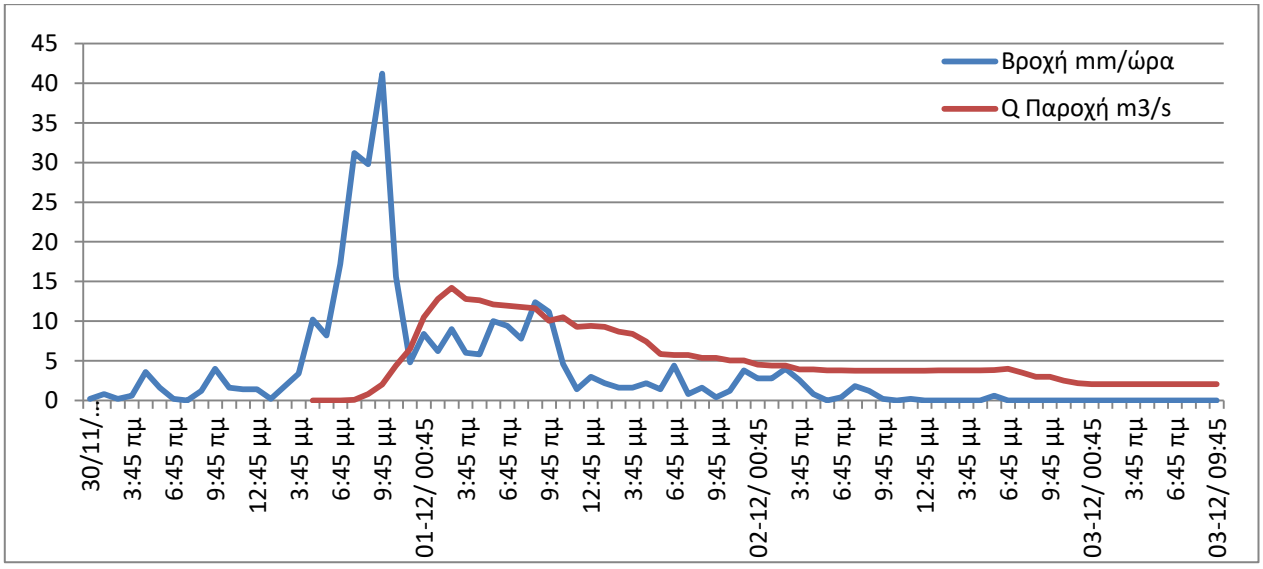
Συντελεστής απορροής είναι ο λόγος του νερού που απορρέει σε μια λεκάνη απορροής προς τα συνολικά πίπτοντα κατακρημνίσματα. Είναι πολύ ευκολότερο να εκτιμηθεί παρά να μετρηθεί. Ακολούθως παρατίθεται ένα παράδειγμα προσπάθειας μέτρησής του εκ του οποίου αναδυκνύεται ο υδρονομικός ρόλος του δάσους στη συγκράτηση των πλημμυρικών αιχμών:

Στο Χολομώντα Χαλκιδικής στα τέλη του 2024, το φαινόμενο «Μπόρα» έφερε αξιοσημείωτα ύψη βροχής. Ο Νοέμβριος μέχρι τις 29/11/24 στις 22:00 χαρακτηρίζεται άνυδρος παρότι είναι ο βροχερότερος μήνας του έτους. Από τις 22:15 το βράδυ της 29/11/24 μέχρι το μεσημέρι της 30/11/24 παρατηρείται πολύ ελαφριά ψιχάλα αθροιστικού ύψους 5,2mm. Η συνέχεια του φαινομένου κορυφώνεται στις 30/11/24 από τις 18:45-22:15 όπου σε 3 ώρες και τρία τέταρτα έπεσαν 120,2mm, με μέση ένταση βροχής 34,34mm/h και μέγιστη 43,6mm/hr. Σε 15 ώρες και 15 λεπτά έριξε αθροιστικά 120,2mm και 98,4mm, δηλαδή 218,6mm, ακολουθούμενου από 43,8mm. Του φαινομένου, προηγήθηκαν κατακρημνίσματα 49mm στις 30/11/24. Έτσι, το συνολικό άθροισμα της βροχόπτωσης ανήλθε σε 318,2mm.

Με την πολύτιμη βοήθεια εγκατεστημένης καταγραφικής κάμερας και τη χρήση του AutoCAD, αποτυπώθηκε η στάθμη του νερού σε ωριαία βάση και υπολογίστηκε η διαβρεχόμενη επιφάνεια του διάρρου του μεγάλου φράγματος του χειμάρρου Αγίου Παντελεήμονα. Η ταχύτητα του νερού υπολογίστηκε με τη βοήθεια διαθέσιμων βίντεο και άναλυσής τους μέσω της εφαρμογής Discharge, καθώς και με επιτόπου μετρήσεις. Δημιουργήθηκε έτσι το πλημμυρογράφημα της βροχόπτωσης της 30/11-2/12/2024 στο οποίο φαίνεται ταυτόχρονα και η πορεία της, παρότι μετράται σε διαφορετικές

μονάδες (mm βροχής έναντι m^3/sec της παροχής). Παροχή στο διάρρου του φράγματος παρατηρήθηκε μόλις το βράδυ της 30/11 και όχι νωρίτερα, αιχμή της πλημμύρας τις πρώτες ώρες της 1/12/24 και πτώση-σταθεροποίηση της στάθμης του διάρρου σε επίπεδα βασικής παροχής το πρωί της 3/12/24. Οι τιμές της παροχής από το βράδυ της 30/11/24 μέχρι το πρωί της 1/12/24 εκτιμήθηκαν λόγω της μη καταγραφής φωτογραφιών τις βραδινές ώρες. Ωστόσο, εκτιμάται ότι η προσομοίωση αποκλίνει λίγο από την πραγματικότητα και μάλιστα, ίσως λίγο υπερεκτιμάται. Η μέγιστη καταγραφόμενη παροχή των 11,62 m^3/s (8:45 το πρωί της 1/12/24) διαπιστώθηκε ότι εντάσσεται στην πορεία καθόδου του πλημμυρογραφήματος. Η μέγιστη εκτιμώμενη τιμή της άγγιξε τα 15 m^3/s και σαφώς υπολείπεται της μέγιστης υδατοπαροχής εκατονταετίας σχεδιασμού του έργου των $maxQ_{100}$= 22,84 m^3/sec (μέση τιμή τεσσάρων εμπειρικών τύπων εκτίμησής της, συμπεριλαμβανομένης της ορθολογικής μεθόδου). Ωστόσο, βρέθηκε ότι βάσει της μέσης και μέγιστης ωριαίας έντασης βροχής, η περίοδος επαναφοράς του φαινομένου «Μπόρα» είναι μεγαλύτερη της εκατονταετίας, γεγονός που δείχνει ότι οι εμπειρικές μέθοδοι υπερεκτιμούν τις εκτιμώμενες παροχές εκατονταετίας.

Εικόνα 12: Η μέγιστη καταγραφόμενη πλημμυρική στάθμης (μέγιστο βάθος ροής τα 22cm)



Σχήμα 21: Η πορεία της βροχόπτωσης 30/11-3/12/2024 και το πλημμυρογράφημα αυτής

Η βροχόπτωση της 30/11/2024 και 1/12/24 διαπιστώθηκε ότι είναι από τις μεγαλύτερες της 50 ετίας (διαθέσιμο αρχείο 1974-2025). Στο ακόλουθο πινακάκι επιλέχθηκαν οι μηνιαίες βροχοπτώσεις που ξεπέρασαν τα 200mm. Ωστόσο, για να διαπιστωθεί το μέγεθος του φαινομένου «Μπόρα», αναλύθηκαν τα επεισόδια βροχής και ερευνήθηκε η πιθανότητα κάποιο από αυτά να καλύπτει δύο ημερολογιακούς μήνες όπως συνέβη στη μελετούμενη περίπτωση. Για παράδειγμα, ενώ οι μηνιαίες τιμές Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου 2024 αθροιστικά φθάνουν τα 479,4mm, «κρύβουν» ότι σε 15 ώρες και 15 λεπτά έπεσαν 218,6mm, με το συνολικό άθροισμα της βροχόπτωσης 29/11/24-3/12/24, να ανέρχεται σε 318,2mm. Για τη σύγκριση παραπλήσιων των επεισοδίων μεγάλης βροχόπτωσης, παρατίθενται ακολούθως τρια περιστατικά, τον Οκτώβριο του 2021, βροχόπτωση μηναίου ύψους 283,4mm, το Δεκέμβριο του 2022 με 134,6mm και το Δεκέμβριο του 2025 με 222mm. Από την ανάλυση των βροχοπτώσεων σε 15 λεπτή βάση, προέκυψε για τον Οκτώβριο του 2022 ότι από τα 283,4mm, τα 164,4mm έπεσαν μεταξύ 14/10/2021 και 16/10/2021 με μέση ωριαία ένταση βροχόπτωσης ίση με 2,9mm/hr. Για τη βροχόπτωση του Δεκεμβρίου 2022, από τα μηναία κατακρημνίσματα των 134,6mm τα 109,8mm έπεσαν σε 1 μέρα, στις 1/12/2022. Προηγήθηκαν 20,4mm του ιδίου επεισοδίου που άρχισε στις 30/11/2022. Έτσι η συνολική βροχόπτωση του επεισοδίου αυτού ήταν 130,6mm με μέση ωριαία ένταση βροχόπτωσης ίση με 3,265 mm/hr. Η βροχόπτωση της 4-5-6/12/2025 με αθροιστικό ύψος 172,8mm και επιμερισμένο τα 68,8mm της 4^{ης} Δεκ, τα 56,4mm της 5^{ης} Δεκ. και τα 47,6mm της 6^{ης} Δεκεμβρίου, είχε μέγιστη ωριαία ένταση τα 16,6mm. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι τα επεισόδια αυτά σαφώς υπολείπονται σε ένταση και ύψος κατακρημνισμάτων συγκριτικά με το μελετώμενο φαινόμενο «Μπόρα».

Μήνας	Δεκ-80	Νοε-85	Φεβ-86	Δεκ-90	Δεκ-95	Ιαν-96	Οκτ-00	Δεκ-02	Δεκ-09	Φεβ-10	Οκτ-10	Σεπ-14	Μαρ-15	Μάης 18	Ιουν-18	Νοε-19	Οκτ-21	Νοε-24	Δεκ-24	Δεκ-25
Ύψος (mm)	206,8	272	383,6	258,4	329,4	234	229,6	259,7	267,3	211,1	251,6	244,4	217,2	224,2	210	201,6	283,4	228	251,4	222

Η αθροιστική λοιπόν βροχόπτωση του φαινομένου «Μπόρα» (άρχισε με 4mm το βράδυ της 29/11/24 και ολοκληρώθηκε στις 3/12/24) ήταν 318,2mm. Αυτό το νερό για τη λεκάνη απορροής που κλείνει στη στέψη του μεγάλου φράγματος και έχει έκταση 5,4 Km^2, αντιστοιχεί σε 1.718.280 m^3 νερού. Ο όγκος του νερού που υπολογίστηκε ότι απέρρευσε από το διάρρου του φράγματος μέχρι το πέρας της βροχόπτωσης στις 17:45 της 2/12/24 ήταν 1.100.088 m^3. Με βάση λοιπόν τον απορροϊκό όγκο και γνωρίζοντας την έκταση της περιοχής, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής απορροής που μέχρι το πέρας της βροχόπτωσης βρέθηκε ίσος με 0,64 που σημαίνει ότι το 64% των κατακρημνισμάτων απέρρευσαν επιφανειακά σε καλά δασωμένη λεκάνη απορροής. Αυτή η τιμή είναι μεγαλύτερη από τις τιμές που μετρήθηκαν από τον Μπαλούτσο και την ομάδα του στον υδρομετρικό σταθμό της Όσσας στο κλείσιμο πειραματικής υδρολογικής λεκάνης 260 ha καλυμένης με δάσος οξιάς στην ανατολική πλευρά του βουνού. Ο συντελεστής απορροής έφτασε το 0,59 σε ακραία ύψη βροχής όπως το μελετούμενο αλλά και ακόμα μεγαλύτερα (Μπαλούτσος κ.α. 2013, 2015, 2017). Σε αντίστοιχο επεισόδιο ακραίας βροχόπτωσης το Νοέμβριο του 1979 οι Μπαλούτσος κα. (2017) βρήκαν ότι ο συντελεστής απορροής έφτασε το 59,4% (για

βροχόπτωση 368 mm). Οι ερευνητές αυτοί βρήκαν μέσο συντελεστή απορροής για τα 4 ακραία επεισόδια (Σεπτεμβρίου 1978, Οκτώβριο 1994, Νοέμβριο 1979 και Δεκέμβριο 1995) ίσο με 56%. Επίσης, οι ίδιοι ερευνητές ανέλυσαν και μέτρησαν τις ετήσιες και μηνιαίες απορροές 32 υδρολογικών ετών (1973-74/2004-05) για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τους. Η μέση ετήσια απορροή της λεκάνης για τα 32 μελετούμενα έτη ανήλθε στο 58%.

7. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΟ

Η υδατοσυγκράτηση ως πρωτογενής απώλεια εμποδίζει την πλήρη άφιξη του νερού των κατακρημνισμάτων στο δασικό έδαφος με αποτέλεσμα την εν συνεχεία πλήρη αλλαγή των εξελισσόμενων υδρολογικών λειτουργιών και έτσι μειώνει την αφικνούμενη ποσότητα νερού στο έδαφος με αποτελέσμα:

- Την αποτροπή, μείωση, ή απάλυνση πλημμυρικών φαινομένων.
- Την μείωση (μέχρι σχεδόν εξαφάνισης) της κρουστικής ενέργειας των σταγόνων της βροχής με αποτέλεσμα τη μείωση ή την εξάλειψη των διαβρώσεων και τη μείωση των παραγόμενων και διακινούμενων φερτών υλών με όσες ευνοϊκές επιπτώσεις αυτό συνεπάγεται.
- Τη μείωση της επιφανειακής απορροής.
- Τη μείωση του δυνάμενου να διηθηθεί νερού, εφόσον μπορεί να πραγματοποιηθεί η αυτή διήθηση. Η ταχύτητα διήθησης στα δασικά εδάφη είναι τουλάχιστον 3πλάσια έως 5πλάσια της αντίστοιχης ενός γυμνού εδάφους.
- Τη μείωση της εξάτμισης από το υποκείμενο έδαφος και την υποκείμενη υποβλάστηση.

Έχοντας, υπόψη τις παραπάνω σημαντικές υδρολογικές λειτουργίες και τις περαιτέρω διαφοροποιήσεις που προκαλεί η υδατοσυγκράτηση, προκύπτει ότι η δυνατότητα ελέγχου της στο μικρότερο δυνατό βαθμό αποτελεί άριστη υδρολογική πράξη, εξαιρετικής σημασίας για τις λείψυδρες ελλειμματικές χώρες όπως οι Μεσογειακές. Η δυνατότητα ελέγχου (μείωσης σε ανεκτά επιθυμητά πλαίσια της υδατοσυγκράτησης) είναι δυνατή τόσο με καλλιεργητικές επεμβάσεις, όσο και με ρύθμιση του βαθμού μίξης των απαντωμένων ειδών. Ενδεικτικά, το σύνολο των υδατικών προβλημάτων της Ελλάδας αφορά ποσότητα 15-40mm/έτος (Παυλίδης 2005). Η ποιότητα αυτή είναι εύκολο να απορροφηθεί με αντίστοιχο κατάλληλο χειρισμό της δασικής βλάστησης **με την προϋπόθεση ότι η απελευθέρωσή της δεν θα αυξάνει την πλημμυρική ή διαβρωτική-στερεομεταφορική επικινδυνότητα των κατάντη περιοχών.**

Σημαντική επίδραση στην απορροή είχε η μετατροπή μεγάλου μέρος των δασών της κεντρικής Ευρώπης σε φυτείες κωνοφόρων με σκοπό την παραγωγή ξύλου και μάλιστα σε περιοχές ακατάλληλες για τα εν λόγω είδη. Για παράδειγμα η ερυθρελάτη που εισήχθη στη Γερμανία από τη Σκανδιναβία, ως επιπολαιόριζο είδος είναι εξαιρετικά ευάλωτη στις ανεμοριψίες. Τα φυτεμένα κωνοφόρα γενικά υποφέρουν μονίμως από δίψα, επειδή η κόμη τους (η ενσωματωμένη ομπρέλα τους) συγκρατεί το ένα τρίτο της βροχής και το επιστρέφει στην ατμόσφαιρα. Στα φυλλοβόλα δάση η τιμή ανέρχεται στο 15% ή

και λιγότερο με αποτέλεσμα το δασικό έδαφος να εμπλουτίζεται με περισσότερο νερό. Στον Καναδά και ειδικότερα στο Βανκούβερ, η διαχείριση του νερού των καταιγίδων είναι προτεραιότητα, ειδικά την υγρή χειμερινή περίοδο. Οι Καναδοί εξετάζουν τις ευεργετικές επιπτώσεις της υδατοσυγκράτησης των δέντρων της πόλης στη μείωση των πλημμυρικών επιπτώσεων. Η μείωση και η καθυστέρηση της απορροής μέσω του σχεδιασμού φύτευσης περισσότερων δέντρων είναι δεδομένη και χρησιμοποιείται (Huang 2016).

Οι ξηρές περιοχές του πλανήτη, καταλαμβάνουν περίπου το 41% της χερσαίας έκτασής του και χαρακτηρίζονται από την περιορισμένη εδαφική υγρασία, αποτέλεσμα λίγων κατακρημνισμάτων και υψηλής εξάτμισης. Η υδατοσυγκράτηση, δηλαδή η εξάτμιση που προέρχεται από βροχή που συγκρατείται από την κομη της βλάστησης και εξατμίζεται πριν φτάσει στο έδαφος, είναι σημαντικός παράγοντας στο υδατικό ισοζύγιο και τη συνολική εξάμτιση των δασικών εκτάσεων. Κυμαίνεται όπως ήδη αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο από **10-50%** της βροχόπτωσης (Rutter et al., 1971).

8. ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ, ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

8.1 Γενικά- Μέθοδοι εκτίμησης της απορροής

Ο υπολογισμός της απορροής των υδάτινων ρευμάτων γίνεται με άμεσες συστηματικές μακροχρόνιες μετρήσεις και καταγραφές υδατοπαροχών που όμως συχνά είναι ελλειπείς ή απουσιάζουν στους χειμάρρους και τους ποταμούς της Ελλάδας. Η ανυπαρξία μετρήσεων οδήγησε στη διατύπωση συγκεκριμένων μεθόδων εκτίμησης της απορροής με κυριότερες τις εξής:

- ***Η μέθοδος του συντελεστή απορροής***
- ***Η μέθοδος σύγκρισης με άλλες ομοειδείς λεκάνες (μέθοδος Viparelli).***
- ***Η βελτιωμένη μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου***

Για να γίνει δυνατή η εκτίμηση της απορροής απαιτείται η γνώση των αναγκαίων για κάθε μέθοδο υδρολογικών μεγεθών. Τα υδρολογικά μεγέθη διαχωρίζονται σε εκείνα που διαμορφώνουν το υδατικό δυναμικό (υδατικές προσαγωγές) και σε εκείνα που αφορούν τις καταναλώσεις του χώρου. Η διαφορά μεταξύ του υδατοφορτίου των υδατοπροσαγωγών (βροχή, χιόνι) και των λειτουργικών καταναλώσεων (υδατοσυγκράτηση, εξάτμιση, εξατμισιδιαπνοή), προσδιορίζει τα πλεονάζοντα να διηθηθούν ή να απορρεύσουν υδατοφορτία, καθώς και το καταγραφόμενο υδατικό έλλειμμα της μελετούμενης λεκάνης.
Η έντονα διαφοροποιημένη χωροχρονικά εξέλιξη των παραπάνω μεγεθών διαμορφώνει σε διάφορες χρονικές στιγμές, στους επιμέρους χώρους, περισσότερο ή ολιγότερο έντονα, θετικά ή αρνητικά υδατικά ισοζύγια. Έτσι κατά περιόδους δημιουργούνται μεγάλα ή μηδενικά υδατικά πλεονασματικά διαθέσιμα, (χωροχρονικά διαφοροποιημένα) των οποίων την αζήμια διακίνηση και αξιοποίηση επιδιώκουμε. Αυτό γίνεται στα πλαίσια αειφορικής κάλυψης του συνόλου των υδατικών αναγκών μιας λείψυδρης περιοχής και στην ανάγκη αντιπλημμυρικής προστασίας. Επισημαίνεται ότι τα απαιτούμενα για την εφαρμογή της

μεθόδου υδρολογικά μεγέθη μελετώνται και αναφέρονται στο σύνολο της ανάντη της θέσης αναφοράς λεκάνης του χειμάρρου. Επομένως το υδατικό δυναμικό κάθε θέσης που βασίστηκε αποκλειστικά στις προσαγωγές των βροχών, υπολογίζεται για το σύνολο της έκτασης της μελετούμενης λεκάνης. Στον υπολογισμό δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψιν το υδατικό δυναμικό του χιονιού, προκειμένου να αποφευχθούν ενδεχόμενες υπερεκτιμήσεις της υδατοπαροχής, λόγω αδυναμιών των μεθόδων μέτρησης ή του υπολογισμού της. Αντίθετα ενδεχόμενες υποεκτιμήσεις δεν προκαλούν προβλήματα στην υδρολογική εξοικονόμηση. Με βάση τις αντίστοιχες μηνιαίες και ετήσιες βροχοπτώσεις, που αναφέρονται στα μέσα υψόμετρα των χειμάρρων των μελετούμενων λεκανών και τις αντίστοιχες επιφάνειες τους (km^2), υπολογίζεται το αντίστοιχο προσαγόμενο σε κάθε λεκάνη μηνιαίο και ετήσιο υδατοφορτίο των βροχοπτώσεων. Σημειώνεται ότι η προσαγωγή νερού βροχής ύψους 1mm αντιστοιχεί σε απορροϊκό υδατοφορτίο 1000 m^3/km^2.

8.1.1. Μέθοδος συντελεστή απορροής

Η μέθοδος βασίζεται στο διαχωρισμό των μελετούμενων λεκανών σε τμήματα με ενιαία υδρολογική συμπεριφορά, που εκφράζεται με συγκεκριμένο, για κάθε τμήμα της λεκάνης, εκτιμούμενο συντελεστή απορροής. Η διάκριση των τμημάτων βασίζεται στην ομοιομορφία και ομοιογένεια των υδρολογικών, μορφολογικών, γεωλογικών, βλαστητικών και άλλων παραγόντων (κατείσδυση, ενδόγεια περατότητα, υδατοσυγκράτηση βλάστησης, δομή και υφή εδάφους, επικλινότητα επιφάνειας, εδαφοκάλυψη, χειμαρρικά φαινόμενα όπως διαβρώσεις, ολισθήσεις κ.λπ., ύψος, αριθμός, ένταση και εποχιακή διανομή βροχών κ.λπ.), που διαμορφώνουν τους επιμέρους ενιαίους συντελεστές απορροής. Η συνολική απορροή εκφράζεται από το άθροισμα των επιμέρους απορροών, που αποδίδουν οι επιμέρους διακριτές ομοιόμορφες επιφάνειες κατά το Σχήμα 22:

$$\Sigma VQ_R = VQ_{R_1} + VQ_{R_2} + \ldots\ldots\ldots VQ_{R_N}$$

Όπου:

$\Sigma VQ_{R=}$ *ο συνολικός απορροϊκός όγκος της μελετούμενης λεκάνης* (m^3)

$VQ_{i=}$ *η απορροή που αποδίδει το ομοιόμορφο και ομοιογενές απορροϊκό τμήμα της λεκάνης επιφάνειας* F_i.

Ο απορροϊκός όγκος κάθε τμήματος VQ_{Ri} υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$VQ_{Ri} = a\,(1000P)\,F_i$$

Όπου:

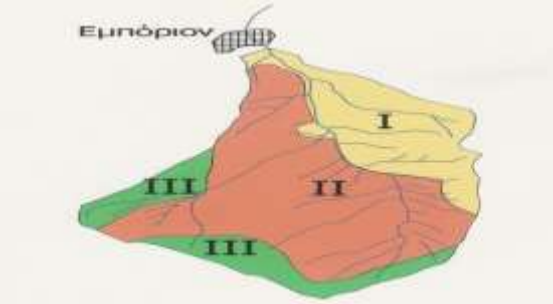
VQ_{Ri} *= ο απορροϊκός όγκος που αποδίδει το ομοιόμορφο-ομοιογενές συμπεριφερόμενο απορροϊκό τμήμα με επιφάνεια* F_i (m^3)

F_i= *η επιφάνεια του ομοιόμορφα συμπεριφερόμενου απορροϊκά τμήματος* (km^2)

***P**= το προσαγόμενο ύψος κατακρημνισμάτων στην επιφάνεια F_i (mm)*

***α**= ο επιμέρους μέσος ετήσιος συντελεστής απορροής της επιμέρους ομοιόμορφης επιφάνειας. Ο απορροϊκός συντελεστής α λαμβάνει τιμές μεταξύ 0,05 και 0,75.*

Στη συνέχεια διαχωρίζονται οι τροφοδότιδες λεκάνες του μελετούμενου χειμάρρου σε ομοιόμορφα τμήματα (ομοιογενείς επιφάνειες). Με βάση τον ενοποιημένο σταθμισμένο μέσο συντελεστή απορροής (a), το μέσο ετήσιο ύψος βροχής (P) και την αναλογούσα επιφάνεια (F) των επιμέρους διακριτών ομοιόμορφων τμημάτων, προκύπτουν οι επιμέρους μέσοι ετήσιοι απορροϊκοί όγκοι, καθώς και οι αντίστοιχοι συνολικοί απορροϊκοί όγκοι του εκάστοτε μελετούμενου χειμάρρου στις θέσεις υδροληψίας ως εξής:



Σχήμα 22: Ομοιόμορφα διακριτά τμήματα της λεκάνης απορροής ενός χειμάρρου, που εμφανίζουν ενιαία απορροϊκή συμπεριφορά (τμήματα με ενιαίο συντελεστή απορροής).

$$\Sigma VQ_R = VQ_{R_1} + VQ_{R_2} + VQ_{R_3} \ (m^3/\text{έτος})$$

Με βάση λοιπόν τη μέθοδο του συντελεστή απορροής προκύπτει ο ετήσιος απορροϊκός όγκος σε mm και σε m^3 ανηγμένος στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Ο μέσος απορροϊκός όγκος εξάγεται για περίοδο όσο το δυνατόν περισσοτέρων ετών και προσημειώνονται οι ακραίες τιμές του. Να σημειωθεί ότι η έννοια του μέσου έτους είναι κυρίως προσεγγιστική χρησιμοποιούμενη για να προκύψουν όσο το δυνατόν ακριβέστερα υδρολογικά αποτελέσματα.

8.1.2. Μέθοδος σύγκρισης με ομοειδείς λεκάνες (μέθοδος Viparelli)

Η μέθοδος αυτή βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε πολλές μελέτες φραγμάτων, ταμιευτήρων και λιμνοδεξαμενών. Η μέθοδος προέρχεται από τη Νότια Ιταλία όπου βρήκε ευρεία εφαρμογή. Ευνοϊκό πεδίο εφαρμογής της είναι και η Ελλάδα, ιδιαίτερα η Κεντρική και η Βόρεια λόγω των κλιματικών και εδαφικών ομοιότητων με τη χώρα προέλευσης. Η μέθοδος βασίζεται σε εργασία του Viparelli, γι αυτό και συχνά τιτλοφορείται ως μέθοδος Viparelli. Ο Viparelli προκειμένου να αποφύγει τη γενική έννοια του μέσου ετήσιου συντελεστή απορροής, που από τη φύση του εμπεριέχει λάθη εξομοίωσης της διαφορετικότητας

των απορροών διαφόρων εποχών συναρτήσει του αντίστοιχου ύψους, προχώρησε στη δημιουργία επιμέρους εποχικών συντελεστών απορροής ανάλογα με το ύψος βροχής κάθε εποχής (Πίνακας 11).

Πίνακας 11: Εποχικοί συντελεστές απορροής κατά βαθμίδα ύψους βροχής (κατά Viparelli)

ΕΠΟΧΙΚΗ ΒΑΘΜΙΔΑ ΒΡΟΧΗΣ	ΕΠΟΧΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (ΚΑΤΆ VIPARELLI)			
(mm)	ΦΘΙΝΟΠΩΡΟ (Φ)	ΧΕΙΜΩΝΑΣ (Χ)	ΑΝΟΙΞΗ (Α)	ΘΕΡΟΣ (Θ)
1	2	3	4	5
0,00-25,00	0,000	0,000	0,000	0,000
25,01-50,00	0,000	0,000	0,000	0,000
50,01-75,00	0,000	0,030	0,020	0,000
75,01-100,00	0,050	0,140	0,050	0,040
100,01-125,00	0,100	0,180	0,180	0,060
125,01-150,00	0,140	0,230	0,270	0,070
150,01-175,00	0,170	0,270	0,360	0,080
175,01-200,00	0,200	0,330	0,440	0,100
200,01-225,00	0,230	0,350	0,500	0,110
225,01-250,00	0,270	0,380	0,540	0,120
250,01-275,00	0,300	0,410	0,570	0,130
275,01-300,00	0,330	0,440	0,610	0,140
300,01-325,00	0,350	0,460	0,640	0,150
325,01-350,00	0,370	0,490	0,670	0,160
350,01-375,00	0,390	0,510	0,680	0,165
375,01-400,00	0,410	0,520	0,700	0,170
400,01-425,00	0,430	0,540	0,720	0,175
425,01-450,00	0,460	0,550	0,740	0,180
450,01-475,00	0,470	0,560	0,750	0,185
475,01-500,00	0,480	0,570	0,770	0,190
500,01-525,00	0,490	0,575	0,775	0,193
525,01-550,00	0,500	0,580	0,780	0,196
550,01-575,00	0,510	0,585	0,785	0,198
575,01-600,00	0,520	0,590	0,790	0,200

Στη συνέχεια τα μηνιαία και ετήσια ύψη βροχής κάθε μελετώμενης λεκάνης ταξινομούνται σε εποχικά ύψη βροχής και έπειτα, με βάση τους εποχικούς συντελεστές απορροής υπολογίζονται οι εποχικές και ετήσιες απορροές της λεκάνης των μελετούμενων χειμάρρων. Επισημαίνεται ότι για τον υπολογισμό χρειάζεται και η προσμέτρηση της σταθερής βασικής παροχής του χειμάρρου.

8.1.3. Βελτιωμένη μέθοδος Υδατικού Ισοζυγίου

Η βελτιωμένη μέθοδος του υδατικού χαρακτηρίζεται ως τέτοια διότι υπερβαίνει τις αδυναμίες της αρχικής μεθόδου που αναπτύχθηκε από τον Thornwaite (Thornwaite and Mather, 1955, 1957) και βελτιώθηκε από τους Παπούλια (1972) και Παυλίδη (1997). Αρχικά ο Παπούλιας διαχώρησε την εξατμισιδιαπνοή σε πραγματική και δυναμική και συμπεριέλαβε στο μοντέλο τη μέγιστη υδατοχωρητικότητα του εδάφους (*Sto*) και το δείκτη επάρκειας υγρασίας και ο Παυλίδης την υδατοσυγκράτηση της βλάστησης.

Είναι γνωστό ότι η γνώση του υδατικού ισοζυγίου μιας λεκάνης απαιτεί τον υπολογισμό ή προσδιορισμό πολλών, ασταθών και δύσκολα μετρήσιμων ή υπολογίσιμων στοιχείων, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του φαινομένου, των διεργασιών και των μετασχηματισμών που λαμβάνουν χώρα κατά της διάφορες φάσεις του υδρολογικού κύκλου. Για να παρακαμφθούν οι παραπάνω δυσκολίες, ώστε το μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου να μπορεί να καταστεί αξιοποιήσιμο, γίνονται κάποιες παραδοχές. Με βάση τα παραπάνω σε γενική κλίμακα βρίσκει εφαρμογή το απλό μοντέλο της εδαφικής υγρασίας. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ως εισόδους τις υδατοπροσαγωγές της βροχόπτωσης P (σπάνια και της υδατοπροσαγωγές της χιονόπτωσης Ps) και τη δυναμική εξατμισιδιαπνοή ET_p και δίνει ως εξόδους την πραγματική εξατμισιδιαπνοή ET_r και την απορροή Q της λεκάνης. Το μοντέλο συνήθως εφαρμόζεται σε μηνιαία βάση και συχνά αγνοεί ακόμα και τη μέγιστη διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα του εδάφους St_o.

Σχετικά με τον υπολογισμό της δυναμικής εξατμισιδιαπνοής ET_p, αυτός γίνεται με βάση τα υπάρχοντα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, με επιλογή ενός από τους καταλληλότερους σχετικούς τύπους (Penman, Turc, Thornthwaite κ.α.). Παρόλο που η παραπάνω μέθοδος είναι αξιόπιστη, εντούτοις στις απώλειες δεν καταγράφονται οι απώλειες της υδατοσυγκράτησης L_p που λαμβάνουν χώρα από το διαδοχικό φαινόμενο της κομοδιαβροχής της φυτοκόμης των δένδρων, θάμνων, ποών κλπ. Με δεδομένο ότι η υδατοσυγκράτηση της βλάστησης αποτελεί σημαντική απώλεια, στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου συμπεριλήφθηκαν και οι απώλειες της (Παυλίδης, 1997). Ειδικότερα οι έννοιες, ορισμοί και οι λειτουργικές απώλειες του χώρου με την παραπάνω βελτιωμένη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου, αφορούν την κομοδιαβροχή και την υδατοσυγκράτηση της βλάστησης (δασικής, θαμνώδους, λιβαδικής), και τη δυναμική και πραγματική εξατμισιδιαπνοή.

Τα κυριότερα μορφομετρικά στοιχεία ενός μελετούμενου χειμάρρου ή ποταμού είναι η επιφάνεια λεκάνης, το μέσο υψόμετρο της. Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία υπολογίζονται τα υδρολογικά μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου των λεκανών απορροής του μελετούμενου χειμάρρου. Σημειώνεται, ότι για αυτόν τον υπολογισμό, χρησιμοποιούνται τα ανηγμένα στα μέσα υψόμετρα της λεκάνης του χειμάρρου κλιματικά στοιχεία (ύψος βροχής και θερμοκρασία αέρα), όπως αυτά διαμορφώθηκαν μετά τη γενόμενη επεξεργασία των σχετικών κλιματικών συνθηκών της περιοχής. Παράλληλα χρησιμοποιούνται

και τα αναγκαία για την εφαρμογή της μεθόδου του υδατικού ισοζυγίου, απαιτούμενα υδρολογικά μεγέθη, όπως η Υδατοσυγκράτηση (L_P), η μέγιστη διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα (St_o) και συντάσσεται το υδατικό ισοζύγιο λεκάνης απορροής του συνόλου των ετών της εκάστοτε μελετούμενης περιόδου.

- **<u>Το μαθηματικό μοντέλο του Υδατικού ισοζυγίου</u>**

- ✓ **Κατακρημνίσματα: (P) (mm)**

Χρησιμοποιούνται οι μηνιαίες, μέσες μηνιαίες, και οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις, προερχόμενες από μετρήσεις βροχής ή εκτιμώμενες από τις μετρήσεις βροχής του σταθμού βάσης με τη βοήθεια της ετήσιας βροχοβαθμίδας και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης.

- ✓ **Υδατοσυγκράτηση: (Lp)**

Ο υπολογισμός της υδατοσυγκράτησης (μηνιαίας, ετήσιας, μέσης μηνιαίας και μέσης ετήσιας) προκύπτει από τη σχέση: $\mathbf{L_P = a * P}$

όπου: a = συντελεστής υδατοσυγκράτησης κατά μήνα και βαθμίδα μηνιαίου ύψους βροχής (Κεφ. Υδ/ση)

- ✓ **Θερμοκρασία Αέρα: (t)**

Χρησιμοποιούνται οι μέσες μηνιαίες και οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες αέρα προερχόμενες από μετρήσεις θερμοκρασίας ή από τον υπολογισμό των αντίστοιχων καταγραφόμενων θερμοκρασιών του σταθμού βάσης και της τοπικής θερμοβαθμίδας της περιοχής και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης.

- ✓ **Δυναμική ή Δυνητική Εξατμισιδιαπνοή: (ETp)**

Για τον υπολογισμό της δυνητικής Εξατμισιδιαποής μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση του Thornwaite.

- ✓ **Πραγματική εξατμισιδιαπνοή: (ETr)**

Ο υπολογισμός της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής γίνεται σε μηνιαία βάση, για το σύνολο των ετών της περιόδου για την οποία υπάρχουν στοιχεία και χρησιμοποιούνται τα κατακρημνίσματα, η υδατοσυγκράτηση, η δυναμική εξατμισιδιαπνοή, η διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα του εδάφους. Η πραγματική εξατμισιδιαπνοή, αφορά τη μέγιστη ποσότητα νερού που μέσω της εξάτμισης και της διαπνοής θα επέστρεφε στην ατμόσφαιρα **εάν υπήρχαν απεριόριστες ποσότητες νερού**. Προκύπτει από τη διαφορά των κατακρημνισμάτων (P) μείον την υδατοσυγκράτηση (L_P) και μείον τη μηνιαία κατανάλωση εδαφικής υγρασίας (Σχήμα 23).

Σχήμα 23: Η Σχέση του δυναμικού με την πραγματική εξατμισιδιαπνοής

✓ **Μέγιστη διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα του εδάφους (Sto)**

Ο υπολογισμός της μέγιστης διαθέσιμης υδατοχωρητικότητας του εδάφους Sto δεν περιλαμβάνεται στο παρόν πόνημα. Απαιτεί εδαφοτομές και μετρήσεις που δημοσιεύτηκαν στο (Ganatsios et. al, 2021). Αν δεν είναι εφικτές οι μετρήσεις της, το μέγεθός της εκτιμάται με επιτόπου μετάβαση στην περιοχή ενδιαφέροντος. Το αντικείμενο της προαναφερθείσας έρευνας ήταν η ανάδειξη της σημασίας του Sto για την ανάπτυξη του δάσους και κάποια από τα αποτελέσματά της δίνονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Μετρούμενες σχέσεις βάθους εδάφους και μέγιστης διαθέσιμης υδατοτωρητικότητας εδάφους (Ganatsios et. al, 2021).

Βάθους εδάφους	Μέγιστη Υδατοχωρητικότητα εδάφους
45cm	71mm
60 cm	90 mm
75 cm	103mm
90cm	115mm

Κατά την περίοδο έρευνας (2001-2003), συνολικό υδατικό πλεόνασμα διαθέσιμο για απορροή ή διήθηση εμφανίστηκε κατά επιπλέον δύο μήνες στα ρηχότερα εδάφη συγκριτικά με τα βαθύτερα. Αντίθετα, στα βαθύτερα εδάφη, συγκρατείται 47mm/έτος περισσότερο νερό που είναι διαθέσιμο για την ανάπτυξη της βλάστησης. Τιμές υδατοχωρητικότητας μεγαλύτερες από 100mm βρέθηκε ότι μπορούν να επεκτείνουν τη βλαστητική περίοδο κατά δύο επιπλέον μήνες. Τα υψηλότερα δέντρα (με διαφορά 5 μέτρων από τα παρακείμενα) βρέθηκαν στην πειραματική επιφάνεια με το μεγαλύτερο βάθος εδάφους. Η εποχική διακύμανση της εδαφικής υγρασίας και το βάθος του εδάφους είναι σημαντικοί περιοριστικοί παράγοντες της βλαστητικής ανάπτυξης. Ιδιαίτερα κατά την παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο, λίγα εκατοστά επιπλέον εδάφους μπορεί να κάνουν τη διαφορά μεταξύ επιβίωσης και θανάτου. Υπό αυτή την οπτική γωνία, η αποτροπή της διάβρωσης είναι υψίστης σημασίας.

Μόνο έτσι λοιπόν, συμπληρώνοντας την πορεία διακύμανσης της εδαφικής υγρασίας (που εξαρτάται από τη μέγιστη διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα του εδάφους) ολοκληρώνεται το μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου και υπολογίζεται η απορροή. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι εκτίμηση της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής ET_r, του δείκτης επάρκειας υγρασίας (ως το πηλίκο της πραγματικής με τη δυναμική εξατμισιδιαπνοή) και του συνολικού υδατικού πλεονάσματος που είναι διαθέσιμο για απορροή Q και διήθηση.

- ✓ **Όγκος Απορροής (Ο.Α.):**

Η πλεονάζουσα ποσότητα Q που τελικά απορρέει, παρατηρείται πως εμφανίζεται συγκεντρωμένη στους πλεονασματικούς μήνες, ενώ εμφανίζεται μηδενική στους ελλειμματικούς μήνες. Στην πραγματικότητα η απορροή συνεχίζει να υπάρχει έστω και σε μικρές ποσότητες και κατά τους πρώτους, μετά την πλεονασματική περίοδο, ελλειμματικούς μήνες. Το φαινόμενο οφείλεται στην αποθήκευση μέρους της διηθούμενης απορροής στους υπόγειους υδροφορείς της περιοχής που εκφορτίζονται σταδιακά στη λεκάνη με μικρή ή μεγάλη χρονική καθυστέρηση.

Ο.Α. = (Σ.Υ.Π. – Δ.Ν.) * Α

όπου: Α = έκταση λεκάνης

όταν το Σ.Υ.Π. < Δ.Ν. τότε Δ.Ν. = Β * Σ.Υ.Π. όπου: Β = συντελεστής

Συνήθως η παραπάνω απόκλιση διορθώνεται με την ακόλουθη σχέση:

$Q_n = a.Q + (1-a).Q_{n-1}$ (a = παράμετρος που συνήθως λαμβάνει την τιμή 0,5)

Σε κάθε λεκάνη με βάση της βαθμίδες βροχής, την μέση υδατοσυγκράτηση, τη διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης, τον αριθμό των βροχών, τη διηθητικότητα (περατότητα) των διαφόρων γεωυποθεμάτων και του ποσοστού συμμετοχής της στην επιφάνεια, μπορεί να υπολογισθει η μέση ετήσια διηθητικότητα (Κ) των εκάστοτε λεκανών απορροής.

Οι εξισώσεις που βασίζεται στο βελτιωμένο μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου είναι οι ακόλουθες:

0	$St_{n,} < 0$
$St_n = St_n$	$0 \le St_{n,} \le St_o$
St_o	$St_{n,} > St_o$
$Q = 0$	$St_{n,} \le St_o$
St_o	$St_{n,} > St_o$

$$ET_p = P - Q - St_n + St_{n-1}$$

όπου:

St, = St_{n-1} + P – ET_p

St_o = μέγιστη διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα του εδάφους (mm)

St = υπάρχουσα διαθέσιμη εδαφική υγρασία (mm)

Q = απορροή (mm)

ET_p = δυναμική εξατμισιδιαπνοή (mm)

Etr = πραγματική αληθής) εξατμισιδαπνοή (mm)

P = βροχόπτωση (mm)

n = αριθμός χρονικού διαστήματος μέτρησης των μεγεθών του υδατικού ισοζυγίου (συνήθως 1 μήνας).

Πίνακας 13: Οι εξισώσεις του υδατικού ισοζυγίου

Υδατικό Πλεόνασμα: (Υ.Π.)	***Υδατικό Έλλειμμα: (Υ.Ε.)***
Εάν $P - L_P - ET_P > 0$ τότε Υ.Π. = $P - L_P - ET_P$	*Εάν $P - L_P - ET_P < 0$ τότε Υ.Ε. = I $P - L_P - ET_P$ I*
Εάν $P - L_P - ET_P \leq 0$ τότε Υ.Π. = 0	Εάν $P - L_P - ET_P \geq 0$ τότε Υ.Ε. = 0
Αθροιστικό Υδατικό Έλλειμμα Εδάφους: (APWL)	***Πορεία Διακύμανσηςτης Εδαφικής Υγρασίας: (St)***
$(APWL)_I = (APWL)_{I-1} + (Y.E.)_I$	*$St = St_o * e^{-(APWL) / Sto}$*
όταν Υ.Π. > 0 τότε	*όπου: St_o = μέση διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα*
$(APWL)_I = St_o [I_n (St_o) – I_n (St)]$	*όταν το Υ.Π. > 0 τότε $St_i = St_{i-1} – St_i \leq 0$ τότε $\Delta St_i = 0$*
Πραγματική Εξατμισιδιαπνοή: (ET_r)	***Καταγραφόμενο Υδατικό Έλλειμμα: (Κ.Υ.Ε.)***
όταν $\Delta St = 0$ τότε $ET_r = ET_P$	*Κ.Υ.Ε. = $ET_P - ET_r$*
όταν $\Delta St > 0$ τότε E ~ = $P - L_P + \Delta St$	
Συνολικό Υδατικό Πλεόνασμα: (Σ.Υ.Π.)	***Διηθούμενο Νερό: (Δ.Ν.)***
Εάν $St < St_o$ τότε Σ.Υ.Π. = 0	Το ετήσιο διηθούμενο νερό υπολογίζεται από τη σχέση: Δ.Ν. = Κ * n * t
Εάν $St = St_o$ τότε $(Σ.Υ.Π.)_I = St_i + Υ.Π._i – St_o$	*όπου: Κ = υδραυλική αγωγιμότητα, n = αριθμός των βροχερών ημερών, t = διάρκεια της βροχής σε ώρες/ημέρα*

8.2. Υπολογισμός Υδατοπαροχών

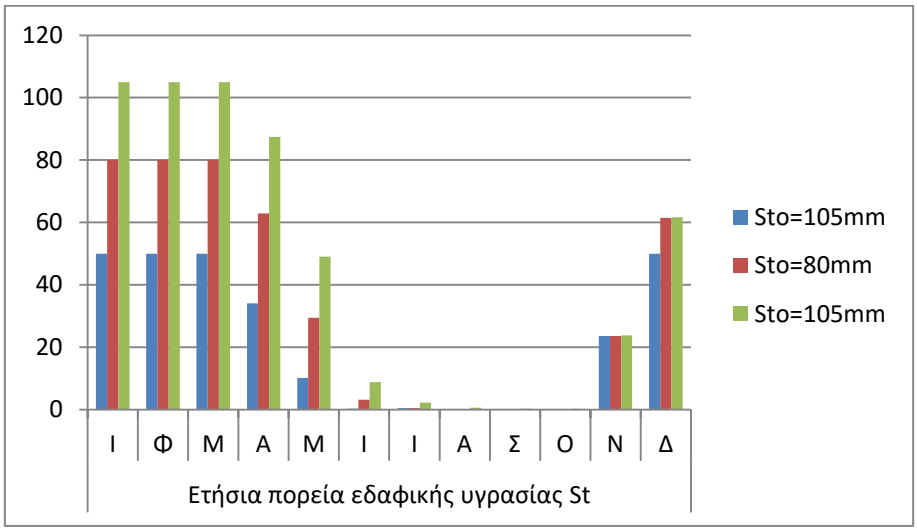
Για τον υπολογισμό των **ελάχιστων υδατοπαροχών** απαιτούνται μετρήσεις της βασικής υδατοπαροχής, συνήθως σε επιλεγμένες θέσεις με τη μέθοδο Στάθμης – Παροχής, από τις οποίες διαπιστώνονται διακυμάνσεις των μέσων τιμών της βασικής υδατοπαροχής κατά μήνα. Η υγρασιακή φόρτιση του εδάφους δεν πρέπει να αποτελεί μετρήσιμη βασική παροχή. Ο υπολογισμός των **μέγιστων υδατοπαροχών** ($_{max}Q_T$) αφορά, τόσο τη μέγιστη αποδεκτή περίοδο επαναφοράς (επανάληψης) που λαμβάνεται συνήθως ίση με Τ=100 έτη (μέγιστη πλημμυρική παροχή σχεδιασμού των υδρονομικών και υδραυλικών έργων), όσο και την αντίστοιχη μέγιστη παροχή με περίοδο επανάληψης όση και η διάρκεια

του χρόνου κατασκευής ενός έργου. Από το σύνολο των χρησιμοποιούμενων εμπειρικών και ημιεμπειρικών μεθόδων, η χρήση της ορθολογικής μεθόδου ενέχει ιδιαίτερη σημασία γιατί περιλαμβάνει περισσότερους και ακριβέστερους συντελεστές υπολογισμού, όπως ο συντελεστής αιχμής της πλημμύρας, η μέση μέγιστη ένταση βροχής ανηγμένη στο χρόνο συγκέντρωσης κ.α. Ως αποτέλεσμα, η μέθοδος αυτή θεωρείται πιό τεκμηριωμένη και στην πράξη να δίνει πιό ακριβή αποτελέσματα από τις υπόλοιπες μεθόδους υπολογισμού της $_{max}Q_{100.}$ Στον Πίνακα 14, φαίνονται οι διαφορές υδατικού ελλείμματος λόγω διαφοράς πραγματικής-δυνητικής εξατμισιδιαπνοής και της μέγιστης διαθέσιμης υδατοχωρητικότητας του εδάφους.

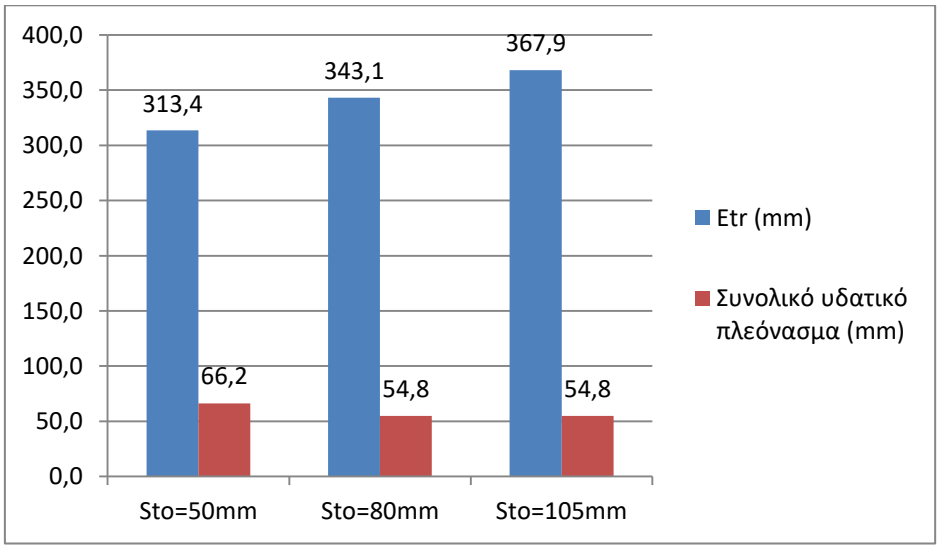
Πίνακας 14: Το μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου για τρία βάθη εδάφους με τιμές μέγιστης υδατοχωρητικότητας Sto 50mm, 80mm και 105mm

Υδρολογικά μεγέθη (mm)	ΜΗΝΑΣ												ΈΤΟΣ
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
Κατακρημνίσματα, P (mm)	36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Υδατοσυγκράτηση	1,4	1,3	1,2	1,4	1,3	1,5	1,7	1,4	1,4	1,2	1,4	1,4	**16,7**
Θερμοκρασία αέρα, t (^{o}C)	5,2	6,7	9,7	14,2	19,6	29,2	26,6	26,0	21,8	16,2	11,0	6,9	16,09
Δυναμικό εξατμισιδιαπνοής, Etp (mm)	6,8	10,4	24,4	50,8	99,1	203,7	165,4	153,7	99,9	55,2	24,4	10,6	**904,5**
Υδατικό πλεόνασμα, (P-Lp-Etp)>0 (mm)	28,6	24,3	15,0	0	0	0	0	0	0	0	28,5	42,8	**139,3**
Υδατικό έλλειμμα, (P-Lp-Etp)<0 (mm)	0	0	0	19,3	60,7	180,1	146,4	137,4	77,5	19,9	0	0	**641,3**
Αθροιστικό υδατικό έλλειμα, A.P.W.L (mm)	0	0	0	19,3	80,0	260,1	406,5	543,9	621,4	641,3	156	56	**56**
Πορεία διακύμανσης εδαφικής υγρασίας, St (mm)	**105**	**105**	**105**	**87,4**	**49,0**	**8,8**	**2,2**	**0,6**	**0,3**	**0,2**	**23,8**	**61,6**	**61,6**
Κατανάλωση εδαφικής υγρασίας, DSt (mm)	0	0	0	17,59	38,39	40,20	6,63	1,60	0,31	0,05	0	0	**104,8**
Πραγματική εξατμισιδιαπνοή, Etr (mm)	6,8	10,4	24,4	49,2	76,8	63,8	25,7	17,9	22,7	35,3	24,4	10,6	**367,9**
Καταγραφόμενο υδατικό έλλειμμα, Etp-Etr (mm)	0	0	0	1,7	22,3	139,9	139,7	135,8	77,2	19,9	0	0	**536,5**
Συνολικό υδατικό πλεόνασμα για Sto=105mm, (mm)	24,2	19,9	10,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**54,8**
Αθροιστικό υδατικό έλλειμα, A.P.W.L (mm)	0	0	0	19,3	80,0	260,1	406,5	543,9	621,4	641,3	97,6	21,1	**21,1**
Πορεία διακύμανσης εδαφικής υγρασίας, St (mm)	**80**	**80**	**80**	**62,89**	**29,44**	**3,10**	**0,50**	**0,09**	**0,03**	**0,03**	**23,6**	**61,4**	**61,4**
Κατανάλωση εδαφικής υγρασίας, DSt (mm)	0	0	0	17,11	33,45	26,34	2,60	0,41	0,06	0,01	0	0	**80**
Πραγματική εξατμισιδιαπνοή, Etr (mm)	6,8	10,4	24,4	48,7	71,8	49,9	21,7	16,7	22,5	35,3	24,4	10,6	**343,1**
Καταγραφόμενο υδατικό έλλειμμα, Etp-Etr (mm)	0	0	0	2,1	27,3	153,8	143,8	137,0	77,4	19,9	0	0	**561,3**
Συνολικό υδατικό πλεόνασμα για Sto=80mm, (mm)	24,2	19,9	10,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**54,8**
Αθροιστικό υδατικό έλλειμα, A.P.W.L (mm)	0	0	0	19,3	80,0	260,1	406,5	543,9	621,4	641,3	37,5	0	**0,0**
Πορεία διακύμανσης εδαφικής υγρασίας, St (mm)	**50**	**50**	**50**	**34,0**	**10,1**	**0,28**	**0,50**	**0,09**	**0,03**	**0,03**	**23,6**	**50**	**50,0**
Κατανάλωση εδαφικής υγρασίας, DSt (mm)	0	0	0	16,0	23,9	9,82	0,00	0,41	0,06	0,01	0	0	**50,2**
Πραγματική εξατμισιδιαπνοή, Etr (mm)	6,8	10,4	24,4	47,5	62,3	33,4	19,1	16,7	22,5	35,3	24,4	10,6	**313,4**
Καταγραφόμενο υδατικό έλλειμμα, Etp-Etr (mm)	0	0	0	3,3	36,8	170,3	146,4	137,0	77,4	19,9	0	0	**591,1**
Συνολικό υδατικό πλεόνασμα για Sto=50mm, (mm)	24,2	19,9	10,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	11,4	**66,2**

Από τον πίνακα 14 προκύπτουν τα εξής: Το αρχικό υδατικό πλεόνασμα του ύδατος που φθάνει στο έδαφος διαφοροποιείται από το τελικό που είναι διαθέσιμο για βαθύτερη διήθηση ή απορροή διότι παρεμβαίνει το έδαφος. Ανάλογα με τη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας και και τη μέγιστη υδατοχωτηρικότητά του εδάφους που εξαρτάται από το βάθος και τη δομή του, καθορίζεται η πορεία της απομένουσας ποσότητας του νερού.



Σχήμα 24: Η ετήσια πορεία διακύμανσης εδαφικής υγρασίας St, για τρεις διαφορετικές μέγιστες υδατοχωρητικότητες εδάφους Sto (mm)



Σχήμα 24: Η διαφοροποίηση των τιμών της πραγματικής εξατμισιδιαπνοής που εξαρτώνται από τη μέγιστη υδατοχωρητικότητα του εδάφους (που εξαρτάται από τη δομή και το βάθος του).

Η δυνητική εξατμισιαπνοή ETp των 904,5mm απέχει πολύ από τα 313mm της ETr. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 24, το συνολικό υδατικό πλεόνασμα που είναι διαθέσιμο για απορροή ή βαθύτερη διήθηση (μετά τον υδατικό κορεσμό του εδάφους) είναι μεγαλύτερο (όπως είναι φυσικό) στα ρηχότερα εδάφη (Sto=50mm).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ

Βουζαράς Α., Καραμήτρος Ε., 1981. ***Μεταβολή υδρολογικών χαρακτηριστικών μετά από πυρκαγιά, στην περιοχή λεκανών απορροής αειφύλλων πλατυφύλλων Όσσας***. Δασική Έρευνα. Τόμος ΙΙ (2): 135-171.

Γκανάτσιος Χ., 2004. ***Αλληλεπιδράσεις των συστημάτων συγκομιδής ξύλου και της συμπεριφοράς των δασικών οικοσυστημάτων (υδρονομικοί και εδαφικοί παράγοντες*).** Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ.

Γκανάτσιος Χ., Μαρίνος Δ., Παπαθανασίου Β., Παυλίδης Β., Κάλφα Α. 2021. ***Παραδείγματα συνεργασίας της Δασικής Υπηρεσίας με το ΑΠΘ στα πλαίσια της Διαχείρισης των Υδάτινων Πόρων***. Πρακτικά 20ου Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου, 3-6/10/2021, Τρίκαλα, σελ. 145-154

Γκανάτσιος Χ., Δημητρακόπουλος Α., Βάρρας Γ., Παυλίδης Β., Βλασταρά Μ., Πανουργιάς Γ., 2022. ***Ολοκληρωμένος σχεδιασμός αντιπυρικών μικροταμιευτήρων στον ορεινό ελλαδικό χώρο. Το παράδειγμα του αντιπυρικού φράγματος Ταξιάρχη Χαλκιδικής και η συμβολή του στην έγκαιρη κατάσβεση πυρκαγιάς***. Πρακτικά 15ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, «Αριστον μεν ύδωρ», 2-3/6/2022, Θεσσαλονίκη, p. 131

Γκανάτσιος Χ. 2024. ***Εμπλουτισμός των αγροδασικών συστημάτων με μικρολιμνοδεξαμενές***. 1ο Πανελλήνιο Αγροδασικό Συνέδριο, Καρπενήσι 17-19 Οκτωβρίου 2024

Δασαρχείο Ταξιάρχη-Βραστάμων 1991. ***Διαχειριστική Μελέτη Πανεπιστημιακού Δάσους Ταξιάρχη Χαλκιδικής***.

Κωτούλας Δ., 1995. ***Μαθήματα Δασικής Υδρολογίας***. Εκδόσεις Α.Π.Θ.

Μανέτας Ι. 2019. ***Τι θα έβλεπε η Αλίκη στη χώρα των φυτών***. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.

Μπαλούτσος Γ., 1988. ***Υδρολογική Συμπεριφορά των πειραματικών λεκανών απορροής Βαρετάδας Αμφιλοχίας σε καταιγίδες ανοδικού τύπου***, Δασικά Χρονικά, Τεύχος 1, Φεβρ. 1988, σελ. 21, 33

Μπαλούτσος Γ., Αθ. Μπουρλέτσικας, Κ. Καούκης, 2013. ***Μελέτη και διερεύνηση χαρακτηριστικών ετήσιων και μηνιαίων απορροών μιας δασικής πειραματικής υδρολογικής λεκάνης της ανατολικής Όσσας (Κισσάβου).*** Γεωτεχνικά επιστημονικά θέματα 1/2013 ISSN 1105-9478 Τόμος 22, Σειρά ΙΙ, σελ. 24-37

Μπαλούτσος Γ., Α. Ρούσσος, 2015. ***Μηχανισμοί σχηματισμού απορροής σε δασικές λεκάνες και η συμβολή τους στην αξιοποίηση του νερού και στην προστασία του ορεινού φυσικού περιβάλλοντος.*** Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα – Σειρά ΙΙ – Τόμος 24– Τεύχος 1/2015, σελ. 4-22

Μπαλούτσος Γ., Αθ. Μπουρλέτσικας, Δ. Στάθης, Κ. Καούκης, Α. Ρούσσος, 2017. ***Ανάλυση και διερεύνηση ακραίων επεισοδίων βροχής των ΒΑ πλαγιών της Όσσας (του Κισσάβου) και της απόκρισης σε αυτά μιας δασωμένης πειραματικής λεκάνης.*** Γεωτεχνικά επιστημονικά θέματα. 1/2017, ISSN 1105-9478, Τόμος 26 Σειρά VI, σελ. 4-23

Μπαλούτσος Γ. 2020. ***Ακραίες πλημμύρες και ορεινές υδρολογικές λεκάνες στην Ελλάδα***. dasarxeio.com, 26/02/2020, https://dasarxeio.com/2020/02/26/76003/

Παπούλιας Ι., 1972 α: ***Συμβολή στη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ έντασης και σύνθεσης της βροχής και επιφανειακής απορροής σε χορτολιβαδικά εδάφη***. Δελτ. Ερευν. 49, σελ. 28, ΥΠ.Γ. Γεν. Διεύθυνση Δασών, ΚΔΕΒΕ, Θεσσαλονίκη.

Παπούλιας Ι., 1972 β*:* ***Επίδραση της βόσκησης ποώδους βλάστησης στη διήθηση του ύδατος εντός του εδάφους***. Δελτ. Ερευν. 50, ΥΠ.ΓΕ, ΚΔΕΒΕ, Θεσσαλονίκη.

Παυλίδης Θ., 1997. ***Μέθοδοι χειρισμού λεκανών απορροής και κοιτών για αύξηση των υδατικών διαθέσιμων, το παράδειγμα του χειμάρρου Μορνιώτικο ρέμα***. Πρακτικά διεθνούς συνεδρίου για το νερό. Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Θεσσαλονίκης, 1997.

Παυλίδης Θ., 2001. ***Έρευνα αντιμετώπισης υδατικών προβλημάτων και ορθολογικής διαχείρισης και αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού του νομού Πιερίας***. Ερευνητικό έργο της Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ.

Παυλίδης Θ., 2005. ***Δασική Υδρολογία & Υδάτινοι Πόροι***. Εκδόσεις Α.Π.Θ.

Σακκάς 2004. ***Τεχνική Υδρολογία-Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων***, Εκδόσεις Αϊβαζή

Aponte Cr., García L.V., Perez-Ramos I., Gutiérrez E., 2011. ***Oak trees and soil interactions in Mediterranean forests: A positive feedback model***. Journal of Vegetation Science 22(5):856 – 867. doi:10.1111/j.1654-1103.2011.01298.x

Aponte Cr., García L.V., Marañón T., 2013. ***Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence***. Forest Ecology and Management 2013(309):36, doi:10.1016/j.foreco.2013.05.035

Baumgartner A., 1965. ***Untersuchungen uber den Warme – Wasserhaushalt eines jungen Waldes,*** Ber. Der Deuts. Wett 1956/5, pp. 4-53.

Chang, M., 2006. ***Forest Hydrology: An Introduction to Water and Forests***. Second Edition. Taylor and Francis, Boca Raton FL, CRC Press, USA.

Corti G., Agnelli A., Cocco S., Cardelli V., Masse J., Courchesne F. 2019. ***Soil affects throughfall and stemflow under Turkey oak (Quercus cerris L.),*** Geoderma, Volume 333, pp.43-56, ISSN 0016.7061, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.010.

Delfs J., 1955. ***Die Nederschlagszuzuckhaltung in Walde,*** Mitt. Des Arbeitskreises «Wasser», 1955/2, p. 54.

Engler A., 1919. ***Untersuchungen uber den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewasser,*** Mitt. Des Sweiz. Anstalt fur das forstl, Versuckswsen, Zurich 1919 (Strele 1950, p. 84).

Ganatsios, H., Tsioras, P.A. & Pavlidis, T., 2010. ***Water yield changes as a result of silvicultural treatments in an oak ecosystem.*** Forest Ecology & Management 260 (8), p. 1367-1374. doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.033.

Ganatsios H., Petaloudi LM., Oikonomou A. 2019. ***Proposal of a Three-Step Water Management Paradigm for Multi-Purpose Forestry: The Case of Mountainous Halkidiki-Greece***. 8th Edition of the International Symposium Forest and Sustainable Development. Ed. Brasov 27-27 October 2018. Series II, Vol. 11 (60) No. 2 – 2019, pp 127-138

Ganatsios, H., Tsioras, P., Papaioanou, A. & Blinn., Ch. R. 2021. ***Short term impacts of harvesting operations on soil properties in a Mediterranean oak ecosystem*.** Croatian Journal of Forest Engineering 42(3), p.463-476, doi:10.5552/crojfe.2021.1100

Ganatsios, H., Papaioanou, A. Mantzanas K. Psilovikos T. Mpekiri S. Marotta F. Ouzounidis N. 2021. ***The environmental impact of the water holding capacity of soil in a Mediterranean oak ecosystem***. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, August 2021, Vol. 16, No. 2, p. 493 – 506; doi:10.26471/cjees/2021/016/194

Ganatsios H., Papaioanou E., Pipinis E., Valeta Ch., 2024. ***Topsoil and Tree Changes in an Oak Ecosystem within a Period of 37 Years***. Sustainability and Climate Change Vol. 17, No. 4. 40. pp. 281-297. https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/scc.2024.0032

Gessler A., Schaub M., McDowell NG. 2016. ***The role of nutrients in drought-induced tree mortality and recovery***. New Phytologist, vol.214/2, pp.513-520, https://doi.org/10.1111/nph.14340

Hewlett J.D., 1982. ***Principles of Forest Hydrology,*** Second ed. The Univ. of Georgia Press, Athens, U.S.A.

Hirata T., 1929. ***Contributions to the problem of the relation between forest and water in Japan***. Imp. Expt. St. Meguzo Tokyo, p. 41.

Huang Jie Ying, 2016. ***An Analytical Model of Rainfall Interception by Urban Trees***. **Final report.** https://mlws.landfood.ubc.ca/all-projects/huang-2016-an-analytical-model-of-rainfall-interception-by-urban-trees/

Lull, H.W., 1964. ***Ecological and silvicultural aspects***, 6/21-6/23. Handbook of Applied Hydrology. Edit. Vent e CHOW, McGraw-Hill N. York-London.

Makarieva, A. M. and Gorshkov, V. G., 2007. **Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land,** Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1013–1033, https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007

Mianabadi A., Coenders-Gerrits M., Shirazi P., Ghahraman B., Alizadeh A., 2019. ***A global Budyko model to partition evaporation into interception and transpiration,*** Volume 23, issue 12, Hydrology and Earth System Sciences, HESS, 23, 4983–5000, 2019. https://doi.org/10.5194/hess-23-4983-2019

Molchanov, A., 1960. ***The hydrological role of forest***, Moska (Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1963).

Momiyama Hiroki, Tomoomi Kumagai, Naoya Fujime, Tomohiro Egusa, Takanori Shimizu, 2023. ***Forest canopy interception can reduce flood discharge: Inferences from model assumption analysis*****.** Journal of Hydrology 623 (2023) 129843, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129843

Pearce, F. 2020. ***Weather makers. Forests supply the world with rain. A controversial Russian theory claims they also make wind***. https://www.science.org/content/article/controversial-russian-theory-claims-forests-don-t-just-make-rain-they-make-wind. doi: 10.1126/science.abd3856

Pickles BJ., Simard SW. 2017 a. ***Mycorrhizal Networks and Forest Resilience to Drought***. Chapter 18 - Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage, pp.319–339, Elsevier, Book. ISBN 9780128043127, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804312-7.00018-8.

Rowe P.B. and Hendrix T.M. 1951. ***Interception of rain and snow by second-growth ponderosa pine***. Amer. Geophys. Union Trans. 1951/32, 903-8.

Rutter A.J., Kershaw K.A. , Robins P.C., Morton A.J., 1971. ***A predictive model of rainfall interception in forests, Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine***, Agricultural Meteorology, Volume 9, Pages 367-384, ISSN 0002-1571, https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90034-3.

Simard SW. 2009 b. ***Mycorrhizal networks and complex systems: Contributions of soil ecology science to managing climate change effects in forested ecosystems***. Canadian Journal of Soil Science, 89(4), pp.369–382. https://doi.org/10.4141/cjss08078

Stephenson NL., Das AJ., Condit R., Russo SE., Baker PJ., Beckman NG., Coomes DA., Lines ER., Morris WK., Rüger N. 2014. ***Rate of Tree Carbon Accumulation Increases Continuously with Tree Size***. Nature 507:90-93.

Turc L. 1954. ***The water balance of the soil. Relationship between precipitation, evaporation and runoff***. Ann. Agron., 5 (1954), pp. 491-569

Wohlleben P., 2018. ***The Secret Network of Nature. The Delicate Balance of All Living Things***. Penguin Random House UK, London SW1V 2SA

Zanella A., Ponge JF., Andreetta A., et al. 2020. ***Combined forest and soil management after a catastrophic event*.** Journal of Mountain Science 17(10). https://doi.org/10.1007/s11629-019-5890-0

**με αστερίσκο είναι οι αναφορές που εμπεριέχονται εντός της παρατιθέμενης βιβλιογραφίας.*

Δ. ΑΣΚΗΣΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

Για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού που φθάνει στο έδαφος και είναι διαθέσιμη για απορροή και διήθηση, μπορεί να εφαρμοστεί το μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου. Στην πλήρη του μορφή, αυτό το μοντέλο υπολογίζει χωριστά τη διήθηση και την απορροή. Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται η μέγιστη διαθέσιμη υδατοχωρητικότητα του εδάφους και η μηνιαία πορεία κατανάλωσής της. Η διαφορά κατακρημνισμάτων-υδατοσυγκράτησης συν το ποσό κατανάλωσης εδαφικής υγρασίας, δίνει την πραγματική εξατμισιδιαπνοή. Η διαφορά δυναμικού εξατμισιδιαπνοής & πραγματικής εξατμισιδιαπνοής, δίνει το καταγραφόμενο μηνιαίο υδατικό έλλειμμα. Όμως, για τις ανάγκες της άσκησης που ακολουθεί, ζητείται μόνο η ποσότητα του νερού που φθάνει στο έδαφος.

1. Αναφέρετε και τεκμηριώστε 3 παραδείγματα αλληλεπιδράσεων στα φυσικά οικοσυστήματα που θα σας βοηθήσουν να εμβαθύνετε την αντίληψή του υδρολογικού κύκλου και ειδικότερα της Δασικής Υδρολογίας με στόχο την παραγωγή νερού.

2. Στο περιαστικό δάσος Θεσσαλονίκης (εικονιζόμενη έκταση επόμενης σελίδας με διαστάσεις πλευράς δρόμου 182μ και 234μ η κάτω διαγώνιος), και έκταση 3,8ha, να υπολογίστει το νερό που φτάνει στο έδαφος σε tn με τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου.

   Να εξεταστούν οι ακόλουθες περιπτώσεις σε έκταση καλυμμένη με δάσος & βαθμό συγκόμωσης 100%:

   Α. Εξαιρετικά πυκνή αναγέννηση πεύκης

   Β. Κωνοφόρων χωρίς υπόροφο

   Γ. Κωνοφόρων με υπόροφο αείφυλλων πλατύφυλλων

   Δ. Αείφυλλων πλατύφυλλων

   Ε. Υψηλό δάσος φυλλοβόλων πλατυφύλλων δρυοδασών

   ΣΤ. Μικτό δάσος 60% φυλλοβόλων πλατυφύλλων και 40% κωνοφόρων

3. Να προτείνετε ένα σχέδιο υδρολογικής διαχείρισης με έμφαση στην παραγωγή νερού. Να σχεδιαστούν πάνω στο χάρτη οι προτεινόμενες επεμβάσεις που αυξάνουν αυτή την ποσότητα του νερού που φθάνει στο έδαφος, να ποσοτικοποιηθούν και να απεικονιστούν οι διαφορές (πριν, μετά) σε σχετικά σκαριφήματα. Σχεδιάστε πάνω στο χάρτη λαμβάνοντας υπ' όψιν τα μήκη των πλευρών της επιφάνειας και εμβαδομετρήστε τις επιφάνειες με τους προτεινόμενους χειρισμούς. Στο παράδειγμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται ενδεικτικοί χειρισμοί. Κάντε τις προτάσεις σας χρησμιοποιώντας ελεύθερα, διάφορα ποσοστά επεμβάσεων και αποτυπώστε τα στο σχέδιο.
4. Να γίνει το συνολικό συγκριτικό (για όλα τα είδη βλάστησης) διάγραμμα ετήσιου υδατικού πλεονάσματος σε tn.

<u>Δεδομένα</u>: Στον πίνακα που ακολουθεί παρέχονται τα μηνιαία ύψη βροχής της περιοχής της περιόδου 1959-1997 καθώς και οι αντίστοιχες θερμοκρασίες αέρα (Πηγή Μ.Σ. ΕΜΥ Καλαμαριά).

Πίνακας 1: Δεδομένα για την επίλυση της άσκησης

Υδρολογικά μεγέθη	ΜΗΝΑΣ												ΕΤΟΣ
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
Κατακρημνίσματα, P (mm)	36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Υδατοσυγκράτηση, Lp (mm)													
Θερμοκρασία αέρα, t (^{o}C)	5,2	6,7	9,7	14,2	19,6	29,2	26,6	26,0	21,8	16,2	11,0	6,9	16,09
Δυναμικό εξατμισιδιαπνοής, Etp (mm)													
Υδατικό πλεόνασμα, (P-Lp-Etp)>0 (mm)													
Υδατικό έλλειμμα, (P-Lp-Etp)<0 (mm)													
Γεωγραφικό Πλάτος 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	

Α. Εξαιρετικά πυκνή φυσική αναγέννηση πεύκης

Β: Πεύκη χωρίς υπόροφο

Γ. Πεύκη με υπόροφο αειφύλλων πλατυφύλλων

Δ. Αειφύλλα πλατύφυλλα

Ε. Φυλλοβόλα πλατύφυλλα

ΣΤ. Μικτό δάσος 60% φυλλοβόλων πλατυφύλλων και 40% κωνοφόρων

Επίλυση- Υπολογισμός υδατοσυγκράτησης I

Πίνακας 2: Επιλογή συντελεστών υδατοσυγκράτησης

Κατηγορία βροχής (mm)	Σχέσεις υδατοσυγκράτησης I –κατακρημνισμάτων Px *					
	Δρυς	Οξιά	Καστανιά	Πεύκο	Θάμνοι	Λιβάδι
0-3,00	I=0,69336Px	I=0,61435Px	I=0,59973Px	I=0,88924Px	0,537812 Px	0,397524 Px
3,01-5,00	I=0,48041Px	I=0,44002Px	I=0,43348Px	I=0,56143Px	0,418665 Px	0,299958 Px
5,01-10,00	I=0,26864Px	I=0,25345Px	I=0,24861Px	I=0,38711Px	0,202392 Px	0,143982 Px
10,01-15,00	I=0,18844Px	I=0,17810Px	I=0,17454Px	I=0,32212Px	0,141206 Px	0,082038 Px
15,01-20,00	I=0,15636Px	I=0,14017Px	I=0,13954Px	I=0,26984Px	0,098314 Px	0,047290 Px
20,01-25,00	I=0,13601Px	I=0,12242Px	I=0,12190Px	I=0,20263Px	0,069323 Px	0,027591 Px
25,01-30,00	I=0,11814Px	I=0,11341Px	I=0,10891Px	I=0,18172Px	0,049667 Px	0,015332 Px
30,01-40,00	I=0,09691Px	I=0,09110Px	I=0,08844Px	I=0,15836Px	0,037442 Px	0,008851 Px
40,01-50,00	I=0,07803Px	I=0,07416Px	I=0,07156Px	I=0,13589Px	0,029766 Px	0,006723 Px
50,01-60,00	I=0,06887Px	I=0,06543Px	I=0,06316Px	I=0,11722Px	0,026321 Px	0,004892 Px
60,01-70,00	I=0,06212Px	I=0,05965Px	I=0,05776Px	I=0,09716Px	0,022854 Px	0,003724 Px
70,01-80,00	I=0,05541Px	I=0,05965Px	I=0,05121Px	I=0,08680Px	0,020096 Px	0,002961 Px
80,01-100	I=0,04970Px	I=0,05329Px	I=0,04606Px	I=0,07854Px	0,018832 Px	0,002412 Px
100,01-120	I=0,04363Px	I=0,04821Px	I=0,04045Px	I=0,06893Px	0,016067 Px	0,002016 Px
120,01-140	I=0,03861Px	I=0,04232Px	I=0,03600Px	I=0,06165Px	0,012544 Px	0,001732 Px
140,01-160	I=0,03402Px	I=0,03785Px	I=0,03174Px	I=0,05412Px	0,009236 Px	0,000527 Px
160,01-190	I=0,02941Px	I=0,03337Px	I=0,02715Px	I=0,04486Px	0,007352 Px	0,000389 Px
190,01-220	I=0,02543Px	I=0,02820Px	I=0,02351Px	I=0,03976Px	0,005264 Px	0,000296 Px

Όπου Px, στο παράδειγμα, η μηνιαία βροχόπτωση. Για παράδειγμα τον Ιανουάριο, 36,8 mm αντιστοιχούν στην 8^{η} σειρά –κατηγορία βροχής (30-40mm) στην οποία επιλέγεται ανάλογα με τη βλάστηση, η αντίστοιχη σχέση υδατοσυγκράτησης-κατακρημνισμάτων. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 3: Υπολογισμός της υδατοσυγκράτησης Ι (ΣΙ) διαφόρων ειδών βλάστησης σε mm														
(mm)	**(mm)**	**Ι**	**Φ**	**Μ**	**Α**	**Μ**	**Ι**	**Ι**	**Α**	**Σ**	**Ο**	**Ν**	**Δ**	**Ετος**
Κατακρημνίσματα		36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Πεύκη	**Υδατοσυγκράτηση –**	5,8	5,7	5,5	5,9	6,0	6,0	4,8	4,1	5,0	5,5	6,4	6,4	67,3
Δρυς		3,6	3,5	3,2	3,6	3,5	3,5	3,3	2,8	3,2	3,2	3,7	3,8	40,8
Ποολίβαδο		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	4,5
Θάμνοι		1,4	1,3	1,2	1,4	1,3	1,5	1,7	1,4	1,4	1,2	1,4	1,4	16,7
Πεύκη με υπόροφο αείφυλλους θάμνους	Πίνακας 6 Γ.													
Κατακρημνίσματα που φθάνουν στον υπόροφο: Κατακρημνίσματα-Υδατοσυγκράτηση Πεύκης ανορόφου		31,0	30,3	35,1	31,6	38,4	23,6	19,1	16,3	22,4	35,3	48,0	48,5	379
Πεύκη με υπόροφο αείφυλλους θάμνους	Υδατο/ση υπορόφου Θάμνων	1,2	1,1	1,3	1,2	1,1	1,6	1,9	1,6	1,6	1,3	1,4	1,4	16,8
Πεύκη με υπόροφο αείφυλλους θάμνους	Υδατο/ση	7,0	6,8	6,6	7,1	7,2	7,6	6,7	5,7	6,5	6,9	7,8	7,9	83,8
Εξαιρετικά πυκνή αναγέννηση Πεύκης	Πίνακας 4 Α.													
Εξαιρετικά πυκνή αναγέννηση Πεύκης	Υδατο/ση υπορόφου	4,9	4,8	4,8	5,0	5,2	4,3	3,9	3,3	4,1	4,8	5,6	5,7	56,3
Εξαιρετικά πυκνή αναγέννηση Πεύκης	ΣΙ	10,7	10,5	10,3	10,9	11,2	10,3	8,7	7,4	9,1	10,3	12,0	12,1	123,6

Πίνακας 4: Α. Εξαιρετικά πυκνή φυσική αναγέννηση πεύκης

Υδρολογικά μεγέθη (mm)	ΜΗΝΑΣ												ΕΤΟΣ
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
Κατακρημνίσματα, P (mm)	36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Υδατοσυγκράτηση Ανορόφου	5,8	5,7	5,5	5,9	6,0	6,0	4,8	4,1	5,0	5,5	6,4	6,4	67,3
Κατακρημνίσματα που φθάνουν στον υπόροφο - Υδατοσυγκράτηση Ανορόφου	31,0	30,3	35,1	31,6	38,4	23,6	19,1	16,3	22,4	35,3	48,0	48,5	379,4
Υδατοσυγκράτηση Υπορόφου	4,9	4,8	4,8	5,0	5,2	4,3	3,9	3,3	4,1	4,8	5,6	5,7	56,3
Συνολική Υδατοσυγκράτηση	10,7	10,5	10,3	10,9	11,2	10,3	8,7	7,4	9,1	10,3	12,0	12,1	123,6
Θερμοκρασία αέρα, t (^{o}C)	5,2	6,7	9,7	14,2	19,6	29,2	26,6	26,0	21,8	16,2	11,0	6,9	16,09
Δυναμικό εξατμισιδιαπνοής, Etp (mm)	6,8	10,4	24,4	50,8	99,1	203,7	165,4	153,7	99,9	55,2	24,4	10,6	**904,5**
Υδατικό πλεόνασμα, (P-Lp-Etp)>0 (mm)	19,3	15,1	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	32,1	**90,4**
Υδατικό έλλειμμα, (P-Lp-Etp)<0 (mm)	0,0	0,0	0,0	24,3	65,9	184,4	150,2	140,7	81,5	24,7	0,0	0,0	**671,8**
Γεωγραφικό Πλάτος 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	
$J_i = \left(\frac{T_a}{5}\right)^{1,514}$	1,06	1,56	2,73	4,86	7,91	14,77	12,13	12,13	9,29	5,93	3,30	1,63	
$J = \sum_{1}^{12} J_i$													77,3
$\alpha = (675 * 10^{-9})J^3-(771 * 10^{-7})J^2+(179 * 10^{-4})J+0,492$ & κατά Serra, $\alpha = 0,016*J+0,5=1,73$													1,73

Πίνακας 5: <u>Β. Πεύκη χωρίς υπόροφο</u>

Υδρολογικά μεγέθη (mm)	ΜΗΝΑΣ												ΈΤΟΣ
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
Κατακρημνίσματα, P (mm)	36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Υδατοσυγκράτηση	5,83	5,70	5,52	5,94	6,03	6,00	4,84	4,13	4,98	5,54	6,38	6,44	**67,3**
Θερμοκρασία αέρα, t (^{o}C)	5,2	6,7	9,7	14,2	19,6	29,2	26,6	26,0	21,8	16,2	11,0	6,9	16,09
Δυναμικό εξατμισιδιαπνοής, Etp (mm)	6,8	10,4	24,4	50,8	99,1	203,7	165,4	153,7	99,9	55,2	24,4	10,6	**904,5**
Υδατικό πλεόνασμα, (P-Lp-Etp)>0 (mm)	24,20	19,93	10,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,59	37,82	**116,2**
Υδατικό έλλειμμα, (P-Lp-Etp)<0 (mm)	0,00	0,00	0,00	19,2	60,7	180,1	146,3	137,4	77,5	19,9	0,00	0,00	**641,3**
Γεωγραφικό Πλάτος 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	
$J_i = \left(\frac{T_a}{5}\right)^{1,514}$	1,06	1,56	2,73	4,86	7,91	14,77	12,13	12,13	9,29	5,93	3,30	1,63	
$J = \sum_{1}^{12} J_i$													77,3
$\alpha = (675 * 10^{-9})J^3-(771 * 10^{-7})J^2+(179 * 10^{-4})J+0,492$ & κατά Serra, $\alpha = 0,016*J+0,5=1,73$													1,73

Πίνακας 6: Γ. Πεύκη με υπόροφο αειφύλλων πλατυφύλλων

Υδρολογικά μεγέθη (mm)	ΜΗΝΑΣ												ΈΤΟΣ
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
Κατακρημνίσματα, P (mm)	36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Υδατοσυγκράτηση Ανορόφου	5,8	5,7	5,5	5,9	6,0	6,0	4,8	4,1	5,0	5,5	6,4	6,4	67,3
Κατακρημνίσματα που φθάνουν στον υπόροφο - Υδατοσυγκράτηση Ανορόφου	31,0	30,3	35,1	31,6	38,4	23,6	19,1	16,3	22,4	35,3	48,0	48,5	379,4
Υδατοσυγκράτηση Υπορόφου	1,16	1,13	1,31	1,18	1,14	1,64	1,87	1,60	1,55	1,32	1,43	1,44	**16,8**
Συνολική Υδατοσυγκράτηση	6,99	6,84	6,56	7,12	7,18	7,63	6,72	5,73	6,53	6,86	7,81	7,88	**83,8**
Θερμοκρασία αέρα, t (^{o}C)	5,2	6,7	9,7	14,2	19,6	29,2	26,6	26,0	21,8	16,2	11,0	6,9	16,09
Δυναμικό εξατμισιδιαπνοής, Etp (mm)	6,8	10,4	24,4	50,8	99,1	203,7	165,4	153,7	99,9	55,2	24,4	10,6	**904,5**
Υδατικό πλεόνασμα, (P-Lp-Etp)>0 (mm)	24,83	18,93	6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,96	37,35	**106,6**
Υδατικό έλλειμμα, (P-Lp-Etp)<0 (mm)	0,0	0,0	0,0	27,5	74,3	203,7	167,5	159,3	94,3	30,6	0,00	0,00	**757,2**

Πίνακας 7: <u>Δ. Αειφύλλα πλατύφυλλα</u>

Υδρολογικά μεγέθη (mm)	ΜΗΝΑΣ												ΈΤΟΣ
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
Κατακρημνίσματα, P (mm)	36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Υδατοσυγκράτηση	1,4	1,3	1,2	1,4	1,3	1,5	1,7	1,4	1,4	1,2	1,4	1,4	**16,7**
Θερμοκρασία αέρα, t (°C)	5,2	6,7	9,7	14,2	19,6	29,2	26,6	26,0	21,8	16,2	11,0	6,9	16,09
Δυναμικό εξατμισιδιαπνοής, Etp (mm)	6,8	10,4	24,4	50,8	99,1	203,7	165,4	153,7	99,9	55,2	24,4	10,6	**904,5**
Υδατικό πλεόνασμα, (P-Lp-Etp)>0 (mm)	28,6	24,3	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,5	42,8	**139,3**
Υδατικό έλλειμμα, (P-Lp-Etp)<0 (mm)	0,0	0,0	0,0	14,7	56,0	175,6	143,2	134,7	73,9	15,6	0,0	0,0	**613,7**

Πίνακας 8:<u>Ε. Φυλλοβόλα πλατύφυλλα Δρυοδάση</u>

Υδρολογικά μεγέθη (mm)	ΜΗΝΑΣ												ΈΤΟΣ
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
Κατακρημνίσματα, P (mm)	36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Υδατοσυγκράτηση	3,6	3,5	3,2	3,6	3,5	3,5	3,3	2,8	3,2	3,2	3,7	3,8	**40,8**
Θερμοκρασία αέρα, t (°C)	5,2	6,7	9,7	14,2	19,6	29,2	26,6	26,0	21,8	16,2	11,0	6,9	16,09
Δυναμικό εξατμισιδιαπνοής, Etp (mm)	6,8	10,4	24,4	50,8	99,1	203,7	165,4	153,7	99,9	55,2	24,4	10,6	**904,5**
Υδατικό πλεόνασμα, (P-Lp-Etp)>0 (mm)	26,5	22,1	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,2	40,5	**128,3**
Υδατικό έλλειμμα, (P-Lp-Etp)<0 (mm)	0,0	0,0	0,0	17,0	58,2	177,6	144,8	136,1	75,7	17,6	0,0	0,0	**626,9**

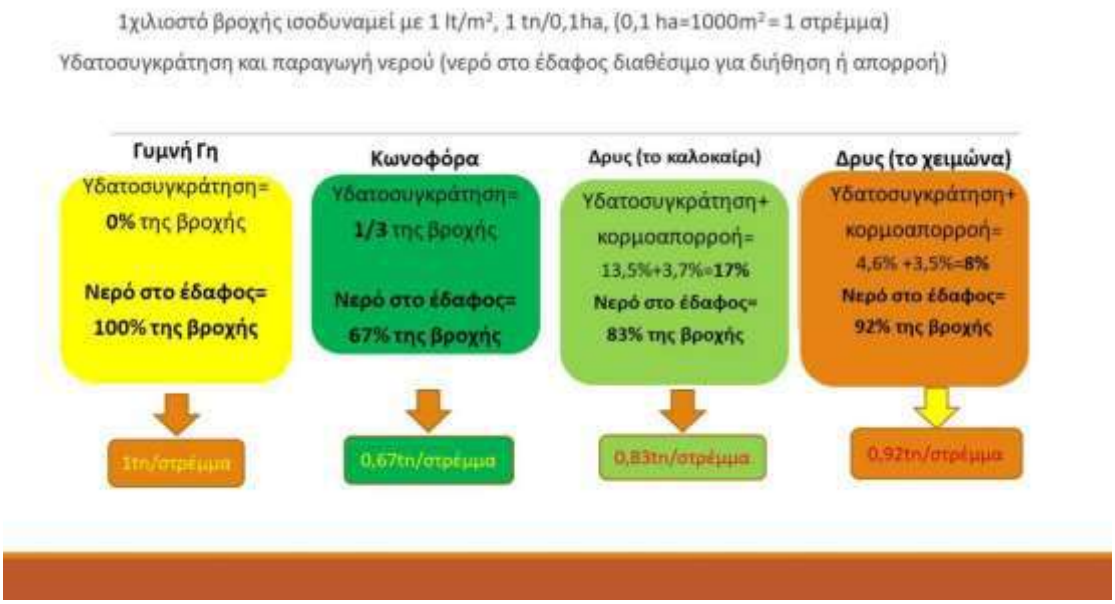
<u>ΣΤ. Μικτό δάσος 60% φυλλοβόλων πλατυφύλλων και 40% κωνοφόρων</u> <u>(βλ πιο κάτω, Πίνακας 10)</u>

Πίνακας 9:<u>Ποολίβαδο</u>

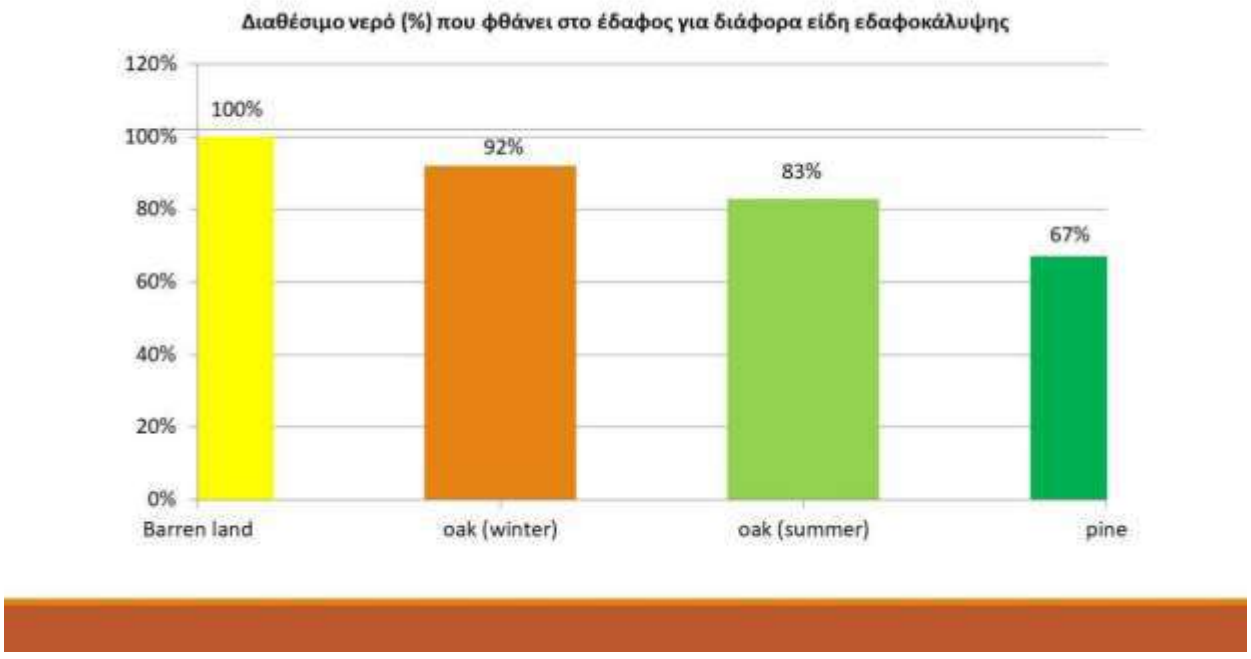
Η αραιωμένη ή αποψιλωμένη επιφάνεια των προτεινόμενων χειρισμών προσομοιάζει υδρολογικά με ποολίβαδο.

Υδρολογικά μεγέθη (mm)	ΜΗΝΑΣ												ΈΤΟΣ
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
Κατακρημνίσματα, P (mm)	36,8	36,0	40,6	37,5	44,4	29,6	23,9	20,4	27,4	40,8	54,4	54,9	446,7
Υδατοσυγκράτηση	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	**4,5**
Θερμοκρασία αέρα, t (^{o}C)	5,2	6,7	9,7	14,2	19,6	29,2	26,6	26,0	21,8	16,2	11,0	6,9	16,09
Δυναμικό εξατμισιδιαπνοής, Etp (mm)	6,8	10,4	24,4	50,8	99,1	203,7	165,4	153,7	99,9	55,2	24,4	10,6	**904,5**
Υδατικό πλεόνασμα, (P-Lp-Etp)>0 (mm)	29,7	25,3	15,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,7	44,0	**144,6**
Υδατικό έλλειμμα, (P-Lp-Etp)<0 (mm)	0,0	0,0	0,0	13,6	55,0	174,6	142,2	133,9	72,9	14,7	0,0	0,0	**606,8**

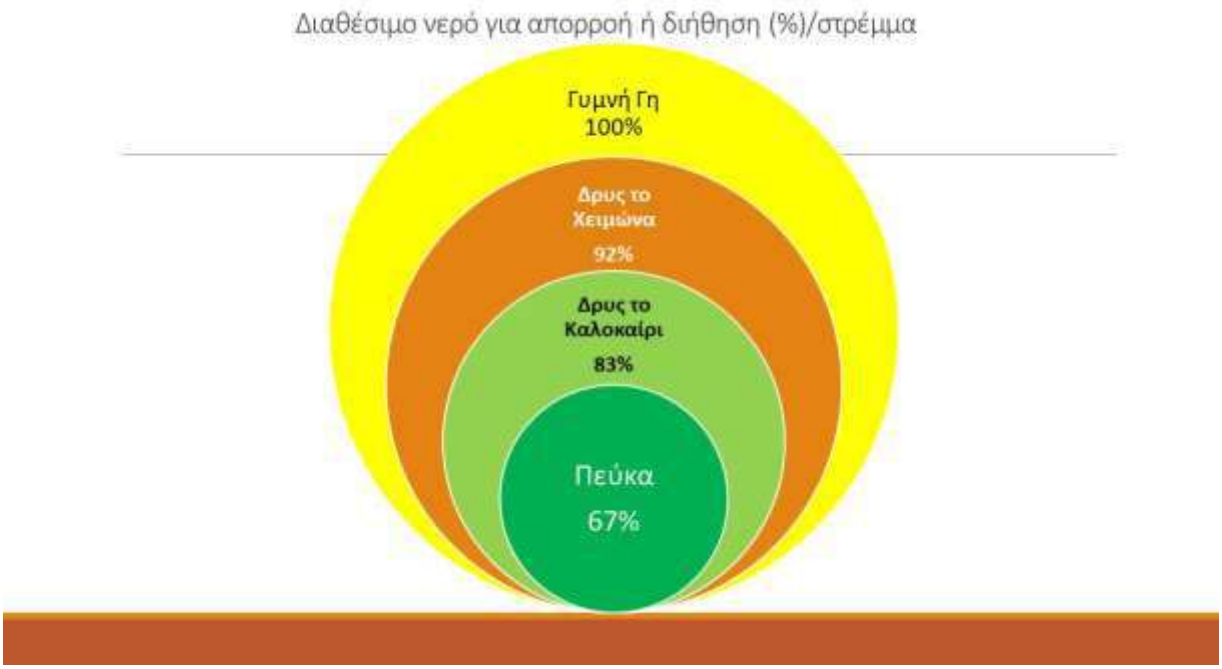
Το 1mm κατακρημνισμάτων για να μετατραπεί σε τόνους (tn) είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η έκταση στην οποία κατακρημνίζεται. Στο 1 στρέμμα (0,1ha), 1mm δίνει 1tn νερού. Ανάλογα με την υδατοσυγκράτηση της βλάστησης, ένα ποσοστό του φθάνει στο έδαφος και είναι διαθέσιμο για απορροή ή διήθηση. Για τις ανάγκες της άσκησης, παραγωγή νερού θεωρείται αυτή η διαθέσιμη για απορροή ή διήθηση ποσότητα νερού που φθάνει στο έδαφος. Έτσι, το ετήσιο υδατικό πλεόνασμα σε mm που προκύπτει από τους πίνακες, είναι ταυτόχρονα και tn νερού για κάθε 0,1ha.

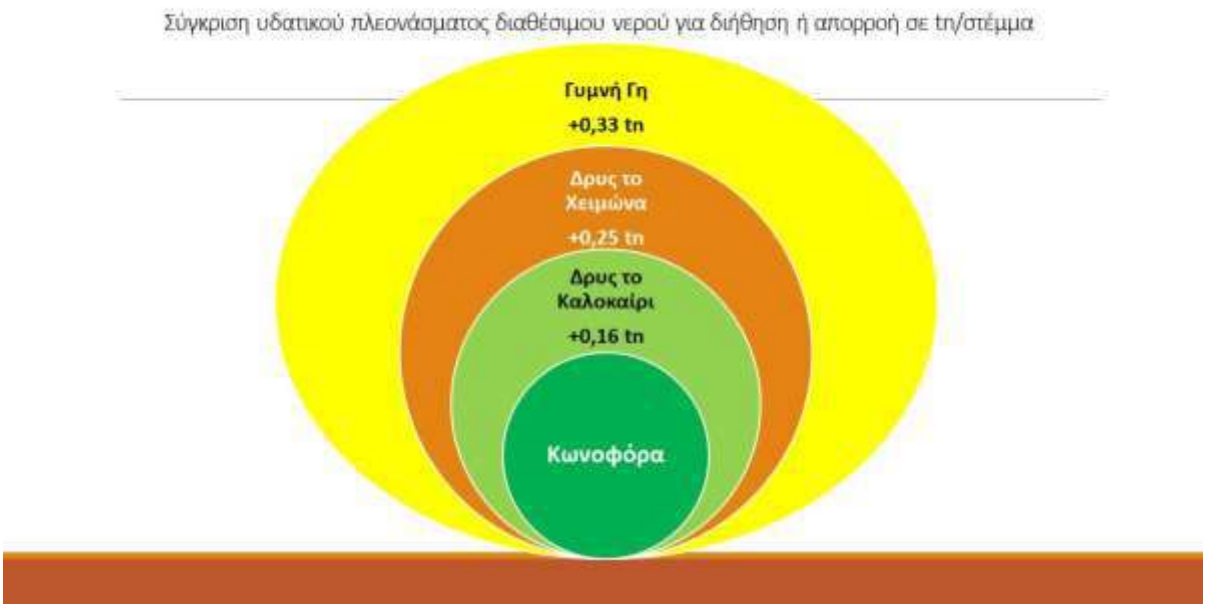


Σχήμα 1 α,β: Συγκριτικά διαγράμματα ποσότητα ύδατος που φθάνει σε έδαφος με διαφορετική φυτοκάλυψη.

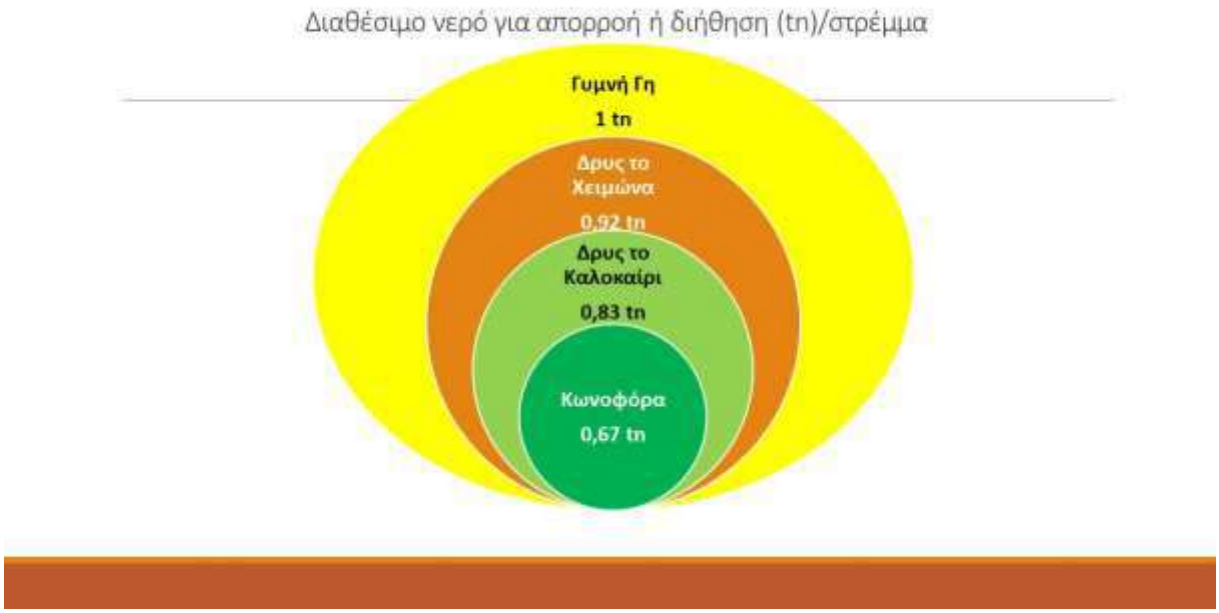


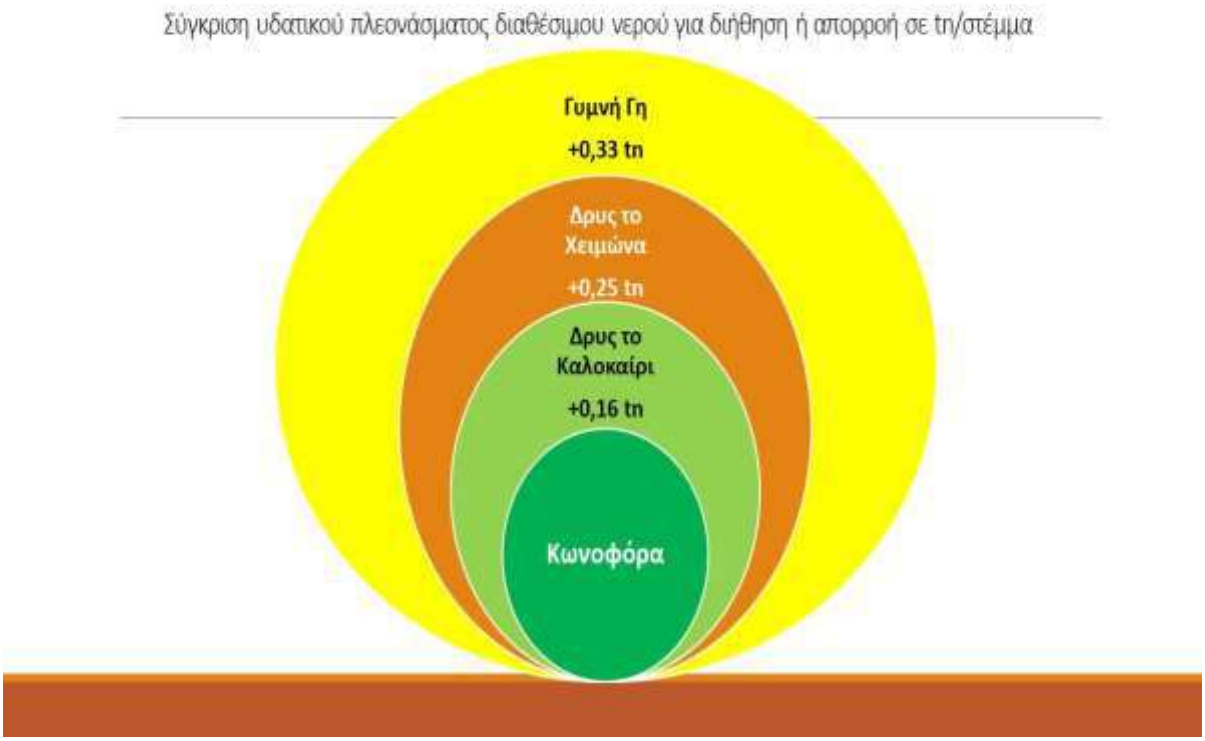
Σχήμα 1 γ, δ: Συγκριτικά διαγράμματα ποσότητα ύδατος που φθάνει σε έδαφος με διαφορετική φυτοκάλυψη.



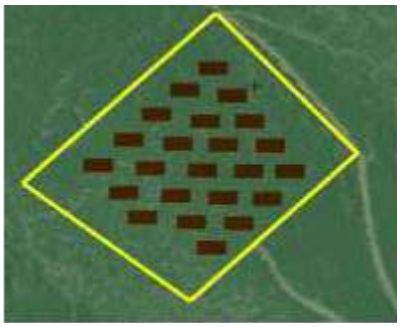


Σχήμα 1 ε, στ: Συγκριτικά διαγράμματα ποσότητα ύδατος που φθάνει σε έδαφος με διαφορετική φυτοκάλυψη.





Σχήμα 1 ζ, η: Συγκριτικά διαγράμματα ποσότητα ύδατος που φθάνει σε έδαφος με διαφορετική φυτοκάλυψη.



Σχήμα 2: Προτεινόμενη επέμβαση από κάποιον φοιτητή.

Στο Σχήμα 2, δίνεται ενδεικτικά ένας προτεινόμενος τρόπος επέμβασης από κάποιον φοιτητή. Με μπορντώ σχεδιάστηκαν οι επιφάνειες που θα καθαριστούν από δεντρώδη και θαμνώδη βλάστηση και έτσι θα υπάρχει εκεί μόνο υδατοσυγκράτηση υπορόφου – λιβαδική βλάστηση και δασικού τάπητα. Γενικότερα, η κατεύθυνση που δόθηκε στους φοιτητές ήταν:

- η αποφυγή των αποψιλωτικών υλοτομιών μεγάλων επιφανειών λόγω του κινδύνου της διάβρωσης,
- η χρήση διαδρόμων-ζωνών ή αποψιλωτικών λωρίδων περιορισμένου πλάτους σε πυκνοφυτείες πεύκης και αείφυλλα πλατύφυλλα,
- και οι επιλογικές υλοτομίες σε υψηλό δάσος.

Ζητήθηκε να υπολογιστεί η αναλογούσα επιφάνεια των επεμβάσεων και έτσι, τα χιλιοστά κατακρημνισμάτων που προκύπτουν από τους αντίστοιχους πίνακες (δασικής βλάστησης & λιβαδικής) να μετατραπούν σε τόνους νερού. Η συνολική ποσότητα του νερού που φθάνει στο έδαφος ολόκληρης της επιφάνειας είναι το αντίστοιχο άθροισμα των δύο επιμέρους ποσοτήτων νερού.

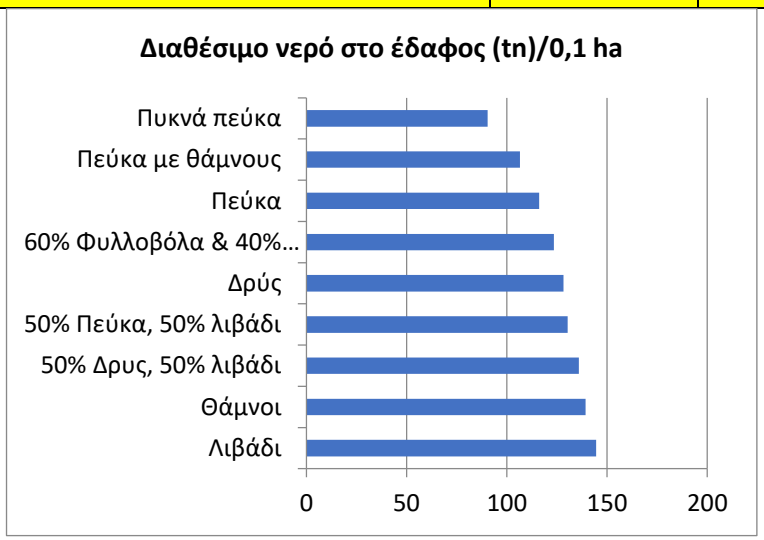
Έτσι, εάν 1 στρέμμα πευκόφυτης έκτασης με ετήσια ποσότητα νερού που φθάνει στο έδαφος ίση με 116,2 tn, αραιωθεί κατά 50%, η αντίστοιχη τελική ποσότητα νερού θα είναι το άθροισμα της ποσότητα νερού που αντιστοιχεί σε λιβαδική έκταση διά δύο (144,6/2=72,3 tn), συν το ήμισι των 116,2 tn (58,1), δηλαδή 130,4tn.

Επομένως το υδατικό κέρδος των αραιώσεων θα είναι 130,4-116,2=**14,2 tn νερού**

Αυτή η ποσότητα ανηγμένη σε επίπεδο λεκακών απορροής μπορεί να δώσει εκατομμύρια κυβικά νερού διαθέσιμα για τις ανάγκες του οικοσυστήματος και των ανθρώπων. Στα πλαίσα της αειφορικής διαχείρισης των λεκανών απορροής, είναι εφικτό να ταμιευτεί ένα μικρό ποσοστό του χειμερινού υδατικού πλεονάσματος και αυτό να αποτελεί μια αξιοσημείωτη ποσότητα νερού (Ganatsios et. al, 2019). Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο Υδάτινοι Πόροι, το υδατικό πρόβλημα της χώρας ποσοτικοποιείται σύμφωνα με τον Παυλίδη σε 15-40mm/έτος. Με το χειρισμό της βλάστησης λοιπόν είναι εφικτό να εξοικονομηθούν αυτοί οι υδάτινοι πόροι με την εφυή χωροχρονική κίνηση της μετατροπής δύο προβλημάτων (πλημμύρα και ξηρασία) σε ευκαιρία.

Πίνακας 10: Διαθέσιμο νερό που φθάνει στο έδαφος (tn) ανά είδος βλάστησης και δασοκομικό χειρισμό.

Είδος βλάστησης	Διαθέσιμο νερό στο έδαφος (tn)	
	0,1 Ha	3,8 Ha
Λιβάδι	144,6	5495
Θάμνοι	139,3	5293
50% αποψίλωση: 50% Δρυς, 50% λιβάδι	136	5168
50% αποψίλωση: 50% Πεύκα, 50% λιβάδι	130	4940
Δρύς	128,3	4875
60% Φυλλοβόλα & 40% Κωνοφόρα	123,5	4692
Πεύκα	116,2	4416
Πεύκα με θάμνους	106,6	4051
Πυκνά πεύκα	90,4	3435



Σχήμα 2: Διαθέσιμο νερό που φθάνει στο έδαφοςνερό ανά στρέμα και είδος βλάστησης

Είναι εμφανές, ότι ακόμα και μια μικρή επέμβαση επηρρεάζει σημαντικά το διαθέσιμο νερό που φθάνει στο έδαφος για απορροή και διήθηση. Ο δασολόγος λοιπόν έχει στα χέρια του ένα σημαντικό εργαλείο για την αντιμετώπιση της ξηρασίας και των πλημμυρών, αλλά πρωτίστως για την παραγωγή νερού που είναι ανεκτίμητη οικοσυστημική υπηρεσία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

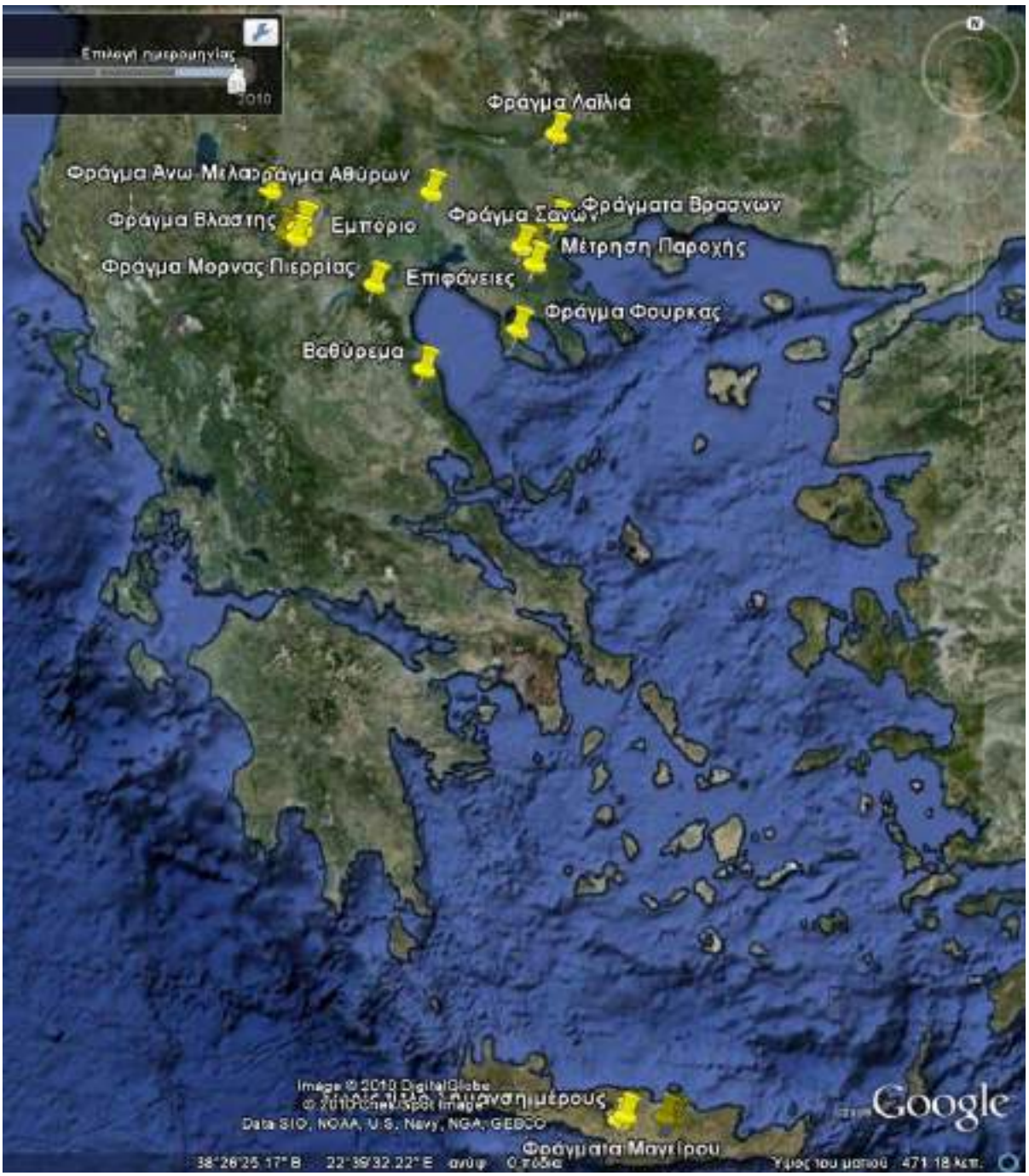
Ε. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΣΤ. ΧΕΙΡΙΣΜΟΙ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ & ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΦΟΙΤΗΤΩΝ

Ζ. ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΤΗΣ ΓΗΣ

Ε. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Που υλοποιήθηκαν με την πρωτοβουλία, έρευνα, μελέτη και επίβλεψη κατασκευής του διατελέσαντος Επίκουρου Καθηγητή Παυλίδη Θεοφάνη και τη συμβολή του Γκανάτσιου Χαρισίου του Εργαστηρίου Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων Α.Π.Θ.



ΚΡΗΤΗ

Φράγματα-Λιμνοδεξαμενές Νομού Ηρακλείου (Από αριστερά προς δεξιά με κίτρινο)

Μάγειρος, Μαγαρικάρι, Γέννα, Δαμάνια, Αρμανώγεια, Αμουργέλες, Πάρτιρα

- Ερευνητικό Έργο 20526 Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ.: «Διερεύνηση των χειμαρρικών συνθηκών και σχεδιασμός μιας ολοκληρωμένης υδρονομικής διευθέτησης χειμάρρων στο **Δήμο Ν. Καζαντζάκη**».

Πάρτιρα Ηρακλείου

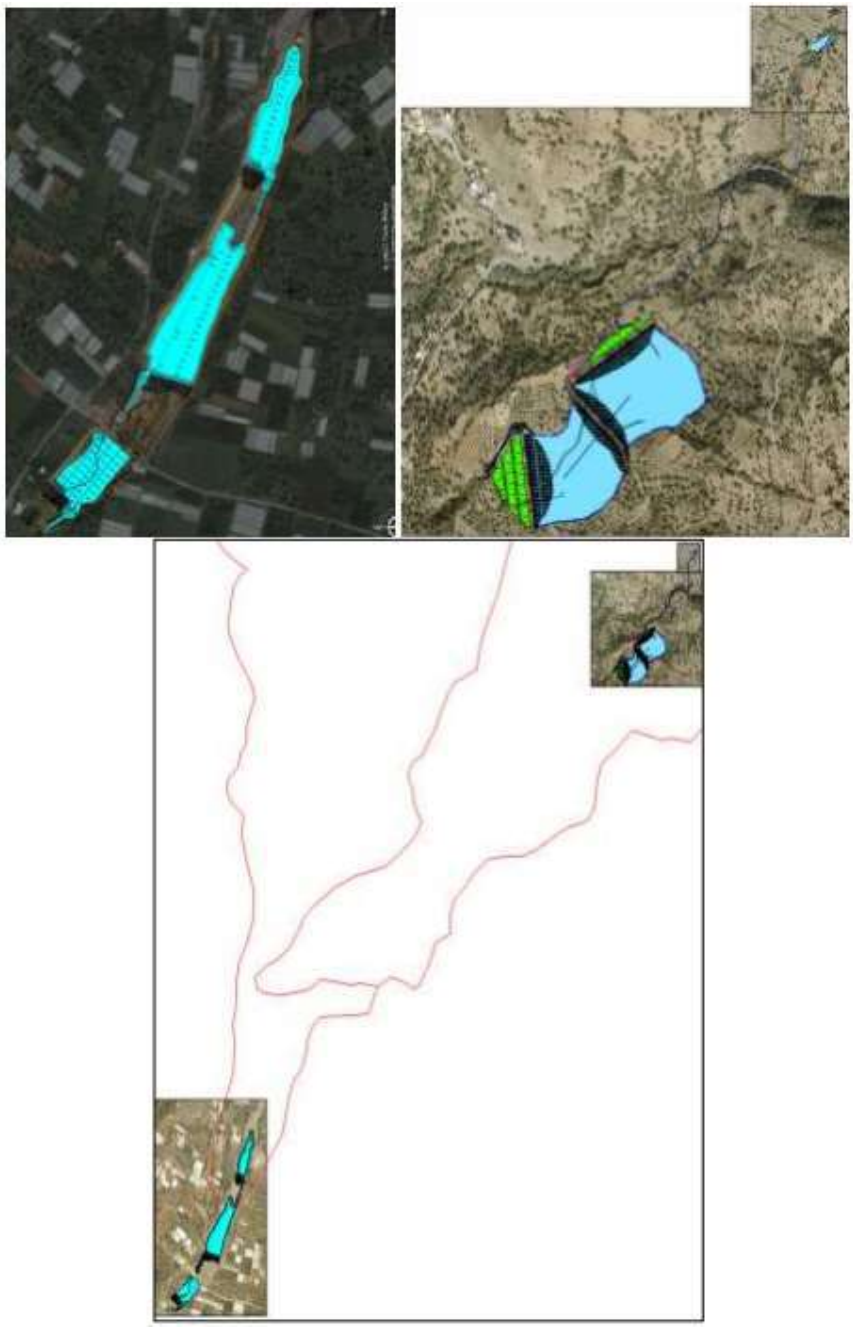
Αμουργέλες Ηρακλείου

Δαμανια Ηρακλείου

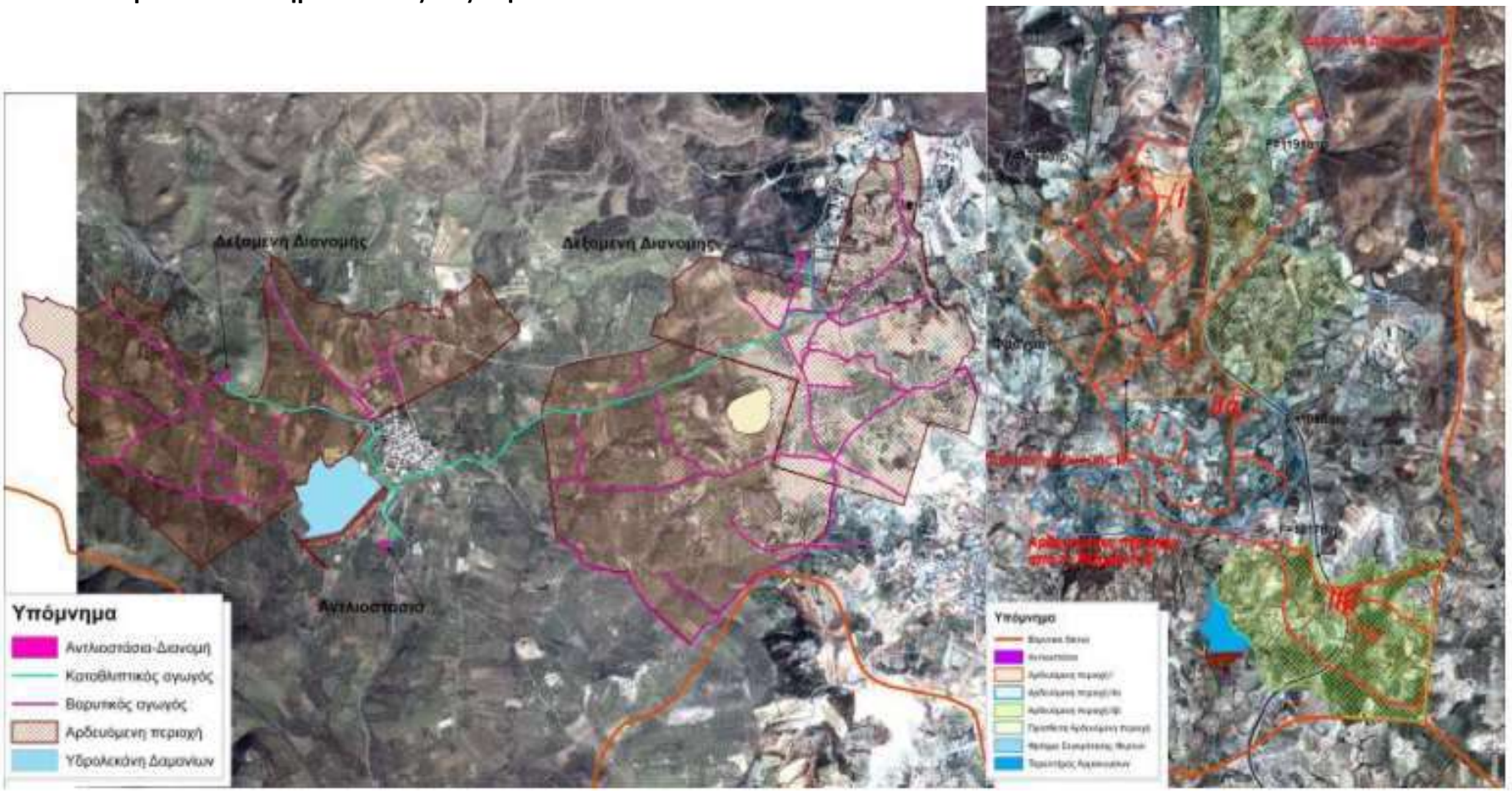
Αρμανωγεια Ηρακλείου

<u>Φράγματα Μαγείρου-Μαγαρικαρίου-Γέννας (Μελετήθηκαν, προβλέπεται η κατασκευή τους)</u>

- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 80115: «Έρευνα του υδατοστερεο-μεταφορικού προβλήματος και των χωροθετικών δυνατοτήτων των χειμάρρων του Δήμου Τυμπακίου στα πλαίσια επίλυσης των υδατικών του προβλημάτων. Πιλοτικές εφαρμογές στους χειμάρρους **˝Μάγειρο˝ και ˝Μαγαρικάρι˝».**
- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 85781: «Έρευνα των εδαφοϋδρολογικών συνθηκών του αγροκτήματος **Μαγαρικαρίου** και αναζήτησης του βέλτιστου συστήματος άρδευσής του».
- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 83880: «Αρχές και συστήματα αντιμετώπισης του πλημμυρικού προβλήματος του χειμάρρου **Μάγειρου».**



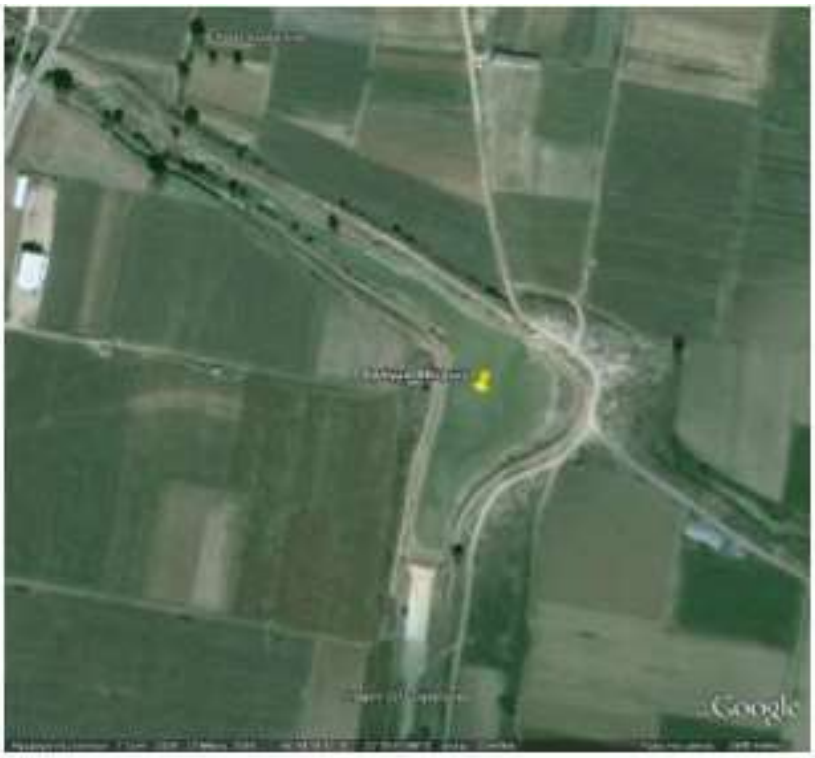
- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 85111: «Σχεδιασμός αρδευτικής αξιοποίησης του νερού των ταμιευτήρων **Αρμανωγείων και Δαμανίων του Δήμου Ν. Καζαντζάκη».**



ΠΕΛΛΑ

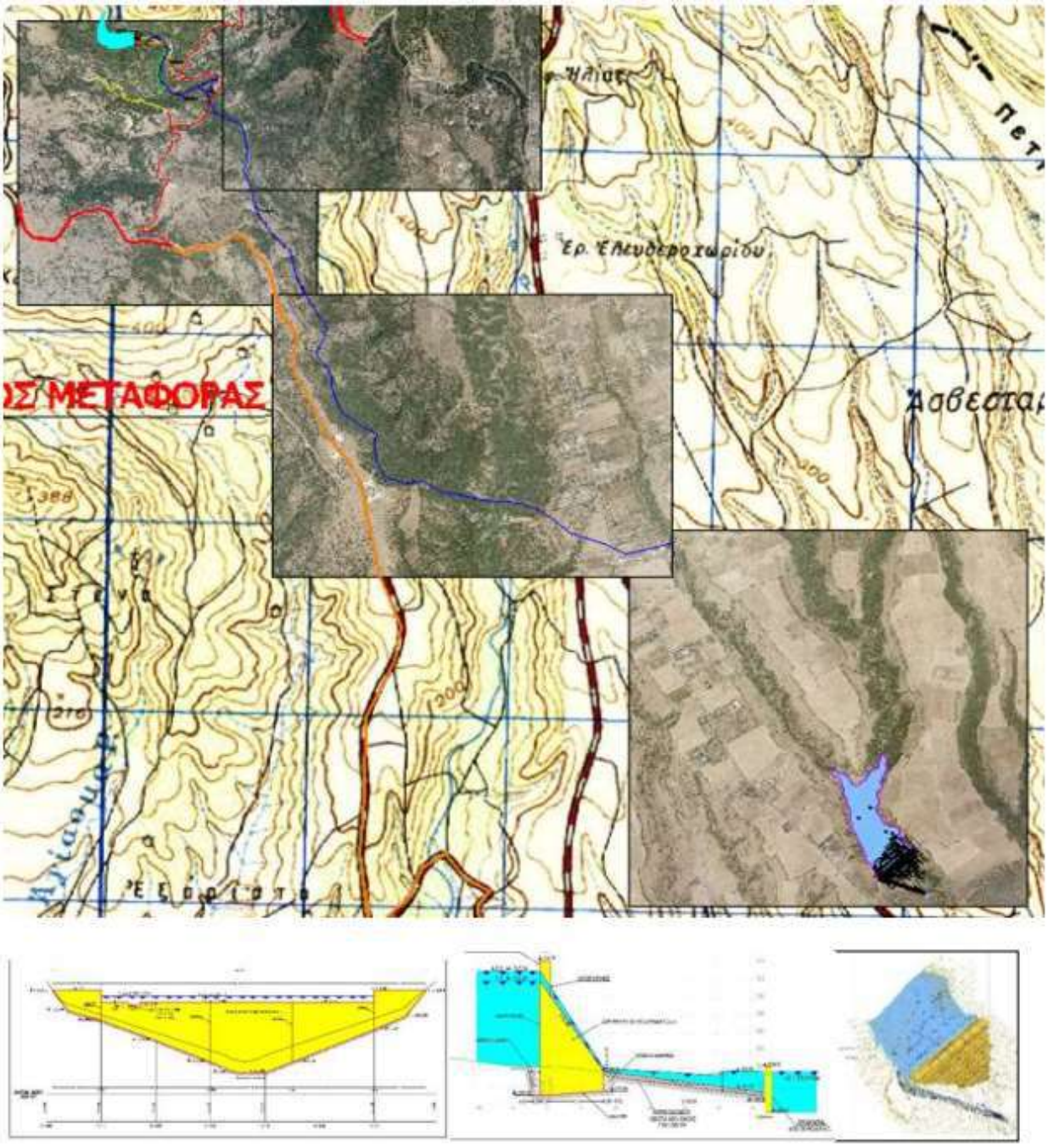
- Ερευνητικό Έργο 20753 Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ.: «Έρευνα χειρισμού των υδατορευμάτων του Δ.Δ. Αθύρων του **Δήμου Πέλλας**, για την αντιμετώπιση των υδατικών τους προβλημάτων».

ΑΘΥΡΑ ΠΕΛΛΑΣ



ΓΙΑΝΝΙΤΣΑ

- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 21607: «Έρευνα αντιμετώπισης των υδατικών προβλημάτων του **Δήμου Γιαννιτσών**. Πιλοτική Εφαρμογή».
  (Μελετήθηκαν, αναμένεται η κατασκευή τους)



Το φράγμα εκτροπής-υδροληψίας Γράμμου και το φράγμα Πενταπλάτανου

ΠΙΕΡΙΑ

- Ερευνητικό Έργο 20259 Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ.: «Έρευνα αντιμετώπισης των υδατικών προβλημάτων και ορθολογικής διαχείρισης και αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού του Νομού **Πιερίας»**

ΜΟΡΝΑ ΠΙΕΡΙΑΣ

Το φράγμα Μόρνας Υδρεύει το 59% του νομού Πιερρίας

ΜΟΡΝΑ ΠΙΕΡΙΑΣ

ΒΑΘΥΡΕΜΑ ΛΑΡΙΣΑΣ

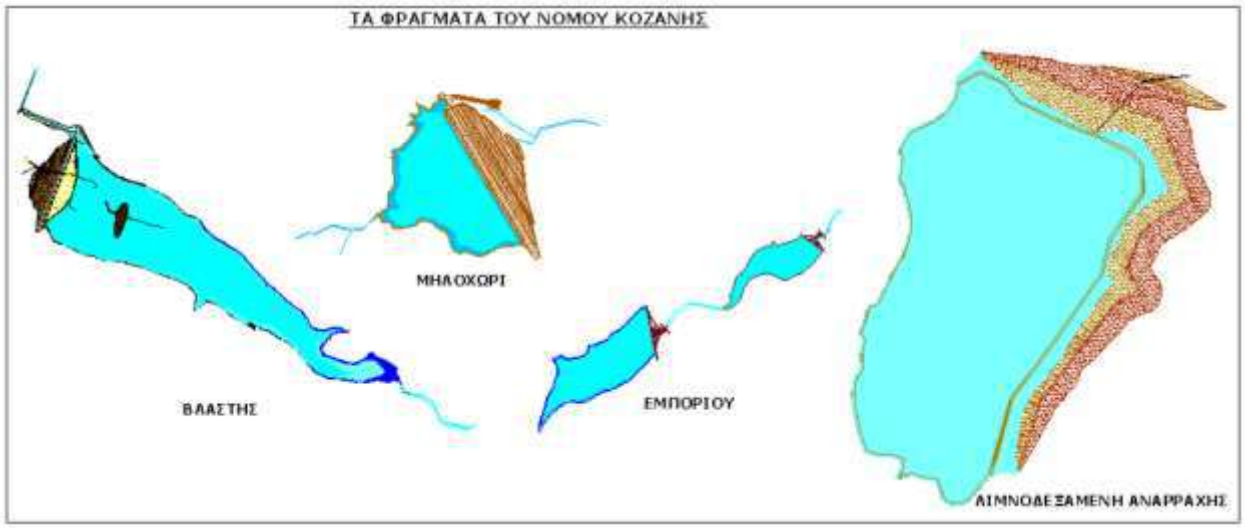
- «Αντιπλημμυρική Διευθέτηση της κεντρικής κοίτης του χειμάρρου Βαθύρεμα Λάρισας». Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Λάρισας.

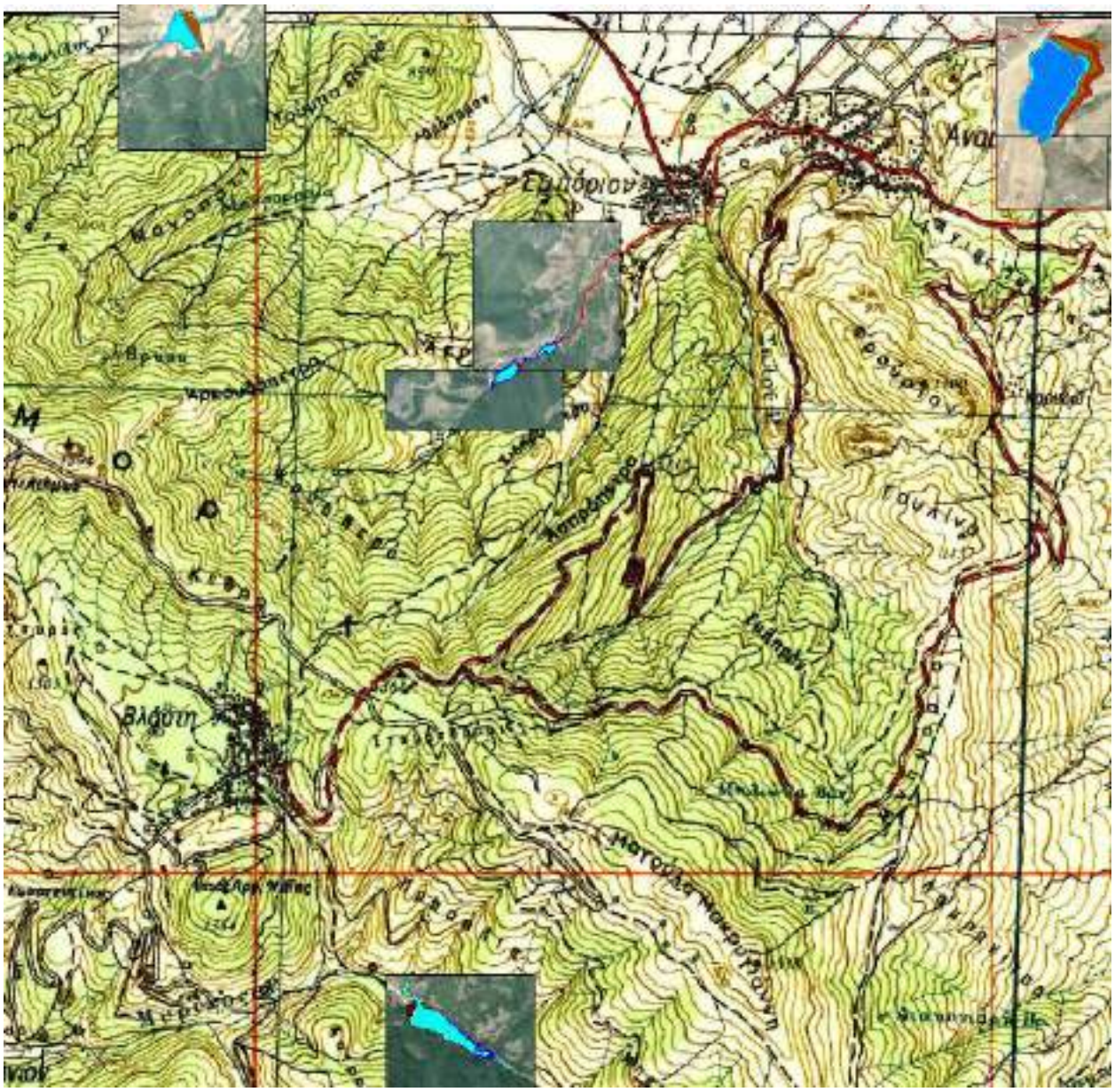
Αντιπλημμυρική Διευθέτηση της κεντρικής κοίτης του χειμάρρου **Βαθύρεμα Λάρισας**

Εικόνες: 3 από τα 7 υλοποιηθέντα αντιπλημμυρικά φράγματα

ΚΟΖΑΝΗ-ΚΑΣΤΟΡΙΑ

ΚΟΖΑΝΗ


ΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΚΟΖΑΝΗΣ
ΜΗΛΟΧΩΡΙ
ΒΛΑΣΤΗΣ
ΕΜΠΟΡΙΟΥ
ΑΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΗ ΑΝΑΡΡΑΧΗΣ



Εφηρμοσμένα Ερευνητικά Έργα της Επιτροπής Ερευνών ΑΠΘ για Καστοριά & Κοζάνη

- Ερευνητικού Έργου 21346 Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ.: «Σχεδιασμός πιλοτικών εφαρμογών αντιμετώπισης των υδατικών προβλημάτων του **Δήμου Κορεστείων** του Νομού Καστοριάς».

- Ερευνητικό Έργο 20716 Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ.: «Διερεύνηση χειμαρρικών και υδατικών συνθηκών και σχεδιασμός υδρονομικής διευθέτησης του χειμάρρου **Γέρμας**, με εφαρμογή ενός πιλοτικού αντιπλημμυρικού - αρδευτικού φράγματος πολλαπλών σκοπών. Νομός Καστοριάς».

- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 21400: «Έρευνα αντιμετώπισης των υδατικών προβλημάτων περιοχών του νομού Κοζάνης. Πιλοτικές εφαρμογές στο **Δήμο Μουρικίου**».

- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 83732: «Έρευνα υπερύψωσης των φραγμάτων **Εμπορίου** και τροποποίησης της πορείας του προσαγωγού δικτύου».

- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 81455: «Έρευνα ανάδειξης και αξιοποίησης του υδατικού και φυσικού περιβάλλοντος του χειμάρρου **Μύριχου** του Νομού Κοζάνης. Πιλοτική εφαρμογή».

- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 81369: «Διερεύνηση του προβλήματος των αστικών λυμάτων της κοινότητας **Βλάστης** του Νομού Κοζάνης και εφαρμογή της βέλτιστης λύσης».

ΜΗΛΟΧΩΡΙ

ΕΜΠΟΡΙΟ

ΛΙΜΝΟΔΕΞΑΜΕΝΗ ΑΝΑΡΡΑΧΗΣ

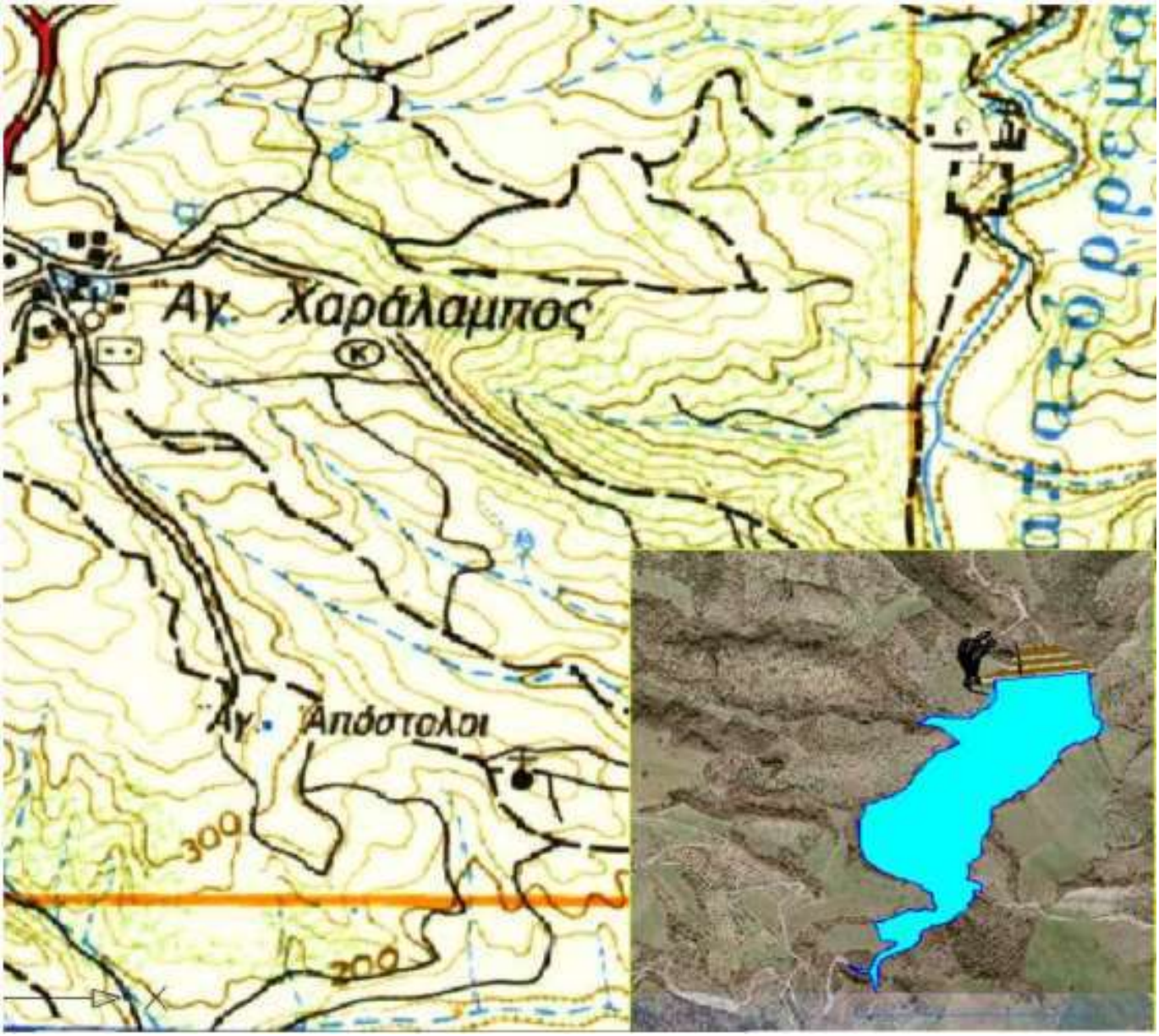
ΚΑΣΤΟΡΙΑ

ΑΝΩ ΜΕΛΑΣ

ΓΕΡΜΑΣ

ΦΘΙΩΤΙΔΑ

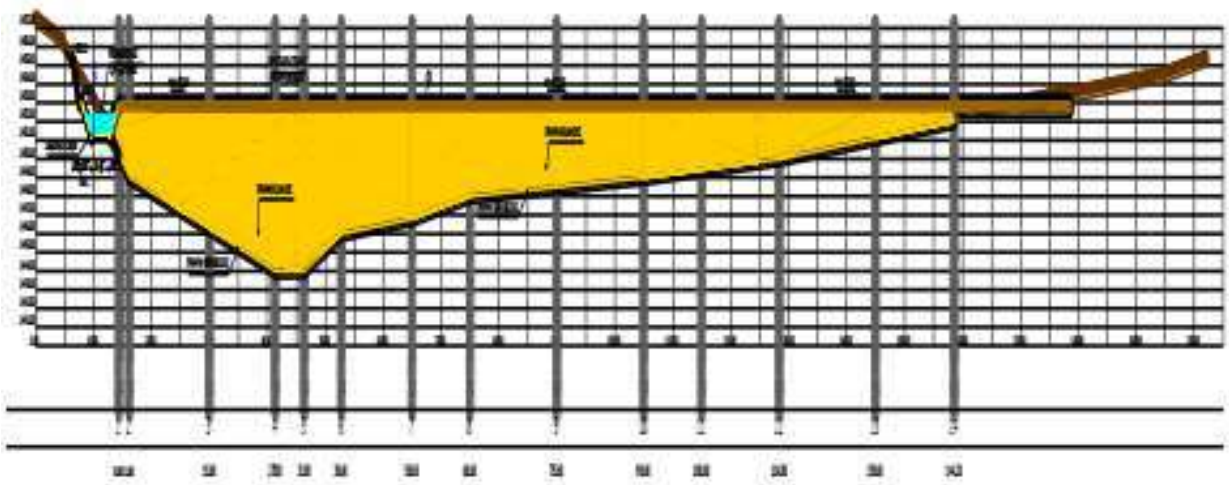
- Ερευνητικού Έργου 20613 Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ.: «Έρευνα του χειμαρρικού και υδατικού δυναμικού του χειμάρρου Λιαπατόρεμα (Ρ. Αγίου Χαραλάμπους) του **Δήμου Μώλου**».
(Μελετήθηκε, αναμένεται η κατασκευή του)



ΣΕΡΡΕΣ

- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 83039: «Σχεδιασμός αντιμετώπισης των προβλημάτων λειψυδρίας του νομού Σερρών και κατασκευή μιας πειραματικής αντιπυρικής λιμνοδεξαμενής στην περιοχή του **Λαϊλιά**».

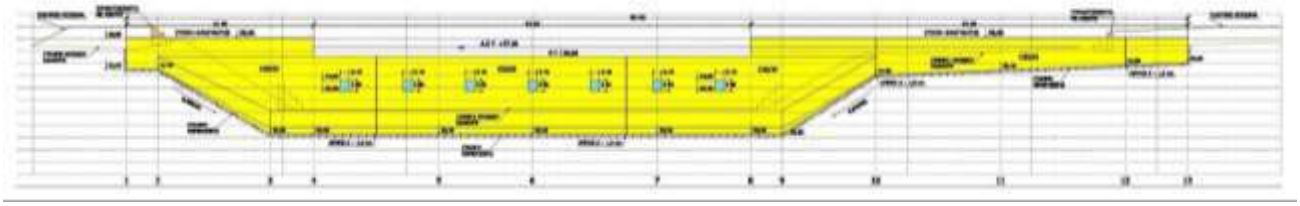
(Μελετήθηκε, αναμένεται η κατασκευή του)

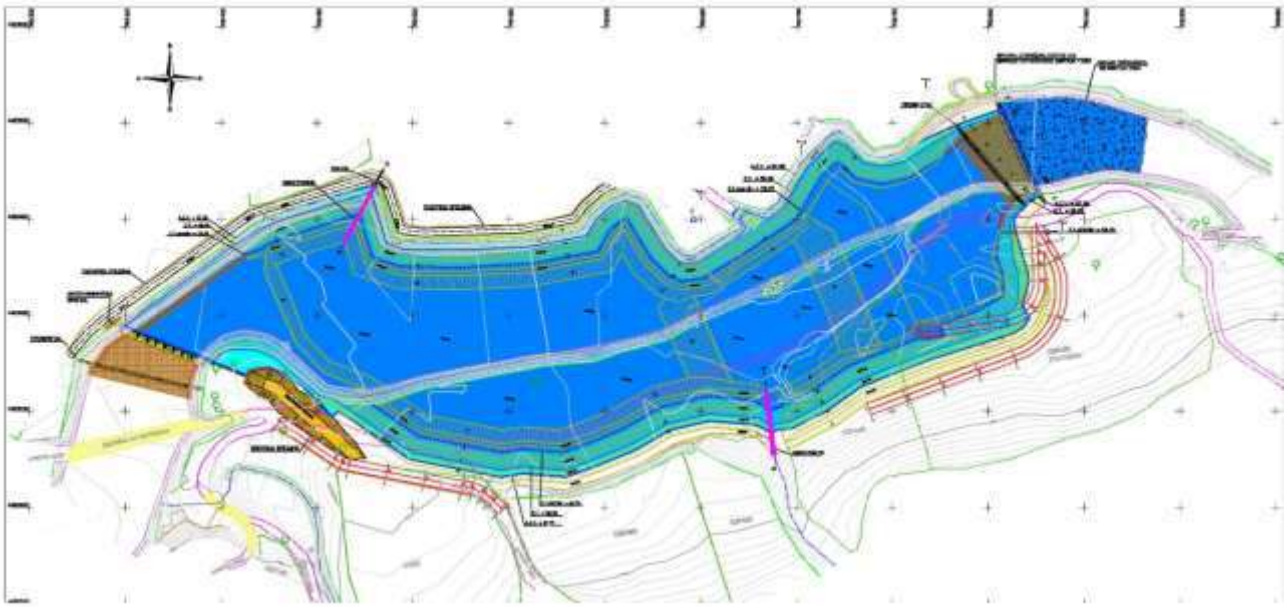


ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ

- «Οριστική μελέτη αντιπλημμυρικών-εμπλουτιστικών φραγμάτων **Φούρκας**- Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Χαλκιδικής».

(Μελετήθηκαν, αναμένεται η κατασκευή τους)





Τοπογραφικό διάγραμμα με το σύνολο των έργων. Διακρίνονται το αντιπλημμυρικό–εμπλουτιστικό φράγμα, το φράγμα συγκράτησης φερτών υλών, τα δύο προφράγματα προστασίας και η υδρολεκάνη του φράγματος (Λιμναίος ταμιευτήρας αντιπλημμυρικού – εμπλουτιστικού φράγματος)

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΔΑΣΟΣ ΤΑΞΙΑΡΧΗ-ΒΡΑΣΤΑΜΩΝ

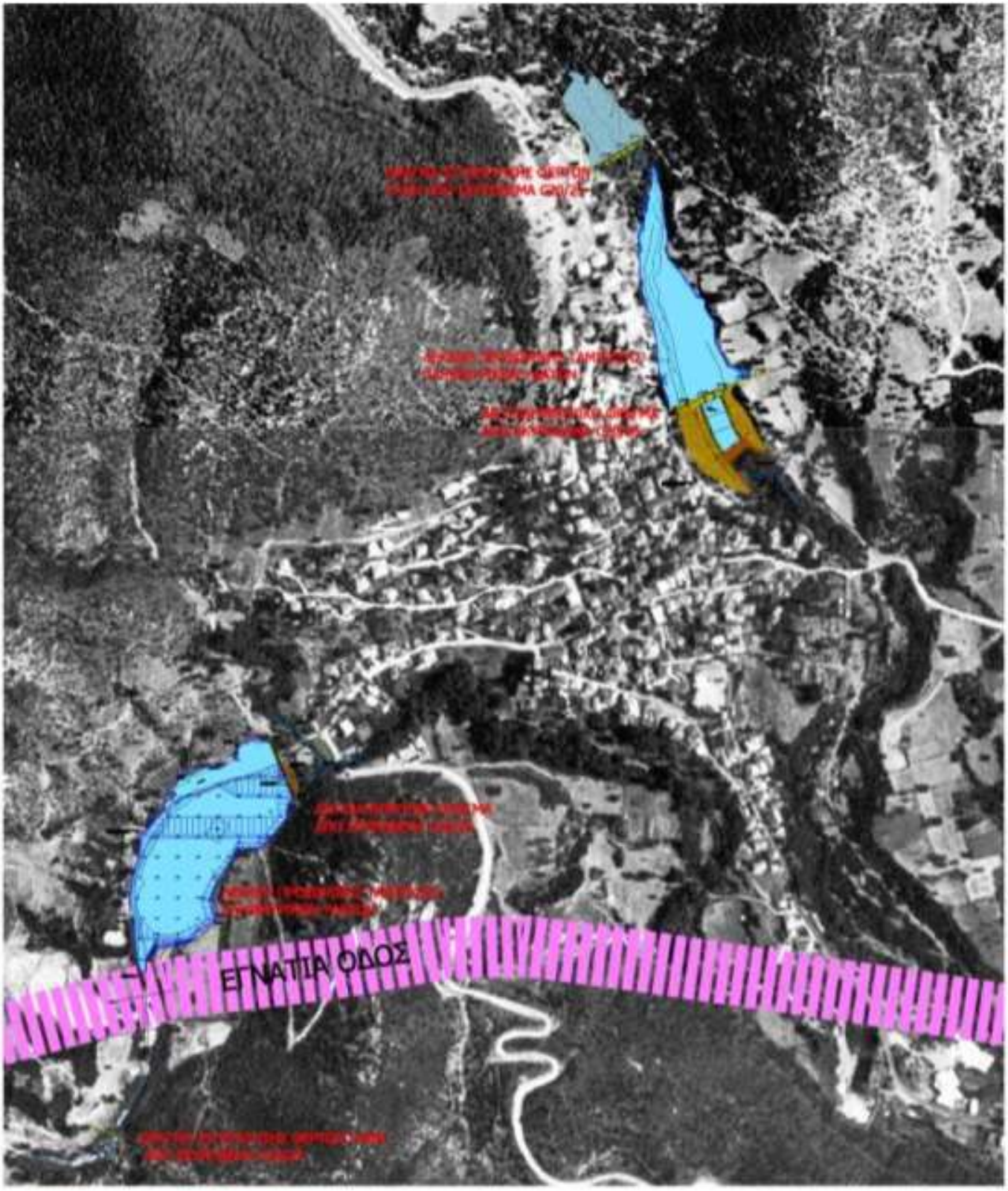
«Οριστική μελέτη διευθέτησης χειμάρρου Αγίου Παντελεήμονα του Πανεπιστημιακού Δάσους Ταξιάρχη-Βραστάμων Χαλκιδικής» Διεύθυνση Δασών Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας

ΝΟΜΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΒΡΑΣΝΑ ΑΣΠΡΟΒΑΛΤΑΣ

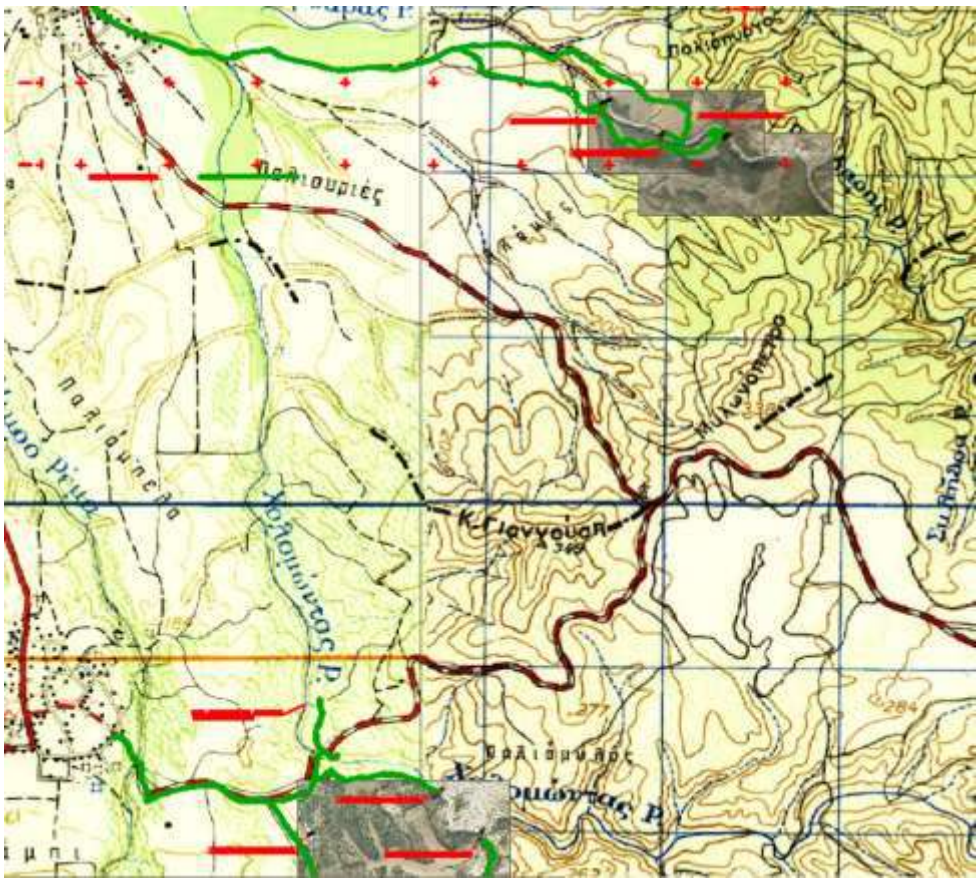
- Ερευνητικό Έργο Επιτροπής Ερευνών Α.Π.Θ. 82546: «Έρευνα αντιμετώπισης των πλημμυρικών προβλημάτων των χειμάρρων του **Δήμου Αγίου Γεωργίου**. Πιλοτικές εφαρμογές».

(Μελετήθηκαν, αναμένεται η κατασκευή τους)



ΑΠΟΛΛΩΝΙΑ-ΜΕΛΙΣΣΟΥΡΓΟΣ

- «Οριστική μελέτη διευθέτησης χειμάρρου **Απολλωνίας–Μελισσουργού** Υδρολογικού συγκροτήματος λεκανών λιμνών Λαγκαδά – Βόλβης» Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας-Διεύθυνση Δασών Περιφέρειας.



Τα φράγματα του Χειμάρρου Βαρβάρας

Το Φράγμα 1.1 (άνω αριστερά)

Τα φράγματα του Χειμάρρου Χολομώντα

Το φράγμα 2.3 (κάτω αριστερά)

Τα φράγματα 2.1, 2.2 (άνω αριστερά και κάτω δεξιά)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΣΤ. Χειρισμοί βλάστησης από τη Δασική Υπηρεσία & Εκπαίδευση φοιτητών

Χειρισμοί βλάστησης από τη Δασική Υπηρεσία

Στα πλαίσια της Δασοπονίας Πολλαπλών Σκοπών, η Δασική Υπηρεσία Θεσσαλονίκης υλοποίησε δράσεις αντιπυρικής προστασίας του περιαστικού δάσους που εξυπηρετούν ταυτόχρονα και άλλες υπηρεσίες όπως η παραγωγή νερού.

Χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τύποι οχημάτων:

1. Ερπυστριοφόρο για τις μεγάλες κλίσεις
2. Τρακτέρ για μικρότερες κλίσεις
3. Τρέϊλερ μεταφοράς θρυμματιστή για μεταφορά κλαδιών & εργασία στο δρόμο
4. Ερυπυστριοφόρος θρυμματιστής με κύλινδρο

Η εικόνα του δάσους σε πολλά σημεία

Ερπυστιοφόρο για τις μεγάλες κλίσεις

Τρακτέρ για μικρότερες κλίσεις & Ερπυστριοφόρος θρυμματιστής με κύλινδρο

Τρέϊλερ μεταφοράς θρυμματιστή για μεταφορά κλαδιών και εργασία στο δρόμο

Το προϊόν θρυμματισμού που γρήγορα γίνεται οργανική ουσία εδάφους

Η μετατροπή του προβλήματος σε ευκαιρία

Ευκαιρία

Αντιπυρική προστασία, Παραγωγή νερού, Εμπλουτισμός του εδάφους,

Καλλιέργεια του δάσους για ευνόηση των καταπιεσμένων πλατυφύλλων ειδών (π.χ. δρύες)

Γενικότερη βελτίωση του οικοσυστήματος

Πρόβλημα

Συσσωρευμένη καύσιμη ύλη,

Υδατικό –αυξητικό στρες,

Κίνδυνος ασθενειών

Μετά από τις επεμβάσεις

Υδρολογική Εκπαίδευση φοιτητών του Τμήματος Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος Α.Π.Θ. στο περιαστικό δάσος Θεσσαλονίκης

Καταπιεσμένη Δρυς
27 ετών
(φυτεύτηκε μετά την πυρκαγιά του 1997)

Νοέμβριος 2024

Μέλη της εθελοντικής ομάδας δράσεων φοιτητών υπό την εποπτεία του Δασαρχείου

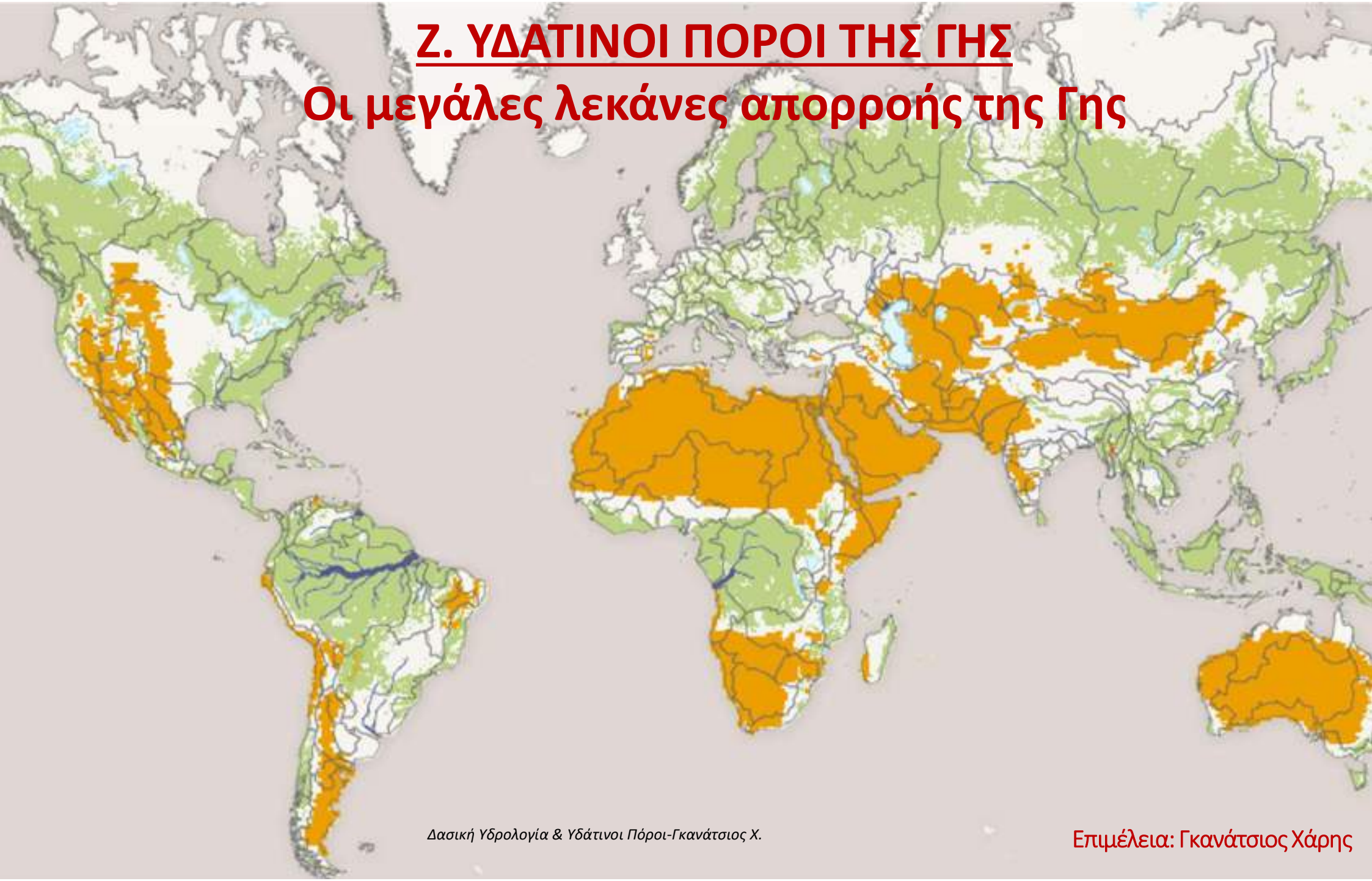
Ιούνιος 2019

Φόρτωση κλάδων σε φορτηγό του Δήμου Θεσσαλονίκης

Ιούνιος 2019

Ζ. ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΤΗΣ ΓΗΣ

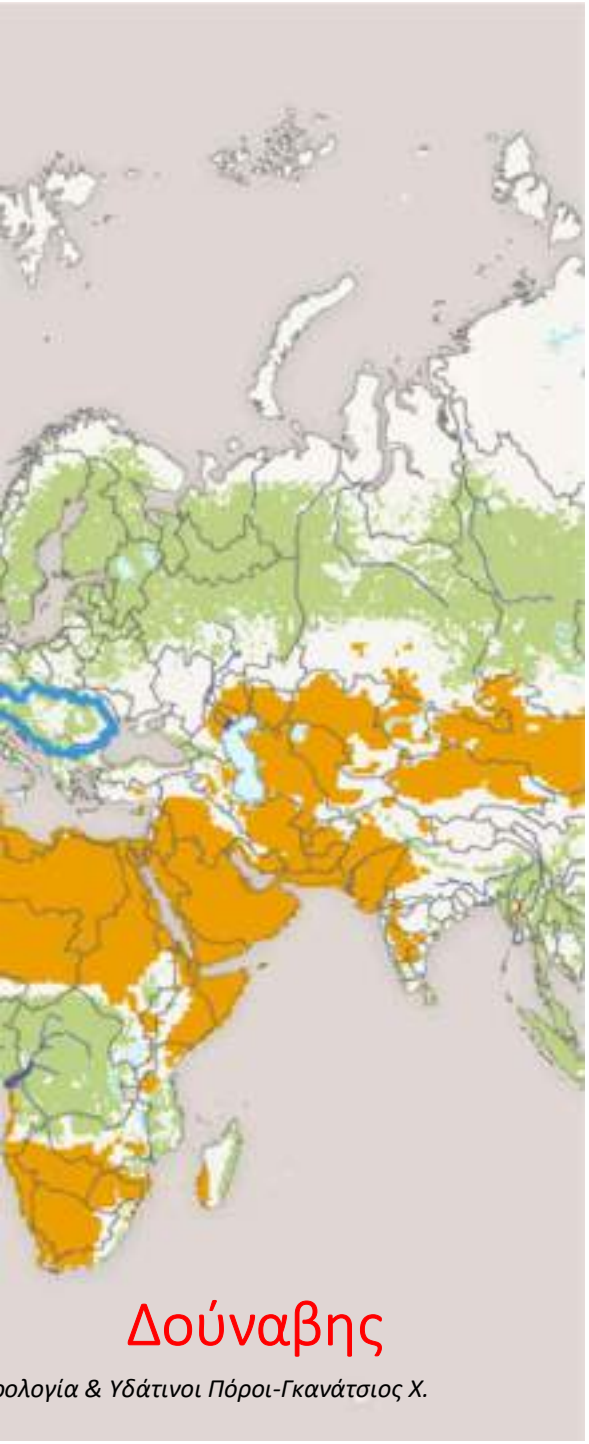
Οι μεγάλες λεκάνες απορροής της Γης

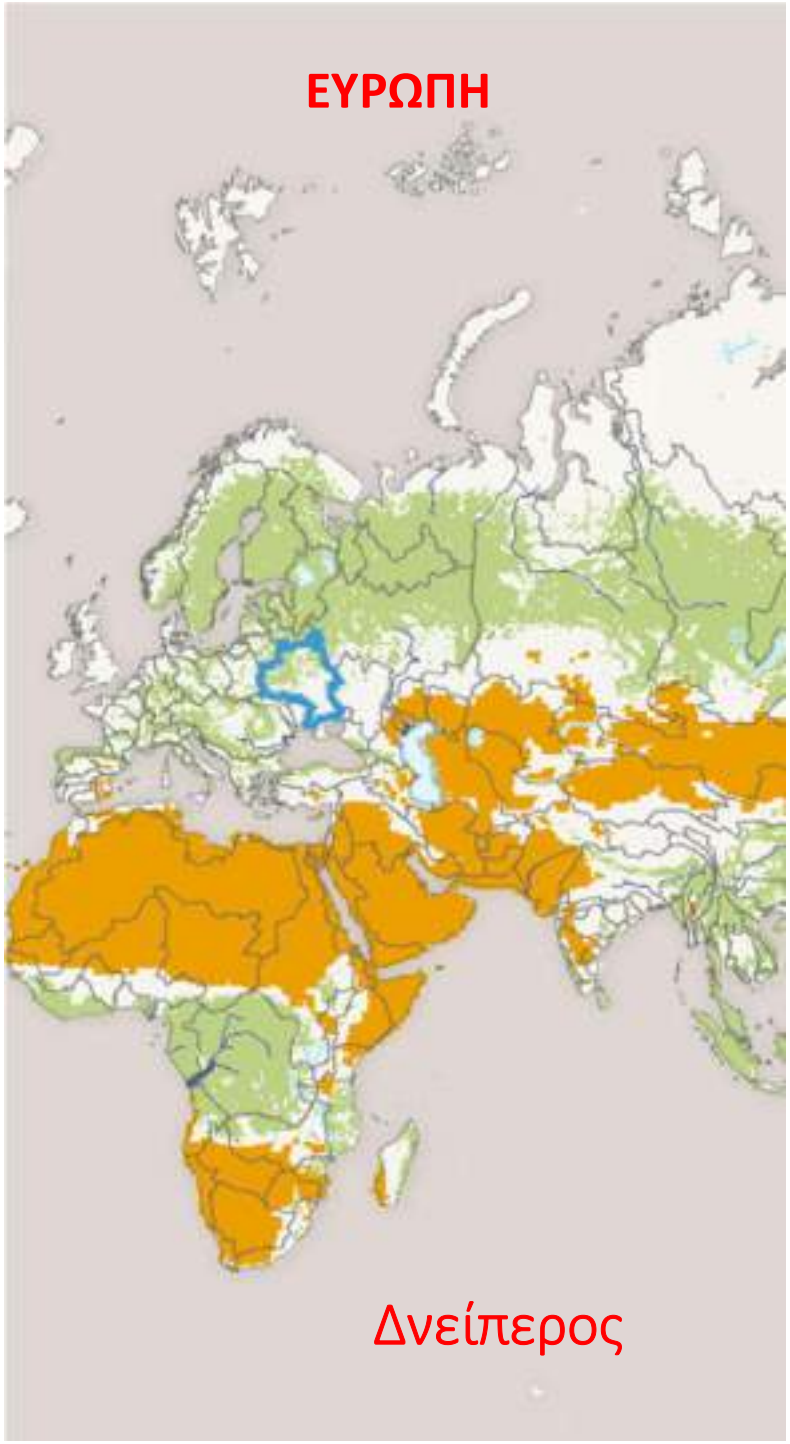


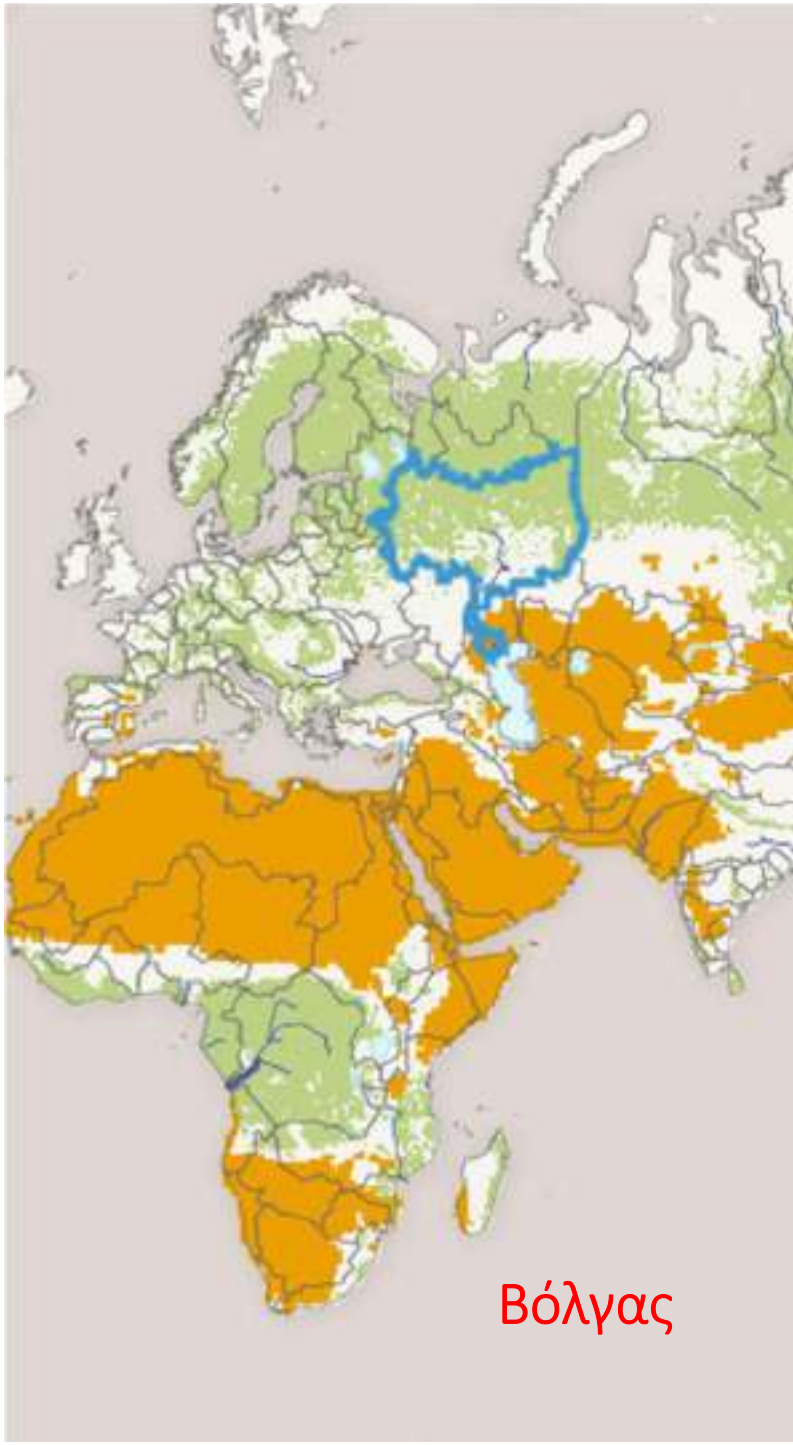
Επιμέλεια: Γκανάτσιος Χάρης

ΥΡΩΠΗ

Νορβηγική Θάλασσα
Ορη Kjolen
Ουράλια Ορη
Λίμνη Onega
Λίμνη Salmaa
Λίμνη Ladoga
Βόρεια Θάλασσα
Βαλτική Θάλασσα
Δυτική Dvina
Βιστούλας
Ελβας
Ρηνος
Δνείπερος (Dniepr)
Βολγας
Μάγχη
Λίγηρας (Lone)
Δούναβης
Αλπεις
Λίμνη Μαλλατιν
Ατλαντικός Ωκεανός
Πυρεναια
Τάγος
Μαύρη Θάλασσα
Μεσόγειος Θάλασσα


Δούναβης


ΕΥΡΩΠΗ
Δνείπερος


Βόλγας

Ποταμοί **Ευρώπης** :

1. *Βόλγας (~3500Κμ), (ΡΩΣΙΑ),*
2. *Δούναβης (~2900Κμ),*
3. *Ουράλης (2500κμ), (ΡΩΣΙΑ),*
4. *Δνείπερος (2200Κμ), (ΟΥΚΡΑΝΙΑ),*
5. *Δνείστερος (1360Κμ), (ΜΟΛΔΑΒΙΑ, ΟΥΚΡΑΝΙΑ),*
6. *Ρήνος (1300κμ), (ΓΕΡΜΑΝΙΑ),*
7. *Έλβας (1100Κμ), (ΓΕΡΜΑΝΙΑ),*
8. *Βιστούλας (1000Κμ), (ΠΟΛΩΝΙΑ),*
9. *Λίγηρας (1000Κμ)- (ο μεγαλύτερος της ΓΑΛΛΙΑΣ),*
10. *Μόσας εκβάλει στο Ρήνο(~1000Κμ), (ΓΑΛΛΙΑ-ΒΕΛΓΙΟ- ΟΛΛΑΝΔΙΑ),*
11. *Όντερ (850Κμ), (ΦΥΣΙΚΟ ΣΥΝΟΡΟ ΠΟΛΩΝΙΑΣ-ΓΕΡΜΑΝΙΑΣ),*
12. *Ροδανός, (810Κμ)-(ΓΑΛΛΙΑ),*
13. *Σηκουάνας (775Κμ),)-(ΓΑΛΛΙΑ),*
14. *Αξιός (388Κμ),*
15. *Έβρος (480Κμ).*

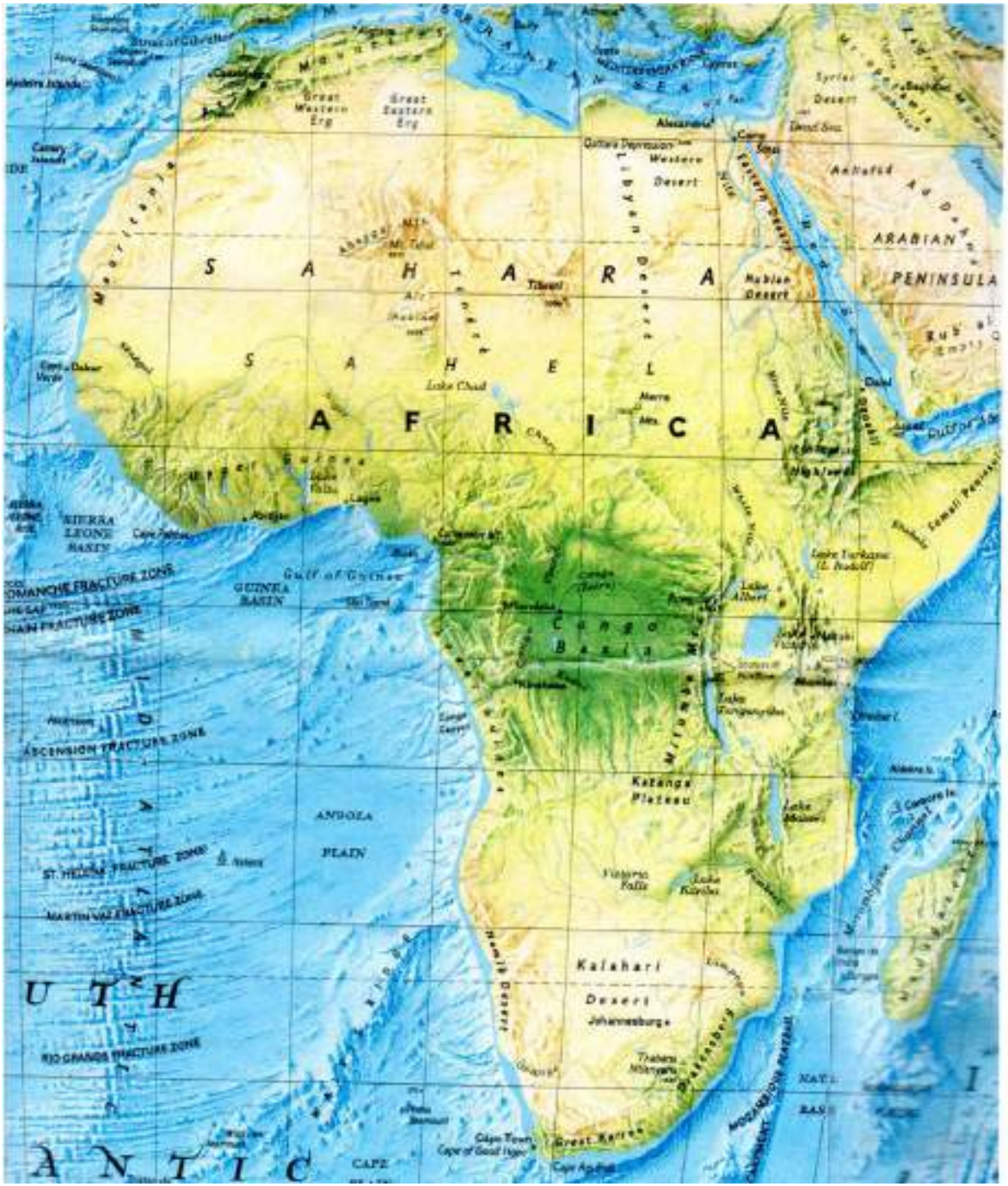
Όρη **Ευρώπης** :

1. *Καύκασος (Ελμπρούς -5642μ) Ρωσία-Γεωργία*
2. *Άλπεις (4810μ),*
3. *Σιέρρα Νεβάδα (3478μ),*
4. *Πυρηναία (3400μ),*
5. *Όλυμπος (2918μ),*
6. *Καρπάθια (2655μ),*
7. Κανταβρικά **(**2678 μ),
8. *Ιβηρικά (*2.314μ)
9. *Απέννινα (*2.912μ),
10. Δειναρρικές Άλπεις (2.522μ),
11. Σκανδιναβικά (2.469 μ),
12. *Ροδόπη (*2.191μ),
13. *Ουράλια (1900μ),*

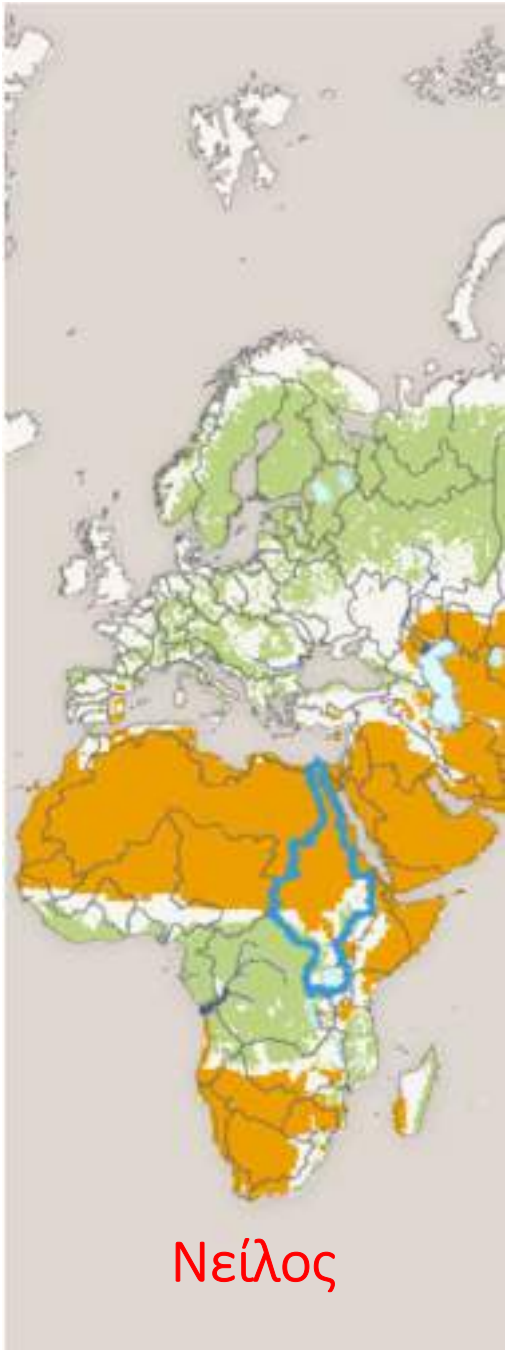
Λίμνες **Ευρώπης** *:*

- Λαντόγκα, Ονέγκα, (Ρωσία), Βενέρν (Σουηδία)

ΑΦΡΙΚΗ


S A H A R A
S A H E L
A F R I C A
ARABIAN PENINSULA
Nubian Desert
Libyan Desert
Western Desert
Great Western Erg
Great Eastern Erg
Ahaggar Mts.
Air Mts.
Tibesti
Lake Chad
Mt. Cameroon
SIERRA LEONE BASIN
GUINEA BASIN
Gulf of Guinea
Congo Basin
Lake Victoria
Lake Albert
Lake Tanganyika
Lake Malawi
Lake Turkana
Katanga Plateau
Victoria Falls
Lake Kariba
ANGOLA PLAIN
Kalahari Desert
Johannesburg
Great Karoo
Cape Town
CAPE
Cape Agulhas
Namib Desert
Orange R.
Limpopo R.
Zambezi R.
Niger R.
Nile R.
Madagascar
Comoro Is.
Aldabra I.
Socotra I.
Gulf of Aden
Red Sea
Mediterranean Sea
Strait of Gibraltar
Canary Islands
Cape Verde
Dakar
Abidjan
Lagos
Douala
Khartoum
Cairo
Alexandria
Aswan
Addis Ababa
Nairobi
Mombasa
Dar es Salaam
Luanda
Windhoek
Maputo
Durban
Port Elizabeth
Cape Town
Ascension Fracture Zone
St. Helena Fracture Zone
Romanche Fracture Zone
Chain Fracture Zone
Rio Grande Fracture Zone
Mozambique Basin
Mozambique Plateau
Agulhas Basin
Agulhas Plateau
Mascarene Basin
Somali Peninsula
Ethiopian Highlands
Atlas Mts.
Great Rift Valley
Tropic of Cancer
Equator
Tropic of Capricorn

ΑΦΡΙΚΗ



Ποταμοί **Αφρικής**:

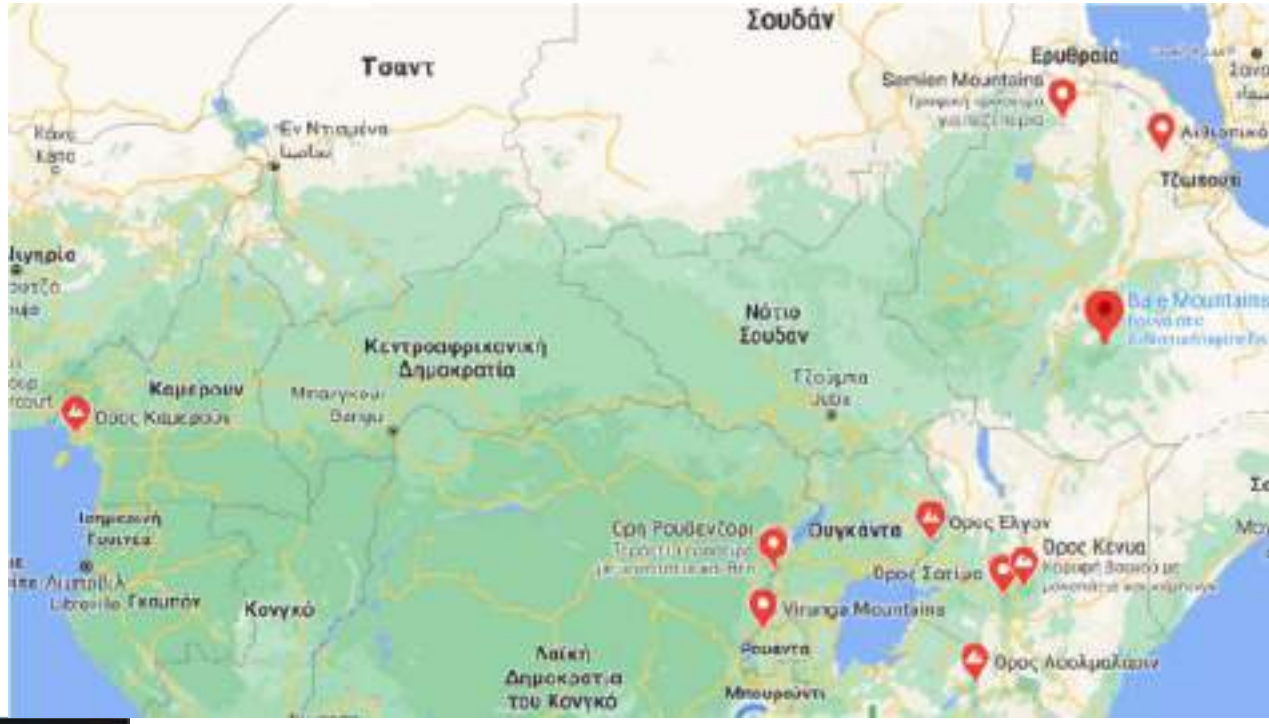
1. *Νείλος (6650κμ),*
2. *Κονγκός (4700Κμ),*
3. *Νίγηρας (4160Κμ),*
4. *Ζαμβέζης ή Μοζαμβίκης(2600Κμ)*
5. *Οράγγης –Orange (Ν. Αφρική) ~(1900Κμ),*
6. *Σενεγάλης (1000Κμ),*

Λίμνες Αφρικής: Βικτώρια, Τανκανίκα, Νυάσα, Τσάντ, Εδουάρδου και Αλβέρτης, Μαλάουι

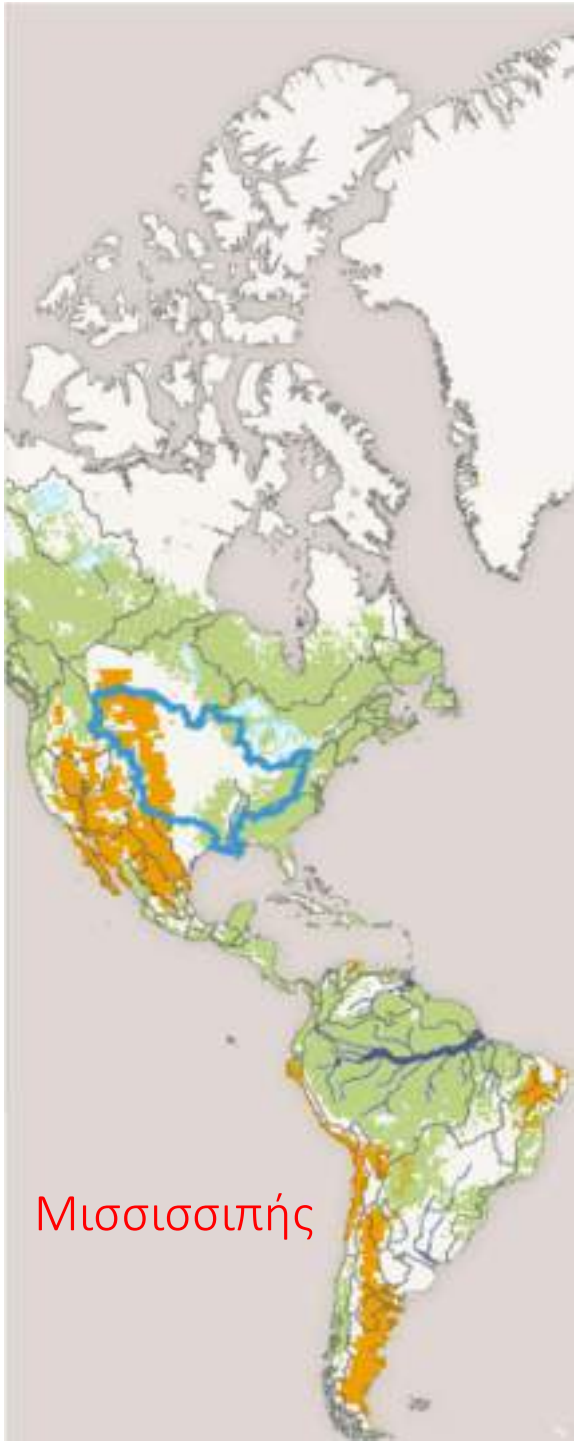
Όρη Αφρικής:

1. *Άτλαντα (Μαρόκο) (4167μ),*
2. *Αβησσυνίας (Αιθιοπίας): Όρη Σεμιέν), Κορυφή Ρας Ντασέν (4600μ), & Όρη Μπάϊλ (4377μ)*
3. *Ρουβενζόρι (Κονγκό-Ουγγάντα) (5110μ)*
4. *Κιλιμάντζαρο (Κένυα- Τανζανία)–κορυφή Κίμπο (6010μ),*
5. *Καμερούν (~4000μ μεταβάλλεται από 4040-4100μ λόγω του ότι είναι ενεργό ηφαίστειο)*

Τα Αφρικανικά υψίπεδα
απ’ τα οποία πηγάζουν μεγάλοι ποταμοί



όνιος


Μισσισσιπής

ΑΜΕΡΙΚΗ
Μακέντζυ

Ρίο Ντε Λα Πλάτα

ιοί **Β. Αμερικής**:

Μισσισσίπης (3730 χμ), *(Προσοχή, στη Wikipedia τα σωστά νούμερα είναι στα αγγλικά μόνο)*

Ριο Γκράντ (3000 χμ),

*Κολοράντο (*2.330 χμ),

*Μακένζυ (*1.738 χμ)

ς: Superior-Σουπέριορ, Ήρι-Erie, Οντάριο, Μίτσιγκαν, Huron

ώδη (4400m) και Απαλλάχια (2037m), ΜακΚίνλεϊ) (6.198 μ)

ιοί **Ν. Αμερικής**:

Αμαζόνιος 6.992 χμ, Αρχικά το μήκος του είχε υπολογιστεί σε 6.400 χλμ., αλλά μετά από δορυφορικές μελέτες αποδείχτηκε ότι πηγές του ορίζονται στην περιοχή *Apacheta Creek*, με συνέπεια το συνολικό μήκος του να ανέρχεται σε 6.992 χλμ.,[2] οπότε είναι ο μακρύτερος ποταμός στη Γη. μέση παροχή, που ανέρχεται σε 219.000 κυβικά μέτρα

Παρανά, (4.880 Km) ΑΡΓΕΝΤΙΝΗ-ΠΑΡΑΓΟΥΑΗ

Ρίο ντε Λα Πλάτα, (290 Km) ποταμοκόλπος ο οποίος σχηματίζεται μετά τη συμβολή των ποταμών Παρανά (άρα και Παραγουάη) και Ουρουγουάη.

Παραγουάης (2.695 Km) *ΒΡΑΖΙΛΙΑ-ΠΑΡΑΓΟΥΑΗ -ΑΡΓΕΝΤΙΝΗ -ΒΟΛΙΒΙΑ εκβάλλει στον Παρανά*

Ορινόκος (2100 km) ΒΕΝΕΖΟΥΕΛΑ

Ουρουγουάης (1800 km) ΟΥΡΟΥΓΟΥΑΗ εκβάλλει στον Ρίο ντε λα πλάτα

ινες: Τιτικάκα

η: *Άνδεις (~7000m , 6961m)*

ιοί **Αυστραλία**: *Μάρρεν, Ντάρλιγκ,* Όρη Αυστραλία: *Κοσκιούσκο (2220m)*

Μισισιπής Ποταμός

Άγιος Λαυρέντιος &
οι μεγαλύτερες λίμνες του πλανήτη
(παγετωνικής προέλευσης)

Ποταμοί Ασίας:

1. *Γιάνγκ τσε (6300Κμ)*
2. *Κίτρινος (5464Κμ),*
3. *Όμπ -Ιρτύς (5400 Κμ),*
4. *Γενισέι (5075Κμ),*
5. *Αμούρ (4440Κμ),*
6. *Λένας (4300Κμ),*
7. *Μεκόγκ (4350Κμ),*
8. *Ινδός (3200Κμ),*
9. *Βραχμαπούτρας (2900Κμ),*
10. *Ευφράτης (2800Κμ),*
11. *Γάγγης (2700Κμ),*
12. *Τίγρης (1850Κμ),*

- **Όρη Ασίας**:

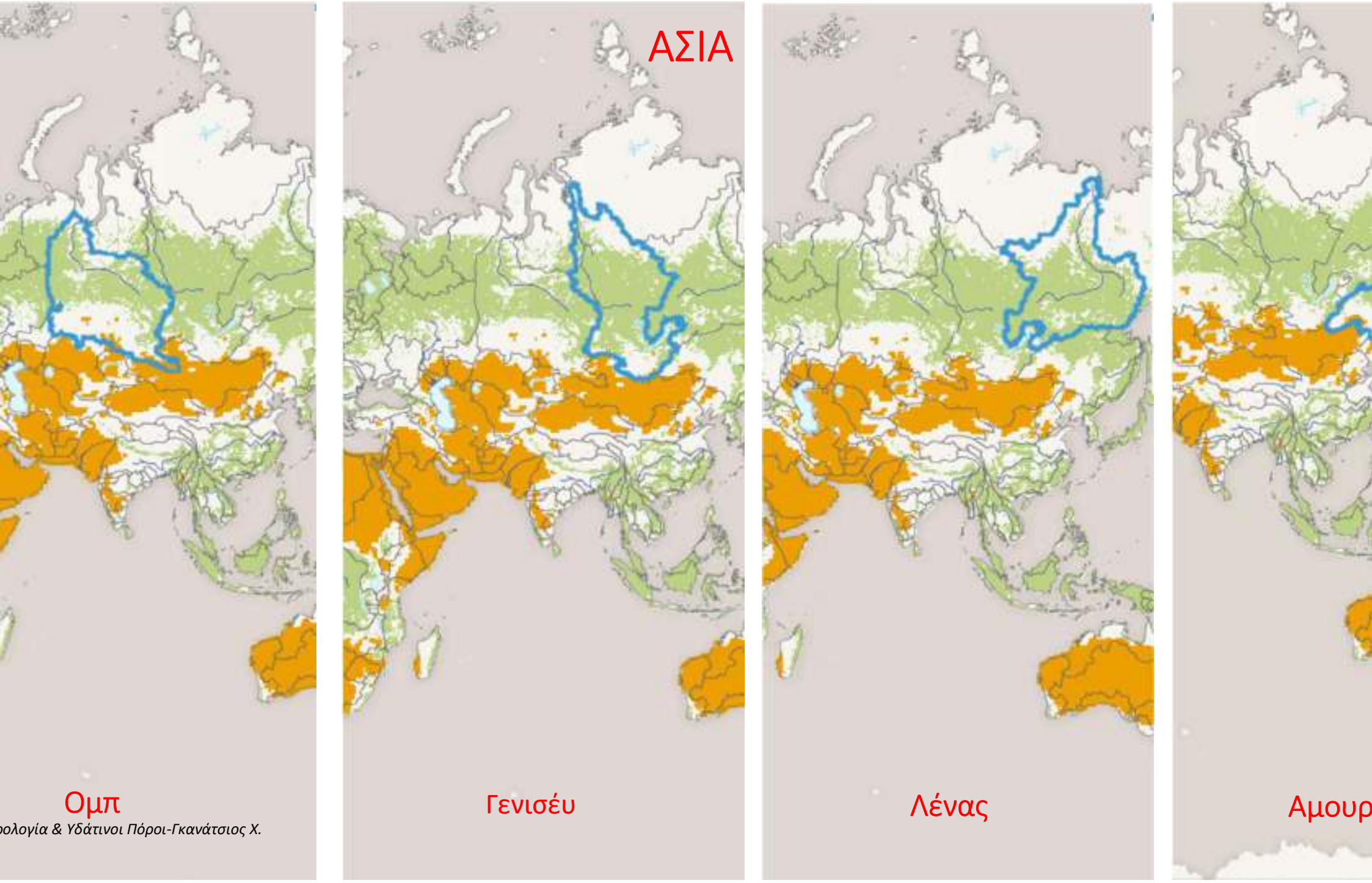
1. *Ιμαλάϊα -Εβερεστ (8882μ),*
2. *Ιντουκούς (7700μ)*
3. *Ελμπούρζ (5671μ) (ΙΡΑΝ)*
4. *Καύκασος (ΓΕΩΡΓΙΑ)*

Η υψηλότερη κορυφή του είναι στη Ρωσία

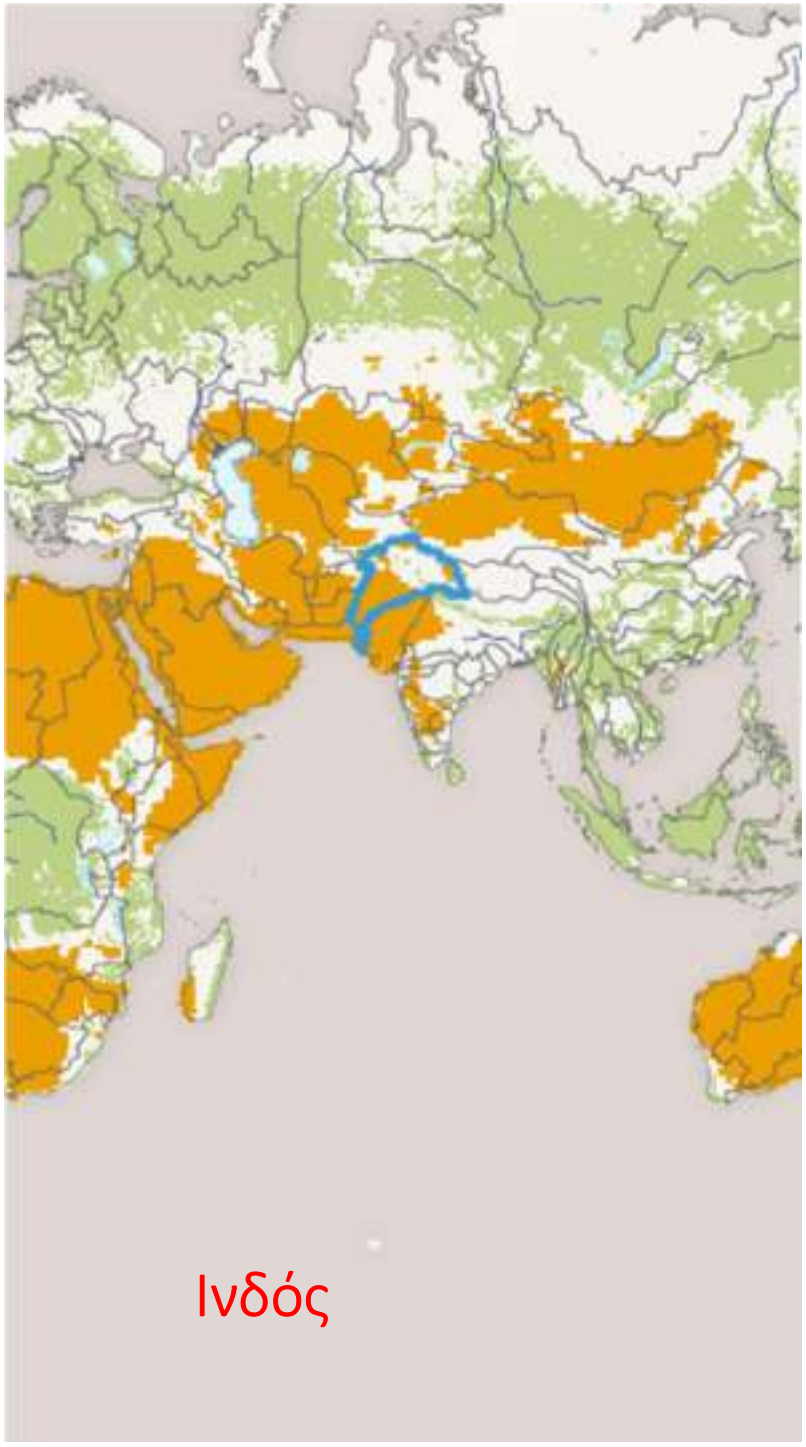
1. *Αραράτ (5137μ)*
2. *Αλτάϊ (4500μ) (ΜΟΓΓΟΛΙΑ)*
3. *Ζάγρος (4400μ) (ΙΡΑΝ)*
4. *Φούτζι, (3776μ) (ΙΑΠΩΝΙΑ)*

Μεγάλες Λίμνες Ασίας:

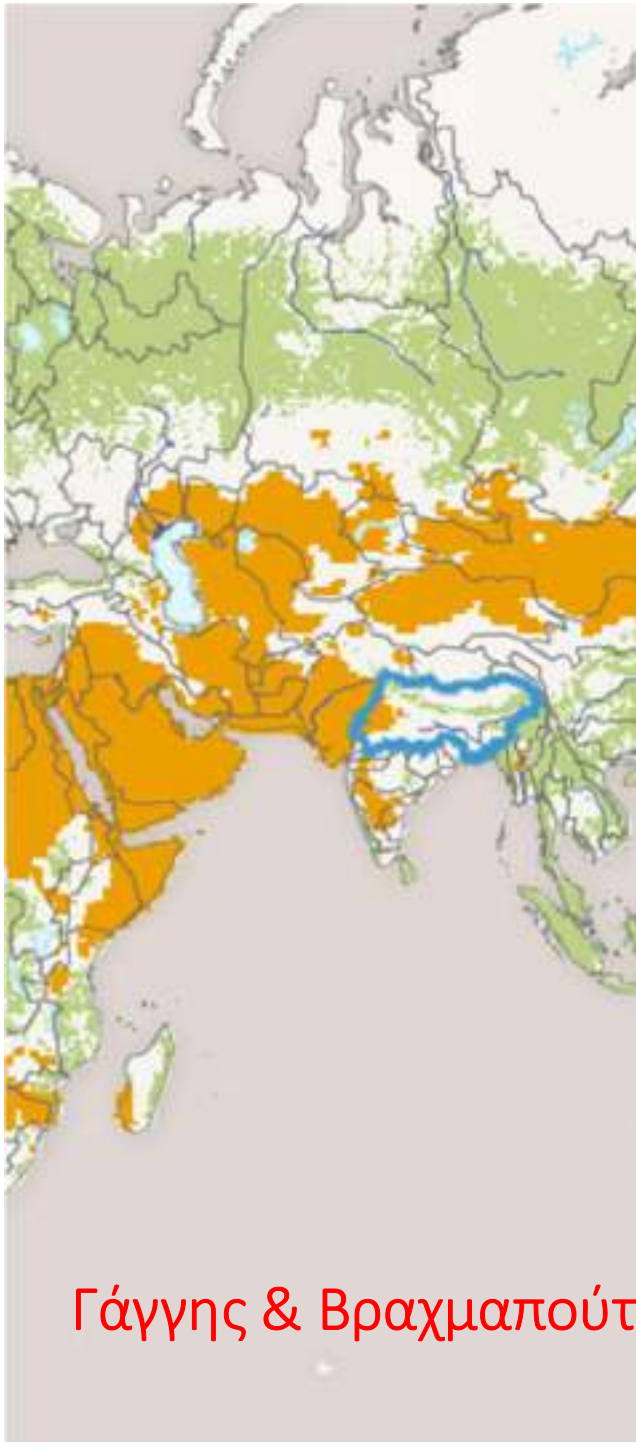
Αράλη, Βαϊκάλη, Κασπία


ΑΣΙΑ
Ομπ
Γενισέυ
Λένας
Αμουρ

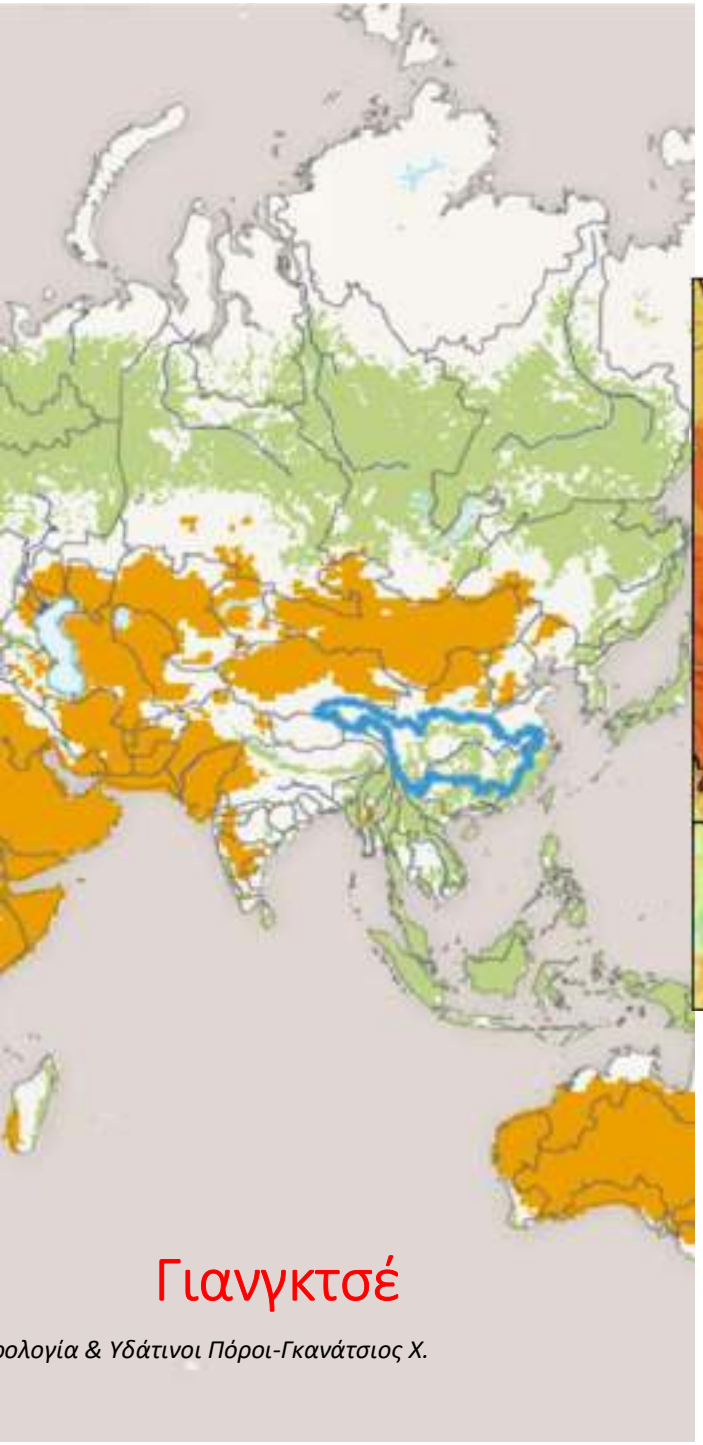
Τίγρης & Εφράτης



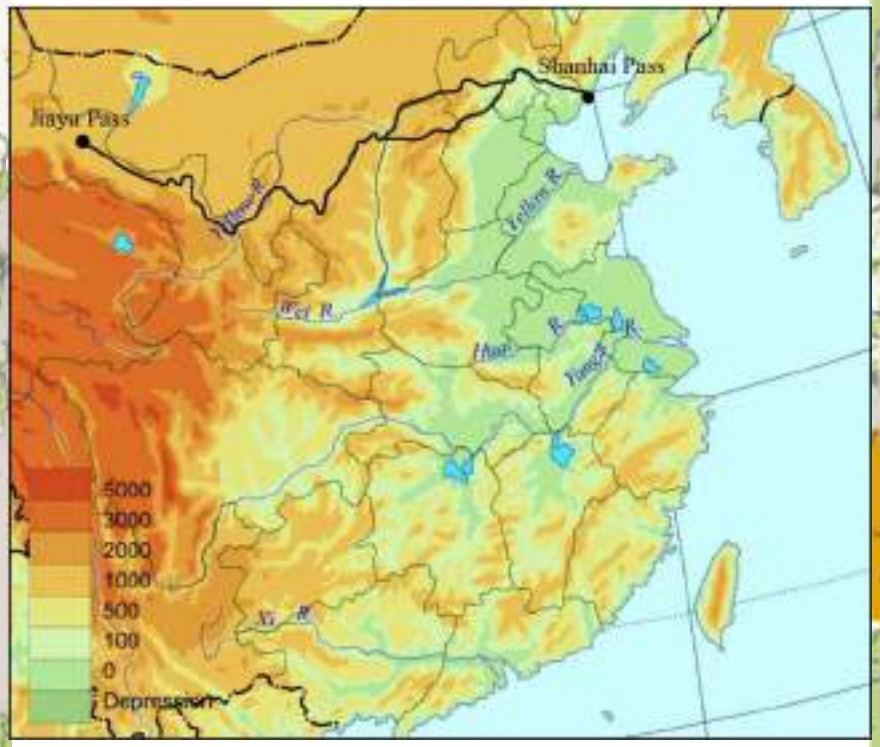
Ινδός



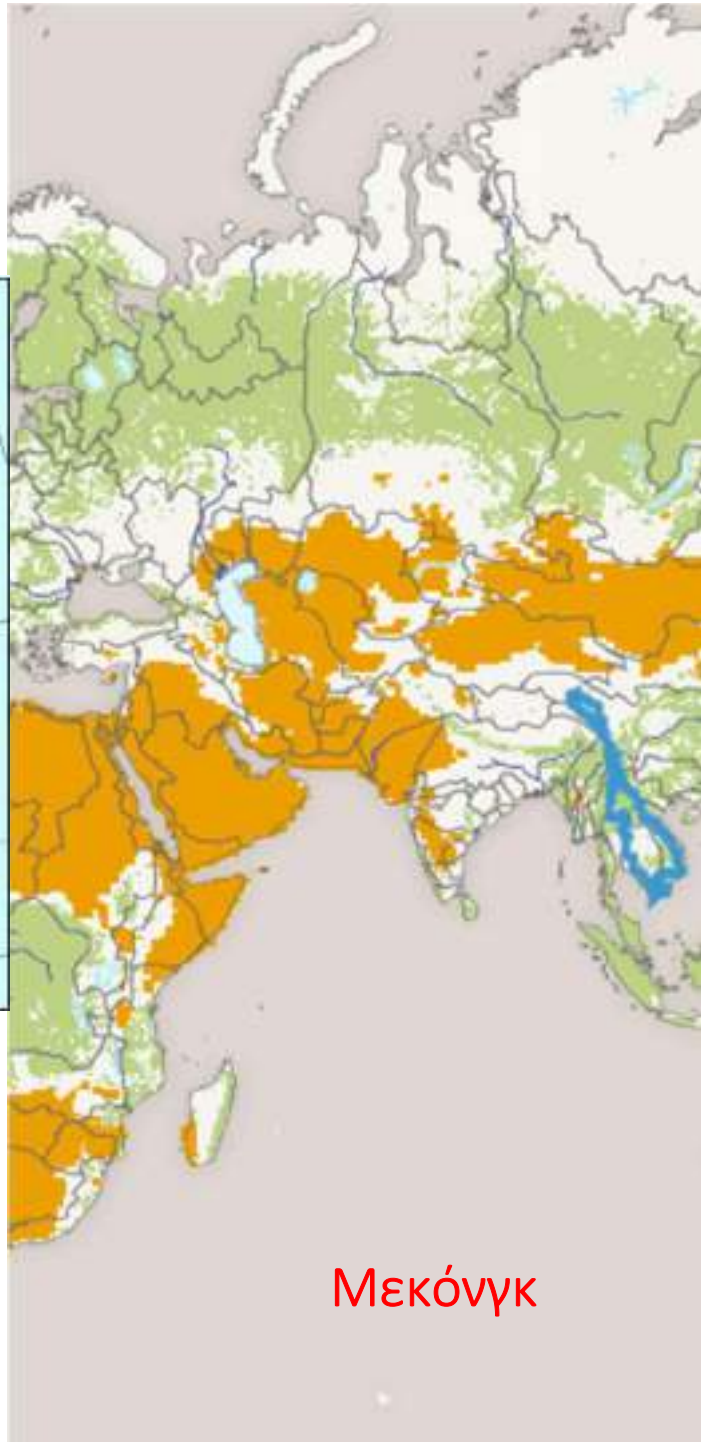
Γάγγης & Βραχμαπούτ



Γιανγκτσέ



Γιανγκτσέ-Yangzi R.
& Κίτρινος-Yellow R.



Μεκόνγκ

Οι μεγαλύτερες λεκάνες απορροής του πλανήτη:

Amazon (7 M* km^2), (*M=εκατομμύρια)
Congo (4 M km^2),
Nile (3.4 M km^2),
Mississippi (3.2 M km^2),
Río de la Plata (3.17 M km^2).
Ob (3 M km^2).
Yenisei (2.58 M km^2).
Lena (2.49 M km^2).
Niger (2,26 M km^2).
Amur (1,9 M km^2).
Mackenzie (1,8 M km^2).
Yangtze (1,8 M km^2).
Volga (1,4 M km^2).
St. Lawrence (1,34 M km^2).
Zambezi (1,332 M km^2).
Missouri (1,331 M km^2) (παραπόταμος Mississippi)
Paraguay (1,1 M km^2).
Indus 1,08 M km^2).

3 ποτάμια που αποστραγγίζουν τη μεγαλύτερη ποσότητα νερού
αι **Αμαζόνιος**, **Γάγγης** και **Κονγκός**.

Τα μεγαλύτερα σε μήκος ποτάμια της γης:

1. ***Αμαζόνιος*** Μήκος ***6.992*** km. Λεκάνη απορροής **7.050.0**
2. **Κονγκός** Μήκος 4.700 Km. Λεκάνη απορροής **4.000.000**
3. ***Νείλος*** Μήκος 6.650 km. Λεκάνη απορροής **3.400.000**
4. ***Μισσισσιπής*** Μήκος **6.000** km. Λεκάνη απορροής **3.200.000**
5. **Ομπ** Μήκος 5.462 Km. Λεκάνη απορροής **3.000.000**
6. **Παρανά** Μήκος 4.880 Km. Λεκάνη απορροής **2.600.00**
7. ***Γενισέι*** με μήκος 5.539 km . Λεκάνη απορροή **2.580.00**
8. **Λένας** Μήκος 4.400 Km. Λεκάνη απορροής **2.490.00**
9. **Αμούρ** Μήκος 4.444 Km. Λεκάνη απορροής 1.900.00
10. ***Γιανγκτσέ*** Μήκος 6.300 km. Λεκάνη απορροής **1.800.0**
11. ***Κίτρινος Ποταμός*** Μήκος 5.464 Km
    ο 2ος ***μεγαλύτερος ποταμός της Κίνας***.
    Λεκάνη απορροής 0.752.00

Οι μεγαλύτερες λίμνες της Γης

ΗΠΕΙΡΟΣ	ΛΙΜΝΗ	ΕΚΤΑΣΗ (τ. χμ.)
Ευρώπη	Κασπία (Θάλασσα)	371.000
Αμερική	Σουπίριορ	82.100
Αφρική	Βικτωρία	68.422
Ασία	Αράλη	66.458
Αμερική	Χιούρον	59.600
Αμερική	Μίσιγκαν	57.800
Αφρική	Τανγκανίκα	32.892
Ασία	Βαϊκάλη	31.500

Δασική Υδρολογία & Υδάτινοι Πόροι

ॐ