

Δημήτρης Μ. Παπαμιχαήλ  
Καθηγητής Τμήματος Γεωπονίας ΑΠΘ

Χρήστος Σ. Μπαρπατζιμόπουλος  
Καθηγητής Τμήματος Γεωπονίας ΑΠΘ

# Εφαρμοσμένη ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ



Δ. Παπαμιχαήλ, Χ. Μπαμπατζιμόπουλος  
Εφαρμοσμένη Γεωργική Υδραυλική

ISBN 978-960-456-415-6

© Copyright 2014, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Δ. Παπαμιχαήλ, Χ. Μπαμπατζιμόπουλος

---

*Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.*

---

**Φωτοστοιχειοθεσία**  
**Εκτύπωση**  
**Βιβλιοδεσία**

**Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ**

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας  
Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19  
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



**www.ziti.gr**

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ:**

Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη  
Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

**ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΠΩΛΗΣΗ ΛΙΑΝΙΚΗ-ΧΟΝΔΡΙΚΗ:**

Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα  
Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ:** [www.ziti.gr](http://www.ziti.gr)

Στη Μαρία  
και στη Μαρία

## Πρόλογος

Στην Ελλάδα, η αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων υπήρξε ραγδαία κατά τα τελευταία 60 χρόνια. Εκτιμάται ότι κατά τη δεκαετία του 40 οι αρδευόμενες εκτάσεις ήταν κάπου μεταξύ 2 και 2.5 εκατομμυρίων στρεμμάτων, για να ξεπεράσουν σήμερα τα 14.5 εκατομμύρια στρέμματα. Αυτό συνετέλεσε στην αλματώδη αύξηση της γεωργικής παραγωγής, που αρχικά εξασφάλισε την αυτάρκεια της χώρας σε βασικά γεωργικά προϊόντα και, με την παράλληλη εισαγωγή νέων καλλιεργειών και ποικιλιών, αύξησε στη συνέχεια το εύρος των προσφερόμενων προϊόντων για εσωτερική κατανάλωση και για εξαγωγή. Η μετατροπή σε μεγάλο ποσοστό της ελληνικής γεωργίας από ξηρική σε αρδευόμενη υπήρξε κοσμογονική και αύξησε κατακόρυφα το εισόδημα των αγροτών, με παράλληλη όμως αύξηση της κατανάλωσης νερού, που ανέρχεται περίπου στο 80% του χρησιμοποιούμενου καλής ποιότητας νερού. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης νερού για άρδευση άσκησε, όπως ήταν φυσικό, ισχυρότατη πίεση πάνω στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους, τόσο στους επιφανειακούς όσο και στους υπόγειους, με παράλληλη υποβάθμισή τους. Η οδηγία 2000/60 έδινε μεγάλη σημασία στην ποιότητα του νερού, αλλά αναγνωρίζεται πλέον ο κομβικός ρόλος και της ποσοτικής διάστασης.

Επίσης, οι διαμορφούμενες σήμερα συνθήκες παγκοσμιοποίησης της οικονομίας και ο σκληρός ανταγωνισμός που αυτή συνεπάγεται, όπως και η ανειλημμένη απόφαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προϊούσα μείωση των επιδοτήσεων, δημιουργούν ασφυκτικές πιέσεις στη διάθεση των ελληνικών αγροτικών προϊόντων στην Ελληνική, Ευρωπαϊκή και παγκόσμια αγορά. Η επιβίωση των προϊόντων αυτών θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από τη συμπίεση του κόστους παραγωγής, ένα μεγάλο μέρος του οποίου οφείλεται στις δαπάνες άρδευσης. Με βάση τα παραπάνω, το πρόβλημα της περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού στη χώρα μας είναι έντονο και, αν επιβεβαιωθούν και τα σενάρια της κλιματικής αλλαγής, θα γίνει εντονότερο.

Ο στόχος, επομένως, της εξοικονόμησης νερού και της ελαχιστοποίησης του κόστους άρδευσης είναι εξαιρετικά σοβαρός. Η μελλοντική πρόκληση για τη γεωργία είναι η εξασφάλιση της επάρκειας τροφίμων με την αύξηση της παραγωγής, υπό την προϋπόθεση όμως της διατήρησης των φυσικών πόρων. Η απαίτηση για αύξηση της παραγωγής συνδέεται με αύξηση της κατανάλωσης αρδευτικού νερού και η πρόκληση έγκειται στην αναζήτηση διαδικασιών για περισσότερη παραγωγή με λιγότερο νερό. Στο παρελθόν η αυξημένη απαίτηση για πα-

ραγωγή τροφίμων ικανοποιήθηκε με την αύξηση της καλλιεργήσιμης γης. Σήμερα οποιαδήποτε αύξηση της γεωργικής παραγωγής πρέπει απαραίτητα να βασίζεται στον αξιόπιστο υπολογισμό των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό άρδευσης, στο σωστό προγραμματισμό των αρδεύσεων, στο σωστό σχεδιασμό των μεθόδων άρδευσης και σε σημαντικές βελτιώσεις στη λειτουργία, διαχείριση και συντήρηση των αρδευτικών δικτύων με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών του αρδευτικού νερού κατά τη μεταφορά, διανομή και εφαρμογή του. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες και περιορισμοί υποχρεώνουν τους επιστήμονες, τους μελετητές και αυτούς που διαμορφώνουν αποφάσεις να αξιολογήσουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σύγχρονων αρδευτικών τάσεων και να βρουν καινοτόμες λύσεις και μεθόδους εξοικονόμησης αρδευτικού νερού με σκοπό την υιοθέτηση αιφώρων αρδευτικών πρακτικών. Οι συγγραφείς πιστεύουν ότι η ύλη του βιβλίου αυτού δίνει τις απαραίτητες σύγχρονες επιστημονικές γνώσεις για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού των παραπάνω λύσεων.

Το βιβλίο αυτό γράφτηκε για να καλύψει τις ανάγκες του μαθήματος «Γεωργική Υδραυλική» του Τμήματος Γεωπονίας του Α.Π.Θ. Δομήθηκε όμως με τέτοιο τρόπο, ώστε η χρήση του να είναι δυνατή και σε αντίστοιχα μαθήματα άλλων Τμημάτων ή Σχολών Πανεπιστημίων ή Τεχνολογικών Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων της χώρας. Επιπλέον, μπορεί να αποτελέσει ένα πολύτιμο βοήθημα για οποιοδήποτε επιστήμονα δραστηριοποιείται στο αντικείμενο της Γεωργικής Υδραυλικής.

Η ύλη του βιβλίου βασίζεται στο εκτεταμένο ερευνητικό και συγγραφικό έργο των συγγραφέων και ενσωματώνει τη σύγχρονη επιστημονική γνώση σε αντικείμενα σχετικά με τη Γεωργική Υδραυλική. Δόθηκε έμφαση ώστε το βιβλίο να έχει έναν εφαρμοσμένο προσανατολισμό, αποφεύγοντας τις θεωρητικές αποδείξεις, παραπέμποντας όμως τον ενδιαφερόμενο σε εξειδικευμένα βιβλία και επιστημονικά άρθρα.

Έμφαση δόθηκε ώστε σε όλο το βιβλίο η παρουσίαση της θεωρίας να συνοδεύεται με πληθώρα εφαρμογών, για να είναι ευκολότερη η κατανόησή της. Όπου επίσης θεωρείται απαραίτητο, δίνονται πρόσθετες ασκήσεις για εξάσκηση.

Το βιβλίο χωρίζεται ουσιαστικά σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται οι αρχές της Γενικής Υδραυλικής, που αποτελούν το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο για την ομαλή μετάβαση στο δεύτερο μέρος, των Αρδεύσεων. Ειδικότερα στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται θεμελιώδεις έννοιες και ορισμοί απαραίτητοι για την κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων. Ακολουθεί στο δεύτερο κεφάλαιο η περιγραφή των νόμων της υδροστατικής που διέπουν τα ρευστά, όταν αυτά βρίσκονται σε ακινησία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μέτρηση των πιέσεων όπως επίσης και στις ασκούμενες δυνάμεις λόγω των υδροστατικών πιέσεων

σε βυθισμένες επιφάνειες. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι νόμοι της υδροδυναμικής που διέπουν τα ρευστά, όταν αυτά βρίσκονται σε κίνηση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται εδώ στην κατανόηση των νόμων διατήρησης μάζας, ενέργειας και ποσότητας κίνησης. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεταφορά νερού με ανοικτούς αγωγούς και οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι εξισώσεις σχεδιασμού ανοικτών αγωγών, οι υδραυλικές κατασκευές που συναντώνται και είναι απαραίτητες κατά τη μεταφορά νερού με ανοικτούς αγωγούς, όπως επίσης και οι τρόποι μέτρησης της παροχής του νερού που μεταφέρεται με ανοικτούς αγωγούς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της μεταφοράς του νερού με κλειστούς αγωγούς. Παρουσιάζονται οι τρόποι υπολογισμού των απωλειών ενέργειας λόγω των τριβών των μορίων κυρίως με τα τοιχώματα των αγωγών και οι τρόποι υπολογισμού της παροχής του νερού, αλλά και της απαιτούμενης διαμέτρου αγωγών για τη μεταφορά συγκεκριμένης παροχής κάτω από ειδικές συνθήκες απώλειας φορτίου. Επίσης παρουσιάζεται η χρήση των αντλιών για τη μεταφορά νερού με κλειστούς σωληνωτούς αγωγούς.

Το δεύτερο μέρος επικεντρώνεται στις Αρδεύσεις. Ξεκινά από το έκτο κεφάλαιο, όπου περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του εδάφους που σχετίζονται άμεσα με την αποθήκευση και την κίνηση του νερού στο έδαφος, αναλύονται τα μεγέθη όγκου και μάζας των τριών φάσεων του εδάφους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εδαφοφυσικών χαρακτηριστικών του, αναλύεται η διαδικασία κίνησης του εδαφικού νερού, αναλύονται οι τρόποι έκφρασης και οι μέθοδοι μέτρησης της εδαφική υγρασίας, περιγράφονται οι αρδευτικές υγρασιακές σταθερές που διαμορφώνουν τη διαθέσιμη υγρασία και, τέλος, αναλύεται η διήθηση του νερού στο έδαφος και περιγράφονται οι διαδικασίες μέτρησής της.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται η έννοια της εξατμισοδιαπνοής και αναλύονται οι μετεωρολογικές μεταβλητές που την διαμορφώνουν, παρουσιάζονται οι άμεσες μέθοδοι μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής, αναλύονται οι έμμεσες μέθοδοι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής οι οποίες περιλαμβάνουν την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με διάφορες σχέσεις και τον αναλυτικό προσδιορισμό των φυτικών συντελεστών που οδηγούν στην έμμεση εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών.

Στο όγδοο κεφάλαιο προσδιορίζονται οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό άρδευσης και αναλύονται η χρήσιμη βροχή, οι αρδευτικές αποδοτικότητες και η έκπλυση των αλάτων, προσδιορίζονται οι αρδευτικές παράμετροι, το ριζικό σύστημα των καλλιεργειών, το ύψος νερού άρδευσης, η διάρκεια και το εύρος άρδευσης. Παρουσιάζονται επίσης οι διαδικασίες του προγραμματισμού των αρδεύσεων και τέλος περιγράφονται οι πηγές προμήθειας του αρδευτικού νερού.

Στο ένατο κεφάλαιο αναλύονται οι διαδικασίες σχεδιασμού των επιφανειακών μεθόδων άρδευσης και περιλαμβάνουν το σχεδιασμό άρδευσης με λεκάνες, με λωρίδες και με αυλάκια. Στο δέκατο κεφάλαιο αναλύονται οι διαδικασίες σχεδιασμού της άρδευσης με κλασικό καταιονισμό. Στο ενδέκατο κεφάλαιο αναλύονται οι διαδικασίες σχεδιασμού της άρδευσης με αυτοπροωθούμενα συστήματα καταιονισμού και τέλος στο δωδέκατο κεφάλαιο αναλύονται οι διαδικασίες σχεδιασμού της μικροάρδευσης.

Για τη συγγραφή αυτού του βιβλίου οι συγγραφείς βοηθήθηκαν από κοινές επιστημονικές δημοσιεύσεις και διδακτικά συγγράμματα με τους πρωτοπόρους στην Ελλάδα σε αντικείμενα Γεωργικής Υδραυλικής συναδέλφων Καθηγητών του Εργαστηρίου Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του ΑΠΘ: του Ομότιμου Καθηγητή Γεωργίου Τερζίδη τον οποίο ευχαριστούν θερμά και του αείμνηστου Καθηγητή Ζαφείρη Παπαζαφειρίου.

Στην ολοκλήρωση του βιβλίου αυτού συνέδραμαν αρκετοί άνθρωποι, τους οποίους οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται: στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Πανταζή Γεωργίου, αφενός από τον πρώτο συγγραφέα για τη διευκόλυνση της συγγραφής αρκετών παραγράφων του μέρους των Άρδεύσεων με τις κοινές επιστημονικές δημοσιεύσεις και αφετέρου από το δεύτερο συγγραφέα για την ανάγνωση του πρώτου μέρους του βιβλίου και την παροχή εποικοδομητικών σχολίων για την καλύτερη παρουσίαση των διαφόρων εννοιών, στο μέλος ΕΔΙΠ κ. Χάρη Γεωργούση για το σχεδιασμό των σχημάτων που αφορούν το μέρος της Γενικής Υδραυλικής, όπως επίσης και στο μέλος ΕΔΙΠ κ. Σοφία Καβαλιεράτου για τη βοήθειά της στην επεξεργασία ασκήσεων στο πρώτο μέρος του βιβλίου.

Ευχαριστίες επίσης εκφράζονται στις συζύγους μας Μαρία και Μαρία για τη συμπαράστασή τους με κατανόηση και υπομονή σε όλη τη διάρκεια συγγραφής αυτού του βιβλίου.

Η προσπάθεια για τη συγγραφή του βιβλίου αυτού δεν είναι δυνατόν να μην εμφανίζει ελλείψεις και πιθανά λάθη. Για το λόγο αυτό η παροχή οποιωνδήποτε υποδείξεων είναι ιδιαιτέρως ευπρόσδεκτη.

Θεσσαλονίκη, 2014

Δημήτρης Μ. Παπαμιχαήλ,  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

Χρήστος Σ. Μπαμπατζιμόπουλος,  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

# Περιεχόμενα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Θεμελιώδεις έννοιες και ορισμοί

1.1	Ορισμός ρευστού	3
1.2	Συστήματα μονάδων	6
1.3	Βάρος, Μάζα και Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα	10
1.4	Φυσικές ιδιότητες των ρευστών	11
	Πυκνότητα	11
	Ειδικό βάρος	11
	Σχετική πυκνότητα ή ειδική βαρύτητα	12
	Ιξώδες ή συνεκτικότητα	12
	Κινηματικό ιξώδες	13
1.5	Επιφανειακή τάση και τριχοειδή φαινόμενα	14
1.6	Εφαρμογές 1ου Κεφαλαίου	18
1.7	Ασκήσεις για εξάσκηση 1ου Κεφαλαίου	24

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Υδροστατική

2.1	Ορισμός της πίεσης και της δύναμης	29
2.2	Υδροστατική πίεση	30
2.3	Μεταβολή της υδροστατικής πίεσης με το βάθος	32
2.4	Ύψος πίεσης	35
2.5	Μέτρηση των υδροστατικών πιέσεων	36
	2.5.1 Πιεζόμετρα	37
	2.5.2 Μανόμετρα τύπου U	38
	2.5.3 Διαφορικά μανόμετρα	40
	2.5.4 Μηχανικές και ηλεκτρονικές συσκευές μέτρησης της πίεσης	42
2.6	Ασκούμενες δυνάμεις σε επιφάνειες	43
	2.6.1 Ασκούμενες δυνάμεις σε βυθισμένες οριζόντιες επίπεδες επιφάνειες	43
	2.6.2 Ασκούμενες δυνάμεις σε βυθισμένες κεκλιμένες επίπεδες επιφάνειες	44
	Ένταση της δύναμης F	45
	Κέντρο πίεσης	45
	2.6.3 Ασκούμενες δυνάμεις σε βυθισμένες καμπύλες επιφάνειες	48



2.7	Αρχή του Αρχιμήδη .....	51
2.8	Το υδροστατικό παράδοξο .....	52
2.9	Εφαρμογές 2ου Κεφαλαίου .....	54
2.10	Ασκήσεις για εξάσκηση 2ου Κεφαλαίου .....	69

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### *Υδροδυναμική*

3.1	Εισαγωγικές έννοιες .....	75
	Μόνιμη και μη μόνιμη ροή .....	77
	Ομοιόμορφη – ανομοιόμορφη ροή .....	78
	Τροχιά και γραμμή ροής .....	78
3.2	Παροχή και ταχύτητα .....	79
3.3	Νόμος διατήρησης της μάζας. Η εξίσωση συνέχειας .....	81
3.4	Εξίσωση Bernoulli .....	83
3.5	Εξίσωση ενέργειας .....	87
3.6	Εφαρμογές της εξίσωσης ενέργειας .....	89
	3.6.1 Μέτρηση της παροχής μέσω οπών .....	89
	3.6.2 Υπολογισμός του χρόνου εκκένωσης δεξαμενής μέσω οπής .....	92
3.7	Ο νόμος διατήρησης της ποσότητας κίνησης .....	94
3.8	Δύναμη που ασκείται από ροή ρευστού πάνω σε γωνία σωληνωτού αγωγού .....	96
3.9	Δύναμη που ασκείται από κρούση ρευστής φλέβας πάνω σε πτερύγιο .....	101
3.10	Εφαρμογές 3ου Κεφαλαίου .....	102
3.11	Ασκήσεις για εξάσκηση .....	113

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### *Μεταφορά νερού με ανοικτούς αγωγούς*

4.1	Εισαγωγή .....	119
4.2	Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή .....	123
4.3	Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή σε ανοικτούς αγωγούς .....	123
	Εμβαδόν υγρής διατομής και περιβρεχόμενη περίμετρος .....	123
	Υδραυλική ακτίνα .....	125
	Κλίση .....	125
	Αριθμός Reynolds .....	126
	Αριθμός Froude .....	127

4.4	Εξισώσεις σχεδιασμού ανοικτών αγωγών .....	128
	Εξίσωση Chezy .....	128
	Εξίσωση Manning .....	128
4.5	Κρίσιμη ροή και ειδική ενέργεια .....	132
4.6	Υδραυλικό άλμα .....	135
4.7	Υδραυλικές κατασκευές ανοικτών αγωγών – Υδρομετρήσεις .....	138
	4.7.1 Θυρίδες .....	139
	4.7.2 Ροή πάνω από εκχειλιστές .....	143
	4.7.2.1 Ορθογωνικοί εκχειλιστές χωρίς πλευρική συστολή .....	146
	4.7.2.2 Ορθογωνικοί εκχειλιστές με πλευρική συστολή .....	147
	4.7.2.3 Τριγωνικοί εκχειλιστές .....	148
	4.7.2.4 Τραπεζοειδείς εκχειλιστές .....	149
	4.7.2.5 Εκχειλιστές ευρείας στέψης .....	150
4.8	Συσκευή μέτρησης ταχύτητας υδατορευμάτων .....	152
4.9	Μετρητής παροχής Parshall .....	155
4.10	Εφαρμογές 4ου Κεφαλαίου .....	158
4.11	Ασκήσεις για εξάσκηση .....	165

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

167

### *Μεταφορά νερού με κλειστούς αγωγούς*

5.1	Εισαγωγή .....	169
5.2	Εξίσωση ενέργειας κατά τη ροή νερού σε κλειστούς αγωγούς .....	169
5.3	Υπολογισμός απωλειών φορτίου με την εξίσωση Darcy-Weisbach .....	175
	5.3.1 Υπολογισμός του συντελεστή τριβών $f$ της εξίσωσης Darcy-Weisbach .....	178
5.4	Εμπειρική εξίσωση των Hazen – Williams .....	181
	Νομογράφημα για την επίλυση της εξίσωσης Hazen-Williams .....	182
5.5	Επίλυση προβλημάτων σε ευθύγραμμους σωλήνες υπό πίεση .....	185
	5.5.1 Υπολογισμός απώλειας φορτίου $h_f$ .....	185
	Α. Χρήση του διαγράμματος Moody .....	186
	Β. Χρήση ρητών σχέσεων για τον υπολογισμό του $f$ (χωρίς τη χρήση διαγραμμάτων) .....	186
	5.5.2 Υπολογισμός παροχής $Q$ .....	187
	5.5.3 Υπολογισμός διαμέτρου $D$ .....	189
	Ρητές σχέσεις υπολογισμού του $f$ .....	190
5.6	Συστήματα σωληνωτών αγωγών .....	192

5.6.1	Εισαγωγή .....	192
5.6.2	Τοπικές ή ελάχιστον απώλειες ενέργειας .....	193
α)	Τοπικές απώλειες στην είσοδο αγωγού από δεξαμενή .....	193
β)	Τοπικές απώλειες λόγω απότομης στένωσης αγωγού .....	193
γ)	Τοπικές απώλειες εξαιτίας απότομης διεύρυνσης αγωγού .....	195
δ)	Τοπικές απώλειες σε βαθμιαία διεύρυνση .....	197
ε)	Τοπικές απώλειες σε ρυθμιστικές δικλίδες ή βάνες .....	198
στ)	Τοπικές απώλειες σε γωνία .....	200
5.7	Συστήματα σωληνωτών αγωγών σε σειρά .....	200
5.8	Σωληνωτοί αγωγοί με αντλία .....	204
5.9	Υδρομετρήσεις σε κλειστούς αγωγούς .....	206
5.9.1	Ο σωλήνας Pitot .....	207
5.9.2	Μετρητής Venturi .....	210
5.9.3	Διάφραγμα με οπή σε σωληνωτό αγωγό .....	213
5.10	Εφαρμογές 5ου Κεφαλαίου .....	216
5.11	Ασκήσεις για εξάσκηση 5ου Κεφαλαίου .....	228

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

233

### Νερό και έδαφος

6.1	Γενικά .....	235
6.2	Βασικά συστατικά του εδάφους .....	236
6.3	Υφή και δομή του εδάφους .....	237
6.4	Σχέσεις μεταξύ των φάσεων του εδάφους .....	240
	Πραγματική Πυκνότητα .....	240
	Φαινομένη Πυκνότητα .....	241
	Πορώδες .....	242
	Εφαρμογή 1 .....	242
6.5	Κίνηση του εδαφικού νερού .....	243
6.6	Εδαφική υγρασία .....	249
6.7	Ποσοτική έκφραση της εδαφικής υγρασίας .....	251
6.8	Μέτρηση της εδαφικής υγρασίας .....	253
	Βαρυμετρική μέθοδος .....	255
	Μέθοδος του τενσιόμετρου .....	256
	Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης .....	257
	Τράπεζα πίεσης .....	258
	Εφαρμογή 2 .....	260

6.9	Αρδευτικές υγρασιακές σταθερές .....	261
	Υδατοϊκανότητα .....	261
	Σημείο μόνιμης μάρανσης .....	263
	Διαθέσιμη υγρασία του εδάφους .....	263
6.10	Διήθηση .....	264
	Μέτρηση της διηθητικότητας .....	268
	Εφαρμογή 3 .....	272

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

277

### *Εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών*

7.1	Γενικές έννοιες και ορισμοί .....	279
7.2	Μετεωρολογικές μεταβλητές διαμόρφωσης της εξατμισοδιαπνοής .....	282
7.2.1	Θερμοκρασία και υγρασία της ατμόσφαιρας .....	283
7.2.2	Άνεμος .....	287
7.2.3	Ηλιακή ακτινοβολία .....	288
7.2.4	Ροή αισθητής θερμότητας στο έδαφος .....	293
7.3	Άμεσες μέθοδοι μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής .....	294
7.3.1	Μέθοδος διαδοχικών δειγματοληψιών .....	294
	Εφαρμογή 1 .....	296
7.3.2	Μέθοδος υδατικού ισοζυγίου .....	297
7.3.3	Μέθοδος λυσίμετρων .....	298
7.4	Έμμεσες μέθοδοι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής .....	300
7.4.1	Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς .....	301
	Μέθοδος Blaney–Criddle κατά SCS .....	303
	Τροποποιημένη μέθοδος Penman κατά FAO–24 .....	305
	Μέθοδοι FAO–56 Penman–Monteith και ASCE–standardized Penman–Monteith .....	307
	Μέθοδος FAO–56 Penman–Monteith με ελλιπή δεδομένα .....	308
	Μέθοδος Hargreaves–Samani .....	309
	Μέθοδος Priestley–Taylor .....	310
	Μέθοδος Εξατμισήμετρου .....	310
	7.4.1.1. Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για τις Ελληνικές συνθήκες .....	313
	Εφαρμογή 2 .....	315
7.5	Φυτικοί συντελεστές .....	327
7.5.1	Στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών .....	328
	Χαρακτηριστικά των τεσσάρων σταδίων ανάπτυξης .....	328
	7.5.1.1 Στάδια ανάπτυξης διαφόρων καλλιεργειών για τις Ελληνικές συνθήκες .....	334

7.5.2 Φυτικοί συντελεστές κατά FAO-56 Penman – Monteith .....	336
Εφαρμογή 3 .....	345
7.5.2.1. Φυτικοί συντελεστές διαφόρων καλλιεργειών για τις Ελληνικές συνθήκες .....	346
7.5.3 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας .....	348

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

351

### ***Ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό άρδευσης και προγραμματισμός αρδεύσεων***

8.1 Ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό άρδευσης .....	353
8.1.1 Χρήσιμη βροχή .....	356
8.1.2 Αρδευτικές αποδοτικότητες .....	357
8.1.3 Έκπλυση των αλάτων .....	363
Εφαρμογή 1 .....	367
8.2 Αρδευτικές παράμετροι .....	370
8.3 Ριζικό σύστημα των καλλιεργειών .....	373
8.4 Διαθέσιμη και ωφέλιμη υγρασία .....	379
8.5 Ύψος νερού άρδευσης, διάρκεια και εύρος άρδευσης .....	381
Εφαρμογή 2 .....	383
8.6 Προγραμματισμός των αρδεύσεων .....	386
Εφαρμογή 3 .....	386
8.7 Προγραμματισμός αρδεύσεων με χρήση μαθηματικών μοντέλων .....	395
8.8 Πηγές προμήθειας αρδευτικού νερού .....	396

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

399

### ***Επιφανειακές μέθοδοι άρδευσης***

9.1 Γενικά .....	401
9.2 Επιφανειακή άρδευση .....	401
9.2.1 Άρδευση με κατάκλυση .....	407
Εφαρμογή 1 .....	413
9.2.2 Άρδευση με λωρίδες ή περιορισμένη διάχυση .....	414
9.2.2.1 Τεχνικές αύξησης της αποδοτικότητας εφαρμογής στη μέθοδο με λωρίδες .....	421
Εφαρμογή 2 .....	423

9.2.3 Άρδευση με αυλάκια .....	425
9.2.3.1 Τεχνικές αύξησης της αποδοτικότητας εφαρμογής στη μέθοδο με αυλάκια .....	432
Εφαρμογή 3 .....	435
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10</b> .....	441
<b>Άρδευση με κλασικό καταιονισμό</b>	
10.1 Γενική περιγραφή .....	443
10.2 Δίκτυο εφαρμογής .....	448
Εφαρμογή 1 .....	451
10.3 Δίκτυο μεταφοράς .....	459
Εφαρμογή 2 .....	463
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11</b> .....	467
<b>Άρδευση με αυτοπροωθούμενα συστήματα καταιονισμού</b>	
11.1 Γενικά .....	469
11.2 Χαρακτηριστικά εκτοξευτήρων .....	473
11.3 Φορείο τυμπάνου .....	475
11.4 Πλάτος αρδευόμενης λωρίδας .....	476
11.5 Ταχύτητα μετακίνησης του εκτοξευτήρα .....	477
11.6 Ύψος νερού άρδευσης .....	478
11.7 Απώλειες φορτίου του αγωγού και του φορείου του τυμπάνου .....	478
Εφαρμογή .....	481
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12</b> .....	485
<b>Μικροάρδευση</b>	
12.1 Γενικά .....	487
12.2 Άρδευση με σταγόνες .....	489
12.2.1 Διατάξεις άρδευσης με σταγόνες .....	491
12.2.2 Αρδευτικές παράμετροι άρδευσης με σταγόνες .....	494
Εφαρμογή 1 .....	496
12.2.3 Υδραυλικοί υπολογισμοί της αρδευτικής μονάδας .....	498
12.2.4 Αγωγοί εφαρμογής .....	499

12.2.5	Αγωγός τροφοδοσίας .....	503
12.2.6	Αγωγός μεταφοράς .....	505
	Εφαρμογή 2 .....	508
12.2.7	Μονάδα ελέγχου .....	511
	Φίλτρα .....	511
	Υδρολιπαντήρες .....	513
12.2.8	Ρύθμιση λειτουργίας του δικτύου .....	515
12.3	Άρδευση με μικροεκτοξευτήρες .....	517
12.4	Υπόγεια άρδευση με σταγόνες .....	520
 <b>Βιβλιογραφία .....</b>		<b>523</b>
 <b>Ευρετήριο όρων .....</b>		<b>545</b>

# Κεφάλαιο 1

## Θεμελιώδεις έννοιες και ορισμοί

---



## 1.1 Ορισμός ρευστού

Τα ρευστά σώματα διακρίνονται σε υγρά και σε αέρια. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο σωμάτων είναι ότι τα υγρά σώματα έχουν ορισμένο όγκο αλλά δεν έχουν ορισμένο σχήμα. Παίρνουν πάντοτε το σχήμα του δοχείου μέσα στο οποίο είναι τοποθετημένα. Αντίθετα τα αέρια δεν έχουν ούτε ορισμένο όγκο, ούτε ορισμένο σχήμα και καταλαμβάνουν ολόκληρο το χώρο που βρίσκεται στη διάθεσή τους. Μια άλλη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών σωμάτων είναι ότι τα αέρια συμπεριφέρονται πολύ εύκολα. Αν δηλαδή μια ποσότητα αερίου είναι αποθηκευμένη σε ένα κυλινδρικό δοχείο, το οποίο είναι αεροστεγώς κλειστό με ένα κινούμενο έμβολο, τότε ο όγκος του πολύ εύκολα μπορεί να μειωθεί με μετακίνηση του εμβόλου. Αντίθετα αν στο δοχείο είναι αποθηκευμένο ένα υγρό τότε ανεξάρτητα από τη δύναμη που θα ασκηθεί σ' αυτό μέσω του εμβόλου, ο όγκος του υγρού θα μειωθεί ελάχιστα έως ανεπαίσθητα.

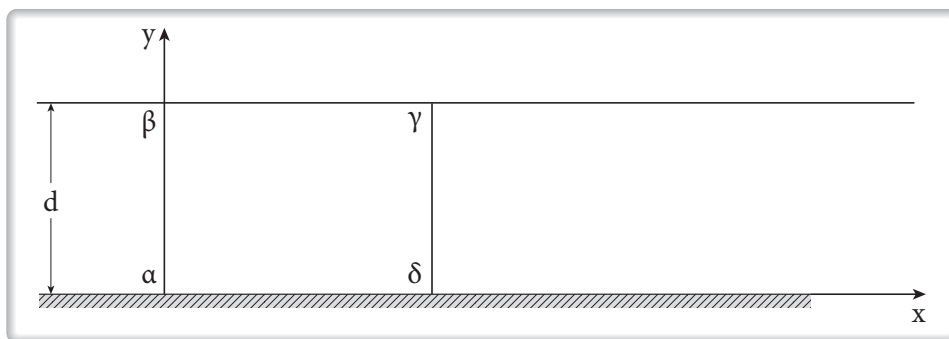
Αντίθετα με τις συμπιεστικές δυνάμεις, στις οποίες τα μεν υγρά αντιστέκονται ενώ τα αέρια δεν αντιστέκονται, και τα δύο αυτά σώματα δεν αντιστέκονται σε διατμητικές (εφαπτομενικές) δυνάμεις. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των ρευστών οδηγεί και στον ορισμό τους:

**Ρευστό είναι το υλικό σώμα που παραμορφώνεται συνεχώς κάτω από την επίδραση μιας διατμητικής (εφαπτομενικής) τάσης που ασκείται σ' αυτό.**

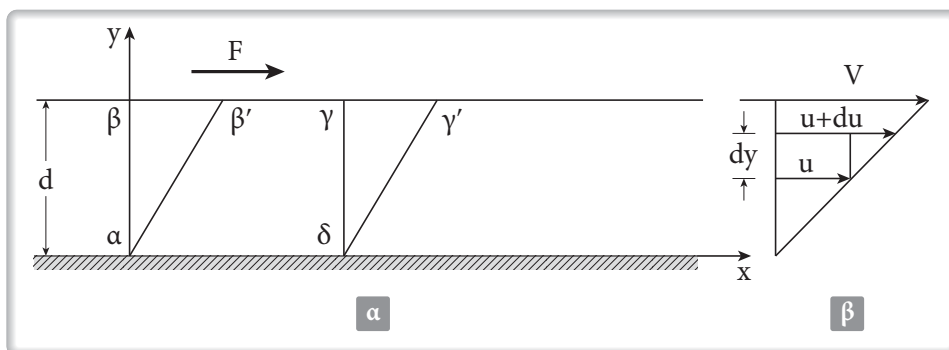
**Διατμητική τάση**,  $\tau$  είναι ο λόγος της δύναμης,  $F$  που ασκείται εφαπτομενικά πάνω σε μια επιφάνεια διά του εμβαδού,  $E$  της επιφάνειας αυτής. Η διατμητική τάση δηλαδή περιγράφεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{F}{E} \quad (1.1)$$

Έστω για παράδειγμα δύο πολύ μεγάλες πλάκες που η μεταξύ τους απόσταση,  $d$  είναι πάρα πολύ μικρή. Η τομή αυτών των πλακών εμφανίζεται στο Σχήμα 1.1. Η κάτω πλάκα είναι πακτωμένη και αμετακίνητη. Η πάνω πλάκα όμως μπορεί να μετακινείται υπό την επίδραση μιας δύναμης. Μεταξύ των δύο πλακών υπάρχει ένα υλικό. Μια δύναμη,  $F$  ασκείται στην πάνω πλάκα με αποτέλεσμα να την μετακινεί με μια ταχύτητα,  $V$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Αν το υλικό που βρίσκεται μεταξύ των δύο πλακών παραμορφωθεί εξαιτίας αυτής της μετακίνησης της πάνω πλάκας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2α, τότε αυτό είναι ρευστό. Είναι προφανές ότι αν το υλικό ήταν στερεό δεν θα παρατηρούνταν καμία παραμόρφωση. Στο Σχήμα 1.2α βλέπουμε ότι το υλικό που βρισκόταν στην περιοχή αβ'γδ μετακινήθηκε στην περιοχή αβ'γ'δ.



Σχήμα 1.1. Παράλληλες πλάκες μεταξύ των οποίων υπάρχει κάποιο υλικό.



Σχήμα 1.2. Γωνιακή παραμόρφωση ρευστού από την άσκηση σταθερής διατμητικής δύναμης και μεταβολή της ταχύτητας μεταξύ των δύο παράλληλων πλακών.

Στο Σχήμα 1.2β φαίνεται το προφίλ της ταχύτητας των μορίων του ρευστού που βρίσκεται μεταξύ των πλακών. Τα μόρια που είναι σε επαφή με την πάνω πλάκα, λόγω του ιξώδους του ρευστού αλλά και της τραχύτητας της πλάκας, είναι προσκολλημένα σ' αυτήν και κινούνται με ταχύτητα  $V$ . Αντίθετα τα μόρια που είναι σε επαφή με την κάτω πλάκα είναι επίσης προσκολλημένα σ' αυτήν και έχουν ως εκ τούτου μηδενική ταχύτητα. Στα ενδιάμεσα σημεία η ταχύτητα μεταβάλλεται γραμμικά λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των δύο πλακών.

Αν  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών, έχει δειχθεί πειραματικά ότι:

$$F = \mu \frac{E \cdot V}{d} \quad (1.2)$$

όπου  $\mu$  είναι μια σταθερά αναλογίας, χαρακτηριστική για κάθε ρευστό, που λέγεται **συντελεστής απόλυτου ή δυναμικού ιξώδους**.

Από τη σχέση (1.2) παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδόν,  $E$  της επιφάνειας και της ταχύτητας,  $V$  τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη,  $F$ . Αντίθετα όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση  $d$  μεταξύ των δύο πλακών τόσο μικρότερη η δύναμη,  $F$ .

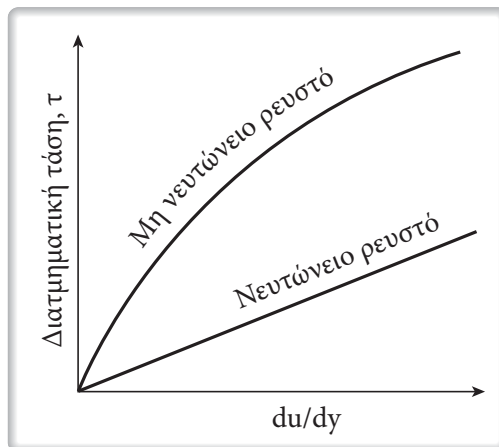
Σύμφωνα με την (1.1) η (1.2) γράφεται:

$$\tau = \mu \frac{V}{d} \quad (1.3)$$

Ας θεωρήσουμε τώρα το διάγραμμα που δείχνει τη μεταβολή της ταχύτητας στο Σχήμα 1.2β και ένα λεπτό τμήμα αυτού ύψους  $dy$ . Η ταχύτητα στο κάτω μέρος του τμήματος αυτού είναι  $u$  και στο πάνω μέρος είναι  $u + du$ . Το πηλίκιο  $du/dy$  εκφράζει το **ρυθμό της γωνιακής παραμόρφωσης** του ρευστού, δηλαδή το ρυθμό μείωσης της γωνίας  $\beta$  και ισούται με το λόγο  $V/d$  καθώς και τα δύο εκφράζουν τη μεταβολή της ταχύτητας διά της απόστασης πάνω στην οποία συμβαίνει η μεταβολή αυτή. Άρα η (1.3) γράφεται:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.4)$$

Η εξίσωση (1.4) εκφράζει το **νόμο του ιξώδους του Νεύτωνα**. Τα ρευστά που υπακούουν στο νόμο αυτόν ονομάζονται **Νευτώνεια ρευστά**. Στα νευτώνεια ρευστά δηλαδή η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης,  $\tau$  και της γωνιακής παραμόρφωσης είναι γραμμική με κλίση ίση με το ιξώδες του ρευστού,  $\mu$ . Το ιξώδες δηλαδή είναι σταθερό και δεν εξαρτάται από την κινητική κατάσταση του ρευστού ή το ρυθμό της γωνιακής παραμόρφωσης  $du/dy$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Αντίθετα υπάρχουν ρευστά, όπως για παράδειγμα κάποιες πλαστικές ουσίες, χυμοί δένδρων, διαλύσεις ζελατίνας, τυπογραφική μελάνη κ.λπ. που δεν έχουν σταθερό ιξώδες αλλά αυτό εξαρτάται από την αμέσως προηγούμενη γωνιακή παραμόρφωση.



**Σχήμα 1.3.** Διατμητική τάση σε σχέση με το ρυθμό της γωνιακής παραμόρφωσης για νευτώνειο και μη νευτώνειο ρευστό.

## 1.6 Εφαρμογές 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

### Εφαρμογή 1

Μια δεξαμενή περιέχει 400 kg υγρού. Η σχετική πυκνότητα του υγρού είναι ίση με 2.1. Να βρεθεί ο όγκος του υγρού (σε m<sup>3</sup> και λίτρα) και το βάρος του (σε N και kp).

Δίνεται:  $\rho_{\text{νερού}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

#### Λύση

Σύμφωνα με τις (1.7) και (1.11) έχουμε:

$$V = \frac{M}{\rho}, \quad \rho = \delta \cdot \rho_{\text{νερού}} = 2.1 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 2100 \text{ kg/m}^3$$

άρα

$$V = \frac{400 \text{ kg}}{2100 \text{ kg/m}^3} = 0.19 \text{ m}^3 = 0.19 \text{ m}^3 \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 190 \text{ l}$$

Σύμφωνα με την (1.6):

$$w = M \cdot g = 400 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 3924 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 3924 \text{ N}$$

$$\Rightarrow 3924 \text{ N} \cdot \frac{1 \text{ kp}}{9.81 \text{ N}} = 400 \text{ kp}.$$

### Εφαρμογή 2

Να βρεθούν η ειδική βαρύτητα (ή σχετική πυκνότητα) και το ειδικό βάρος ενός ρευστού με πυκνότητα ίση με 760 kg/m<sup>3</sup>.

Δίνεται:  $\rho_{\text{νερού}} = 1000 \text{ Kg/m}^3$  και  $\gamma_{\text{νερού}} = 9810 \text{ N/m}^3$ .

#### Λύση

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{\text{νερού}}} = \frac{760 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.76$$

$$\delta = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{νερού}}} \Rightarrow \gamma = \delta \cdot \gamma_{\text{νερού}} = 0.76 \cdot 9810 = 7456 \text{ N/m}^3.$$

## Κεφάλαιο 4

### Μεταφορά νερού με ανοικτούς αγωγούς

---

## 4.1 Εισαγωγή

Η μεταφορά νερού για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών καλλιεργούμενων εδαφών γίνεται με ανοικτούς και κλειστούς αγωγούς. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι οι ανοικτοί αγωγοί έχουν ελεύθερη επιφάνεια νερού, η οποία βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση και η κίνηση του νερού σ' αυτούς γίνεται λόγω βαρύτητας από υψηλότερα σημεία του εδάφους προς χαμηλότερα. Στους κλειστούς αγωγούς, κατά κανόνα κυκλικής διατομής, το νερό βρίσκεται υπό πίεση και καλύπτει όλη τη διατομή του αγωγού. Η κύρια κινητήρια δύναμη για τη ροή του νερού σε κλειστούς αγωγούς είναι η διαφορά ενέργειας μεταξύ του αρχικού και του τελικού σημείου του αγωγού. Για το λόγο αυτό δεν είναι απαραίτητο να κατευθύνονται από υψηλότερα σε χαμηλότερα υψόμετρα. Το νερό με τους κλειστούς αγωγούς μπορεί να μεταφέρεται και από χαμηλότερα σε υψηλότερα υψόμετρα αρκεί να διατίθεται η απαιτούμενη ενέργεια για την προώθησή του.

Το παλαιότερο σύστημα μεταφοράς νερού είναι οι ανοικτοί αγωγοί. Είναι γνωστά τα ρωμαϊκά υδραγωγεία για τη μεταφορά νερού, όπως επίσης και τα κανάλια Ελλάδας, Αιγύπτου και άλλων χωρών με αρχαίο πολιτισμό. Σήμερα η επιλογή μεταξύ ανοικτών και κλειστών αγωγών εξαρτάται κυρίως από το κόστος κατασκευής και συντήρησης του κάθε συστήματος, υπάρχουν όμως πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου από τα οποία εξαρτάται και η τελική επιλογή. Για παράδειγμα οι ανοικτοί αγωγοί είναι περισσότερο κατάλληλοι για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων νερού. Σε ορεινές και λοφώδεις περιοχές όμως το κόστος κατασκευής τους μπορεί να ανεβαίνει πάρα πολύ διότι η χάραξή τους πρέπει να ακολουθεί τις ισούψείς γραμμές του εδάφους ώστε να υπάρχει μια ομαλή κλίση του πυθμένα. Σε αντίθετη περίπτωση η ταχύτητα του νερού μπορεί να είναι πολύ μεγάλη προκαλώντας διάβρωση του εδάφους και καταστροφή των αγωγών. Σε τέτοιες συνθήκες οι κλειστοί αγωγοί θα αποτελούσαν μια καταλληλότερη λύση μεταφοράς του νερού διότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε εδαφικό ανάγλυφο και μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερες ταχύτητες ροής καθώς δεν υπάρχουν κίνδυνοι διάβρωσης εδαφους. Και στους κλειστούς αγωγούς όμως δεν σημαίνει ότι οι ταχύτητες ροής μπορούν να αυξηθούν απεριόριστα διότι δημιουργούνται άλλοι κίνδυνοι όπως για παράδειγμα η δημιουργία **υδραυλικού πλήγματος**, φαινόμενο που οφείλεται στην απότομη διακοπή της ροής π.χ. με κάποια βάννα, οπότε λόγω του μηδενισμού της ταχύτητας και της συμπίεσης του νερού δημιουργείται ένα μετακινούμενο κύμα μεγάλων πιέσεων που μπορεί να προκαλέσει καταστροφή του

αγωγού. Όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ταχύτητα κίνησης του νερού τόσο μεγαλύτερο είναι και το κύμα των υπερπιέσεων.

Στους ανοικτούς αγωγούς η διατομή ποικίλει, π.χ. μπορεί να είναι ορθογωνική, τραπεζοειδής κ.λπ., τα βάθη ροής ανάλογα με τη διατομή μπορεί να είναι διαφορετικά και η τραχύτητα του πυθμένα τους μπορεί να ποικίλει επίσης σε μεγάλο βαθμό. Οι κλειστοί αγωγοί από την άλλη είναι κατά κανόνα κυκλικοί και ως εκ τούτου το σχήμα τους χαρακτηρίζεται μόνο από τη διάμετρό τους, που ορίζει και την περιφέρειά τους. Σημαντικό ρόλο εδώ παίζουν οι απώλειες ενέργειας, που εξαρτώνται από την τραχύτητα του αγωγού, τη διάμετρο, το μήκος και την ταχύτητα ροής.

Εκτός και αν είναι επενδεδυμένοι, οι ανοικτοί αγωγοί κινδυνεύουν από διάβρωση του πυθμένα τους, ενώ η βλάστηση υδροχαρών φυτών σε αυτούς μπορεί επίσης να προκαλεί προβλήματα στη ροή. Πολύ μεγάλο πρόβλημα στη μεταφορά νερού με ανοικτούς αγωγούς όμως, είναι η απώλεια νερού λόγω εξάτμισης και βαθείας διήθησης, όταν δεν είναι επενδεδυμένοι.

Οι προηγούμενες διαφορές κάνουν τη μελέτη της ροής σε ανοικτούς αγωγούς λίγο περισσότερο πολύπλοκη από ότι αυτή στους κλειστούς αγωγούς. Όπως και τους κλειστούς αγωγούς όμως, η πλειονότητα των προβλημάτων και εδώ λύνεται με χρησιμοποίηση των τριών βασικών εξισώσεων που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο: των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ενέργειας και ποσότητας κίνησης. Σύμφωνα και με την περιγραφή της ενέργειας στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, η ολική ενέργεια σε ένα σημείο του ανοικτού αγωγού δίνεται ως άθροισμα του ύψους θέσης, του ύψους πίεσης και του ύψους ταχύτητας:

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g} \quad (4.1)$$

όπου

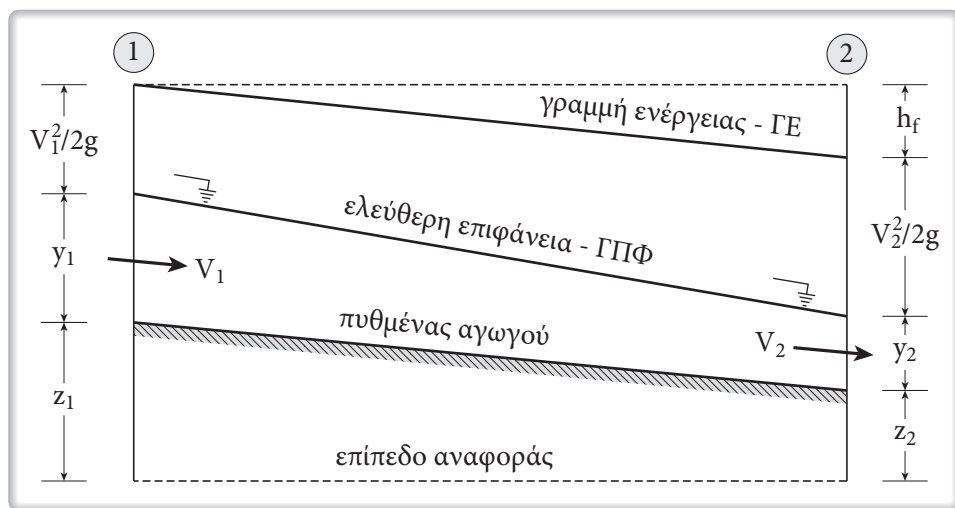
$z$  είναι η απόσταση του πυθμένα από το επίπεδο αναφοράς,

$y$  είναι το βάθος στο συγκεκριμένο σημείο του αγωγού και

$V$  είναι η μέση ταχύτητα ροής (Σχήμα 4.1).

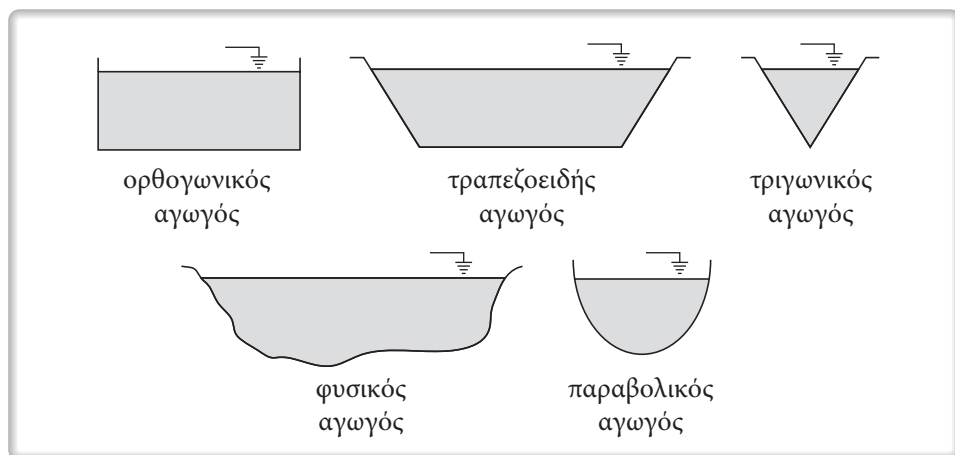
Το ύψος πίεσης στους ανοικτούς αγωγούς ορίζεται από το βάθος ροής και η πιεζομετρική γραμμή ή γραμμή πιεζομετρικού φορτίου ορίζεται από το άθροισμα της απόστασης του πυθμένα από το επίπεδο αναφοράς,  $z$  και του βάθους ροής. Η πιεζομετρική γραμμή δηλαδή συμπίπτει με την ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

Σύμφωνα και με το Σχήμα 4.1 η απώλεια ενέργειας ή φορτίου μεταξύ δύο σημείων σε ένα αγωγό δίνεται από την υψομετρική διαφορά  $h_f$  της γραμμής ενέργειας μεταξύ των δύο αυτών σημείων.



Σχήμα 4.1. Γραμμή ενέργειας (ΓΕ) και γραμμή πιεζομετρικού φορτίου (ΓΠΦ) σε ανοικτό αγωγό.

Οι ανοικτοί αγωγοί διακρίνονται σε **φυσικούς**, όπως είναι τα ποτάμια και σε **τεχνητούς**. Οι τεχνητοί αγωγοί που έχουν αμετάβλητη διατομή και κλίση πυθμένα ονομάζονται **πρισματικοί**. Οι αγωγοί στους οποίους η διατομή και η κλίση αλλάζει κατά το μήκος τους ονομάζονται μη **πρισματικοί**. Οι τεχνητοί αγωγοί μπορεί να έχουν διατομή διαφορετικού σχήματος. Οι περισσότερο συνηθισμένες διατομές είναι τραπεζοειδούς, ορθογωνικού, τριγωνικού ελλειψοειδούς ή παραβολικού αλλά και κυκλικού σχήματος όπου όμως το νερό καλύπτει ένα τμήμα μόνο της κυκλικής διατομής (Σχήματα 4.2-4.3).



Σχήμα 4.2. Διατομές ανοικτών αγωγών.





(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 4.3.**

Τεχνητές διώρυγες μεταφοράς νερού α) ορθογωνικής διατομής  
β) τραπεζοειδούς διατομής  
γ) τριτεύουσα αρδευτική διώρυγα ελλειψοειδούς διατομής

## Κεφάλαιο 11

### Άρδευση με αυτοπροωθούμενα συστήματα καταιονισμού

---

## 11.1 Γενικά

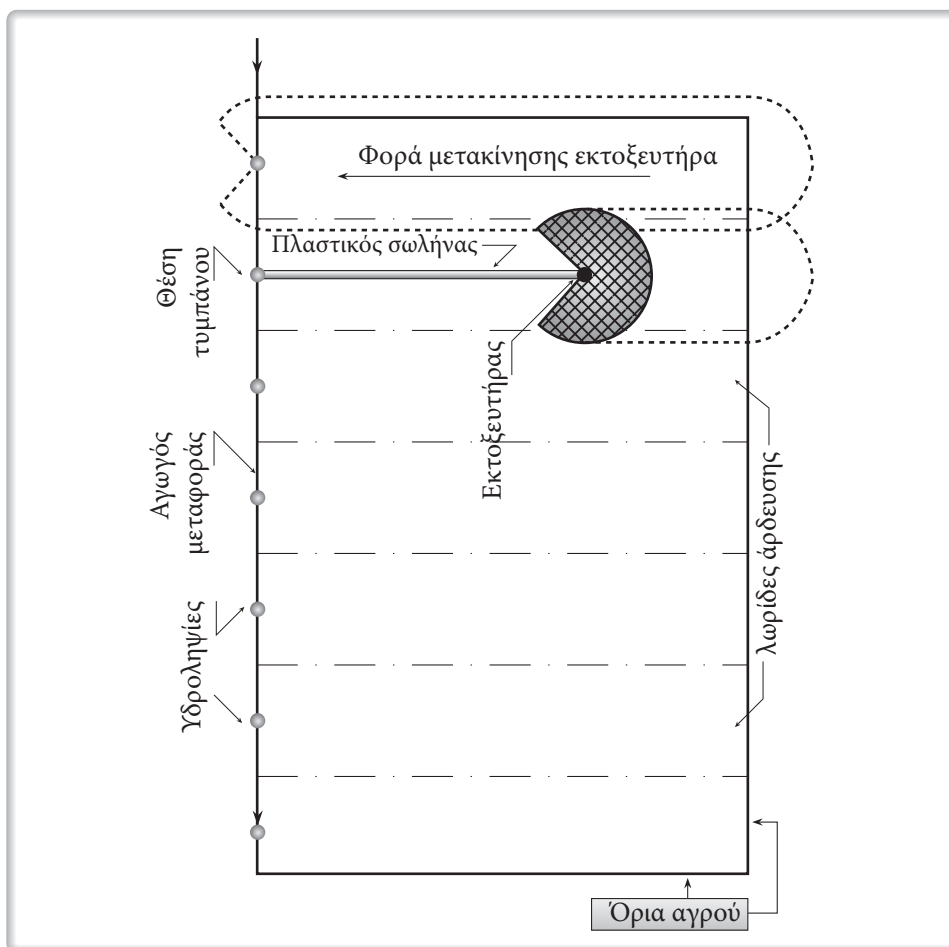
Ο κλασικός καταιονισμός με τον οποίο το νερό διανέμεται σε έναν ή περισσότερους εκτοξευτήρες που λειτουργούν παραμένοντας για ορισμένο χρόνο στάσιμοι και που κατανέμουν το νερό περιστρεφόμενοι, φαίνεται ότι έχει χάσει σημαντικό έδαφος ύστερα από την εμφάνιση των αυτοπροωθούμενων συστημάτων καταιονισμού. Το σύστημα καταιονισμού με αυτοπροωθούμενο εκτοξευτήρα (καρούλι) κατασκευάζεται και αγοράζεται με αυξανόμενους ρυθμούς, για τα ελληνικά δεδομένα. Οι λόγοι που οδήγησαν στη μεγάλη εξάπλωση των αυτοπροωθούμενων εκτοξευτήρων είναι η προοδευτική μείωση των εργατικών χεριών για τη γεωργία και η συνεχής βελτίωση των καλλιεργούμενων ειδών που οδήγησε σε καλλιέργειες πολύ αποδοτικές των οποίων όμως η μεγάλη ανάπτυξη και πυκνότητα σποράς ή φύτευσης καθιστούν το χειρισμό και τη μετακίνηση των υλικών του κλασικού καταιονισμού στο αγροτεμάχιο, δύσκολη και κοπιαστική.

Ο αυτοκινούμενος εκτοξευτήρας υψηλής πίεσης (καρούλι) είναι ένας μεγάλος υψηλής πίεσης εκτοξευτήρας που τροφοδοτείται με νερό μέσω ενός εύκαμπτου σωλήνα από πολυαιθυλένιο και κινείται από το ένα μέχρι το άλλο άκρο του χωραφίου αρδεύοντας μια λωρίδα εδάφους. Το όλο συγκρότημα αποτελείται από ένα φορείο πάνω στο οποίο βρίσκεται ο εκτοξευτήρας και από ένα άλλο φορείο που φέρει ένα τύμπανο πάνω στο οποίο τυλίγεται ο εύκαμπτος σωλήνας (Σχήμα 11.1). Στο φορείο αυτό καταλήγει ο κύριος αγωγός μεταφοράς που φέρνει το



Σχήμα 11.1. Αυτοπροωθούμενο σύστημα καταιονισμού με εκτοξευτήρα υψηλής πίεσης.

νερό από την υδροληψία και συνδέεται με τον εύκαμπτο σωλήνα που είναι τυλιγμένος στο τύμπανο. Το τύμπανο περιστρέφεται με τη βοήθεια ενός μηχανισμού που είναι είτε μια υδραυλική τουρμπίνα είτε ένα έμβολο. Το άλλο άκρο του σωλήνα συνδέεται με τον εκτοξευτήρα. Για να αρχίσει η άρδευση, το φορείο με το τύμπανο τοποθετείται στο πάνω άκρο του χωραφιού και το φορείο με τον εκτοξευτήρα τοποθετείται στο κάτω, ενώ ο εύκαμπτος σωλήνας είναι ξετυλιγμένος συνδέοντας τα δύο φορεία.



Σχήμα 11.2. Τυπική διάταξη άρδευσης αγρού με αυτοπροωθούμενο εκτοξευτήρα.

Με την έναρξη της άρδευσης, το τύμπανο αρχίζει να περιστρέφεται τυλίγοντας το σωλήνα, ο οποίος ταυτόχρονα τροφοδοτεί με νερό τον εκτοξευτήρα και έλκει το φορείο που τον φέρνει, επιτυγχάνοντας έτσι την άρδευση μιας λωρίδας εδά-

φους ανάμεσα στα όρια του χωραφιού. Μετά την άρδευση της λωρίδας αυτής, το σύστημα μετακινείται στη διπλανή και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, μέχρι να αρδευτεί ολόκληρη η έκταση. Το πλάτος της λωρίδας που αρδεύεται κάθε φορά εξαρτάται από τη διάμετρο εκτόξευσης του νερού και την ταχύτητα του ανέμου. Ο εκτοξευτήρας μπορεί να διαγράφει ολόκληρο κύκλο ή μέρος μόνο του κύκλου, οπότε το φορείο με τον εκτοξευτήρα μετακινείται πάνω σε ξερό έδαφος. Μια τυπική διάταξη άρδευσης με καρούλι φαίνεται στο Σχήμα 11.2.

Η επιλογή του κατάλληλου για κάθε περίπτωση συγκροτήματος εξαρτάται από τη διηθητικότητα του εδάφους, το ολικό ύψος νερού άρδευσης, το εύρος άρδευσης, τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, το μήκος της αρδευόμενης λωρίδας και τα πιθανά πλάτη της σε σχέση με το ολικό πλάτος του χωραφιού. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι το σύστημα χρησιμοποιεί όλη την παροχή του κύριου αγωγού μεταφοράς, η οποία υπολογίζεται με τη σχέση (10.15). Το μήκος του εύκαμπτου σωλήνα και η διάμετρός του συνήθως χαρακτηρίζουν τον τύπο του αυτοπρωθόμενου συγκροτήματος. Στο Σχήμα 11.3 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του εύκαμπτου σωλήνα ενός αυτοπρωθόμενου συγκροτήματος.



Σχήμα 11.3. Χαρακτηριστικά του εύκαμπτου σωλήνα ενός αυτοπρωθόμενου συγκροτήματος.



Στην άρδευση με αυτοπροωθούμενα συστήματα καταιονισμού ανήκει η υποκατηγορία της άρδευσης με ράμπα, όπου ο αυτοκινούμενος εκτοξευτήρας υψηλής πίεσης αντικαθίσταται με αυτοπροωθούμενη ράμπα η οποία φέρει αριθμό μικροεκτοξευτήρων. Η επιλογή των χαρακτηριστικών των μικροεκτοξευτήρων έχει σχέση με την ένταση καταιόνισης που επιδιώκεται και εξαρτάται μεταξύ των άλλων από τον τύπο του εδάφους. Το πλάτος της λωρίδας που αρδεύεται ταυτίζεται με το μήκος της ράμπας και ο σχεδιασμός της άρδευσης με ράμπα ακολουθεί τα βήματα του σχεδιασμού της άρδευσης με αυτοπροωθούμενο εκτοξευτήρα υψηλής πίεσης (Lionel (1982), Heermann and Kohl (1983), Παπαζαφερίου και Παπαμιχαήλ (1996), Παπαμιχαήλ και Τσακίρης (2006)). Τα συστήματα άρδευσης με ράμπα ενδείκνυνται για την άρδευση ετήσιων καλλιεργειών στα αρχικά τους στάδια εξαιτίας του ότι η μεγάλη δύναμη πρόσκρουσης των σταγόνων στους αυτοπροωθούμενους εκτοξευτήρες υψηλής πίεσης είναι επιβλαβής στα νεαρά φυτά και στο έδαφος. Από την άλλη πλευρά όταν η καλλιέργεια αναπτυχθεί πολύ, η μετακίνηση της ράμπας είναι δύσκολη και για το λόγο αυτό τα σύγχρονα καρούλια που κυκλοφορούν στην ελληνική αγορά λειτουργούν και με αυτοπροωθούμενο εκτοξευτήρα και με αυτοπροωθούμενη ράμπα (Σχήμα 11.4).



Σχήμα 11.4. Σύστημα καρουλιού με αυτοπροωθούμενο μεγάλο εκτοξευτήρα και αυτοπροωθούμενη ράμπα.

## 12.2 Άρδευση με σταγόνες

Βάση του συστήματος άρδευσης με σταγόνες είναι οι **σταλακτήρες**. Στο Σχήμα 12.2 φαίνεται ένα τυπικό σύστημα άρδευσης με σταγόνες. Το νερό εμφανίζεται στην έξοδο των σταλακτήρων με τη μορφή σταγόνων κατά τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε σε κάθε θέση να διηθούνται στο έδαφος λίγα λίτρα την ώρα. Για να μπορεί να εκπληρώσει σωστά την αποστολή του, ένας σταλακτήρας πρέπει να εξασφαλίζει μικρή και ομοιόμορφη παροχή που να μην επηρεάζεται από περιορισμένες μεταβολές της πίεσης στον αγωγό εφαρμογής, να έχει σχετικά μεγάλη διατομή ροής ώστε να μην αποφράζεται εύκολα, να είναι κατασκευασμένος από υλικό που να μην επηρεάζεται σημαντικά και να μην παθαίνει μόνιμες αλλοιώσεις από τις έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας κατά την έκθεσή του στο χωράφι, να είναι ευκόλοχρηστος και να έχει μικρό κόστος.



Σχήμα 12.2. Τυπικό σύστημα άρδευσης με σταγόνες.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια έχει σχεδιαστεί μια μεγάλη ποικιλία σταλακτήρων (Σχήμα 12.3) που, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, διακρίνονται σε ορισμένες κατηγορίες. Έτσι, ανάλογα με το είδος ροής του νερού, διακρί-

νονται σε σταλακτήρες με **στρωτή ροή**, με **μεταβατική** και με **τυρβώδη ροή**. Ανάλογα με τον τρόπο απόσβεσης ή στραγγαλισμού της πίεσης, διακρίνονται σε σταλακτήρες με **μακρύ διάδρομο ροής** και με **επιστόμιο ή οπή**. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και οι **αυτορυθμιζόμενοι** που διατηρούν σταθερό φορτίο και παροχή με κάποιο μηχανισμό αυτόματης ρύθμισης. Ανάλογα με την ικανότητα αυτοκαθαρισμού τους διακρίνονται σε **αυτοκαθαριζόμενους** και **μη αυτοκαθαριζόμενους** σταλακτήρες είναι κατά κανόνα και αυτοκαθαριζόμενοι.



Σχήμα 12.3. Διάφοροι τύποι σταλακτάρων.

Αν η ροή ενός σταλακτήρα είναι στρωτή, η παροχή του επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Επειδή οι διακυμάνσεις αυτές είναι σημαντικές κατά τη διάρκεια της ημέρας στα χωράφια, η ενστάλλαξη του νερού γίνεται ανομοιόμορφα. Για το λόγο αυτό στα δίκτυα με σταγόνες πρέπει να χρησιμοποιούνται σταλακτήρες με τυρβώδη ροή. Γενικά, η παροχή ενός σταλακτήρα είναι κάποια συνάρτηση της πίεσης λειτουργίας του, που μπορεί να εκφραστεί από μια σχέση της μορφής:



## Ευρετήριο όρων

Αγωγοί απλοί ευθύγραμμοι, 492-493

αγωγοί δύο παράλληλοι, 492-493

- » ελικοειδείς βοηθητικοί, 492
- » εφαρμογής παράλληλοι, 492-493
- » μεταφοράς, 487, 505
- » ανοικτοί, 132
- » ανοικτοί πρισματικοί, 121
- » ανοικτοί τεχνητοί, 121, 129
- » ανοικτοί φυσικοί, 120-121, 123, 126-127, 135, 138-139, 143, 152, 154
- » ανοικτοί μη πρισματικοί, 121

αγωγός αναρρόφησης, 204

- » εφαρμογής, 488, 492, 498, 500, 508
- » κατάθλιψης, 204
- » τροφοδοσίας, 488, 498-499, 503-504, 506, 508, 522

αιωρούμενα σωματίδια, 511

ακτινοβολία εξωγήινη, 288, 290

- » καθαρή, 291, 294, 302, 306-307, 310, 315
- » καθαρή μεγάλου μήκους κύματος, 291
- » καθαρή μικρού μήκους κύματος, 291
- » ολικής αιθρίας, 289

άμμος, 238-239, 247, 262

αμμώδη ή ελαφρά εδάφη, 238

ανακλαστικότητα, 281, 291

ανθρακικά, 512

ανομοιόμορφη ροή, 78, 123, 126

αντλητικό συγκρότημα, 443, 445, 459, 460

αντλία, 204, 221, 513

ανύψωση σωλήνων, 446

απλή ευθύγραμμη διάταξη, 492, 517-518

αποδοτικότητα αντλίας, 204

- » αποθήκευσης ταμειντήρα, 360
- » αρδευτική, 361
- » δικτύου διανομής, 361
- » εφαρμογής, 361, 381, 383, 386
- » του δικτύου, 361-362

αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού, 252

αποτελεσματικότητα έκπλυσης, 363, 367, 370

απώλειες γραμμικές, 175, 192, 453-454, 456, 463

- » τοπικές, 193, 195, 197-198, 453, 456

άργιλος, 238, 511

αργιλώδη εδάφη, 236, 238, 252

άρδευση, καθαρό ύψος νερού, 494, 496

- » ολικό ύψος νερού, 495-496

αρδευτικά δίκτυα επιφανειακά, 358

- » » υπό πίεση, 358

αρδευτική αποδοτικότητα, 355, 357, 367

αρδευτικό δίκτυο, 354, 358-360, 367, 370

αριθμός Froude, 127, 161

- » Reynolds, 75-76, 77, 91, 126-127
- » σταλακτήρων, 494, 496, 500, 503-504
- » της ημέρας του έτους, 288-289

αρνητική πίεση, 249

αρχή του Αρχιμήδη, 51-52

- » του Blaise Pascal, 30

αρχικό στάδιο ανάπτυξης, 328, 330, 345

ατμόσφαιρας θερμοκρασία, 282-285, 291, 293-294, 301, 304, 306-307, 309, 315

- » υγρασία, 279, 282-283, 286, 290, 295-296, 301, 306, 309, 313, 315, 327, 339, 344-345

ατμοσφαιρική πίεση, 8, 284, 315

**Βάθος του ριζοστρώματος, 371**

βαλβίδες ηλεκτρικές διαφραγματικές, 516

- » ογκομετρικές, 516

βαριά εδάφη, 238

βαρυμετρική μέθοδος, 254

βροχή χρήσιμη ή ωφέλιμη, 353, 356

**Γραμμή ενέργειας, 170**

- » πιεζομετρικού φορτίου, 120-121, 171
- » ροής, 78, 90

γραμμικές απώλειες ενέργειας, 175

γωνία επαφής, 244, 249

- » της ώρας δύσης του ηλίου, 288, 290

- Δείκτης φυλλικής επιφάνειας, 329  
 δεύτερος νόμος του Νεύτωνα, 10, 94  
 διαβρωτικά υλικά, 512  
 διάγραμμα Moody, 179, 181, 185, 187, 222, 224  
 διαθέσιμη υγρασία, 263, 372, 379, 383, 386  
 διακόπτες νερού, 515  
 » χειροκίνητοι, 515  
 διαλύματα λιπασμάτων, 512  
 διαλυμένα στερεά, 511  
 διαπνοή, 279, 281-282, 298  
 διάρκεια άρδευσης, 382-383, 490, 496, 513  
 διάταξη εκτοξευτήρων, 448  
 διατμητική τάση, 3, 5  
 διατομή συνεσταλμένη, 90-91  
 διαφορική πίεση, 513-514  
 διάφραγμα με οπή, 213  
 διεθνές σύστημα μονάδων, 6  
 διήθηση, 264-266, 268  
 » βαθιά, 353, 361, 381  
 διηθητικότητα, 264-267, 271-272  
 » αθροιστική, 265  
 » αρχική, 265  
 » βασική ή τελική, 265  
 » στιγμιαία, 265-266, 268, 272  
 διηθητόμετρο κυλινδρικό ή διηθητόμετρο εφαρμογής αρδεύσεων, 268  
 » μισής διατομής, 272  
 » ομόκεντρων κυλίνδρων, 269-270  
 διηθητόμετρα, 268, 270-272  
 δίκτυο εγγείων βελτιώσεων, 359  
 » εφαρμογής, 443, 445, 448, 487  
 » μεταφοράς, 445, 459, 487  
 » οδικό, 358-359  
 » στραγγιστικό, 358  
 δίσκος πίεσης, 260, 262  
 δομή του εδάφους, 237, 240, 246, 261-264  
 δυνάμεις συνάφειας, 15, 249  
 » συνοχής, 15  
 δύναμη, 29-30, 34-35, 44-45, 50-51, 63, 66-67  
 δυναμικό βαρύτητας, 243-244  
 » πίεσης, 243-244, 249-250, 253-254, 256-258, 262-263  
 » πνευματικό, 243-244  
 » του εδαφικού νερού, 243-244  
 » ωσμωτικό, 243-244  
 Εδαφικά σωματίδια, 237, 240, 256, 258  
 εδαφική υφή, 238  
 εδαφικό προφίλ, 235, 240, 261-262, 264  
 έδαφος ακόρεστο, 244-245, 249  
 » ανισότροπο, 245  
 » κορεσμένο, 244-245, 249  
 » πορώδες, 240, 242, 245-246, 249-250, 254, 257  
 εδάφους κορεσμός, 249  
 ειδική βαρύτητα, 12  
 » ενέργεια, 132-134, 137  
 » παροχή, 135  
 ειδικό βάρος, 11, 19  
 εκτοξευτήρες, 446, 448, 451, 457, 463  
 εκχειλιστές, 138, 143, 145-151  
 » ευρείας στέψης, 143, 150  
 » καθολικοί, 143  
 » λεπτής στέψης, 143  
 » μερικοί, 143  
 » ορθογωνικοί χωρίς πλευρική συστολή, 146  
 » ορθογωνικοί με πλευρική συστολή, 147  
 » τύπου Cipoletti, 150, 164  
 » τριγωνικοί, 148, 163  
 » τραπεζοειδείς, 149  
 ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία, 285  
 ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο μείωσης της υγρασίας, 361, 372  
 εναλλασσόμενα βάθη, 134, 137  
 ενέργειας απώλεια, 88  
 ενέργεια δυναμική, 83  
 » κινητική, 83  
 » ολική, 83-84, 106, 120  
 » πίεσης, 83  
 εξάτμιση, 279-282, 288, 293, 298, 302, 311, 315, 327, 328  
 » δυναμική, 281  
 εξατμισήμετρο, 310-311, 313  
 » Colorado Sunken pan, 311  
 » λεκάνης Τύπου Α, 311-312, 315  
 εξατμισοδιαπνοή, 279-282, 294-302, 304-307, 309-311, 313, 327, 348  
 » αναφοράς, 300, 304  
 » δυναμική, 281, 301  
 » καλλιέργειας, 281, 300, 327  
 » της καλλιέργειας αναφοράς, 281, 300

- εξίσωση Bernoulli, 83
- » Chezy, 128
  - » Colebrook-White, 178
  - » Darcy-Weisbach, 175
  - » Hazen-Williams, 182-183, 192, 216, 224, 229, 231, 453, 479, 500, 503, 506
  - » Manning, 128
  - » ενέργειας, 87, 169
  - » ποσότητας κίνησης 96-97, 100, 102, 112
  - » συνέχειας, 81-82, 94, 98
- επιτάχυνση βαρύτητας, 10
- επιφανειακή απορροή, 353, 361, 381
- » τάση, 14, 17
- επιφανειακό έδαφος, 235-236
- εύρος άρδευσης, 381, 383, 496
- Ζώνη κορεσμένη, 264**
- » μεταβατική, 264
  - » μεταφοράς, 264
  - » του ριζοστρώματος, 353-356, 360-361, 365, 367, 370, 372-373, 379, 381-382, 386
  - » ύγρانشς, 264
- Ηλιακή ακτινοβολία, 282, 288-290, 302, 306, 309, 315**
- » ακτινοβολία προσπίπτουσα, 289
- Θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου, 285**
- » υγρού θερμομέτρου, 285
- θερμότητα αισθητή, 293**
- » λανθάνουσα, 284, 293, 310
- θυρίδες, 139, 140**
- Ικανότητα διήθησης, 265**
- ιλύς, 238**
- ιξώδες, 12**
- ισοδύναμο ύψος νερού, 251-252, 260**
- Καθαρές σε νερό άρδευσης ανάγκες της καλλιέργειας, 354-355**
- καθαρό ύψος νερού άρδευσης, 381-383, 386**
- καλλιέργεια αναφοράς, 300-303, 308**
- καμπύλη απορρόφησης, 250**
- » εκρόφησης, 250
  - » ελευθέρωσης, 250
- καμπύλη προσρόφησης, 250**
- » συγκράτησης, 250
  - » χαρακτηριστική της εδαφικής υγρασίας, 250, 254
- κανονική παροχή, 129**
- κανονικό βάθος, 129**
- κέντρο πίεσης, 44**
- κινηματικό ιξώδες, 8, 13, 22**
- κλίση εδάφους, 125**
- » της γραμμής ενέργειας, 171
  - » της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών-θερμοκρασίας αέρα, 286
  - » του ηλίου, 288, 290
- κολλοειδή, 511**
- κρίσιμη ροή, 127, 132, 134-135, 151, 157, 161-162, 165**
- κρίσιμο βάθος, 134-135, 151, 155, 161**
- Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, 284**
- λυσίμετρα αναπλήρωσης με σταθερή επιφανειακή στάθμη, 299**
- » αναρρόφησης, 299
  - » ελεύθερης στράγγισης, 299
  - » ισοσταθμιστικά ή σταθερής υπόγειας στάθμης, 299
  - » μη ζυγιστικά, 299
  - » στραγγιστικά ή ογκομετρικά, 299
- Μανόμετρα, 36, 40-42, 515**
- » διαφορικά, 40, 57
  - » τύπου U, 38
- μανομετρικό ύψος, 205**
- μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία, 285**
- μέθοδος ASCE-standardized Penman-Monteith, 303, 307-308, 310, 315**
- » Blaney-Criddle κατά SCS, 303, 305, 315
  - » FAO-56 Penman-Monteith, 303, 307-308, 313-315, 339-340, 345, 347-348
  - » FAO-56 Penman-Monteith με ελλιπή δεδομένα, 303, 308
  - » Hargreaves-Samani, 303, 309, 315
  - » Priestley-Taylor, 303, 310
  - » απλού φρεατίου, 247
  - » διαδοχικών δειγματοληψιών, 294

- μέθοδος διάχυσης νετρονίων, 254
- » εισόδου-εξόδου, 268, 271
  - » μικροκυμάτων, 254
  - » της γ-ακτινοβολίας, 254
  - » της ηλεκτρικής αντίστασης, 254-255
  - » της θερμικής αγωγιμότητας, 254
  - » της τράπεζας πίεσης, 254-255
  - » του διπλού ψυχομέτρου, 254
  - » του Εξαμισήμετρου, 303, 310
  - » του τενσιόμετρου, 254-255
  - » του φίλτρου χάρτου, 254
  - » τροποποιημένη Penman κατά FAO-24, 303, 305-306
  - » των λυσίμετρων, 294, 298, 300
  - » υδατικού ισοζυγίου, 294
  - » υδροπερατόμετρου πτώσης στάθμης ή μεταβαλλόμενου φορτίου, 246
  - » υδροπερατόμετρου σταθερού φορτίου, 246
- μεμβράνη πίεσης, 260, 263
- μέση ημερήσια θερμοκρασία, 285
- μετατόπιση του μηδενικού επιπέδου, 287
- μετατροπείας πίεσης, 43, 256
- μέτρηση υδροστατικών πιέσεων, 36
- μετρητής Venturi, 210, 226-227
- » πίεσης Bourdon, 42
- μέτωπο υγρό ή μέτωπο προσπέλασης, 264
- μηδενικό επίπεδο, 287
- μηνιάια αναγκαία κατανάλωση, 304
- μηχανική ανάλυση, 238, 248
- μικροφύκη, 511-512
- μονάδα ελέγχου, 487, 507, 511, 515
- μύζηση, 249
- μυλίσκος, 152-154
- Νερό βαρύτητας ή ελεύθερο νερό, 249
- » τριχοειδές, 249
  - » υγροσκοπικό, 249
- Νευτώνεια ρευστά, 5, 23
- νόμος διατήρησης ποσότητας κίνησης, 94
- » διατήρησης της μάζας, 81
  - » ιξώδους του Νεύτωνα, 5
- Ογκομετρική παροχή, 79, 111
- ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες της καλλιέργειας, 355
- ολική ενέργεια, 120, 132
- ολικό δυναμικό του εδαφικού νερού, 243
- » ύψος νερού άρδευσης, 381- 383
- ομοιόμορφη ροή, 78, 123
- ομοιομορφία κατανομής, 448, 450-451
- οπή, 79, 89-90, 92-93, 105-106, 114-115
- οργανικά εδάφη, 236, 252
- » υλικά, 512
- ορθογωνικοί εκχειλιστές με πλευρική συστολή, 147
- ορθογωνικοί εκχειλιστές χωρίς πλευρική συστολή, 146
- ορίζοντες ή εδαφικές στρώσεις, 235
- ορυκτά εδάφη, 236, 241-242
- Παράδοξο του Pascal, 52
- παροχή, 79
- πεδοσυναρτήσεις, 248
- περιβρεχόμενη περίμετρος, 125
- περιεχόμενο κατ' όγκο νερό ή ογκομετρική εδαφική υγρασία, 251-252, 255
- » κατά βάρος νερό ή βαρυμετρική εδαφική υγρασία, 251, 255
- περιοριστές πίεσης, 507, 517
- περιστροφικού τύπου βραδείας περιστροφής, 446
- πηλώδη ή μέσα εδάφη, 238
- πιεζομετρική γραμμή, 120, 123
- πιεζομετρικό ύψος, 34, 84, 170, 177
- » φορτίο, 84, 170, 177-178
- πιεζόμετρο, 37
- πίεση, 29-45, 47, 50, 52, 54, 57, 61-62, 65, 69, 71-72
- » κορεσμού των υδρατμών, 283, 285-286, 306-307, 315
  - » οργάνου, 34, 36-37
- πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, 281
- » πίεση των υδρατμών, 286, 315
  - » ταχύτητα, 246
- προγραμματισμός αρδεύσεων, 386
- προγραμματιστής δικτύου, 516
- προθέματα μονάδων, 9
- πρόσθετη ποσότητα νερού, 366
- πυκνότητα, 11, 19
- » πραγματική, 240-242, 260

πυκνότητα, σχετική, 12, 18, 107

- » φαινομένη, 240-242, 252, 255, 260

**Ρευστό, 3**

ρητές σχέσεις, 186

- » σχέσεις υπολογισμού του  $f$ , 186, 190

ριζόστρωμα, 353, 356, 373, 381, 386

ροή ανομοιόμορφη, 78, 82

- » ασταθής, 77
  - » μεταβατική, 75
  - » μη μόνιμη, 77
  - » μόνιμη, 77
  - » ομοιόμορφη, 78
  - » σταθερή, 77-78, 84, 86-87, 93-96, 99, 103, 114
  - » στρωτή, 75, 96
  - » τυρβώδης, 75-77, 96
  - » υποκρίσιμη ή ποτάμια, 134
- ρυθμός εφαρμογής, 449, 451
- » γωνιακής παραμόρφωσης, 5

**Σημείο δρόσου, 284**

- » μόνιμης μάρανσης, 261, 263, 372, 379, 383

σιφώνιο, 109, 172-173, 218, 229

στάδιο μέσης περιόδου, 329, 345

- » ταχείας ανάπτυξης, 328, 345
- » τελικό, 330, 345

σταθερή ροή, 77

σταλακτήρες, 487, 489-492, 495-496, 498, 508, 522

- » αυτοκαθαριζόμενοι, 490
- » αυτορυθμιζόμενοι, 490, 495, 498
- » με επιστόμιο ή οπή, 490
- » με μακρύ διάδρομο ροής, 490
- » με μεταβατική ροή, 490
- » με στρωτή ροή, 490
- » με τυρβώδη ροή, 490
- » μη αυτοκαθαριζόμενοι, 490
- » πολλαπλών εξόδων, 492

στάσιμο σημείο, 207

στατική πίεση, 172, 208

στέψη, 143, 145-146, 151

στρωτή ροή, 75

συνεκτικά εδάφη, 238, 240, 242, 256, 258, 261

συνεκτικότητα, 12

συνεσταλμένη διατομή, 90

συντελεστής Manning, 129

- » απόλυτου ή δυναμικού ιξώδους, 4
- » έκπλυσης, 355, 365-367, 370
- » ομοιομορφίας, 450-451
- » παροχής, 91-93, 114-115
- » συστολής, 90
- » ταχύτητας, 91
- » υδραυλικής αγωγιμότητας, 245
- » ωφελιμότητας, 372, 375, 380, 382, 386

συστήματα καταιονισμού ημιμόνιμα, 446, 448, 458

- » καταιονισμού μεταφερόμενα, 446, 448, 458
- » καταιονισμού μόνιμα, 446
- » μονάδων, 7-8

σχετική απόσταση γης-ηλίου, 288-289

- » πίεση, 34, 36-37, 65, 72
- » πυκνότητα, 12, 19, 22, 55-56
- » υγρασία, 286

σωλήνας Pitot, 207

**Τάση επιφανειακή, 249**

ταχυσύνδεσμοι, 448

ταχύτητα διήθησης, 265, 271

- » του ανέμου, 282, 287, 302, 313, 327, 344-345, 448, 451
- » ροής, 80

τενσιόμετρο, 256

τραπεζοειδείς εκχειλιστές, 149

τραχύτητα αγωγών, 179

τριγωνικοί εκχειλιστές, 148

τριχοειδής ανύψωση, 14, 17, 353-354, 370, 386

τροχιά μορίου, 78

τύπος του Torricelli, 91

- » υψής του εδάφους, 238, 250

τυρβώδη, 236

**Υγρασία ελάχιστη επιτρεπόμενη, 372, 381, 383, 386**

υγρασία ωφέλιμη ή ευχερώς διαθέσιμη, 361, 372, 379

υδατοϊκανότητα, 261-263, 353, 361, 372-373, 379-382, 386

- υδραυλική αγωγιμότητα ακόρεστη, 245
- υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμένη, 245, 265, 268
- υδραυλική ακτίνα, 125, 127-128, 135, 158, 159, 160, 162, 165
- υδραυλικό άλμα, 135, 136
- υδραυλικό βάθος, 127, 158, 161, 165
  - » ύψος, 244
  - » πλήγμα, 119
- υδροκυκλώνες, 512
- υδρολιπαντήρες, 507, 513, 515
- υδρομετρητές, 515
- υδροπερατόμετρο Guelph σταθερού φορτίου, 246
- υδροπερατόμετρο ταχύτητας ή μεταβαλλόμενου φορτίου, 246
- υδροπερατότητα ή συντελεστής Darcy, 245
- υδροστατική, 29-30
  - » πίεση, 30
- υδροστατικό παράδοξο, 52-53
- υπέδαφος, 235
- υπερκρίσιμη ροή, 127, 134, 136-137, 151, 155, 161, 165
- υποκρίσιμη ροή, 127, 134, 162
- υπολογισμός απώλειας φορτίου, 185
- υπολογισμός διαμέτρου, 185, 189
  - » παροχής, 185, 187
  - » του  $f$ , 175, 185-187, 190
- υστέρηση, 250
- υφή του εδάφους, 237-238, 240, 261-264
- υψηλή πίεση, 446
- ύψος
  - θέσης, 34, 84, 170, 244
  - » πιεζομετρικό, 84
  - » πίεσης, 34, 37, 54, 84-85, 120, 141, 170, 244
  - » ταχύτητας, 84-86, 91, 103, 170
- Φαινομένη ταχύτητα του Darcy, 245
- φίλτρα, 487, 507, 511-512, 515
  - » σίτας, 512
  - » χαλίκων ή άμμου, 512
- φορτίου απώλεια, 88
- φορτίο θέσης, 34, 84, 170
  - » πιεζομετρικό, 84, 103, 111, 115
  - » πίεσης, 34, 84, 170
  - » ταχύτητας, 84, 170
- φυτικοί συντελεστές, 301, 304, 327, 329, 340, 347
- Χαλίκια, 237
- χαμηλή πίεση, 446
- χειμαρρώδης ροή, 134
- χουμώδη, 236
- Ψυχρή εποχή, 302-303, 332, 342
- ψυχομετρική σταθερά, 284, 315, 284,
- Blaise Pascal, 30
- Christiansen, 450, 456
- Darcy-Weisbach συντελεστής τριβών, 175
- Parshall μετρητής παροχής, 155